

Friedrich Herrmann und Georg Job

## **Altlasen der Physik Gesamtbund**

Januar 2020

*Konzept und Redaktion:*  
Heiner Schwarze

*Mit Beiträgen von:*  
Peter Würfel, Ralph von Baltz, Peter Schmälzle, Holger Hauptmann, Michael Pohlig und Heiner Schwarze

Alle Rechte vorbehalten. Die Vervielfältigung der Texte und Bilder ist ohne Zustimmung der Autoren nicht gestattet.

*Autoren der einzelnen Artikel:*

*F. Herrmann:* 1.1 bis 1.32, 2.2 bis 2.7, 3.1 bis 3.34, 4.1 bis 4.15, 5.2 bis 5.4, 5.6 bis 5.13, 5.16, 5.18, 5.20 bis 5.25, 5.27  
5.35 bis 5.38, 5.40, 5.42 bis 5.47, 6.1 bis 6.29, 7.1 bis 7.5, 8.1 bis 8.16, 9.1 bis 9.6, 10.1 bis 10.4, 11.1 bis 11.13, 12.1, 12.6  
bis 12.10

*G. Job:* 2.1, 5.1, 5.5, 5.14 und 5.15, 5.17, 5.19, 5.26, 5.39, 5.41, 12.2 bis 12.5,

*P. Würfel:* 5.34, 9.1, 9.2, 9.3

*H. Hauptmann* 7.3

*M. Pohlig* 9.4

*R. von Baltz* 9.4

*P. Schmälzle* 3.24

*H. Schwarze* 9.6

## Vorwort 2020

Die Altlasten der Physik gibt es seit 1994. Die Artikel erschienen monatlich zunächst in verschiedenen Zeitschriften (MNU, Physik in der Schule, Praxis der Naturwissenschaften); dann seit 2013 im Internet. Da bei den über 200 Einzelbeiträgen unsere Website immer unübersichtlicher wurde, haben wir die bisher vorliegenden Artikel zu einem E-Book mit neuem Layout zusammengefasst.

## Vorwort 2002

Die Naturwissenschaft ist in ständigem Wachstum begriffen. In gewissen Zügen ähnelt ihre Entwicklung der biologischer Systeme. Jeder Mensch, der Naturwissenschaften lernt und lehrt, nimmt Fakten auf und gibt sie mutiert weiter. Mutiert deshalb,

- weil die Weitergabe nicht immer störungsfrei gelingt,
- weil sich die Gewichtung mit der Zeit verschiebt,
- weil die Forschung laufend neue Erkenntnisse einbringt.

Der Zwang, sich in der Anwendung zu bewähren, sorgt dafür, dass Fehler ausgemerzt, unnötige Bildungen abgebaut und arbeitssparende Ansätze begünstigt werden.

Längst ist das naturwissenschaftliche Wissen so angeschwollen, dass es sich nur noch arbeitsteilig bewältigen lässt. Ein Forscher oder Anwender kennt meist nur einen kleinen Ausschnitt genau und den Rest nur im groben Überblick. Wer Grundwissen vermittelt, hat kaum noch Gelegenheit, dessen Aktualität zu prüfen und aufzubessern. Das Grundwissen unterliegt daher nicht mehr demselben strengen Auslesedruck. Was neu hinzukommt, wird dem bisherigen Bestand angegliedert, meist ohne den alten Kern anzutasten, eine Erscheinung, die in der Evolutionstheorie als Prolongation bezeichnet wird. Jede Umgestaltung bedeutet einen zusätzlichen Aufwand, den zu erbringen die Hemmung immer stärker, der Antrieb immer schwächer wird. Je komplizierter ein System bereits ist, desto konservativer wird es.

Eine Folge hiervon ist es, dass sich an dem, was als Grundwissen einer Naturwissenschaft gilt, ihr geschichtlicher Werdegang widerspiegelt. Jeder Lernende vollzieht in gewissem Umfang die historische Entwicklung nach. Der Lernprozess des Einzelnen läuft, oft bis in Details, nach einem ähnlichen Muster ab wie der Entwicklungsprozess der ganzen Naturwissenschaft. Dies erinnert an E. Haeckels biogenetische Grundregel, der zufolge die Einzelentwicklung eines Lebewesens die kurze Wiederholung seiner Stammesgeschichte ist. So können Umwege beibehalten und Bildungen, die sich im größeren Zusammenhang als überflüssig oder gar

nachteilig erweisen, zäh bewahrt werden. Alte Durchgangsstadien konnten – als lebende Fossilien – bis heute überdauern, ja offenkundige Fehler können Jahrzehnte überleben, weil die Rückmeldung in der Nachrichtenflut zu unwirksam geworden ist. Es erfordert besondere Aufmerksamkeit, solche Altlasten zu erkennen, und noch größere Anstrengungen, sich ihrer zu entledigen. Langjährige Gewöhnung verschleiert den Blick, vordergründige Vorteile und die feste Einbindung in eine gewachsene Struktur lähmen die Bereitschaft, etwas zu ändern. Wir wollen in einer Reihe kurzer Beiträge auf solche Altlasten aufmerksam machen.

Es gibt Altlasten sehr unterschiedlicher Natur: größere und kleinere, sehr alte und solche, die gerade erst entstanden sind. Es gibt Altlasten, die nur in einer ungeschickt gewählten Bezeichnung bestehen und andere, die sich auf die Grundkonzepte unseres naturwissenschaftlichen Weltbildes beziehen. Manche Themen sind dadurch zur Altlast geworden, dass sich unsere Auffassungen über die Grundlagen der Physik geändert haben, andere nur dadurch, dass sich die Möglichkeiten der experimentellen Technik gewandelt haben.

Wir werden allen Beiträgen denselben Aufbau geben. Zunächst wird der Gegenstand der Betrachtung vorgestellt. Dann wird analysiert, welche Mängel die herkömmliche Darstellung hat. Wenn möglich, wird etwas zur Herkunft oder Entstehung der Altlast gesagt, und schließlich wird vorgeschlagen, wie die Entsorgung geschehen kann.

Durch manche Artikel werden wir die übliche Lehrmeinung erheblich infrage stellen. Sicher würde mancher Leser das eine oder andere der Themen, das wir als Altlast vorstellen, nicht als solche einstufen. Es ist gewiss auch eine Frage des Ermessens, der Erwartung über die künftige Entwicklung und des Rahmens, in den ein Thema gestellt wird, ob ein bestimmter Lehrinhalt als überflüssig oder ungeschickt dargestellt eingestuft wird. Wir erwarten nicht, dass jeder Leser genauso urteilt wie wir. Schon wegen der angestrebten Kürze der Beiträge wird unsere Argumentation nicht für jeden in allen Punkten überzeugend sein können. Uns wäre aber daran gelegen, eine Diskussion über die Angemessenheit der üblichen Lehrinhalte in Gang zu setzen. Und wir würden gern möglichst viele dazu anregen, selbst nach Altlasten zu suchen.

## Vorwort 2012

Manches, was wir geschrieben haben, mag den Eindruck der Rechthaberei erwecken. Wird dem Leser nicht mit Häme seine Unwissenheit und seine Inkompetenz vor Augen geführt? Fühlt er sich vielleicht verspottet? Dass das passieren kann, war uns klar. Aber das

war unvermeidlich, wenn man sich mal für die Glosse als journalistischem Genre entschieden hatte – und das hatten wir. Die Artikel sollten sich gut lesen.

Wir möchten einen Versuch machen, uns mit den sich verspottet fühlenden Lesern zu versöhnen. Alle Fehler und Unstimmigkeiten, die wir anprangern, beruhen auf Fehlurteilen oder Missverständnissen, die wir an uns selbst entdeckt hatten: einen Irrtum, dem man aufgesessen war; etwas, von dem man sich eingeredet hatte, man hätte es verstanden, es aber gar nicht hatte; oder auch einfach die Entdeckung, dass es auch kürzer und klarer geht.

Und das ist es schließlich, was bei der Suche und beim Schreiben von Altlasten so viel Spaß macht: entdecken, dass man selbst jahre- oder jahrzehntelang etwas falsch Verstandenes mit sich herumgetragen hat. Wir können nur jedem empfehlen, sich dem Unternehmen anzuschließen.

Es geht bei der Diskussion physikalischer Themen durchaus nicht immer nur um wissenschaftliche Wahrheit und Klarheit. Unstimmigkeiten kommen nicht nur aus Unbedachtheit in ein Buch, sondern auch dadurch, dass man etwas nicht wahrhaben will. Das Lieb gewonnene hat es leichter zu überleben, als das Korrekte sich durchzusetzen. Der Konsens über Inhalte und Methoden der Lehre verschafft ein Gefühl der Behaglichkeit (um es mit Nietzsche auszudrücken).

Konsens drückt sich aus in Konventionen, Normen, Gesetzen oder Spielregeln. Konsens ist notwendig für die Stabilität eines Systems. Normen und Gesetze schaffen nicht nur ein Gefühl der Sicherheit. Man braucht sie für die gegenseitige Verständigung. Ihr Fehlen führt zu Anarchie. Andererseits bewirken zu viel Normen Lähmung und Stagnation. (Die zu freie frühkapitalistische Wirtschaftsordnung hat zu Ungerechtigkeit und zu Konflikten geführt, die sozialistische Planwirtschaft hat Entwicklung und Fortschritt paralysiert.)

Einmal bemerkte ein Kollege, der übrigens unsere Altlasteinstufungen durchaus für gerechtfertigt hielt, dass er doch an der klassischen Physik nicht zu viel geändert sehen möchte, denn diese stelle ja eine Art historisches Monument dar, ähnlich einer gotischen Kathedrale, die man schließlich auch nicht gern mit einer Stahl- und Glasfassade versehen möchte.

Völlig einverstanden: Auch das Pflegen der Bausubstanz der Kathedrale „Naturwissenschaft“ ist wünschenswert. Dafür haben wir allerdings unsere Wissenschaftshistoriker. Die Naturwissenschaft, mit der wir heute arbeiten und unsere heutigen Probleme lösen, sollte nicht die Naturwissenschaft des 18. oder 19. Jahrhunderts sein. Und im Unterricht wollen wir durchaus auch die Geschichte der Naturwissenschaft ansprechen,

so wie im Kunstunterricht die Kunstgeschichte behandelt wird. Aber wir wollen sie deutlich trennen von einer Darstellung der Physik, die auf einer zeitgemäßen Perspektive beruht.

Wenn man eine Änderung vorschlägt, wird einem oft entgegengehalten, das gehe nicht, denn was sollen die Schüler denn machen, wenn sie mal an die Universität kommen, und es dort anders gemacht wird, oder wenn der Student die Universität wechselt, und es an der neuen Universität anders gemacht wird, oder wenn der Schüler oder Student ein „normales“ Buch lesen will, in dem es anders gemacht wird. Das Argument ist also: Es geht gar nicht anders, denn alle machen es ja so.

Der Einwand hört sich plausibel an, trifft aber nicht zu. Wir muten den Schülern und Studenten ohnehin viele Paradigmenwechsel zu, ohne uns dessen bewusst zu sein.

Beim Rückblick auf die nach und nach erschienenen Artikel beobachtet man etwas, das uns am Anfang durchaus nicht ganz klar war. Für die Unstimmigkeiten gibt es eine recht kleine Liste von Ursachen. Eine ganze Reihe von Altlasten haben eine bestimmte, gleiche Ursache, und andere haben eine andere gemeinsame Ursache. Man könnte also, wenn man Abhilfe schaffen will, gleich an diese wenigen Ursachen gehen. Wir wollen einige dieser dominanten Ursachen nennen.

Mehr als 25 der Altlasten sind dadurch entstanden, dass man der Benutzung einer bestimmten physikalischen Größe aus dem Weg geht. Allein 16 haben ihre Ursache darin, dass man die Entropie nicht benutzt, wo es angebracht wäre. Bei einigen anderen ist es das fehlende chemische Potenzial, bei wieder anderen ist der Nichtgebrauch der magnetischen Ladung der Auslöser der Unstimmigkeiten. Aber auch das Nichtverwenden des Impulses führt an etlichen Stellen zu Schwierigkeiten.

Eine andere Gruppe von Altlasten hat damit zu tun, dass man sich nicht von den Fernwirkungsvorstellungen des 17. Jahrhunderts trennen mag. Hierzu gehört die Formulierung des einfachen Impulserhaltungssatzes in Form der verwickelten Newton'schen Axiome, die Verwendung des Begriffs Arbeit zur Beschreibung eines Energietransports und die Formulierung der Regel über Anziehung und Abstoßung von elektrisch geladenen Körpern und Magneten.

Wieder andere Altlasten sind der Dominanz der Kinetik im Lehrgebäude der Physik zuzuschreiben: Unstimmigkeiten bei der Behandlung von Schwingungen oder die Schwerfälligkeit der Darstellung der Rotationsmechanik.

Mehrere Altlasten haben damit zu tun, dass physikalische Größe und physikalisches System verwechselt

werden: die Strahlung mit der Energie, das Photon mit einer Energieportion, die Ladung mit dem Elektron, das (nicht existierende) magnetisch geladene Teilchen mit der magnetischen Ladung, das elektrische Feld mit der Feldstärke.

Schließlich noch eine Altlastenkategorie, die speziell mit der Lehre zu tun hat: Man stellt etwas als Erklärung eines Phänomens oder Gerätes vor, was keine ist. Man schreibt den Schülern oder Studenten vor, wann sie gefälligst einen Sachverhalt als verstanden zu betrachten haben. So hat man die Funktionsweise der elektrochemischen Zelle „verstanden“, wenn man weiß, welche Reaktionen in ihr ablaufen. Man hat verstanden, warum ein Flugzeug fliegt, wenn man weiß, wie sich der Bernoulli-Effekt auswirkt. Man hat den Kühlschrank verstanden, wenn man weiß, dass im Innern etwas verdampft und außen wieder kondensiert.

Interessant ist auch eine besondere Kategorie von Altlasten: die, die gerade im Entstehen sind. Ein Stück brandneuer Wissenschaft erzeugt bereits seine Lehraltlasten. Man kann daraus lernen, dass das Aufräumen des physikalischen Lehrgebäudes nicht etwa eine einmalige Angelegenheit ist. Es ist eher wie das Putzen des Hauses, es muss regelmäßig, ja eigentlich ständig gemacht werden.

Wir machen daher erst mal weiter, und wir werden nicht müde, unsere Kolleginnen und Kollegen zu ermuntern, sich an der weiteren Suche und Elimination von Altlasten zu beteiligen.

# INHALT

## 1 Allgemeine Themen

1.1 Die letzten Geheimnisse der Natur	7
1.2 Das Ich, der Beobachter und der liebe Gott	8
1.3 Herleitung und Verständnis	10
1.4 Gibt es physikalische Größen in der Natur?	12
1.5 Physikgeschichte im Physikunterricht	13
1.6 Wie stellt man es her? Wie weist man es nach?	
1.7 Das Kausalitätsprinzip in der Physik	14
1.8 Die exakte Fachsprache	15
1.9 Verschleiernde Sprache	16
1.10 Sprachlicher Wildwuchs	17
1.11 Namen physikalischer Größen in Zusammensetzungen	18
1.12 Originalformulierungen	19
1.13 Wenn auf die Ladung der Masse eine Kraft wirkt, ändert sich ihr Impuls	21
1.14 Umwandlungen	23
1.15 Breitband-Internetzugang	24
1.16 Wozu Physikdidaktik?	25
1.17 Physikbuchautorinnen	26
1.18 Mechanik versus Wärmelehre	27
1.19 Direkte und indirekte Messung	28
1.20 Einheit – Gleichheit – Vielfachheit	29
1.21 Zur Messgenauigkeit	30
1.22 Erhaltungssätze	31
1.23 Abgeschlossene Systeme	32
1.24 Teilchen überall	33
1.25 Wechselwirkung	34
1.26 Quarzuhr und Geigerzähler	36
1.27 Fernwirkungen	37
1.28 Die zwei Wirkungen von Kräften und die drei Wirkungen von elektrischen Strömen	38
1.29 Lineare Kennlinien	39
1.30 Kraftfelder	40
1.31 Ersatzwiderstände	42
1.32 Masse und Materie	42

## 2 Energie

2.1 Energieformen
2.2 Die Leistung
2.3 Der Energieerhaltungssatz
2.4 Wo ist die Energie?
2.5 Frei werdende Energie

7	2.6 Das Perpetuum mobile und der Energieerhaltungssatz	49
	2.7 Reine Energie	50
<b>3</b>	<b>Mechanik</b>	<b>52</b>
12	3.1 Die Newton'schen Gesetze	52
13	3.2 Kräftegleichgewicht und drittes Newton'sches Gesetz	52
14	3.3 Das dritte Newton'sche Gesetz	53
15	3.4 Das dritte Newton'sche Gesetz (zum dritten Mal)	54
16	3.5 Tauziehen	56
17	3.6 Die Kraft in der Tischplatte	58
18	3.7 Das Überlagerungsprinzip	59
19	3.8 Der Impuls als Produkt aus Masse und Geschwindigkeit	61
21	3.9 Impuls und Stoß	62
23	3.10 Die Geringschätzung des Impulses	63
24	3.11 Die Richtung von Impulsströmen	64
25	3.12 Impulsströme in ruhenden Impulsleitern	66
26	3.13 Impulsstromrichtung und Bezugssystemwechsel	68
27	3.14 Der Kraftstoß	70
28	3.15 Die Definition der Kraft	71
29	3.16 Eine Anschauung von der Kraft	72
30	3.17 Kraft und Energie	73
31	3.18 Angriffspunkt und Wirkungslinie	74
32	3.19 Druck und Kraft	75
33	3.20 Die Umlenkrolle	76
34	3.21 Momentan- und Durchschnittsgeschwindigkeit	77
35	3.22 Die Beschleunigung	78
36	3.23 Die wirkende Beschleunigung	79
37	3.24 Der Bewegungszustand	80
38	3.25 Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit	81
39	3.26 Bewegungskonstanten	83
40	3.27 Der Punkt in der Mechanik	84
41	3.28 Haftriebung	85
42	3.29 Kraftübertragung, Drehmoment übertragung und Leistungsübertragung	86
43	3.30 Potenzielle Energie	87
44	3.31 Der Drehimpulserhaltungssatz	88
45	3.32 Der Staudruck	90
46	3.33 Warum das Flugzeug fliegt	90
47	3.34 Die fallende Katze	92

## 4 Relativistische Physik

4.1	Die Bezeichnung Relativitätstheorie	95
4.2	Die Postulate der Relativitätstheorie	96
4.3	Inertialsystem und Trägheitsgesetz	96
4.4	Die Schreibweise der Gleichung $E = mc^2$	99
4.5	Masse, Ruhmasse, invariante Masse, relativistische Masse, Energie, Ruhenergie und innere Energie	100
4.6	Lichtgeschwindigkeit oder Grenzgeschwindigkeit	101
4.7	Relativitätstheorie und Bezugssystemwechsel	101
4.8	Dilatation, Kontraktion, Expansion	102
4.9	Bewegung in der Raumzeit	104
4.10	Die Relativität der Gleichzeitigkeit	105
4.11	Geschwindigkeitsaddition	106
4.12	GPS-Korrektur und ART	106
4.13	Der Äther und das Vakuum	107
4.14	Das Michelson-Morley-Experiment	108
4.15	Der absolute Raum	109

## 5 Thermodynamik

5.1	Entropie	111
5.2	Der Entropiesatz	112
5.3	Die Messung der Entropie	115
5.4	Noch einmal: die Messung der Entropie	115
5.5	Der dritte Hauptsatz	117
5.6	Der nullte Hauptsatz	117
5.7	Die Entropie als Irreversibilitätsmaß	117
5.8	Die Entropiezunahme beim Mischen von Pfeffer und Salz	118
5.9	Entropie und Leben	119
5.10	Negative Entropie und Negentropie	120
5.11	Mischungsentropie	121
5.12	Keine Temperatur – keine Entropie?	123
5.13	Die Entropie des Universums	124
5.14	Äquivalenz von Wärme und Arbeit	126
5.15	Streben zum Energieminimum	127
5.16	Nutzbare Energie	128
5.17	Voll- und minderwertige Energie	129
5.18	Frei werdende Energie	130
5.19	Carnot'scher Wirkungsgrad	131
5.20	Wirkungsgrad und Carnotfaktor	132
5.21	Der Carnot'sche Kreisprozess	132
5.22	Innere Energie und Wärme	134
5.23	Thermische Energie	135
5.24	Was ist eigentlich Energie? Was ist eigentlich Entropie?	136
5.25	Verdampfungswärme, Verdampfungsenergie, Verdampfungsenthalpie	137

95	5.26 Vorläufige Temperaturskalen	140
	5.27 Die thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper	141
96	5.28 Zustandsgrößen	142
96	5.29 Drei Arten des Wärmetransports	143
99	5.30 Die Namen der Gasgleichung	144
	5.31 Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases und die Ungrößen Entropie und chemisches Potenzial	145
100	5.32 Wärmemenge und Wärmekapazität	147
	5.33 Die Adiabatengleichungen	148
	5.34 Wärmestrahlung	149
	5.35 Temperatur und Wärme bei der Expansion ins Vakuum	151
104	5.36 Dampfmaschinen	152
105	5.37 Sieden und verdunsten	153
106	5.38 Kühnen mit flüssigem Stickstoff	154
107	5.39 Seeklima und Wärmekapazität des Wassers	155
108	5.40 Der Wärmetransport durch die Atmosphäre	156
109	5.41 Die Temperaturschichtung der Atmosphäre	158
	5.42 Die barometrische Höhenformel	158
	5.43 Sternschnuppen und Raumkapseln	160
111	5.44 Temperatur und kinetische Energie der Teilchen	162
111	5.45 Die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung	163
112	5.46 Mikroskopisch - makroskopisch	165
115	5.47 Das Teilchenmodell	166
117		
117		
118	<b>6 Elektrodynamik</b>	<b>169</b>
119	6.1 Symmetrien in der Elektrodynamik	169
120	6.2 Elektronenüberschuss – Elektronenmangel	171
121	6.3 Zwei Arten elektrischer Ladung	173
123	6.4 Der Strom und sein Artikel	173
124	6.5 Die konventionelle Stromrichtung	174
126	6.6 Die elektrische Kapazität	175
127	6.7 Magnetpole	176
128	6.8 Die Hysteresiskurve	177
129	6.9 Monopol und magnetische Ladung	178
130	6.10 Das Feld von Dauermagneten	180
131	6.11 Elektromagnete	181
132	6.12 Die Permeabilitätszahl	182
132	6.13 Die Induktivität	185
134	6.14 Das Feld als Raumbereich mit Eigenschaften	186
135	6.15 Äquipotenzialflächen	187
136	6.16 Wo befindet sich das Feld?	189
	6.17 Potenzialfelder und Wirbelfelder	190
137	6.18 Die elektrische Probeladung	191
138	6.19 Mechanische Spannungen im elektrischen und im magnetischen Feld	192

6.20 Geschlossene magnetische Feldlinien	193	9.4 Der fotoelektrische Effekt	238
6.21 Pole einer Spule	195	9.5 Die Planck-Konstante mit LEDs bestimmen	242
6.22 Die Lenz'sche Regel und das Minuszeichen im Induktionsgesetz	197	9.6 Löcher rekombinieren	244
6.23 Zwei Ursachen der Induktion	199		
6.24 Die Induktionsspannung	201	<b>10 Astrophysik</b>	<b>247</b>
6.25 Wirbelströme	203		
6.26 Das Streufeld des Transformators	205	10.1 Das Hertzsprung-Russell-Diagramm	247
6.27 Der Hertz'sche Dipol	207	10.2 Photonen in der Sonne	248
6.28 Zündfunken und elektromagnetische Strahlung	209	10.3 Weiße Zwerge, Teil 1: Druck- oder Kräftegleichgewicht?	250
6.29 Verstärker	209	10.4 Weiße Zwerge, Teil 2: Erklärungsrituale	251
<b>7 Schwingungen und Wellen</b>			
7.1 Resonanzfrequenz und Eigenfrequenz	211	<b>11 Atom-, Kern- und Quantenphysik</b>	<b>253</b>
7.2 Die rücktreibende Kraft	212		
7.3 Phasendifferenzen bei erzwungenen Schwingungen	213	11.1 Bilder des Atoms	253
7.4 Stimmgabel und Resonanzkasten	214	11.2 Das Schalenmodell	253
7.5 Gekoppelte Pendel, gekoppelte Schwingungen und Synchronisation	215	11.3 Das leere Atom	255
<b>8 Optik</b>	<b>217</b>	11.4 Ununterscheidbarkeit von Teilchen	255
8.1 Die Bestandteile des Lichts	217	11.5 Das eine und das andere Elektron	257
8.2 Das Huygens'sche Prinzip	218	11.6 Auswahlregeln, verbotene Übergänge	258
8.3 Beugung am Spalt und Interferenz des Lichts	219	11.7 Der Bahnbegriff in der Quantenphysik	259
8.4 Kohärenz	221	11.8 Aufenthaltswahrscheinlichkeit, Antreffwahrscheinlichkeit, Übergangswahrscheinlichkeit	259
8.5 Unpolarisiertes Licht	223		
8.6 Elektromagnetische Transversalwellen	225	11.9 Zur physikalischen Bedeutung der Psi-Funktion	261
8.7 Strahlenoptik – Wellenoptik	226	11.10 Orbitale	262
8.8 Die Sinusbedingung der Optik	227	11.11 Bindungskräfte	263
8.9 Abbildende und nichtabbildende Optik	228	11.12 Der Massendefekt	264
8.10 Die Strahldichte	229	11.13 Kernreaktionen und Radioaktivität	264
8.11 Sonne und Spektrallampen	230	<b>12 Chemie</b>	<b>266</b>
8.12 Photonen und Phononen	233		
8.13 Der Kondensor	234	12.1 Physikalische und chemische Vorgänge	266
8.14 Einfärbiges Licht	234	12.2 Chemische Energie	267
8.15 Grundfarben und der dreidimensionale Farbraum	235	12.3 Stoffmenge und Teilchenzahl	267
<b>9 Festkörperphysik</b>	<b>236</b>	12.4 Die Avogadro-Konstante	269
9.1 Feld- und Diffusionsstrom	236	12.5 Das chemische Potenzial	270
9.2 Die Halbleiterdiode als Gleichrichter	237	12.6 Der Antrieb von Stoffströmen – Teilchen- zahldichte oder chemisches Potenzial?	271
9.3 Die Halbleiterdiode als Fotoelement	237	12.7 Der Antrieb von Stoffströmen – Stoffströme über Phasengrenzen hinweg	273
		12.8 Chemisches Gleichgewicht	274
		12.9 Elektrochemische Zellen	275
		12.10 Elektrolyten und dotierte Halbleiter	277



# 1 ALLGEMEINE THEMEN

## 1.1 Die letzten Geheimnisse der Natur

### Gegenstand

1 „If physicists could answer these questions, we would finally begin to comprehend how matter functions at its most fundamental level. [...] The technologies being developed today give us hope that by the time another 40 years roll around, we will have finally cracked the essential mystery of how matter, at its most fundamental level, is made.“ [1]

Ähnlich, wenn auch nicht immer so bombastisch formuliert, hört man es auch von anderen Physikern: Irgendwann, in nicht all zu ferner Zukunft, haben wir das Rätsel gelöst, den Code geknackt.

Wenn es von Journalisten dem Normalbürger verständlich gemacht werden soll, kann es sich so anhören:

2 „Mit ihm [dem LHC], so die Hoffnung, lässt sich eventuell die Weltformel entdecken – eine Formel, die erklärt, was die Welt im Innersten zusammenhält.“

3 oder „Auf der Suche nach den letzten Geheimnissen des Weltalls können die Forscher wieder den weltgrößten Teilchenbeschleuniger nutzen.“

### Mängel

Die „fundamentale Ebene“ (fundamental level), das „wesentliche Mysterium“ (essential mystery), das „letzte Geheimnis“ und immer wieder das (abgedroschene) Faust-Zitat – all das ist Ausdruck einer Sehnsucht: Die Welt möge einfach und übersichtlich sein.

Dass Wissenschaftler überzeugt sind und wohl immer waren, bald mit der Arbeit fertig zu sein, äußert sich auch in Bezeichnungen, die sie den Gegenständen und Ergebnissen ihrer Forschung geben: das *Unteilbare* (átomos), das *Elementarteilchen*, das *punktförmige Teilchen* ..., das *Prinzip*, die *first principles*, die *Weltformel*, die *Theory Of Everything* ... Es sind alles Bezeichnungen, die nicht übertroffen werden können, die ein Ende zum Ausdruck bringen. Die Adjektive „elementar“, „fundamental“ und „prinzipiell“ lassen sich nicht steigern; kleiner als punktförmig geht nicht.

Dass solche Äußerungen eher von Teilchenphysikern kommen, bedeutet nicht, dass die darin zum Ausdruck

komende Sicht nicht auch von Festkörper-, Plasma- und sonstigen Physikern und natürlich auch von wissenschaftlichen Laien geteilt wird.

Die Vorstellung ist auch keineswegs neu. In jeder Physikergeneration wurde sie vertreten. Die Aussichten darauf, irgendwann alles Grundlegende verstanden zu haben, waren mal besser und mal schlechter, aber im Großen und Ganzen hat sich nicht viel geändert. Insbesondere gegen Ende des 19. Jahrhunderts sah die Zukunft der Wissenschaft recht rosig aus. Mit der statistischen Thermodynamik und der Maxwell'schen Elektrodynamik, die ja Maxwell selbst als eine im Wesentlichen mechanische Theorie des Äthers verstand, schienen die Aussichten gut, in nicht all zu ferner Zukunft alles physikalische Geschehen auf die Mechanik zurückführen zu können, und diese glaubte man zu beherrschen. Wie weit daneben man mit einer solchen Vorstellung lag, hat Max Planck schon 1924 in einer Gastvorlesung an der Universität München bemerkt [2].

Und heute, d.h. noch einmal 90 Jahre später, haben wir noch mehr Anschauungsmaterial dafür, dass solche Prognosen sich nicht bewahrheiten. Wir wissen es, weil wir gesehen haben, was danach kam. Wir kennen die Zukunft von damals. Die von heute kennen wir allerdings nicht. Und wenn wir aus der Vergangenheit etwas lernen wollen, so sollte es nicht nur die Einsicht sein, dass damals der Schluss, die Physik sei bald abgeschlossen, voreilig war, sondern auch, dass ein solcher Schluss heute, da wir die Zukunft von heute eben nicht kennen, auch sehr leichtsinnig wäre. Etwas pointierter könnte man sagen: Wir könnten aus der Vergangenheit der Naturwissenschaft lernen, dass jedes gelöste Problem mindestens ein neues ungelöstes hervorbringt. Diese Extrapolation ist sicher nicht so unvorsichtig, wie die Erwartung, man hätte bald das Ende erreicht.

### Herkunft

Es mögen verschiedene Ursachen zusammenspielen.

- Eine einfache Erklärung könnte sein: Jeder Mensch braucht etwas, das ihn motiviert, seine Arbeit zu tun. Wenn man einen Berg hinauf steigt, möchte man die Sicherheit haben, dass der Berg eine Spitze hat. Erst

## Das Ich, der Beobachter und der liebe Gott

das Erreichen der Spitze befriedigt uns, belohnt uns für die Mühe.

- Die Erwartung, dass man der Natur endgültig auf die Schliche kommt, ist Ausdruck einer Sehnsucht, der Sehnsucht nach Sicherheit.

Offenbar schützt gute Fachkenntnis nicht vor naiven Erwartungen. Den Glauben, dass es eine endgültige und erschöpfende physikalische Erklärung für alles gibt, kann man nur vergleichen mit dem Glauben an einen allmächtigen Gott, dessen Allmächtigkeit keiner weiteren Erklärung bedarf. Die Frage danach, wie der Gott funktioniert, wird als nicht legitim betrachtet und daher nicht gestellt.

- Schließlich das Marketing. Die Geräte sind teuer. Da muss schon etwas Werbung gemacht werden. Das ist verständlich. Man könnte ja der Meinung sein, dass die Teilchenphysik im Grunde nicht spannender ist als etwa die Chemie im 19. Jahrhundert, als klar wurde, dass die unendliche Vielfalt der Stoffe mithilfe von wenigen Grundstoffen erklärt werden kann. Das war eine großartige Erkenntnis, die allerdings etwas kostengünstiger erreicht wurde.

Die Geräte der Festkörperphysik, der Optoelektronik, etc. sind weniger kostspielig. Und die dazu gehörenden Physiker können uns auch nur einen besseren Speicher für unser Smartphone oder Ähnliches versprechen (was wir dann auch noch selbst bezahlen müssen).

Anders die Teilchenphysik. Sie ist besonders teuer und löst Probleme, die sie selbst erzeugt hat. Endlich wissen wir, woher die Masse kommt, so wird uns gesagt. Da schämt sich der schlichte Bürger fast, dass er das Problem bisher noch nie gehabt hatte.

Man muss den finanziellen Aufwand rechtfertigen und daher verspricht man dem Bürger das Transzendentale. An den lieben Gott glaubt dieser ja nicht mehr so recht; so bekommt er stattdessen die letzten strukturlosen elementaren Teilchen oder die Theory Of Everything.

Dass die Journalisten dabei oft etwas dicker aufzutragen, mag man ihnen nachsehen; sie müssen schließlich ihre Leser bei Laune halten. Eigentlich könnten aber auch sie sich etwas mehr der Aufklärung verpflichtet fühlen.

### Entsorgung

Die Teilchenphysik gehört zu den Bereichen der Physik, an denen Grenzen der bisherigen Physik überschritten werden. Sie ist aufwendig, aber eine Gesellschaft, die im Überfluss lebt wie die unsrige, kann und soll sich die Beschleuniger und Teleskope leisten. Nur bitte: mit einem anderen Paradigma. Jedes gelöste Problem schafft

mindestens ein neues. Ist diese Einsicht so schwer zu ertragen? Ist sie nicht eine viel stärkere Motivation, Physik zu treiben, als die Hoffnung auf ein Ende der Forschung, und zwar auch der Teilchenphysik? Die Freude, die Spitze des Berges erreicht zu haben, würde ohnehin nicht lange währen.

Das mag an Sisyphos erinnern. Aber der Vergleich passt nicht: Sisyphos hat den Stein immer wieder denselben Berg hinauf gerollt. Das entspricht aber nicht den immer wieder neuen Problemen der Naturwissenschaft. Jede neu erreichte Höhe eröffnet eine weitere und schönere Aussicht.

[1] Scientific American, May 2015, S. 34f.

[2] M. Planck, *Vom Relativen zum Absoluten*, Gastvorlesung in der Universität München am 1. Dezember 1924, in „Wege zur Physikalischen Erkenntnis. Reden und Vorträge“, Band 1, S. Hirzel Verlag, Leipzig 1944, S. 142: „Als ich meine physikalischen Studien begann und bei meinem ehrwürdigen Lehrer Philipp v. Jolly wegen der Bedingungen und Aussichten meines Studiums mir Rat erholte, schilderte mir dieser die Physik als eine hochentwickelte, nahezu voll ausgereifte Wissenschaft, die nunmehr, nachdem ihr durch die Entdeckung des Prinzips der Erhaltung der Energie gewissermaßen die Krone aufgesetzt sei, wohl bald ihre endgültige stabile Form angenommen haben würde. Wohl gäbe es vielleicht in einem oder dem anderen Winkel noch ein Stäubchen oder ein Bläschen zu prüfen und einzuordnen, aber das System als Ganzes stehe ziemlich gesichert da, und die theoretische Physik nähere sich merklich demjenigen Grade der Vollendung, wie ihn etwa die Geometrie schon seit Jahrhunderten besitze. Das war vor fünfzig Jahren die Anschauung eines auf der Höhe der Zeit stehenden Physikers.“

## 1.2 Das Ich, der Beobachter und der liebe Gott

### Gegenstand

In der Physik spielt der „Beobachter“ eine wichtige Rolle, ganz anders als etwa in der Chemie oder der Biologie. In Unterhaltungen über physikalische Erscheinungen wird aus dem Beobachter auch oft das „Ich“. „Ich sehe den Meterstab verkürzt“, „für mich ist die Lebensdauer des Myons ...“, „bei einer Fahrt um eine scharfe Kurve werde ich zur Seite gedrückt“.

In der Quantenphysik ist die Rolle des Beobachters noch wichtiger: Er (ja, der Beobachter ist anscheinend immer männlich) ist es, der gern Messungen macht,

## Das Ich, der Beobachter und der liebe Gott

und dadurch das System, an dem er misst, irgendwie stört.

### Mängel

Wir benutzen in der Physik zwei Perspektiven der Welt. Ich möchte sie an einem einfachen Beispiel erläutern, nämlich an der Vorstellung, die wir uns von der Erde machen.

### Die Erde aus der normalen Alltagsperspektive

Man sieht nur einen kleinen Teil, begrenzt durch den Horizont. Außerdem erscheint klein, was weit weg ist; was näher ist, erscheint groß. Ich kann den Kirchturm des Nachbardorfes von meinem Haus aus sehen. Er erscheint mir unter einem Winkel von  $1^\circ$ . Den Kirchturm meines eigenen Dorfes sehe ich unter  $20^\circ$ .

Wenn man diesen Standpunkt in der Physik einnimmt, spricht man von „Beobachtung“; man selbst ist „der Beobachter“.

### Die Erde aus der Perspektive des Wissenden

In unserem Kopf entsteht eine Vorstellung, die ganz anders ist: Die Erde ist eine Kugel; die beiden Kirchtürme sind gleich hoch; sowohl Europäer als auch Australier stehen mit den Füßen auf dem Boden ... Man könnte auch sagen: So sieht der liebe Gott die Erde und wir versuchen, es ihm gleich zu tun. Der liebe Gott braucht keinen bestimmten Beobachtungsstandort; für ihn gibt es keinen Horizont, ja nicht einmal einen bestimmten Beobachtungszeitpunkt. Und wenn er sich ein quantenmechanisches System vorstellt, so stört er es nicht durch eine Messung.

Welche der beiden Perspektiven ist die der Physik? Man könnte vielleicht meinen: Es ist ihr Anliegen, die Welt so zu sehen wie der liebe Gott. Also: nicht durch Horizonte begrenzt; die Symmetrie der realen Welt nicht durch die Willkür von Koordinaten- und anderen Bezugssystemen gebrochen; das Wasserstoffatom nicht durch eine Messung gestört.

Aber so ist die Physik nicht, und so soll sie auch nicht sein. Denn Physiker und Physikerinnen sollen oder wollen ja immer auch das beschreiben, was ein Mensch sieht — ein Mensch, den sie gern Beobachter nennen; ein „ich“ also. Sie müssen ja Aussagen auch darüber machen, wie man ihre Behauptungen prüfen kann. Der Meterstab ist, was er ist, aber die Physik soll uns auch sagen, wie er erscheint. Er sieht aus großer Entfernung kleiner aus, und er sieht auch aus der Nähe kleiner aus, wenn er sich schnell bewegt.

Eine Folge davon ist allerdings, dass die Beschreibung der Welt komplizierter wird als sie es ohne diese

Forderung wäre. Da wir, und auch die Physiker und Physikerinnen, aber Menschen und nicht der liebe Gott sind, ist die Beschreibung der Effekte, die mit der Beobachtung zu tun haben, unerlässlich. Was gibt es also auszusetzen?

Ich glaube, dass der Standpunkt des Beobachters, des Experimentators, des „Ichs“, eine zu große Rolle in unserem physikalischen Diskurs und vor allem in der Lehre spielt.

Ein beträchtlicher Teil der Schwierigkeiten, die jeder mit der speziellen Relativitätstheorie hat, kommt nur davon, dass man die Frage beantwortet, wie jemandem die Länge eines Gegenstandes erscheint oder die Zeitdauer zwischen zwei Ereignissen. Ein beträchtlicher Teil der Unterrichtszeit geht drauf, die Artefakte zu beschreiben, die durch die Wahl und die Wechsel der Bezugssysteme zustande kommen. Eine fatale Konsequenz ist in diesem Fall, dass den Lernenden gar nicht bewusst wird, dass es im selben Kontext, d.h. in der Relativitätstheorie, echte Längenänderungen gibt: etwa der Abstand der Spiegel eines Gravitationswellendetektors.

Ähnlich in der Quantenphysik. Das Wasserstoffatom könnte so einfach sein. Aber man möchte natürlich auch sagen, was ein Beobachter „sieht“ und misst. Und dem Beobachter wird natürlich unterstellt, er möchte wissen, wo genau sich ein Elektron in jedem Augenblick befindet. Also lässt man den Beobachter eine Ortsmessung machen, wobei der schöne, einfache Zustand des ungestörten Atoms zerstört wird.

Und noch ein Beispiel: Materie stürzt in ein schwarzes Loch hinein. Wir, die außen lebenden Menschen und Beobachter „sehen“, dass die Materie, die auf den Horizont zu fällt, immer langsamer und langsamer wird, und den Horizont nie erreicht. Ein gedachter Beobachter, der mit der Materie im freien Fall mitfällt, fliegt durch den Horizont hindurch, ohne etwas von ihm zu merken. Wie passt das zusammen? Es ist nicht viel anders als bei den Kirchtürmen. Wenn du wissen willst, wie die Welt ist, frage nicht danach, was die Beobachter sehen, sondern frage nach der physikalischen Beschreibung des Gegenstandes selbst, — die sagt dir alles. Sie sagt natürlich auch, was die verschiedenen Beobachter sehen und erleben, aber das sind nur Einzelheiten. Sie dienen weniger dem Verständnis der Welt als dem des physikalischen Handwerks.

### Herkunft

Möglicherweise aus der traditionell positivistischen Einstellung der Naturwissenschaft: Man akzeptiert nur das, was gemessen und überprüft werden kann. Das ist eine vernünftige Einstellung. Gewissermaßen ein Hygi-

## Herleitung und Verständnis

eneverhalten, das eine Voraussetzung dafür ist, dass die Naturwissenschaft verbindlichere Aussagen machen kann als manch anderer Wissenschaftsbereich. Es ist aber sicher ebenso vernünftig anzunehmen, dass die Dinge, die Gegenstände unserer Betrachtung, die physikalischen Systeme, auch dann existieren, wenn wir sie nicht beobachten und vermessen.

Wahrscheinlich war es früher sogar noch schlimmer. Die Älteren unter uns werden sich erinnern, dass wir, als wir Studenten waren, nicht nur wissen mussten, was der Beobachter misst, sondern wir mussten auch die Funktionsweise des Messinstruments, des Galvanometers, des Kraftmessers und des Geigerzählers in der Prüfung herleben können.

### Entsorgung

Man geht sparsam um mit dem Begriff Beobachter. Man gibt Beschreibungen den Vorzug, die unabhängig vom Beobachter sind. Das „ich“ kann natürlich, vor allem im mündlichen Vortrag, eine Sache anschaulich machen. Aber eigentlich sollte es in unseren Argumenten nicht vorkommen (es sei denn, man diskutiert den Impuls austausch, etwa zwischen „ich“ und „du“, oder besser, mir und dir).

Besonders in der speziellen Relativitätstheorie lasse man die Lorentz-Transformationen erstmal beiseite, und in der Quantenphysik die Messerei.

## 1.3 Herleitung und Verständnis

### Gegenstand

Bei der Betreuung von Diplom-, Staatsexamens-, Bachelor- und Masterarbeiten habe ich die Beobachtung gemacht, dass die Studierenden gern etwas „herleiten“; als Wissenschaftstheoretiker würde man sagen, sie lieben es zu deduzieren.

Die Tendenz ist auch im Unterricht der Schule ausgeprägt: Eine neu einzuführende Beziehung zwischen physikalischen Größen muss hergeleitet oder aus einem Experiment erschlossen werden.

### Mängel

Es geht mir hier nicht um Wissenschaftstheorie, sondern um etwas Bescheideneres: Wie kommt man am besten zum Verständnis eines Zusammenhangs zwischen physikalischen Größen, oder kurz: zum Verständnis einer Formel?

Es entsteht oft der Eindruck, dass es das Hauptanliegen des Physikunterrichts sei, die Gültigkeit einer Formel zu beweisen. Damit, so scheint es, hat man seine

Pflicht getan; ich meine die Pflicht, etwas verständlich zu machen.

Den „Beweis“ kann man auf zweierlei Art erbringen: 1. durch Herleiten der Formel, 2. durch Prüfen in einem Experiment.

Nun kann ich aufgrund meiner jahrzehntelangen Erfahrung im Umgang mit den Problemen von Studentinnen und Studenten berichten, dass mit dem Beweis einer Formel ein Verständnis noch keineswegs erreicht sein muss. In vielen Fällen ist es so, dass trotz der Herleitung die Lernenden noch nicht das geringste Verständnis der betrachteten Formel haben. Ja, es passiert sogar, dass sie außer der Herleitung weder das Hergleitete, noch das, aus dem hergeleitet wurde, verstanden haben. Sie haben also nichts verstanden außer dem Rechenweg.

Hinzu kommt, dass in vielen Fällen die Herleitung schwerer zu verstehen ist als das Hergleitete (so wie das Smartphone oder das Auto leichter zu verstehen ist als sein Herstellungsprozess).

Und wenn der Herleitungsprozess zu schwierig ist, so verzichtet man leider in der Schule auf das Thema ganz und gar, obwohl das Ergebnis der Herleitung leicht verstanden werden könnte. Ein Beispiel hierfür ist die Fourierzerlegung. Der Beweis des Verfahrens ist für die Schule zu kompliziert, daher kommt die Fourierzerlegung im Unterricht der Schule nicht vor. Wenn man aber mithilfe einer einfachen Computer-App das Verfahren anwendet, so kann die Fourierreihe schon in der Mittelstufe verstanden werden.

Natürlich ist es befriedigend, etwa die ganze Elektrodynamik aus den Maxwellgleichungen herzuleiten. Das Streben der Physiktreibenden nach Axiomatik, also nach dem Herleiten aller Formeln aus einigen wenigen, die uns die Natur anscheinend begründungslos vorsetzt, ist menschlich verständlich. Es ist verwandt mit dem Streben nach „first principles“, letzten Wahrheiten, elementarsten Teilchen, endgültigsten Gleichungen.

Hier die Zügel etwas locker zu lassen bedeutet nicht, dass man die Physik ihrer Exaktheit beraubt. Die Formel, die wir einfach an die Tafel schreiben und deren Aussage wir plausibel machen, ist eine mathematische Beziehung, sie ist exakt in dem von uns gewünschten Sinn.

### Herkunft

Man kann verschiedene Ursachen vermuten:

- Das Rechnen nimmt einem das Denken ab. Eine Rechnung nachzuvollziehen ist bequemer, als sich das Verständnis der Physik hinter einer Formel zu erarbeiten.
- Auch auf die Gefahr hin, den Zorn meiner Kollegen mit der Fächerkombination Mathe/Physik zu erregen: Ich befürchte, manche von ihnen sind durch ihr

zweites Fach, die Mathematik, darauf getrimmt, das Beweisen als die wichtigste wissenschaftliche Tätigkeit zu betrachten.

Bis vor nicht allzu langer Zeit – ich meine, solange es noch keine Computer gab – war die analytische Rechnung das wichtigste Werkzeug für die exakte Beschreibung physikalischer Sachverhalte. Der Analysis als Werkzeug der Physik könnte es aber bald ähnlich gehen wie schon früher der Geometrie. Zu Zeiten Galileos galt die Geometrie als einziges zuverlässiges Mittel zur exakten Beschreibung einer physikalischen Erscheinung. („Wer die Geometrie begreift, vermag in dieser Welt alles zu verstehen“ oder „Die Natur spricht die Sprache der Mathematik: Die Buchstaben dieser Sprache sind Dreiecke, Kreise und andere mathematische Figuren.“) Das hat sich, nachdem Newton die Differenzialrechnung eingeführt hatte, gründlich geändert.

Man könnte mit Kant einwenden „... in jeder reinen Naturlehre [sei] nur soviel an eigentlicher Wissenschaft enthalten, als Mathematik in ihr angewandt werden kann.“ Das trifft gewiss zu, aber Mathematik ist eben nicht einfach nur Herleitung von einem aus dem anderen.

- Im Physikunterricht wird traditionell Wert darauf gelegt, dass nichts Unbewiesenes gesagt wird. Bei Pohl, den die Älteren unter uns noch von seinen klassischen Lehrbüchern zur Experimentalphysik her kennen, war dieses Betreiben schon fast obsessiv. Der Dozent durfte im Hörsaal nichts sagen, was er nicht durch ein Experiment demonstriert hatte. Nun ist die Frage, ob die Studierenden im Hörsaal bei jeder neuen Aussage an deren Glaubwürdigkeit zweifeln. Schließlich gibt der Ruf der Physik keinen Anlass dazu, im Gegensatz zu etlichen anderen Schul- und Studienfächern, in denen eine Denkschule, Mode oder Ideologie die andere ablöst, und wo man mit Herleitungen oder Experimenten kaum aufwarten kann.

### Entsorgung

Das Wichtigste bei der Einführung einer neuen Formel: Die Formel selbst diskutieren, sodass bei den Schülerinnen und Schülern am Ende der Eindruck entsteht, die hätten sie auch selbst gleich hinschreiben können.

Hierzu ein einfaches Beispiel aus der Schule: die Formel

$$E_{\text{kin}} = \frac{m}{2} v^2$$

für die kinetische Energie. Die Herleitung aus einer anderen, bekannten, vertrauten Gleichung, etwa aus

$$\Delta E = F \cdot \Delta s$$

ist verwickelt, da man integrieren muss, und die Integralrechnung vielleicht noch nicht zur Verfügung steht. Außerdem entspricht der Integration ein physikalischer Prozess, der im Endergebnis gar keine Rolle mehr spielt.

Tatsächlich kann man sich die Gleichung, oder wenigstens ihren wesentlichen Teil, mit etwas physikalischem Verständnis ohne Rechnung beschaffen. Zunächst stellt man fest, dass der Energiebeitrag, den man sucht, von der Masse und der Geschwindigkeit und von nichts anderem abhängt. Dann überzeugt man sich leicht, dass die Energie proportional zur Masse sein muss, denn die Energie ist eine mengenartige (extensive) Größe, und daher muss auf der rechten Seite der Gleichung auch eine mengenartige Größe in der ersten Potenz stehen. (Zwei Körper mit der gleichen Masse müssen bei gleicher Geschwindigkeit doppelt so viel kinetische Energie haben wie ein einziger.) Schließlich die Abhängigkeit von  $v$ . Die Energie ist gewiss unabhängig von der Richtung der Bewegung oder, in einer Dimension, vom Vorzeichen der Geschwindigkeit. Die einfachste Funktion, die dafür sogen kann, ist  $v^2$ . Sogar für den Faktor 1/2 gibt es ein Argument. Falls nämlich schon andere Energieformeln diskutiert worden sind, hat man diesen Faktor schon einmal oder öfter angetroffen: bei der Energie, die beim Spannen einer Feder gespeichert wird, bei der Energie im Kondensator oder in der Spule.

Und noch eine Empfehlung für das Herleiten an der Universität, wo die Zahl der Rechenschritte erheblich größer sein kann: Man versuche, jedes Zwischenergebnis zu interpretieren, denn auch jedes Zwischenergebnis macht eine physikalische Aussage.

Schließlich noch eine Alternative zum Herleiten: Modellbildungssysteme. Sie werden meiner Meinung nach zu wenig im Physikunterricht eingesetzt. Der Umgang mit ihnen ist schnell zu lernen. Sie verschaffen ein gutes Verständnis und führen zu einem logischen Durchdringen physikalischer Vorgänge, indem sie uns die Rechnerei abnehmen.

Ich muss in diesem Zusammenhang auch an mein eigenes Studium denken: an die Vorlesung über analytische Mechanik an der Technischen Hochschule Karlsruhe von Fritz Weidenhammer, der damals mein Vorbild war, schon als ich noch nicht ahnte, dass ich selbst einmal Lehrer werden sollte. Wenn er für eine Weile unsere volle Aufmerksamkeit in Anspruch genommen hatte und eine Rechenphase beginnen sollte, sprach er die beruhigenden Worte: „Es rechnet von selbst“ – womit er meinte: „Jetzt könnt Ihr euren Lernprozessor auf Standby schalten.“ Ich glaube, besser kann man die Rolle des Rechnens für den Lernprozess nicht charakterisieren.

## Gibt es physikalische Größen in der Natur?

# 1.4 Gibt es physikalische Größen in der Natur?

### Gegenstand

In der physikalischen Literatur findet man das Konzept Impulsstrom. Die physikalische Größe Kraft ist nichts anderes als die Stärke dieses Impulsstroms, der mechanische Spannungstensor ist identisch mit dem Impulsstromdichtetensor. In einem Gutachten der Deutschen Physikalischen Gesellschaft zum Karlsruher Physikkurs wird behauptet, in der Natur gebe es keine Impulsströme [1]. Was ist wahr?

### Mängel

Beides, denn: 1. In der Natur gibt es sie nicht; 2. es gibt sie in den Lehrbüchern. Diese Aussage trifft allerdings auch auf alle anderen physikalischen Größen zu. Eine physikalische Größe ist eine Variable in einer Theorie, welche wiederum eine Erfindung des Menschen ist [2, 3].

In der Natur gibt es in diesem Sinne nicht nur keine Impulsströme, sondern auch keine elektrischen Ströme, keine Kräfte, usw.

Elektrische Ladung kann nicht fließen; genauso wenig wie „eine“ Masse an einer Feder hängen oder ein Gas sich in „einem“ Volumen befinden kann. Fließen können die Elektronen, an der Feder hängen kann ein Körper und das Gas kann sich in einem Behälter befinden. Die Elektronen haben eine Eigenschaft, die wir durch ihre elektrische Ladung beschreiben, der Körper hat eine Eigenschaft, die wir durch seine Masse beschreiben, und das Gas befindet sich in einem Behälter, den wir durch sein Volumen beschreiben.

Man mag sagen, es sei pedantisch, so zu argumentieren. Es wäre schön, wenn man recht hätte; es wäre schön, wenn jeder wüsste, dass wir, wenn wir von Strömen physikalischer Größen sprechen, – von elektrischen Strömen, Massenströmen oder Energieströmen –, ein Modell benutzen. Wenn man sich dessen bewusst ist, so ist nichts dagegen einzuwenden, dass man sagt, im Draht fließe elektrische Ladung. Jeder Physiker spricht so, und das ist auch gut so. Darum gibt es aber auch keinen Einwand gegen die Einführung von Impulsströmen, seien sie konvektiv oder konduktiv.

Die Einsicht, dass wir mit einem Modell operieren, wenn wir von elektrischen oder Energieströmen sprechen, scheint durchaus nicht allen, die mit diesen Begriffen umgehen, bewusst zu sein.

Besonders deutlich wird das etwa in dem DPG-Gutachten im Zusammenhang mit der Wärme.

Die Frage, was Wärme ist, was sie „wirklich“ ist, stellen sich ja nicht nur die Gutachter; sie ist so alt wie die Physik. Dass es eine falsche Frage war, ist erst klar ge-

worden, als die Physik in ein aufgeklärteres Stadium getreten ist. Aber auch heute ist diese Einsicht noch nicht überall angekommen.

Man hat sich lange gestritten, ob Wärme ein Stoff sei oder die Bewegung von Teilchen, so als bestünde kein Zweifel darüber, dass es in der Welt etwas gibt, was unabhängig vom Menschen das ist, was die Menschen dann Wärme genannt haben oder nennen wollten. Man musste es nur finden, man musste die Wärme entdecken und ihre Eigenschaften nach und nach erforschen. So der Irrtum.

Dass schließlich eine ganze Reihe von Größen eingeführt wurden mit dem Anspruch, das zu messen, was man sowohl im täglichen Leben als auch in der Physik und in der Chemie als Wärme bezeichnet oder gern bezeichnen würde, hat viele Menschen verstört, und wird von manchen als eine besondere Tücke der Thermodynamik gesehen; als eine der Ursachen dafür, dass die Thermodynamik prinzipiell ein schwieriges Fachgebiet ist. So ist das Wärmemaß der Physiker offiziell die Prozessgröße  $Q$ . Um Schülern und Studenten den Wärmebegriff klar zu machen, greift man aber auch gern auf die Größe  $U$ , genannt innere Energie zurück. Für die Chemiker ist nach wie vor die Größe  $H$ , genannt Enthalpie, das beliebteste Wärmemaß.

### Herkunft

Ein unaufgeklärter Umgang mit den Grundbegriffen der Naturwissenschaft.

### Entsorgung

Man mache von vornherein klar, dass physikalische Größen vom Menschen erfunden, oder genauer, konstruiert werden.

[1] Gutachten über den Karlsruher Physikkurs; In Auftrag gegeben von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft von M. Bartelmann, F. Bühler, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschke, P. Reineker, M. Tolan, J. Wambach und W. Weber; <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/download/dpg-gegen-kpk.pdf>

[2] A. Einstein, L. Infeld, *Die Evolution der Physik*, rororo, 1956, S. 29: „Physikalische Begriffe sind freie Schöpfungen des Geistes und ergeben sich nicht etwa, wie man sehr leicht zu glauben geneigt ist, zwangsläufig aus den Verhältnissen in der Außenwelt.“

[3] G. Falk, W. Ruppel, Mechanik, Relativität, Gravitation, Springer-Verlag, Berlin, 1973, S. 2: „Schließlich ist es irrtümlich anzunehmen, die Objektivität der Physik bestünde darin, dass ihre Begriffe nichts zu tun hätten mit der menschlichen Fantasie oder überhaupt mit dem

Menschen. Tatsächlich sind die physikalischen Größen Erfindungen des menschlichen Geistes, die dazu dienen, die verwirrende Fülle der uns umgebenden Erscheinungen durch einfache Regeln überschaubar zu machen.“

## 1.5 Physikgeschichte im Physikunterricht

### Gegenstand

Die Geschichte der Naturwissenschaft ist ein wichtiger Teil unserer Kultur, und sie ist es Wert, Unterrichtsgegenstand zu sein. Auch wenn man im Physikunterricht aus Zeitgründen nicht in der Lage ist, der Ideengeschichte der Naturwissenschaften gerecht zu werden, so versucht man doch wenigstens, die wichtigsten naturwissenschaftlichen Entwicklungen darzustellen und die wichtigsten Akteure zu nennen. Welche Forscher genannt werden, kann ein Indikator dafür sein, wie mit der Geschichte der Physik umgegangen wird.

### Mängel

Schon bei der Entscheidung, welche Forscher mit welchen Arbeiten genannt werden, entstehen Probleme, die in Schulbüchern unterschiedlich gut gelöst werden.

Man muss eine Reihe von Forschern nennen, obwohl man sich eigentlich nicht dafür entscheiden würde: Alle jene, die das Glück hatten, dass ein Effekt, eine Gleichung, eine Regel, eine Maßeinheit, eine Naturkonstante oder ein Experiment nach ihnen benannt worden ist. Wir wollen hier nicht die Gründe ansprechen, die einen veranlassen, Personen auf diese Art zu ehren. Jedenfalls hat die Tatsache Auswirkungen, die in zweierlei Hinsicht problematisch sind.

So erscheint uns eine physikalische Aussage wichtiger, wenn sie einen Eigennamen trägt, als wenn sie keinen solchen Namen hätte, und damit manchmal wichtiger als sie eigentlich ist.

Außerdem kann die Verknüpfung mit seinem Namen den Beitrag des geehrten Wissenschaftlers wichtiger erscheinen lassen, als es eigentlich angemessen wäre.

Es gibt also Fälle, in denen man, wenn es diese Verbindung mit einem Forschernamen nicht gäbe, entweder den Forscher selbst oder den nach ihm benannten Effekt oder die nach ihm benannte Gleichung im Unterricht gar nicht erwähnen würde.

Beispiele sind etwa die Balmerserie, der Halleffekt, der Geigerzähler und die Wilson'sche Nebelkammer.

Die vielen Namen der Gasgleichung werden in einer anderen Altlast angesprochen [1].

Wir sind an solche Bezeichnungen gewöhnt und fragen gar nicht mehr: Warum hat die Beziehung  $p \sim 1/V$  einen Eigennamen, nicht aber die Gleichung  $p = m \cdot v^2$ ? Warum hat  $F = D \cdot s$  einen Namen, nicht aber  $\Phi = L \cdot I$  oder  $Q = C \cdot U$ ? Die Lenz'sche Regel dürfte die einzige Regel sein, deren Aussage in nichts weiter als einem Vorzeichen besteht. Wie steht es mit den Zügen anderen Vorzeichen in anderen Gleichungen?

Wenn man nachsieht, welche Wissenschaftler ausdrücklich und absichtlich genannt werden, stellt man fest, dass die Wahl manchmal etwas unüberlegt geschieht. Man erkennt es vor allem daran, dass einige der ganz Großen oft gar nicht genannt werden, etwa Euler, Descartes, Leibniz oder Gibbs.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, wie mit den Bilanzgesetzen umgegangen wird, also mit der Frage, ob eine Größe bilanzierbar ist und, damit zusammenhängend, ob sie erhalten ist.

Die Energieerhaltung wird gewöhnlich thematisiert und als Autoren werden Joule, Mayer und vielleicht noch Helmholtz genannt.

Wie die Überzeugung, dass die Masse erhalten ist, in die Naturwissenschaft gekommen ist, erfährt man nur, wenn man Chemie als zweites Fach studiert; nur dann wird man etwas von Lomonossow und Lavoisier erfahren. In der Physik dagegen geht es nur um die Negation der Massenerhaltung: um den Massendefekt.

Eher selten wird etwas dazu gesagt, wer den Impuls in die Physik gebracht hat und wer seine Erhaltung entdeckt hat; also nichts in diesem Zusammenhang zu Descartes und Huygens. Und über die Einführung des Drehimpulses kein Sterbenswörtchen, sodass Euler, wenn überhaupt, nur als Mathematiker bekannt wird.

Schließlich noch eine weitere „Ungerechtigkeit“: Etliche bedeutende Forscher werden genannt und gelobt, allerdings für etwas, das gar nicht ihr größtes Verdienst ist. Etwa Huygens für seine Elementarwellen (statt für den Impuls) [2], Daniel Bernoulli für die Bernoulligleichung (aber nicht für seinen Beitrag zur Einführung des Drehimpulses), Carnot für seinen Prozess mit den vier Prozessschritten (und nicht für die geniale Idee, die Wärmekraftmaschine mit einem Wasserrad zu vergleichen) [3]. An Faraday erinnern vor allem die etwas kuriosen Geräte Faradaybecher und Faradaykäfig sowie die Maßeinheit der Kapazität. Man lernt auch, dass er die Induktion entdeckt hat, was gewiss eine bedeutende Entdeckung war. Die Tatsache, dass er den Feldbegriff eingeführt hat, oder man kann auch sagen, das elektrische und magnetische Feld entdeckt hat, kommt gewöhnlich zu kurz.

## Wie stellt man es her? Wie weist man es nach?

### Herkunft

Man kann jeden Einzelfall untersuchen und wird jedes Mal eine andere Geschichte finden. Aus allem zusammen kann man aber den Schluss ziehen: Die Ursachen für die nicht immer passende Wahl sind Zufall und Konvention. Eine Gleichung bekommt einen Namen, wenn es sich gerade so ergibt, ähnlich wie Straßen nach Personen benannt werden, die man gerade für wichtig hält, oder die die geeignete Lobby haben. Und wenn sie den Namen hat, behält sie ihn auch.

### Entsorgung

Ich empfinde in diesem Zusammenhang ein Unbehagen. Ich bin überzeugt, dass die Geschichte der Physik einer umfassenden Aufarbeitung bedarf, und zwar besonders in Hinblick auf die begrenzte Zeit, die im Physikunterricht dafür zur Verfügung steht. Was das Nennen der Forscher betrifft, so empfehle ich erstens Zurückhaltung und zweitens Beschäftigung mit der Ideengeschichte der Physik. Wie wäre es mit einer Pflichtvorlesung zur Geschichte der Physik für Studierende des Lehramts?

[1] F. Herrmann, *Die Namen der Gasgleichung*, Altlasten der Physik

[2] F. Herrmann, *Das Huygens'sche Prinzip*, Altlasten der Physik

[3] F. Herrmann, *Der Carnot'sche Kreisprozess*, Altlasten der Physik

Die Eigenschaften des Gegenstandes der Betrachtung selbst kommen unter die Räder.

So erfahren sie, wie man sich Feldlinienbilder beschafft; wie mithilfe des Feldes ein Körper auf einen anderen eine Kraft ausübt. Nur das Feld selbst bleibt vage und abstrakt. Die Frage nach den Werten der physikalischen Standardgrößen wie Energiedichte, Druck, Temperatur, Entropie wird kaum gestellt. Als wüsste man alles Wesentliche über ein elektrisches Feld, wenn man weiß, welche Kraft auf einen Probekörper ausgeübt wird.

- Die Erklärung des Erzeugungsverfahrens ist gewöhnlich komplizierter als die Beschreibung des Gegenstandes, um den es eigentlich geht. Ein Beispiel ist die Einführung der elektromagnetischen Welle über den Hertz'schen Oszillator. Sie ist außerordentlich kompliziert und es entsteht der Eindruck, ohne Hertz'schen Dipol könnte man sich keine Welle vorstellen.

Man trifft das Verfahren an bei Erscheinungen oder Systemen, die als kompliziert gelten. Man kann sich allerdings fragen, ob der Eindruck der Kompliziertheit nicht gerade erst durch die indirekte Erklärung verursacht wird.

Wenn man jemandem erklären sollte, was Luft ist, so würde man sicher nicht damit beginnen, über die Entstehung der Luft im Lauf der Erdgeschichte zu sprechen, und man würde auch nicht damit beginnen, zu erläutern, wie man die Existenz der Luft, etwa durch die Messung ihres Druckes, nachweisen könnte.

## 1.6 Wie stellt man es her? Wie weist man es nach?

### Gegenstand

Das elektrische Feld wird eingeführt über die Kraft auf eine Probeladung.

Die elektromagnetische Welle wird eingeführt über den offenen Schwingkreis.

Die Wellenfunktion wird erklärt über die Messung der Wahrscheinlichkeit, das Teilchen in einem Zustand mit scharfem Ort anzutreffen.

Die Kohärenz von Licht wird eingeführt über die Eigenschaften der Lichtquelle.

### Mängel

Die Einführung eines neuen physikalischen Gebildes oder „Systems“, beginnt man oft damit, dass man erklärt, wie man es realisiert, oder auch, wie man seine Existenz nachweist. Das hat zwei Nachteile:

- Es bleibt oft dabei, dass die Schülerinnen und Schüler Herstellungs- oder Nachweisverfahren lernen.

### Herkunft

Aufgrund von historischen Zufällen erschien das Gebilde oder die Erscheinung zunächst als schwierig. Es entstand der Eindruck, man könnte nicht in derselben Art darüber sprechen, wie man sonst über Vorgänge oder physikalische Systeme spricht. Also bot sich ein Verfahren an, das sich in anderen Zusammenhängen bewährt hat: die operationale Definition. Man beschreibt ein Verfahren (eine Operation), mit dem man die Erscheinung oder das System herstellt oder nachweist.

### Entsorgung

Erkläre das elektrische und magnetische Feld, indem du über deren Eigenschaften sprichst, insbesondere über Energiedichte und mechanische Spannungen in den Feldern, aber auch über Temperatur und Entropie.

Erkläre die elektromagnetische Welle, indem du über die Eigenschaften einer frei laufenden Welle sprichst. Beginne mit der ebenen Sinuswelle.

Erkläre die Kohärenz, indem du sagst, wie kohärentes Licht beschaffen ist, und zwar an dem Ort des Lich-

tes, das du charakterisieren möchtest (die Kohärenz ändert sich im Allgemeinen von Ort zu Ort).

Erkläre die Wellenfunktion, solange sie nicht durch eine Messung, d. h. durch einen erzwungenen Übergang in einen anderen Zustand zerstört worden ist.

## 1.7 Das Kausalitätsprinzip in der Physik

### Gegenstand

Das Kausalitätsprinzip wird in Physikbüchern gewöhnlich nur an einer einzigen Stelle erwähnt: zur Begründung der Kramers-Kronig-Beziehung, d. h. im Kontext eines speziellen Themas der Festkörperoptik, Abb. 1.1. Studierende des Lehramts Physik werden kaum etwas damit zu tun haben:

- „Man sollte zur Kenntnis nehmen, dass die Schlussfolgerung  $\epsilon(\omega)$  sei in der oberen Halbebene regulär, physikalisch eine Folge des Kausalitätsprinzips ist.“ [1]
- „Wenn ein linearer Zusammenhang dieser Art als Funktion der Frequenz betrachtet wird — d.h. als Funktion der Zeit —, muss er die Bedingung der Kausalität erfüllen; ...“ [2]

### Mängel

Für denjenigen, der diesen Teil der Physik nie studiert hat, gibt es hier kein Problem. Wenn man ihn nach dem Kausalitätsprinzip fragt, wird er antworten, das sei ein

philosophisches Konzept; dass es gilt, ist eine Selbstverständlichkeit; für den Physiker ist es kein Thema, denn es werde von jeder physikalischen Theorie vorausgesetzt. Ein Problem hat nur der Student, der die Vorlesung über optische Eigenschaften der Festkörper hört, und der auch dieser Meinung war, und dann, in der Vorlesung über theoretische Festkörperphysik sitzend, plötzlich den Dozenten sagen hört, er benutze für die folgende Rechnung das Kausalitätsprinzip. Hat er fünf Semester studieren müssen, um endlich an die Stelle zu kommen, an der sich das Kausalitätsprinzip in der Physik bemerkbar macht?

### Herkunft

Wohl nur eine von Generation zu Generation übertragene Gewohnheit.

### Entsorgung

Es ist zwar gegen das Kausalitätsprinzip an dieser Stelle nichts Wesentliches einzuwenden. Nur: Wenn man sich einer so starken Keule bedient, hätte man vielleicht schon etwas früher darauf hinweisen können, dass man sie besitzt. Und wenn man sich etwas mit den begrifflichen Grundlagen der Physik befassen würde, hätte man bemerkt, dass das Kausalitätsprinzip allenthalben wirksam ist.

[1] L. D. Landau und E. M. Lifshitz, *Electrodynamics of Continuous Media*, Pergamon Press, Oxford, 1960, S. 257

[2] J. M. Ziman, *Principles of the Theory of Solids*, University Press, Cambridge, 1969, S. 222

It is useful to notice that the conclusion that  $\epsilon(\omega)$  is regular in the upper half-plane is, physically, a consequence of the causality principle. The integration in (58.3) is, on account of this principle, taken only over times previous to  $t$ , and the region of integration in formula (62.1) therefore extends from 0 to  $\infty$  rather than from  $-\infty$  to  $\infty$ .

It is evident also from the definition (62.1) that

$$\epsilon(-\omega^*) = \epsilon^*(\omega). \quad (62.2)$$

However, the coefficients  $n$  and  $k$  are not quite independent of one another. They are linked by *dispersion relations*. The quantity  $N^2$  in (8.11), is an example of a *generalized susceptibility*,  $\alpha$ , say, in a relation like

$$D = \alpha E \quad (8.20)$$

between a generalized ‘displacement’,  $D$ , and a ‘force’,  $E$ . When a linear relation of this kind is considered as a function of frequency—that is, as a function of time—it must satisfy the requirements of *causality*; there must be no displacement until after the application of the force. It is well known that this condition requires that the real and imaginary parts of the complex function

$$\alpha(\omega) = \alpha_1(\omega) + i\alpha_2(\omega) \quad (8.21)$$

Abb. 1.1

## Die exakte Fachsprache

### 1.8 Die exakte Fachsprache

#### Gegenstand

- 1 „Fachausdruck ... : feste, spezielle Bezeichnung für etw. ganz bestimmtes in einem bestimmten Fachgebiet.“ [1]
- 2 „Eine Fachsprache unterscheidet sich von der Umgangssprache unter anderem dadurch, dass ihre Begriffe eindeutig bezeichnet sind, aber in der Regel nur innerhalb des betreffenden Faches gelten.“ [2]

#### Mängel

Die Fachsprache gilt, wie es auch die beiden Zitate belegen, als exakte Sprache. Wenn man weiß, zu welchem Fachgebiet eine Aussage gehört, so ist die fachsprachliche Aussage eindeutig – so wenigstens die verbreitete Meinung. Wahrscheinlich ist es die Meinung von Nichtfachleuten. Denn die Fachleute wissen oder sollten wissen, dass diese Meinung nicht zutrifft.

Bekannt sind die verschiedenen Bedeutungen des physikalischen und technischen Fachausdrucks „Kraft“. Im 17. und 18. Jahrhundert deckte der Kraftbegriff das ab, was wir heute als Impuls bezeichnen, außerdem aber auch das, was wir heute mechanische Energieformen nennen, und schließlich auch das, was wir heute in der Physik mehrheitlich unter einer Kraft verstehen. Man könnte denken, diese Vieldeutigkeit hatte ihren Grund darin, dass das Ringen um Klarheit der Begriffe noch in vollem Gang war. Allerdings wurde das Wort durchaus noch nicht einheitlich benutzt, nachdem dieses Ringen als abgeschlossen gelten konnte. Das folgende Zitat stammt aus einem Lehrbuch aus dem Jahr 1912: „Wir nennen das Produkt aus der halben Masse und aus dem Quadrate der Geschwindigkeit des bewegten Gewichtes seine lebendige Kraft.“ [3] Und auch heute noch wird in der Physik manchmal die Energie als Kraft bezeichnet [4]. Als eigentlich alles hätte klar sein können, trat zu dem noch ein neuer Konkurrent auf. Die Thermodynamik der irreversiblen Prozess setzte das Wort für ihre Zwecke ein – als Bezeichnung für die Antriebe von Transportvorgängen: „Wir haben im vorhergehenden Abschnitt gesehen, daß es für das Auftreten von irreversiblen Erscheinungen eine Reihe von Ursachen geben kann: z. B. einen Temperaturgradienten, einen Konzentrationsgradienten, einen Potentialgradienten oder eine chemische Affinität. Diese Größen werden gewöhnlich in der Thermodynamik der irreversiblen Prozesse „Kräfte“ genannt ...“ [5]. Schließlich haben auch die alten Bezeichnungen „elektromotorische Kraft“ und „Thermokraft“ für elektrische Spannungen unangefochten bis heute überlebt. Man könnte denken, dass zu einem so unverantwortlichen Umgang mit der wissen-

schaftlichen Sprache nur unsere Vorfahren fähig gewesen wären. Aber so ist es nicht. Denn man kann gerade jetzt wieder beobachten, wie das unschuldige Wort Kraft von einer neuen Spezialistengruppe vereinahmt wird: von den Teilchenphysikern. Was sie genau unter einer Kraft verstehen, ist nicht leicht auszumachen. Jedenfalls sprechen sie, wenn sie ihre vier Wechselwirkungen meinen, auch von den vier Kräften: „Zwei der drei Wechselwirkungsteilchen der Schwachen Kraft sind elektrisch geladen. Daher unterliegen sie auch der elektromagnetischen Kraft. Sie können also Photonen aussenden und sich gegenseitig anziehen.“ Offenbar wird das Wort „Kraft“ in diesem Zusammenhang nicht als Name einer physikalischen Größe benutzt.

Dass solche Bedeutungswandel heute genauso stattfinden wie in früheren Zeiten, kann man bei etwas Aufmerksamkeit allerorten beobachten.

Das Bit hatte zunächst eine sehr schlichte Bedeutung. Es war eingeführt worden als Maßeinheit für die Shannonsche Datenmenge. Dann wurde es aber aufgewertet; es wurde synonym für „Zweizustandssystem“ verwendet, und man findet es in merkwürdigen Wendungen, wie „das bit wird gesetzt“. Dieser Aufstieg erfuhr seine Krönung als dem Bit das Qubit zugesellt wurde.

Das Orbital wurde zunächst eingeführt als Ersatz für die abhanden gekommene Bahn des Elektrons. Inzwischen hat es aber noch mindestens zwei weitere Bedeutungen angenommen. Es bezeichnet erstens eine Einzelchenwellenfunktion [6], und zweitens das Quadrat der Wellenfunktion [7].

Trotz DIN und ISO, SI und IUPAP werden also Fachausdrücke durchaus nicht in einer einheitlichen Bedeutung benutzt. Mit der Exaktheit der naturwissenschaftlichen Sprache ist es nicht so weit her, wie man uns manchmal glauben macht.

#### Herkunft

Die Fachsprache unterliegt denselben Gesetzen wie die Umgangssprache, und das bedeutet auch: Sie entwickelt sich. Neue Bedeutungen kommen hier wie da durch einen unbekümmerten Umgang mit der Sprache zustande. Immer wenn in Naturwissenschaft und Technik ein neues Teilgebiet entsteht, wird zunächst ein Jargon gesprochen, der zunächst gar nicht unbedingt ernst gemeint ist, sich aber schnell zu einer Fachsprache verfestigt.

#### Entsorgung

Nicht jede sprachliche Mode oder Marotte der Vertreter eines naturwissenschaftlichen oder technischen Spezialgebiets mitmachen. Nicht ohne Not die Verwendung eines Fachwortes in verschiedenen Bedeutungen för-

dern, also etwa: strikt zwischen dem Wort Feld als Bezeichnung für ein physikalisches System und dem Wort Feldstärke als Name einer physikalischen Größe unterscheiden. Wenn sich aber ein Wort in mehreren Bedeutungen fest etabliert hat und man es in beiden Bedeutungen braucht, die Lernenden auf das Problem aufmerksam machen, etwa: das Wort Strom für eine Erscheinung aus der Elektrizitätslehre einerseits und für elektrische Energie andererseits.

- [1] Duden, *Deutsches Universalwörterbuch*, Dudenverlag, Mannheim, 1989, Stichwort: Fachausdruck
- [2] Wikipedia, Dezember 2006, Stichwort: Fachsprache
- [3] E. Riecke, *Lehrbuch der Physik*, Verlag von Veit & Comp. Leipzig, 1912, S. 63
- [4] F. Herrmann: *Kraft und Energie*, Altlasten der Physik
- [5] S. R. de Groot, *Thermodynamik irreversibler Prozesse*, Bibliographisches Institut Mannheim, 1960, S.4
- [6] K. Bethge und G. Gruber, *Physik der Atome und Moleküle*, VCH Weinheim, 1990, S. 199: „In der chemischen Literatur werden Einteilchenwellenfunktionen als Orbitale bezeichnet ...“
- [7] dtv-Atlas zur Chemie, dtv München, 1983, S. 23: „Stattdessen gilt die Bezeichnung Atomorbital (Orbital) für die Aufenthalts wahrscheinlichkeit eines Elektrons (ElektronendichteVerteilung) innerhalb eines Atoms.“

## 1.9 Verschleiernde Sprache

### Gegenstand

Die folgenden Wendungen sind uns Physiklehrern vertraut. Man wundert sich nicht, wenn sie in Schulbüchern oder in wissenschaftlichen Zeitschriften gebraucht werden, und man wird sie vielleicht selbst im Unterricht benutzen:

- 1 „... Systeme tauschen elektrische Ladung aus.“
- 2 „... Systeme wechselwirken miteinander.“
- 3 „... ruft eine Kraftwirkung hervor.“
- 4 „Es liegt ein elektrisches Feld vor.“
- 5 „Ein Körper erfährt ein Gravitationsfeld.“
- 6 „Um ..., ... muss man die Energie  $E$  aufbringen.“
- 7 „Dem Elektron kommt eine Wellenfunktion zu.“

### Mängel

Die Ausdrucksweisen haben gemeinsam, dass sie etwas aussagen und gleichzeitig etwas offen lassen. Es könnte etwas gesagt werden, wird aber nicht gesagt. Dass man etwas nicht sagt, was im Prinzip gesagt werden könnte, kann durchaus gerechtfertigt sein. Zur Erläuterung betrachten wir das in der Physik beliebte Verb „austau-

schen“, siehe unser erstes Beispiel. Der Satz „Die Systeme A und B tauschen Ladung aus“ behauptet, dass Ladung entweder von A nach B oder von B nach A geht, ohne zwischen den beiden Möglichkeiten zu unterscheiden. Der Grund dafür, dass man die Unterscheidung nicht trifft, mag sein, dass es einem in dem betrachteten Zusammenhang nicht darauf ankommt, in welche Richtung der Transport läuft. Man möchte eine Aussage machen, die sich auf beide Möglichkeiten bezieht. Es könnte aber auch sein, dass es zwar interessant wäre zu wissen, in welche Richtung die Ladung geht, dass man es aber nicht weiß. Schließlich kommt es aber auch vor, dass man es weiß und dass es nützlich wäre, es mitzuteilen, dass man es aber trotzdem nicht sagt. Um diesen letzteren Fall geht es uns hier: Etwas, das durchaus gesagt werden könnte, wird offen gelassen.

Wir wollen die zitierten Beispiele untersuchen.

- 1 Das Verb „austauschen“ wurde schon angesprochen.<sup>1</sup>
- 2 Wenn man sagt, zwei Systeme A und B „wechselwirken“ miteinander, so meint man, es geht etwas von A nach B oder von B nach A (wie beim „Austausch“). Die Formulierung lässt aber nicht nur offen, ob der Transport in die eine oder in die andere Richtung geht, sondern auch, was überhaupt transportiert wird. In den meisten Fällen, aber durchaus nicht in allen, ist der Impuls gemeint. Wenn das der Fall ist, sollte man es auch sagen.
- 3 Von jeder Kraft, außer von den Trägheitskräften, kann man sagen, 1. wer sie ausübt und 2. auf wen sie wirkt. (Bei Trägheitskräften fehlt derjenige Körper, der sie ausübt.) Man gewinnt meistens, wenn man beide Systeme oder Körper benennt.
- 4 Die Wendung „es liegt vor“, etwa synonym zu „es existiert“, ist die vagste Art, wie man das Vorhandensein von etwas zum Ausdruck bringen kann. Die Formulierung lässt nicht nur offen, wo sich das „Etwas“ befindet, sondern sie ist sogar dann noch zu gebrauchen, wenn das „Etwas“ nicht lokalisierbar ist, also prinzipiell gar keinen Ort hat. Man vergleiche etwa mit dem folgenden Satz, in dem das Wort durchaus angebracht ist: „Es liegt eine Straftat vor.“ Nun kann man von Feldern aber im Allgemeinen genau sagen, wo sie sich befinden. Das „Vorliegen“ oder auch „Existieren“ führt den Lernenden also eher in die Irre: Er könnte annehmen, Felder haben keinen eindeutigen Ort.

<sup>1</sup>Das Wort hat einen anderen Makel: So wie es in der Physik benutzt wird, entspricht es nicht der umgangssprachlichen Bedeutung, denn hier heißt „austauschen“: B bekommt etwas von A, und dafür bekommt A etwas von B.

## Sprachlicher Wildwuchs

- 5 Gemeint ist wohl, dass sich ein Körper im Gravitationsfeld eines anderen befindet. Erfährt das Feld auch den Körper? Und erfährt der Körper auch sein eigenes Feld?
- 6 Auch das „Aufbringen“ der Energie lässt etwas, was man klar sagen könnte, offen: nämlich woher die Energie kommt, und wohin sie geht.
- 7 Die Vorsichtigkeit und Vagheit dieser Aussage ist kaum zu übertreffen. Warum soll man nicht sagen: „Das Elektron hat die Wellenfunktion?“ Es hat die Wellenfunktion nicht mehr und nicht weniger als es eine Ladung und eine Masse hat.

### Herkunft

Es geht uns hier nicht um Stilblüten. Auch diese gibt es in Physiklehrbüchern. Man wird aber wohl niemanden beleidigen, wenn man sagt, dass Physikbuchautoren keine Schriftsteller sind. Es geht darum, etwas, das man klar sagen kann, auch klar zu sagen. Die Ungenauigkeiten in den zitierten Formulierungen haben mehrere Ursprünge.

- 1 Die Sprache der Physik ist manchmal unklar, weil ein Sachverhalt zu einer gewissen Zeit noch nicht bekannt war. Man konnte sich nicht klarer ausdrücken. Beispiele hierfür sind zahlreiche Formulierungen, bei denen es um die Energie geht. Bis Ende des 19. Jahrhunderts konnte man weder die Energie noch deren Ströme lokalisieren. Die Sprache, die damals entstand, musste mit Formulierungen operieren, die die räumliche Verteilung der Energie offen lassen. Hierzu gehört die „Leistung“ als Name für den Energiestrom, die Wendung „Arbeit verrichten“, das „Aufbringen“ und das „Aufwenden“ von Energie, ja auch das „Übertragen von Energie“. Die vagen Formulierungen waren also Fachsprache, und sie werden noch benutzt, obwohl man sich heute klarer ausdrücken kann. Für erfahrene Physiker stellt das kein Problem dar. Die verstehen sich untereinander sehr wohl. Das Problem hat der Lernende, und vor allem der, dessen große Leidenschaft nicht die Physik ist.
- 2 In einigen Fällen scheint es, dass der Autor selbst den Gegenstand nicht ganz überblickt, obwohl dieser von der Wissenschaft im Prinzip verstanden ist. Vorsichtshalber wählt er die ungenaue Ausdrucksweise.

### Entsorgung

Eine der Aufgaben der Schule, und auch des Physikunterrichts, ist die Sprachpflege. Zur Sprachpflege in einem Gebiet, das man zu den exakten Wissenschaften zählt, gehört, dass man sich klar ausdrückt. Schließlich gilt: „Alles, was sich aussprechen lässt, lässt sich klar aussprechen.“ [1]

[1] L. Wittgenstein, *Tractatus logico-philosophicus*, edition suhrkamp, Suhrkamp Verlag, Frankfurt, 1963, S. 42

## 1.10 Sprachlicher Wildwuchs

### Gegenstand

- Was wandert? Ionen
- Was breitet sich aus? Das Licht
- Was pflanzt sich fort? Eine Welle
- Was fällt ab? Eine Spannung
- Was liegt an? Auch eine Spannung
- Was wird eingespeist? Ein Strom
- Was wird verrichtet? Arbeit
- Was wird ausgeübt? Eine Kraft
- Was wird übertragen? Energie oder Impuls
- Was wird zugeführt? Energie oder Wärme
- Was herrscht? Ein Druck, eine Temperatur oder Unordnung
- Was entweicht? Luft
- Was wird zurückgelegt? Eine Strecke

Wie in der Umgangssprache, so gibt es auch in der physikalischen Fachsprache Phraseologismen, d. h. mehr oder weniger feste Wortverbindungen, die als „Fertigteile“ eines Texten verwendet werden können.

### Mängel

Physik und Chemie sind die unbeliebtesten Schulfächer. Wir glauben, dass der Grund dafür nicht an erster Stelle die Inhalte sind, sondern dass es die Sprache ist. Die Anzahl der Fachausdrücke, die in Schulphysik- und -chemiebüchern verwendet werden, ist bekanntlich größer als die Zahl der Vokabeln, die die Schülerinnen und Schüler im Fremdsprachenunterricht lernen.

Nun bringt die Fachsprache noch eine weitere Er schwerung: die festen Wortverbindungen. Eine Spannung fällt ab, Licht breitet sich aus, eine Kraft wird ausgeübt ... Um die Fachsprache zu beherrschen oder auch nur um sie einigermaßen korrekt zu sprechen, genügt es nicht, die Fachausdrücke, also einzelne Wörter, in ihrer Bedeutung zu kennen. Es müssen auch Wortverbindungen gelernt werden.

Für die Umgangssprache sind solche Wortverbindungen eine Bereicherung. Jemand, der eine Sprache erlernen möchte, muss außer den Vokabeln noch die Phraseologismen lernen, etwa: „falschliegen“, „aus den Fugen geraten“...

In der Physik (und sicher auch in der Chemie) stellen sie aber nur eine weitere Hürde beim Erlernen der fachlichen Inhalte dar.

## Namen physikalischer Größen in Zusammensetzungen

Wortverbindungen bedeuten eine Einschränkung oder Normung: So musst du es ausdrücken, auch wenn du es vielleicht lieber mit anderen Worten sagen würdest. Warum sollen die Ionen unbedingt wandern und nicht fließen, sich bewegen oder gehen? Weil man zum Ausdruck bringen möchte, dass es sich um einen diffusiven Prozess handelt? Aber warum wandern dann nicht die Elektronen in einem metallischen Leiter? Oder warum fällt an einem elektrischen Widerstand eine Spannung ab, nicht aber eine Temperaturdifferenz an einem Wärmewiderstand?

### Herkunft

Die Physik, aber auch jeder Teilbereich von ihr, hat seine eigene Geschichte. Außer der mathematischen Beschreibung entstehen dabei mehr oder weniger konkrete Modellvorstellungen. Diese äußern sich in der Sprache, die zur Beschreibung des entsprechenden Erscheinungsbereichs verwendet wird. Welches Modell entsteht und welche Sprache sich einbürgert, hängt dabei oft vom Zufall ab.

Manchmal helfen Wortverbindungen aber auch einfach, zu verschleiern, dass man kein passendes Modell gefunden hat.

Ein Beispiel ist der Umgang mit der Newton'schen Kraft. Eine Kraft wird von Körper 1 auf Körper 2 ausgeübt. Falls man Körper 1 unerwähnt lassen möchte, kann man auch sagen, auf Körper 2 wirke eine Kraft. Es darf aber nicht gesagt werden, eine Kraft fließe oder herrsche. Die Sprache ist hier so konstruiert, dass vermeiden wird, das zu sagen, was eigentlich angezeigt wäre: dass es um einen Impulstransport geht. Das wollte Newton, als er die „Kraftsprache“ oder das „Kraftmodell“ kreierte, unbedingt vermeiden, da er im für ihn wichtigen Fall der Gravitation das System, das den Impuls transportiert, nicht angeben konnte.

Ähnlich steht es mit der „Prozessgröße“ Arbeit. Sie wurde eingeführt zu einem Zeitpunkt, als es die physikalische Größe Energie noch nicht gab. Über die Energie als extensive Größe kann man bequem allein mit den Werkzeugen der Umgangssprache sprechen, d. h. ohne feste Wortverbindungen.

Die Arbeit allein, ohne die Energie, lässt sich in einem Modell schlecht unterbringen. Daher die genormte Ausdrucksweise „Arbeit verrichten“ oder „Arbeit leisten“; auf keinen Fall jedoch „Arbeit erledigen“ oder „Arbeit machen“.

### Entsorgung

Hilfreich ist ein gutes Sachverständnis. Nur wer einen Phänomenbereich durchschaut, kann es wagen, sich von Sprachschablonen zu befreien.

Eine Empfehlung, besonders für den Physikunterricht der Schule: Zurückhaltung, Mäßigung und Entkrampfung beim Umgang mit der Fachsprache. Müssen die Ionen unbedingt wandern? Muss sich das Licht unbedingt ausbreiten? Muss sich die Welle unbedingt fortpflanzen?

## 1.11 Namen physikalischer Größen in Zusammensetzungen

### Gegenstand

Mit den Namen physikalischer Größen werden oft Zusammensetzungen gebildet. So gibt es zur Kraft die Zusammensetzungen:

*Gewichtskraft, Schwerkraft und Gravitationskraft, Federkraft und Seilkraft, Muskel- und Magnetkraft, Luftwiderstands-, Reibungs-, Haft-, Haftriebungs-, Gleitreibung- und Rollreibungskraft, Brems-, Antriebs-, Zug-, Druck- und Schubkraft, Anziehungs- und Abstoßungskraft, Anpress-, Normal- und Hangabtriebskraft, Einzel-, Teil-, Gesamt-, Kompensations-, Gleichgewichts-, Reaktions- und Gegenkraft, Zwangs- und Ersatzkraft, Zentrifugal-, Zentripetal-, Schein- und Trägheitskraft, Auftriebs- und Gezeitenkraft, Beschleunigungs- und Rückstellkraft, Coriolis- und Lorentzkraft, Kohäsionskraft und Motorkraft.*

Alle diese Bezeichnungen für Kräfte stammen aus Schulbüchern, ebenso wie die folgenden Zusammensetzungen mit der Spannung:

*Batteriespannung, Klemmspannung, Urspannung, Leerlaufspannung, Gleichspannung, Wechselspannung, Momentanspannung, Effektivspannung, Kippspannung, Spitzenspannung, Sägezahnspannung, Hochspannung, Durchbruchspannung, Durchschlagspannung, Teilspannung, Gesamtspannung, Öffnungsspannung, Diffusionsspannung, Messspannung, Hallspannung, Schwellenspannung, Sperrspannung, Anodenspannung, Sättigungsspannung, Induktionsspannung, Selbstinduktionsspannung, Basisspannung, Erregerspannung und Modulationsspannung.*

Auch gibt es die verschiedensten Temperaturen:

*(Raum-, Siede-, Gleichgewichtstemperatur etc.), die unterschiedlichsten Drücke*

*(Schwere-, Eigen-, Kolben-, Über-, Partial-, Innen-, Sättigungsdruck etc.)*

Es gibt einen *Scheinwiderstand* und einen *Ersatzwiderstand*, einen *Bahndrehimpuls*, eine *Punktladung* und unzählige Arbeiten und Energien.

## Namen physikalischer Größen in Zusammensetzungen

### Mängel

Die Zusammensetzungen sollen die Sprache kompakter machen. Durch Verwendung eines zusammengesetzten Namens sparen wir oft einen Nebensatz oder sogar eine längere Erklärung. Dieser Vorteil wird aber oft teuer erkauft. Jeder solche Name stellt einen neuen Fachausdruck dar, dessen Bedeutung gelernt und behalten werden muss.

Oft ist der Gewinn, den die Verwendung eines solchen Namens bringt, gering. Manchmal wird sogar nur der Begriff erklärt, und er wird nie wieder oder nur noch selten verwendet. Das Ziel scheint hier nur noch das Erlernen der Fachsprache zu sein.

Die Möglichkeit, Zusammensetzungen zu bilden, ist eine Eigenheit der deutschen Sprache. Sie gestattet, sich knapp auszudrücken. Allerdings geht dabei auch Information verloren, denn die Beziehung zwischen Grundwort („Kraft“) und Bestimmungswort („Gewicht“ bei der Gewichtskraft) kann sehr verschiedener Natur sein [1].

Manchmal wird mit dem Bestimmungswort einfach das System benannt, auf das sich der Wert der Größe bezieht: die Sonnenmasse, die Elektronenladung, der Gasdruck, die Batteriespannung. Die Zusammensetzung lässt sich hier durch eine Genitivkonstruktion ersetzen: die Masse der Sonne, die Ladung des Elektrons, der Druck des Gases, die Spannung der Batterie.

In anderen Fällen möchte man durch die Zusammensetzung einen bestimmten Wert oder Wertebereich charakterisieren: der Überdruck, die Hochspannung, die Normaltemperatur.

In wieder anderen Fällen besagt das Bestimmungswort, dass ein bestimmter Vorgang abläuft, oder eine bestimmte Erscheinung auftritt: der Sättigungsdruck (der Druck, bei dem das Gas gesättigt ist), die Schmelztemperatur (die Temperatur, bei der ein fester Stoff schmilzt), der Kurzschlussstrom (die Stromstärke im Fall des Kurzschlusses).

Gelegentlich werden aber noch kompliziertere Situationen im Bestimmungswort zusammengefasst. So charakterisiert man mit manchen Bestimmungswörtern die Verteilung der Werte einer Größe im Raum oder in der Zeit. Mit Kolbendruck meint man eine homogene Druckverteilung, mit Wechselspannung eine Spannung mit einem sinusförmigen Zeitverlauf.

Die Tatsache, dass die Beziehung zwischen Grundwort und Bestimmungswort nicht eindeutig ist, verleitet aber auch dazu, Unklarheiten in einer solchen Konstruktion zu verstecken. Ein auffälliges Beispiel dieser Art sind einige Zusammensetzungen, die man mit der Kraft bildet.

Eine Kraft wird immer von einem System auf ein anderes ausgeübt. Wenn man von einer bestimmten Kraft spricht, müssten daher immer zwei Systeme, und zwar in geordneter Reihenfolge, benannt werden. Dies lässt sich natürlich nicht alles in einem einzigen Bestimmungswort unterbringen. Was ist zum Beispiel eine Seilkraft? Die Kraft, die das Seil auf einen anderen Körper ausübt? Oder die Kraft, die ein Teil des Seiles auf einen anderen Teil des Seiles ausübt? Was ist eine Federkraft? Ist es die Kraft, die die Feder auf den Körper am einen Ende ausübt, oder die auf den Körper am anderen Ende? Und was ist wohl mit der Motorkraft eines Autos gemeint?

Ein weiteres Problem in diesem Zusammenhang ist, dass der Eindruck entsteht, man habe es je nach Bestimmungswort mit einer anderen physikalischen Größe zu tun. Was man Spannenergie nennt und was man als La-geenergie bezeichnet, ist dieselbe Größe an verschiedenen Systemen. Es entsteht aber leicht der Eindruck, es handele sich um verschiedene Größen. Die Stärke der Beschreibung mit physikalischen Größen besteht gerade darin, dass man dasselbe Merkmal an völlig verschiedenen Systemen mit ein und derselben Größe beschreibt.

### Herkunft

Zusammensetzungen werden wohl meist von Personen eingeführt, die mit dem entsprechenden Fachgebiet viel zu tun haben, sodass sich für sie die Abkürzung lohnt. Aus der Spezialliteratur werden sie dann, oft wohl etwas zu unkritisch, in die allgemeinbildenden Bücher übernommen.

Der Verdacht ist allerdings auch nicht ganz von der Hand zu weisen, dass manche Zusammensetzungen verwendet werden, um Unklarheiten zu verschleiern.

### Entsorgung

Wir empfehlen natürlich nicht, auf Zusammensetzungen der angesprochenen Art ganz zu verzichten. Es ist sicher nichts dagegen einzuwenden, Zusammensetzungen zu verwenden, die sich selbst erklären, wie Hochspannung, Überdruck, Sonnenmasse oder Gesamtkraft. Einen großen Teil der gebräuchlichen Zusammensetzungen könnte man aber leicht durch einen Nebensatz ersetzen, ohne dass der Text dadurch an Klarheit verliert. Dies trifft zum Beispiel auf die meisten Kräfte zu. Wir haben sogar Zusammensetzungen gefunden, bei denen allein das Weglassen des Bestimmungswortes die Aussage klarer macht. So kann man den Eigendruck eines Gases getrost durch den Druck ersetzen.

[1] Duden, *Die Grammatik*, Bibliographisches Institut, Mannheim, 1973, S. 394

## 1.12 Originalformulierungen

### Gegenstand

In der Schule, beim Abfragen meiner Schüler, oder an der Uni in mündlichen Prüfungen geben die Schüler bzw. Studenten oft wörtlich bestimmte Formulierungen wieder, die sie im Unterricht gelernt haben, oder die als Lehrsätze an der Tafel oder im Buch standen. Hier einige Beispiele

- im Zusammenhang mit dem Wasserstoffatom: „Der Bahnbegriff verliert seinen Sinn.“,
- bei der Einführung des elektrischen Feldes: „Das Feld ist der Raumbereich ...“,
- bei den Newton'schen Gesetzen: „...verharrt im Zustand der Ruhe oder ...“,
- bei der Diskussion der vier Wechselwirkungen der Teilchenphysik: „Für den Betazerfall ist die schwache Wechselwirkung verantwortlich.“

### Mängel

Gewöhnlich stammen die Formulierungen nicht vom Lehrer oder Dozenten; auch er oder sie hat sie übernommen. Und wenn man den Weg zurück verfolgt, landet man schließlich beim Erfinder oder Entdecker oder Erstaussprecher des beschriebenen Sachverhalts. In unseren Beispielen wären es Heisenberg, Maxwell, Newton und (wahrscheinlich) Fermi.

Es wäre mir viel lieber, wenn die Studenten die entsprechende Gegebenheit in ihren eigenen Worten, auch im Pfälzer oder im Sächsischen Dialekt, beschrieben. Die Formulierung aus dem Buch, dem Unterricht oder der Vorlesung zu übernehmen, hat für sie natürlich einen strategischen Vorteil: Man kann nichts falsch machen. Der große Meister hat es ja selbst so gesagt. Man kann das fehlende Verständnis verbergen, auch vor sich selbst. Sagte man es mit eigenen Worten, so würde man vielleicht entdecken, dass der Satz nicht verstanden wurde, oder manchmal auch, dass der Kaiser keine Kleider anhat.

Nehmen wir uns die zitierten Sätze oder Satzbrocken noch einmal vor:

Wenn der Bahnbegriff seinen Sinn verliert, so gibt es also Teilchen, die keine Bahn haben. Die sich aber trotzdem bewegen? Folgt daraus nicht, dass auch der Teilchenbegriff seinen Sinn verliert? Am besten fragt man nicht [1].

Wenn das Feld ein Raumbereich ist, der Raum aber leer ist, wie man vorher gelernt hat, er also nichts enthält, so hätte man „nichts“ mit Eigenschaften. Wie kommt man aus diesem Widerspruch heraus? Am besten fragt man nicht [2].

Warum wagt niemand, das erste Newton'sche Gesetz in modernen Worten zu formulieren: Ein Körper, der

keinen Impuls bekommt oder verliert, ändert seinen Impuls nicht. Sollte es wirklich so einfach sein? Am besten fragt man nicht.

Warum ist nur die schwache Wechselwirkung für etwas „verantwortlich“? Wechselwirkung, so hat man früher gelernt, ist, wenn zwei Körper oder Teilchen entgegengesetzt gleiche Kräfte aufeinander ausüben. Die drei anderen werden doch durch ein Kraftgesetz beschrieben. Wie ist denn das Kraftgesetz bei der schwachen Wechselwirkung. Am besten fragt man nicht [3].

### Herkunft

Wir haben nicht genug Zeit, uns mit den begrifflichen Grundlagen der Physik zu befassen. Es geht darum, Prüfungen zu bestehen.

### Entsorgung

„Was du ererbt von deinen Vätern hast, erwirb es, um es zu besitzen“ heißt es im Faust. Oft wird aber das Ererbte nicht erworben, sondern es wird nur geerbt. Nehmen wir uns Goethe zu Herzen!

[1] F. Herrmann, *Der Bahnbegriff in der Quantenmechanik*, Altlasten der Physik

[2] F. Herrmann, *Das Feld als Raumbereich mit Eigenschaften*, Altlasten der Physik

[3] F. Herrmann, *Wechselwirkung*, Altlasten der Physik

## 1.13 Wenn auf die Ladung der Masse eine Kraft wirkt, ändert sich ihr Impuls

### Gegenstand

„An der Feder hängt eine Masse“, „die Ladung wird im elektrischen Feld beschleunigt“, „in dem Volumen befindet sich ein Gas“, „das Filter lässt nur große Wellenlängen durch“. In diesen Sätzen, die jeder Physiker versteht, wird der Name eines Gegenstandes oder physikalischen Systems durch den einer physikalischen Größe ersetzt. Gemeint ist eigentlich: „An der Feder hängt ein Körper“, „das geladene Teilchen wird beschleunigt“, „in dem Behälter befindet sich ein Gas“, „das Filter lässt nur Licht großer Wellenlängen durch“.

### Mängel

- 1 Physikalische Größen sind Variablen im Sinn der Mathematik. Sie können nicht hängen oder beschleunigt werden, in ihnen kann sich kein Gas befinden, und sie können nicht durch ein Filter hin-

## Wenn auf die Ladung der Masse eine Kraft wirkt, ändert sich ihr Impuls

durchgehen. Wenn, wie es hier geschehen ist, die physikalische Größe genannt wird, wo eigentlich ein Gegenstand oder ein Teilchen gemeint ist, so handelt es sich im Sinn der Linguistik um eine Metonymie. In der Umgangssprache sind Metonymien weit verbreitet. So sagt man etwa: „Auf die Experimentalphysikprüfung habe ich mich mit dem Tipler vorbereitet“, wo man meint: „Auf die Experimentalphysikprüfung habe ich mich mit dem Buch von Tipler vorbereitet.“

Im Fall unserer Zitate ersetzt man den Gegenstand durch eine der ihn beschreibenden physikalischen Größen, nämlich durch diejenige Größe, auf die es in dem betrachteten Zusammenhang gerade ankommt. Nur die Masse des Körpers, der an der Feder hängt, ist von Bedeutung, wenn man sich für die Schwingung interessiert, nicht seine Temperatur oder seine Farbe; nur auf die Wellenlänge des Lichts kommt es bei der Beschreibung der Wirkung des Filters an ...

- 2 Das Identifizieren von Ding und Maß ist besonders verbreitet bei den physikalischen Größen Masse und elektrische Ladung. So sagt man nicht die Energie, die Entropie oder der Impuls hänge an der Feder. Es müssen Größen sein, die wir als für den Körper charakteristisch ansehen. Die Ladung werde beschleunigt, sagt man auch nur dann, wenn es sich um ein Teilchen handelt, dessen elektrische Ladung wir als für das Teilchen charakteristisch ansehen, also etwa ein Elektron oder ein Proton. Bei einem makroskopischen elektrostatischen Experiment würde man eher (aber auch nicht immer) sagen, der geladene Körper werde beschleunigt.
- 3 In Fällen, in denen im Namen der Größe eindeutig zum Ausdruck kommt, dass es sich um ein Maß handelt, ist es nicht üblich, den Körper mit dem Namen der Größe zu bezeichnen. So sagt man nicht: Der Körper hängt an der Federkonstante, sondern an der Feder, obwohl es in dem betrachteten Zusammenhang nur auf die Federkonstante ankommt. Der Wortteil „Konstante“ steht der Identifikation entgegen. Man sagt zwar „gleichnamige (elektrische) Ladungen stoßen sich ab“; aber man sagt nicht „gleichnamige (magnetische) Polstärken stoßen sich ab“, sondern „gleichnamige Pole stoßen sich ab“. Der Wortteil „Stärke“ steht der Ausdrucksweise entgegen.
- 4 Manchmal geht man noch weiter, nämlich wenn man etwa sagt, „der Impuls der Masse“, „das Volumen der Masse“, „das Potenzial der Ladung“. Auch hier sieht man die Sonderbehandlung von Masse und elektrischer Ladung. Man würde wohl nicht vom „Impuls der Energie“ oder der „Temperatur der Entropie“,

und schon gar nicht von der „Temperatur des Drucks“ oder der „Zeitdauer der Länge“ sprechen.

Welches sind nun die Probleme oder die Mängel? Oft keine, manchmal kleine, und manchmal große, die aber gewöhnlich nicht wahrgenommen werden. Etwa wenn man den Namen des Systems „elektrisches Feld“ und den Namen der physikalischen Größe „elektrische Feldstärke“ vertauscht, wenn man das magnetisch geladene Teilchen mit der magnetischen Ladung identifiziert oder wenn man im Elektron nur noch elektrische Ladung sieht und im Photon nur Energie [1].

### Herkunft

Metonymien gehören zum normalen Sprachgebrauch. Sie führen gewöhnlich nicht zu Missverständnissen, sondern bereichern die Sprache.

In der Physik ist man bekanntlich um größere Strenge bemüht; so wenigstens ist das Selbstverständnis der Physiker. Tatsächlich ist es mit der begrifflichen Sorgfalt aber nicht immer weit her. Oft wird ein Jargon gesprochen, mit dem sich die Physiker untereinander recht gut verständigen. Dass manches Missverständnis und mancher wissenschaftliche Streit nur auf unsauber benutzten Bezeichnungen und damit unklar definierten Konzepten beruht, wird nicht bewusst.

Geschichtlich wurde die Rolle der extensiven oder Quantitäts-Größen Masse, Ladung und Entropie erst recht spät klar. Wenn man erkannt hatte, dass sich ein Vorgang mit einer extensiven Größe beschreiben lässt, unterstellte man zunächst, dass man es mit einem tatsächlich vorhandenen Stoff zu tun hatte. Die elektrische Ladung schien mehr zu sein als ein mathematisches Werkzeug zur Beschreibung elektrischer Vorgänge. Man glaubte, man habe es mit zwei Arten elektrischer Fluida zu tun. Ebenso glaubte man an die Existenz von magnetischen Fluida oder von einem Wärmestoff. Und mit der physikalischen Größe Masse geht man oft noch heute um, als wäre das Wort synonym zu Materie. In all diesen Fällen war die extensive Größe das Maß der Menge von etwas in der Natur Vorhandenem, und zwischen dem Maß und dem entsprechenden Fluidum hat man nicht unterschieden. Das elektrische Fluidum hatte ja nur eine einzige Eigenschaft, nämlich die, die durch die Ladung beschrieben wurde, der Wärmestoff hatte nur eine Eigenschaft, nämlich die durch die Größe „Wärme“ (bzw. „heat“ oder „chaleur“) beschriebene.

### Entsorgung

Die Identifizierung von Gegenstand und physikalischer Größe, von Ding und Maß, ist unter den Spezialisten eines Fachgebiets besonders ausgeprägt.

Als Lehrer in der Schule überlege man sich aber gut, ob es sich wirklich lohnt, die Masse an der Feder hängen zu lassen. Warum nicht: „Der Körper hängt an der Feder?“ Warum nicht „Das geladene Teilchen wird beschleunigt“ statt „die Ladung wird beschleunigt“? Es ist nur wenig aufwendiger, trägt aber zur begrifflichen Klarheit bei.

Vor allem vermeide man aber Formulierungen wie: die Energie der Masse, die Kraft auf die Ladung, der Impuls der Masse.

Die beiden Extremfälle des Umgangs sind die Pedanterie auf der einen Seite und das Fachkauderwelsch auf der anderen. Wir schlagen vor, das Fachkauderwelsch den Fachleuten zu überlassen, und sich in der Schule eher um begriffliche Sorgfalt zu bemühen, auch wenn es etwas länger ist zu sagen, die Stromstärke des Ladungsstroms betrage 2 A, statt der Strom ist 2 A. Oder „der Körper der Masse 2 kg hängt an der Feder“, statt „eine Masse von 2 kg hängt an der Feder“.

[1] F. Herrmann, *Reine Energie*, Altlasten der Physik

## 1.14 Umwandlungen

### Gegenstand

Man spricht in der Physik oft von Umwandlungen. So wird Energie von einer Form in eine andere umgewandelt. Aber es wird nicht nur, wie hier, eine physikalische Größe in dieselbe physikalische Größe verwandelt, sondern manchmal auch in eine andere: „... die Ladung bereits innerhalb des Pixels mithilfe einer Verstärkerschaltung in eine Spannung umzuwandeln.“

Es kann auch noch verwickelter sein: „Er wandelt Intensität und Richtung des einfallenden Lichts in eine elektrische Ladung um.“

Schließlich werden nicht nur physikalische Größen hin- und hergewandelt. Es werden auch Gegenstände der realen Welt in physikalische Größen verwandelt, wie etwa wenn man sagt, Licht werde in Energie verwandelt (wenn man nicht gleich sagt, Licht sei selbst Energie), oder wie in diesem Zitat: „Die Umwandlung des Lichts in eine elektrische Ladung basiert auf dem inneren Fotoeffekt.“

### Mängel

Die Zitate stammen nicht etwa aus der Wochenendausgabe einer lokalen Tageszeitung, sondern aus dem *Physik-Journal*.

Zunächst wieder eine Begriffsklärung. Nach Duden bedeutet umwandeln: „zu etwas anderem machen“.

Umwandeln bezeichnet also einen Prozess. Etwas war vorher A und ist nachher B. Es war vorher noch nicht B und ist nachher nicht mehr A. Etwa auf der Hochzeit von Kana: Vorher war es Wasser und nach der Verwandlung Wein.

Einleuchtend, selbstverständlich, trivial? Offenbar nicht so trivial und so einleuchtend, dass in der Physik entsprechend mit dem Begriff umgegangen wird.

Zum Verwandeln von Energie möchte ich hier nichts sagen; sie ist Gegenstand einer anderen Altlast. Ebenso wenig zum Verwandeln von Masse in Energie.

Ich beginne mit der Ladung, die in eine Spannung verwandelt wird. Verschwindet die Ladung im Pixel, und dafür tritt eine Spannung auf? Wohl eher nicht. Noch auffälliger ist die Unstimmigkeit in dem Zitat danach, wo eine Richtung in eine Ladung verwandelt wird.

Und noch mehr tut es weh, wenn man liest, dass Licht in Energie, oder sogar, wie in unserem letzten Zitat, in elektrische Ladung umgewandelt wird. Dagegen spricht nicht nur die Physik, sondern vor allem die Logik. Wie kann Licht, d. h. ein Gegenstand der realen Welt, in eine physikalische Größe, d. h. eine Variable im Sinn der Mathematik verwandelt werden?

Man könnte entgegnen, das sei nun mal die physikalische Umgangssprache. Das mag wohl stimmen, leider.

Sie, liebe Leserin und lieber Leser, gehörten in der Schule wahrscheinlich zu den 10 % bis 15 % der Schülerinnen und Schüler, die gegen schlechten Physikunterricht immun sind, und es ist Ihnen nicht schwergefallen, mit dieser etwas unstimmigen Sprache zurechtzukommen. Aber Sie sind eben nur 10 % bis 15 %.

Man braucht sich dann nicht zu wundern, dass in den Köpfen der Studentinnen und Studenten ein begriffliches Chaos entsteht und man es für möglich hält, dass sie etwa in der Prüfung – ich kann es bezeugen – immer verrücktere Wandlungen vorschlagen: Energie in Impuls, Impuls in Drehimpuls, Energie in Entropie und Ähnliches.

### Herkunft

Wie so oft, eine Liederlichkeit im Umgang mit den begrifflichen Grundlagen der Physik.

Vorreiter aller Wandlungen ist natürlich die Umwandlung der Energie, d. h. Arbeit in Wärme, Wärme in Arbeit, Wärme in elektrische Energie, elektrische in chemische etc.

Die zweite Ursache ist die immer wieder anzutreffende Verwechslung von Aussagen über die reale Welt und Aussagen über die mathematische Beschreibung. Licht kann sich aus logischen Gründen nicht in Energie ver-

## Breitband-Internetzugang

wandeln. Licht hat Energie, so wie es auch Impuls, Drehimpuls und Entropie hat. Und das Licht hat keine elektrische Ladung, und es kann sich grundsätzlich nicht in solche verwandeln.

### Entsorgung

- Man achte darauf, wie man spricht. Mit etwas mehr Sorgfalt zu sprechen, bedeutet nicht, dass unsere Aussagen komplizierter oder schwieriger werden. Im Gegenteil: Sie werden klarer und leichter verständlich.
- Es gibt nur wenige Situationen in der Physik, in denen man den Begriff Umwandlung oder Verwandlung braucht. Daher meine Empfehlung: Das Wort und mit ihm den Begriff einfach entsorgen.

## 1.15 Breitband-Internetzugang

### Gegenstand

Fachkauderwelschproliferation am Beispiel der Spektroskopie

### Mängel

Die Telekom benachrichtigt uns: „LTE kann im einfachen Betrieb eine Bandbreite bis zu 150 Mbit/s erzeugen. In Städten sind sogar bis zu 300 Mbit/s möglich.“

Der Scientific American schreibt: „... a laser emits a narrow band of frequencies at best. ... But having a light source that combines the properties of a laser with the broad bandwidth of an incandescent bulb opens up a whole new realm of possibilities.“

Und so weiter, und so weiter ... Die Bezeichnungen begegnen uns immer wieder: Breitbandinternet, Bandbreite, Linienspektrum, Bandenspektrum, Bandpass, ...

Vielleicht wäre es besser, mit der sprachlichen Analyse im Englischen zu beginnen, denn im Deutschen kommt noch eine Komplikation hinzu: Man unterscheidet, anders als im Englischen oder Französischen, noch zwischen dem Band und der Bande. Aber ersparen wir uns die Einzelheiten.

Woher kommen die Bezeichnungen? Sie beziehen sich auf das, was man sieht, wenn man Licht mithilfe eines Spalts und eines Prismas oder Beugungsgitters zerlegt. Je nach Art der Lichtquelle sieht man auf einem Schirm optische Abbildungen des Spalts, die nach Wellenlängen geordnet gegeneinander verschoben sind. Das ganze Bild besteht damit aus mehr oder weniger breiten Linien oder Bändern. Interessiert ist man an der Energiestromdichte pro Frequenzintervall. Man misst daher diese Bilder aus und stellt das Ergebnis als

einen Funktionsverlauf über der Frequenz dar. Wenngestens ist das heute so.

Die Bezeichnungen Linie und Band beziehen sich also auf die Rohdaten, auf ein technisch bedingtes Artefakt. Wenn man von einem Band oder einer Bandbreite spricht, meint man ein Frequenzintervall, oder schließlich sogar eine Datenübertragungsrate – siehe unser Telekom-Zitat.

Man wird einwenden: So ist es nun mal – die Sprechweise hat sich eingebürgert, jeder versteht sie, so funktioniert Sprache. Und dagegen ist zunächst auch nichts einzuwenden.

Man kann sich trotzdem fragen: Wenn mit den Wörtern Linie und Band nicht mehr beabsichtigt ist, als die Größe des Intervalls einer physikalischen Größe zu charakterisieren, warum diese Extrawurst? Warum braucht ausgerechnet das Frequenzintervall eine eigene Bezeichnung? Wie wär's, wenn wir eine ausreichende Wasserversorgung als Breitbandwasserversorgung bezeichnen würden? Oder wie wär's mit einem Breitbandautobahnzubringer? Oder einem Breitbandschiennennetz?

Man könnte ebenso daran denken, eine elektrische Potenzialdifferenz als „Sektor“ zu bezeichnen, denn auf dem Zeigermessinstrument entspricht ihr gerade ein Sektor. Oder ein Zeitintervall als Winkel, denn auf dem Zifferblatt einer Zeigeruhr entspricht ihm ein Winkel.

Aber noch einmal: Lohnt es sich, darüber zu sprechen? Wenn es nur die Linien und die Bänder wären, wäre das Thema tatsächlich uninteressant. Nicht der Einzelfall „Bandbreite“ ist das Problem, sondern die Tatsache, dass der Physikunterricht (ebenso wie der Chemieunterricht) überladen ist mit ungeschickten, unbedachten, unnötigen Spezialformulierungen.

Warum immer neue Wörter für etwas, das man auch mit den alten sagen kann?

### Herkunft

In der Anfangszeit der Spektroskopie (der wir fast alle Erkenntnisse verdanken, die schließlich zur Quantenphysik geführt haben), waren die „Spektren“, d.h. die Abbildungen des Beugungsspalts das Beobachtungsergebnis – also nicht etwa ein Funktionsverlauf der spektralen Energiestromdichte über der Frequenz. Die entsprechenden Sprechweisen haben sich etabliert und ausgebreitet.

### Entsorgung

Was unser hier gewähltes Beispiel betrifft, so ist es nicht schwer, sich etwas passender auszudrücken: Frequenzintervall oder im Fall des Internetzugangs: Internetzu-

gang mit großen Datenströmen. Oder noch näher an der Umgangssprache: schneller Internetzugang, hohe Datenstromstärke oder große Datenübertragungsrate, Hochleistungszugang ...

Mein eigentliches Anliegen ist aber etwas anderes, als eine neue Bezeichnung vorzuschlagen, was sowieso ganz unrealistisch wäre. Nämlich ein Hinweis auf Frankreich.

Es gibt in Frankreich eine Tradition der Sprachpflege. In Deutschland dagegen scheint die Devise zu sein: Sprache ist, was gesprochen wird, freie Sprache für freie Bürger.

Es würde genügen, dass sich jemand, oder eine Gruppe, Gedanken über die Formulierungen macht, Gedanken, die der, der das Wort eingeführt hat und den man gewöhnlich gar nicht kennt, keine Zeit oder keine Lust hatte, sich zu machen. Ziel sollte es sein, Vorschläge zu machen für eine unprätentiöse, klare Sprache und überflüssige und unklare Bezeichnungen rauszuwerfen, so wie man im Garten das Unkraut entfernt.

Übrigens: Der Breitbandzugang zum Internet heißt auf Französisch: Accès à haut débit. Klarer geht es nicht.

am Ende jenes Jahrhunderts geglaubt, dass man kurz vor der Aufstellung einer Theorie stand, die ein Grundprinzip der damaligen Physik, den Determinismus, in Frage stellt.

Aber auch auf einer viel kürzeren Zeitskala kann man die Unvorhersagbarkeit physikalischer Ergebnisse beobachten: In seiner berühmten Arbeit von 1905 erklärt Einstein, der Äther sei ein überflüssiges Konzept. Zehn Jahre später nimmt er diese Aussage zurück: „Gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie ist ein Raum ohne Äther undenkbar.“ [1]. Ebenfalls in seiner Arbeit von 1905 erklärt Einstein auf den ersten drei Seiten umständlich, dass es ein wichtiges Problem sei, Uhren zu synchronisieren, damit man über die Gleichzeitigkeit von zwei Ereignissen entscheiden kann. Zehn Jahre später zeigt er mit seiner Gravitationstheorie, dass das Synchronisieren von Uhren in einem gekrümmten (d.h. in einem realistischen) Raum prinzipiell unmöglich ist, und dass man im Allgemeinen von Gleichzeitigkeit von zwei Ereignissen an verschiedenen Orten nicht sprechen kann.

Man kann sich die Entwicklung der Physik vorstellen wie das Vordringen in ein noch unbekanntes Land, etwa den amerikanischen Westen im frühen 19. Jahrhundert: Es ging immer dort lang, wo es gerade am bequemsten war. Erst später fand man kürzere Wege und baute Tunnels und Brücken, sodass eine Reise zwischen Ausgangs- und Endpunkt viel schneller ging.

Die Physik ist also nicht gestartet mit dem Ziel, den Zustand zu erreichen, in dem sie sich heute befindet, sondern sie ging immer den Weg, der sich gerade auftat.

Nun wird dieser Zickzack-Weg in der Lehre auf erstaunlich exakte Art nachgegangen — mit schwerwiegenden Konsequenzen:

- Es wird unnötig viel Zeit gebraucht.
- Strukturen und Zusammenhänge, die erst im Rückblick erkennbar sind, werden im Unterricht nicht dargestellt.

Man könnte denken, es sei logisch und vernünftig, die Mängel, die ein solcher Zickzack-Kurs zur Folge hat, zu beseitigen, sobald sie in Erscheinung treten. Das ist aber praktisch nie geschehen. Warum nicht?

Die Lehre der Physik ist verankert in einem System, das sich kleinsten Änderungen widersetzt. Zu diesem System gehören Lehrer, Universitätsprofessoren, Lehrbücher, Lehrpläne, Berufsverbände und anderes mehr. So geschah es, dass die Physik zu einem der konservativsten Schulfächer wurde.

Um das Phänomen besser einordnen zu können, wollen wir die Frage nach den charakteristischen Zeiten verschiedener natürlicher und gesellschaftlicher Entwicklungsprozesse stellen.

Etwa: Wie ist die typische Dauer eines Krieges? (10 Jahre). Wie lange überlebt ein totalitäres Regime

## 1.16 Wozu Physikdidaktik?

### Gegenstand

Der Physikunterricht an Schule und Hochschule folgt bis in viele Details dem historischen Werdegang der heutigen Physik.

### Mängel

Der Aufbau des Fachs ist weitgehend unstrukturiert und unnötig schwierig, und er enthält viel Überflüssiges.

### Herkunft

Die Physik wurde entwickelt — oder entwickelte sich — im Wesentlichen ohne ein bestimmtes Ziel. Allgemeine Motivationen gab es natürlich: das allgemeine Streben nach Erkenntnis und das praktische Streben nach technischem Fortschritt. Was aber die nächste Entdeckung oder Erfindung sein würde, konnte man im Voraus nie wissen. Und so ist es auch heute noch: Man forscht und sucht in alle Richtungen. Vieles führt auch zu nichts, aber kaum jemand erfährt etwas von solchen Misserfolgen.

Niemand konnte zu Newtons Zeit ahnen, dass in 150 Jahren eine Feldtheorie der elektrischen Erscheinungen, die Elektrodynamik, entstehen würde. Niemand konnte im Jahr 1800 voraussehen, dass sich in dem Jahrhundert, das gerade begann, die Statistik zu einem fantastischen Werkzeug der Physik entwickeln würde. Niemand hätte

## Physikbuchautorinnen

(30 Jahre). Wie lange hält sich eine Kleidermode? (2 Jahre). Wie lange hält sich eine Verbrauchergewohnheit, wie etwa das Rauchen (100 Jahre). Wie lange hält sich eine Wetterlage? (einige Tage). Wie lange hält sich eine Religion? (1000 Jahre). Wie lange dauert es, eine neue Technik einzuführen? (5 Jahre). Und schließlich: Wie lange hält sich ein Lehrkonzept?

Die Idee zu dieser Fragestellung und die geschätzten Antworten stammen von einem meiner Kollegen aus der Hochenergiephysik. Es war seine Art, die Trägheit der Lehrkonventionen zu charakterisieren. Seine Antwort auf die letzte Frage war: 300 Jahre.

Bemerkenswert ist hier vor allem der Unterschied der Zeitskalen bei der Einführung eines neuen Lehrkonzepts – einige Hundert Jahre – und einer technischen Neuerung – einige Jahre oder höchstens Jahrzehnte. Man hätte erwarten können, dass sich beide auf der gleichen Zeitskala entwickeln. Tatsächlich ist der Unterschied gewaltig.

Warum kann sich eine technische Entwicklung so schnell durchsetzen, und ein neues Lehrkonzept nicht?

Bei der Technik sorgt eine starke Konkurrenz für eine schnelle Entwicklung. Die Nützlichkeit wird gemessen in Dollar, Euro und Yuan. Wer nicht forschreitet, bleibt zurück. Der Gewinn zahlt sich in einer nahen Zukunft, d.h. in wenigen Jahren aus.

Diese Art von Feedback existiert bei der Lehre offenbar nicht. Ein Lehrbuch, das zu innovativ ist, scheitert daran, dass es nicht zum Lehrplan passt. Die Lehrpläne können nicht wesentlich modernisiert werden, weil man den Lehrern kein Umlernen und Umdenken zutrauen möchte. Ein Hochschulbuch, das zu innovativ ist, hat bei den Verlagen keine Chance, denn es verkauft sich nicht.

Und schließlich noch ein Hindernis: Es fehlt die entsprechende Forschungsstruktur an den Universitäten. Eigentlich, so sollte man meinen, wäre es doch genau die Aufgabe der Fachdidaktik, die Inhalte der Lehre ständig infrage zu stellen, neu zu bearbeiten, neu zu strukturieren, Überflüssiges hinauszuswerfen. Dabei gibt es allerdings ein Problem: Eine solche Aktivität wird von der Fachphysik nicht geschätzt. Und die Fachdidaktik möchte es sich mit denen, die am längeren Hebel sitzen, nicht verderben. So beschäftigt man sich lieber entweder in der Lehr-Lern-Forschung. Damit tut man keinem Fachphysiker etwas zuleide. Oder man macht etwas, das man vielleicht als physikalische Unterhaltungsmusik bezeichnen könnte. Man untersucht und beschreibt nette physikalische Effekte aus Sport und Spiel und dem sonstigen Alltagsleben und macht damit Werbung für das Fach. Dagegen hat die Fachphysik nichts einzuwenden.

### Entsorgung

Man muss nicht nur im, sondern auch mit dem Physikunterricht experimentieren. Nur so kann sich herausstellen, welche Konzepte den aktuellen Problemen gerecht werden.

Dazu braucht man eine kompetente und selbstbewusste Fachdidaktik, die nicht nur darauf schielte, was wohl die Kollegen von der Teilchen- und der Nanophysik denken.

Ihre Aufgabe wäre eine Auseinandersetzung mit Lehrplänen und Lehrprogrammen der Universitäten sowie eine ständige Bearbeitung der Ergebnisse der aktuellen physikalischen Forschung.

Schließlich noch eine Idee, die so gar nicht zur Denkweise von uns Pädagogen und Didaktikern zu passen scheint. (Ich habe sie von einem erfolgreichen Unternehmer.) Man versucht, den Unterricht monetär zu bewerten. Etwa so: Man entwickelt eine neue Unterrichtseinheit über einen akzeptierten Inhalt, die dasselbe leistet, wie eine bereits bestehende. Wenn für die neue Einheit eine Unterrichtsstunde weniger gebraucht wird, so bedeutet das volkswirtschaftlich einen Gewinn. Der lässt sich leicht hochrechnen auf das ganze Land.

[1] A. Einstein, *Äther und Relativitätstheorie*, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1920, S. 12

## 1.17 Physikbuchautorinnen

### Gegenstand

„... entschloss man sich, schnell fahrende Triebfahrzeuge mit Drehstromasynchronmotoren auszustatten. Stromrichter und Thyristoren (Geräte der Leistungselektronik) verwandeln den vom Stromabnehmer aufgenommenen Einphasenwechselstrom zunächst in Gleichstrom, dann in Drehstrom variabler Frequenz. Durch die Stromrichter ist es möglich, beim Bremsen frei werdende Energie als elektrische Energie mit der richtigen Frequenz und Phase ins Netz zurückzuspeisen, wenn die Fahrmotoren als Generatoren geschaltet werden ...“

### Mängel

Ich möchte hoffen, dass jeder Lehrbuchautor der Meinung ist, solche Sätze würden ihm nie aus der Feder fließen. Und doch stammen sie aus einem Schulphysikbuch. Sie sind mein Demonstrationszitat für die Vorlesung, wenn ich meinen Studentinnen und Studenten zu zeigen versuche, warum es gar nicht überraschend ist, dass die Physik (im Verein mit der Chemie)

zu den unbeliebtesten Schulfächern gehört. Der Satz ist zwar nicht typisch — Gott sei Dank —, aber er ist eine extreme Ausprägung eines Stils, der typisch ist.

Im Sek-I-Physik-Unterricht werden etwa 2000 Fachausdrücke eingeführt. Das entspricht dem Grundwortschatz einer Fremdsprache. Ich empfehle dringend, die Arbeiten von G. Merzyn über die entsprechenden Untersuchungen zu lesen [1]. Danach ist in einem Durchschnittsschulbuch jedes 6. Wort ein Fachausdruck (unser Rekordzitat oben schafft es auf jedes dritte Wort). Die Hälfte aller Fachausdrücke wird nur ein einziges Mal benutzt. Merzyn beschreibt den misslichen Zustand in gemäßigten Worten. Ich meine, ein Aufschrei wäre angebracht! Ganz unabhängig von seinen sonstigen Qualitäten, kann ein Physik- (oder auch Chemie-) Buch seinen Zweck nicht erfüllen, solange dieser Missstand nicht behoben ist.

Ich räume allerdings ein, dass es eine Minderheit unter den Lernenden gibt, die eine Begabung dafür haben, das Geschwurbel nachzusprechen — eine Beobachtung, die ich bei Studenten an der Universität gelegentlich mache. Das kann durchaus vorteilhaft sein: Je üppiger die Sprache, desto weniger fällt auf, dass man nichts verstanden hat. Besonders förderlich für das Bestehen der mündlichen Prüfung.

### Herkunft

Ein Verhaltensforscher würde sprachliches Imponiergehabe diagnostizieren, wie man es bei männlichen Primaten antrifft.

Oder können Sie sich, liebe Leserin und lieber Leser, vorstellen, dass der zitierte Text von einer Frau geschrieben wurde? Ich weiß nicht, wer ihn geschrieben hat, aber unter den 16 AutorInnen des Buches befand sich keine einzige Autorin.

### Entsorgung

Man verstehe mich nicht falsch. Ich möchte nicht, dass man sich mit einer Kinder- oder Jugendsprache bei den Lernenden anbiedert. Die Sprache soll einfach und klar sein. Ein erster Schritt könnte sein: aus einem Lehrbuch die Hälfte aller Fachausdrücke streichen. Das geht nicht? Gewiss geht es, siehe oben: 50 % der Fachausdrücke werden nie wieder gebraucht. Und wenn man einmal Spaß am Rauswerfen gefunden hat, geht es immer besser, und man sieht, dass man die verbleibende Hälfte noch einmal reduzieren kann. Man wird sich am Ende wundern, wie klar alles geworden ist.

Ein praktischer Vorschlag für die Autoren: Geben Sie den Text Ihrer Frau zum Lesen. Sie soll jedes Wort, dessen Bedeutung sie nicht kennt, anstreichen. (Das könnte natürlich auch die Lektorin des Verlags machen.)

Ein weiterer Vorschlag: Für die Maximalzahl an Fachausdrücken wird eine Obergrenze festgelegt. Diese könnte bei der Zulassung des Schulbuchs leicht kontrolliert werden. Sie sollte natürlich deutlich unter der Zahl der Vokabeln im Fremdsprachenunterricht liegen.

[1] G. Merzyn, *Fachbestimmte Lernwege zur Förderung der Sprachkompetenz*, [https://www.schulentwicklung.nrw.de/cms/upload/sprachsensibler\\_FU/Fachbestimmte\\_Lernwege\\_zur\\_Foerderung\\_der\\_Sprachkompetenz\\_Naturwissenschaften\\_Mercyn.pdf](https://www.schulentwicklung.nrw.de/cms/upload/sprachsensibler_FU/Fachbestimmte_Lernwege_zur_Foerderung_der_Sprachkompetenz_Naturwissenschaften_Mercyn.pdf)

## 1.18 Mechanik versus Wärmelehre

### Gegenstand

Die Mechanik ist der wichtigste Teil der Physik, ihre Grundlage. Die Wärmelehre dagegen ist eine von mehreren, weniger wichtigen Teildisziplinen. Man sieht es an Lehrplänen, Studienplänen und Lehrbüchern. So umfasst das Studium des Lehramts Physik an einer typischen Universität 6 Semesterwochenstunden (SWS) Mechanik, aber nur 2,5 SWS Thermodynamik. In Lehrbüchern der Hochschule und der Schule ist das Verhältnis ähnlich.

Dass die Mechanik in der Physik eine herausragende Stellung einnimmt, wird auch oft explizit gesagt, etwa in einem Schulbuch im Zusammenhang mit der Gleichung  $F = m \cdot a$ : „Dies ist nun wirklich die wichtigste Aussage in diesem Buch, sie hat ab 1686 die Welt verändert.“

### Mängel

Die Thermodynamik ist nicht nur laut Lehr- oder Studienplan kürzer. In manchen Bundesländern hat sie im Lehrplan gar keinen Platz gefunden. Es kommt noch hinzu, dass das, was in den Plänen vorgesehen ist, gewöhnlich nicht erfüllt wird. Wenn sie in der Schule im Lehrplan steht, so ist sie vorgesehen für die Klasse 11, nach der Mechanik, also für den letzten Teil des Schuljahres. Dort gerät sie dann aber im Trubel der vielen Feiertage, der Projekttage und der Hektik am Schuljahresende leicht unter die Räder. Ähnlich ist es an der Universität: Vorgesehen ist die TD in einem Semester zusammen mit der Optik. Man beginnt mit der Optik, aber die Zeit wird knapp, und die Thermodynamik hat das Nachsehen. So kommt es, dass viele Schüler die Schule, und manche Studenten der Physik die Hochschule als thermodynamische Analphabeten verlassen.

## Direkte und indirekte Messung

Aus heutiger Sicht verdient die Mechanik nicht diese Vorzugsstellung. Und die Thermodynamik verdient es nicht, in der Schmuddelecke zu stehen.

Warum soll gerade die Gleichung  $F = m \cdot a$  so wichtig sein? Sie ist im Wesentlichen Newton's zweites Gesetz, nämlich  $F = dp/dt$ , welches die Impulserhaltung ausdrückt. Das Impulserhaltungsgesetz ist aber nicht einzigartig; es gibt entsprechende Gesetze für die Energie, den Drehimpuls und die elektrische Ladung. Und in die Reihe gehört auch das besonders wichtige Gesetz, das eine Aussage über die Nichterhaltung der Entropie macht: Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden.

### Herkunft

Besser als Ernst Mach 1883 kann man es auch heute nicht ausdrücken: „Wenn die französischen Encyklopädisten des 18. Jahrhunderts dem Ziel nahe zu sein glaubten, die ganze Natur physikalisch-mechanisch zu erklären, wenn Laplace einen Geist fingirt, welcher den Lauf der Welt in alle Zukunft anzugeben vermöchte, wenn ihm nur einmal alle Massen mit ihren Lagen und Anfangsgeschwindigkeiten gegeben wären, so ist diese freudige Ueberschätzung der Tragweite der gewonnenen physikalisch-mechanischen Einsichten im 18. Jahrhundert verzeihlich, ja ein liebenswürdiges, edles, erhebenches Schauspiel, und wir können diese intelectuelle, einzig in der Geschichte dastehende Freude lebhaft mitempfinden.“

Nach einem Jahrhundert aber, nachdem wir besonderer geworden sind, erscheint uns die projectirte Weltanschauung der Encyklopädisten als eine mechanische Mythologie im Gegensatz zur animistischen der alten Religionen. Beide Anschauungen enthalten unbührlische und phantastische Uebertreibungen einer einseitigen Erkenntnis.“

### Entsorgung

Sie ist nicht leicht, denn es gibt eine lange Lehrtradition. Man könnte versuchen, beim Rückbau der Mechanik mit der Kinematik zu beginnen.

## 1.19 Direkte und indirekte Messung

### Gegenstand

Man unterscheidet oft zwischen direkten und indirekten Messungen. Hierzu drei Zitate:

1 „Unter direkten Messungen versteht man solche, deren Ergebnis unmittelbar am Messmittel ables-

bar ist, beispielsweise Messungen mit Lineal, Winkelmaß oder Maßband. Bei indirekten Messmethoden liegt das Resultat erst nach einigen Zwischenstufen vor ..., z.B. Temperaturbestimmung von Sternen aus deren elektromagnetischen Spektren.“

2 „Eine physikalische Größe wird direkt gemessen, wenn man ihren Wert durch Vergleich mit einer Größe desselben Typs, die als Normal genommen wird, erhält. ... Eine physikalische Größe wird indirekt gemessen, wenn ihr Wert mithilfe einer geeigneten mathematischen Beziehung aus anderen physikalischen Größen berechnet wird.“

3 „Das direkte Messen einer physikalischen Größe erfolgt durch Vergleich mit einem vorher definierten Maßstab (Messgröße und Messstandard). Ist ein direkter Vergleich unmöglich oder zu aufwendig, wird indirekt gemessen. Dazu wird eine leicht zugängliche Größe bestimmt, die mit der Messgröße in einer wohlbekannten Beziehung steht.“

### Mängel

Eine Unterscheidung zwischen direkter und indirekter Messung wird offenbar für so wichtig gehalten, dass man die Klassifizierung ausdrücklich erklärt. Ein Vergleich unserer Zitate zeigt allerdings, dass die Definitionen nicht übereinstimmen. So ist die einfache Frage, ob eine Spannungsmessung mit einem Galvanometer eine direkte oder indirekte Messung ist, schon schwer zu beantworten. Wie lautet dann aber die Antwort, wenn man die Spannung mit einem Digitalvoltmeter misst, oder wenn man sie über CASSY am Bildschirm anzeigen lässt? Ist eine Energiestrommessung mit einem klassischen Wattmeter (mit Strom- und Spannungsspule) eine direkte oder indirekte Messung? Wie steht es bei der Messung einer elektrischen Ladung oder auch einer elektrischen Spannung mit einem Elektroskop?

Man sieht, dass diese Fragen nicht nur schwer zu beantworten sind, sondern auch, dass ihre Beantwortung keinerlei Folgen hat und kein Problem löst. Manchmal ist ein Klassifizieren nützlich, weil es gedankliche Ordnung schafft. Aber auch das ist hier nicht der Fall.

### Herkunft

Wohl aus einer Zeit, als Messgeräte noch sehr einfach gebaut waren. Aber auch damals war der Begriff entbehrlich.

### Entsorgung

Man kann schon einmal sagen, dass man etwas „direkt“ gemessen hat, wenn man das Wort in seiner einfachen

umgangssprachlichen Bedeutung benutzt. Man würde es einfach dann sagen, wenn man den Messwert direkt irgendwo abliest, egal, welche Tricks in dem Messsystem zur Anwendung kommen. Man würde es genau so sagen, wie man etwa sagen könnte, man ist auf direktem Wege hergekommen. Niemand würde verlangen, dass man eine allgemeingültige Definition des direkten Weges gibt.

## 1.20 Einheit – Gleichheit – Vielfachheit

### Gegenstand

Physikalische Größen, die man nicht aus anderen Größen ableitet, die sogenannten Basisgrößen, werden über eine Messvorschrift definiert. Das Verfahren besteht aus drei Teilen: 1. Es wird eine Einheit festgelegt. 2. Es wird erklärt, wie man feststellt, ob die Werte der Größe an zwei Systemen gleich sind (Gleichheit). 3. Es wird erklärt, was ein Vielfaches oder ein Bruchteil der Einheit bedeutet (Vielfachheit) (siehe etwa [1] oder [2]).

### Mängel

Wer sich mit dem axiomatischen Aufbau der Physik beschäftigt, mag in dieser Einführung von „Grundgrößen“ eine gewisse Schlässigkeit und auch Ästhetik sehen. Für denjenigen, der die Disziplin als Anfänger und Nichtspezialist kennenlernen, ist das Verfahren aber eher unpassend. Tatsächlich werden Größen in Physikbüchern auch nur selten in aller Strenge nach diesem Verfahren eingeführt. Überbleibsel des Verfahrens findet man aber noch oft, manchmal sogar als hervorgehobene Lehrsätze. So wird es gern in der Mechanik bei der Einführung der Kraft angewendet („Zwei Kräfte sind gleich groß, wenn sie denselben Körper gleich stark verformen“), und in der Wärmelehre zur Einführung der Temperaturskala („Der Abstand zwischen Eispunkt und Siedepunkt wird in hundert gleiche Teile eingeteilt“).

Wir wollen versuchen, die drei Teilschritte in ihrer Bedeutung für den Unterricht zu bewerten.

- Die Festlegung der Einheit: Dass eine Einheit definiert sein muss, ist eine Selbstverständlichkeit. Wie sie in den verschiedensten Fällen festgelegt wird, kann für den Berufsphysiker wichtig sein. Trotzdem ist es aber im Wesentlichen nur eine technische Frage. Das Verfahren muss eine präzise Reproduktion ermöglichen und ist im Allgemeinen kompliziert. Wenn wir im Unterricht eine Größe neu einführen und uns um die Bildung einer Anschauung bemühen, ist seine Kenntnis aber nicht nur hilfreich.

Die Voraussetzungen für ein Verständnis des Verfahrens sind oft noch nicht vorhanden.

- Die Erklärung der Gleichheit: Dass sie überhaupt ein Problem darstellen kann, ist im Anfängerunterricht nur schwer zu vermitteln. Außerdem würde man sofort sehen, dass die angeführten Gleichheitserklärungen gar nicht praktikabel sind. Wenn etwa gesagt wird, zwei Kräfte seien gleich, wenn sie an einen Körper die gleiche Verformung verursachen, wie soll man dann die Gleichheit feststellen, wenn etwa die eine diejenige Kraft ist, die ein Proton auf ein Elektron ausübt?
- Die Erklärung der Vielfachen-Bildung scheint der physikalisch wichtigste der drei Schritte zu sein. Sagt er uns nicht etwas über das Wesen der Größe aus? Wir kennen alle das Problem der Temperaturskala. Definiert man die Vielfachen über die Ausdehnung des Quecksilbers, so erhält man eine andere Temperaturskala, als wenn man sie über die Ausdehnung einer anderen Flüssigkeit oder eines Gases erklärt, und diese ist wieder anders als die thermodynamische Temperaturskala. Tatsächlich ist aber die Temperaturskala ein Sonderfall. Die Komplikationen, die hier zunächst aufgetreten waren, existieren längst nicht mehr. Die Erklärung der Vielfachen einer Einheit ist nämlich in den meisten Fällen trivial. Sie ist trivial für die geometrischen Größen Länge, Flächeninhalt und Volumen sowie für die Zeit. Sie ist außerdem trivial für alle extensiven Größen, d.h. Masse, Energie, Impuls, Entropie, elektrische Ladung etc. (das Volumen wurde schon genannt): Man konstruiert ein Vielfaches des Wertes einer dieser Größen an einem System  $S_1$ , indem man eine identische Kopie  $S_2$  des Systems erzeugt und sie mit dem ersten System zu einem neuen System  $S_{1,2}$  zusammenfasst. An  $S_{1,2}$  ist der Wert aller extensiver Größen doppelt so groß wie an  $S_1$  oder  $S_2$ . Aus diesen Vielfachendefinitionen folgt aber auch die aller anderen Größen, die sich als Produkte oder Quotienten hieraus ergeben, d.h. aller Ströme, intensiven Größen, Dichten, Stromdichten, Feldstärken usw.
- Der einzige Fall, bei dem die Vielfachenbildung problematisch zu sein scheint, wird dann auch in manchen Lehrbüchern entsprechend ausgewalzt: die Temperaturskala. Tatsächlich war die Festlegung der Temperaturskala einmal eine Art Schandfleck im Lehrgebäude der Physik: Sie war abhängig von den speziellen Eigenschaften einer willkürlich gewählten Substanz. Nun ist aber diese Unstimmigkeit längst beseitigt: Die Temperaturskala ist festgelegt über den Quotienten aus Energie- und Entropieänderung (als „Energie pro Entropie“)

## Zur Messgenauigkeit

$$T = \left( \frac{\partial E(S, V, n, \dots)}{\partial S} \right),$$

ähnlich wie die elektrische Spannung über „Energie pro Ladung“ oder das chemische Potenzial über „Energie pro Stoffmenge“ definiert ist.

Wir schließen aus all dem, dass das Drei-Schritt-Verfahren der Definition einer Grundgröße mit keinen besonderen Einsichten verbunden ist, ja, dass es leicht als Sophisterei empfunden werden kann.

Es sei nebenbei erwähnt, dass das Verfahren ohnehin nicht so funktioniert, wie es oft vorgestellt wird. Es wird einem ja nahegelegt, dass man einen Minimalsatz von Größen nach dem oben beschriebenen Verfahren definieren muss, also operational, oder durch Angabe einer Messvorschrift. Aber das trifft so gar nicht zu, und wird tatsächlich auch gar nicht immer so gehandhabt. Ein Beispiel ist wieder die Temperatur: Das Kelvin, also die Einheit der Temperatur, ist festgelegt als der 273,16-te Teil des Temperaturintervalls zwischen dem absoluten Nullpunkt und dem Tripelpunkt des Wassers. Das Kelvin ist also eine Basiseinheit. Die Vielfachen der Einheit (die Temperaturskala), sind aber, wie schon erwähnt wurde, festgelegt über den Quotienten aus Energie- und Entropieänderung. Die Vielfachenbildung wird also zurückgeführt auf die der extensiven Größen Energie und Entropie. Die Größe Temperatur erscheint damit als abgeleitete Größe, während ihre Einheit eine Basiseinheit ist. Um diese Abweichung von der behaupteten Drei-Schritt-Regel zu beseitigen, begibt sich die Schulphysik manchmal etwas außerhalb der Legalität: Man erklärt sowohl die Einheit als auch die Vielfachen über die längst ausgemusterte Quecksilberskala [3].

### Herkunft

Eine Neigung zu Strenge und Formalisierung an der falschen Stelle.

### Entsorgung

Man zeigt, wenn immer es möglich ist, wie man eine Größe messen kann. Dabei ist es nicht unbedingt notwendig, dass die Funktionsweise des Messgeräts verstanden wird. Es genügt oft, dass man durch Experimentieren Vertrauen in das Messgerät oder Messverfahren erzeugt. Messverfahren werden behandelt unabhängig davon, ob eine Größe in einem gedachten axiomatischen Aufbau als Grundgröße fungiert oder nicht. Ferner stellt man typische Werte der Größen an bekannten Systemen vor. Also etwa beim Druck: der Druck der atmosphärischen Luft, der Druck in der Wasserleitung, in einem Autoreifen, im Innern der Erde ...

Man formuliert bei der Kraft keine Lehrsätze über Gleichheit und Vielfachheit. Die Temperaturskala führt man, analog zur Skala der elektrischen Spannung, ein über Energie pro Entropie.

- [1] R. Götz, H. Dahnke, F. Langensiepen (Hrsg.): *Handbuch des Physikunterrichts*, Band 1: Mechanik, Aulis Verlag, Köln, 1990, S. 51
- [2] U. Backhaus, H. J. Schlichting: *Vom didaktischen Wert physikalischer Grundgrößen*, Physik und Didaktik 3, 1979, 218 – 225
- [3] F. Herrmann, *Vorläufige Temperaturskalen*, Altlasten der Physik

## 1.21 Zur Messgenauigkeit

### Gegenstand

„Eine Messung ist die empirische Bestimmung des tatsächlichen Wertes einer physikalischen Größe.“

### Mängel

Die Messung der Werte physikalischer Größen gehört zu den Standardaufgaben oder -beschäftigungen der Physik. Man misst, um den Zusammenhang zwischen zwei oder mehreren Größen zu ergründen oder zu prüfen. Nun wird mit der Begründung der Notwendigkeit von Messungen oft der folgende Eindruck erweckt: Vor der Messung kennt man den Wert nicht, nach der Messung kennt man ihn. Es gibt also zwei Situationen oder Zustände: „nicht gemessen“ und „gemessen“. Unser Zitat zeigt, dass man davon ausgeht, es gebe einen tatsächlichen Wert. Manchmal wird auch betont, dass unsere Wahrnehmung ungenau und unzuverlässig ist und man daher Messungen machen muss.

Diese Sicht der Dinge ist in zweierlei Hinsicht etwas unpassend. Erstens ist es nicht so, dass man vor der Messung nichts über den Wert der zu messenden Größe wüsste, und zweitens ist es auch nicht so, dass man nach der Messung den Wert genau kennt. Vielmehr weiß man vor einer Messung immer, dass der Wert in einem bestimmten, wenn auch manchmal sehr großen Intervall liegt, und nach der Messung weiß man auch nur, dass der Wert der Größe in einem Intervall liegt. Wenn die Messung überhaupt eine Messung war, so ist das Intervall nach der Messung kleiner als das vorher. Wenn die Größe des Intervalls durch die Messung stark abgenommen hat, so war es eine gute Messung, wenn es nur wenig abgenommen hat, so war die Messung nicht so erfolgreich.

Man kann aufgrund dieser Überlegung auch ein Maß für die Güte einer Messung der Größe  $X$  definieren, etwa den Quotienten aus dem Unsicherheitsintervall vor und dem nach der Messung

$$\frac{X_{v2} - X_{v1}}{X_{n2} - X_{n1}}.$$

Der Index  $v$  bedeutet vor, der Index  $n$  nach der Messung. Ein besseres Maß ist der Zweierlogarithmus dieser Größe

$$M = \ln\left(\frac{X_{v2} - X_{v1}}{X_{n2} - X_{n1}}\right) \text{bit}, \quad (1.1)$$

denn er stellt gleich den Informationsgewinn in Bit dar. Er sagt uns, um wie viel Bit die Datenmenge des Messwerts durch die Messung zugenommen hat. Nehmen wir an, es sei vor einer Messung bekannt, dass der Wert einer Größe zwischen 10 und 12 liegt. Nach der Messung weiß man, dass er zwischen 10,6234 und 10,6236 liegt. Dann ist

$$M = \ln\left(\frac{12 - 10}{10,6236 - 10,6234}\right) \text{bit} = 13,3 \text{bit}.$$

Dass die Messung etwas gebracht hat, war von Anfang an zu erkennen. Die Rechnung sagt uns, dass der Messapparat 13 bit liefert hat<sup>1</sup>.

## Herkunft

Es scheint eine Gewohnheit zu sein, eine Messung als gut einzustufen, wenn die Messgenauigkeit etwa 1 % bis 5 % ist. Schlecht ist sie, wenn die Messgenauigkeit zum

<sup>1</sup>Die Gleichung gilt nur, solange die Unsicherheit klein gegen den Messwert ist. Sie lässt sich aber verallgemeinern für den Fall, in dem das nicht mehr zutrifft.

$$M = \ln\left(\frac{\lg \frac{X_{v2}}{X_{v1}}}{\lg \frac{X_{n2}}{X_{n1}}}\right) \text{bit}.$$

Wir nehmen an, es sei bekannt, dass die Anzahl der Protonen im Weltall zwischen  $10^{70}$  und  $10^{90}$  liegt. Jemand schließt nun aufgrund einer kosmologischen Messung, dass der Wert zwischen  $10^{75}$  und  $10^{85}$  liegt. Die Formel sagt uns dann, dass wir

$$M = \ln\left(\frac{\lg 10^{20}}{\lg 10^{10}}\right) \text{bit} = \ln 2 \text{bit} = 1 \text{bit}$$

gewonnen haben. Für den Fall, dass die Unsicherheit klein gegen den Messwert ist, geht diese allgemeine Gleichung in Gleichung (1.1) über.

Beispiel 30 % ist. Diese Einschätzung ist recht willkürlich. Sie hängt wohl damit zusammen, dass die alten Zeigermessinstrumente eine Genauigkeit von einigen Prozent hatten. Und wohl auch damit, dass wir etliche Größen wie Entfernung, Geschwindigkeiten und Gewichte mithilfe unserer Sinnesorgane mit einer Genauigkeit von 10 % bis 50 % bestimmen können. Eine Messung, so die Idee, ist aber nur etwas, was man mithilfe eines Messgeräts und nicht mithilfe unserer Sinnesorgane bewerkstellt.

## Entsorgung

Wir empfehlen mehr Mut zu Messungen, die man oft als ungenau abtut. Eine Messung mithilfe unserer Sinnesorgane muss keine schlechte Messung sein. Und eine Messung mithilfe der Geräte aus der Sammlung muss keine schlechte Messung sein, auch wenn der Messwert von dem Literaturwert abweicht. Man kann die Schüler vor einer Messung das Ergebnis schätzen lassen, und zwar mit Unsicherheitsintervall. Dann misst man und schätzt das neue Unsicherheitsintervall ab. So sieht man, dass die Messung etwas gebracht hat. Vor allem mache man aus der Messerei kein Dogma. Viele Generationen von Physikern und Physiklehrern sind an der Uni im Praktikum mit übertriebenen Fehlerbetrachtungen gequält worden.

## 1.22 Erhaltungssätze

### Gegenstand

Zu jeder extensiven Größe lässt sich ein Satz aussprechen, der ihre Erhaltung oder Nichterhaltung behauptet. Manche extensiven Größen befolgen (soweit wir es wissen) einen universellen Erhaltungssatz: die Energie, der Impuls, der Drehimpuls, die elektrische Ladung, die Leptonenzahl, die Baryonenzahl, die Farbladung. Von einer Größe wissen wir, dass für sie ein „halber Erhaltungssatz“ gilt: Die Entropie kann zwar erzeugt, aber nicht vernichtet werden. Jede nicht allgemein erhaltene Größe bleibt aber unter bestimmten Umständen erhalten. So verhält sich die Entropie bei reversiblen Prozessen wie eine Erhaltungsgröße. Die Stoffmenge bleibt allgemein nicht erhalten, aber es gibt viele Vorgänge, bei denen sich ihr Wert nicht ändert.

### Mängel

Wenn man die extensiven Größen in den Vordergrund stellt, gelangt man zu einer Darstellung der Physik, in der die verschiedenen Teilgebiete dieselbe Struktur haben. Mechanik, Wärmelehre, Elektrizitätslehre und

## Abgeschlossene Systeme

Chemie erscheinen als Spezialfälle eines einheitlichen Begriffssystems, das auf alle Teilgebiete passt. Damit man diese Strukturverwandtschaft sinnvoll nutzen kann, ist es notwendig, dass die verschiedenen, zueinander analogen physikalischen Größen auch auf analoge Art behandelt werden. Und hierzu gehört es, dass man mit der Erhaltung bzw. Nichterhaltung der verschiedenen extensiven Größen auf gleiche Art umgeht. Das ist jedoch keineswegs üblich.

So wird die Erhaltung der Energie als eines der wichtigsten Prinzipien der Physik überhaupt dargestellt. Die Erhaltung des Impulses wird in ein merkwürdig kompliziertes Gewand, die Newton'schen Axiome, gekleidet, sodass man die einfache Aussage gar nicht mehr erkennt. Ganz anders wieder die elektrische Ladung: Über ihre Erhaltung verliert man gewöhnlich kein Wort, sie wird als selbstverständlich vorausgesetzt. Die einfache Aussage, dass Entropie erzeugt, aber nicht vernichtet werden kann, findet man in den Schulbüchern manchmal nur im Kleingedruckten, meist aber an einer Stelle, zu der der Unterricht ohnehin nicht mehr vordringt. Die Nichterhaltung der Stoffmenge wird nie als Satz formuliert, ebenso wenig die Tatsache, dass Stoffmengen für bestimmte Prozessklassen erhalten sind. Statt die nützlichen und einfachen Erhaltungssätze, die man aus Kern- und Teilchenphysik kennt, zu formulieren und anzuwenden, verschwendet man kostbare Unterrichtszeit mit der Diskussion von Einzelheiten spezieller Strahlungsmessgeräte.

### Herkunft

Die Sätze über Erhaltung bzw. Nichterhaltung extensiver Größen sind ein Spiegel der historischen Entwicklung der Physik. War das Entdecken und das Formulieren eines solchen Satzes schwierig und langwierig, oder wurde die Gültigkeit des Satzes längere Zeit infrage gestellt, so wird auch für die Behandlung im Unterricht viel Zeit angesetzt und der Satz wird als besonders wichtig dargestellt. Das deutlichste Beispiel hierfür ist der Energieerhaltungssatz. Man könnte anführen, dass der Energieerhaltungssatz die Menschen deshalb so fasziniert, weil er etwas verbietet, womit man viel Geld machen könnte. Das mag zutreffen. Es würde aber auch für die Fantasielosigkeit der Perpetuum-Mobile-Möchtegern-Erfinder sprechen. Denn sicher könnte man auch mit der Verletzung irgendeines anderen Erhaltungssatzes Geld machen.

Ging die Entdeckung eines Erhaltungs- oder Nichterhaltungssatzes schnell, und wurde die Aussage historisch nicht bezweifelt, so wird der Satz auch im Unterricht schnell oder gar nicht behandelt.

### Entsorgung

Der Unterricht würde gewinnen, wenn man

- 1 die Erhaltung bzw. Nichterhaltung für jede extensive Größe klar formuliert;
- 2 der Wichtigkeit der Erhaltung bzw. Nichterhaltung besser Rechnung trägt (vor allem im Fall von elektrischer Ladung, Stoffmenge, Leptonenzahl und Baryonenzahl);
- 3 die Wichtigkeit der Erhaltung aber auch nicht übertritt (wie bei der Energie).

## 1.23 Abgeschlossene Systeme

### Gegenstand

Um die Erhaltung der Energie und auch anderer Größen zu formulieren, bezieht man sich oft auf ein abgeschlossenes System. Man kann sich darunter einen Raumbereich vorstellen, durch dessen Begrenzungsfäche kein Strom der entsprechenden Größe fließt. Die Zitate 1 und 2, die sich auf die Erhaltung der Energie beziehen, entstammen zwei Schulbüchern für die Oberstufe.

- 1 Merksatz: „In einem thermisch und mechanisch abgeschlossenen System ist die Gesamtenergie konstant.“
- 2 Merksatz: „In einem abgeschlossenen System ist die Summe aller Energien stets konstant. Die Gesamtenergie bleibt erhalten.“

$$E_{\text{gesamt}} = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_1^n E_i = \text{konstant}$$

$E_1 + E_2 + \dots + E_n$  verschiedene Energieformen “

### Mängel

Das Konzept der Erhaltung einer extensiven oder mengenartigen Größe ist kein schwieriges Konzept. Das hat damit zu tun, dass man sich von diesen Größen eine einfache Anschauung bilden kann: Man stellt sie sich vor als eine Art Fluidum oder Substanz. Die Erhaltung einer Größe  $X$  lässt sich dann so formulieren: „ $X$  kann weder erzeugt, noch vernichtet werden“.

Dabei kommt es nicht auf den genauen Wortlaut an. Die Erhaltung ist etwas, was man bequem mit dem Vokabular der Umgangssprache formulieren kann.

Es ist eine Folge dieser Aussage, dass sich der Wert von  $X$  in einem gedachten Raumbereich nur dadurch ändern kann, dass ein Strom von  $X$  in den Bereich hinein oder aus ihm heraus fließt. Mathematisch kann man diesen Sachverhalt so ausdrücken:

$$\frac{dX}{dt} + I_x = 0$$

Hier ist  $dX/dt$  die zeitliche Änderung des Wertes von  $X$  in einem Raumbereich und  $I_X$  der Strom von  $X$  durch die Oberfläche des Bereichs.

Die Formulierungen der Energieerhaltung, in denen auf ein abgeschlossenes System Bezug genommen wird, sind ein Spezialfall dieser Aussage. „Ein System ist abgeschlossen“ bedeutet ja, dass kein Strom durch seine Oberfläche fließt. Die Abgeschlossenheit ist aber eine unnötige Einschränkung, denn erhalten sind die betrachteten Größen unabhängig davon, ob das System abgeschlossen ist oder nicht.

Um mich davon zu überzeugen, dass die Anzahl meiner Schülerinnen und Schüler „erhalten“ ist, brauche ich nicht die Klassenzimmertür zu schließen. Es stört nicht, dass ab und zu mal jemand hinausgeht oder hereinkommt, solange ich feststelle, dass die Schülerzahl nur dadurch abnimmt, dass jemand hinausgeht, und dass sie nur dadurch zunimmt, dass jemand hereinkommt.

### Herkunft

Dass man die Erhaltung formuliert, indem man sich auf ein abgeschlossenes System bezieht, ist ein Überbleibsel der mühevollen Entwicklung einer mengenartigen Vorstellung von der Energie. Noch bis kurz vor Beginn des 20. Jahrhunderts war die Lokalisierbarkeit der Energie nicht erwiesen. Man war noch nicht in der Lage, ihr eine Dichte, einen Strom und eine Stromdichte zuzuordnen. In einem geschichtlichen Überblick aus dem Jahr 1887 schreibt Max Planck [1]: „... denn nach der Definition wird der Betrag der Energie nur durch diese äußeren Wirkungen gemessen, und wenn man daher der Energie in Gedanken irgendein materielles Substrat unterlegen will, so hat man dasselbe in der Umgebung des Systems zu suchen; hier allein findet die Energie ihre Erklärung und folglich auch ihre begriffliche Existenz. Solange man von der äußeren Wirkung eines materiellen Systems ganz abstrahrt, kann man auch von seiner Energie nicht reden, da sie dann nicht definiert ist ... Nun sehen wir andererseits aus der zuletzt abgeleiteten Form des Prinzips, dass die Energie eines Systems konstant bleibt, wenn ein mit ihm ausgeführter Prozess keine äußeren Wirkungen hervorruft, mögen die inneren Wirkungen noch so ausgedehnt und verschiedenartig sein. Dieser Satz führt uns dazu, die in einem System enthaltene Energie als eine begrifflich von den äußeren Wirkungen unabhängig bestehende Größe aufzufassen.“ Und später: „Indessen ist doch ... unverkennbar, dass mit der hier in Rede stehenden substanzien Deutung des Begriffes der Energie nicht nur eine Vermehrung der Anschaulichkeit, sondern auch ein direkter Fortschritt

in der Erkenntnis verbunden ist. ... Sobald man aber auf diese Frage eingeht, nimmt die Unbestimmtheit, die vorher im Begriffe selber lag, die Form eines der Lösung fähigen physikalischen Problems an ...“ Diese Lösung kam wenige Jahre später von Gustav Mie [2]. Er zeigte, dass man den Energieerhaltungssatz lokal formulieren kann, nämlich in Form einer Kontinuitätsgleichung. Spätestens von jetzt an war die merkwürdige Trennung von System und den nur in der Umgebung beobachtbaren Wirkungen nicht mehr nötig.

Es hatte also etwa 50 Jahre gedauert, bis der Nachweis des Mengencharakters der Energie erbracht war. Die Erwartung, dass die Größe diese Eigenschaft hat, war aber von Anfang an vorhanden. Ostwald [3] würdigte in seinem 1908 erschienenen Büchlein *Die Energie* die Arbeit von Robert Mayer mit den folgenden Wörtern: „Für unsere allgemeine Untersuchung ist das Wesentlichste, was Mayer geleistet hat, die substanziale Auffassung dessen, was er Kraft nennt, d. h. der Energie. Diese ist ihm durchaus eine Wirklichkeit, ein Wesen bestimmter und eigener Art; gerade die Unzerstörbarkeit und Unerstichtbarkeit kennzeichnet seine Wirklichkeit.“

### Entsorgung

Einen Erhaltungssatz der mengenartigen Größe formuliert man etwa so: „Energie, Impuls, Drehimpuls, elektrische Ladung ... kann weder erzeugt noch vernichtet werden.“ Ebenso wichtig sind aber auch Aussagen über die Nichterhaltung einer mengenartigen Größe, zum Beispiel: „Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden.“

[1] M. Planck, *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*, B. G. Teubner, Leipzig, 1908, S. 115

[2] G. Mie, *Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung*, Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, CVII, Band VIII, Heft, 1898, S. 1113

[3] W. Ostwald, *Die Energie*, Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1908, S. 59

## 1.24 Teilchen überall

### Gegenstand

1 „Jedes Mal, wenn die Moleküle des heißen Wasserdampfes gegen eine zurückweichende Schaufel des Laufrades stoßen, geben sie einen Teil ihrer Bewegungsenergie an diese ab und prallen mit verminderter Geschwindigkeit zurück.“

## Wechselwirkung

- 2 „Infolge der großen Wellenlänge und der geringen Reibung zwischen den Wassermolekülen wird ein Tsunami kaum gedämpft ...“
- 3 „Da die Nachfrage nach Elektrizität oft am geringsten ist, wenn der Wind am stärksten bläst, muss Dänemark seinen Überschuss an Elektronen für Pfen-nige an Nachbarländer verkaufen ...“

### Mängel

Zum ersten Zitat: In der Turbine bekommen nur sehr wenige Moleküle die Schaufel zu spüren. Also „die“ Moleküle ist etwas übertrieben. „Einige sehr wenige Moleküle“ wäre richtig. Zum zweiten Zitat ist zu sagen, dass Moleküle nicht rau sind, und nicht aneinander reiben. Zum dritten Zitat (aus einer sehr angesehenen wissenschaftlichen Zeitschrift): Ein physikalisch gebildeter Mensch wird verstehen, was gemeint ist, nämlich etwas anderes als gesagt wird. (Bei einem Wechselstrom mit einer typischen Stromdichte zittern die Elektronen gerade mal einige Mikrometer vor und zurück. Zu sagen, dass sie Dänemark verlassen, ist also etwas übertrieben. Hinzu kommt, dass das Kabel eine Hin- und eine Rückleitung hat). Wer die Physik nicht so gut kennt, das heißt, die Mehrzahl der Leser, mag wirklich glauben, dass Elektronen von Dänemark nach Deutschland fließen.

Alles sind kleine Schnitzer und wären nicht der Rede wert, wenn sie nicht symptomatisch wären für eine Neigung, die bei uns Physikern sehr ausgeprägt ist: Alles und Jedes mit Teilchen zu erklären. Solange eine Erscheinung nicht auf das Verhalten von Teilchen zurückgeführt ist, ist sie nicht richtig verstanden – so scheint die Meinung zu sein.

Man spricht von den Wassermolekülen, wenn man das Wasser meint, von den Photonen, wenn man das Licht meint oder den Elektronen, wenn man die elektrische Ladung, oder im Fall unseres letzten Zitats, die Energie meint.

Natürlich kann man bei jedem physikalischen Vorgang erzählen, was mit den Teilchen geschieht – denn irgendwelche Teilchen gibt es immer und die tun auch immer irgendetwas. Allerdings ist das, was sie tun, nicht unbedingt erhellend für das, was gerade interessiert. Man versteht die Turbine nicht besser mit den Dampf-molekülen als mit dem Dampf, den Tsunami nicht besser mit den Wassermolekülen als mit dem Wasser, elektrische Phänomene nicht besser mit den Elektronen als mit der elektrischen Ladung, das Verdampfen von Alkohol mit den Alkoholmolekülen nicht besser als mit dem chemischen Potenzial.

Die Physik arbeitet mit physikalischen Größen und wir (und unsere Schülerinnen und Schüler) haben auch kein Problem damit, mit diesen umzugehen. Natürlich

sind die Teilchen anschaulich. Aber von physikalischen Größen bilden wir uns auch eine Anschauung. Die elektrische Ladung oder die Energie stellen wir uns vor als strömungsfähige, bilanzierbare Fluida. Wenn wir uns auf die Teilchen verlassen, ist es bei vielen Vorgängen schwieriger, zu einem Verständnis und auch zu einer formalen, mathematischen Beschreibung zu gelangen. Und schon gar nicht stellt das Geschehen auf der Teilchenebene die tiefere Wahrheit dar.

Aus dem verwinkelten Zusammenspiel sehr vieler Teilchen wachsen auf einer höheren Ebene neue Erscheinungen heraus, die durch eine neue einfache Theorie beschrieben werden können. In der Wissenschaftstheorie nennt man diese Erscheinung Emergenz. Führt man das Verhalten eines Systems auf das Verhalten der Teilchen zurück, so erklärt man oft das Einfache durch das Komplizierte.

### Herkunft

Genosse Trend. Und der Trend ist der Reduktionismus. Er hat im 19. Jahrhundert seine großen Erfolge gefeiert und konnte sich in der Physik durchsetzen. Was nicht auf Teilchenbewegung, und das heißt im Wesentlichen auf Mechanik, zurückgeführt werden konnte, galt als nicht verstanden.

### Entsorgung

In der Turbine entspannt sich der Dampf. Er drückt auf die Turbinenschaufeln, sein Druck und seine Temperatur nehmen dabei ab, so wie die Temperatur der Luft, wenn sie aufsteigt. Statt der geringen Reibung der Moleküle können wir beim Tsunami einfach sagen, dass Wasser sei hinreichend dünnflüssig. Und Dänemark exportiert nicht Elektronen, sondern elektrische Energie.

## 1.25 Wechselwirkung

### Gegenstand

Das Wort „Wechselwirkung“ wird in der Physik in verschiedenen Zusammenhängen gebraucht. Dabei weicht seine Bedeutung von der umgangssprachlichen mehr oder weniger ab.

Im Jahr 1899 schreibt Auerbach [1]: „Die Kräfte, mit denen zwei Körper aufeinander wirken, sind einander entgegengesetzt gleich. Oder verallgemeinert: Zu jeder aus den Erscheinungen abstrahierten Kraft gehört eine entgegengesetzt gleiche Gegenkraft, die mit ihr zusammen eine Wechselwirkung darstellt.“

Die Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik [2] definiert den Begriff so: „Wechselwirkung: In der

Physik gebräuchlicher Ausdruck für die Art und Weise, wie Elementarteilchen untereinander bzw. mit einem Feld in dynamische Beziehung treten ...“.

Das Fischer-Lexikon Technik und exakte Naturwissenschaften [3] sagt dazu: „Wechselwirkung, allgemein Bezeichnung für die gegenseitige Beeinflussung physikalischer Objekte. Der Begriff umfasst die in der klass. Physik behandelten, durch Kraftvektoren (Kraftfelder) beschreibbaren Einwirkungen auf Massenpunkte und Körper ebenso wie die Wechselbeziehungen zwischen Elementarteilchen oder den sie repräsentierenden Feldern, bei denen die Vorstellung von Kraftvektoren Schwierigkeiten bereitet.“

In den Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss [4] ist der Begriff „Wechselwirkung“ eins von vier „Basiskonzepten“. Es wird dort ausgeführt: „Wenn Körper aufeinander einwirken, kann eine Verformung oder eine Änderung der Bewegungszustände der Körper auftreten. Körper können durch Felder aufeinander einwirken.“

Strahlung kann mit Materie wechselwirken, dabei können sich Strahlung und Materie verändern.“

Dazu werden die folgenden Beispiele genannt: Kraftwirkungen, Trägheitsgesetz, Wechselwirkungsgesetz, Impuls, Kräfte zwischen Ladungen, Schwerkraft, Kräfte zwischen Magneten, Reflexion, Brechung, Totalreflexion, Farben, Treibhauseffekt, globale Erwärmung, ionisierende Strahlung.

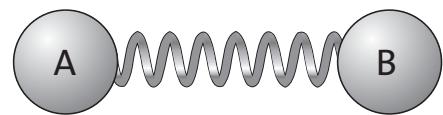
Schließlich zum Vergleich noch der Duden [5]: „Wechselwirkung: wechselseitige Beeinflussung (z. B. zwischen Staat und Gesellschaft).“

## Mängel

Die Zitate zeigen, dass man in der Physik verschiedene Erscheinungen und Vorgänge als Wechselwirkungen bezeichnet.

- Man spricht von einer Wechselwirkung, wenn zwei Körper im Sinne des dritten Newton'schen Gesetzes Kräfte aufeinander ausüben. Es scheint zunächst, dass hier die Bezeichnung „Wechselwirkung“ angebracht ist. Wenn ein Körper A auf einen anderen Körper B eine Kraft ausübt, so übt nach dem dritten Newton'schen Gesetz auch B auf A eine Kraft aus. Da man von einer Kraft sagt, sie „wirke“ auf einen Körper, haben wir es hier mit zwei Wirkungen zu tun: von A auf B und von B auf A, also auch im Sinn der Umgangssprache mit einer Wechselwirkung. Allerdings führt uns diese Betrachtung gleich zu einem Problem. Das Wort ist nur solange passend, wie man den Vorgang mit dem Newton'schen Modell der Fernwirkung beschreibt. An dem Geschehen nehmen zwei deutlich getrennte Partnersysteme teil: ein

Körper A und ein Körper B, und sonst nichts. Nun brauchen wir aber seit nunmehr gut 100 Jahren die Notlösung „Fernwirkung“ nicht mehr [6], denn man ist heute überzeugt, dass alle Wirkungen auf Transporten physikalischer Größen beruhen. Insbesondere sind die Newton'schen Kräfte nichts anderes als Impulstransporte. Wenn die (masselos gedachte) Feder die Körper A und B aufeinander zu zieht (Abb. 1.2), so nimmt der Impuls von A zu und der von B ab.



**Abb. 1.2** Die Feder steht unter Zugspannung. Der Impuls von A nimmt zu, der von B ab (der „negative Impuls“ von B nimmt zu).

Es ist aber nicht etwa so, dass der Impuls bei B einfach verschwindet, und bei A wieder auftaucht. Vielmehr wird er durch ein dazwischen liegendes Medium oder System, in unserem Fall die Feder, transportiert. Man kann also genau angeben, auf welchem Wege er von B nach A gelangt. So gesehen passt die Bezeichnung „Wechselwirkung“ nicht mehr so recht. Wenn B etwas abgibt und A es aufnimmt, so wird man einen solchen Vorgang eher als Übertragung oder als Transport bezeichnen. Wenn man Wasser aus einem Eimer in einen anderen gießt, so würde man den Vorgang auch nicht besonders treffend charakterisieren, wenn man ihn Wechselwirkung nennen würde.

- In der Teilchenphysik unterscheidet man die fermionischen „Materieteilchen“ (Hadronen und Leptonen) von den bosonischen „Wechselwirkungsteilchen“ (manchmal auch Kraftteilchen oder Feldteilchen genannt). Von einer Wechselwirkung spricht man, wenn ein Wechselwirkungsteilchen erzeugt oder vernichtet wird. Da es vier Arten von Bosonen-Feldern gibt, gibt es auch vier verschiedene Wechselwirkungen: die elektromagnetische, die gravitative, die starke und die schwache. Zu diesen Prozessen gehört die Wechselwirkung im klassischen Sinn, also der Fall, dass zwischen zwei (Materie-)Teilchen Impuls übertragen wird und sich die Natur der Teilchen dabei nicht ändert (Beispiel: Elektron-Elektron-Streuung). Außerdem gehören hierzu Prozesse, bei denen zwei Feldteilchen „miteinander wechselwirken“ (Beispiel: Photon-Photon-, oder Gluon-Gluon-Wechselwirkung). Es gehören aber auch Prozesse dazu, bei denen Materieteilchen ihre Natur ändern (Beispiel: der

## Quarzuhr und Geigerzähler

- Beta-Zerfall, bei dem etwa aus einem Neutron ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino entsteht). Man sieht, dass hier der Gebrauch des Wortes Wechselwirkung mit dem umgangssprachlichen Gebrauch nicht mehr deckungsgleich ist. Vielmehr beschreibt das Wort etwas, was man etwas treffender als Reaktion (im Sinn der Chemie) bezeichnen würde.
- In anderen Bereichen der Physik benutzt man das Wort in einem noch weiteren Sinn, nämlich zur Bezeichnung der verschiedensten Vorgänge, an denen zwei (oder mehr) Teilsysteme beteiligt sind. Nun ist aber kaum eine Erscheinung denkbar, bei der das nicht der Fall wäre, sodass schließlich alles zur Wechselwirkung wird. Es klingt wissenschaftlich, wenn man von Wechselwirkung spricht, auch dann, wenn kaum etwas Konkretes gesagt wird – siehe etwa die Bildungsstandards [4].

### Herkunft

Bei Newton gab es zwar noch keine interactio, dafür aber actio und reactio. Sein drittes Gesetz wurde auch in der Folge zunächst nicht als Wechselwirkungsgesetz, sondern als Gegenwirkungsprinzip bezeichnet. Spätestens Ende des 19. Jahrhunderts findet man die „Wechselwirkung“ in der physikalischen Literatur, zum Beispiel bei Ernst Mach [7]. Seine große Beliebtheit hat die Bezeichnung aber erst viel später erlangt, wohl in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts, also als jeder physikalische Vorgang, an dem nur zwei Teilsysteme beteiligt sind, zur Wechselwirkung wurde.

### Entsorgung

Wir wollen sie wieder dreiteilen:

- Das 3. Newton'sche Gesetz formuliere man nawiwirkungsphysikalisch: Der Impuls, den Körper B abgibt, wird von Körper A aufgenommen.
- Im Zusammenhang mit den vier Bosonenfeldern hat das Wort eine so spezifische Bedeutung angenommen, dass man es wohl als physikalischen Fachausdruck mit eigener Bedeutung akzeptieren muss. Die beste Wahl war es aber sicher nicht.
- Durch sparsamen Umgang mit dem Wort gewinnt fast jeder Text an Klarheit.

[1] F. Auerbach, *Kanon der Physik*, Verlag von Veit & Comp., Leipzig, 1899, S. 41

[2] *Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik*, Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 1981

[3] *Lexikon Technik und exakte Naturwissenschaften*, Fischer Taschenbuchverlag, Frankfurt am Main, 1972

[4] Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss, pdf-Datei:

Physik\_MSA16-12-04.pdf, S. 8, herunterzuladen vom Deutschen Bildungsserver:

<http://www.kmk.org/schul/Bildungsstandards/bildungsstandards.htm>

[5] Duden, *Deutsches Universalwörterbuch*, Dudenverlag, Mannheim, 1989

[6] M. Planck, *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*, Verlag von B. G. Teubner, Leipzig, 1908, S. 274: „... denn so gut es der mühsamen Arbeit vieler Jahrhunderte bedurfte, die Vorstellung einer unmittelbaren Fernewirkung zur lebendigen Gewohnheit zu machen, so gut muß es gelingen, diese Gewohnheit wieder abzustreifen, wenn einmal wirklich festgestellt ist, daß jene Vorstellung ihren Dienst getan hat.“

[7] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Verlag F. A. Brockhaus, Leipzig, 1897, S. 193

## 1.26 Quarzuhr und Geigerzähler

### Gegenstand

Wenn es nach den Lehrbüchern geht, so muss man wissen, wie ein Geigerzähler, nicht aber wie eine Quarzuhr funktioniert. Man beschäftigt sich ausführlich mit dem Flüssigkeitsthermometer, aber kaum mit dem Thermoelement. Man lernt die atomaren Vorgänge kennen, die im Laser ablaufen, nicht aber die in der Glühlampe oder der Kerzenflamme. Massenspektrometer und Geschwindigkeitsfilter werden ausführlich behandelt, Fourierpektrometer nicht. Isotherme Zustandsänderungen werden quantitativ behandelt, isentrope gar nicht. Aus Hochschullehrbüchern lernt man, warum der Himmel blau, nicht aber, warum der Rest der Welt rot, grün, grau, schwarz oder weiß ist.

### Mängel

Wenn man einen Lehrplan oder Studienplan entwirft, wenn man Bildungsstandards aufstellt, aber auch wenn man nur den eigenen Unterricht oder die Vorlesung vorbereitet, muss man immer wieder eine Auswahl treffen. Etwa: Welche physikalischen Größen führe ich ein, welche nicht? Wie viele Stunden sehe ich für die Mechanik vor, wie viele für die Wärmelehre und wie viele für die Elektrizitätslehre? Für welche Vorgänge gebe ich eine atomistische Deutung, für welche eine makroskopische? Welche Messgeräte oder Sensoren behandle ich im Unterricht?

Schaut man sich Lehrpläne und Lehrbücher an, so bemerkt man, dass die Auswahl oft ungeschickt getroffen wurde. Die Beispiele unter „Gegenstand“ zeigen das.

## Herkunft

Themen kommen oft durch Zufälligkeiten der historischen Entwicklung in den Lehrkanon. Sie werden zur Gewohnheit, und ihre Berechtigung wird kaum noch hinterfragt. Hinzu kommt, dass eine Tradition von Abi- oder Klausur-Aufgaben entstanden ist, die das Überleben bestimmter Themen garantiert. Auch durch das Angebot an Geräten durch die Lehrmittelfirmen werden Themen stabilisiert. Die Trägheit des ganzen Systems, bestehend aus Lehrern und Dozenten, Lehrerbildungseinrichtungen, Hochschullehrbüchern und Schullehrbüchern, sowie deren Autoren, Prüfungsgewohnheiten, Lehr- und Studienplänen und Experimentiergeräten ist sehr groß.

## Entsorgung

Um die Themen für Lehrpläne, Lehrbücher oder den eigenen Unterricht auszuwählen, empfehle ich, das folgende Verfahren anzuwenden: Man nimmt irgend ein Thema her, von dem man annimmt, dass es ein Kandidat für den Lehrplan bzw. den Unterricht sein könnte. Man sucht dann nach „Konkurrenten“, d. h. Themen, die in irgendeiner Hinsicht gleichberechtigt sein könnten: im Schwierigkeitsgrad, in der Anwendbarkeit, in Hinblick auf seinen Wert für eine Allgemeinbildung, etc. Ein Themenvorschlag überlebt nur dann, wenn man gute Gründe dafür findet, dass das Thema wichtiger ist als die Konkurrenten, die nicht aufgenommen werden. Es genügt also nicht, Gründe dafür anzuführen, dass ein Thema wichtig ist. Solche Gründe lassen sich für jedes Thema finden und auch überzeugend darstellen. Damit ein Thema akzeptiert wird, muss es vielmehr gegen seine Konkurrenten gewinnen.

Ein einfaches Beispiel: Der Ausgangsvorschlag sei, die elektrische Feldstärke im Lehrplan aufzuführen. Es gibt Konkurrenten verschiedener Art. Zunächst die andere Vektorgröße, mit der man ein elektrisches Feld beschreiben kann, die elektrische Verschiebung. Dann eine für die Beschreibung gleichwertige skalare Größe, das elektrische Potenzial. Weitere Konkurrenten sind aber auch die magnetische Feldstärke, die magnetische Induktion und das magnetische Skalarpotenzial, die Gravitationsfeldstärke und das Gravitationspotenzial. Es werden nun die folgenden Fragen gestellt: wenn die elektrische Feldstärke, warum nicht auch die magnetische Feldstärke, die Gravitationsfeldstärke, das Gravitationspotenzial etc.? Oder: wenn nicht die Gravitationsfeldstärke, die magnetische Feldstärke etc., warum dann die elektrische?

Mit den Entscheidungen dieses Beispiels wird man sich nicht sehr schwer tun. Anders sieht es im folgen-

den Fall aus. Vorgeschlagen wird, die thermische Ausdehnung fester und flüssiger Stoffe im Unterricht zu behandeln. Wieder werden zunächst Konkurrenten gesucht, und das sind vor allem andere Materialeigenschaften: thermische, mechanische, elektrische, magnetische, optische. Man wird sie vergleichen etwa in Hinblick auf ihre Größenordnung (die thermische Ausdehnung ist ein Effekt der Größenordnung  $10^{-3}$ ), hinsichtlich ihrer Wichtigkeit für ein allgemeines Verständnis der Physik oder hinsichtlich ihrer Wichtigkeit in technischen Anwendungen. Die Zahl der Konkurrenzthemen ist in diesem Fall so groß, dass für die thermische Ausdehnung kaum eine Überlebenschance besteht.

Ähnlich ist es, wenn vorgeschlagen werden sollte, die Funktionsweise des Geigerzählers im Unterricht zu behandeln. Konkurrenten sind unzählige Messgeräte, die zum Teil so exotisch sind wie der Geigerzähler, aber auch so allgegenwärtig wie die Quarzuhr oder die CCD-Matrix in der Digitalkamera.

Unter „Gegenstand“, sind weitere Themen genannt, die diesen Prozess nicht überleben würden oder deren Konkurrenten unberechtigterweise nicht zum Zuge kommen.

## 1.27 Fernwirkungen

### Gegenstand

Aussagen wie „die Erde zieht den Mond an“, „die Sonne übt eine Kraft auf die Erde aus“, „gleichnamige Magnetpole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an“.

### Mängel

Die Sätze vermitteln die Auffassung, es existierten Wirkungen eines Körpers A auf einen entfernten Körper B, an denen kein weiteres System beteiligt ist, welches A und B miteinander verbindet und die Wirkung vermittelt. Seit es die erste Feldtheorie, die Elektrodynamik von Faraday und Maxwell, gibt, ist die Wissenschaft davon überzeugt, dass eine solche Fernwirkungsbeschreibung unpassend ist.

### Herkunft

Die „Fernwirkungssprache“, die heute noch in allen Physikbüchern verwendet wird, stammt aus der Zeit Newtons. In der Tat hatte man vor Faraday und Maxwell kaum eine andere Wahl, als sich elektrische, magnetische und Gravitationskräfte als Fernwirkungen vorzustellen. Schon Newton selbst hat die Annahme von Fernwirkungen aber als einen Mangel seiner Theorie gesehen.

## Die zwei Wirkungen von Kräften und die drei Wirkungen von elektrischen Strömen

### Entsorgung

Sobald im Unterricht Gravitations-, elektrische oder magnetische Kräfte zwischen zwei Körpern behandelt werden, wird das entsprechende Feld als dritter Beteiligter eingeführt. Man beschreibt das Feld als genauso real existierendes Gebilde wie die beiden Körper [1]. Die Anziehung bzw. Abstoßung beschreibt man etwa so: Zwei Körper mit Ladungen gleichen Vorzeichens werden von ihrem Feld voneinander weggedrückt, Körper mit Ladungen verschiedenen Vorzeichens werden zueinander hingezogen.

[1] F. Herrmann, *Das Feld als Raumbereich mit Eigenschaften*, Altlasten der Physik

## 1.28 Die zwei Wirkungen von Kräften und die drei Wirkungen von elektrischen Strömen

### Gegenstand

Kräfte haben zweierlei Wirkungen: Sie können verformen und beschleunigen.

Elektrische Ströme haben dreierlei Wirkungen: eine Wärme-, eine magnetische und eine chemische Wirkung.

### Mängel

Um uns einen besseren Überblick über diese Einteilungen zu verschaffen, wollen wir die beiden Aussagen miteinander vergleichen. Das ist nahe liegend, denn eine Kraft ist nichts anderes als ein Impulstrom. Bei beiden Klassifizierungen geht es also um die Wirkungen eines Stroms: eines Impulstroms im ersten und eines elektrischen Stroms im zweiten Fall. Der Vergleich fördert nun einige Unstimmigkeiten zutage.

- Beginnen wir mit der beschleunigenden Wirkung der Kraft. Wir können sie auch so beschreiben: Eine Kraft auf einen Körper kann bewirken, dass sich der Impuls des Körpers ändert. Die analoge elektrische Aussage wäre: Ein elektrischer Strom, der in einen Körper hineinfließt (aus ihm herausfließt), kann bewirken, dass die elektrische Ladung des Körpers zunimmt (abnimmt). Dieser Satz ist sicher richtig. Warum nehmen wir ihn dann aber nicht in die Reihe der Wirkungen des elektrischen Stroms auf? Weil er uns trivial erscheint. Genauso selbstverständlich ist aber die

beschleunigende Wirkung der Kraft: Wenn in einen Körper Impuls hinein- und nicht gleichzeitig wieder herausfließt, so häuft er sich zwangsläufig im Körper an.

- Betrachten wir als Nächstes die „Wärmewirkung des elektrischen Stroms“. Wärme wird nicht nur durch elektrische Ströme erzeugt. Auch Impulströme (Kräfte) erzeugen Wärme, nämlich bei Reibungsvorgängen (Haftreibung ausgenommen).
- Die Aufzählung der Wirkungen der Ströme ist keineswegs vollständig. So gibt es noch elektrische Wirkungen von Kräften (den piezoelektrischen Effekt), optische Wirkungen von Kräften (die Spannungsdoppelbrechung), optische Wirkungen oder Lichtwirkungen des elektrischen Stroms (in der Leuchtdiode), eine Kühlwirkung elektrischer Ströme (beim Thermoelement) etc.

Zusammenfassend lässt sich sagen: Die zitierten Wirkungen sind nicht charakteristisch für den jeweiligen Strom. Es sind auch nicht alle Wirkungen, die der jeweilige Strom hat, und es sind auch nicht unbedingt die wichtigsten. Kurz: Die beiden Einteilungen enthalten recht viel Willkür.

### Herkunft

Da die Mechanik unabhängig von der Elektrizitätslehre entstanden ist, haben sich in den beiden Gebieten unterschiedliche Modelle und Lehrgewohnheiten etabliert. Den Newton'schen Gesetzen, deren Inhalt nichts weiter als die Impulserhaltung ist, wird im Vergleich zum Satz von der Erhaltung der elektrischen Ladung eine zu große Wichtigkeit beigemessen. Die mechanische Reibung dagegen wird im Gegensatz zur „elektrischen Reibung“, also dem elektrischen Widerstand, zu Unrecht als etwas den eigentlichen Betrieb der Mechanik Störendes stigmatisiert.

### Entsorgung

- Entweder man lässt die beschleunigende Wirkung der Kraft weg, oder man nimmt beim elektrischen Strom die „aufladende Wirkung“ hinzu. Meine Wahl wäre, beide Erscheinungen nicht in die Gruppe der Wirkungen von Strömen aufzunehmen, denn im Gegensatz zu den anderen angesprochenen Wirkungen treten sie ja nur dann auf, wenn der entsprechende Strom Divergenzen hat.
- Wenn man schon eine Klassifizierung von Wirkungen vornimmt, sollte in beiden Fällen die Wärmewirkung mit dabei sein.
- Es sollte zum Ausdruck kommen, dass es sich nur um eine Auswahl von Wirkungen handelt.

## 1.29 Lineare Kennlinien

### Gegenstand

Im Verlauf des Mechanik- bzw. Elektrizitätslehreunterrichts werden die linearen Beziehungen von Tab. 1.1 behandelt.

### Mängel

Die angeführten Gleichungen hängen eng miteinander zusammen. Sie beschreiben für Mechanik und Elektrizitätslehre je drei „passive“ Bauelemente mit linearen Kennlinien.

Jede der sechs Gleichungen gilt nur in einem hinreichend klein gewählten Bereich der jeweiligen unabhängigen Variable. Eine Feder befolgt das Hooke'sche Gesetz nicht mehr, wenn man sie überdehnt. Der Impuls ist nicht mehr proportional zur Geschwindigkeit, wenn die Geschwindigkeit nicht mehr klein gegen  $c$  ist. Die Reibungskraft hört auf, proportional zur Geschwindigkeit zu sein, wenn Turbulenz einsetzt. Elektrische Stromstärke und magnetischer Fluss sind nicht mehr proportional zueinander, wenn sich die Spule unter dem Einfluss des magnetischen Feldes verformt. Elektrische Ladung und Kapazität sind nicht proportional, wenn sich der Kondensatorplattenabstand aufgrund der Zugspannung des elektrischen Feldes vermindert. Ein Widerstand befolgt nicht mehr das Ohm'sche Gesetz, wenn die elektrische Stromstärke zu groß wird.

Der lineare Zusammenhang ist also einerseits ein Sonderfall. Andererseits ist dieser Sonderfall besonders wichtig, denn er tritt immer als Näherung für kleine Werte der Variablen auf.

Dass und wie die Gleichungen zusammengehören, sieht man gut am bekannten Beispiel des mechanischen Schwingers bzw. des elektrischen Schwingkreises. In je-

der der beiden Differenzialgleichungen für gedämpfte Schwingungen sind drei der Bauelemente durch Summanden vertreten. Jedem Bauelement des mechanischen Schwingers entspricht ein elektrisches im elektrischen Schwingkreis. Wegen der gleichen mathematischen Struktur der Differenzialgleichungen haben auch ihre Lösungen dieselbe Gestalt.

So betrachtet, zeigt sich ein enger Zusammenhang zwischen den sechs Beziehungen, und es wäre nahe liegend, diese Einheitlichkeit im Unterricht zu vermitteln. Tatsächlich verfährt man aber anders.

Es beginnt bei den Namen: Als etablierte Namen treten nur das Hooke'sche und das Ohm'sche Gesetz auf. Diese Feststellung ist durchaus nicht nebensächlich. Eine Gleichung bekommt dadurch, dass sie einen Namen trägt, ein größeres Gewicht als eine namenlose Formel.

Wichtiger ist aber, als was die Gleichungen überhaupt „verkauft“ werden. Nur die Gleichungen (1.2), (1.6) und (1.7) werden so einführt, wie oben beschrieben: als Ausdruck einer beobachtbaren Proportionalität und gleichzeitig als Definitionsgleichung für den Proportionalitätsfaktor.

Gleichung (1.3) dagegen wird nur als Definitionsgleichung aufgefasst, nämlich für den Impuls. Sie enthält also gar keine Aussage, die durch eine Beobachtung geprüft werden könnte. Als reine Definitionsgleichung scheint sie also kein Naturgesetz zu sein. Vertritt man diese Auffassung, so ist es nur natürlich, dass sie keinen Namen trägt.

Gleichung (1.4), das zum Ohm'schen Gesetz analoge Reibungsgesetz, begegnet dem Lernenden eher am Rande: Während es im Mechanikteil der Lehrbücher oft gar nicht erwähnt wird – Reibungsvorgänge, bei denen die Kraft unabhängig von der Geschwindigkeit ist, wer-

Formel	Name	Aussage
$F = -D \cdot x$ (1.2)	Hooke'sches Gesetz	Für eine Feder sind Auslenkung $x$ und Kraft $F$ proportional zueinander. Der Proportionalitätsfaktor heißt Federkonstante.
$p = m \cdot v$ (1.3)	keiner	Definition des Impulses
$F = k \cdot v$ (1.4)	manchmal: Stokes'sches Reibungsgesetz	Für viskose Medien ist die Reibungskraft $F$ proportional zur Geschwindigkeit $v$ . Der Proportionalitätsfaktor heißt (nicht einheitlich) Dämpfungs- konstante.
$n\Phi = L \cdot I$ (1.5)	keiner	Der magnetische Fluss $n\Phi$ in einer Spule ist proportional zur elektrischen Stromstärke. Der Proportionalitätsfaktor heißt Induktivität.
$Q = C \cdot U$ (1.6)	keiner	Die Ladung $Q$ eines Kondensators ist proportional zur Spannung $U$ zwischen den Platten. Der Proportionalitätsfaktor heißt Kapazität.
$U = R \cdot I$ (1.7)	Ohm'sches Gesetz	Die elektrische Stromstärke $I$ in einem Leiter ist proportional zur elektrischen Spannung $U$ zwischen den Enden des Leiters. Der Proportionalitätsfaktor heißt elektrischer Widerstand.

Tab. 1.1

## Kraftfelder

den offenbar für die wichtigsten gehalten —, taucht es erst bei den Schwingungen als typischer Reibungsmechanismus auf. (Warum wohl?) Außerdem findet man das Gesetz manchmal beim Millikan-Versuch wieder. Man kann nur hoffen, dass niemand glaubt, die Stokesche Reibung sei eine Besonderheit des Millikan-Versuchs. Die Stoßdämpfer des Autos dagegen, die ja kaum weniger wichtig sind als Federn und Bremsen, werden nicht behandelt.

### Herkunft

Die Gleichungen wurden, über etwa 200 Jahre verteilt, von verschiedenen Personen in verschiedenen Zusammenhängen eingeführt. Obwohl die Analogien nicht schwer zu erkennen und bei Ingenieuren sogar Gegenstand eigener Vorlesungen sind, hat sich, vielleicht aufgrund des aufgeprägten Traditionsbewusstseins der Physiker, im Physikunterricht in dieser Hinsicht kaum etwas geändert.

### Entsorgung

Es ist sicher aussichtslos, zu versuchen, einen Namen, der seit Jahrhunderten an einer Gleichung hängt, zu entfernen, oder eine altbekannte namenlose Gleichung mit einem Namen zu versehen. (Dabei wäre es doch sicher nicht unpassend, die Beziehung  $p = m \cdot v$  nach einem ihrer Entdecker Descartes'sches Gesetz oder Huygens'sches Gesetz zu benennen.) Alles was wir tun können, ist, die zueinander analogen Gleichungen auch als analog darzustellen, und die Ungerechtigkeit bei der Namensvergabe im Unterricht oder in der Vorlesung anzusprechen.

Dass die Proportionalität zwischen  $p$  und  $v$  beobachtbar ist, zeigt man, indem man sie tatsächlich beobachtet. Gleichung (1.3) ist dann gleichzeitig die Definitionsgleichung der tragen Masse. Mit dem zweiten Newton'schen Gesetz  $dp/dt = F$  folgt daraus die so geliebte (zu viel geliebte?) Gleichung  $F = m \cdot a$ .

## 1.30 Kraftfelder

### Gegenstand

1 „Wie die in der Natur vorkommenden Kräfte beschaffen sind, d.h., von welchen Größen sie abhängen und wie diese Abhängigkeit aussieht, kann man nur aufgrund der Erfahrung sagen. Diese lehrt, dass die (in der Mechanik interessierenden) Kräfte, die auf einen Massenpunkt  $m$  wirken, von dessen Ortsvektor und/oder seiner Geschwindigkeit  $v = \dot{r}$  und auch von der Zeit abhängen können. Es wird also im allgemeinen Fall eine Kraft  $K = K(r, \dot{r}, t)$  sein.“ [1]

2 „Als physikalischer Fachbegriff bezeichnet Kraft die Fähigkeit, die Bewegung eines Körpers zu ändern (Richtungsänderung oder Beschleunigung) oder einen Körper zu verformen. Sie ist eine Feldgröße.“ [2]

3 „Die Kraft ist eine ortsabhängige vektorielle Größe, also  $F = F(r)$ .“ [3]

### Mängel

Jeder von uns Physikern muss durch die theoretische Mechanik hindurch. Dort lernen wir unter anderem, was unser erstes Zitat zum Ausdruck bringt: Die Kraft hängt von Ort, Geschwindigkeit und Zeit ab. Der Satz beinhaltet eine Behauptung, die in den beiden anderen aus Wikipedia stammenden Zitaten noch etwas pointierter ausgedrückt wird: Die Kraft ist eine Feldgröße. Diese Aussage ist aber, mindestens wenn man sie so allgemein formuliert, nicht richtig. Warum?

Der Wert einer physikalischen Größen bezieht sich immer auf irgendetwas, und immer wenn man einen Wert angibt, muss klar sein, worauf. So gibt es Größen, deren Werte sich auf einen Punkt beziehen, z.B. die Temperatur, der Druck und die elektrische Feldstärke. Bei anderen Größen bezieht sich der Wert auf eine Fläche. Hierzu gehören alle Ströme und Flüsse: die elektrische Stromstärke, die Leistung (der Energiestrom), der magnetische Fluss und die Kraft (der Impulsstrom). Bei wieder anderen bezieht sich der Wert auf ein Raumgebiet. Das sind die extensiven Größen: Masse, Energie, elektrische Ladung, Entropie, etc. Bei noch anderen Größen kann die Zuordnung komplizierter sein, etwa beim elektrischen Widerstand.

Uns geht es im Augenblick um die Kraft. Allgemein gilt für den Zusammenhang zwischen Kraft  $\vec{F}$  und mechanischer Spannung  $\vec{\sigma}$  (zwischen Impulsstromstärke und Impulsstromdichte):

$$\vec{F} = \iint_S \vec{\sigma} d\vec{A}$$

Die mechanische Spannung ist ein Tensor, das Flächenelement ein Vektor. Für den Fall einer Kraft in einem unter reiner Zug- oder Druckspannung stehenden Stab vereinfacht sich die Beziehung zu

$$|\vec{F}| = \sigma \cdot A.$$

Hier ist  $\sigma$  die Spannung in der Richtung des Stabes (die einzige von null verschiedene Komponente des Spannungstensors). Wir haben angenommen, dass sie über die Querschnittsfläche des Stabes konstant ist.  $A$  ist der Flächeninhalt der Querschnittsfläche.

In ruhenden Flüssigkeiten und Gasen sind die Komponenten des Spannungstensors in allen Richtungen

gleich und identisch mit dem, was man als Druck bezeichnet. Es gilt die bekannte Gleichung:

$$\vec{F} = p \cdot \vec{A}.$$

Man kann in diesem Fall die Bezugsfläche orientieren, wie man will. Die Kraft hat immer dieselbe Richtung wie der Flächenvektor.

Auch durch Felder vermittelte Kräfte lassen sich als Integral über die mechanischen Spannungen berechnen. Wählt man die Bezugsfläche so, dass sie einen Körper ganz umschließt, so erhält man „die Kraft, die auf den Körper wirkt“. Im Fall des elektromagnetischen Feldes nennt man  $\vec{\sigma}$  den Maxwell'schen Spannungstensor.

Diese Betrachtungen zeigen, dass zur Angabe einer Kraft immer auch die Angabe der Fläche gehört, auf die sie sich bezieht. Diese Feststellung steht nun aber im Widerspruch zu unseren Zitaten, die behaupten, dass sich Kräfte auf Punkte beziehen.

Der Kontext, in den die zitierten Lehrsätze gehören, ist die theoretische Mechanik. Wie kommt die theoretische Mechanik dazu, Kraftfelder einzuführen? Sie beginnt die Beschreibung mechanischer Vorgänge durchweg mit dem Modell des Massenpunktes. Die Punktmechanik wird in einer solchen Breite behandelt, dass man leicht aus den Augen verliert, dass man es mit einem zwar sehr brauchbaren, aber begrifflich etwas sonderbaren Modell zu tun hat. Warum sonderbar? Einige Größen, die man aus der „normalen“ Mechanik kennt, werden unendlich, oder besser gesagt, es gibt diese Größen in der Punktmechanik nicht mehr: Dichten, Stromdichten und mechanische Spannungen. Die Kraft, deren Wert sich in der „normalen“ Mechanik auf die einen Körper umschließende Fläche bezieht, wirkt jetzt auf einen Punkt. Das hat zur Folge, dass man mithilfe eines punktförmigen Probekörpers jedem Punkt des Raumes eine Kraft zuordnen kann. Man bekommt die „Kraftfeld“ genannte Funktion  $\vec{F} = \vec{F}(\vec{r})$ . Die Kraft, die in der normalen Mechanik eine integrale Größe ist, wird also in der Punktmechanik zu einer lokalen Größe.

Jeder Physiker weiß, dass Kraftfelder eine wichtige Rolle in der Hamilton- und Lagrange-Theorie für Massenpunkte spielen, und dass viele reale Systeme in sehr guter Näherung als Systeme von Massenpunkten beschrieben werden können. Man vergisst darüber aber leicht, dass Sätze wie die oben zitierten keineswegs allgemeingültig, sondern auf den Kraftbegriff der Punktmechanik zugeschnitten sind. Aus Sicht der normalen Mechanik, in der es verteilte Massen gibt, erscheinen sie eher als etwas pathologische Konstruktionen, und man kann sich fragen, ob man die beiden Kraft-Konzepte

überhaupt noch als dieselbe physikalische Größe betrachten kann.

### Herkunft

Bei Newton war die Kraft noch einem Körper zugeordnet. Den Begriff Massenpunkt gab es bei ihm nicht. Newton konnte die Kraft nicht auf eine Schnittfläche beziehen, denn es gab noch keine Felder und damit auch nichts zu schneiden. Statt der Fläche ordnete er sie daher dem durch eine Fläche eingeschlossenen Körper zu. Im Impulstrombild kann man diesen Sachverhalt so ausdrücken: Er ordnete die Stromstärke der Quelle des Flusses zu, statt dem Fluss selbst.

Die Punktmechanik, die mit Lagrange, Hamilton und Jacobi ihre volle Blüte erreichte und später als Vorbild für die Quantenphysik diente, wurde mit einer solchen Selbstverständlichkeit als die eigentliche Mechanik gelehrt, dass die merkwürdigen Konsequenzen der Annahme der Punktformigkeit der Körper leicht übersehen wird.

### Entsorgung

Wenn man eine neue physikalische Größe einführt, so mache man deutlich, worauf sich ihre Werte beziehen. Dass das notwendig ist, erkennt man an einem einfachen Versuch: Man legt Studenten, oder auch Schülern, eine Liste derjenigen physikalischen Größen vor, die sie bereits kennengelernt haben, und bittet, von jeder dieser Größen zu sagen, worauf sie sich bezieht. Man erhält mit Sicherheit etliche Fehleinstufungen.

Wenn man es nicht mit der Hamilton'schen Punktmechanik zu tun hat, vermeide man es, von „Kraftfeldern“ zu sprechen. Wie man mit der Kraft umgehen kann, lässt sich gut an der bekannten Gleichung

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \quad (1.8)$$

erläutern. Die elektrische Feldstärke  $\vec{E}$  ist wirklich eine Feldgröße, d.h. ihre Werte sind im Raum verteilt. Wir können also schreiben  $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r})$ . Der „Probekörper“ mit der Ladung  $Q$  hat aber eine Ausdehnung. Damit Gleichung (1.8) anwendbar ist, muss die Ausdehnung so klein sein, dass die Feldstärke im entsprechenden Raumbereich (vor dem Einbringen des Probekörpers) als homogen angesehen werden kann.  $\vec{F}$  ist dann die Kraft auf den Probekörper. Ihr Wert bezieht sich auf eine Fläche, die den Probekörper einschließt, oder in Newton'scher Sprechweise auf den Körper selbst.

- [1] C. Schaefer und M. Päsler, *Einführung in die Theoretische Physik*, Verlag Walter de Gruyter & Co, 1970, S. 92
- [2] Wikipedia, Dezember 2006, Stichwort „Kraft“
- [3] Wikipedia, Dezember 2006, Stichwort „Kraftfeld“

## Ersatzwiderstände

### 1.31 Ersatzwiderstände

#### Gegenstand

Schaltet man Geräte mit den Widerständen  $R_1, R_2, R_3, \dots$  in Reihe, so hat das Gesamtsystem den „Ersatzwiderstand“

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots ;$$

schaltet man sie parallel, so gilt für den Ersatzwiderstand

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

#### Mängel

Die Regeln sind Teil des Physikunterrichts, seit es die Elektrizitätslehre gibt, d. h. seit etwa 150 Jahren.

An ihnen ist nichts falsch. Aber wir könnten einige Fragen stellen: Warum gehören sie zum Pflichtkanon des Physikunterrichts? Warum haben sie den Status von Merkregeln? Warum wird ihnen ein ganzes Kapitel gewidmet? Man würde uns vielleicht antworten: Weil sie so wichtig sind.

Wenn man sie aber für wichtig genug hält, um sie in den Unterricht aufzunehmen, warum dann nicht auch eine ganze Reihe ähnlicher, analoger Regeln: über das Hintereinander- und In-Reihe-Schalten von Kondensatoren und Spulen, von Hooke'schen Federn und Stoßdämpfern, von Wärmewiderständen und von Strömungswiderständen? Die mathematische Struktur der Regeln ist dieselbe wie bei den elektrischen Widerständen. Sind denn Wärmewiderstände weniger wichtig als elektrische? Sind Kondensatoren weniger wichtig als elektrische Widerstände?

Wenn man berücksichtigt, dass die eingangs zitierten Regeln aus der Maschen- und der Knotenregel folgen, so fällt einem noch anderes auf.

Die Maschenregel ist trivial, wenn man die elektrische Spannung vernünftig einführt, nämlich als Differenz von elektrischen Potenzialen. Dann ist sie so selbstverständlich wie die folgende Aussage: Wenn man mit dem Aufzug 2 Stockwerke hochfährt, und dann noch einmal 3 Stockwerke, so ist man insgesamt 5 Stockwerke hochgefahren. Man kann es auch gelehrter ausdrücken: Die Maschenregel gilt, weil man es, wie im Fall des Aufzugs, mit einem konservativen Feld zu tun hat. Aber es ist besser man drückt es nicht so aus.

Die Knotenregel folgt aus der Erhaltung der strömenden Größe. Sie gilt für die verschiedensten Ströme:

elektrische Ströme, Massenströme und Impulsströme. Es wäre schade um sie, wenn sie nur im Zusammenhang mit elektrischen Strömen angesprochen würde.

#### Herkunft

Die Regeln wurden in etwas anderer Form als hier wiedergegeben von Kirchhoff 1845 formuliert, d. h. in der Anfangszeit der Elektrizitätslehre. In dieser Zeit, als noch alles neu war, erschienen sie durchaus nicht trivial. Dass sie bis heute als eigene Regeln überlebt haben, liegt wahrscheinlich vor allem daran, dass sie einen eigenen Namen bekommen hatten (im Gegensatz zu den oben erwähnten analogen Regeln).

#### Entsorgung

Man kann das verschiedene Verschalten von Widerständen durchaus im Rahmen einer Aufgabe behandeln; man wird den Ergebnissen aber nicht den Status von Merksätzen geben. Und man wird ähnliche Probleme im Zusammenhang mit anderen Bauelementen – etwa Kondensatoren und Spulen – und mit anderen Strömen – etwa Wasser-, Impuls- und Wärmeströmen – behandeln.

Noch eine meiner Lieblingsregeln für das Erstellen von Lehrplänen: Immer wenn jemand den Vorschlag macht, ein bestimmtes Thema in den Lehrplan (oder allgemeiner in den Unterricht oder in ein Lehrbuch) aufzunehmen, suche man zunächst nach Konkurrenz-Themen, d. h. Themen, die aufgrund irgendeiner Analogie denselben Anspruch auf Aufnahme in den Lehrkanon geltend machen könnten. Erst wenn man einen Grund gefunden hat, das vorgeschlagene Thema zu behandeln, die Konkurrenten aber nicht, wird das Thema aufgenommen. Diese Methode hat sich für mich in vielen Zusammenhängen bewährt.

### 1.32 Masse und Materie

#### Gegenstand

1 „Ein Schwarzes Loch unterscheidet sich dramatisch von Sternen jeder anderen Art. Andere Sterne enthalten sowohl Materie als auch Masse. Ein Schwarzes Loch dagegen ist körperlose Masse, Masse ohne Materie. ... Im Zentrum des Schwarzen Loches ist der Punkt des Zusammenbruchs. Dort wird die Materie, die einst den Stern bildete, aus ihrer Existenz herausgequetscht. In diesem Zusammenbruch verschwindet Materie, mit all ihren Teilchen, Drücken, und Eigenschaften. Es bleibt reine, materiefreie Masse übrig.“

- 2 „Ein Teil der Materie wird dabei in Energie umgewandelt.“
- 3 „Transport von Materie, Ladung und Energie ...“

### Mängel

Ich möchte keinen Beitrag zu der Jahrhunderte andauernden philosophischen Diskussion des Begriffs Materie leisten. Mich interessiert hier auch nicht die Abgrenzung, die in Begriffspaaren wie „Geist und Materie“, „Materie und Feld“, „Licht und Materie“ zum Ausdruck kommt. Es geht mir um eine schlichtere Frage.

Materie ist ein Teil der realen Welt, etwas, das nicht vom Menschen erfunden wurde, das auch existierte, wenn keiner einen Namen dafür erdacht hätte.

Die Masse dagegen ist eine physikalische Größe, eine Variable im Sinn der Mathematik, vom Menschen eingeführt, um bestimmte Eigenschaften von Objekten zu beschreiben, nämlich ihre Schwere und ihre Trägheit.

Wer sich dieser einfachen Feststellung anschließen kann, wird erkennen, dass die Zitate nicht nur ungeschickt sind. Sie sind logisch nicht stimmig; sie haben keinen Sinn. Reine Masse ist sinnlos. Die Masse ist ein Maß. Das Maß ohne das Gebilde, an dem sie gemessen wird, ist sinnlos.

Ein Sack Kartoffeln hat ein bestimmtes Gewicht. Das Gewicht ohne die Kartoffeln ist sinnlos.

Derartiges gibt es nur in der Märchenwelt: Das Grinsen der Katze ohne die Katze in Alice im Wunderland [1], – aber das ging bekanntlich auch nur für einen kurzen Moment, und Alice ist auch entsprechend überrascht.

Allzu sehr wird man sich über die zitierten Sätze allerding nicht wundern, falls einem schon aufgefallen ist, dass oft gesagt wird, Licht sei Energie, oder Photonen seien Energiequanten.

Mit meinen Studenten mache ich gern das folgende Spielchen. „Wir stellen uns ein Elektron vor; direkt vor uns, in Ruhe“. (Niemand scheint ein Problem damit zu haben, dass das der Quantenphysik widerspricht). „Wir wollen nun dem Elektron seine elektrische Ladung wegnehmen, nur in Gedanken. Könnt Ihr Euch das vorstellen?“, „Ja, können wir; da haben wir dann ein ungeladenes Elektron.“ (Man sollte ihm jetzt eigentlich einen anderen Namen geben, wir lassen es aber beim Namen Elektron, denn aus einem solchen ist ja das neue Gebilde entstanden.) Ich frage weiter: „Das Elektron hat einen Spin, man kann sich grob vorstellen, dass es rotiert. Wir wollen ihm nun den Spin wegnehmen. Könnt Ihr Euch das vorstellen?“ „Ja, können wir; das ist dann ein Elektron ohne Ladung, das nicht rotiert.“ Ich überspringe weitere, das Elektron charakterisierende extensive Größen, wie etwa die leptonische Ladung, und komme

gleich zur Masse: „Wir wollen dem Elektron nun die Masse wegnehmen. Könnt Ihr Euch das vorstellen?“ „Nein, das geht nicht. Dann bleibt ja vom Elektron nichts mehr übrig.“ „Aber wir könnten ihm vielleicht seinen Drehimpuls zurückgeben und dafür die Masse wegnehmen. Geht das?“ „Nein, was soll denn da noch rotieren.“ etc., etc.<sup>1</sup>

Was man bei diesem Spiel wegnimmt, sind immer extensive Größen. Genauer: Man macht ihre Werte in Gedanken zu null.

Ich würde mich nicht wundern, wenn es den Leser geschüttelt hätte beim Lesen dieser Zeilen, aber trotzdem: Geben sie nicht etwas wieder, was eine gewisse Plausibilität hat?

Das Erstaunliche ist, wie viel man wegnehmen kann, ohne dass sich unser Geist dagegen sträubt. Bei der Masse scheint es aber ein Ende zu haben: Man hat das Gefühl, man macht nicht nur den Wert einer Größe zu null, sondern man nimmt das betrachtete Objekt selbst weg, das Eigentliche des Elektrons, vielleicht auch seine Seele. Im Fall der Teilchen, wie dem Elektron, scheint man die Seele immer in der Masse, genauer: in der Ruhmasse, anzusiedeln.

### Herkunft

Es ist sicher etwas Metaphysik im Spiel. Ich kann nur Vermutungen darüber anstellen, was in den Köpfen mancher meiner Kollegen vor sich geht.

Vielleicht das Folgende: Ein Körper, ein Teilchen, ein Stück Materie ist ein Individuum. Es ist mehr als das Ensemble der Werte seiner physikalischen Größen. Die Menge dieses metaphysischen Zeuges wird, so wahrscheinlich die Vorstellung, gemessen durch die Masse. Wenn diese verändert wird, so ist der Körper nicht mehr derselbe wie vorher. Er bleibt derselbe, wenn sein Impuls sich ändert oder sein Drehimpuls oder seine Entropie, und vielleicht auch seine Ladung, nicht aber wenn sich seine Masse ändert. Die Masse misst die Menge der Materie, und die Materie ist etwas, was über die physikalischen Größen hinausgeht.

<sup>1</sup>Nimmt man statt des Elektrons einen makroskopischen Körper, so scheint man an dieser Stelle weniger Probleme zu haben. Jeder kennt die masselose Feder eines Federschwingers oder den masselosen Faden eines Pendels. Man benutzt diese Konstruktionen genau so unbekümmert wie den widerstandslosen elektrischen Leiter oder den reibungsfrei rollenden Wagen. Offenbar verhält man sich an dieser Stelle viel aufgeklärter als beim masselosen Elektron. Interessant ist das Spiel übrigens auch, wenn man es mit einem Photon macht.

## Masse und Materie

### Entsorgung

Man unterscheide sorgfältig zwischen Objekt und physikalischer Größe, oder zwischen „Ding und Maß“. Man versuche, in die Masse nicht etwas hinein zu interpretieren, was mehr ist als ein Maß für eine Eigenschaft.

[1] Alice's Adventures in Wonderland, by Lewis Carroll:  
“All right,” said the Cat; and this time it vanished quite slowly, beginning with the end of the tail, and ending with the grin, which remained some time after the rest of it had gone.

“Well! I've often seen a cat without a grin,” thought Alice; “but a grin without a cat! It's the most curious thing I ever saw in all my life!”

# 2 ENERGIE

## 2.1 Energieformen

### Gegenstand

Dass die Energie in verschiedenen Formen auftritt, gehört zum physikalischen Gemeinwissen. Kinetische, potenzielle, elektrische, chemische Energie und Wärme sind jedermann geläufige Beispiele; die Umwandlung einer Form in eine andere ist eine stehende Redensart.

### Mängel

Obwohl wir ganz selbstverständlich von Energieformen sprechen, haben wir Mühe, sie zu definieren. Schon in der notwendigen Unterscheidung von Daseins- und Austauschformen der Energie sind wir nicht konsequent, im Gegenteil, wir neigen in saloppen Formulierungen dazu, sie gleichzusetzen. Während sich für die Abgrenzung der Austauschformen — etwa Wärme und verschiedene Arten der Arbeit — noch gewisse Regeln eingespielt haben, scheint die Einteilung der Daseinsformen außer bei einigen mechanischen Paradebeispielen vage und willkürlich. Welcher Anteil der Energie einer Stahlfeder oder einer Luftmolekel ist mechanisch, thermisch, chemisch, elektrisch oder magnetisch, welcher translatorisch, rotatorisch oszillatorisch oder elektronisch, welcher kinetisch oder potenziell, welcher geordnet oder ungeordnet? Dass man zu sinnvollen Ergebnissen gelangen kann, auch ohne diese Fragen genau beantworten zu können, lässt vermuten, dass die Einteilung physikalisch belanglos ist.

### Herkunft

Um die Rolle der Energie im Naturgeschehen zu verdeutlichen, ist die Aufzählung von Erscheinungsformen der Energie ein nahe liegendes, ja schwer zu vermeidende sprachliches Ausdrucksmittel. Ein Zitat von F. Mohr (1837) aus der Vorzeit des Energiesatzes mag dies veranschaulichen: „Außer den 54 bekannten chemischen Elementen gibt es in der Natur der Dinge nur noch ein Agens, und dieses heißt Kraft: Es kann unter den passenden Verhältnissen als Bewegung, chemische Affinität,

Kohäsion, Elektrizität, Licht, Wärme und Magnetismus hervortreten, und aus jeder dieser Erscheinungsarten können alle übrigen hervorgebracht werden.“

### Entsorgung

Wir ersparen uns viele Worte, wenn wir auf nutzlose Differenzierungen verzichten. Was Grundwasser, Regenwasser, Meerwasser, Kondenswasser, Leitungswasser, Trinkwasser, Warmwasser, Abwasser usw. unterscheidet, ist nicht das Wasser selbst, sondern Fundort, Verwendungszweck, Transportmittel, Beimengungen usf., alles Attribute, die irgendwelche Begleitumstände kennzeichnen und die beim Umgang mit den Wässern gewisse Vorkehrungen erzwingen oder manche Nutzungsweisen begünstigen, andere ausschließen. Bei der Energie ist es nicht anders. Was die Energie als kinetisch erkennbar macht, ist der mit ihr assoziierte Impuls. Wir nennen eine Energie elektrisch, wenn sie bei der Verschiebung elektrischer Ladung mitbefördert wird. Wir sprechen von Wärme, wenn die Energie mit der Entropie liiert ist und so weiter. Impuls, Ladung, Entropie ... sind es, um deren Auftreten und Verbleib wir uns kümmern müssen und welche die besonderen Eigenschaften der zugehörigen „Energieformen“ bedingen.

Wenn wir etwa durch Reibung Entropie erzeugen, dann wissen wir bereits, dass es dabei warm wird [1], dass der Vorgang unumkehrbar ist, dass die dabei eingesetzte Energie nur teilweise und nur auf Umwegen wiedergewinnbar ist. Um das zu verstehen, müssen wir keine besondere Energieform mit spezifischen Eigenschaften postulieren.

Die sauberste, wenn auch nicht die bequemste Lösung ist der Verzicht auf alles Gerede über „Energieformen“. Natürlich dauert es — wie bei einem Patienten, der nach langem Krankenlager zum ersten Mal seine Krücken aufgibt — bis man sich an den neuen Zustand der Freiheit gewöhnt hat und auch schwierige Stolperstrecken unbeschadet zu überwinden gelernt hat.

[1] G. Job, *Entropie*, Altlasten der Physik

## Die Leistung

### 2.2 Die Leistung

#### Gegenstand

Die Bezeichnung „Leistung“ für die Größe  $P$  in der Gleichung  $P = dW/dt$

#### Mängel

Die Gleichung  $P = dW/dt$  bezieht sich auf eine vorgegebene Fläche.  $dW$  ist die durch die Fläche transportierte Energie, die „verrichtete Arbeit“, wie man auch sagt.  $P$  ist demnach die durch die Bezugsfläche pro Zeit transportierte Energie und somit nichts anderes als die Stärke des Energiestroms. Wenn die Energie über einen wohldefinierten Transportweg fließt, ohne dass die Stromstärke auf dem Weg abnimmt, so ist  $P$  die Stärke des Stroms an jeder beliebigen Schnittfläche durch den Weg oder die Leitung.

$P$  hat also eine einfache Bedeutung. Das Wort Leistung bringt aber diese einfache Bedeutung nicht zum Ausdruck. Man ist eher geneigt, eine „Leistung“ einem Gerät zuzuordnen – einem Elektromotor zum Beispiel –, statt der Zuleitung zum Gerät. Der Elektromotor leistet viel oder wenig. Um doch noch zum Ausdruck zu bringen, dass man einen Transport charakterisierende Größe meint, spricht man manchmal von der „übertragenen Leistung“. Dies ist eine besonders unglückliche Ausdrucksweise, denn was übertragen wird, ist Energie, und nicht Energie durch Zeit.

#### Herkunft

Die Bezeichnung „Leistung“ stammt aus einer Zeit, als man Energie und Energiestrome noch nicht lokalisieren konnte. Man wusste zwar, dass die Zunahme der Energie an einer Stelle mit der Abnahme an einer anderen verknüpft ist, kannte aber für einen der wichtigsten Energietransporte keine StromdichteVerteilung: für den elektrischen Energietransport. Die Größe  $P$  war deshalb synonym für die zeitliche Änderung der Energie an einem festen Ort.  $P$  war also einem Körper oder einem Gerät zugeordnet, nicht einer Schnittfläche.

#### Entsorgung

Man nennt  $P$  nicht „Leistung“, sondern „Energiestromstärke“, oder auch kurz „Energiestrom“.

### 2.3 Der Energieerhaltungssatz

#### Gegenstand

Die Formulierung des Satzes von der Erhaltung der Energie, oder kurz des Energiesatzes, scheint nicht tri-

vial zu sein. Die Zitate 1 und 2 sind Schulbüchern entnommen, Zitat 3 stammt aus einem Hochschulbuch.

- 1 Als Merksätze hervorgehoben: „Die Gesamtenergie eines Körpers kann auf verschiedene Energieformen verteilt sein. – Ohne Energieübertragung von oder zu anderen Körpern bleibt die Gesamtenergie des Körpers konstant.“ ... „Sind bei Energieübertragung und -umwandlung ohne Reibung mehrere Körper beteiligt, so bleibt die Summe aus Bewegungs-, Spann- und Höhenenergie all dieser Körper erhalten.“ ... „Tritt Reibung auf, so gehört zur Energie- summe die innere Energie der beteiligten Körper und der Umgebung.“
- 2 Merksatz: „Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie: In einem energetisch abgeschlossenen System bleibt die Summe der mechanischen Energien konstant, solange die mechanischen Vorgänge reibungsfrei ablaufen. Energie geht hierbei weder verloren, noch entsteht sie neu; sie wandelt sich nur von der einen in die andere mechanische Energieform um.“
- 3 „Nunmehr kann der Energiesatz wie folgt formuliert werden: Die einem System von außen zugeführte Wärmemenge  $\Delta Q$  dient zur Erhöhung seiner inneren Energie  $\Delta U$ , z. B. seiner Temperatur ... oder seiner elektrischen und chemischen Energie, und zu einer Arbeitsleistung  $\Delta W$ , die wir negativ nennen wollen, wenn sie vom System abgegeben wird, sodass  $\Delta U = \Delta Q + \Delta W$ .“

#### Mängel

Ein einfacher Sachverhalt wird völlig zerredet. Man kann ja der Meinung sein, dass es, bevor man den Energiesatz formuliert, einiges zu bedenken gibt. Aber irgendwann sollte man ihn dann doch in aller Klarheit aussprechen: Energie kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden. Und in diesen Satz gehören die Bedenken nicht mehr hinein. Sonst entsteht der Eindruck, die Erhaltung selbst sei ein schwieriges Konzept.

#### Herkunft

Siehe die Altlast „Abgeschlossene Systeme“

#### Entsorgung

Man formuliert die Energieerhaltung, so wie man auch die Ladungserhaltung formuliert, nämlich ohne Wenns

## Wo ist die Energie?

und Abers, etwa so: Energie ist weder erschaffbar noch zerstörbar.

## 2.4 Wo ist die Energie?

### Gegenstand

Die verbale Beschreibung von Energietransporten und -bilanzen durch Sätze wie die folgenden:

„Die mechanische Leistung gibt an, wie schnell mechanische Arbeit verrichtet wird.“

„In einem abgeschlossenen System ist die Summe aller Energien konstant.“

„Die an einem Körper verrichtete mechanische Arbeit ist gleich der Änderung seiner Energie.“

### Mängel

Die Energie ist eine extensive Größe, für die ein Erhaltungssatz gilt: Wenn sie in einem System A abnimmt, muss sie in einem anderen System B um denselben Betrag zunehmen. Man weiß aber seit Ende des 19. Jahrhunderts, dass der Energieerhaltungssatz nicht nur in dieser globalen Form gilt. Man kann nämlich die räumliche Verteilung der Energie angeben – in Form der lokalen Größe Energiedichte  $\rho_E$  – und man kann angeben, auf welchem Weg die Energie von einer Stelle zu einer anderen gelangt – in Form der Energiestromdichte  $\vec{j}_E$ . Man kann also sagen, wo sich die Energie befindet, und auf welchem Weg sie von einer Stelle zu einer anderen gelangt. Die Energieerhaltung kann man in Form einer Kontinuitätsgleichung ausdrücken:

$$\frac{\partial \rho_E}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_E = 0$$

Die unter „Gegenstand“ zitierten Sätze sind so formuliert, dass sie nur die ältere Form des Energieerhaltungssatzes voraussetzen, oder in anderen Worten, dass sie die Möglichkeit einer Fernwirkung zulassen: Die Energie bei B kann ab- und die bei A zunehmen, ohne dass irgendein anderes System, das A und B miteinander verbindet, dabei eine Rolle spielt.

Die Vorstellung von der Energie, die dabei vermittelt wird, ist in zweierlei Hinsicht unpassend. Erstens entspricht sie nicht den heutigen Auffassungen der Physik, denen zufolge es keine Fernwirkungen gibt, und zweitens ist die verbale Beschreibung von Energiebilanzen unnötig kompliziert.

### Herkunft

Unmittelbar nach der Einführung der Energie in die Physik um die Mitte des 19. Jahrhunderts, hatte man

noch keine andere Wahl. Man konnte die Energieerhaltung nur nachweisen, indem man die Energieinhalte von zwei Systemen A und B miteinander verglich. Es war noch offen, ob man in jedem Fall eine lokale Verteilung der Energie angeben kann, und vor allem, ob die Energie auf einem wohldefinierten Weg von A nach B gelangt. Was zwischen A und B passiert, war nur im Fall von Energietransporten „in Form von Wärme“ (mit dem Energieträger Entropie) klar, nicht aber für elektrische Energietransporte und auch nicht für mechanische.

Die lokale Verteilung der Energie in elektrischen und magnetischen Feldern wurde dann von Maxwell angegeben. Zu einer echt lokalen Größe wurde die Feldenergie aber erst durch die Arbeiten von Poynting im Jahr 1884 [1].

Damit war das Problem aber nicht aus der Welt. Noch 1892 äußert sich Heinrich Hertz in seinen Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft [2] sehr skeptisch: „Ein grösseres Bedenken scheint mir in der Frage zu liegen, wie weit bei unseren gegenwärtigen Kenntnissen von der Energie die Localisation derselben und ihre Verfolgung von Punkt zu Punkt überhaupt Sinn und Bedeutung hat. Derartige Betrachtungen sind noch nicht durchgeführt bei den einfachsten Energieumsätzen der gewöhnlichen Mechanik; es ist daher die Frage noch unerledigt, ob und in welchem Umfange der Begriff der Energie eine solche Behandlungsweise zulässt.“ Im selben Buch etwas weiter hinten sagt er es so: „Wenn eine Dampfmaschine mittelst eines hin- und zurücklaufenden Riemens eine Dynamomaschine treibt und diese wiederum mittelst eines hin- und zurücklaufenden Drahtes eine Bogenlampe speist, so ist es allerdings eine allgemein übliche und einwurfsfreie Ausdrucksweise zu sagen, dass die Energie von der Dampfmaschine durch den Riemen auf die Dynamomaschine übertragen werde und von dieser wiederum mittelst des Drahtes auf die Lampe. Aber hat es einen deutlichen physikalischen Sinn zu behaupten, die Energie bewege sich längs des gespannten Riemens entgegen der Richtung der Bewegung desselben von Punkt zu Punkt fort? Und wenn nicht, kann es dann einen deutlicheren Sinn haben zu sagen, die Energie bewege sich in den Drähten, oder – nach Poynting – in dem Zwischenraum zwischen den beiden Drähten von Punkt zu Punkt fort? Die hier auftretenden begrifflichen Dunkelheiten bedürfen noch sehr der Aufhellung.“

Als Hertz' Buch erschien, war die Dunkelheit aber schon aufgehellt. Heaviside hatte 1891 [3] auch die mechanischen Energietransporte theoretisch als Nahewirkung beschrieben. Noch klarer wurde die Situation, vor allem für die deutschen Leser, als Gustav Mie 1898 [4]

## Frei werdende Energie

seine umfassende Arbeit *Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung* veröffentlichte. Lassen wir ihn abschließend zu Wort kommen:

„Wenn zwischen zwei räumlich getrennten materiellen Systemen A und B nur solche Energieübergänge stattfinden, die in einem notwendigen Zusammenhang mit den Zustandsgrößen in den Punkten eines beide verbindenden Körpers C stehen, so dass man den Energieübergang  $dE/dt$  ohne Weiteres berechnen kann, wenn man nur den Zustand in allen Punkten von C kennt, so sagt man, dass die Energie  $dE$  zwischen A und B durch C übertragen wird. [...] Energieübergänge, d.h. überhaupt Änderungen der räumlichen Vertheilung der Energie, können nur durch reine Energieübertragung eintreten.“

Die unter „Gegenstand“ zitierten Sätze, die ja typisch dafür sind, wie sich die Physik beim Umgang mit Energietransporten noch heute ausdrückt, zeigen, dass sich die Sprache, die unmittelbar nach Einführung der Energie entstanden ist, konserviert hat, so als hätte es die Arbeiten von Poynting, Heaviside und Mie nicht gegeben – zum Schaden aller jungen Menschen, die sich bemühen, ein klares Bild über die Energie zu bekommen.

### Entsorgung

Man führt die Energie so ein, dass von Anfang an klar wird, dass sie im Raum verteilt ist, und dass sie strömen kann. Den Energieerhaltungssatz formuliert man etwa so: „Energie kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden.“ Die Begriffe Arbeit, Leistung und Energieform sind überflüssig [5, 6].

- [1] J. H. Poynting, On the transfer of energy in the electromagnetic field, Phil. Trans. A, 1884, S. 343 – 361
- [2] H. Hertz, Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft, Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1892, S. 234 und 293
- [3] O. Heaviside, The Electrician 27, 3. Juli 1891
- [4] G. Mie, Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung, Sitzungsbericht der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, CVII. Band, Abtheilung II.a, 1898, S. 1113 – 1181
- [5] G. Job, *Energieformen*, Altlasten der Physik
- [6] F. Herrmann, *Die Leistung*, Altlasten der Physik

## 2.5 Frei werdende Energie

### Gegenstand

Energie wird frei oder wird freigesetzt, im Englischen „released“, im Französischen „libérée“.

### Mängel

Man sagt oft, Energie werde frei oder werde freigesetzt. Ich muss zugeben, dass ich nicht so recht weiß, was damit gemeint ist. Nehmen wir eine Aussage wie diese: „Die frei werdende Energie wird dabei durch Emission eines Photons abgegeben.“

Nun ja, das Photon fliegt davon, frei wie ein Vogel. Da leuchtet es schon ein, dass die Energie jetzt frei ist. Aber sollten wir dann nicht konsequent sein und sagen, dass die Energie bei einem Absorptionsprozess wieder eingefangen wird? Aber das sagt niemand. Dass die Energie davonfliegt, kann also nicht das Kriterium für das Freiwerden sein.

Hier eine andere Vermutung: Man interessiert sich für einen Vorgang, bei dem Energie abgegeben wird. Man interessiert sich dabei nur für das System, das die Energie abgibt, nicht aber dafür, was dann mit der Energie geschieht. Es ist einem egal, ob damit etwas ange regt, erwärmt, chemisch verwandelt, verdampft, komprimiert oder beschleunigt wird. Dafür spricht das folgende Zitat: „Stoffumwandlungen, bei denen Energie in Form von Wärme abgegeben wird, nennt man exotherme chemische Reaktionen. Es wird dabei Energie freigesetzt, die z. B. genutzt werden kann, um Wärme und Licht abzugeben oder um elektrische bzw. mechanische Arbeit zu verrichten.“

Dagegen sprechen allerdings Aussagen wie die folgende: „Die beim Bremsen freigesetzte Energie wird in Form von elektrischer Energie zurückgewonnen, in Batterien gespeichert und [...] über einen Elektromotor wieder für den Antrieb verwendet.“

Hier wird klar gesagt, was mit der beim Bremsen abgegebenen Energie passiert. Oder wird sie vielleicht in der Batterie dann wieder eingesperrt? Denn sicher wird sie ja erneut frei, wenn sie die Batterie wieder verlässt und vom Elektromotor „für den Antrieb verwendet“ wird? Oder wird sie immer nur frei und freier?

Wie die Formulierung „Energie wird frei“ benutzt wird, bekommt man schön vorgeführt, wenn man die Wortkombination bei *Linguee* eingibt. *Linguee* spuckt einem zig Zitate aus. Man kann es auch mit dem englischen oder französischen Pendant versuchen. Was man in jedem Fall feststellt, ist: Wenn man das „freiwerden“ ersetzt durch „abgeben“, bleiben alle gefundenen Sätze klar und richtig.

Noch eine andere Bemerkung: Beim Umgang mit mengenartigen (extensiven) Größe hat man eine große Freiheit in der Wortwahl. Wir können etwa sagen, elektrische Ladung wird gespeichert, verteilt, konzentriert, sie kann strömen, fließen, kommen und gehen und sich verkrümeln. All diese Sprechweisen kann man mit Recht und mit Nutzen im Zusammenhang mit allen ex

## Das Perpetuum mobile und der Energieerhaltungssatz

tensiven Größen verwenden. Aber versuchen wir es mal mit dem Freisetzen. Würde man sagen, man setzt elektrische Ladung frei, wenn sich ein geladener Körper entlädt, oder man setzt Impuls frei, wenn ein Auto bremst?

### Herkunft

Wohl ein Überbleibsel aus der Zeit, als es noch keinen Energiestrom und keine Energiestromdichte, und keine lokale Bilanzgleichung für die Energie gab, also grob aus der Zeit vor 1900.

### Entsorgung

Eine einfache Regel, die ich jedem meiner Lehramtsstudentinnen und -studenten mitgebe: Sprecht über die Energie wie über einen Stoff. Stellt immer die Fragen: „Wo ist sie?“, „Wo kommt sie her?“, „Wo geht sie hin?“

Und wenn Ihr mal glaubt, eine Situation anzutreffen, die es rechtfertigt, die Metapher vom Freiwerden zu verwenden, vergesst nicht zu sagen, dass die Energie vorher eingesperrt war, und dass sie nachher auch wieder einfangen wird.

ten und unwiderlegten Energiesatz« — Satz von der Erhaltung der Energie —, nach dem Energie »bei keinem physikalischen Vorgang erzeugt oder vernichtet«, sondern nur »von einer Form in eine andere umgewandelt wird«. Anschließend nimmt das Bundespatentgericht zu der in der Anmeldung dargelegten Rechnungsweise des Anmelders Stellung ...“

### Mängel

Die Behauptung, ein Perpetuum mobile (PM) erster Art könnte nicht funktionieren, weil es den Energieerhaltungssatz verletzt, greift etwas kurz.

Man stelle sich vor, man kennt den Energiesatz nicht und möchte nachweisen, dass ein vorgeschlagenes PM nicht funktionieren kann, ohne das Gerät zu bauen und auszuprobieren. Man wird den Nachweis leicht bringen können, denn außer dem Energiesatz werden auch andere physikalische Gesetze verletzt: andere Erhaltungssätze, die Maxwell'schen Gleichungen, das Gravitationsgesetz etc. Mechanische Perpetua mobilia scheitern gewöhnlich an den Newton'schen Gesetzen, d.h. am Impulserhaltungsgesetz oder am Drehimpulserhaltungssatz.

Dass die Energieerhaltung nicht das einzige Hindernis für das Funktionieren eines Perpetuum mobile ist, zeigen auch die beliebten Diskussionen über pfiffige PM-Vorschläge. Obwohl man weiß, dass der Energiesatz verletzt ist, betrachtet man die Widerlegung erst dann als befriedigend, wenn man noch einen weiteren Grund für das Nichtfunktionieren gefunden hat, d.h. die Verletzung eines anderen physikalischen Gesetzes.

Der Energiesatz ist zwar ein bequemes Werkzeug, um zu zeigen, dass ein bestimmter Prozess nicht laufen kann. Er spielt aber in diesem Zusammenhang keine ausgezeichnete Rolle.

### Herkunft

Da das Ziel der PM-Erfinder gerade die Verletzung des Energiesatzes ist, ist es bequem, mit diesem zu argumentieren, um die Realisierbarkeit zu widerlegen. PM-Erfindern, die es auch heute noch gibt, — siehe unser vierter Zitat — scheint es an Fantasie zu fehlen. Immer haben sie es darauf abgesehen, eine Maschine zu realisieren, die den Energiesatz verletzt. Der Grund ist wohl, dass sie die Energie als kostbare Handelsware sehen. Ihnen scheint nicht klar zu sein, dass sie auch durch Verletzung jedes anderen Naturgesetzes zu Reichtum kommen könnten.

### Entsorgung

Perpetua mobilia (die nicht funktionieren) sind ein hübsches und physikalisch ergiebiges Diskussionsthema. Man tue die Sache aber nicht einfach damit ab, dass

## 2.6 Das Perpetuum mobile und der Energieerhaltungssatz

### Gegenstand

- 1 Brockhaus 1839 [1]: „Perpetuum mobile, eine Maschine, welche, vermöge einer aus ihrer Zusammensetzung selbst hervorgehenden Triebkraft in beständiger Bewegung bliebe, deren Herstellung aber jetzt nicht mehr für möglich gehalten wird, weil bekannte Naturgesetze dawider sprechen. In früherer Zeit gehörte sie mit dem Steine der Weisen, den Lebenselixiren u. dergl. m. zu den Dingen, mit deren Besitz mancher Charlatan sich brüstete und deren Entdeckung sich viele Mechaniker und Mathematiker zur Aufgabe machten.“
- 2 Brockhaus 1910 [2]: „Perpetuum mobile (lat.), ein Körper, der sich unaufhörlich bewegt, insbes. eine oft angestrebte, aber infolge des Gesetzes von der Erhaltung der Energie (s.d.) als unmöglich erwiesene mechan. Vorrichtung, die ihre Kraft durch eigene Bewegung stets wieder erneuern könnte.“
- 3 Brockhaus 1953 [3]: „Perpetuum mobile 1. Art, Maschine, die ohne Aufwendung irgendwelcher Arbeit ständig Energie liefern soll; steht im Widerspruch zu dem Erfahrungssatz von der Erhaltung der Energie.“
- 4 Blatt für Patent-, Muster- und Zeichenwesen 1985 [4]: „Das Bundespatentgericht verweist in soweit auf den »in der gesamten Naturwissenschaft anerkannt

## Reine Energie

man sagt, der Energiesatz sei verletzt. Es entsteht dann der Eindruck, die Physik sei so gebaut, dass man ein Naturgesetz in Gedanken außer Kraft setzen kann, ohne dass das ganze Gedankengebäude zusammenfällt.

- [1] Bilder-Conversations-Lexikon, F. A., Brockhaus, Leipzig, 1839
- [2] Brockhaus' Kleines Konversations-Lexikon, F. A. Brockhaus, Leipzig, 1910
- [3] Brockhaus ABC der Naturwissenschaft und Technik, VEB F. A. Brockhaus Verlag, Leipzig, 1953
- [4] Blatt für Patent-, Muster- und Zeichenwesen, 87. Jg. 1985, S. 118

## 2.7 Reine Energie

### Gegenstand

In Lehrbüchern und wissenschaftlichen Zeitschriften findet man oft Aussagen, denen zufolge elektromagnetische Strahlung reine Energie sei, wie etwa in folgender Formulierung [1]: „Wenn ein Positron mit einem Elektron zusammentrifft, vernichten sich die Teilchen gegenseitig und erzeugen reine Energie in Form von Gammastrahlung.“

Oder ein anderes Beispiel [2]: „Ein schweres Teilchen und sein Antiteilchen können sich gegenseitig vernichten, sodass dabei Energie entsteht, und ein solches Paar kann aus Energie wieder erzeugt werden.“

Eine ähnliche Auffassung kommt in der folgenden Formulierung zum Ausdruck [3]: „... Licht kann auch mithilfe von Photonen beschrieben werden, diskret emittierten Energiequanten.“

### Mängel

Selbstverständlich sind elektromagnetische Wellen keine reine Energie. Das elektromagnetische Feld ist ein physikalisches System, d. h. ein Gebilde, für das alle physikalischen Standardvariablen bestimmte Werte haben, und nicht nur die Energie.

So haben für das elektromagnetische Feld außer der Energie im Allgemeinen auch die extensiven Größen Impuls, Drehimpuls und Entropie von null verschiedene Werte. (Die elektrische Ladung dagegen ist in allen Zuständen des Feldes gleich null.) Aber auch intensive Größen haben, genauso wie bei anderen Systemen, bestimmte Werte. So hat das elektromagnetische Feld in jedem Punkt einen bestimmten Druck. (Der Druck ist richtungsabhängig und daher ein Tensor). In bestimmten Zuständen, nämlich den Zuständen, die man thermische Strahlung nennt, hat das Feld auch eine be-

stimmte Temperatur und ein bestimmtes chemisches Potenzial.

Die Strahlung mit einer einzigen physikalischen Größe zu identifizieren, ist einfach nicht korrekt. Die Strahlung ist ein physikalisches System, das uns durch die Natur vorgegeben ist. Physikalische Größen dagegen sind Produkte des menschlichen Geistes. Sie sind Werkzeuge zur Beschreibung von Systemen.

Ein Photon, die Elementarportion des Systems „elektromagnetisches Feld“, ist entsprechend auch mehr als nur ein Quantum der Energie. Auch das Photon trägt neben Energie noch andere extensive Größen, etwa Impuls und Drehimpuls.

Die Verwechslung der Konzepte „Größe“ und „System“ kommt auch in einer anderen Art Formulierung, die man oft antrifft, zum Ausdruck, und in der Energie und Materie offenbar als zwei gleichberechtigte Klassen von in der Natur vorkommenden „Stoffen“ dargestellt werden [4]: „Wenn sich alle Galaxien voneinander entfernen [...], erscheint es logisch, dass sie einst in einem dichten See aus Materie und Energie zusammengedrängt waren.“

### Herkunft

Wahrscheinlich gibt es zwei Ursachen für die falsche Identifizierung der Größe „Energie“ mit dem System „elektromagnetisches Feld“. Man hatte wohl einerseits in der Energie zunächst mehr als nur eine Größe gesehen, andererseits aber auch das elektromagnetische Feld als System nicht ernst genommen.

Nach der Einführung der Energie um die Mitte des vorigen Jahrhunderts wurde schnell ihre umfassende Bedeutung in der Naturwissenschaft erkannt. Die Begeisterung darüber, eine Größe von so großer Tragweite gefunden zu haben, führte aber auch zu einer Überschätzung und Verkennung der Größe: Die Energie wurde, besonders in den Kreisen der „Energetiker“, begriffen als etwas Stoffliches. So kann man im Jahre 1908 in Ostwalds Buch Die Energie lesen [5]: „Die Energie ist daher in allen realen oder konkreten Dingen als wesentlicher Bestandteil enthalten, der niemals fehlt, und insfern können wir sagen, dass in der Energie sich das eigentliche Reale verkörpert.“

Andererseits war die elektromagnetische Strahlung nicht als das akzeptiert, als was sie heute begriffen wird. Wir wissen heute, dass sie ein System ist wie andere Systeme, etwa das ideale Gas oder das Phononensystem eines Festkörpers. Wie andere Systeme, so besteht auch das elektromagnetische Feld aus Elementarportionen. Was für das Gas Wasserstoff die Wasserstoffmoleküle sind oder für das Gittersystem eines Festkörpers die Phononen, sind für das elektromagnetische Feld die Photonen.

Diese Verkennung, sowohl der physikalischen Größe „Energie“, als auch des physikalischen Systems „elektromagnetisches Feld“, hat ihre Spuren hinterlassen. Auch wenn wir es längst besser wissen, gehen uns leicht Sätze wie die oben zitierten über die Lippen.

### Entsorgung

Statt zu sagen, bei der Reaktion eines Elektrons mit einem Positron entstehe reine Energie, sage man, es entstehen Photonen. Und statt zu sagen, elektromagnetische Strahlung sei reine Energie, sage man elektromagnetische Strahlung trage Energie, aber neben der Energie auch noch andere extensive Größen, etwa Impuls, Drehimpuls und Entropie.

[1] Scientific American, Dezember 1993, S. 44: „When a positron encounters an electron, the two particles annihilate each other and produce pure energy in the form of gamma radiation.“

[2] R. Penrose, The emperor’s new mind, Oxford University Press, S. 308: „A massive particle and its anti-particle can annihilate to form energy, and such a pair can be created out of energy.“

[3] Scientific American, April 1993, S. 26: „... light can also be described in terms of photons, discretely emitted quanta of energy.“

[4] Scientific American, Oktober 1994, S. 32: „So if galaxies are all moving away from one another [...] it seems logical that they were once crowded together in some dense sea of matter and energy.“

[5] W. Ostwald, *Die Energie*, Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1908, S. 5

# 3 MECHANIK

## 3.1 Die Newton'schen Gesetze

### Gegenstand

- 1 Ein Körper bleibt im Zustand der Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung, wenn keine Kräfte auf ihn wirken.
- 2 Die auf einen Körper wirkende Kraft ist gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung des Körpers.
- 3 Wenn ein Körper A auf einen Körper B eine Kraft  $\vec{F}_{AB}$  ausübt, so übt B auf A die Kraft  $\vec{F}_{BA} = -\vec{F}_{AB}$  aus.

### Mängel

Alle drei Gesetze sind Spezialfälle einer Aussage, die man viel einfacher formulieren kann: Impuls kann weder erzeugt noch vernichtet werden. Besonders deutlich wird dies, wenn man berücksichtigt, dass eine Kraft nichts anderes ist, als die Stärke eines Impulsstroms. Die Newton'schen Gesetze können dann folgendermaßen umformuliert werden:

- 1 Der Impuls eines Körpers ändert sich nicht, solange kein Impuls in ihn hinein oder aus ihm heraus fließt.
- 2 Die zeitliche Änderung des Impulses eines Körpers ist gleich der Stromstärke des Impulses, der in den Körper hineinfließt.
- 3 Fließt ein Impulsstrom von einem Körper A auf einen Körper B, so ist die Stromstärke beim Verlassen von A gleich der beim Eintritt in B.

Diese Folgerungen aus dem Impulssatz sind so einfach, dass man ihnen kaum den Status von Lehrsätzen zugeschenen würde. Man überzeugt sich leicht davon, indem man die entsprechenden Sätze für andere Erhaltungsgrößen formuliert, oder zum Beispiel auch einfach für Wasser: „Die Wassermenge in einem Behälter ändert sich nicht, solange kein Wasser in den Behälter hinein oder aus ihm heraus fließt.“...

### Herkunft

Die Herkunft ist einerseits jedermann klar, andererseits bedürfte es einer umfangreichen Analyse der Newton'schen Arbeit, um zu verstehen, dass im Newton'schen System die drei Gesetze unabhängig voneinander waren. Schließlich ordnen sie sich in ein kompliziertes Gefüge von Beobachtungen und Definitionen ein. Selbstverständlich hat Newton nicht die Impulserhaltung an den Anfang seiner Überlegungen gestellt.

ander waren. Schließlich ordnen sie sich in ein kompliziertes Gefüge von Beobachtungen und Definitionen ein. Selbstverständlich hat Newton nicht die Impulserhaltung an den Anfang seiner Überlegungen gestellt.

### Entsorgung

Man führt in der Mechanik den Impuls sehr früh und als eigenständige Größe ein: als ein Maß der „Bewegungsmenge“, also von dem, was man umgangssprachlich „Schwung“, „Wucht“ oder auch „Kraft“ nennt. Wenn sich der Impuls eines Körpers ändert, so sagt man nicht, es wirke eine Kraft  $F$ , sondern es fließe ein Impulsstrom der Stärke  $F$  auf den Körper. Diese Sprechweise ist für den erfahrenen Physiklehrer zwar ungewohnt, für den Anfänger aber einfacher, da sie einige der Komplikationen vermeidet, die die Diskussion der Newton'schen Gesetze, besonders des dritten Gesetzes, mit sich bringt.

## 3.2 Kräftegleichgewicht und drittes Newton'sches Gesetz

### Gegenstand

Kräfte wirken auf Körper. Wenn ein Körper K, auf den ein anderer Körper A eine Kraft  $\vec{F}_{AK}$  ausübt, nicht beschleunigt wird, so muss noch mindestens ein zweiter Körper B eine Kraft  $\vec{F}_{BK}$  auf ihn ausüben, die der ersten das Gleichgewicht hält, sodass die resultierende Kraft auf K null ist. Wenn nun aber A auf K eine Kraft  $\vec{F}_{AK}$  ausübt, so muss, nach dem dritten Newton'schen Gesetz auch K eine Kraft  $\vec{F}_{KA}$  auf A ausüben. Das Analoge gilt für B: Da B auf K die Kraft  $\vec{F}_{BK}$  ausübt, muss K eine Kraft  $\vec{F}_{KB}$  auf B ausüben. Alle vier Kräfte  $\vec{F}_{AK}$ ,  $\vec{F}_{BK}$ ,  $\vec{F}_{KA}$  und  $\vec{F}_{KB}$  haben den gleichen Betrag, die Richtungen sind paarweise entgegengesetzt:

$$\vec{F}_{AK} = -\vec{F}_{BK}, \vec{F}_{AK} = -\vec{F}_{KA}, \vec{F}_{BK} = -\vec{F}_{KB}, \vec{F}_{KB} = -\vec{F}_{KA}$$

So wird die Situation beschrieben, in der ein Körper K

ruht. Dies ist, abgesehen von der trivialen Situation der Kräftefreiheit, die einfachste Situation, die es gibt. Wer verstehen will, was eine Kraft ist, muss diese vier Kräfte begrifflich auseinanderhalten.

### Mängel

Das Problem ist so kompliziert, dass es ein Durchschnittsschüler nicht versteht. Tatsächlich haben noch Physikstudenten Schwierigkeiten, die vier Kräfte auseinanderzuhalten. Die Schule macht trotzdem den verzweifelten Versuch, den Newton'schen Kraftbegriff in der Mittelstufe einzuführen.

### Herkunft

Der Kraftbegriff, der hier vermittelt wird, stammt von Newton, d. h. aus einer Zeit als man mechanische Wechselwirkungen nur als Fernwirkungen beschreiben konnte [1]. (Der Feldbegriff entstand erst mehr als 100 Jahre später.) Eine Kraft wurde stets zwei Körpern zugeordnet: einem, der sie ausübt, und einem, auf den sie wirkt. In dem angesprochenen Problem treten drei Körper auf, die zu sechs Kräften führen. Von diesen interessieren uns diejenigen vier, an denen der Körper K beteiligt ist.

Eine begriffliche Vereinfachung wäre zu dem Zeitpunkt möglich gewesen, als der Feldbegriff durch Faraday und Maxwell eingeführt wurde. Tatsächlich ist eine solche aber erst vorgeschlagen worden, nachdem klar geworden war, dass der Impuls eine eigenständige men genartige Größe ist und nicht nur eine bequeme Abkürzung für das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit: Max Planck hat 1908 [2], also drei Jahre nach der Veröffentlichung der speziellen Relativitätstheorie gezeigt, dass eine Kraft nichts anderes ist, als die Stromstärke eines Impulsstroms. Eine Kraft ist damit eine Größe, deren Wert sich nicht auf einen Körper bezieht, sondern auf eine Schnittfläche durch einen Impulsleiter (so wie sich auch jede andere Stromstärke auf eine durchströmte Fläche bezieht).

Wendet man diese Einsicht auf die oben zitierte Situation an, so löst sich das Wirrwarr der vier Kräfte auf: Es handelt sich bei allen vier um die (Impuls-)Stromstärke desselben Stroms, an vier verschiedenen Stellen gemessen:  $\vec{F}_{KA}$  ist die Stärke des Stroms, der von A nach K fließt beim *Verlassen* von A,  $-\vec{F}_{AK}$  ist die Stärke desselben Stroms beim *Eintritt* in K.  $\vec{F}_{BK}$  ist die Stärke dieses Stroms, wenn er K wieder *verlässt* und  $-\vec{F}_{KB}$  ist seine Stromstärke, wenn er in B ankommt. Dass der Betrag überall derselbe ist, liegt daran, dass sich Impuls nirgends anhäuft: weder auf dem Weg zwischen den Körpern noch im Körper K selbst. Das Vorzeichen ist deshalb nicht immer dasselbe, weil man die Bezugsfläche für die Stromstärkemessung nicht einheitlich orientiert.

### Entsorgung

Der ganze Spuk löst sich auf, wenn man statt mit Kräften mit Impulsströmen operiert. Die verbale Beschreibung unserer Situation ist dann etwa so: Es fließt Impuls von A nach K und von K nach B. Da sich nirgends Impuls anhäuft, ist die Stärke des Stroms an jeder Stelle gleich.

- [1] F. Herrmann, *Fernwirkungen*, Altlasen der Physik
- [2] M. Planck, *Bemerkungen zum Prinzip der Aktion und Reaktion in der allgemeinen Dynamik*, Phys. Z. 9, 1908, S. 828

## 3.3 Das dritte Newton'sche Gesetz

### Gegenstand

„Kräfte treten immer paarweise auf. Übt ein Körper A auf einen anderen Körper B eine Kraft aus (*actio*), so wirkt eine gleich große, aber entgegen gerichtete Kraft von Körper B auf Körper A (*reactio*).“

Man zeigt die Gültigkeit des Gesetzes oft mit einem Experiment: Zwei Personen stehen auf zwei Rollbrettern und ziehen sich mithilfe eines Seiles aufeinander zu; einmal zieht die eine, einmal die andere, Abb. 3.1.

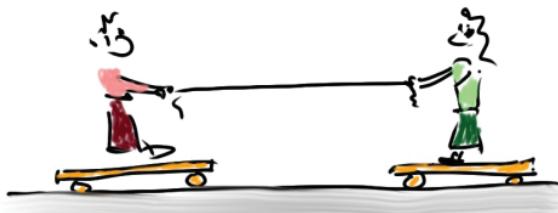


Abb. 3.1 Zum experimentellen Beweis des dritten Newton'schen Gesetzes: Eine Person zieht, die andere nicht.

### Mängel

Ich gestehe, dass ich selbst das Gesetz lange nicht verstanden hatte, auch am Ende meines Physikstudiums noch nicht. Es hatte mich allerdings auch nicht sonderlich interessiert. Es schien mir einer der Sprüche zu sein, wie man sie auch im Religionsunterricht lernt. Du weißt, was du im richtigen Augenblick (im Augenblick der Prüfung) zu sagen hast. Und das wusste ich sehr wohl. Es war ja nicht sehr schwer, den Satz nachzusprechen.

Hier mein Problem: Von einem Gesetz erwarte ich, dass es sagt, wie es ist, aber auch dass es sagt, wie es nicht ist. Damit das Gesetz verständlich ist, muss man

## Das dritte Newton'sche Gesetz (zum dritten Mal)

sich eine Welt vorstellen können, in der es nicht gilt. Nehmen wir das 2. Newton'sche Gesetz (oder das, was heute so genannt wird): Es gilt

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}.$$

Wer es noch nicht kennt, könnte sich durchaus vorstellen, dass gilt

$$\vec{F} = k \cdot m^2 \cdot \vec{a}.$$

Ich konnte mir nun aber einfach keine Welt vorstellen, in der das dritte Gesetz nicht gilt. Wie soll es aussehen, wenn die Kraft, die Körper A auf Körper B ausübt, nicht gleich der ist, die B auf A ausübt, Abb. 3.2? Sollte sich B in Bewegung setzen und A nicht? Das kann ja aus Symmetriegründen nicht sein. Wozu brauche ich da noch ein Gesetz?



Abb. 3.2 Die Situation ist symmetrisch.

Da dieses Unbehagen wohl jeder haben würde, der die Situation von Abb. 3.2 betrachtet, hat irgendjemand die zweifelhafte Idee für das Experiment von Abb. 3.1 gehabt.

Man baut die Geschichte zwar zunächst symmetrisch auf — zwei Wagen, zwei Personen —, bricht dann aber die Symmetrie, indem man nur den einen der beiden Protagonisten ziehen lässt. Und die Begleitmusik geht so: A zieht, d.h. übt eine Kraft aus, B zieht nicht, übt also keine Kraft aus, oder wenigstens nicht absichtlich, und trotzdem übt B eine Kraft aus, denn sonst würde A nicht beschleunigt. Dass das „Ziehen“ der einen oder der anderen Person nichts mit dem dritten Gesetz zu tun hat, merkt man so nicht gleich. Es offenbart vielmehr, dass der Experimentator Impuls- und Energieaussagen durcheinander bringt. Was die beiden Teilexperimente — A zieht oder B zieht — unterscheidet, ist nur die Energiequelle für die Beschleunigung. Und was die Voraussetzung dafür ist, dass man das Experiment für überzeugend hält, ist, dass man an den Spruch glaubt, Kräfte erkenne man an einem „Muskelgefühl“. In manchen Versionen des Experiments wird sogar noch darauf geachtet, dass die nichtziehende Person das Seil nicht mit der Hand hält, sondern sich um die Taille bindet, damit diese nichtziehende, sondern nur haltende Person kein Muskelgefühl hat. (An die Muskeln in Hüfte und Beinen scheint der Experimentator nicht gedacht zu haben.)

### Herkunft

Von Newton selbst. Newton war genial — darüber besteht kein Zweifel; aber zu seiner Zeit war es wohl Programm, die Welt zu beschreiben wie einen Gegenstand der Mathematik, d.h. axiomatisch. Sein Werk heißt schließlich auch „Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie“, und es wimmelt von *definitiones*, *leges*, *scholia*, *corollaria*, *lemmata* etc. Dieses Ziel musste er natürlich verfehlen, wie zum Beispiel Ernst Mach ausführlich darlegt [1]. Dass dabei der Satz von der Gleichheit der Kräfte, die zwei Körper aufeinander ausüben, als Gesetz auftritt, ist nicht überraschend.

### Entsorgung

Das dritte Gesetz ist eine (triviale) Folge des Impulssatzes. Da der Impulssatz ohnehin behandelt wird, braucht man kein gesondertes (drittes Newton'sches) Gesetz.

Das Experiment mit den Rollbrettern kann durchaus nützlich sein, nämlich, wenn man außer der Impuls- auch die Energiebilanz diskutiert, d.h. nach dem Verlauf von Impuls- und Energieströmen fragt.

[1] E. Mach, E, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, F. A. Brockhaus, Leipzig, 1897, S. 180 f.

## 3.4 Das dritte Newton'sche Gesetz (zum dritten Mal)

### Gegenstand

„Wenn Willy und Lilly, Abb. 3.3, mit derselben Kraft ziehen, bewegt sich das Seil nicht. Es herrscht Kräftegleichgewicht. Wenn sich das Seil bewegt, etwa nach links, zieht Willy mit der größeren Kraft.“



Abb. 3.3 Zieht Willy mit der größeren Kraft?

### Mängel

Ich bin dem Altladenleser nicht böse, wenn er diesen Artikel weglässt. Schließlich war das dritte Newton'sche Gesetz schon zweimal Thema. Hier trotzdem noch einmal, aus aktuellem Anlass.

Jeder Autor wünscht sich viele Leser. Aber nicht nur das; er wünscht sich ganz bestimmte Leser. Auch der

### Das dritte Newton'sche Gesetz (zum dritten Mal)

Schreiber dieser Kolumne hat eine solche Hoffnung: die Altlasten mögen gelesen werden von Schulbuchautoren. Leider werden sie es nicht. So können die Leser, die keine Schulbuchautoren sind, nur mit Verzweiflung oder Schadenfreude zuschauen, wie die Schulbuchautoren dieselben Fehler von einer Generation zur nächsten weitergeben.

Trotzdem hier eine Korrekturanmerkung zu einem Lehrbuch, das gerade frisch aus der Presse kommt, siehe das oben stehende, leicht verfremdete Zitat: Da die Masse des Seils gegenüber der aller anderen Beteiligten vernachlässigt werden kann, ist die Kraft, die Willy auf das Seil ausübt, dem Betrage nach immer gleich der die Lilly ausübt. Das ist das dritte Newton'sche Gesetz. Vielleicht wäre es keine schlechte Idee gewesen, einmal nachzumessen.

Wenn wir die Behauptung auf ein anderes System anwenden, so ergibt sich eine interessante Schlussfolgerung: Zwei elektrisch geladene Körper ziehen sich an, sie machen „Tauziehen“. Das „Tau“ ist in diesem Fall das elektrische Feld. Wenn es nach den Regeln gehen würde, die unserem Zitat zugrunde liegen, könnte nun der eine Körper mit einer größeren Kraft als der andere ziehen. Dadurch würde sich der Schwerpunkt des ganzen Systems in Bewegung setzen. In Zeiten knapper Energie vielleicht ein interessantes Geschäftsmodell – wenn es funktionieren würde.

#### Herkunft

- Die Mechanik ist schwierig, wenn man sie mit der Newton'schen Sprechweise formuliert.
- Die Behauptung, man spüre Kräfte über die Muskeln, d.h. über das Ausmaß der Anstrengung.
- Wenn eine falsche Interpretation, Erklärung oder sonstige Aussage keinerlei nachteilige Konsequenzen hat, so hat die richtige Deutung gegenüber der falschen schlechte Karten. Das kennen wir von der Evolution. Die Proteinbausteine aller lebenden Organismen sind linksdrehend, obwohl rechtsdrehende keinen evolutionären Nachteil hätten. Die eine Sorte war zufällig einmal in der Überzahl, und von da an hatte die andere Sorte immer geringere Überlebenschancen, bis sie schließlich ausgestorben ist. Offenbar hat das Nichtverstehen des dritten Gesetzes keinerlei nachteilige Konsequenzen, weder in der Prüfung, noch im täglichen Leben.

#### Entsorgung

Wenn man sich entschließt, bei der selbstquälerischen, spätbarocken Newton'schen Sprechweise zu bleiben (und nicht die Impulsstromdarstellung benutzt, in der die Schwierigkeiten gar nicht auftreten), so bleibt nichts

anderes, als sich die Newton'sche Mechanik wirklich zu eignen zu machen, was offenbar nicht jedem gelingt.

Wenn man das Tauziehen unbedingt in der Schule diskutieren möchte, hier einige Anregungen.

Es soll ja festgestellt werden, ob Willy stärker ist als Lilly oder umgekehrt, wobei wir mit „stärker“ zunächst noch nicht unbedingt eine größere Kraft meinen. Die Frage ist zunächst, worin sich denn Willy und Lilly in diesem Zusammenhang unterscheiden.

Man könnte dazu das folgende (Gedanken-)Experiment machen. Man misst die Stärke von Willy und Lilly getrennt – mit der Anordnung der Abb. 3.4.

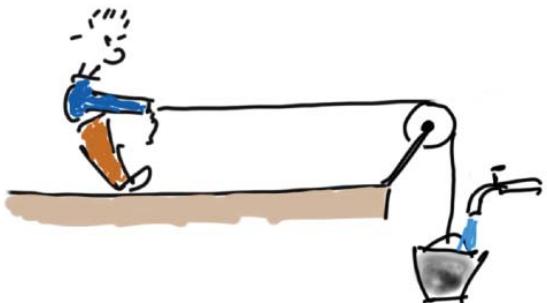


Abb. 3.4 Willys Stärke wird gemessen.

Zunächst muss Willy mithilfe des Seils den Wassereimer in der Schwebe halten. Solange noch nicht viel Wasser darin ist, ist das kein Problem. Nun fließt aber ständig Wasser zu, bis der Eimer schließlich so schwer wird, dass Willy ihn nicht mehr halten kann. Die Wassermenge ist dann ein Maß für Willys Stärke. Damit ist auch die Kraft, bei der Willy den Eimer gerade noch halten kann, ein Maß für seine Stärke.

Dann wird Lilly auf die gleiche Art vermessen und man kann entscheiden, wer „stärker“ ist, und man weiß auch, wer beim Tauziehen gewonnen hätte. Es bleibt aber die Frage, welche Eigenschaft oder Fähigkeit der beiden Personen, in physikalischen Termen ausgedrückt, denn hier gemessen wurde. Es könnte sein, dass Willy glattere Schuhsohlen hat, und deshalb verliert. Das ist natürlich nicht das, was man messen wollte. Also nehmen wir an, der Kontakt zum Boden sei perfekt, d.h. kein Rutschen und Reiben. Nun sieht man vielleicht, worauf es tatsächlich ankommt. Die Person, sagen wir Willy, übt Kräfte aus, und zwar auf das Seil und auf die Erde, die vom Betrag her gleich sind. Für den Betrag dieser Kräfte gibt es einen Maximalwert, der nicht überschritten werden kann, weil Willy zusammenknickt oder umfällt. An welchen seiner Muskeln das liegt, hängt davon ab, welche Körperhaltung er eingenommen hat.

## Tauziehen

Was gemessen wird, ist also diese maximale Kraft. Beim Tauziehen wird bei einem der beiden Partner dieser Wert zuerst erreicht. Er hat dann verloren.

Mit Impulsströmen ausgedrückt: Willys (oder Lillys) Körper kann nur einen Impulsstrom einer bestimmten Stärke aushalten; bei einem höheren Wert bricht der Impulseiter zusammen, vergleichbar etwa mit einer Schmelzsicherung, die nur einen bestimmten maximalen elektrischen Strom aushält, und den Stromkreis unterbricht, wenn der Strom zu stark wird.

Nun hat das Tauziehen-Problem noch einen anderen Aspekt. Die Körper von Willy und Lilly müssen ja nicht nur die Kraft aushalten (übertragen können). Es muss erstmal dafür gesorgt werden, dass die Kräfte überhaupt entstehen. Und auch hierzu werden die Muskeln gebraucht. Diesmal allerdings nicht in ihrer Eigenschaft als Kraftübertrager (Impulsstromleiter), sondern in ihrer Eigenschaft als mechanische Energiequelle. Diese wird gebraucht, auch wenn im Gleichgewicht gar keine Energie fließt.

Man sieht, dass die physikalische Erklärung des Tauziehens komplizierter ist, als man es vielleicht vermutet hätte. Zur Erläuterung des dritten Gesetzes ist es ungeeignet, da hier die Frage nach *actio* und *reactio*, im Vergleich zu den anderen Problemen, eher sekundär ist.

Vielleicht aber noch ein anderer Vorschlag: Wenn man etwas falsch erklärt und das keinerlei Konsequenzen hat für die Lernenden, die trotzdem gute Eventmanager oder Wirtschaftsprüfer oder auch Ingenieure werden, könnte man auch daran denken, das Thema ganz wegzulassen. Man würde Zeit gewinnen für etwas Vernünftiges. Dem Ansehen der Physik würde es auch nicht schaden.

Im Fall des Tauziehens wurde eine leicht nachsprechbare, nicht ganz unplausible, aber schwer kontrollierbare Aussage zum Allgemeinbildungsgut erklärt. Das kennen wir doch auch anderswoher. Die Physik hat eigentlich einen besseren Ruf verdient.

## 3.5 Tauziehen

### Gegenstand

Zwei Personen A und B spielen Tauziehen. A übt mithilfe des Seils eine Kraft auf B aus und B auf A, Abb. 3.5.

### Mängel

In einem Seminar bekommen 17 Studierende des Lehramts Physik (5. bis 7. Semester) die Aufgabe, die Kräfte beim Tauziehen in eine Abbildung einzurichten und die Zusammenhänge zwischen diesen Kräften zu diskutieren.

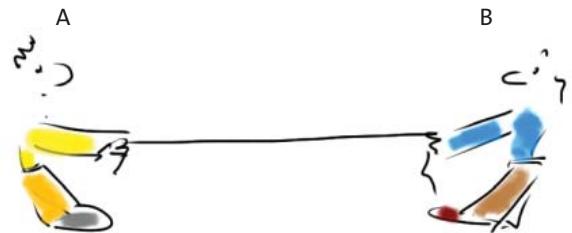


Abb. 3.5 A übt auf B und B übt auf A eine Kraft aus.

tieren. Sie arbeiten in kleinen Gruppen und dürfen miteinander reden. Sie bekommen keine Hilfe vom Dozenten. Am Ende sollen sie ihr Ergebnis präsentieren. Man beginnt mit dem einfachsten Fall: Beide Personen A und B befinden sich in Ruhe und bleiben in Ruhe, also Geschwindigkeit null und Beschleunigung null. Jeder zieht mit einer Kraft von 200 N.

Es stellt sich heraus, dass es drei Meinungen darüber gibt, „welche Kraft im Seil herrscht“.

### Meinung 1

Die Kraft im Seil ist null, denn  $(+200 \text{ N}) + (-200 \text{ N}) = 0$ .

### Meinung 2

Die Kraft beträgt 400 N, denn  $2 \cdot 200 \text{ N} = 400 \text{ N}$

### Meinung 3

200 N.

Da es zu keiner Einigung kommt, entschließt man sich, eine Abstimmung zu machen. Überraschenderweise votieren schließlich alle für 400 N. Weil man sich aber nach wie vor nicht sicher ist, wird überlegt, wie man feststellen könnte, ob die Aussage richtig ist. Es wird vorgeschlagen drei Kraftmesser in das Seil einzubauen, Abb. 3.6: einen auf der Seite von A zur Messung der „Kraft von A“, einen auf der Seite von B zur Messung der „Kraft von B“ und einen in der Mitte zur Messung der „Kraft im Seil“.

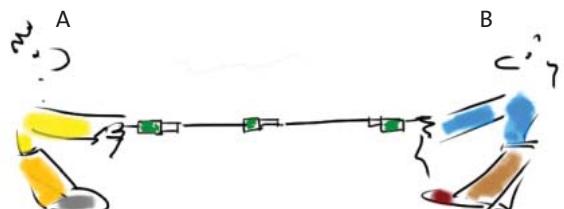


Abb. 3.6 „Der linke Kraftmesser misst die Kraft von A, der rechte die von B. Der in der Mitte misst die Kraft im Seil.“

Da die Praktikumssammlung in der Nähe ist, schlägt der Dozent vor, es auszuprobieren — was auch getan wird. Das Ergebnis ruft Überraschung hervor.

So geschehen vor nicht allzu langer Zeit an der Fakultät für Physik am Karlsruher Institut für Technologie. Die beteiligten Studierenden hatten bis dahin die Newton'sche Mechanik dreimal „gelernt“: in der Mittelstufe des Gymnasiums, in der Oberstufe des Gymnasiums und in der Experimentalphysikvorlesung. Außerdem wurden in der Theorievorlesung die Hamilton- und Lagrangemechanik behandelt. Die Studierenden machten keineswegs den Eindruck, besonders untalentiert oder unintelligent zu sein.

Man übertreibt kaum, wenn man sagt, dass dieses Ergebnis ein Fiasko ist. Wir könnten noch über weitere ähnliche Erfahrungen mit Problemen der elementaren Mechanik berichten. Man kann das Ergebnis auch so formulieren: Die Studierenden können die Newton'sche Mechanik nicht.

### Herkunft

Die Schuld für das beschämende Ergebnis liegt nicht bei den Studierenden und auch nicht unbedingt an den Lehrern und Professoren, wenigstens nicht an deren Fähigkeiten, die Physik zu lehren. Das Ergebnis ist offenbar unabhängig davon, bei wem die Studierenden die Physik gelernt haben. Aber man sollte hier gar nicht nach der Schuld fragen, sondern nach der Ursache. Denn die ist leicht auszumachen: Es ist die Newton'sche Art, Impulstransporte zu beschreiben.

Wir betrachten die Situation der Abb. 3.7: Zwei Körper A und B sind durch eine gedehnte Feder miteinander verbunden. Dabei nimmt der Impuls von Körper A zu, der von B nimmt ab.



Abb. 3.7 Die Feder steht unter Zugspannung. Vom rechten zum linken Körper fließt Impuls.

Wenn man die lokale Impulserhaltung ernst nimmt, so muss man sagen, der Impuls geht durch die Feder von B nach A, oder in anderen Worten, in der Feder fließt ein Impulsstrom von B nach A. Wenn man die Stromstärke beim Austritt des Stroms aus B kennt, so kennt man sie natürlich auch beim Eintritt in A und an allen Stellen dazwischen — genauer: durch jede Schnittfläche, die man durch die Verbindung zwischen A und B legen kann. Wir haben den Sachverhalt hier mit einem Modell beschrieben, das sich an vielen Stellen der Physik bewährt hat: dem Stoffmodell. Man stellt sich den Impuls als ein Fluidum vor, das strömen kann, ähnlich wie man es mit der elektrischen Ladung oder der

Masse tut. Die Änderung des Impulsinhalts eines Systems kommt dann zustande durch Zu- oder Wegfluss von Impuls.

Newton konnte dieses einfache Modell nicht anwenden, denn er hätte dazu den Feldbegriff gebraucht, und den gab es noch nicht. Sein wichtigster Forschungsgegenstand war ja die Impulsänderung von Himmelskörpern. Wie kommt der Impuls (die *quantitas motus*) von der Erde zum Mond oder vom Monde zur Erde? Über ein System, das den Transport vermittelt, und das sich zwischen Erde und Mond befindet, also das, was wir heute Gravitationsfeld nennen, hatte er nicht genug Kenntnis, daher sein *Hypoteses non fingo*. Und daher sein geniales, aber sehr sperriges Kraftmodell: Statt „der Impuls geht von A nach B“ heißt es: „A übt auf B eine Kraft aus und B übt auf A eine Kraft aus und dadurch ändert sich der Impuls beider Körper.“ Dass das nicht das letzte Wort zu dem Thema war, war ihm klar [1]. Das Newton'sche Kraftmodell gestattet eine stimmige Beschreibung mechanischer Wechselwirkungen, aber der Umgang mit ihm ist, wie wir gesehen haben, schwierig.

### Entsorgung

Heute sind wir in einer viel bequemerem Lage als Newton es war. Man kann getrost davon ausgehen, dass Newton, hätte ihm der Feldbegriff zur Verfügung gestanden, die Prozesse, von denen hier die Rede ist, mit Impulsströmen beschrieben hätte. (Da er das, was bei uns heute Impuls heißt, Bewegungsmenge oder auch kurz nur Bewegung nannte, würde er wohl den zugehörigen Strom Bewegungsstrom genannt haben.)

[1] Brief von Newton an Richard Bentley, The Newton Project <http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/view/texts/normalized/THEM00258> „The last clause of your second Position I like very well. Tis unconceivable that inanimate brute matter should (without the mediation of something else which is not material) operate upon & affect other matter without mutual contact; as it must if gravitation in the sense of Epicurus be essential & inherent in it. And this is one reason why I desired you would not ascribe innate gravity to me. That gravity should be innate inherent & essential to matter so that one body may act upon another at a distance through a vacuum without the mediation of any thing else by & through which their action or force may be conveyed from one to another is to me so great an absurdity that I believe no man who has in philosophical matters any competent faculty of thinking can ever fall into it. Gravity must be caused by an agent acting constantly according to certain laws, but whether this agent be material or immaterial is a question I have left to the consideration of my readers.“

## Die Kraft in der Tischplatte

### 3.6 Die Kraft in der Tischplatte

#### Gegenstand

Im Mechanikteil der Physikschulbücher werden verschiedene Kräfte angesprochen: Gewichtskraft, Hangabtriebskraft, Normalkraft, Reibungskraft, Auftriebskraft und viele andere mehr. Von einer Kraft sagt man, ein Körper übe sie auf einen anderen aus. Wenn man den ausübenden Körper nicht erwähnen will, sagt man sie wirke auf einen Körper. Manchmal sagt man auch, sie greife an einem Körper an, oder auch, sie greife am Angriffspunkt an. Gelegentlich benutzt man noch eine andere Formulierung: Statt zu sagen, ein schwerer Körper übe eine Kraft auf die Erde aus, sagt man, er übe die Kraft auf seine Unterlage aus, zum Beispiel auf eine schiefe Ebene.

#### Mängel

Man sieht an diesen sprachlichen Wendungen, dass man es mit einer schwierigen Größe zu tun hat (im Gegensatz zu allen Beteuerungen, dass jeder Mensch ein natürliches Gefühl für Kräfte habe). Dass der sprachliche Umgang mit der Größe Kraft so ungewöhnlich ist, lässt erkennen, dass das Konzept auch begrifflich schwierig ist. Man kann sich leicht davon überzeugen, dass es die meisten Studierenden der Physik nicht ganz verstanden haben.

Betrachten wir den Fall, dass eine Kiste auf dem Boden steht. (Ein einfacheres statisches Problem kann man sich kaum vorstellen.) In diesem Fall übt die Erde auf die Kiste eine Kraft aus, die man nach  $m_{\text{Kiste}} \cdot g$  berechnen kann. Die Erde übt die Kraft aus? Die ganze Erde? Auch die ganz unten in Neuseeland? So muss es wohl sein. Die übt sie, wie gesagt, auf die Kiste aus. Auf die ganze Kiste? Ja und nein. Schon auf die ganze Kiste. Aber sie greift ja, wie man sagt, in einem Angriffspunkt an. Wie kommt sie dann aber vom Angriffspunkt zu den anderen Punkten der Kiste? Vor allem dann, wenn die Kiste leer ist und der Angriffspunkt dort liegt, wo sich nur Luft befindet. Und wie steht es mit der Erde? Hat sie entsprechend einen „Angriffspunkt“? Auf jeden Fall gibt es ja nach dem 3. Newton'schen Gesetz zu unserer ersten Kraft eine Gegenkraft, und die wird wohl am Angriffspunkt der Erde angreifen. Oder doch nicht? Sagt man nicht eher, dass die Kiste die Kraft auf ihre Unterlage ausübt? Wenigstens ist das doch plausibler, als auf die ganze Erde. Stellen wir nun die Kiste auf einen Tisch. Da wird die Sache noch komplizierter. Jetzt übt die Kiste eine Kraft auf den Tisch aus, oder vielleicht genauer, auf ihre Auflagefläche auf der Tischplatte. Die Tischplatte gibt sie dann irgendwie weiter an die Tischbeine. (Aber darf man in der Prüfung so sprechen? Wie sagt man es dann aber?) Und jedes Tischbein übt eine

Kraft auf die Erde aus. Wieder: nur auf die vier Auflageflächen oder auf die ganze Erde, also einschließlich Neuseeland? Und da gibt es dann auch noch das Gravitationsfeld. Welche Rolle spielt dieses? Es heißt manchmal, es „vermittele die Kraft“. Es vermittelt zwischen zwei Körpern, wie der Heiratsvermittler zwischen zwei Menschen unterschiedlichen Geschlechts.

Sie haben natürlich bemerkt, liebe Leserin oder lieber Leser, und Sie mögen es mir vorwerfen, dass ich mich hier absichtlich dumm gestellt habe. Natürlich habe ich das. Aber sind die Fragen, die ungeschickten Formulierungen, die ich skizziert habe, nicht eigentlich nahe liegend? Muss man denn solche Fragen nicht stellen, wenn man so an die Statik herangeführt wird, wie es in der Schule (und auch in der Physikvorlesung an der Uni) geschieht?

Das Problem ist, dass wir es bei einem statischen Problem immer mit einem geschlossenen Weg zu tun haben, oder mindestens mit einem Teilstück eines solchen Weges – nur sagen wir das nicht. Stattdessen sprechen wir bestenfalls über einige wenige Schnittstellen in diesem Weg, und schlimmstenfalls über Angriffspunkte, die, wie etwa bei einem Ring oder der leeren Kiste, auch dort liegen können, wo der Körper gar nicht ist.

Der größte Teil unseres Kistenproblems wird also gar nicht angesprochen: Wie steht es um die Kräfte in der Kiste, in der Tischplatte, in den Tischbeinen, in der Erde, im Gravitationsfeld? Wir haben zwei oder drei Stellen herausgepickt, für die sich die Berechnung der Kraft leicht ausführen lässt. Wir können dann aber schlecht in Anspruch nehmen, wir würden über die Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler sprechen.

Man könnte meinen, hier sei nichts zu machen: Unterrichtszeit ist ein knappes Gut. Wir müssen uns auf die einfachen Fälle beschränken. Schließlich behandeln wir auch nur lineare Schwinger und lassen die nichtlinearen für die Uni. Wir behandeln das ideale Gas und überlassen das reale Gas der Uni, etc ... Wenn wir die gesamte Verteilung der Kraft in einem statischen Problem behandeln wollten (genauer: die Verteilung der mechanischen Spannungen), so brauchten wir, könnten man denken, Landau-Lifshitz Band 7 oder Ähnliches – also nichts für die Schule. Darum, so wird man schließen, beschränken wir uns darauf, die Kräfte nur an einigen wenigen Stellen zu beschreiben.

Tatsächlich liegt die Sache hier anders als im Fall der linearen Näherung bei den Schwingungen oder der Idealisierung beim Gas. Es ist ja nicht so, dass die Kraft in der Kiste geringer wäre als an der Stelle, wo die Kiste den Boden berührt. Es ist also keine Näherung was wir machen, sondern wir blenden einfach den größten Teil des Phänomens aus.

## Herkunft

Man macht es wie zu Newtons Zeiten, als es noch nicht anders ging. Euler und Bernoulli waren später und haben im Unterricht kaum Spuren hinterlassen. An der Universität lernen die zukünftigen Lehrerinnen und Lehrer stattdessen die Theorien von Hamilton und Lagrange, die zwar sehr elegant sind, mit denen sie aber in ihrem Beruf kaum etwas anfangen können.

Die Newton'sche Mechanik benutzt eine Sprache, die die Frage nach der Kraft in einer Tischplatte, innerhalb der Erde, innerhalb der Kugel, die von einer anderen angestoßen wird, oder gar der Kraft im Gravitationsfeld, gar nicht erst aufkommen lässt. Kräfte wirken einfach auf Körper, auf die Erde oder auf den Mond, auf eine Feder, nur gelegentlich auch mal in einem Seil. Und natürlich weder auf das noch in dem Gravitationsfeld – denn das gab es damals noch nicht.

## Entsorgung

Die von Newton eingeführte, barocke Kraftmetapher ist nicht mehr zeitgemäß. Newton hat sie ja genau mit der Absicht erfunden, nicht über die oben angeschnittenen Probleme sprechen zu müssen – zu damaliger Zeit eine geniale Idee. Das Hauptproblem war, dass er den Begriff des Gravitationsfeldes noch nicht hatte. Und natürlich war er noch weit von einer Mechanik der Kontinua entfernt.

Heute sind wir in einer viel besseren Lage und müssten uns die Newton'sche Sprache nicht mehr antun, nachdem Euler und Bernoulli die Mechanik der kontinuierlichen Medien entwickelt haben, und vor allem seitdem Planck gezeigt hat, dass man Kräfte als Impulsströme interpretieren kann. Dann geht die Beschreibung unseres Kistenproblems so: Impuls kommt von der Erde, und zwar von allen Stellen der Erde durch das Gravitationsfeld zur Kiste, im breiten Strom zu allen Punkten der Kiste, an denen sich Masse befindet; falls die Kiste leer ist, also nicht ins Innere. Dann fließt er durch die Materie der Kiste zu ihrer Unterseite, von dort in die Erde, in der er sich weit verteilt. So ist der Stromkreis geschlossen. Durch die Erde fließen natürlich noch viel mehr Impulsströme, aber der gerade beschriebene ist der Anteil, der mit unserer Kiste zu tun hat.

All das kann man sagen, noch bevor man mit irgend-einer Rechnung begonnen hat.

Manchmal hat man den Eindruck, dass die Auffassung herrscht, solange man nicht rechnet, habe man es noch nicht mit richtiger Physik zu tun. Ich bin gar nicht dieser Meinung: Das Wesentliche des Verständnisprozesses geht der Rechnung voraus.

Wenn wir sagen, das Wasser im Ozean verdunstet, wird mit der Luft auf das Land transportiert, konden-

siert, fällt als Regen herunter auf die Erde, sammelt sich in Bächen und Flüssen, und gelangt so zurück ins Meer – so sagen wir sehr viel Wichtiges über den Wasserkreislauf, ohne dass wir für irgendeine Schnittfläche durch den Wasserstromkreis eine Stromstärke, oder für irgendeinen Punkt eine Stromdichte angegeben haben. Warum sollen wir nicht mit dem Impuls auf dieselbe Art verfahren? Es ist doch so einfach!

## 3.7 Das Überlagerungsprinzip

### Gegenstand

Das Überlagerungs- oder Unabhängigkeitsprinzip

### Mängel

1 Verschiedene Autoren scheinen unter dem Überlagerungsprinzip Verschiedenes zu verstehen. Einigen Texten zufolge macht das Prinzip eine Aussage über die vektorielle Addition von Kraft oder Impuls [1, 2], in anderen ist es ein Satz über die Addition der kinematischen Größen Geschwindigkeit, Weg und Beschleunigung [3, 4]. Manchmal wird es als eine Formulierung des Relativitätsprinzips vorgestellt [5].

2 Beschränkt man sich darauf, zu behaupten, eine bestimmte vektorielle Größe sei additiv, so macht man eine Aussage, mit der nicht viel anzufangen ist. Es muss auf jeden Fall klar zum Ausdruck gebracht werden, unter welchen Umständen man die Werte der Größe addieren darf. Die Addition jeder physikalischen Größe – egal ob Skalar, Vektor oder Tensor – hat in der realen Welt irgendeine Entsprechung. Welchen Sinn macht der Satz, Geschwindigkeiten seien additiv? Das Addieren der Geschwindigkeiten von nebeneinander fahrenden Autos ist sinnvoll, wenn man den Mittelwert der beiden Geschwindigkeiten berechnen will. Geschwindigkeiten verhalten sich aber auch additiv bei Bezugssystemwechsel. Sind Drücke additiv? Manchmal schon: Partialdrücke idealer Gase addieren sich zum Gesamtdruck. Kräfte kann man addieren, wenn sie auf denselben Körper wirken. Impulse, wie alle anderen extensiven Größen, verhalten sich additiv, wenn man zwei Teilsysteme zu einem Gesamtsystem zusammenfasst. Sind Temperaturen additiv? Addiert man die Temperaturen, die ein Körper zu zehn verschiedenen äquidistanten Zeitpunkten hat, und dividiert durch 10, so erhält man das Zeitmittel der Temperatur. Schaltet man zwei Wärmepumpen hintereinander, so ist die insgesamt erreichte Temperaturdifferenz gleich der

## Das Überlagerungsprinzip

Summe der Temperaturdifferenzen, die jede Wärme pumpe einzeln schafft, usw.

- 3 Wenn das Überlagerungsprinzip tatsächlich nichts anderes ist als die Aussage, die Geschwindigkeit oder die Kraft addiere sich unter bestimmten Umständen vektoriell, so ist es wohl kaum gerechtfertigt, eine solche Aussage als Prinzip zu bezeichnen und als eine Besonderheit herauszustellen (wie es in vielen Texten geschieht), es handele sich um einen Erfahrungssatz. In [1] und [2] wird die Aussage sogar zu Newtons Lex Quarta erhoben. Wie wir gesehen haben, kann man ein entsprechendes Prinzip zu jeder anderen physikalischen Größe formulieren. Die Additionsregel der Kraft, sowie die der Geschwindigkeit, gehört einfach zu den Anwendungsregeln des fundamentalen physikalischen Handwerkszeugs: zu den Regeln für den Umgang mit jeder einzelnen physikalischen Größe. Schließlich war das Überlagerungsprinzip ja auch bei Newton kein Gesetz.
- 4 In den meisten Schulbüchern wird das Überlagerungsprinzip vorgestellt als ein Prinzip, das aus einem Wurfexperiment folgt: Zwei Körper fallen gleichzeitig aus derselben Höhe, der eine wird einfach losgelassen, der andere beginnt mit einer waagrechten Impulskomponente. Das Ergebnis des Experiments ist, dass die Vertikalgeschwindigkeiten der beiden Körper denselben zeitlichen Verlauf zeigen. Nun setzt der Ausgang des Experiments die Gültigkeit mehrerer Gesetze und Regeln voraus, sodass es nicht verwunderlich ist, wenn unterschiedliche Schlüsse gezogen werden. Man kann aber die Bedingungen des Experiments leicht so wählen, dass das gewünschte Ergebnis gar nicht eintritt: Sind die fallenden Körper groß und leicht, sodass die Luftreibung nicht vernachlässigbar ist, so ist die Vertikalkomponente der Geschwindigkeit in den beiden Fällen nicht mehr gleich. Ebenso, wenn der Ortsfaktor, wie es sein Name ja behauptet, vom Ort abhängt. In [5] wird daraus sogar der Schluss gezogen, es gebe gar kein allgemeines Überlagerungsprinzip.
- 5 Eine weitere Schwierigkeit entsteht dadurch, dass man sagt, ein Körper führe gleichzeitig mehrere unabhängige Teilbewegungen aus [3, 4, 5]. Wie erkennt man, ob ein Körper gleichzeitig mehrere Bewegungen ausführt? Indem man die Kraftfelder und die Anfangsimpulse für die Teilbewegungen vorgibt? Dann müsste ein Körper, der sich geradlinig durch gekreuzte elektrische und magnetische Felder bewegt, gleichzeitig eine kreisförmige und eine parabolische Teilbewegung ausführen, was er bekanntlich nicht tut. Oder bekommt man die Teilbewegungen, indem man die tatsächliche Geschwindigkeit nach

den Regeln der Vektorrechnung zerlegt? Dann braucht man sich allerdings nicht zu wundern, dass beim Zusammensetzen die alte Bewegung wieder herauskommt.

## Herkunft

Es ist das erste Korollar zu den drei Gesetzen in Newtons Principia [7]. Offenbar hat es schon in früheren Zeiten Modifikationen erfahren, denn Ernst Mach [8] kommentiert Newtons eigene Formulierung des Satzes: „Diese Auffassung ist vollkommen natürlich und bezeichnet doch deutlich den wesentlichen Punkt. Sie enthält nichts von dem Künstlichen und Geschraubten, das man nachher in die Lehre von der Zusammensetzung der Kräfte gebracht hat.“

## Entsorgung

Es genügt, Kraft und Impuls auf die übliche Art als Vektoren einzuführen. Dabei wird selbstverständlich geklärt, unter welchen Umständen sich Kräfte und Impulse vektoriell addieren. Der Ausgang des Wurfexperiments ist dann vollständig beschreibbar.

[1] A. Sommerfeld, I, Mechanik, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1944, S. 6: „Als Lex Quarta, welche bei Newton allerdings nur als Zusatz zu den Bewegungsgesetzen, als Corollarium, auftritt, wollen wir die Regel vom Parallelogramm der Kräfte ansehen. Sie besagt, dass zwei Kräfte, die am gleichen Massenpunkt angreifen, sich zur Diagonalen des von ihnen gebildeten Parallelogramms zusammensetzen. Kräfte addieren sich wie Vektoren.“

[2] Lexikon Technik und exakte Naturwissenschaften, Band 10, Fischer Taschenbuch Verlag, 1972, S. 2978: „Unabhängigkeitsprinzip (Überlagerungsprinzip, Superpositionsprinzip), von Newton als Lex Quarta formulierte physikal. Erfahrungstatsache: Die Wirkungen mehrerer an einem Körper angreifender Kräfte überlagern sich ungestört, d. h. ohne gegenseitige Beeinflussung.“

[3] Metzler Physik, J. B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1991, S. 21: „Prinzip der ungestörten Überlagerung von Bewegungen: Führt ein Körper gleichzeitig zwei oder mehrere Bewegungen aus, so überlagern sich diese Bewegungen ungestört zur Gesamtbewegung. Wege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen addieren sich vektoriell.“

[4] Grimsehl, I, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1957, S. 29: „Gesetz oder Prinzip von der Unabhängigkeit der Bewegungen: Führt ein Körper gleichzeitig zwei (oder mehrere) Bewegungen aus, so ist der von dem Körper erreichte Ort unabhängig davon, ob die Bewegungen gleichzeitig oder in beliebiger Reihenfolge

## Der Impuls als Produkt aus Masse und Geschwindigkeit

einzelnen nacheinander ausgeführt werden. Daraus folgt also, dass der gleichzeitige Ablauf der Teilbewegungen diese nicht beeinflusst.“

[5] W. Kuhn, *Physik*, Band II, 1. Teil, Klasse 11, Westermann, Braunschweig, 1989., S. 16 – 17: „Beide Teilbewegungen erfolgen offenbar völlig unabhängig voneinander. Die reale Bewegung setzt sich aus zwei voneinander unabhängigen Teilbewegungen zusammen (Unabhängigkeitsprinzip). Der gleiche Sachverhalt folgt auch aus der Anwendung des Relativitätsprinzips. [...] Würde das Unabhängigkeitsprinzip nicht gelten, [...], dann wären die Fallgesetze in einem fahrenden Zug anders als in einem ruhenden. Wir könnten dann durch Fallexperimente im Zug feststellen, ob dieser sich gleichförmig bewegt. Das ist nach unserer Erfahrung unmöglich, denn es würde das Relativitätsprinzip verletzen! Relativitätsprinzip und Unabhängigkeitsprinzip hängen eng zusammen.“

[6] Dorn-Bader, I, Oberstufe Band MS, Lehrerband, Schroedel Schulbuchverlag GmbH, Hannover, 1985, S. 20

[7] A. Motte, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World*, Vol. 1, University of California Press, Berkeley, 1962, S. 14: „A body, acted on by two forces simultaneously, will describe the diagonal of a parallelogram in the same time as it would describe the sides by those forces separately.“

[8] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, F. A. Brockhaus, Leipzig, 1897, S. 192.

## 3.8 Der Impuls als Produkt aus Masse und Geschwindigkeit

### Gegenstand

Der Impuls wird gewöhnlich definiert als das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit eines Körpers:

$$\vec{p} = m \vec{v} \quad (3.1)$$

$\vec{p}$  ist demnach nichts anderes als eine Abkürzung für das Produkt aus  $m$  und  $\vec{v}$ . Der Impuls erscheint damit als Musterbeispiel für eine abgeleitete Größe. In manchen Büchern wird der Impuls sogar ausdrücklich als Hilfsbegriff bezeichnet [1].

### Mängel

Es gibt mehrere Gründe dafür, den Impuls nicht als abgeleitete Größe, sondern als Grundgröße einzuführen.

1 Der Impuls ist eine Erhaltungsgröße. Diese Eigenschaft ermöglicht es, den Impuls von bewegten Kör-

pern zu messen, ohne auf Beziehung (3.1) zurückzugehen [2]. Da man auch die (schwere) Masse und die Geschwindigkeit unabhängig voneinander und unabhängig vom Impuls messen kann, lässt sich die Gültigkeit von Gleichung (3.1) experimentell prüfen.

2 Gleichung (3.1) gilt nicht für alle Systeme. So lässt sich der Impuls des elektromagnetischen Feldes nicht nach dieser Gleichung berechnen. Vielmehr hängt die Impulsdichte  $\vec{\rho}_p$  mit elektrischer und magnetischer Feldstärke zusammen gemäß

$$\vec{\rho}_p = \frac{\vec{E} \times \vec{H}}{c^2}$$

3 Die Beziehung (3.1) hat ein Analogon in der Elektrizitätslehre. Der extensiven mechanischen Größe Impuls entspricht die extensive elektrische Ladung, der intensiven Größe Geschwindigkeit entspricht die intensive elektrische Spannung. So wie für bestimmte Systeme, nämlich nicht zu schnelle (nichtrelativistische) Körper, der Impuls zur Geschwindigkeit proportional ist, so ist für bestimmte andere Systeme, etwa Kondensatoren (aber auch viele andere Systeme) die elektrische Ladung  $Q$  zur elektrischen Spannung  $U$  proportional. Den Proportionalitätsfaktor zwischen  $p$  und  $v$  nennt man die (träge) Masse, den zwischen  $Q$  und  $U$  elektrische Kapazität:

$$Q = C \cdot U \quad (3.2)$$

Ein Vergleich der Beziehungen (3.1) und (3.2) zeigt, dass man die Masse als Impulskapazität eines Körpers interpretieren kann. Je größer die Masse eines Körpers ist, desto mehr Impuls enthält er bei gegebener Geschwindigkeit. (Je größer die elektrische Kapazität eines Kondensators ist, desto mehr Ladung enthält er bei gegebener Spannung.)

Dieser Vergleich zeigt uns, wie ungeschickt es ist, den Impuls über Gleichung (3.1) zu definieren. Es ist so, als würde man die elektrische Ladung über Gleichung (3.2) einführen, statt, wie es üblich ist, als eigenständige, von  $U$  und  $C$  unabhängig messbare Größe.

4 Dass es sinnvoll ist, den Impuls als eigenständige Größe zu begreifen, folgt auch aus der Tatsache, dass die kartesischen Komponenten des Impulses (genauer: der Impulsdichte) drei der Komponenten des Energie-Impuls-Tensors bilden. Das heißt, der Impuls spielt für das Gravitationsfeld eine ähnliche Rolle wie elektrische Ladung oder elektrischer Strom für das elektromagnetische Feld: Er gehört (neben Energie, Energstrom und Impulsstrom) zu den Quellen des Gravitationsfeldes. Die Quellen von Feldern spielen eine wichtige Rolle bei den fundamentalen

## Impuls und Stoß

Wechselwirkungen der Natur, und man wird diese Quellgrößen nur ungern als abgeleitete Größen betrachten.

### Herkunft

Die physikalische Größe Impuls ist (im Gegensatz zur elektrischen Ladung) in einem längeren Entwicklungsprozess entstanden. Es war im 17. Jahrhundert eines der erklärten Ziele der Mechanik, Stoßgesetze zu formulieren. Dabei vermutete man richtig, dass bei Stoßvorgängen eine Invariante eine wichtige Rolle spielt. Diese versuchte man, durch Masse und Geschwindigkeit auszudrücken.

Im Jahr 1644 veröffentlichte Descartes seine *Principia philosophiae*, in denen er die Erhaltung des Produkts aus Masse und Geschwindigkeit, der *quantitas motus* (zu deutsch die Bewegungsmenge) behauptete. Einige Jahrzehnte später glaubte Leibniz nachzuweisen, dass das Produkt aus Masse und Geschwindigkeitsquadrat die „richtige“ Stoßinvariante sei. Und es entbrannte der berühmte, Jahrzehnte dauernde Streit um das „wahre Kraftmaß“, der erst 1726 durch Daniel Bernoulli beendet wurde, und bei dem es bekanntlich keine Verlierer gab. Vielmehr entstanden schließlich zwei neue Begriffe. Den einen nennen wir heute Impuls, den anderen kinetische Energie. Das Ergebnis dieser Entwicklung war ein nach Gleichung (3.1) *definierter* Impuls. Erst viel später entdeckte man, dass man eine Erhaltungsgröße Impuls nur dann konstruieren kann, wenn man die Beziehung (3.1) als Definition aufgibt. Die spezielle Relativitätstheorie lehrte, dass Impuls und Geschwindigkeit nicht mehr proportional sind. Man rettete Gleichung (3.1) für bewegte Körper, indem man eine geschwindigkeitsabhängige Masse einführt. Wenn man den Impulssatz aber auch auf Vorgänge anwenden will, an denen das elektromagnetische Feld beteiligt ist, so muss man den Impulsbegriff verallgemeinern: Man muss den Impuls unabhängig von Gleichung (3.1) einführen.

### Entsorgung

Man führt den Impuls als eigenständige Größe ein, mit einem eigenen Messverfahren, etwa so, wie man es mit der elektrischen Ladung zu tun gewohnt ist. Über Gleichung (3.1) definiert man die (träge) Masse als den Faktor, mit dem man die Geschwindigkeit multiplizieren muss, um den Impuls zu erhalten.

[1] R. W. Pohl, *Mechanik, Akustik und Wärmelehre*, Springer-Verlag, Berlin, 1969, S. 45

[2] F. Herrmann und M. Schubart, *Measuring momentum without the use of  $p = m v$  in a demonstration experiment*, American Journal of Physics 57, 1989, S. 858

## 3.9 Impuls und Stoß

### Gegenstand

Man lernt den Impuls gewöhnlich im Zusammenhang mit Stoßvorgängen kennen. Der Impuls ist diejenige Größe, deren Erhaltung sich bei Stoßvorgängen bemerkbar macht.

### Mängel

Impuls hat jeder Körper, der sich bewegt und jedes Teilchen, das sich bewegt. Der Impuls ändert sich beim Beschleunigen, beim Bremsen und bei jeder Änderung der Bewegungsrichtung. Im Unterricht werden aber fast nur Stoßvorgänge, d. h. Spezialfälle solcher Beschleunigungs-, Brems- und Richtungsänderungsprozesse betrachtet. Bei Stoßprozessen geht die Impulsübertragung so schnell vonstatten, dass sich die Frage nach dem zeitlichen Verlauf des Vorgangs nicht aufdrängt. Man hat das Gefühl, der Vorgang laufe instantan ab. Die wichtige Rolle, die der Impuls in der Dynamik spielt, wird damit auf eine Randerscheinung reduziert. Der Impuls erscheint als Bilanzierungshilfe für Prozesse, nach deren zeitlichem Verlauf man am besten gar nicht fragt. Der im Deutschen übliche Name „Impuls“ unterstreicht diese Bedeutung noch (lat. *impellere* = anstoßen).

### Herkunft

Siehe auch die Altlast „*Der Impuls als Produkt aus Masse und Geschwindigkeit*“. Die Stoßmechanik geht zurück ins 17. Jahrhundert, siehe etwa Ernst Mach [1]. Es erschien nahe liegend, dass für Stoßvorgänge einfache Gesetze gelten. Naturwissenschaftler widmeten sich der Aufgabe, diese Gesetze zu entdecken.

Im Jahre 1668 regte die Royal Society of London die Untersuchung der Stoßgesetze an. Daraufhin wurden Arbeiten von drei Wissenschaftlern eingereicht, darunter eine von Huygens. Um die Stoßgesetze zu formulieren, wurde die *quantitas motus* konstruiert. Der wohl auf Descartes zurückgehende lateinische Name trifft die Bedeutung der Größe viel besser als der Name Impuls. Nun hat das Wort *quantitas* aber im Deutschen zwei Entsprechungen, nämlich „Größe“ (im Sinn einer physikalischen Größe) und „Menge“. Descartes meinte das Wort in der Bedeutung einer Menge. Leider ist aus der *quantitas motus* im Deutschen die farblose Bewegungsgröße geworden.

### Entsorgung

Den Namen Impuls und auch die Bewegungsgröße werden wir wohl nicht mehr los. Man sollte aber die Anwendung des Impulsbegriffs nicht auf Stoßvorgänge beschränken. Da es die Dynamik mit bewegten Körpern

und Teilchen zu tun hat und der Impuls ein Mengenmaß für die Bewegung ist, operiert man in der Mechanik mit dem Impuls am besten von Anfang an und macht ihn zur wichtigsten Größe der Mechanik überhaupt.

[1] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, F. A. Brockhaus, Leipzig 1897, S. 300

## 3.10 Die Geringschätzung des Impulses

### Gegenstand

1 „Grundgleichung der Mechanik: Beschleunigende Kraft gleich Masse mal Beschleunigung:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

2 „Die zum Drehzentrum gerichtete Zentripetalkraft, die einen Körper der Masse  $m$  mit der Geschwindigkeit  $v$  auf einem Kreis mit dem Bahnradius hält, ist

$$F = m \frac{v^2}{r}.$$

### Mängel

Die Gleichung

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (3.3)$$

ist natürlich richtig. Der Wert des Terms auf der rechten Seite ist gleich dem Wert der Größe auf der linken. Ungeschickt ist es, eine Gleichung als Grundgleichung zu bezeichnen, die zwei andere Gleichungen zusammenfasst, deren Aussagen man auseinanderhalten sollte. Die Erste ist das Newton'sche Grundgesetz:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (3.4)$$

Es macht eine Aussage über das Wesen der Größe Impuls: Der Impuls ist eine erhaltene Größe. Auf der rechten Seite der Gleichung steht die Impulsänderung eines Körpers, oder allgemeiner, eines Systems. (Das Gesetz gilt auch für Systeme, die man gewöhnlich nicht als Körper bezeichnet: für Teilchen und für Felder.) Die Gleichung sagt uns, dass sich der Impuls des Systems nur dadurch ändern kann, dass ein Strom in das System hinein oder aus ihm heraus fließt („dass eine Kraft auf das System wirkt“).

Um zu  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$  zu kommen, braucht man noch den Zusammenhang

$$\vec{p} = m \vec{v} \quad (3.5)$$

oder nach der Zeit abgeleitet

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Gleichung (3.5) hat einen anderen Charakter als die Erhaltungsgleichung (3.4). Sie ist das, was man in anderen Zusammenhängen eine Zustandsgleichung oder auch Materialgleichung nennen würde. Solche Gleichungen gelten für bestimmte Systeme unter bestimmten Umständen und für andere nicht. So gilt

$$\vec{p} = m \vec{v}$$

nur, solange die Geschwindigkeit klein gegen  $c$  ist, und die Gleichung gilt auch nicht für das elektromagnetische Feld, weil bei dem die Größen  $m$  und  $\vec{v}$  gar nicht vorkommen.

Um die Logik des Vorgehens zu verstehen, betrachten wir die entsprechenden elektrischen Gesetze. Es besteht die in Tab. 3.1 gezeigte Analogie

Mechanik	Elektrizitätslehre
$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$	$I = \frac{dQ}{dt}$
$\vec{p} = m \vec{v}$	$Q = C \cdot U$
$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m \vec{a}$	$I = C \frac{dU}{dt}$

Tab. 3.1

Man würde sicher nicht behaupten:

$$I = C \frac{dU}{dt}$$

sei das Grundgesetz der Elektrizitätslehre.

Wenn man den Zwischenschritt überspringt und Gleichung (3.3) zum Grundgesetz macht, erspart man es sich, vom Impuls zu sprechen. Die Kraft (der Impulstrom) wird am Anfang der Mechanik eingeführt und in aller Breite behandelt. Der Impuls selbst, d. h. die zentrale mengenartige Größe der Mechanik, muss aber warten, bis er in einem Kapitel über Stoßprozesse abgefertigt wird.

Man sieht auch an anderen Stellen des Physikunterrichts, wie der Impuls gemieden wird, siehe unser zweites Zitat. Auch hier fehlt der Zwischenschritt. Man be-

## Die Richtung von Impulsströmen

rechnet zunächst die Impulsänderung des Körpers, der eine Kreisbewegung macht:

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = m \frac{v^2}{r}.$$

In dem Term auf der rechten Seite stehen nur Größen, die den Körper charakterisieren. Erst mithilfe des Newton'schen Gesetzes kommt man dann zu:

$$F_z = m \frac{v^2}{r}.$$

### Herkunft

Die Geringschätzung des Impulses, das Reduzieren seiner Bedeutung auf eine Invariante bei Stoßprozessen, ist kein Überbleibsel aus der Anfangszeit der Mechanik. Im Gegenteil, schon vor Newton und dann auch bei Newton war der Impuls die Größe, um deren Bilanzen es ging. Die Größe hieß damals Bewegungsmenge. Andererseits ist auch nach Auffassung der modernen Physik der Impuls, neben dem Drehimpuls, die zentrale Größe der Mechanik. Man sieht es etwa in der Relativitätstheorie, wo die Impulsdichte als eine der Komponenten des Energie-Impuls-Tensors auftritt, und man sieht es in der Teilchenphysik, wo der Impuls zu den wichtigen Größen, die ein Teilchen charakterisieren, gezählt wird. Woher kommt aber die offenkundige Geringschätzung bei der Einführung in die Mechanik?

Wir vermuten, dass Leibniz einen Anteil der Schuld trägt. In dem berühmten Streit um das „wahre Kraftmaß“ zwischen Leibniz und den „Cartesianern“ ging er um die Frage, welche der beiden Ausdrücke  $m \cdot v$  und  $m \cdot v^2$  das „richtige“ Maß für die „Kraft“, oder Bewegungsmenge sei. Heute wissen wir, dass beide Ausdrücke ihre Berechtigung haben. Den ersten kennen wir als Impuls, den zweiten (von einem Faktor 1/2 abgesehen) als kinetische Energie. Beide Größen können das wiedergeben, was man damals Kraft nannte, und was man heute, um Verwechslungen mit der Größe  $F$  zu vermeiden, als Wucht bezeichnen würde. Nun hat sich offenbar die Zuordnung der „Wucht“ zur Größe  $(m/2) \cdot v^2$  durchgesetzt. Die kinetische Energie hat gegen den Impuls gewonnen. Für den Impuls ist daher die Verknüpfung mit dem anschaulichen Begriff Wucht nicht mehr frei. Im Gegenteil: Der Impuls ist suspekt geworden, da er sich ähnlich wie die kinetische Energie manifestiert, und sich trotzdem von ihr unterscheidet. Der Impuls erscheint als eine abstrakte Größe, ohne Entsprechung in der Alltagswelt. Seine Bedeutung ist damit reduziert auf eine mathematische Invariante bei Stoßprozessen. Dazu trägt auch der unglückliche Verlust seines schönen Geburtsnamens bei: Bewegungsmenge.

Das Missgeschick, das der Impuls erlitten hat, ist ganz ähnlich dem der Entropie. Sie war zunächst ein perfektes Maß für das, was man umgangssprachlich als „Wärme“ bezeichnet. Nachdem die Energieerhaltung entdeckt worden war, übertrug man die Bezeichnung „Wärme“ auf die Differentialform  $dQ$ . Dadurch entstand der Eindruck, ja die Überzeugung, die Entropie sei eine unanschauliche Größe.

### Entsorgung

Man führt das 2. Newton'sche Gesetz so ein, wie es Newton selbst tat:  $F = dp/dt$ . Der Impuls wird in den Mittelpunkt der Mechanik gestellt. Die Gleichung  $p = m \cdot v$  wird erst nach der Einführung des Impulses behandelt, so wie  $Q = C \cdot U$  nach der Einführung der elektrischen Ladung. Bei Drehbewegungen wird zuerst gezeigt, dass die Impulsänderung  $dp/dt = mv^2/r$  ist. Der Satz „ $mv^2/r$  ist die Zentripetalkraft“ wird nicht formuliert.

## 3.11 Die Richtung von Impulsströmen

### Gegenstand

Kräfte können als Impulsströme interpretiert werden. Die Einsicht stammt von Max Planck [1], und man findet sie erwähnt oder ausführlich dargestellt in zahlreichen Lehrbüchern der theoretischen Physik, vornehmlich im Zusammenhang mit der Mechanik der Kontinua. Da der Impuls eine vektorielle Größe ist und daher seine kartesischen Komponenten zweierlei Vorzeichen annehmen können, besteht eine Willkür in der Wahl der Vorzeichen der Impulskomponenten. Von dieser Wahl hängt auch die Stromrichtung der drei Impulskomponenten ab.

### Mängel

Da Impulsströme nur in Lehrbüchern für Fortgeschrittenen behandelt werden, bekommen die meisten Studenten der Physik nichts davon mit. Entsprechend unsicher sind auch erfahrene Physiker im Umgang mit ihnen. Es scheint besonders zu stören, dass die Stromrichtung von der Festlegung des Vorzeichens der strömenden Größe abhängt [2].

Unter der Stromrichtung versteht man in der Physik immer die Richtung des Stromdichtevektors, egal um welche „strömende Größe“ es sich handelt.

Da das Stromrichtungsproblem beim Impuls dasselbe ist wie bei der elektrischen Ladung, erinnern wir zunächst daran, wie man die Richtung des elektrischen Stroms festlegt.

Für die elektrische Ladung gilt eine Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \rho_Q}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_Q = 0 \quad (3.6)$$

Hier ist  $\rho_Q$  die elektrische Ladungsdichte und  $\vec{j}_Q$  die elektrische Stromdichte.

Wenn die Ladungsdichte an einer Stelle abnimmt, d.h. wenn

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} < 0$$

ist, so ist dort die Divergenz von  $\vec{j}_Q$  positiv, d.h., es fließt ein Strom von der Stelle weg. Diese Festlegung der Stromrichtung folgt aus der Kontinuitätsgleichung der elektrischen Ladung und stellt keine Konvention dar, wie es manchmal behauptet wird. Trotzdem gibt es im Prinzip die Möglichkeit, zur entgegengesetzten Stromrichtung zu kommen, nämlich, indem man das Vorzeichen der elektrischen Ladung anders herum definiert. Entsprechend der allgemein akzeptierten Festlegung tragen Elektronen negative und Protonen positive Ladung. Würde man festlegen, dass die Ladung der Elektronen positiv und die der Protonen negativ ist, so würde sich nach Gleichung (3.6) auch die Stromrichtung umkehren. Die elektrische Stromrichtung beruht also auf einer Konvention, allerdings nicht auf die Art, wie es manchmal behauptet wird: Man kann nicht die Konvention über das Vorzeichen der elektrischen Ladung beibehalten, und nur die Richtung des Stroms umdefinieren.

Nun zum Impuls. Für jede kartesische Komponente des Impulses einzeln gilt ein Erhaltungssatz und damit eine Kontinuitätsgleichung der Gestalt von Gleichung (3.6). Wie im Fall der elektrischen Ladung gilt auch hier, und zwar für jede der drei Impulskomponenten einzeln: Man hat die Freiheit festzulegen, was man unter positivem und negativem Impuls versteht. Sobald man sich darauf festgelegt hat, liegt auch die Stromrichtung fest. Und wenn man die Festlegung der positiven Impulsrichtung umkehrt, so kehrt auch der Stromdichtevektor seine Richtung um.

Nun ist es bequem, sich darauf festzulegen, was man unter positiver elektrischer Ladung versteht. Einmal getroffen ist die Entscheidung verbindlich. Das ist beim Impuls anders: Für jedes Experiment, das man beschreibt, muss erneut festgelegt werden, welchen Impuls man als positiv bezeichnet. Es gibt zwar auch hier eine Konvention: Bewegung nach rechts bedeutet positiver  $x$ -Impuls etc. Diese Konvention stammt aus der Mathematik und wird auch in der Physik durchweg befolgt: Die positive Richtung von Koordinatenachsen al-

ler Art ist nach rechts bzw. nach oben. Aber es genügt, eine Bewegung, die in die positive  $x$ -Richtung verläuft, von der Rückseite aus zu betrachten, und schon wird aus einer positiven Geschwindigkeit eine negative und aus positivem Impuls negativer. (In dieser Situation befindet man sich als Lehrer. Ein Experiment, das auf dem Lehrertisch aufgebaut ist, wird man daher immer aus Schülersicht beschreiben.)

### Herkunft

Für den Physiker ist der Strom eine Modellvorstellung, die ihre Rechtfertigung allein aus der Gültigkeit einer Bilanzgleichung der Form

$$\frac{\partial \rho_X}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_X = \sigma_X \quad (3.7)$$

bezieht. Hier ist  $X$  eine beliebige extensive Größe. Falls die Größe eine Erhaltungsgröße ist, verschwindet der Erzeugungsterm  $\sigma_X$ .

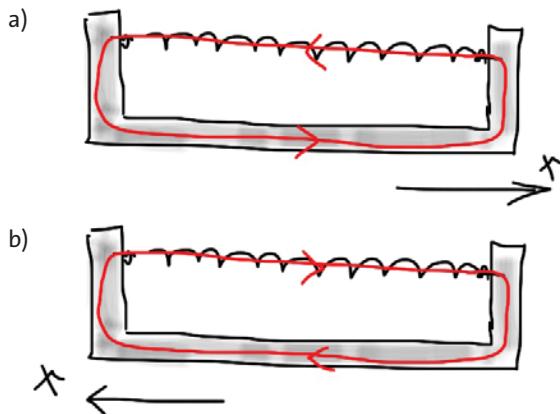
Schon im Zusammenhang mit der elektrischen Stromrichtung wird oft ein Fehler gemacht: Es wird unterschieden zwischen einer „technischen“ und einer „physikalischen“ Stromrichtung. Dabei ist nur die sogenannte technische Stromrichtung mit der Theorie, d.h. mit Gleichung (3.7) kompatibel. Die sogenannte physikalische Stromrichtung ist die Bewegungsrichtung der Elektronen (und damit gleichzeitig die Stromrichtung der extensiven Größe „Stoffmenge“ im Sinn von Gleichung (3.7)). Der Strom wird also nicht als eine Gleichung (3.7) entsprechende Modellvorstellung begriffen, sondern im Sinn der Umgangssprache als kollektive Bewegung. Auch beim Impulsstrom scheint die Erwartung zu bestehen, dass sich irgendetwas bewegen müsse.

Den Vorzeichenwechsel bei Umdefinition der Impulsrichtung mag man als unschön empfinden. Wer mit Impulsströmen nicht bewandert ist, mag auch Anstoß nehmen an der scheinbaren Symmetriebrechung bei einem Vorgang, der offensichtlich symmetrisch ist. Abb. 3.8a zeigt einen einfachen Impulsstromkreis.

Die Feder stehe unter Zugspannung. Der Impuls fließt hier entgegen dem Uhrzeigersinn. (Außer der eingezeichneten Impulsstromschleife fließen innerhalb des starren Jochs noch geschlossene Impulsströme.) Zählt man den Impuls nicht nach rechts, sondern nach links positiv, so kehrt auch der Impulsstrom seine Richtung um, Abb. 3.8b.

Dass ein erfahrener Physiker hieran Anstoß nimmt, ist allerdings überraschend. Diese Art von Symmetriebrechung ist immer der Preis dafür, dass wir ein Problem mathematisch beschreiben können. Sobald wir ein Koordinatensystem oder Bezugssystem festlegen, brechen wir die Symmetrie zwischen rechts und links, unten und

### Impulsströme in ruhenden Impulsleitern



**Abb. 3.8** (a) Positive Impulsrichtung nach rechts: Impulsstrom fließt gegen Uhrzeigersinn; (b) positive Impulsrichtung nach links: Impulsstrom fließt im Uhrzeigersinn.

oben etc. Wenn wir Atomorbitale berechnen, taucht bei einem kugelsymmetrischen Problem plötzlich eine ausgezeichnete Raumrichtung auf, meist als  $z$ -Richtung bezeichnet. Jeder Student hat damit Schwierigkeiten, aber irgendwann hat er verstanden, dass die Auszeichnung nur durch das mathematische Werkzeug bedingt ist.

Dass Ströme ihre Richtung bei Bezugssystemwechsel umkehren, kennen wir auch aus anderen Zusammenhängen. Betrachten wir zum Beispiel den Energiestrom in einer Fahrradkette. Im Bezugssystem des Fahrrads fließt die Energie durch den gespannten Teil der Kette vom vorderen zum hinteren Kettenrad. In einem Bezugssystem, in dem dieser Teil der Kette ruht, (das sich also in Fahrtrichtung gegen die Erde bewegt, und zwar schneller als das Fahrrad selbst) wird der Energiestrom durch die Kette null, und in einem Bezugssystem, das sich noch schneller gegen die Erde bewegt, kehrt der Energiestrom seine Richtung um: Die Energie fließt im gespannten Teil der Kette vom hinteren zum vorderen Kettenrad. (Es muss wohl nicht gesagt werden, dass hinten trotzdem immer der gleiche Energiestrom ankommt. Nur fließt er eben nicht nur durch die Kette, sondern auch durch den Fahrradrahmen.) Würden die Herren Gutachter der Deutschen Physikalischen Gesellschaft hier auch sagen: „Es gibt diesen Strom in der Natur nicht“? Oder: Die Richtung dieses Stroms „ist keine Eigenschaft des Systems“?

### Entsorgung

Wenn man in der Schule elektrische Ströme einführt, orientiert man sich nicht an der Bewegung der Ladungsträger (die man ja den Schülern auch erst aufschwatzen muss), sondern man verwendet von Anfang an das

„Stoffmodell“: Wir stellen uns die elektrische Ladung vor als eine Art Fluidum, das in den Drähten strömt, und für dieses gedachte Fluidum gilt die Stromrichtung, die aus der Bilanzgleichung folgt. Dabei braucht man in der Schule natürlich nicht die Kontinuitätsgleichung zu formulieren. Es genügt zu sagen, dass wenn die Ladung eines Gegenstandes abnimmt, der Ladungsstrom vom Gegenstand wegfließt – eine Selbstverständlichkeit.

Entsprechend verfährt man mit dem Impuls: Nur muss man hier darauf achten, dass man am Anfang der Beschreibung einer Erscheinung klar festlegt, was man unter positivem Impuls versteht.

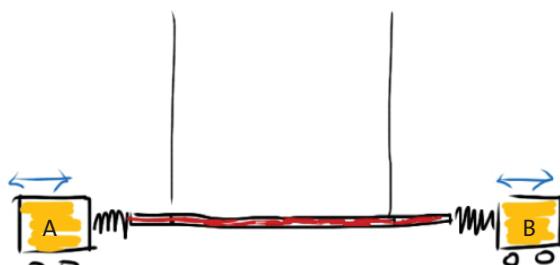
[1] M. Planck, *Bemerkungen zum Prinzip der Aktion und Reaktion in der allgemeinen Dynamik*, Phys. Z. 9, 1908, S. 828

[2] *Gutachten über den Karlsruher Physikkurs*; In Auftrag gegeben von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft von M. Bartelmann, F. Bühler, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschke, P. Reineker, M. Tolan, J. Wambach und W. Weber; <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/download/dpg-gegen-kpk.pdf>

## 3.12 Impulsströme in ruhenden Impulsleitern

### Gegenstand

Dass Impuls mithilfe bewegter Körper oder strömender Flüssigkeiten oder Gase transportiert werden kann, ist allgemein bekannt. Dass Impuls aber auch durch ruhende Medien fließt, wenn diese unter mechanischer Spannung stehen, ist weniger bekannt oder wird regelrecht bestritten [1].



**Abb. 3.9** A und B schwingen gegeneinander. Der Stab bleibt dabei in Ruhe.

### Mängel

Abb. 3.9 zeigt einen etwas ungewöhnlichen Schwinger. Zwei Körper A und B, die sich horizontal bewegen kön-

## Impulsströme in ruhenden Impulsleitern

nen, sind über zwei Federn und einen Stab zwischen den Federn aneinander gekoppelt [2]. Man kann sich vorstellen (wie es in der Mechanik oft gemacht wird), dass der Stab starr ist und Federn und Stab masselos sind<sup>1</sup>.

Die Körper werden symmetrisch nach außen gezogen und dann losgelassen, sodass sie gegeneinander schwingen. Der Impuls von A und der von B ändern sich nun periodisch, und zwar so, dass die Impulsabnahme des einen Körpers mit der Impulszunahme des anderen einhergeht. Das kann man auch so ausdrücken: Der Impuls fließt durch den Stab zwischen den beiden Körpern hin und her.

Wenn man nicht akzeptiert, dass durch den Stab ein Impulsstrom fließt, so verzichtet man auf die Möglichkeit dieser einfachen Beschreibung. Stattdessen wird man sagen: A übt auf die linke Feder eine Kraft aus, und diese übt eine Kraft auf A aus. Außerdem übt die linke Feder auch eine Kraft auf den Stab aus und dieser wiederum eine auf die Feder. Darüber hinaus übt der Stab noch eine Kraft auf die rechte Feder aus, und diese übt eine Kraft auf den Stab aus. Schließlich übt die rechte Feder auch noch eine Kraft auf Körper B aus, welcher selbst wiederum eine Kraft auf die rechte Feder ausübt. Dabei ist noch nicht gesagt, in welcher Beziehung die Kräfte zueinanderstehen.

### Herkunft

Wir vermuten, dass der Grund dafür, dass man Impulsströme in nicht bewegten Stäben, Seilen, Federn usw. nicht akzeptiert, in der Tatsache zu suchen ist, dass man einen etwas naiven Strombegriff zugrunde legt. Danach würde man nur dann von einem Strom sprechen, wenn sich ein Stoff oder eine Menge von Teilchen kollektiv bewegt. Dann wäre die Schlussfolgerung natürlich zwingend, dass kein Strom fließt, wenn kein sich bewegender Stoff oder keine sich bewegenden Teilchen vorhanden sind. Ein solcher Strombegriff entspricht aber weder dem der Physik noch dem der Umgangssprache.

So spricht man im Alltag auch dann von Strömen, wenn nicht die Bewegung von etwas Materiellem gemeint ist, sondern etwas, was man im physikalischen Kontext eine extensive physikalische Größe nennen würde: Man spricht etwa von Geldströmen oder von Datenströmen.

<sup>1</sup>Diese Vorstellung ist für unsere Zwecke akzeptabel. Tatsächlich würde sie zur Folge haben, dass der Impuls nicht mit Schallgeschwindigkeit, sondern unendlich schnell durch den Stab läuft.

In der Physik ist die Sache noch einfacher: Man spricht vom Strom einer Größe  $X$ , wenn sich für sie eine Gleichung der folgenden Gestalt formulieren lässt:

$$\frac{\partial \rho_X}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_X = \sigma_X \quad (3.8)$$

Diese Gleichung kann man als Bilanzgleichung interpretieren. Daher kommen auch die Namen, die sich für die verschiedenen Größen der Gleichung etabliert haben:  $\rho_X$  nennt man die Dichte von  $X$ ,  $\vec{j}_X$  die Stromdichte und  $\sigma_X$  die Dichte der Produktionsrate (welche für Erhaltungsgrößen gleich null ist).

Die Gleichung verlangt nun nicht, dass an einem Ort, an dem  $\vec{j}_X$  ungleich null ist, auch  $\rho_X$  ungleich null sein muss; siehe hierzu auch den Aufsatz von Gustav Mie: *Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung* [3].

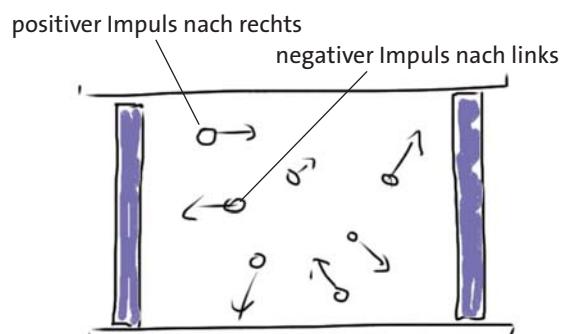
Tatsächlich kann diese Möglichkeit, nämlich  $\vec{j}_X \neq 0$  bei  $\rho_X = 0$ , immer dann auftreten, wenn die strömende Größe zweierlei Vorzeichen fähig ist. Man darf sich dann vorstellen, dass es zwei Beiträge zum Strom gibt, wobei sich die räumlichen Dichten der beiden Anteile zu null addieren, während die Stromdichten nicht null ergeben.

Ein Beispiel hierfür ist ein elektrischer Strom in einem normalen elektrischen Leiter. Die elektrische Ladung ist kompensiert, die Stromdichte nicht.

Diese Möglichkeit existiert nicht bei extensiven Größen, die nur positive Werte annehmen können, wie Energie, Masse, Entropie und Stoffmenge.

Die Kontinuitätsgleichung, die die Rechtfertigung des Physikers dafür ist, von einem Strom zu sprechen, verlangt auch nicht, dass ein Strom auf der Bewegung von irgendwelchen Teilchen beruht.

Wer glaubt, dass er einen Transport besser versteht, wenn dieser an bewegte Teilchen gekoppelt ist, mag zunächst den Impulstransport durch ruhende Gase betrachten, Abb. 3.10.



**Abb. 3.10** Impuls geht von Kolben A zu Kolben B. Die eine Hälfte der Moleküle transportieren positiven Impuls nach rechts, die anderen negativen nach links.

## Impulsstromrichtung und Bezugssystemwechsel

Die beiden Kolben werden durch das Gas, das sie einschließen, nach außen beschleunigt; also Kolben A nach links und Kolben B nach rechts. Hier gelangt offenbar Impuls von A nach B, (wenn wir die positive Impulsrichtung nach rechts wählen). Der mikroskopische Mechanismus ist hier so einfach, dass wohl kaum Bedenken bestehen, den Vorgang als Impulsfluss zu deuten.

Diejenigen Moleküle, deren Geschwindigkeit eine positive  $x$ -Komponente hat, tragen positiven Impuls und transportieren diesen nach rechts. Die Moleküle mit negativer  $x$ -Geschwindigkeit haben negativen Impuls und transportieren ihn nach links, was auch einem Impulsstrom (einem Strom positiven Impulses) nach rechts entspricht. Man sieht also: Die Beiträge zur *Impulsdichte* heben sich auf, die Beiträge zu *Stromdichte*, „verstärken“ sich.

Ein Problem, welches Bartelmann et al. zu haben scheinen, ist auch, dass der Impulsstrom seine Flussrichtung ändert, wenn man die positive Impulsrichtung anders herum festlegt. Unser Beispiel zeigt aber, dass dahinter nichts Geheimnisvolles steckt. Wenn man das nicht will, dann bleibt nur, auf die mathematische Beschreibung des Vorgangs ganz zu verzichten.

Ähnliche Überlegungen kann man anstellen, wenn der Impuls durch einen Festkörper oder auch durch das elektromagnetische Feld fließt. Die Sache ist dann etwas verwickelter<sup>2</sup>. Eine neue Einsicht im Zusammenhang mit dem Problem von Bartelmann et al. bringt sie aber nicht. Die Dinge sind so einfach, wie sie sich beim Impulsfluss durch ein Gas darstellen, und das heißt: verständlich schon für Schüler der Mittelstufe.

### Entsorgung

Physikalische Größen sind Variablen im Sinn der Mathematik und können prinzipiell weder strömen noch nicht strömen (so wie eine Masse nicht an einer Feder hängen kann). Wenn wir trotzdem vom Strom elektrischer Ladung, von Masse oder von Impuls sprechen, so bedeutet das, dass wir ein Modell benutzen. Wenn man sich dieser Tatsache bewusst ist, so tritt die Frage, ob es in der Natur einen Impulsstrom gibt, gar nicht auf. Man führt ihn ein oder man lässt es bleiben; man benutzt das Modell oder man benutzt es nicht. Eine Entscheidung gegen das Modell würde aber die Frage aufwerfen, warum man das Strommodell bei Energie, Masse und elektrischer Ladung verwendet und nicht beim Impuls.

<sup>2</sup>Ich empfehle als Übung im Umgang mit Impulsströmen die entsprechenden Überlegungen anzustellen für eine thermisch angeregte lineare Kette, die einmal unter Zug- und einmal unter Druckspannung steht.

Kurz: Bei einem aufgeklärten Umgang mit dem Strombegriff ist ein Impulsstrom genauso gerechtfertigt wie ein elektrischer oder ein Massestrom.

[1] *Gutachten über den Karlsruher Physikkurs*; In Auftrag gegeben von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft von M. Bartelmann, F. Bühler, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschke, P. Reineker, M. Tolan, J. Wambach und W. Weber; <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/download/dpg-gegen-kpk.pdf>

[2] Ich danke Herrn Werner Maurer für die Idee zu diesem Versuch, siehe auch <http://www.youtube.com/watch?v=aBLPEOM7xbM>

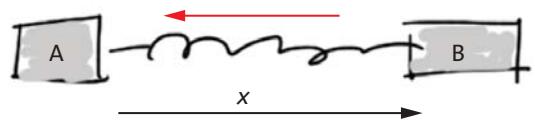
[3] Gustav Mie, *Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung*, Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, CVII. Band, Abtheilung II.a, 1898, S. 1113 – 1181

## 3.13 Impulsstromrichtung und Bezugssystemwechsel

### Gegenstand

Zwei Körper A und B sind durch eine gedehnte Feder miteinander verbunden, Abb. 3.11.

a)



b)

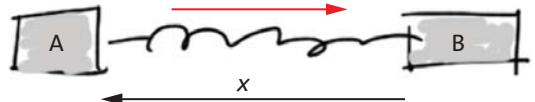


Abb. 3.11 Die Feder ist gespannt; der rote Pfeil gibt die Stromrichtung des  $x$ -Impulses an. (a) Der Impuls von A nimmt zu, der von B nimmt ab. (b) Der Impuls von B nimmt zu, der von A nimmt ab.

In Abb. 3.11a ist die  $x$ -Achse nach rechts orientiert. Daher nimmt der Impuls von A zu, der von B nimmt ab. Es müsste also Impuls in die negative  $x$ -Richtung fließen, d.h. nach links, wie es der rote Pfeil zeigt. Orientiert man die  $x$ -Achse nach links, so nimmt der Impuls von A ab und der von B zu, und das heißt, dass der Impuls von links nach rechts fließt. Das kann nicht sein,

## Impulsstromrichtung und Bezugssystemwechsel

denn dann hätte man die Richtung des Impulsstroms „willkürlich“, d. h. unabhängig vom Geschehen im System allein durch eine neue Wahl des Koordinatensystems verändert“. [1]

### Mängel

Die Schlusskette unter Gegenstand enthält einen Fehler. Zunächst eine allgemeine Bemerkung.

Eine physikalische Größe beschreibt eine Eigenschaft eines Systems. Der Wert der Größe hängt von verschiedenen Gegebenheiten ab. An erster Stelle vom Zustand des Systems, denn dieser soll ja durch die Größe beschrieben werden. Er hängt außerdem von der Maßeinheit ab, was trivial ist, und er kann schließlich noch von der Wahl des Bezugssystems abhängen. Dass sich die Werte physikalischer Größen beim Wechsel des Bezugssystems ändern, ist eine jedem Physiker bekannte Tatsache.

Im konkreten vorliegenden Fall kann man den scheinbaren Widerspruch, oder besser das Unbehagen, auf zwei Arten beseitigen.

1. Die Stromrichtung ist physikalisch gesehen die Richtung des Stromdichtevektors. Ein Vektor stellt eine koordinatenunabhängige Beschreibung dar. So ist etwa die Geschwindigkeit ein Vektor. Stellt man diesen Vektor als Pfeil dar, so ist die Pfeilrichtung unabhängig von der Wahl eines (Geschwindigkeits-)Koordinatensystems, man braucht kein Koordinatensystem, um den Pfeil korrekt zu zeichnen. Seine Richtung ist durch die Anordnung der Elemente des Systems eindeutig festgelegt. Die kartesischen Komponenten dagegen sind es nicht. Zwei Autos fahren auf einer Straße gleich schnell, nämlich mit 60 km/h, aber in entgegengesetzte Richtungen, eines nach rechts, das andere nach links. Um den Sachverhalt physikalisch zu beschreiben, ordnet man jedem Auto einen Vektor zu. Die Beschreibung ist recht-links-symmetrisch. Benutzt man zur Beschreibung kartesische Koordinaten, so muss man dem einen Auto eine positive Geschwindigkeit +60 km/h, dem anderen die negative Geschwindigkeit -60 km/h zuordnen. Die Symmetrie ist zerstört – woran aber kein Physiker Anstoß nehmen wird.

Sollte es nicht bei der Impulsstromdichte genauso sein? Ist die Impulsstromdichte nicht ein Vektor, sodass dessen Richtung unabhängig von der Wahl des Koordinatensystems sein sollte? Nein, die Impulsstromdichte ist kein Vektor, sie ist ein Tensor. Wenn wir hier über eine Impulsstromrichtung sprechen, so sprechen wir über den Strom einer Komponente des Impulsvektors. Diese ist nicht mehr koordinatensystemunabhängig. Sie ist aus demselben Grund koordinatensystemabhängig, wie die Geschwindigkeitskomponente im vorangehenden Beispiel.

2. Was die Schule betrifft, so braucht man das Konzept Tensor nicht zu kennen. Man behandelt die drei Komponenten des Impulses unabhängig voneinander, so als handele es sich um drei Skalare. Für jede gilt, unabhängig von den beiden anderen, ein Erhaltungssatz. Wir betrachten etwa die  $x$ -Komponente des Impulses. Man hat nun noch die Freiheit, den  $x$ -Impuls in die eine oder in die entgegengesetzte Richtung positiv zu zählen. Ein Körper, dessen Impuls bei der ersten Wahl 5 Einheiten beträgt, hat dann bei der anderen Wahl -5 Einheiten. Die Beschreibung des Systems spiegelt also nicht die Symmetrie wider, die das System von sich aus hat. Das ist ein Opfer, das man immer bringen muss, wenn man ein System in kartesischen Koordinaten (oder in Zylinder- oder Kugelkoordinaten) beschreibt. Die Wahl eines Koordinatensystems zerstört die Symmetrie.

Man kann übrigens den Satz, dass der Impuls in einer gespannten Feder in eine bestimmte Richtung fließt, auch invariant formulieren:

Bei Zugspannung fließt (positiver) Impuls in die negative Richtung.

Der Satz bleibt richtig, auch wenn man die  $x$ -Richtung umkehrt. Trotzdem empfehlen wir diese Formulierung nicht für die Schule. Schüler haben nicht dieselben Schwierigkeiten wie erfahrene Physiker.

### Herkunft

Die Gutachter scheinen sich daran zu stoßen, dass die mathematische Beschreibung einer symmetrischen Situation unsymmetrisch ist. Dass sie daran Anstoß nehmen, mag daran liegen, dass ihnen diese spezielle Situation noch nicht begegnet war. Wenn man sich umschaut, findet man schnell viele andere Erscheinungen, bei denen das analoge Problem auftritt, bei denen man aber keine Schwierigkeit mehr sieht, weil man die Situation gut kennt und durchschaut, und sich längst an die Asymmetrie gewöhnt hat.

Hier einige Beispiele:

Bei der quantenmechanischen Behandlung des Wasserstoffatoms spielt angeblich eine  $z$ -Richtung eine besondere Rolle. Jeder Student hat damit zunächst Schwierigkeiten. Und manch einer hat bis zum Ende seines Studiums nicht verstanden, dass diese  $z$ -Richtung nur ein Artefakt der mathematischen Beschreibung ist.

Kaum einem Schüler oder Studenten wird klar, was es mit den beiden Induktionsexperimenten auf sich hat: einmal kommt die Induktionsspannung zustande, weil  $\vec{B}$  ungleich null ist, ein andermal, weil eine Lorentzkraft auftritt; einmal ist das elektrische Feld ein Rotationsfeld, einmal nicht. Tatsächlich handelt es sich beide Male um denselben Effekt, aber in verschiedenen Be-

## Der Kraftstoß

zugssystemen beschrieben. Auch hier könnte man sich wundern, dass „unabhängig vom Geschehen im System“ zwei ganz verschiedene Erklärungen gegeben werden.

Ebenso könnte es einen stören, dass der Energiestrom in einer Fahrradkette, je nach Bezugssystem, einmal vom vorderen zum hinteren und einmal vom hinteren zum vorderen Kettenrad fließt, der Energiestromdichtevektor also einmal nach rechts und einmal nach links weist. Auch hier kehrt ein Stromdichtevektor seine Richtung „unabhängig vom Geschehen im System“ um. Beschreibt es deshalb „keine Eigenschaft des Systems“?

Oder nehmen wir das magnetische Feld eines geraden Drahtes, durch den ein elektrischer Strom fließt. Es wird verursacht durch die Driftbewegung der Elektronen – sagt man gewöhnlich. In dem Bezugssystem aber, in dem die Driftgeschwindigkeit null ist, kommt das Magnetfeld – so ist man gezwungen zu sagen – nicht mehr durch die Elektronen zustande, sondern die der Atomrümpe. (Der Bezugssystemwechsel ist übrigens minimal: Die Driftgeschwindigkeit beträgt nur Bruchteile eines Millimeters pro Sekunde.) Die Ursache des Magnetfeldes ist einmal die Bewegung der Elektronen und einmal die der Atomrümpe, „unabhängig vom Geschehen im System“.

Oder das magnetische Feld eines Elektronenstrahls: Im Bezugssystem der Elektronen ist die magnetische Feldstärke null. Also: mal ein magnetisches Feld, mal keines – „unabhängig vom Geschehen im System“.

All das sind Situationen, die dem Physiker mehr oder weniger vertraut sind, an die er sich hat gewöhnen müssen. Der Impulsstrom in der Feder ist nur eine weitere davon.

### Entsorgung

1 Was die Schule betrifft: Man mache es so, wie im Karlsruher Physikkurs. Man legt die positive  $x$ -Richtung ein für alle Mal fest, und zwar von den Schülern aus gesehen nach rechts. Mit der Tatsache, dass der Impulsstrom in einer gespannten Feder dann nach links fließt, hatte nach unserer Erfahrung kein Schüler Schwierigkeiten.

2 Zu einem viel späteren Zeitpunkt diskutiert man das Problem in einem weiteren Kontext. So wird im KPK unter anderem der Lehrsatz formuliert: „Durch einen Bezugssystemwechsel wird die Welt nicht verändert. Es ändert sich nur unsere Beschreibung der Welt.“

[1] Gutachten über den Karlsruher Physikkurs; In Auftrag gegeben von der Deutschen Physikalischen Gesell-

schaft von M. Bartelmann, F. Bühler, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschke, P. Reineker, M. Tolan, J. Wambach und W. Weber; <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/download/dpg-gegen-kpk.pdf> „... die Richtung der  $x$ -Achse kann willkürlich im Raum festgelegt und auch verändert werden, unabhängig vom physikalischen Geschehen innerhalb des Systems. Damit kann auch die Richtung des KPK-Impulsstroms willkürlich, d. h. unabhängig vom Geschehen im System allein durch eine neue Wahl des Koordinatensystems verändert werden. Wir schließen daraus: die Richtung des KPK-Impulsstroms ist keine Eigenschaft des Systems.“

## 3.14 Der Kraftstoß

### Gegenstand

Im Zusammenhang mit dem Impuls wird oft der Begriff Kraftstoß eingeführt, etwa so: „... als elementaren Kraftstoß einer Kraft  $\vec{F}_i$  während der Zeit  $dt$  bezeichnen wir die Vektorgröße  $\vec{F}_i dt$ . Der Kraftstoß einer Kraft  $\vec{F}_i$  innerhalb einer endlichen Zeitspanne  $\Delta t$  ist gleich

$$\int_0^{\Delta t} \vec{F}_i dt.$$

Ist die Kraft  $\vec{F}_i$  konstant, so ist ihr Impuls im Zeitraum  $\Delta t$  gleich  $\vec{F}_i \Delta t$ .

Man kann das zweite Newton'sche Gesetz also auch so formulieren: Die elementare Änderung des Impulses eines Massenpunktes ist gleich dem elementaren Kraftstoß der auf ihn wirkenden Kraft:

$$d(m_i \vec{v}_i) = \vec{F}_i dt.$$

Oder so: „Der Kraftstoß  $\Delta \vec{p}$  einer Kraft ist ein Vektor, der durch

$$\int_0^{\Delta t} \vec{F}_i dt$$

definiert ist. ... Der Kraftstoß heißt deshalb auch Impulsübertrag.“

### Mängel

Man geht von einer übersichtlichen Gleichung  $\vec{F} = d\vec{p}/dt$  aus. Jede der drei in ihr auftretenden Größen hat eine klare physikalische Bedeutung. Die Gleichung wird umgeformt in  $d\vec{p} = \vec{F} dt$ , und einer Seite der neuen Gleichung wird ein eigener Name gegeben. Man braucht dazu im Lehrbuch eine Seite und im Unterricht eine Stunde. Dabei wird nahe gelegt, es gebe et-

## Die Definition der Kraft

was zu verstehen, das über das normale Verständnis des zweiten Newton'schen Gesetzes hinausgeht. Insbesondere wird der Eindruck vermittelt, es werde eine neue physikalische Größe eingeführt. Nun ist der Kraftstoß aber keine physikalische Größe – wenigstens nicht im üblichen Sinn. Eine physikalische Größe hat in einem gegebenen Zustand eines Systems einen bestimmten Wert [1]. Auf den Kraftstoß trifft das aber nicht zu.

Dass der Begriff nicht unentbehrlich ist, sieht man auch daran, dass man nach demselben Rezept leicht noch andere Ausdrücke erzeugen kann, was man aber – Gott sei Dank – nicht tut. Wenn man nämlich berücksichtigt, dass man die Kraft als Impulsstromstärke und den Kraftstoß das Zeitintegral über die Impulsstromstärke deuten kann, sieht man, dass sich ein entsprechendes Integral auch mit jedem anderen Strom bilden lässt, z. B. mit dem elektrischen Strom, dem Massenstrom oder dem Energiestrom. So könnte man den Ausdruck

$$\int P dt$$

(mit  $P$  = Energiestromstärke oder Leistung) als Leistungsstoß bezeichnen.

Es soll damit nicht gesagt werden, dass es sinnlos wäre, solche Integrale zu berechnen. Es ist nur nicht geschickt, dem Integral einen eigenen Namen zu geben. Wenn man das beherzigt, so merkt man vielleicht auch, dass das ganze Kapitel, das sich mit dem Kraftstoß befasst, überflüssig ist. Denn dass eine auf einen Körper wirkende Kraft (ein in den Körper fließender Impulsstrom) über die Zeit integriert die Impulsänderung des Körpers ergibt, ist für jeden, der die Mengenartigkeit des Impulses verstanden hat, eine Selbstverständlichkeit.

Wenn man die Stromstärke des Wassers, das in eine Badewanne fließt, mit der Zeit multipliziert, bekommt man die Wassermenge, die in die Badewanne geflossen ist. Um das zu verstehen, braucht man auch nicht den Begriff des Wasserstromstoßes.

Ein Name für das Zeitintegral der Kraft, der dazu verleitet zu glauben, man habe es mit einer neuen physikalischen Größe zu tun, ist so irreführend wie die Namen Arbeit und Wärme für die Differentialformen  $F ds$  bzw.  $T ds$ . Auch dies sind Ausdrücke, die keine physikalischen Größen darstellen.

### Herkunft

Eingeführt wurde der Begriff, um einen kurzen Impulsübertragungsvorgang zu beschreiben. Man wollte zum Ausdruck bringen, dass es einem auf den zeitlichen Ver-

lauf des Impulsstroms nicht ankommt. Das ist ein verständliches Anliegen, aber man erreicht es auch ohne den neuen Namen. Es genügt zu sagen, dass eine bestimmte Menge Impuls übertragen wird. Nun wird aber oft die Größe Kraft als fundamentaler betrachtet als der Impuls. Der Impuls gilt nur als Abkürzung für das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit. Dann scheint es natürlicher, den Vorgang mit einer Aussage über die Kraft zu charakterisieren.

Man sieht das deutlich an unserem zweiten Zitat. Es wird gesagt: „Der Kraftstoß heißt deshalb auch Impulsübertrag“, und nicht etwa umgekehrt: „Der übertragene Impuls heißt auch Kraftstoß.“

### Entsorgung

Wenn man den Impuls als eigenständige physikalische Größe ernst nimmt, wird der Kraftstoß nicht gebraucht. Die Mechanik verliert nichts, wenn man ihn weglässt, und sie gewinnt an Klarheit.

[1] G. Falk, *Theoretische Physik, II Thermodynamik*, Heidelberger Taschenbücher, Springer-Verlag, Berlin, 1968, S. 4

## 3.15 Die Definition der Kraft

### Gegenstand

1 „Sie [die Kraft] ist als die Änderungsrate des Impulses definiert, sodass für ihren Betrag gilt:

$$\vec{F} = d\vec{p}/dt.$$

2 „Die Gleichung  $[\vec{F} = m \vec{a}]$  ist eine Definition der Kraft, welche die äußere Einwirkung auf einen Körper mithilfe der Beschleunigung des Körpers messbar macht.“

3 „Der Kraftbegriff geht auf Isaac Newton zurück, der im 17. Jahrhundert in den drei Newton'schen Gesetzen die Grundlagen der Mechanik schuf und darin die Kraft als zeitliche Änderung des Impulses definierte.“

### Mängel

Ich muss die Leser schon wieder mit Newton belästigen (oder beglücken).

- Wenn man die Kraft als Änderungsrate des Impulses definierte, wäre das zweite Newton'sche Gesetz kein Gesetz, sondern eine Definition. Es ist aber ein Gesetz, denn es macht eine Aussage, die durch das Experiment überprüft werden kann: Man misst die Än-

## Eine Anschauung von der Kraft

derungsrate des Impulses des betrachteten Körpers und unabhängig davon die Gesamtkraft, die auf den Körper wirkt.

- Wäre die Kraft durch die Gleichung  $\vec{F} = d\vec{p}/dt$  definiert, so wären die Kräfte in jeder statischen Anordnung gleich null. Die Ingenieure hätten ein Problem.
- Wenn man meint, die Kraft sei als  $d\vec{p}/dt$  definiert, so müsste sich das in der Sprache niederschlagen. Es wäre dann etwa erlaubt zu sagen, Körper A übe auf Körper B eine Impulsänderung aus.

Wird die Physik durch die in den Schulbüchern zur Schau gestellte, aber nicht durchgeholtene Strenge nicht in die Nähe gebracht von Theorien wie etwa dem sogenannten wissenschaftlichen Sozialismus oder der Psychoanalyse? Das hat sie doch hoffentlich nicht verdient. Und ist es ein Wunder, dass die Physik das unbeliebteste Schulfach ist?

### Herkunft

Das Entstehen eines neuen Schulbuchs könnte man sich so vorstellen: Beim Schreiben orientiert sich der Autor an vorliegenden älteren Werken. Er stellt Unstimmigkeiten, Ungeschicklichkeiten und vielleicht auch Fehler fest und korrigiert entsprechend. Dabei werden die Physikbücher nach und nach immer besser. Ja, so könnte man es sich vorstellen — aber so ist es nicht. Die Bücher werden mal besser, aber auch immer mal wieder schlechter. Eine Sache, die eigentlich längst klar ist, wird wieder verunstaltet oder verdreht. Besonders deutlich zu besichtigen im Fall der Mechanik.

So glaubt manch einer, er könne es besser als Newton, aber er irrt sich. Newtons Sprache ist für uns Heutige zwar etwas schwer zu lesen, aber seine Logik hat noch niemand überboten (auch nicht der große Ernst Mach oder Ludwig Lange, der Erfinder des Inertialsystems).

Hier zur Erinnerung noch einmal Newtons Definition der Kraft: „*Def. IV. Vis impressa est actio in corpus exercita, ad mutandum ejus statum vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum.*“ Oder in deutscher Übersetzung (von Jacob Philipp Wolfers 1872): „Eine angebrachte Kraft ist das gegen einen Körper ausgeübte Bestreben, seinen Zustand zu ändern, entweder den der Ruhe oder den der gleichförmigen geradlinigen Bewegung.“ Hier steht nicht, die Kraft sei durch die Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers definiert.

### Entsorgung

Wir können eine Kraft  $\vec{F}_1$  die auf einen Körper wirkt, über  $d\vec{p}/dt$  messen: Wenn wir dafür sorgen, dass keine andere Kraft  $\vec{F}_2$  auf den Körper wirkt. Das ist manchmal

einfach, und manchmal weniger einfach. Das heißt aber nicht, dass wir dadurch die Kraft über  $d\vec{p}/dt$  definieren.

Man stellt bei solchen Experimenten fest, dass immer

$$d\vec{p}/dt = \vec{F},$$

gilt, wo  $\vec{F}$  die Summe aller auf den Körper wirkenden Kräfte ist. Man stellt damit fest, dass der Impuls eine Erhaltungsgröße ist. Es wäre auch denkbar gewesen, dass man findet

$$d\vec{p}/dt > \vec{F}$$

oder

$$d\vec{p}/dt < \vec{F}.$$

Dann hätte man im ersten Fall geschlossen, dass Impuls erzeugt, und im zweiten Fall, dass er vernichtet werden kann.

Der Fehler in unseren Zitaten wäre nicht gemacht worden, wenn man die Größe  $\vec{F}$  von vornherein als Impulstromstärke interpretiert hätte. Dann sagt uns unsere Anschauung nämlich sofort, wie die Beziehung zwischen  $\vec{F}$  und  $d\vec{p}/dt$  ist: Da  $\vec{p}$  eine erhaltene Größe ist, ist die Änderung der Menge des Impulses gleich der Gesamtstromstärke des in den Körper hineinfließenden Impulses.

Die Impulsmenge ändert sich nicht, wenn ein Strom nur durch den Körper hindurchfließt. Dann ist Zufluss gleich Abfluss. Oder in der Newton'schen Sprache: Auf den Körper wirken zwei entgegengesetzt gleiche Kräfte; es herrscht Kräftegleichgewicht.

## 3.16 Eine Anschauung von der Kraft

### Gegenstand

- 1 Ein Hochschulbuch [1]: „Ebenso wie die Begriffe Länge und Zeit besitzt auch der Kraftbegriff eine unmittelbar anschauliche Bedeutung, die keiner weiteren Erklärung bedarf. Körperliche Kraft wird durch Muskeln ausgeübt, sie wird als eine Muskelempfindung vom Ausübenden erlebt.“
- 2 Ein anderes Hochschulbuch [2]: „Wir meinen, dass wir in unserem Muskelgefühl eine unmittelbare, wenigstens qualitative Vorstellung des Kraftbegriffs besitzen.“
- 3 Ein Schulbuch: „Der Begriff der Kraft geht auf unser Muskelgefühl zurück.“

### Mängel

Die Betätigung eines Muskels nehmen wir als Anstrengung wahr, und zwar nicht über eine spezifische Sinneswahrnehmung, sondern über einen Willensakt. Für welche physikalische Größe ist diese Anstrengung ein Maß? Zum einen wirkt, während der Muskel gespannt ist, eine Kraft (es fließt ein Impulsstrom). Zum anderen verbraucht der Muskel Energie. ATP wird in ADP verwandelt, und zwar egal, ob der Muskel etwas bewegt (also mechanische Energie abgibt) oder nicht (also nur Wärme produziert).

Das „Muskelgefühl“ weist also ebenso auf einen Impulsstrom (eine Kraft), wie auf einen Energiestrom hin. Da diese beiden Begriffe, Impulsstrom und Energiestrom, bzw. Kraft und Leistung aber oft verwechselt werden, ist es nicht geschickt, an das Muskelgefühl zu appellieren, um eine erste Anschauung für den Kraftbegriff zu erzeugen.

### Herkunft

Der Verdacht liegt nahe, dass man sich am Muskelgefühl orientiert, weil man die Muskeln für die Ursache oder die Verursacher der Kraft hält.

Wer oder was verursacht denn die Kraft in dem Seil in Abb. 3.12a? Unser Gefühl sagt uns: die Feder. Und in Abb. 3.12b?

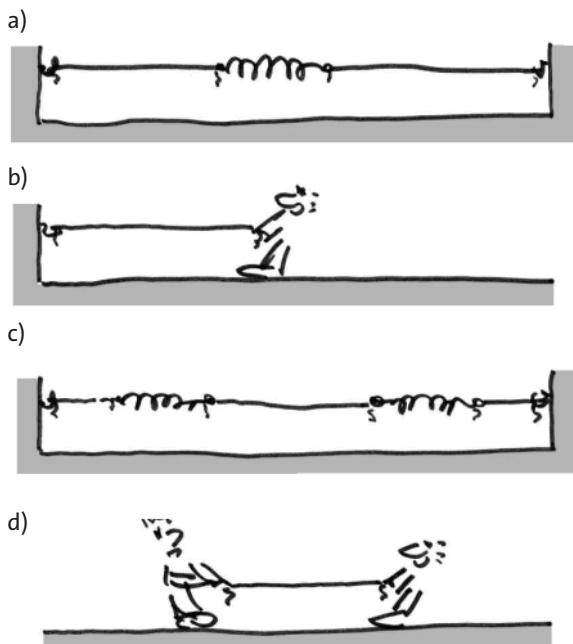


Abb. 3.12 Wer oder was verursacht die Kraft? Die Feder in (a)? Das Männchen in (b)? Welche Feder in (c)? Welches Männchen in (d)?

Das Männchen mit seinen Muskeln. Wir sagen: „Die Feder zieht“, oder „das Männchen zieht“, und nicht etwa „das Seil zieht“ oder „die Wand zieht“. Oder wir sagen, das Männchen übe eine Kraft aus und die Wand erfahre oder erleide die Kraft. Durch diese Sprechweise wird eine Kausalität behauptet: Das Männchen bzw. die Feder wird zum Verursacher, und die Wand bekommt die Wirkung zu spüren.

Etwas kann hier aber nicht stimmen. Welche Feder wäre denn in Abb. 3.12c für die Kraft verantwortlich: die rechte oder die linke? Und welches Männchen in Abb. 3.12d? Schließlich kann man das Seil selbst auch als Feder auffassen, eine Feder mit einer großen Federkonstante. Das Verfahren funktioniert also nicht. Aber ganz kann uns unser Gefühl doch nicht getäuscht haben. Zeichnen sich denn Federn und Männchen nicht doch irgendwie vom Rest der jeweiligen Anordnung aus? In der Tat tun sie das: Sie stellen eine Quelle mechanischer Energie dar. Dabei spielt es keine Rolle, ob sie in der betrachteten Situation wirklich Energie abgeben. Die Tatsache, dass sie mechanische Energie abgeben können, lässt sie als Verursacher erscheinen. Und zwar auch dafür, wofür sie nicht verantwortlich sind: die Kraft.

### Entsorgung

Wir können Kräfte, die auf unseren Körper wirken, qualitativ gut wahrnehmen, denn die Natur hat uns mit eigenen Sinnesorganen dafür ausgestattet: In unserer Haut haben wir Druck-, Zug- und Scherspannungssensoren, die als Kraft- oder Impulsstromsensoren mindestens so zuverlässig sind wie unsere Temperatur-, Licht- und Schallsensoren. Durch sie spüren wir Kräfte. So kann man sogar gut eine Vorstellung von der Größe der Maßeinheit Newton vermitteln: Ein leichter Druck mit dem Finger auf die Haut, oder auch ein 100-g-Gewichtsstück, das man sich auf den Arm legt.

[1] W. Macke, *Mechanik der Teilchen, Systeme und Kontinua*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1962, S. 6

[2] A. Sommerfeld, *Vorlesungen über Theoretische Physik, Mechanik*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1944, S. 5

## 3.17 Kraft und Energie

### Gegenstand

Formulierungen, in denen das Wort Antriebskraft oder Motorkraft vorkommt, wie etwa die folgende: „Die Antriebskraft, die vom Motor auf die Räder übertragen

## Angriffspunkt und Wirkungslinie

wird, kann ...“ oder „Ein langsam fahrendes Auto kann durch die Motorkraft beschleunigt werden.“

### Mängel

Etwas, was von A nach B übertragen wird, befindet sich, nach allgemeinem Sprachgebrauch, erst bei A und dann bei B. Bei den oben angeführten Formulierungen, die Schulbüchern entnommen sind, trifft das auf die Kraft, wenn man das Wort im Sinne der Physik benutzt, nicht zu; auch nicht dann, wenn man die Sache großzügig betrachtet. Richtig werden die Aussagen, wenn man das Wort Kraft mit dem identifiziert, was in der Physik Energie genannt wird.

### Herkunft

Den Namen Kraft benutzt die Physik heute für die Größe  $\vec{F}$ . Es gibt aber eine lange Tradition, der zufolge das Wort auch andere Bedeutungen hatte. So bezeichnete man damit sowohl das, was wir heute Energie nennen – die kinetische Energie hieß „lebendige Kraft“ –, als auch das, was heute Impuls heißt. Der historische Streit „um das wahre Kraftmaß“, bei dem es um die Frage ging, ob der Ausdruck  $m \cdot v$  oder  $m \cdot v^2$  das „wahre“ Maß für die Beschreibung einer Bewegung ist, zeugt davon. Diese Tradition steckt offenbar so tief auch in der Fachsprache, dass das Wort Kraft für die Größe  $E$  genommen wird, ohne dass der Lehrer oder der Buchautor es selbst merkt. Das allgemeine Klagen darüber, dass die Schüler die Begriffe nicht auseinanderhalten, sollte sich nicht gegen die Schüler richten, denn die geben nur das wieder, was sie von uns lernen. Wir differenzieren sorgfältig zwischen verwandten Konzepten, wie Lichtstrahl und Lichtbündel, zwischen Kräften aller Art, zwischen verschiedenen Prozessen, wie Kernzerfall und Kernspaltung, leisten uns aber Verwechslungen, wenn es um die elementarsten Begriffe geht. Die zunächst sorgfältig eingeführten Größen Energie und Kraft werden lustig durcheinander geworfen.

### Entsorgung

Man achtet darauf, dass die Bezeichnung Kraft im Kontext physikalischer Erscheinungen nur als Name für die Größe  $\vec{F}$  benutzt wird.

## 3.18 Angriffspunkt und Wirkungslinie

### Gegenstand

Wenn die Größe Kraft eingeführt wird, weist man darauf hin, dass eine Kraft bestimmt ist durch Betrag, Rich-

tung und Angriffspunkt. Später, im Zusammenhang mit der Behandlung des Drehmoments, bekommt die Kraft noch eine Wirkungslinie zugeordnet.

### Mängel

Wieder scheint die Kraft eine Sonderbehandlung zu erfordern. Als Vektor hat sie Betrag und Richtung. Warum muss man ihr noch einen Angriffspunkt zuordnen? Ist dies eine Besonderheit der Kraft?

Die Werte der meisten physikalischen Größen gehören zu einem der drei folgenden geometrischen Gebilden: einem Punkt, einer Fläche oder einem Raumbereich. (Zu den wenigen Ausnahmen gehört die Zeit.) Die Größen, deren Werte sich auf einen Punkt beziehen, nennt man manchmal intensive, manchmal lokale Größen. Zu ihnen gehören zum Beispiel die Geschwindigkeit, der Druck, die Temperatur, alle Feldstärken, Potenziale und die verschiedensten Dichten und Stromdichten. Die Größen, deren Werte einen Raumbereich betreffen, sind die extensiven Größen. Zu ihnen gehören die Masse, die Energie, die elektrische Ladung und der Impuls. Diejenigen Größen, deren Werte sich auf eine Fläche beziehen, sind die Stromstärken und Flüsse. Zu ihnen gehören die elektrische Stromstärke, die Leistung (Energiedstromstärke), die Massenstromstärke, die Kraft (Impulsstromstärke), der magnetische Fluss etc. Diese Einteilung gilt sowohl für skalare, als auch für vektorielle und auch tensorielle Größen. So ist die Temperatur eine skalare und die elektrische Feldstärke eine vektorielle lokale Größe. Die elektrische Ladung ist eine skalare und der Impuls eine vektorielle extensive Größe. Die Leistung ist eine skalare, die Kraft eine vektorielle „Flächengröße“.

Wir können nun klarer sagen, was es mit dem Angriffspunkt von Kräften auf sich hat. Es soll ja die Angabe des „Ortes“ sein, auf den sich der Kraftvektor bezieht. Zwei Bemerkungen sind dazu am Platze:

1. Dieser Ort ist kein Punkt, sondern eine Fläche.
2. Es ist in der Physik sonst nicht üblich, diesen Ort in der Definition der Größe zu benennen. Es ist so als würde man etwa sagen: Die Wirkung einer Temperatur ist bestimmt durch ihren Betrag und den Ort, an dem sie herrscht. Oder, die Wirkung der elektrischen Ladung hängt ab vom Betrag der Ladung und dem betrachteten Raumbereich. Oder, um es wirklich genauso zu machen wie bei der Kraft, stellen wir uns einen unendlich dünnen elektrischen Leiter vor, einen Leiter also, dessen Querschnitt ein Punkt ist. Dann würde man sagen, die elektrische Stromstärke hängt ab vom Betrag und vom Durchflusspunkt, oder, falls der Strom in einen Körper hineinfließt, vom Zuflusspunkt.

### Herkunft

Dass man vom Angriffspunkt und nicht etwa von der Angriffsfläche der Kraft spricht, liegt wohl am ausgeprägten Traditionsbewusstsein der Physiker. Die Punktmechanik des 18. und 19. Jahrhunderts, in der es ja auch Massenpunkte und Punktladungen gab, war sehr erfolgreich und ist es als Näherung heute noch. Aber darunter sollte die heutige Schulphysik nicht unbedingt leiden.

### Entsorgung

Man kann auf Angriffspunkt und Wirkungslinie ohne Weiteres verzichten. Auf jeden Fall sollte man es tun, wenn man einen Lehrsatz zur Einführung der Kraft formuliert.

## 3.19 Druck und Kraft

### Gegenstand

„Der Druck im Innern einer Flüssigkeit ist an derselben Stelle nach unten, nach der Seite und nach oben gleich groß.“

### Mängel

Das Zitat stammt aus einem mehrbändigen älteren Hochschulphysikbuch. In ihm kommt ein Problem zum Ausdruck, das uns auch in vielen moderneren Büchern, wenn auch nicht in so knapper Form, begegnet: Man hat seine liebe Not damit, die beiden Größen Kraft und Druck auseinanderzuhalten.

Es ist allgemein üblich, zunächst die Kraft einzuführen und danach den Druck als Kraft pro Fläche. Das Problem ist nun: Wie macht man aus dem Vektor Kraft und dem Vektor Fläche den Skalar Druck? Man hätte den Druck einführen können als Energieänderung pro Volumenänderung:

$$dE = p \cdot dV.$$

Dann hätte man das Problem nicht gehabt. So hat man es aber. Wenn man es mit Kraft pro Fläche ordentlich machen wollte, so müsste man schreiben

$$\vec{F} = \vec{\sigma} \cdot \vec{A}.$$

Hier ist  $\vec{\sigma}$  der mechanische Spannungstensor. In ruhenden Flüssigkeiten und Gasen hat dieser Tensor nur drei untereinander gleiche Diagonalelemente und kann damit durch eine einzige Zahl charakterisiert werden, die man den hydrostatischen Druck nennt.

Dass  $\vec{\sigma}$  im Allgemeinen nicht diese einfache Gestalt hat, hängt mit einer auch jedem physikalischen Laien vertrauten Tatsache zusammen: Man kann einen festen Gegenstand in drei zueinander orthogonalen Richtungen unter beliebige, voneinander unabhängige mechanische Spannungen versetzen. Wenn man diesen Sachverhalt aber nicht anspricht, so hat man es schwer, die Aussage von der „Allseitigkeit“ des Drucks in Flüssigkeiten und Gasen plausibel zu machen. Diese Allseitigkeit wird ja vorgestellt als eine überraschende Beobachtung. Offenbar wird davon ausgegangen, dass man sich vorstellen können, dass der Druck nicht allseitig ist. Es wird dann gezeigt, dass er es ist, und es entsteht der Eindruck, die Erwartung war unberechtigt, vielleicht sogar unsinnig. Wie einfach wäre es doch gewesen, zu sagen, dass der Druck im Allgemeinen tatsächlich richtungsabhängig ist! Offenbar hat sich der Autor unseres Zitats sogar selbst im Gestrüpp von Skalar, Vektor und Tensor verfangen. Denn dass der Druck „nach unten“ und „nach oben“ derselbe ist, ist eine sinnlose Aussage: Ein Tensor unterscheidet verschiedene Richtungen, aber für eine Richtung nicht die beiden verschiedenen Orientierungen. Einen Druck nach unten und einen anderen nach oben gibt es also nicht, sondern nur einen einzigen in der vertikalen Richtung. Dieser könnte sich durchaus von dem in einer der horizontalen Richtungen unterscheiden. (In einer Flüssigkeit tut er das allerdings nicht.) „Druck nach unten“ und „Druck nach oben“ wurde offenbar verwechselt mit „Kraft nach unten“ und „Kraft nach oben“.

### Herkunft

Zum einen aus der alten Newton'schen Vorstellung, nach der Kräfte auf Körper wirken. Wenn man den Druck über die Kraft erklärt, so wird man auch beim Druck nach einem Körper suchen, auf den er wirkt. Die Erwartung, dass der Druck eine Orientierung hat, ist dann nahe liegend.

Zum anderen wahrscheinlich vom Namen der Größe. Zum Druck gehört das Verb „drücken“, und man drückt nun mal immer auf irgendetwas. Das Drücken hat eine Richtung.

### Entsorgung

Man führt die Kraft ein als eine Größe, deren Wert sich auf eine Fläche bezieht, also nicht auf einen Punkt und auch nicht auf einen Körper [1].

Vor dem Druck in Flüssigkeiten und Gasen führt man die mechanische Spannung in festen Materialien ein, und man zeigt, dass diese richtungsabhängig ist: Man kann der mechanischen Spannung in einem festen Körper in drei zueinander orthogonalen Richtungen voneinander unabhängige Werte geben. Flüssigkeiten

## Die Umlenkrolle

und Gase sind Sonderfälle, bei denen die drei Spannungen untereinander gleich und positiv sind.

(Einen anderen Sonderfall stellen elektrische und magnetische Felder dar: Hier haben die drei „Hauptspannungen“ alle denselben Betrag. In Richtung des Feldstärkevektors ist die Spannung negativ, in den dazu orthogonalen Richtungen positiv.)

Man vermeide die Formulierung „der Druck auf ...“. Man kann dagegen sagen: der Druck in horizontaler Richtung oder in vertikaler Richtung.

[1] F. Herrmann, *Einige Vorschläge zur Einführung des Drucks*, Praxis der Naturwissenschaften, 46, 1997, S. 37

## 3.20 Die Umlenkrolle

### Gegenstand

- 1 „Eine feste Rolle vermag nur die Richtung der erforderlichen Kraft zu verändern.“
- 2 „Eine feste Rolle lenkt eine Kraft in eine andere Richtung um.“
- 3 „Eine Rolle ist ein Kraftwandler ... Dabei wird die Richtung einer Zugkraft verändert, ohne dabei den Betrag der Kraft zu verändern.“
- 4 „Man kann ... die Kraft in eine andere Richtung umlenken. Dabei ist es egal, ob man senkrecht oder schräg am Seil zieht.“

### Mängel

Eine Person P zieht an einem Seil, das über eine Rolle R läuft und an dem ein Körper K hängt, Abb. 3.13.

1 Die zitierten Sätze beziehen sich auf die Kräfte in den Teilen a und b ein und desselben Seils. Wenn man von der Kraft spricht, ohne den Körper zu benennen, der sie ausübt und auf den sie wirkt, so hat man die Orientierung des Vektorpfeils noch nicht festgelegt. Die Kraft  $\vec{F}_{PR}$ , die P auf R ausübt, weist nach unten, die Kraft  $\vec{F}_{RP}$ , die R auf P ausübt, nach oben. Der Zustand des Seilstücks a wird sowohl durch die eine als auch durch die andere Kraft eindeutig beschrieben.

Unsere Sätze behaupten, eine Kraft werde umgelenkt. Das wird man so verstehen: Wenn man

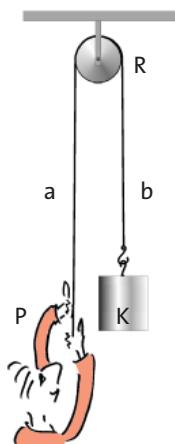


Abb. 3.13 Was lenkt die Umlenkrolle um?

von Seilstück (a) zu Seilstück (b) geht, wechselt die Kraft ihre Richtung. Nun ist es aber in unser Belieben gestellt, ob sie das tut oder nicht.  $\vec{F}_{PR}$  hat zwar die zu  $\vec{F}_{RK}$  entgegengesetzte Richtung, es scheint also etwas umgelenkt worden zu sein. Aber die Richtungen von  $\vec{F}_{PR}$  und  $\vec{F}_{RK}$  sind gleich. So gesehen wurde nichts umgelenkt.

2 „Umlenken“ bedeutet, einem Ding, das sich bewegt, eine neue Richtung geben. Wenn man die Metapher von der umgelenkten Kraft benutzt, so unterstellt man, dass eine Kraft irgendwoher kommt, und dass man sie weiterleiten kann: entweder geradeaus, in einem geraden Seil oder nicht geradeaus über einer Rolle.

Wenn man sich auf eine solche Beschreibung einlässt, muss man sich aber die Frage gefallen lassen, was denn mit der dritten Kraft passiert: die, welche die Aufhängung auf die Rolle ausübt. Wenn eine Kraft etwas ist, was man weiterverfolgen und umlenken kann, wie läuft die denn weiter, wohin wird sie umgelenkt?

Tatsächlich lenkt ja die Rolle etwas um, und sogar gleich zweierlei, nämlich erstens – trivialerweise – das Seil, und zweitens den Energiestrom, Abb. 3.14. Wenn Seil (a) nach unten gezogen wird, fließt die Energie in Seil (a) nach oben, dann um die Rolle herum und in Seil (b) nach unten zu Körper K.

3 Es ist durchaus möglich, mit der Größe  $\vec{F}$  so umzugehen, wie es hier versucht wird.  $\vec{F}$  ist der Impulsstrom, und dessen Verlauf kann man für die Rolle leicht angeben. Der folgt allerdings nicht dem Seil. Wenn wir, wie es üblich ist, die positive Impulsrichtung nach oben annehmen, fließt der Impuls aus der Aufhängung heraus in die Rolle. Dort verzweigt er sich in zwei gleich große Teilströme, Abb. 3.15.

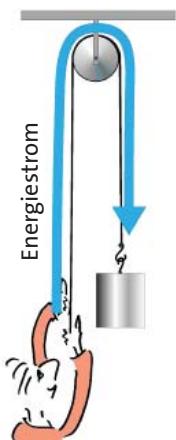


Abb. 3.14 Umgelenkt wird nicht die Kraft, sondern das Seil und der Energiestrom.

### Herkunft

Das Problem schreit danach, durch etwas beschrieben zu werden, was den Charakter eines Stroms hat. Dass durch die Rolle, außer dem Seil, etwas umgelenkt wird, ist nahe liegend. Aber anscheinend wird hier versucht,

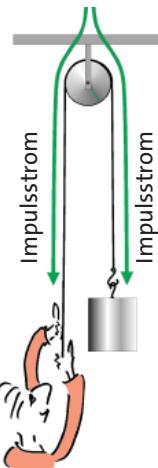
## Momentan- und Durchschnittsgeschwindigkeit

das Verhalten des Energiestroms auf die Kraft zu projizieren, siehe auch die Altlast Kraft und Energie [1].

### Entsorgung

Das Bild von der umgelenkten Kraft taugt nichts. Man bekommt Klarheit, wenn man die feste Rolle, die lose Rolle und den Flaschenzug mit Energie- und Impulsströmen beschreibt, und dabei Energie- und Impulsstrom sorgfältig auseinanderhält, so wie man beim elektrischen Stromkreis den Energiestrom und den elektrischen Strom auseinanderhält.

[1] F. Herrmann, *Kraft und Energie*, Altlasten der Physik



**Abb. 3.15** Der Impulsstrom wird nicht umgelenkt.

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

die Durchschnittsgeschwindigkeit dieser Bewegung auf dem Wegstück  $\Delta s$ , bzw. im Zeitintervall  $\Delta t$ .“

- 7 „Die Momentangeschwindigkeit zu einem Zeitpunkt  $t_0$  erhält man näherungsweise als Intervallgeschwindigkeit eines möglichst kleinen Zeitintervalls, das den Zeitpunkt  $t_0$  enthält.“

Entsprechende Lehrsätze findet man für die Beschleunigung. Die Aussagen sind keine Besonderheit der Bücher, denen sie entnommen wurden. Ähnliche Lehrsätze stehen in den meisten Schulphysikbüchern, egal ob ganz neu in modernem Gewand oder 100 Jahre alt.

### Mängel

Die Geschwindigkeit und die Beziehung  $v = \Delta s / \Delta t$  werden mit einer ungewöhnlichen Akribie eingeführt. Verschiedenerlei Bedenken könnten einem kommen.

- Die hier versuchte Strenge kann im Folgenden nicht durchgehalten werden. Man bedenke, mit welcher Ungenauigkeit später viel wichtige Begriffe eingeführt werden, wie etwa Kraft, Wärme oder elektrische Stromstärke.
- Gerade am Anfang des Physikkurses wirkt das starke Formalisieren abschreckend.
- Es ist kein weiter Weg von gedanklicher Strenge zu Pedanterie, und man kann sich fragen, ob die Grenze zwischen beiden hier nicht schon überschritten ist.
- Es wird erklärt, dass man unter  $v = \Delta s / \Delta t$  die Geschwindigkeit versteht. Sie wird über diese Beziehung definiert. Es wird also nicht einfach gesagt, die Gleichung beschreibe den Zusammenhang zwischen  $v$ ,  $s$  und  $t$ . Soll der Schüler daraus schließen, dass das, was er sich bisher unter Geschwindigkeit vorgestellt hat, gar nicht die Geschwindigkeit im Sinn der Physik ist? Wir sollten nicht Trivialitäten mathematisch verbrämmt als neue Einsichten verkünden. Nebenbei sei bemerkt, dass man die Geschwindigkeit, wenn man sie schon definieren will, auch auf andere Art definieren kann [1].
- Was wir als Weg zum Verständnis der Geschwindigkeit anbieten, ist nicht gerade sehr handlich. Der Umweg führt über zwei oder drei Spezialgeschwindigkeiten: eine Momentan-, eine Intervall- und eine Durchschnittsgeschwindigkeit. Wenn man bei anderen Größen analog verfahren würde, käme man im Unterricht nicht weit. Konsequenterweise müsste man etwa erklären: „In der Praxis finden wir den Momentanwert der elektrischen Stromstärke näherungsweise als Durchschnittsstromstärke in einem

## 3.21 Momentan- und Durchschnittsgeschwindigkeit

### Gegenstand

In einem Lehrbuch der Physik fand ich die folgenden hervorgehobenen Sätze:

- 1 „Unter der Geschwindigkeit  $v$  einer gleichförmigen Bewegung versteht man den konstanten Quotienten aus einer beliebigen Ortsänderung  $\Delta s$  und der dazu benötigten Zeit  $\Delta t$ :  $v = \Delta s / \Delta t$ .“
- 2 „Bei einer gleichförmigen Bewegung mit den Anfangswerten  $t = 0$  und  $s = 0$  gilt neben  $v = \Delta s / \Delta t$  auch  $v = s / t$ .“
- 3 „In der Praxis finden wir die Momentangeschwindigkeit näherungsweise als Durchschnittsgeschwindigkeit in einem möglichst kleinen Zeitintervall.“

In einem anderen Lehrbuch, ebenfalls hervorgehoben:

- 4 „Definition: Sind bei der geradlinigen Bewegung eines Körpers Weg  $s$  und Zeit  $t$  zueinander proportional, so bezeichnet man den konstanten Quotienten  $s/t = v$  als Geschwindigkeit des Körpers.“
- 5 „Definition: Haben in einem Teilabschnitt einer geradlinigen Bewegung alle Quotienten  $\Delta s / \Delta t$  denselben Wert, so ist  $\Delta s / \Delta t = v$  die Geschwindigkeit innerhalb dieses Bewegungsabschnitts.“
- 6 „Sind  $\Delta s$  und  $\Delta t$  zusammengehörige Intervalle von Weg und Zeit einer beliebigen Bewegung, so ist

## Die Beschleunigung

möglichst kleinen Zeitintervall“, oder: „... die lokale Dichte näherungsweise als Durchschnittsdichte in einem möglichst kleinen Raumbereich.“

### Herkunft

Wahrscheinlich eine Überlieferung aus den Anfangszeiten der Physik. Man lese ein Lehrbuch oder auch Originalarbeiten aus dem 18. Jahrhundert. Dort begegnet einem oft diese Art peinlicher Exaktheit an Stellen, wo wir heute kaum noch ein Problem sehen. Vielleicht schimmert bei unseren modernen Schulbüchern aber auch einfach nur das zweite Unterrichtsfach der Autoren hindurch.

### Entsorgung

Eine Abrüstung ist auf verschiedene Weisen möglich. So braucht man nicht zu erklären, was man unter Geschwindigkeit und was man unter konstanter Geschwindigkeit versteht. Die Gleichung  $v = s/t$  beschreibt den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, zurückgelegtem Weg und dazu gebrauchter Zeit, falls die Geschwindigkeit konstant ist. Ist sie nicht konstant, so verfährt man wie mit anderen Größen, deren Wert sich mit der Zeit ändert. Messen kann man die Geschwindigkeit mit dem Tachometer.

[1] Zwei alternative Verfahren zur Definition oder Einführung der Geschwindigkeit seien angedeutet, aber nicht etwa zum Gebrauch in der Schule.

- Man definiert die Geschwindigkeit über  $dE = \vec{v} d\vec{p}$ , also als Energieänderung pro Impulsänderung, in Analogie zu der Art, wie man die elektrische Spannung definiert (als Energieänderung pro Ladungsänderung), oder die absolute Temperatur (als Energieänderung pro Entropieänderung).
- Durch „direkte Metrisierung“. Mit einem nicht geechten Tachometer kann man feststellen, ob eine Geschwindigkeit konstant ist. So kann man eine Geschwindigkeitseinheit  $v_0$  festlegen. Vielfache konstruiert man, indem man einen Körper B mit der Geschwindigkeit  $v_0$  gegenüber einem anderen Körper A bewegt, der seinerseits die Geschwindigkeit  $v_0$  gegen die Erde hat. B hat dann gegen die Erde die Geschwindigkeit  $2v_0$ .

## 3.22 Die Beschleunigung

### Gegenstand

Im Rahmen der Kinematik wird die Beschleunigung eingeführt. Man unterscheidet Momentan- und Durch-

schnittsbeschleunigung, Bahn-, Radial-, Normal- und Winkelbeschleunigung, Zentrifugal-, Zentripetal- und Coriolisbeschleunigung. Man lernt, dass die gleichförmige Kreisbewegung eine beschleunigte Bewegung ist.

### Mängel

- Mithilfe von Fachausdrücken kann man sich kürzen. Man packt in ein einziges Wort, wozu man sonst einen ganzen Nebensatz gebraucht hätte. Aussagen können dadurch verständlicher werden. Für die Anzahl der Fachausdrücke gibt es aber wohl eine Art Optimum. Denn benutzt man zu viele, so wird die Verständlichkeit wieder geringer. Die Aussagen werden zwar zunächst kürzer, aber man verliert dadurch wieder an Kürze, dass man die Fachausdrücke erklären muss, und man verliert an Verständlichkeit, weil der Lernende die Definitionen kennen muss. Die Beschleunigung ist ein Beispiel für die Proliferation von unterschiedlichen Namen für ein und dieselbe physikalische Größe.
- Die Bewegung eines Punktes kann man durch verschiedene Zeitfunktionen beschreiben. Die gebräuchlichsten sind die Position  $s(t)$ , die Geschwindigkeit  $v(t) = ds/dt$  und die Beschleunigung  $a(t) = d^2s/dt^2$ . Man kann aber auch noch höhere Zeitableitungen von  $s(t)$  einführen. Die dritte Zeitableitung von  $s(t)$  nennt man gelegentlich den „Ruck“. Der Name bringt die anschauliche Bedeutung der Größe gut zum Ausdruck. Wenn es einem nicht darum geht, sich auf der kinematischen Spielwiese auszutoben, so muss man sich aber fragen, welche dieser Funktionen man wirklich braucht.

Betrachten wir als Beispiel einen wichtigen Bewegungstyp: die gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Die Beschreibung mithilfe der Position  $s$  ist, wenigstens für Schüler, recht kompliziert, denn  $s(t)$  ist eine quadratische Funktion.  $v(t)$ , in unserem Fall eine lineare Funktion, ist einfacher. Mathematisch noch einfacher wird die Beschreibung mit der Beschleunigung, denn  $a(t)$  ist konstant. Am einfachsten im Sinne der Mathematik ist aber das Verhalten der dritten Zeitableitung: Sie ist für alle  $t$  gleich null. Selbstverständlich kann man viel lernen, wenn man diese Funktionen miteinander vergleicht. Wenn es einem aber auf eine möglichst knappe Beschreibung von Bewegungen ankommt, so wird man versuchen, sich auf die Diskussion derjenigen dieser Funktionen zu beschränken, die der Anschauung am besten zugänglich sind. Meiner Meinung nach sind das  $s(t)$  und  $v(t)$ . Die Funktion  $v(t)$  in unserem Beispiel sagt uns, dass die Geschwindigkeit mit der Zeit gleichmäßig zunimmt. Ich glaube, diese Aussage ist anschau-

## Die wirkende Beschleunigung

licher als die, die Beschleunigung sei konstant. Man sieht es zum Beispiel daran, wie auch technisch geschulte Personen die Beschleunigung eines Autos angeben. Sie sagen nicht, die Beschleunigung betrage so und so viele Meter pro Sekunde zum Quadrat, sondern sie sagen, das Auto beschleunige von 0 auf 100 in so und so viel Sekunden. Es wird also mit  $v(t)$  argumentiert.

Als Physiklehrer oder -Lehrerin glaubt man vielleicht, ohne die Größe Beschleunigung gar nicht auszukommen, tritt sie doch in der wichtigsten Gleichung der Mechanik auf, nämlich im zweiten Newton'schen Gesetz. Tatsächlich gibt es aber die Beschleunigung bei Newton selbst gar nicht. Sein zweites Gesetz formuliert er mit der zeitlichen Änderung des Impulses.

- Der Name Beschleunigung für die Größe  $a$  ist Ursache für manch eine logische Unstimmigkeit. Kürzlich habe ich in einem Aufsatz die folgende Formulierung gefunden: „... dass geladene Teilchen, immer wenn sie beschleunigt oder verzögert werden oder wenn sie die Bewegungsrichtung ändern, Strahlung emittieren“. Gegen diese Formulierung ist sicher nichts einzuwenden. Schon im nächsten Satz heißt es aber: „... Teilchen, die sich auf einer Kreisbahn bewegen — sogar bei konstanter Geschwindigkeit — sind beschleunigt und emittieren also ...“. Während im ersten Satz noch zwischen beschleunigen, verzögern und Richtung ändern unterschieden wird, führt im zweiten kurzerhand jedes Teilchen eine beschleunigte Bewegung aus, für das  $a(t)$  von null verschiedenen ist.

Man kennt das Problem natürlich von anderswoher. Oft hat die Umgangssprache für die positiven Werte einer physikalischen Größe ein anderes Wort als für die negativen, oder für die großen Werte ein anderes als für die kleinen: Beschleunigung – Verzögerung, Druck – Zug, Wärme – Kälte. Die Physik braucht nun aber einen Namen für eine Variable und nicht, je nach ihrem Wert, verschiedene. Dass Probleme auftreten, ist daher kaum zu vermeiden. Man kann und sollte aber sehr wohl vermeiden, aus dem unpassenden Größennamen wieder ein Adjektiv zu bilden, denn so entsteht schlechter Fachjargon. Genau das ist bei der Beschleunigung passiert. Man sagt, die gleichförmige Kreisbewegung sei eine beschleunigte Bewegung – obwohl doch nichts schneller wird. Gewiss, die Geschwindigkeit ändert sich. Aber die kann sich eben auch ändern, ohne dass der Körper schneller oder langsamer wird. Man lässt sich also aufgrund des Namens der Größe zu einer unpassenden Aussage verle-

ten, und verkauft dann den Widersinn – die gleichmäßige Kreisbewegung ist eine beschleunigte Bewegung – als physikalische Einsicht.

### Herkunft

Im Gegensatz zur verbreiteten Ansicht hat Newton (1643 – 1727) eine Größe Beschleunigung nie benutzt. Nach seiner Formulierung des zweiten Gesetzes ist die Änderung der „Bewegung“ proportional zur Kraft. Das Wort Bewegung (motus) benutzte er oft abkürzend für „Bewegungsmenge“ (quantitas motus), also das, was wir heute Impuls nennen. Auch bei Huygens (1629 – 1695) gibt es die Beschleunigung als physikalische Größe noch nicht [1]. 1754 benutzt Euler in einer Veröffentlichung den Differenzialquotienten  $d^2s/dt^2$ , gesteht ihm aber kein eigenes Symbol zu und nennt ihn nicht Beschleunigung [2]. Die früheste Stelle, an der ich die Beschleunigung als Variable gefunden habe, ist in den Opera omnia von Johann Bernoulli aus dem Jahr 1742 [3]. Offenbar wurde sie eingeführt im Rahmen der zunehmenden Mathematisierung der Mechanik, die nach Newton einsetzte.

### Entsorgung

Man führt eine Größe Beschleunigung gar nicht erst ein. In der Kinematik beschränkt man sich auf die Diskussion der Weg-Zeit- und der Geschwindigkeits-Zeit-Funktion. Auch in der Dynamik braucht man die Beschleunigung nicht. Das zweite Newton'sche Gesetz formuliert man so:  $\vec{F} = d\vec{p}/dt$ .

Wenn man die Größe  $a$  aber schon benutzt, dann sollte man nicht sagen, ein Körper werde beschleunigt oder führe eine beschleunigte Bewegung aus, solange der Betrag seiner Geschwindigkeit nicht zunimmt.

[1] E. J. Dijsterhuis, *Die Mechanisierung des Weltbildes*, Springer-Verlag, Berlin, 1956, S. 528

[2] L. Euler, *Vollständige Theorie der Maschinen, die durch Reaktion des Wassers in Bewegung versetzt werden*, Ostwald's Klassiker der Exakten Naturwissenschaften, Nr. 182, Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1911

[3] S. Sambursky, *Der Weg der Physik*, Artemis Verlag, Zürich, 1975, S. 428.

## 3.23 Die wirkende Beschleunigung

### Gegenstand

- 1 „Auf einen Stein in Erdnähe wirkt eine Beschleunigung von  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .“

## Der Bewegungszustand

- 2 „Während der Beschleunigung eines PKWs wirkt auf die Insassen eine Beschleunigung von ca. 0,3 g, der Pilot eines Formel-1 Rennwagens erfährt beim Start 1 g – 1,5 g und in Kurvenfahrten bis 5 g.“
- 3 „Die Richtung, in der die Beschleunigung wirkt, spielt ebenfalls eine Rolle. Am schädlichsten sind ‚nach unten‘ gerichtete Beschleunigungen, wobei das Blut in das Gehirn und in die Augen schießt.“
- 4 „Observers in freely falling frames who plunge through the hole’s horizon see no real particles outside the horizon, only virtual ones. Observers in accelerated frames who, by their acceleration, remain always above the horizon see a plethora of real particles.“ (Mit „hole“ ist „black hole“ gemeint, d. h. ein schwarzes Loch.)

### Mängel

Die Größe, die wir in der Kinematik mit  $a$  abkürzen, nennt man Beschleunigung. Der Name passt einigermaßen gut, denn sie misst das, was man auch umgangssprachlich Beschleunigung nennen würde (abgesehen davon, dass man auf diese Art auch einer Kreisbewegung eine Beschleunigung zuordnet).

Wenn man nun einen physikalisch korrekten Satz formulieren sollte, d. h., dass zum Subjekt Beschleunigung noch ein Prädikat und ein Objekt hinzukommt, so würde man sagen, ein Körper hat eine Beschleunigung, oder seine Beschleunigung beträgt so und so viel, so wie man von dem Körper auch sagt, dass er eine Geschwindigkeit, eine Temperatur oder eine Dichte hat. Auf keinen Fall würde man aber sagen, die Beschleunigung wirke auf den Körper.

Die Beschleunigung ist eine kinematische Größe des Gebildes, das sich bewegt – es muss gar kein Körper sein; es kann zum Beispiel auch ein Punkt auf dem Bildschirm des Computers sein –, genauso wie etwa die Geschwindigkeit, von der man auch nicht sagt, sie wirke auf einen Körper.

Wirken kann auf den Körper nur etwas anderes oder jemand anderes. Die Beschleunigung kann höchstens die Wirkung von etwas sein.

Besonders häufig wird vom „Wirken“ der Beschleunigung im Zusammenhang mit dem Gravitationsfeld der Erde gesprochen. Und dazu passt auch, dass man die physikalische Größe  $g$  Schwerkraft-, Fall- oder Gravitationsbeschleunigung nennt.

Um diese ungeschickte Sprechweise zu vermeiden, benutzt man für  $g$  auch gern die Bezeichnung Ortsfaktor, vor allem in der Schulbuchliteratur. Das ist etwas besser, aber wieder auf andere Art verquer.

Die Gleichung  $\vec{F} = m \cdot \vec{g}$  ist das Analogon zu der aus der Elektrostatik bekannten Gleichung  $\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$

Mit demselben Recht wie  $\vec{g}$  könnte man auch  $\vec{E}$  als Ortsfaktor bezeichnen, denn auch der Wert der elektrischen Feldstärke hängt vom Ort ab, so wie die Werte noch unzähliger anderer physikalischer Größen.

Warum nennt man  $\vec{g}$  nicht Gravitationsfeldstärke, so wie man  $\vec{E}$  elektrische Feldstärke und  $\vec{H}$  magnetische Feldstärke nennt?

Man könnte einwenden, es sei pedantisch, solche Sprachgewohnheiten zu kritisieren; man weiß doch, was gemeint ist. Ja, wenn es ein Einzelfall wäre, wäre es nicht schlimm. Leider ist es aber eines von vielen Beispielen dafür, dass man sich in der Physik unklar, unpassend oder widersprüchlich ausdrückt. Wie viel könnte die Physik durch eine klare, kohärente Sprache gewinnen!

### Herkunft

Dass  $\vec{g}$  nicht als Gravitationsfeldstärke bezeichnet oder interpretiert wird, liegt wohl daran, dass man hier immer noch dem von Newton à contrecœur eingeführten Fernwirkungskonzept anhängt. Schließlich gab es bei Newton noch kein Gravitationsfeld.

Auch wenn die Sprechweise keine schwerwiegenden Konsequenzen hat, ist sie doch ein Indiz für ein antiziertes Weltbild.

Ich muss auch zugeben: Wer so spricht, ist in guter Gesellschaft. Ich verrate ausnahmeweise den Autor eines der oben stehenden Zitate, nämlich des letzten: Der Satz stammt von Kip Thorne (Physik-Nobelpreis 2017, den er gewiss verdient hat). Den Jargon der Fachwissenschaft (und der Nobel-Preisträger) zu sprechen verleiht einem das wohlige Gefühl, dazugehören, egal ob man’s verstanden hat oder nicht.

### Entsorgung

Man lasse eine Beschleunigung auf keinen Fall wirken.

Wenn man unbedingt etwas wirken lassen will (aber noch besser wäre es, gar nichts wirken zu lassen), dann lasse man doch die Kraft wirken, oder zur Not auch das Feld, oder die Erde, aber um Gottes Willen nicht die Beschleunigung.

Und  $\vec{g}$  nenne man Gravitationsfeldstärke, sodass klar wird, dass die beiden Gleichungen  $\vec{F} = m \cdot \vec{g}$  und  $\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$  etwas gemeinsam haben.

## 3.24 Der Bewegungszustand

### Gegenstand

Jeder Student weiß, was er zu antworten hat, wenn er in der Prüfung nach den Wirkungen einer Kraft gefragt

wird: Eine Kraft verursacht eine Verformung oder eine Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers.

### Mängel

Mit der Änderung des Bewegungszustandes ist die Änderung der Geschwindigkeit gemeint. Mindestens den Schülerinnen und Schülern der Oberstufe kann man zumuten, dass sie wissen, dass die Geschwindigkeit eine vektorielle Größe ist. Mit der Umschreibung „Bewegungszustand“ drückt man etwas unklar aus, was man auch klar sagen könnte, indem man die physikalische Größe benennt, deren Wert sich ändert, wenn eine Kraft wirkt. Schließlich sagt man auch, dass Wärmezufuhr eine Temperaturerhöhung bewirkt, dass die Zufuhr elektrischer Ladung eine Zunahme der Spannung verursacht oder der Druck zunimmt, wenn man Luft in einen Reifen pumpt. Man sagt nicht, es ändere sich der thermische, der elektrische bzw. der Kompressionszustand des entsprechenden Systems.

### Herkunft

Die Formulierung stammt direkt vom großen Meister. Sein erstes Gesetz lautet ins Deutsche übersetzt etwa so: „Jeder Körper verharrt in seinem Zustand der Ruhe oder geradlinig-gleichförmigen Bewegung, außer wenn er durch eine Kraft gezwungen ist, seinen Zustand zu ändern.“ Hier haben wir also den „Zustand“ der Bewegung.

Dass Newton es so ausdrückte, ist verständlich. Einfach von der Geschwindigkeit als vektorieller Größe konnte er noch nicht sprechen, denn die Vektoren als mathematisches Werkzeug wurden erst mehr als hundert Jahre später erfunden.

### Entsorgung

Das Wort Bewegungszustand ist durchaus brauchbar in einem allgemeineren Sinn. Dort wo es gewöhnlich angewendet wird, sagt man aber lieber gleich Geschwindigkeit. Unter dem Bewegungszustand eines Körpers würde man alles verstehen, was seine Bewegung ausmacht, auch seine Beschleunigung und seine Rotation.

## 3.25 Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit

### Gegenstand

Zu den einfachsten und gleichzeitig auffälligsten Bewegungen um uns herum gehört die Bewegung eines Fahrzeugs, das gleichmäßig dahinfährt: ein Auto auf der Landstraße oder der Autobahn oder ein Zug auf freier Strecke.

### Mängel

Wie geht der Physikunterricht mit diesen Vorgängen um? In der Kinematik werden sie erwähnt und besprochen: als Beispiel für eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit, also der einfachsten Bewegung überhaupt.

Was aber sagt die Dynamik zu der normalen Auto- oder Bahnfahrt? Zum Beispiel das Folgende:

„Damit sich ein Fahrzeug gleichförmig bewegt, muss seinem Motor kontinuierlich Energie zugeführt werden. Denn aufgrund von Reibung wird während der Bewegung ständig Wärme an die Umgebung abgegeben.“

Die Antriebskraft ist bei der gleichförmigen Bewegung genauso groß wie die gesamte Reibungskraft  $F_R$ . Die Energie, die notwendig ist, um das Fahrzeug gleichförmig um die Strecke  $s$  zu bewegen, beträgt dann  $E = F_R \cdot s$ . Die kinetische Energie des Fahrzeugs bleibt bei diesem Vorgang konstant.“

Diese Sätze können korrekt sein. Es wäre allerdings schön, wenn man noch erfahren hätte, was unter der Antriebskraft zu verstehen ist. Eine Kraft wird immer von einem Körper A auf einen Körper B ausgeübt. Welches ist bei der Antriebskraft der Körper A und welches ist B? Angetrieben wird doch wohl das Auto. Dann wäre also das Auto der Körper B. Nun kommt der Antrieb doch nach allgemeiner Sprechweise und Erwartung irgendwie vom Motor. Der Motor ist aber Teil des Körpers B, auf den die Antriebskraft wirken soll. Dem Lernenden bleibt nichts weiter, als die Sätze auswendig zu lernen und, wenn erforderlich, nachzusprechen.

Die Sätze beantworten auch nicht eine Frage, die der naive Leser vielleicht haben könnte: Warum bleibt die Geschwindigkeit des Fahrzeugs konstant? Ist die Antwort zu schwierig? Oder ist sie trivial? Warum sind die beiden Kräfte gleich? Muss der Fahrer vielleicht mit dem Gaspedal genau die Stellung erwischen, bei der sich das Auto weder beschleunigt noch verzögert bewegt?

Fragen wir noch ein anderes Buch, was es dazu zu sagen hat. Hier wird das Thema angesprochen, nachdem die Reibung in allen ihren Einzelheiten diskutiert worden ist, mit Gleit-, Haft- und Rollreibung, mit den entsprechenden Kraftgesetzen und der molekularen Deutung. All das scheint man zu brauchen für das Verständnis des gleichmäßig dahinfahrenden Autos.

Auch wenn man nicht alles versteht, so lernt man hier auf jeden Fall: Die Sache ist außerordentlich kompliziert. Man muss, um die Bewegung des Autos zu verstehen zwischen 10 verschiedenen Kräften unterscheiden, nämlich Antriebskraft, Fahrtwiderstandskraft, Wechselwirkungskraft, Haftkraft, Gleitreibungskraft, Normalkraft, Rollreibungskraft, Luftwiderstandskraft,

## Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit

Hangabtriebskraft und Beschleunigungswiderstandskraft. Der wohlgesonnene Leser fragt sich allerdings auch hier, was mit der Antriebskraft gemeint ist. Im Text heißt es:

„Die Antriebskraft  $F_A$ , die vom Motor über das Getriebe auf die Räder übertragen wird, kann höchstens gleich der maximalen Haftkraft sein.“

Hier wird also klar gesagt: Die Antriebskraft kommt vom Motor. Versuchen wir zu verstehen. Nehmen wir an, die Kolben des Motors bewegen sich in senkrechter Richtung, also auf und ab. Das heiße Gas drückt auf die Kolben. Natürlich drückt es auch nach oben und nach den Seiten, aber das spielt wahrscheinlich keine Rolle, denn der Antrieb geschieht ja über den sich bewegenden Kolben. Also haben wir eine Kraft des Gases nach unten. Nun soll sich aber das Auto nicht nach unten, sondern nach vorn bewegen. Was nun? Es ist wirklich ein Problem, denn auch der Motor als Ganzes gesehen schafft es nicht, eine nach vorn wirkende Kraft zu erzeugen. Abgesehen von dem Problem, das wir schon vorher hatten: Der Motor ist doch Teil des Autos. Er soll also gar keine Kraft nach vorn ausüben, denn dann müsste er sich selbst ja dabei nach hinten bewegen.

Dumme Bemerkungen? Vielleicht. Könnte es aber vielleicht auch sein, dass sich der Autor im von ihm selbst angelegten Kräftegestrüpp verfangen und, aus Versehen, Kraft und Energie verwechselt hat? Denn mit der Energie wird der Satz richtig: Sie geht vom Motor über das Getriebe zu den Rädern, oder „wird übertragen“, wenn man es etwas gelehrter ausdrücken will.

### Herkunft

Mit Galileis Entdeckung des Trägheitssatzes, dem ganzen Werk von Newton, den Schriften von Descartes und Huygens begann ein Neustart der Naturwissenschaft, eine Fortsetzung von etwas, das vor etwa 2000 Jahren in Griechenland begonnen hatte, dann aber schon bald in einen viele Jahrhunderte dauernden Dämmerschlaf gefallen war. Seit Galilei und Newton wusste man nun: Kräfte verursachen Beschleunigungen. Diese Erkenntnis war großartig. Sie hatte allerdings auch eine negative Begleiterscheinung: Die Reibung, die ja rückblickend zu Aristoteles' eher unglücklichen Deutung der Bewegung von Körpern geführt hatte, erschien jetzt nur noch als Störung der Schönheit des neuen Lehrgebäudes. Die richtige Physik spielte sich, so sah man es jetzt, im reibungsfreien Raum ab. Der Pferdewagen damals oder das Auto und der ICE heute kämpfen, während sie fahren, nur gegen diese Störung an. Ordentliche Physik beobachtet man bestenfalls beim Anfahren.

So wurde das 2. Newton'sche Gesetz zum Allerheiligsten der Physik, auch wenn es im Lichte der danach

folgenden Entdeckungen und Einsichten nicht mehr ist als Ausdruck der Erhaltung einer physikalischen Größe, nämlich des Impulses. Nun ist der Impulssatz zwar ein wichtiges physikalisches Gesetz, aber doch nicht unbedingt wichtiger als die Gesetze über Erhaltung oder Nichterhaltung anderer extensiver Größen, wie Energie, elektrischer Ladung, Entropie oder Drehimpuls, die man in der Folge entdeckt hat.

Und noch eine Bemerkung zu den vielen Kräften: Inzwischen ist der Neuerer Newton auch schon über 300 Jahre alt, und seither ist einiges passiert. Die Kraftmetapher, so genial sie zu Newtons Zeit auch war, brauchen wir Gott sei Dank nicht mehr. Wenn man nämlich die Tatsache benutzt, dass Kräfte als Impulsströme gedeutet werden können, so entdeckt man, dass mehrere Kräfte aus unserer Liste einfach ein und derselbe Impulsstrom an verschiedenen Stellen oder mit verschiedenen orientierten Flächen gemessen sind.

### Entsorgung

Die Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit bei Anwesenheit von Reibung ist ein schönes Thema für die Schule – wichtig, nicht trivial, aber auch nicht zu schwierig. Sie ist ein einfaches Beispiel für das, was man in der Physik ein Fließgleichgewicht nennt: Der Wegstrom stellt sich so ein, dass er gleich dem Zustrom ist.

Das gilt für das Wasser, das in einen Behälter mit einem Loch fließt, Abb. 3.16.

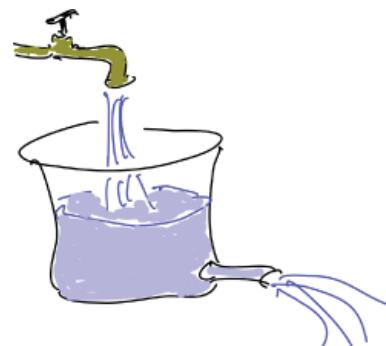


Abb. 3.16 Das Wasserniveau stellt sich so ein, dass genau so viel Wasser abfließt wie zufließt.

Der Behälter sei zunächst leer. Man öffnet den Wasserhahn und lässt das Wasser laufen. Der Wasserspiegel steigt; dadurch nimmt die Stromstärke des abfließenden Wassers zu. Sie nimmt solange zu, bis der Wegstrom gleich dem Zustrom geworden ist.

Dasselbe haben wir beim Auto. Der Motor sorgt dafür, dass aus der Erde ein Impulsstrom ins Auto fließt. Die Geschwindigkeit des Autos nimmt zu, dadurch nimmt die Stromstärke des (durch Reibung) wegflie-

ßenden Impulses zu. Sie nimmt solange zu, bis der Impulsabfluss gleich dem Zufluss ist.

Man kann das Analoge über einen Raum sagen, den man heizt. Zunächst nimmt die Temperatur zu. Darauf ... usw.

Auch die mittlere Temperatur der Erdoberfläche ist das Ergebnis des Einstellungsprozesses eines Fließgleichgewichts.

Man könnte einwenden, in den oben zitierten Lehrbuchpassagen sollte ja viel mehr gesagt werden als nur das Einstellen des Geschwindigkeitsgleichgewichts. Nehmen wir mal an, die Texte enthielten keine Fehler: Auch dann sind sie unpassend. Der Handlungsbedarf bei der Konzeption des Physikunterrichts besteht heute nicht so sehr darin, welche neuen Themen wir hineinbringen sollten. Bevor wir neue Themen aufnehmen, müssen darüber entscheiden, was wir dafür rauswerfen. Die zehn Kräfte beim Auto wären dafür gute Kandidaten.

dass man von jeder mengenartigen Größen sagen kann, ob sie erhalten ist oder nicht. (Eine Größe ist mengenartig, wenn es zu ihr eine Dichte und einen Strom gibt.) Manche mengenartigen Größen sind erhalten, wie die Energie, der Impuls und die elektrische Ladung, andere sind es nicht, etwa die Entropie. Die Erhaltung bzw. Nichterhaltung ist eine universelle Eigenschaft einer Größe. Sie ist nicht die Eigenschaft einer bestimmten Funktion, eines bestimmten Systems oder eines bestimmten Prozesses. Es hat auch keinen Sinn, von der Erhaltung oder Nichterhaltung einer nicht-mengenartigen Größe zu sprechen. So ist die Temperatur weder erhalten noch nichterhalten.

In der theoretischen Mechanik dagegen steht das Wort „Erhaltungsgröße“ synonym für „Konstante der Bewegung“, siehe unser erstes Zitat. Eine Bewegungskonstante ist eine manchmal recht unanschauliche, nicht unbedingt mengenartige Größe, deren Wert sich bei einem Bewegungsablauf nicht ändert. Ein Beispiel ist der Lenz-Runge-Vektor, der beim Kepler-Problem zeitunabhängig ist. Nach dem Sprachgebrauch der theoretischen Mechanik ist er eine Erhaltungsgröße des Keplerproblems. Nun ist aber der Lenz-Runge-Vektor keine mengenartige Größe, denn zu ihm gibt es keine Dichte und keinen Strom. Außerdem gilt seine Erhaltung nicht universell, sondern eben nur für das Keplerproblem.

Die Größen Energie, Impuls und Drehimpuls sind nach dem Sprachgebrauch der theoretischen Mechanik manchmal Erhaltungsgrößen und manchmal nicht, siehe unser 2. Zitat.

## Herkunft

Die theoretische Mechanik ist eine der elegantesten physikalischen Theorien. Auch als Grundlage weiterer Theorien spielt sie eine wichtige Rolle: Es bedarf nur weniger Modifikationen, um zur Quantentheorie zu gelangen. Diese Perfektheit mag der Grund dafür sein, dass sie recht unabhängig von anderen Bereichen der Physik vervollkommen wurde. Dabei hat sie natürlich, wie jede Spezialdisziplin, ihr eigenes Vokabular entwickelt. Unter anderem wird die Bezeichnung „Erhaltung“ in einem anderen Sinn gebraucht als sonst. Dass das nicht immer auffällt, liegt daran, dass sich die Bedeutungen in manchen Fällen decken. Dieser Gebrauch mag auch mit daran Schuld sein, dass in anderen Bereichen der Physik die Erhaltung einer Größe in einer etwas unglücklichen Art formuliert wird. Statt eine Erhaltungsgröße dadurch zu charakterisieren, dass man sagt, sie sei unzerstörbar und unerschaffbar, sagt man in Anlehnung an die theoretische Mechanik, der Wert der Größe sei in einem abgeschlossenen System konstant.

## 3.26 Bewegungskonstanten

### Gegenstand

In der theoretischen Mechanik spielen Bewegungsinvarianten eine wichtige Rolle: Größen, deren Werte beim Ablauf einer Bewegung konstant bleiben. Ein System mit  $n$  Freiheitsgraden hat  $2n-1$  solche Konstanten. Man nennt diese Größen oft Erhaltungsgrößen:

1 „Eine Funktion  $f(q, \dot{q}, t)$  heißt „Erhaltungsgröße“ oder „Konstante der Bewegung“ oder seltener auch „Bewegungsintegral“, wenn für alle Bahnen  $q_i(t)$ , die die Lagrange-Gleichungen erfüllen, gilt

$$\frac{d}{dt} f(q, \dot{q}, t)$$

sodass  $f(q, \dot{q}, t)$  während der Bewegung konstant bleibt.“ [1]

2 „Offenbar ist der Impuls eine Erhaltungsgröße, wenn seine zeitliche Ableitung verschwindet, wenn also die Kräfte  $K_1$  und  $K_2$  während des gesamten Bewegungsablaufs gleich groß und entgegengerichtet sind, wenn also  $K_1 + K_2 = 0$  gilt.“ [2]

### Mängel

In der theoretischen oder analytischen Mechanik hat die Bezeichnung „Erhaltungsgröße“ eine etwas andere Bedeutung als in anderen Bereichen der Physik.

Im Allgemeinen, d.h., wenn wir von der analytischen Mechanik absehen, benutzt man die Bezeichnungen Erhaltung bzw. Nichterhaltung, um eine physikalische Größe zu charakterisieren. Wir erinnern daran,

## Der Punkt in der Mechanik

### Entsorgung

Man unterscheide zwischen der Bezeichnung „Bewegungsintegral“ und „Erhaltungsgröße“, etwa wie es im Landau-Lifschitz [3] gemacht wird: „Unter Ihnen [den Bewegungsintegralen] sind einige, deren Konstanz eine tiefe Ursache hat, die mit den Grundeigenschaften von Zeit und Raum – ihrer Homogenität und Isotropie – zusammenhängen. Diese sogenannten Erhaltungsgrößen haben alle die wichtige Eigenschaft der Additivität gemeinsam.“

- [1] F. Kuypers, *Klassische Mechanik*, Physik-Verlag, Weinheim, 1983, S. 38
- [2] W. Macke, *Mechanik der Teilchen*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1962, S. 240
- [3] L. D. Landau und E. M. Lifschitz, *Theoretische Physik kurzgefaßt I*, Akademie-Verlag, Berlin, 1973, S. 17,

## 3.27 Der Punkt in der Mechanik

### Gegenstand

In der Punktmechanik benutzt man die Begriffe Massenpunkt, Ort, Bahnkurve, Kraftfeld ... Die Punktmechanik ist die Lieblingsmechanik der Physiker. Physikstudenten lernen sie in aller Ausführlichkeit, und auch in der Schulphysik ist oft von Massenpunkten die Rede.

### Mängel

- 1 Die Punktmechanik ist in der Physik so dominant, dass man es ganz natürlich findet, statt von einem Körper von einem Massenpunkt oder einer Punktmasse zu sprechen. Dazu passt die Vorstellung, es gebe Kraftfelder, und damit Kräfte, die sich von Punkt zu Punkt ändern.

Bei dieser Art der Naturbeschreibung verlieren wichtige Konzepte der Mechanik ihren Sinn oder werden problematisch, wie etwa der Druck oder die Dichten von Masse, elektrischer Ladung, Impuls und Energie. Dabei besteht gewöhnlich – und vor allem in der Schulphysik – gar keine Notwendigkeit, diese etwas singuläre theoretische Beschreibung zu benutzen.

- 2 Hinzu kommt der oft recht unbekümmerte Umgang mit den Bezeichnungen „Masse“ und „Punkt“. Wir wollen die Begriffe kurz klären. Die Masse ist eine physikalische Größe, die eine bestimmte Eigenschaft eines Körpers oder Teilchens misst: seine Trägheit und Schwere. Und der Punkt? Unter den zahlreichen Bedeutungen (im Wiktionary sind es 18) wäre die einzige, die in unserem Zusammenhang überhaupt infrage kommen könnte: „ein genau definierter Ort“.

Nun sind die beiden Bezeichnungen „Massenpunkt“ und „Punktmasse“ auf unterschiedliche Art nicht ganz stimmig.

Nach den allgemein üblichen Sprechgewohnheiten wäre ein Massenpunkt ein Punkt, der eine Masse hat, während die Punktmasse eine Masse wäre, die punktförmig ist. Beide Aussagen sind aber eigentlich sinnlos.

Zunächst zum Massenpunkt: Ein Gegenstand, ein Körper oder ein Teilchen hat eine Masse. Ein Punkt, d.h. ein geometrisches Objekt, kann grundsätzlich keine Masse haben. Das heißt nicht, dass seine Masse 0 kg beträgt. Vielmehr hat er gar nicht die Eigenschaft, die mit der Masse gemessen wird.

Und die Punktmasse? Ein Körper kann punktförmig, d.h. hier: hinreichend klein sein. Die Masse dagegen ist eine Variable im Sinn der Mathematik. Als solche kann sie weder punktförmig noch nicht-punktförmig sein.

Wie erklären die Lehrbücher die Begriffe, und wie begründen sie die Wahl der Bezeichnungen? Hier zwei Beispiele aus Hochschulbüchern.

In dem einen werden Massenpunkte definiert als „mit Masse behaftete Punkte“. (Schon das Wort „behaftet“ ist eines jener Wörter, die mich aufmerken lassen: Man benutzt es gewöhnlich, um etwas unklar auszudrücken, das man auch klar sagen könnte. In der Umgangssprache sagt man etwa, dass etwas „mit einem Makel behaftet“ sei.)

Unser zweites Buch macht es etwas besser: „Die sich bewegenden Gegenstände müssen idealisiert werden, .... Solchermaßen gekennzeichnete Gegenstände nennen wir Punktmassen.“ Es ist zwar nicht schön, einen Gegenstand „Masse“ zu nennen, aber immerhin wird erklärt, dass man dem Wort hier eine andere Bedeutung gibt: Masse ist hier also nicht der Name einer physikalischen Größe.

Solche konzeptuellen Ungenauigkeiten mögen in der physikalischen Forschung und im Ingenieurwesen ohne schädliche Folgen sein. In der Schule, und allgemein in der Lehre, ist begriffliche Sorgfalt aber keine Pedanterie, sondern eine Voraussetzung dafür, Klarheit in den Köpfen der Lernenden zu schaffen. Außerdem weiß jede Lehrerin und jeder Lehrer: Die Physik wird durch die Verwendung klarer Begriffe nicht schwieriger, sondern leichter.

- 3 Es sollte einem auch die Tatsache zu denken geben, dass man nie von Impulspunkten, Entropiepunkten oder Energiepunkten spricht. Meint man etwa mit der Masse doch mehr als nur eine Variable, die eine Eigenschaft eines Körpers oder Teilchens beschreibt? Mit der elektrischen Ladung verfährt man allerdings

## Haftriebung

tatsächlich wie mit der Masse. Es gibt bei den Physikern nicht nur Punktmassen, sondern auch Punktladungen – mit denselben schädlichen Nebenwirkungen: In den Köpfen der Studenten wird das Elektron zur Punktladung. Auch hier die unselige Verwechslung von physikalischem System (Elektron) und physikalischer Größe (elektrische Ladung), oder kurz: von Ding und Maß.

### Herkunft

- Zur dominanten Rolle der Punktmechanik in der Physik: Ihre Erfolge in der Astronomie und ihre wichtige Rolle in der Teilchenphysik.
- Was die unsaubere Bezeichnung betrifft: Das Wort Masse wird missverstanden als synonym zum Wort Materie.
- Zur Punktmasse in der Schulphysik: Die Ausbildung der Lehrerinnen und Lehrer: ein Semester Punktmechanik in der Experimentalphysik, ein Semester Punktmechanik in der Theorie-Vorlesung, null Semester Kontinuumsmechanik.

### Entsorgung

- Man vermeide, vor allem in der Schule, die Bezeichnungen Massenpunkt, Punktmasse und Punktladung. Wenn einem die Punktformigkeit sehr am Herzen liegt, mag man von punktförmigen Körpern sprechen. Konsequenter wäre es, von kleinen Körpern zu sprechen. Oder wenn man annehmen kann, dass es richtig verstanden wird, auch einfach von Teilchen.
- Es gibt kaum einen Grund, die Punktmechanik in der Schule einzuführen. Die Kontinuumsmechanik ist den Problemen der Alltagsphysik besser angemessen. Einige der Probleme, die man in der Punktmechanik mit dem Kraftbegriff hat, werden dann verschwinden.

## 3.28 Haftriebung

### Gegenstand

Wenn in der Mechanik die Reibung eingeführt wird, unterscheidet man Haft-, Gleit- und Rollreibung.

In einem schon etwas älteren Nachschlagewerk habe ich unter dem Stichwort Reibungskraft gefunden: „**Außer dem Widerstand des umgebenden Mediums** tritt bei Bewegungen die Reibung als energiezehrender Widerstand auf. [...]

Man unterscheidet folgende Reibungsarten:

- Gleitreibung: Sie wirkt bei einer Bewegung [...]

- Haftriebung: Sie wirkt bei ruhendem Körper [...]
- Rollreibung: Sie tritt auf, wenn der Körper auf der Unterlage rollt [...]“

Auch wenn die Klassifizierung nicht so deutlich herausgestellt wird wie hier, so werden doch auch in vielen anderen Lehrbüchern im Mechanikteil die drei Reibungsarten genannt. Manchmal werden auch die entsprechenden Kräfte mit Namen versehen: Gleitreibungskraft, Haftriebungskraft und Rollreibungskraft.

### Mängel

Wahrscheinlich verspürt jeder bei diesem Thema ein gewisses Unbehagen. Man kann sich auch kaum vorstellen, dass es dem Autor unseres Zitats nicht aufgefallen ist, dass die Haftriebung gar nicht zu den Erscheinungen zählt, die er als Reibung definiert: nämlich als energiezehrenden (in anderen Worten: dissipativen oder irreversiblen) Prozess. Irgendetwas stimmt hier also nicht.

Man könnte versuchen, Remedium zu schaffen, indem man die Reibung nicht als „energiezehrenden“ Prozess bezeichnet. Nun ist aber die Dissipation wohl derjenige Aspekt der Reibung, auf den man bei einer Definition am wenigsten verzichten möchte. Dass die drei Erscheinungen nicht so recht für eine Klasseneinteilung geeignet sind, sieht man auch so:

Es wird suggeriert: Reibung sei entweder Haft- oder Gleit- oder Rollreibung. Aber was wird hier eigentlich klassifiziert? Drei verschiedenartige Systeme, bei denen je ein anderer Reibungstyp auftritt? Oder drei Zustandsbereiche eines einzigen Systems? Weder das eine noch das andere, sondern mal so und mal so. Haft- und Gleitreibung gehören zu ein und demselben System, etwa dem Klotz auf der Unterlage. Gleit- und Rollreibung dagegen gehören zu verschiedenen Systemen, dem Klotz, der gleitet bzw. dem Rad, das rollt.

### Herkunft

Klasseneinteilungen sind ein wichtiges Mittel, gedankliche Ordnung in die Vielfalt der Phänomene zu bringen. Jeder kennt die „drei Wirkungen des elektrischen Stroms“, die „drei Möglichkeiten des Wärmetransports“, die „vier fundamentalen Wechselwirkungen“ und anderes. Die Versuchung, auf diese Art eine Ordnung zu erlangen, ist aber manchmal so groß, dass man sich zu Abstrichen an der gedanklichen Klarheit verleiten lässt.

### Entsorgung

Die Unstimmigkeit ist wohl vielen bewusst. Wahrscheinlich, damit der Bruch mit der alten Gewohnheit nicht zu krass ist, wird etwa in [1] im Zusammenhang

## Kraftübertragung, Drehmomentübertragung und Leistungsübertragung

mit dem Haften das Wort Reibung in Anführungszeichen gesetzt. Wir würden empfehlen, das Wort Reibung in diesem Zusammenhang gar nicht erst zu benutzen.

Wenn man Reibungsvorgänge klassifizieren will, so bietet sich ein anderes Verfahren an [2]. Bei jedem Reibungsvorgang, an dem zwei Körper beteiligt sind, bewegt sich der eine relativ zum anderen, und die Körper üben Kräfte aufeinander aus.

Ist  $F$  der Betrag dieser Kräfte, und  $\Delta v$  die Geschwindigkeitsdifferenz, so ist die pro Zeit dissipierte Energie:

$$P = \Delta v \cdot F.$$

Diese Gleichung ist das mechanische Analogon von

$$P = U \cdot I.$$

Angewendet auf einen elektrischen Widerstand sagt uns die letztere Gleichung, wie viel Energie im Widerstand dissipiert wird. So wie man den elektrischen „Reibungsvorgang“ durch eine  $I-U$ -Kennlinie charakterisiert, so charakterisiert man auch den mechanischen Reibungsvorgang oder den mechanischen Widerstand am besten durch die  $F-\Delta v$ -Kennlinie. Und man klassifiziert die Reibungsvorgänge danach, wie die Kennlinie aussieht.

1. Im einfachsten Fall ist der Zusammenhang linear, Abb. 3.17. Diesem Vorgang entspricht in der Elektrizitätslehre das Ohm'sche Gesetz. Er liegt vor, wenn sich zwischen den beiden Körpern ein viskoses Medium, ein Schmiermittel zum Beispiel, befindet. Ein schönes Beispiel ist der Stoßdämpfer beim Auto oder der Türdämpfer. Ein Stoßdämpfer ist übrigens gut für Schulexperimente geeignet.

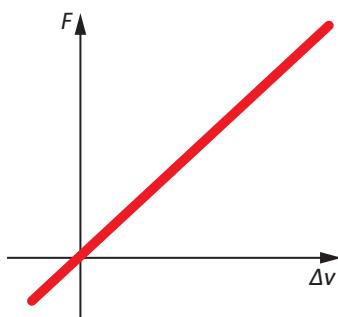


Abb. 3.17 Viskose Reibung wie beim Stoßdämpfer

2. Wenn das Medium eine turbulente Bewegung macht, ändert sich  $F$  quadratisch mit  $\Delta v$ , Abb. 3.18. Ein Beispiel ist die Luftreibung eines schnell fahrenden Fahrzeuges.

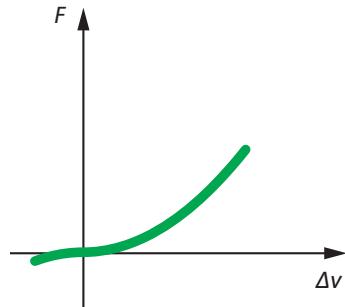


Abb. 3.18 Turbulente Reibung, wie die Luftreibung eines Autos

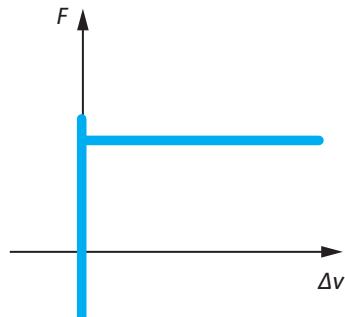


Abb. 3.19 Haft- und Gleitreibung

3. Haft- und Gleitreibung gehören bei dieser Einteilung zu ein und derselben Kennlinie, Abb. 3.19. Allerdings hat diese eine Singularität. Zum Wert  $\Delta v = 0$  gehört nicht ein eindeutiger Wert der Kraft, sondern die Kraft kann alle Werte von  $-F_H$  bis  $+F_H$  annehmen. Als Anwendung wird man nicht nur das Haften und Rutschen eines Autos diskutieren, sondern vor allem auch Bremse und Kupplung.

Bei allen drei Klassen handelt es sich um echte Reibungsvorgänge, denn bei allen wird Energie dissipiert, d. h. Entropie erzeugt.

[1] Dorn-Bader, *Physik*, Sek II, Schroedel, 2000, S. 39

[2] Gerthsen-Kneser-Vogel, *Physik*, Springer, 1977, S. 30

## 3.29 Kraftübertragung, Drehmomentübertragung und Leistungsübertragung

### Gegenstand

Wikipedia zum Stichwort Kraftübertragung: „Die Kraftübertragung beschreibt die technische Möglichkeit, eine Kraft oder ein Moment vom Ort der Entstehung zum Ort der Nutzung zu übertragen.“

## Potenzielle Energie

Aus dem Angebot eines Kupplungsherstellers: „**Kupplungen für Drehmomentübertragung**“

Aus dem Angebot eines Herstellers optischer Bauteile: „**Fasern zur Leistungsübertragung**“

Ein Schulbuch: „Für ein Kraftfahrzeug berechnet man aus seiner Leistung  $P$  und der in eine Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  umgerechneten Drehzahl des Motors das Drehmoment  $M = P/\omega$  des Motors. Durch das Getriebe ... erhält man das Drehmoment des Antriebsrades ... und daraus die Antriebskraft des Rades ...“

### Mängel

Bei allen drei Größen Kraft, Drehmoment und Leistung handelt es sich um Stromstärken: Die Kraft ist die Stromstärke des Impulses, das Drehmoment die des Drehimpulses und die Leistung die der Energie. Wie bei anderen Stromstärken beziehen sich die Werte dieser Größen auf eine durchströmte Fläche. Sie bringen zum Ausdruck, wie viel von der entsprechenden Größe von einer Stelle zu einer anderen gelangt, wie viel fließt oder strömt, wie viel transportiert oder übertragen wird – man kann es ausdrücken wie man will.

Wir betrachten zunächst die drei ersten Zitate. Sie stammen aus dem Internet. Google liefert zu den Suchbegriffen „Kraftübertragung“, „Drehmomentübertragung“ und „Leistungsübertragung“ zahlreiche Treffer, auf seriösen Websites, meist aus dem Bereich der Technik. Ähnlich benutzt werden auch die Bezeichnungen „Kraftfluss“, „Drehmomentfluss“ und „Leistungsfluss“. Es handelt sich offenbar um etablierte Technikersprache. Die Aussagen sind klar, und doch sind sie nicht in Ordnung. Denn übertragen wird nicht die Kraft, sondern der Impuls, und nicht das Drehmoment, sondern der Drehimpuls und nicht die Leistung sondern die Energie. So wie in einer Wasserleitung nicht die Wasserdurchflussstärke übertragen wird oder fließt, sondern das Wasser. Man könnte die Ingenieure und Techniker auf diese sprachliche Unsauberkeit hinweisen. Eines muss man ihnen aber lassen: Es wird gesagt, dass etwas fließt.

Wir kommen zu dem vierten, dem Schulbuchzitat, das typisch ist für den Umgang von Physikbüchern mit den drei Größen Kraft, Drehmoment und Leistung. Alle drei Begriffe werden hier nicht einem Transport zugeordnet, sondern einem Körper oder Objekt: die Leistung dem Kraftfahrzeug, das Drehmoment dem Motor, die Antriebskraft dem Rad. Dass diese Sprechweise ungeschickt ist, sieht man, wenn man sie auf einen Strom überträgt, zu dem die Physik ein weniger gestörtes Verhältnis hat: auf den elektrischen Strom. Es heißt nicht: der elektrische Strom „des Dynamos“ oder „des Motors“, sondern der elektrische Strom „in der Leitung“; „durch den Dynamo oder Motor“ geht auch.

Aber ist das wirklich so schlimm? Weiß man denn nicht, was gemeint ist? Eine schiefe Sprache erzeugt schiefe Bilder. Man weiß eben nicht, was gemeint ist. Oder man meint vielleicht gar nicht, was gemeint werden müsste: dass, wenn ein Rad eine Antriebskraft „hat“, Impuls von der Erde ins Rad fließt; dass, wenn eine Turbine einen Generator antreibt, Drehimpuls durch die Turbinenwelle zum Generator fließt; dass es sich also jedes Mal um einen Transportvorgang handelt.

### Herkunft

Wieder unser altes Gebrechen: die Fernwirkungsvorstellungen [1]. Kräfte werden Körpern zugeordnet, wie Newton es tat, weil es damals nicht anders ging. Entsprechend wird mit dem Drehmoment verfahren. Dass auch im sprachlichen Umgang mit der Energie die Fernwirkung immer wieder durchblitzt, ist besonders bedauerlich, denn in vielen Bereichen der Naturwissenschaft und Technik ist man hier längst weiter als in der Physik. Die Ingenieure könnten mit einer solchen Auffassung ihr Handwerk schlecht betreiben. Für sie ist selbstverständlich, dass etwas fließt, auch wenn sie es nicht ganz richtig benennen. Nur die Physiker scheinen bei ihren mechanischen Trockenübungen noch mit der Sprache des 17. Jahrhunderts zurechtzukommen.

### Entsorgung

Von der Erde in das (Antriebs-)Rad fließt Impuls; durch die Kardanwelle, die Motor- oder Turbinenwelle und die Antriebswelle fließt Drehimpuls; durch die Lichtfaser (und durch viele andere Transportvorrichtungen, wie z. B. auch die schon genannten Wellen) fließt Energie.

[1] F. Herrmann, *Fernwirkungen*, Altlästen der Physik

## 3.30 Potenzielle Energie

### Gegenstand

Aus Wikipedia: „Die potenzielle Energie (auch Höhen- oder Lageenergie) ist eine der Formen der Energie in der Physik. Es handelt sich dabei um diejenige Energie, welche einem Körper durch seine Position oder Lage in einem konservativen Kraftfeld (etwa einem Gravitationsfeld oder elektrischen Feld) innewohnt.“

Aus einem Schulbuch: „Beispiel  
Potenzielle Energie eines Satelliten ...“

### Mängel

Die Zitate zeigen, dass man die potenzielle Energie gern einem Körper zuordnet.

## Der Drehimpulserhaltungssatz

Wenn man der Auffassung ist, dass sich die Energie lokalisieren lässt – und das ist die Überzeugung in der Physik seit dem Ende des 19. Jahrhunderts –, dann wird man die Sätze so lesen: Die Körper enthalten die potenzielle Energie. Das bedeutet auch, dass die potenzielle Energie im Körper auf eine bestimmte eindeutige Art verteilt ist. Diese Aussagen wären aber nicht korrekt. Die potenzielle Energie ist nicht in den Körpern enthalten, sondern in dem Feld, das sich im Wesentlichen zwischen den Körpern befindet.

Dass etwas nicht ganz stimmen kann, sieht man an dem Zitat mit dem Satelliten. Wenn man die ganze potenzielle Energie dem Satelliten zuordnet, so müsste man wohl beim System Erde-Mond die ganze potenzielle Energie im Mond unterbringen, und wenn man schließlich beide Partner gleich groß macht, wie es bei manchen Doppelsternsystemen der Fall ist, so würde die Energie in nur einem der Partner stecken – was aber schon aus Symmetriegründen nicht sein kann.

Gelegentlich spricht man von potenzieller Energie auch dann, wenn der Impulsaustausch zwischen zwei Körpern A und B nicht über ein Feld, sondern über eine Feder C geschieht. Dann ordnet man die potenzielle Energie allerdings nicht mehr A oder B zu, sondern der Feder, also dem dritten Partner C –, und das ist auch korrekt. Nicht mehr ganz stimmig ist dann allerdings der Name. „Potenziell“ bedeutet, etwa nach dem Duden: möglich (im Gegensatz zu wirklich), denkbar; der Anlage, Möglichkeit nach [vorhanden]; vielleicht zukünftig. Das passt aber gar nicht zu der in einer gespannten Feder gespeicherten Energie. Wie die kinetische Energie in einem bewegten Körper enthalten ist, so ist auch die Energie, die man durch Spannen in eine Feder gesteckt hat, in der Feder enthalten. Für beide Energieanteile kann man eine Dichteverteilung angeben (man kann sie „lokalisieren“), und man kann beide, im Prinzip wenigstens, durch die relativistische Massenzunahme messen.

### Herkunft

Die Sprechweise scheint mehrere Ursachen zu haben.

- Die Begriffsbildung und die zugehörige Sprache stammen aus einer Zeit, als man die Energie noch nicht lokalisieren konnte (vor etwa 1890).
- Man entwickelt den Begriff potenzielle Energie gewöhnlich am Beispiel eines kleinen Körpers auf der Erde und berechnet sie über die Formel  $E = m \cdot g \cdot h$ . Hier wird unter  $h$  die Höhe des Körpers über einer Bezugshöhe verstanden, wobei der Höhennullpunkt fest mit der Erde verbunden ist.  $h$  erscheint nicht als Abstand zwischen zwei Körpern, nämlich dem betrachteten kleinen Körper und der Erde.  $h$

erscheint auch nicht als Höhe der Erde über dem Körper, sondern als Höhe des Körpers über der Erde.

- Zum Umfeld, in dem der Begriff benutzt wird, gehören Bahnen von Körpern mit Gravitationsfeld, bei denen der eine Körper eine sehr viel größere Masse hat als der andere. Betrachten wir den berühmten fallenden Apfel und beginnen mit der Impulsbilanz: Daran beteiligt sind nur die beiden Körper Erde und Apfel; was der fallende Apfel an Impuls gewinnt, verliert die Erde. Das Feld hat fast keinen Impuls und kann zur Impulsbilanz nichts beitragen. Anders steht es mit der Energie. Die kinetische Energie der Erde ändert sich im Schwerpunktsystem praktisch nicht (weil die Masse der Erde so viel größer ist, als die des Apfels). Die Energie, die der Apfel aufnimmt, kommt nicht aus der Erde, sondern fast vollständig aus dem Gravitationsfeld.

Es ist genau so, wie wenn man zwei Körper sehr verschiedener Masse statt durch ein Feld über eine Feder miteinander verbindet. Auch hier wird der Impuls fast ausschließlich zwischen den beiden Körpern ausgetauscht, die Energie aber zwischen dem leichten Körper und der Feder.

### Entsorgung

Kleine Lösung: Man vermeidet Formulierungen, die die potenzielle Energie einem Körper zuordnen, etwa wie es in einem anderen Schulbuch formuliert ist: „Die Lageenergie oder potenzielle Energie des Systems Erde-Körper der Masse  $m$  in Bezug auf ein frei wählbares Bezugsniveau beträgt ...“

Diese Sprechweise ist besser als die unserer Zitate, stützt allerdings immer noch eine Fernwirkungsauffassung, denn das System wird bezeichnet als System Erde-Körper. Das Feld wird als Teilsystem nicht erwähnt.

Große Lösung: Man führt von vornherein das Feld als dritten Partner ein und sagt, wo die Energie lokalisiert ist, nämlich in eben diesem Feld.

Die Energie, die man beim Spannen in eine Feder steckt, sollte man nicht als potenzielle Energie bezeichnen.

## 3.31 Der Drehimpulserhaltungssatz

### Gegenstand

Der Satz von der Erhaltung des Drehimpulses wird oft folgendermaßen eingeführt:

Man betrachtet einen Massenpunkt. Man multipliziert das zweite Newton'sche Gesetz

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

vektoriell mit dem Radiusvektor  $\vec{r}$  (der den Ort des Massenpunktes in Bezug auf den willkürlich gewählten Ursprung festlegt). Man erhält eine Beziehung zwischen Drehmoment und Änderung des Drehimpulses:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}.$$

Man berechnet den entsprechenden Ausdruck für zwei (oder mehrere) Massenpunkte und berücksichtigt, dass für die inneren Kräfte

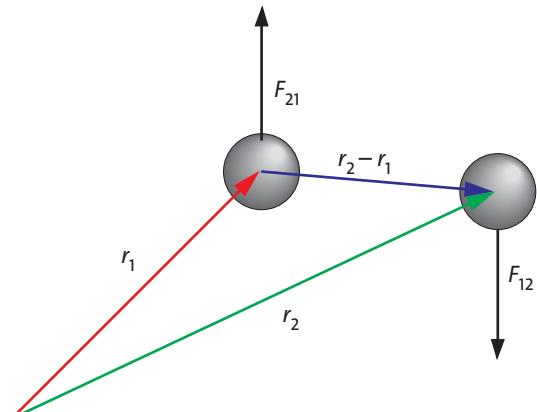
$$\vec{F}_{ik} = -\vec{F}_{ki}$$

gilt, und dass diese Kräfte mit dem Vektor  $\vec{r}_i - \vec{r}_k$  den Winkel null einschließen. Man findet, dass die zeitliche Änderung des Drehimpulses des Systems von Massenpunkten gleich der Resultierenden der Drehmomente aller äußeren Kräfte ist. Daraus folgt der Drehimpulserhaltungssatz: „Der Drehimpuls ist zeitlich konstant, wenn keine äußeren Drehmomente angreifen.“

### Mängel

Wir haben die Herleitung des Drehimpulserhaltungssatzes hier etwas verkürzt dargestellt, denn wir nehmen an, dass sie der Leser kennt. In einem Lehrbuch kann sie gut eine Seite Text mit 10 Gleichungszeilen einnehmen. Eine solche Herleitung lässt sich leicht nachvollziehen, wenn man ihr Schritt für Schritt folgt. Wahrscheinlich wird man am Ende auch überzeugt sein, dass der Drehimpulserhaltungssatz gilt. Wenn man sich aber fragt, was auf dieser Lehrbuchseite eigentlich bewiesen worden ist, so hat man ein Problem. Es wird ausgegangen vom zweiten Newton'schen Gesetz, und das heißt vom Impulssatz, und man kommt an beim Drehimpulssatz. Es ist daher gar nicht zu vermeiden, dass der Eindruck entsteht, der Drehimpulssatz sei mathematisch aus dem Impulssatz hergeleitet worden. Das trifft natürlich nicht zu. Kaum ein Student wird aber verstehen, wie der Zaubertrick funktioniert, ja er wird wahrscheinlich gar nicht vermuten, dass ein solcher angewendet worden ist. Tatsächlich wird hier der Drehimpulssatz nicht aus dem Impulssatz hergeleitet, sondern er wird in die Rechnung hineingesteckt, nämlich wenn man sagt, dass die Kraft  $\vec{F}_{ik}$  mit  $\vec{r}_i - \vec{r}_k$  den Winkel null einschließt.

Abb. 3.20 zeigt etwas, was es in Wirklichkeit nicht gibt. Die Körper üben Kräfte aufeinander aus, die entgegengesetzt gleich sind ( $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ ), mit dem Vektor  $\vec{r}_2 - \vec{r}_1$  aber



**Abb. 3.20** Die Kräfte auf die beiden Körper sind nicht parallel zur Verbindungsgeraden, der Drehimpulssatz ist verletzt.

nicht den Winkel null einschließen. Das erste Newton'sche Gesetz, und damit der Impulssatz, wird befolgt, aber aufgrund des Kräftepaars würde der Drehimpuls des Systems zunehmen, und zwar ohne dass ein äußeres Drehmoment wirkt. Solche Kräfte, die nicht parallel zur Verbindungsgeraden der Schwerpunkte sind, gibt es aber nicht, der Drehimpulserhaltungssatz verbietet es. Die Aussage, dass die Kräfte  $\vec{F}_{ik}$  und  $\vec{F}_{ki}$  mit dem Vektor  $\vec{r}_i - \vec{r}_k$  den Winkel null einschließen, ist also zum Drehimpulssatz äquivalent.

Zurück zum Gegenstand: Es wird einem eine längere Rechnung vorgeführt, irgendwo wird unauffällig der Drehimpulssatz hineingesteckt, und am Ende wird gefeiert, dass der Drehimpulssatz herausgekommen ist. Wozu aber überhaupt die Rechnung?

### Herkunft

Die Newton'schen Gesetze beinhalten nicht mehr und nicht weniger als die Erhaltung des Impulses. Bedingt durch ihre großen Erfolge, hat sich aber die Vorstellung breitgemacht, sie seien mehr als ein einfacher Erhaltungssatz, ja sie seien geradezu das Ein und Alles der Physik, die Grundlage, aus der alles andere irgendwie zu folgen hätte. Manchmal wird ja aus dem zweiten Newton'schen Gesetz sogar der Energiesatz hergeleitet, wieder mit einem kleinen Trick – aber das wäre ein Thema für eine andere Altlast.

### Entsorgung

Man führt den Drehimpuls als eigene Größe ein, für die ein Erhaltungssatz gilt. Das schließt nicht aus, dass man zeigt, wie der Drehimpuls eines Systems von Massenpunkten mit den Impulsen der Teile des Systems zusammenhängt.

## Der Staudruck

### 3.32 Der Staudruck

#### Gegenstand

Für eine stationäre, inkompressible, reibungsfreie Flüssigkeit gilt die Bernoulli'sche Gleichung:

$$p + \rho \cdot g \cdot h + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = \text{const}$$

Hier ist  $p$  der Druck,  $\rho$  die Dichte,  $g$  der Ortsfaktor,  $h$  die Höhe (nach oben positiv) und  $v$  die Geschwindigkeit.

Mit „const“ ist gemeint, dass sich die Summe der linken Seite der Gleichung nicht ändert, wenn man sich innerhalb der Strömung in Strömungsrichtung einen Stromfaden entlang bewegt. Falls sich die Werte der lokalen Größen über einen Querschnitt durch die Strömung nicht ändern, kann man die Einschränkung mit dem Stromfaden auch weglassen. „const“ bedeutet dann: „hat denselben Wert an jedem Querschnitt.“

Die Gleichung wird gewöhnlich folgendermaßen interpretiert. Es gibt mehrere Arten von Drücken: den statischen Druck  $p$ , den Schweredruck  $\rho \cdot g \cdot h$  und den dynamischen Druck oder Staudruck  $(\rho/2) \cdot v^2$ . Die Bernoulli'sche Gleichung sagt uns, dass die Summe aus diesen drei Drücken (unter den genannten Bedingungen) konstant ist.

#### Mängel

Qualitativ und in Worte gefasst lautet die Aussage der Bernoulligleichung:

- Dort wo die Flüssigkeit schnell fließt, ist der Druck kleiner als dort, wo sie langsam fließt.
- Der Druck nimmt nach unten hin zu.

In dieser Aussage gibt es nur einen Druck, und das ist die Größe  $p$  in der Bernoulligleichung. Die Terme  $\rho \cdot g \cdot h$  und  $(\rho/2) \cdot v^2$  haben zwar beide die Dimension eines Druckes, sind aber nicht das, was man unter einem Druck versteht. Summanden in einer Summe stellen durchaus nicht immer dieselbe physikalische Größe dar. Dass  $\rho \cdot g \cdot h$  nicht der Schweredruck sein kann, sieht man auch am Vorzeichen. Der Schweredruck nimmt bekanntlich nach unten hin zu, der Term  $\rho \cdot g \cdot h$  dagegen wächst mit zunehmendem  $h$ .

#### Herkunft

Es gab wahrscheinlich keine historische Situation, in der diese Deutung der Bernoulligleichung gerechtfertigt war. Vermutlich beruht die hier inkriminierte Interpretation auf dem Wunsch oder Versuch, den Druck als eine Größe vorzustellen, für die eine Art Erhaltungssatz gilt. Tatsächlich erinnert die Aussage: „Der Gesamtdruck in ... ist konstant“ an eine bestimmte

Formulierung von Erhaltungssätzen: „In einem abgeschlossenen System ist die elektrische Ladung (oder die Energie, der Impuls, der Drehimpuls) konstant.“ Solche Sätze sind sehr elegant, denn sie sind einerseits leicht zu formulieren und haben andererseits eine sehr umfassende Gültigkeit. Auch der Druck könnte also, dank Bernoulli, in den erlauchten Kreis der Erhaltungsgrößen aufgenommen werden. Was einen zu einer solchen Sicht noch besonders ermuntern könnte, ist, dass man die Bernoulligleichung aus dem Energieerhaltungssatz ableiten kann.

Wir glauben, dass hier mit dem Druck doch etwas Schindluder getrieben wird. Zur Erhaltungsgröße kann man ihn auf keinen Fall machen, denn eine notwendige Bedingung dafür, dass man überhaupt über die Erhaltung oder auch die Nichterhaltung einer Größe sprechen kann, ist, dass die Größe extensiv ist – und das ist der Druck nun mal nicht.

Man könnte einwenden, dass uns doch schließlich niemand verbieten kann, den Term  $(\rho/2) \cdot v^2$  „dynamischen Druck“ zu nennen, denn eine Namensgebung kann prinzipiell weder falsch noch richtig sein. Nun ja, im Prinzip schon. Immerhin kann die Wahl eines Namens aber mehr oder weniger zweckmäßig sein. Und ich glaube, die zitierten Terme „Druck“ zu nennen, würde eine ungeschickte Namensgebung darstellen. Der Druck ist eine der Anschauung leicht zugängliche Größe.  $(\rho/2) \cdot v^2$  als Druck zu bezeichnen würde nur dazu führen, dass der Lernende den Eindruck erhält, der Druck sei im Grunde doch eine unanschauliche Größe. Die Beweihräucherung durch das Adjektiv „dynamisch“ hilft dabei noch etwas nach.

#### Entsorgung

Man lese die Bernoulligleichung so: Der Druck nimmt ab, erstens, wenn die Geschwindigkeit zunimmt, und zweitens, wenn die Höhe zunimmt. Beide Aussagen sind einleuchtend.

### 3.33 Warum das Flugzeug fliegt

#### Gegenstand

Warum ein Flugzeug fliegt, wird nicht nur in Fachbüchern über Strömungsmechanik erörtert. Es wird auch in Physikbüchern für Schule und Hochschule und in populärwissenschaftlichen Büchern beschrieben. Dabei findet man eine ganze Reihe verschiedener Erklärungen. In einigen Büchern die eine, in anderen die andere, in wieder anderen gleich mehrere. Die häufigsten sind:

## Warum das Flugzeug fliegt

- Die Strömungsgeschwindigkeit an der Oberseite des Tragflügels ist größer als an der Unterseite. Nach der Bernoulligleichung herrscht damit oben ein geringerer Druck als unten.
- Luftteilchen werden am Tragflügel reflektiert. An der Unterseite ist der Impulsübertrag größer als an der Oberseite.
- Um den Tragflügel bildet sich eine Zirkulationsströmung. Diese führt zu einer Kraftkomponente nach oben.

Bei den erwähnten Erklärungen handelt es sich nicht um verschiedene Mechanismen, sondern um unterschiedliche Betrachtungsweisen ein und desselben Vorgangs.

### Mängel

- 1 Die Erklärungen sind oft nicht verständlich. Manche Texte erschlagen den Leser mit Einzelheiten und Fachausdrücken: Grenzschichtablösung, Formwiderstand, Reynoldszahl, Anstellwinkel, Auftriebsbeiwert, Zirkulation, Anfahrwirbel, Zähigkeit, Stokes'sches Gesetz, Newton'sche und Stokes'sche Reibung, Bernoulli'sche Gleichung, turbulente Strömung.
- 2 Andere Texte suggerieren, es handle sich bei den oben erwähnten Vorgängen um mehrere voneinander unabhängige Beiträge zum Auftrieb. Ich habe ein Buch gefunden, in dem gesagt wird, dass die Moleküle von unten Impuls übertragen, und dass zusätzlich oben ein Unterdruck entsteht.
- 3 Das wichtigste Problem aber, das wir hier diskutieren wollen, ist: Wenn ein Schüler fragt, warum ein Flugzeug fliegt, – mit was für einer Antwort wird er wohl zufrieden sein? Wir meinen, keine der oben angeführten Erklärungen stellt eine solche Antwort dar. Zur Verdeutlichung betrachten wir eine andere Situation, die aber mit dem fliegenden Flugzeug etwas gemeinsam hat. Statt „Warum fällt das Flugzeug nicht auf die Erde?“ fragen wir: „Warum fällt die Vase, die vor uns auf dem Tisch steht, nicht auf die Erde?“

Ein hypothetischer Physiker, der für die Erklärung des fliegenden Flugzeugs die Bernoulligleichung heranzieht, würde hier konsequenterweise etwa das Folgende antworten: „Der Untersetzer, auf dem die Vase steht, ist elastisch. Er verhält sich wie eine gespannte Feder und übt auf die Unterseite der Vase eine Kraft aus.“ Die Aussage ist zwar nicht falsch, aber wahrscheinlich interessiert es den Frager gar nicht, wer warum auf die Unterseite der Vase eine Kraft ausübt. Ähnlich ist es beim Flugzeug. Wenn man weiß, wie es die Luft anstellt, die

Tragflügel nach oben zu drücken, hat man wahrscheinlich nicht das Gefühl, den Grund für das Fliegen verstanden zu haben.

Derjenige hypothetische Physiker, der für die Erklärung des fliegenden Flugzeugs die stoßenden Moleküle braucht, könnte bei der Vasenfrage antworten: „Die Vase fällt nicht auf die Erde, weil es zwischen den Molekülen des Untersetzers und den Molekülen der Vase eine abstoßende quantenmechanische Wechselwirkung gibt.“ Auch mit dieser Antwort würde der Frager nicht sehr glücklich. Und auch beim Flugzeug bringt die Antwort mit dem Impulsübertrag der Luftmoleküle nicht die erwünschte Einsicht. Muss man denn die Atomphysik bemühen, um das Fliegen zu verstehen?

Die hypothetischen Physiker hatten offenbar die Frage nicht so recht zur Kenntnis genommen. Sie haben die ursprüngliche Frage sofort übersetzt in eine andere, die ihnen zu zeigen gestattet, was sie alles wissen. Sie haben daraus ein Anwendungsbeispiel des Kräfteadditionsprinzips bzw. der Atomphysik gemacht. Zu beanstanden ist an ihren Antworten, dass sie keinerlei Aussage darüber machen, welche Rolle die Tischplatte und die Tischbeine spielen. Wie oft versuchen wir Lehrer doch, unseren Schülern eine andere Frage unterzuschieben als die, die sie gestellt hatten: eine Frage, auf die wir eine schnelle Antwort haben, oder eine Frage, die es uns gestattet, unsere Überlegenheit zu demonstrieren.

Bevor wir zum Flugzeug zurückkommen: Warum fällt eigentlich ein Hubschrauber nicht auf die Erde? Auf diese Frage pflegt die Physik eine Antwort ganz anderer Art zu geben. Sie sagt dazu nicht viel mehr, als auch jeder physikalische Laie sagen würde. Die Erklärung dieses Laien wäre wohl einfach: Der Hubschrauber fliegt, weil er Luft nach unten pustet. Die Physik ergänzt diese Aussage: Die Luft muss nach unten geblasen werden, weil der Hubschrauber über das Gravitationsfeld ständig Impuls bekommt (Richtung des Impulsvektors nach unten), und dieser Impuls darf sich nicht ansammeln, der Hubschrauber muss ihn loswerden. Die einzige Möglichkeit, die er dazu hat, ist, den Impuls an die Luft weiterzugeben.

Beim Flugzeug ist es nicht anders. Es muss Impuls loswerden, und den kann es nur an die Luft abgeben. Es muss Luft nach unten hin in Bewegung setzen. Genau das machen die Tragflächen, wenn sich das Flugzeug nach vorn bewegt.

Der Grund dafür, dass ein Flugzeug fliegt, ist nicht nur derselbe wie der, dass ein Hubschrauber fliegt. Es ist auch derselbe, wie der, dass ein Fallschirm mit konstanter Geschwindigkeit (und nicht beschleunigt) fällt, und es ist auch der Grund dafür, dass ein Ventilator bläst. Alle diese

## Die fallende Katze

Geräte kann man erklären mit Bernoulli, durch die Stöße der Moleküle oder mit der Zirkulation. Alle blasen sie aber auch Luft nach unten bzw. nach vorn, und damit übertragen sie Impuls auf die Luft. Das ist, unserer Meinung nach, für den, der kein Spezialist in Flugmechanik werden will, eine befriedigende Erklärung.

### Herkunft

Was wir in manchen Schulbüchern und anderen Büchern, die für den Nichtspezialisten bestimmt sind, antreffen, ist unverdaute Ingenieurliteratur. Selbstverständlich ist es wichtig, das Strömungsfeld genau zu kennen, wenn ein Tragflügelprofil optimiert werden soll. Selbstverständlich ist es wichtig, eine Strömung in einen zirkulationsfreien und einen quellfreien Anteil zu zerlegen, um die Potenzialtheorie zur Berechnung von Profilen heranziehen zu können. Zur Allgemeinbildung wird man diese Themen aber sicher nicht zählen.

### Entsorgung

Man beschränkt sich auf die folgende Erklärung: Das Flugzeug muss Luft nach unten in Bewegung setzen, genauso wie der Vogel, das Insekt, der Hubschrauber, die Frisbee-Scheibe und der Bumerang, ja sogar wie der Fallschirm, denn es muss den Impuls loswerden, den es ständig mittels der Schwerkraft von der Erde bekommt. Die nach unten strömende Luft nimmt diesen Impuls mit, und gibt ihn schließlich an die Erde zurück.

schäftigungen der Kontrolltheorie gehört. ... Physikalisch ausgedrückt ist Montgomerys Verbindung ein gewisses Yang-Mills-Feld auf dem Konfigurationsraum und ist ein Spezialfall eines allgemeineren Zugangs zur Dynamik deformierbarer Körper dargestellt durch Eichfelder ...“

### Mängel

Dass der Wikipedia-Eintrag als Satire gemeint ist, konnte ich nicht feststellen. Normalerweise würde er ja dann nach einiger Zeit rausfliegen.

Zunächst noch einmal kurz, worin das Problem besteht. Es wird offenbar als überraschend, wenn nicht als widersprüchlich empfunden, dass die Katze die Drehung schafft. Man hat das Gefühl, es gebe ein Problem mit dem Drehimpulssatz. Scheinbar bestätigt wird diese Sorge, wenn man Erklärungen, wie die oben zitierte, liest. Denn einfach scheint der Trick, den die Katze anwendet, nicht zu sein.

Und nun die Mängel:

- 1 Es handelt sich bei der Drehung nicht um eine besondere Fertigkeit von Katzen. Der Mensch und auch andere, einigermaßen bewegliche Tiere können es auch. Probieren Sie es selbst aus:
- Stellen Sie sich auf glattem Fußboden auf ein Bein, mit einem Schuh, der eine glatte Sohle hat, oder noch besser in Socken.
- Machen Sie eine Vierteldrehung um die senkrechte Achse.

Ich erkläre nicht, wie Sie es anstellen müssen, denn ich möchte Ihnen ja beweisen, dass Sie es selbst können, ohne Anleitung.

(Sie können die Drehung auch mit einem anderen Verfahren realisieren, nämlich unter Ausnutzung der Reibung. Probieren Sie auch das: wieder auf einem Bein stehend. Allerdings ist das hier nicht unser Thema.)

- 2 Was die Katze schafft (oder was Sie gerade eben geschafft haben), ist nicht bemerkenswerter als sehr viele andere Leistungen, die wir ständig vollbringen, und über die wir uns im Physikunterricht keine Gedanken machen (vielleicht zu Unrecht): Aufrecht gehen, rennen, Rad fahren, freihändig Rad fahren, Schlittschuh laufen ...
- 3 Es wird ein unnötiger Aufwand getrieben, das scheinbare Problem zu lösen.

### Herkunft

- 1 Die Diskussion des Problems hat eine lange Tradition. Schon Maxwell und Stokes, aber auch viele andere, haben sich damit beschäftigt.

- 2 Es offenbart das Kind im Mann (d.h. im Physiker oder in der Physikerin).
- 3 Wir, die Physiker und Physikerinnen, können damit dem Rest der Menschheit, d.h. den 80 % der Bevölkerung, die stolz sind auf ihr physikalisches Analphabetentum, zeigen, dass sich die Physik nicht nur mit Higgs-Teilchen, verschränkten Photonen und dunkler Energie beschäftigt, wofür die sich nicht interessieren. Sogar um ihr geliebtes Haustier zu verstehen, braucht man Physik.
- 4 Vielleicht auch ein etwas verkramptes Verhältnis zum Drehimpuls.

### Entsorgung

Ein hübscher Effekt, den man im Unterricht zeigen kann. Wie gesagt, braucht man keine Katze. Damit bei der Drehung die Reibung sichtbar ausgeschlossen ist, bitte ich einen Schüler oder eine Schülerin, sich auf einen Drehstuhl zu setzen, und sich zu drehen, ohne sich am Boden abzustützen. Ich habe es nie erlebt, dass das jemand nicht konnte.

Was ist an dem Experiment interessant? Vor allem die Tatsache, dass das analoge Experiment der Translationsmechanik nicht funktioniert.

Es würde so aussehen: Zwei Wagen A und B; Willy (der Protagonist des Karlsruher Physikkurses) sitzt auf Wagen A und versucht, indem er an Wagen B zieht oder gegen ihn drückt, oder ihn vor- und zurückschüttelt, den Schwerpunkt des Gesamtsystems zu verschieben, Abb. 3.21.



Abb. 3.21 Der Schwerpunkt lässt sich nicht verschieben.

Wie man weiß, geht das nicht. Es lässt sich auch leicht theoretisch zeigen:

Mit

$$p = m \cdot v$$

und

$$\Delta s = \int v dt$$

wird

$$\Delta s = \frac{1}{m} \int pdt$$

und damit

$$m \Delta s = \int pdt$$

Das gilt sowohl für Wagen A (mit Willy) als auch für Wagen B. Wegen der Impulserhaltung folgt:

$$m_A \Delta s_A = -m_B \Delta s_B$$

Jede Verschiebung  $\Delta s_A$  des Wagens 1 ist mit einer Verschiebung

$$\Delta s_B = -\frac{m_A}{m_B} \Delta s_A \quad (3.9)$$

des Wagens B verknüpft. Das bedeutet, dass sich der Schwerpunkt des Systems aus beiden Wagen nicht verschiebt, was für Bewegungen Willy auch immer macht. Und wenn am Ende der Abstand zwischen den Wagen wieder so ist wie am Anfang, so sind auch die Positionen beider Wagen wieder die alten. Eine Voraussetzung für diese Folgerung war allerdings, dass die Massen  $m_A$  und  $m_B$  nicht verändert werden.

Wir wollen aber auch noch untersuchen, was passiert, wenn Massenänderungen zugelassen sind.

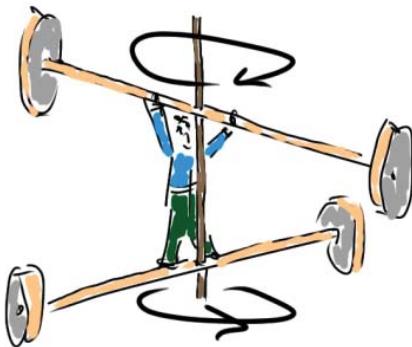
Wagen A sei zunächst leer und leicht, Wagen B mit Sand beladen und schwer. Willy sitzt wieder auf Wagen A und zieht mithilfe der Stange an dem schweren Wagen B. B bewegt sich nur wenig, A dagegen viel. Dann wird B ent- und A beladen, d.h. jetzt ist A schwer und B leicht. Willy stößt sich mithilfe der Stange von B ab. Jetzt bewegt sich A wenig und B viel. Am Ende ist der Abstand zwischen A und B wieder wie am Anfang, aber das ganze System hat sich nach rechts verschoben. Möglich war das, weil man die Massen verändert hat: das Verhältnis  $m_A/m_B$  war beim Wegstoßen und beim Wiederheranziehen nicht dasselbe. Dass der Schwerpunkt der beiden Wagen am Ende nicht mehr da liegt, wo er am Anfang war, wundert einen nicht. Man hat gewissermaßen gemogelt. Interessant ist die Geschichte nur deshalb, weil man beim Rotations-Analogon ganz ähnlich verfährt. Allerdings geht es dabei ohne Mogeln.

Wir betrachten zwei Hanteln, die um eine gemeinsame Achse rotieren können, Abb. 3.22. Statt einer Nettoverschiebung wollen wir eine Nettodrehung erreichen.

Es gilt die zu (3.9) analoge Gleichung:

$$\Delta \alpha_B = -\frac{J_A}{J_B} \Delta \alpha_A \quad (3.10)$$

## Die fallende Katze



**Abb. 3.22** Durch Hin- und Herdrehen der Hanteln lässt sich die Orientierung ändern, wenn man das Trägheitsmoment einer Hantel bei dem Vorgang ändert, indem man die Gewichte an den Enden verschiebt.

( $\alpha$  ist der Drehwinkel,  $J$  das Trägheitsmoment. Die Herleitung geht genau wie die oben).

Wenn man auf der unteren Hantel steht und versucht, die obere zu verdrehen, so verdreht sich auch die untere, und die Drehwinkel stehen in dem Verhältnis, das durch Gleichung (3.10) gegeben ist.

Wenn man die Trägheitsmomente unverändert lässt, so gehört zu jedem  $\Delta\alpha_A$  ein ganz bestimmtes, durch Gleichung (3.10) gegebenes  $\Delta\alpha_B$ . Dreht man einmal hin und wieder zurück, so weist am Ende jede der Hanteln wieder in die ursprüngliche Richtung.

Nun kann man aber die Trägheitsmomente verändern, ohne die Masse zu verändern, ohne irgend etwas auf- oder abzuladen. Wenn man nun eine Hin- und Rückdrehung macht, und dafür sorgt, dass etwa das Trägheitsmoment  $J_A$  bei der Hindrehung größer ist als bei der Rückdrehung, so bleibt ein Nettodrehwinkel übrig. Genau das tun Katze oder Mensch, wenn sie sich drehen.

# 4 RELATIVISTISCHE PHYSIK

## 4.1 Die Bezeichnung Relativitätstheorie

### Gegenstand

Die beiden großen Theorien von Einstein werden Relativitätstheorien genannt, die Spezielle (SRT) und die Allgemeine (ART). Sie beruhen auf dem Relativitätsprinzip: Die Naturgesetze haben für alle Beobachter dieselbe Form. In der SRT gilt das Prinzip zunächst nur für Bezugssysteme, die sich gleichförmig gegeneinander bewegen. In der ART wird es auf beschleunigte Bezugssysteme verallgemeinert.

### Mängel

Die Bezeichnung Relativitätstheorie weist darauf hin, dass Bezugssystemwechsel in den Einstein'schen Theorien eine besondere Rolle spielen. Allerdings entsteht dabei auch der Eindruck, Bezugssystemwechsel seien der Hauptgegenstand der Theorien. Das spiegelt sich in der Lehre wider, besonders im Fall der SRT. Bevor man zu den interessanten Aussagen der Theorie kommt, muss man sich durch die verwickelten Betrachtungen im Zusammenhang mit den sich gegeneinander bewegenden Bezugssystemen hindurcharbeiten, mit der Folge, dass die Lernenden (in Schule und Hochschule) den Spaß am Thema schnell verlieren.

Man überlege sich einmal, was man jemandem zur SRT sagen würde, von dem man weiß, dass er nicht bereit ist, länger als zwei Minuten zuzuhören. Ich glaube nicht, dass es vernünftig wäre, ihm mitzuteilen, dass das Relativitätsprinzip gelten soll. Hier einige bessere Vorschläge:

- Raum und Zeit verschmelzen zu einer Einheit.
- Aus Dreier- werden Vierervektoren.
- Energie und Masse sind dieselbe physikalische Größe.
- Es gibt eine Grenzgeschwindigkeit.

Man mag einwenden, auf den Namen komme es doch nicht an, wenn es um das Verständnis der Theorie geht. Ich bin anderer Meinung. Nach meiner Erfahrung hängt der Unterrichtserfolg stark davon ab, welche Sprache, und insbesondere welche Bezeichnungen man verwenden.

det. Nomen est omen: Wenn man aufgrund des Namens zu der Meinung gekommen ist, das Hauptinteresse der RT gelte den Bezugssystemwechseln, so wird man den Unterricht auch entsprechend gestalten.

Wer die Theorien gut kennt, mag kein Verständnis für diese Sorgen haben. Es sind aber nicht die Fachleute, um die ich mir Sorgen mache. Vielmehr sind es die, für die die „relativistische“ Physik nicht mehr ist als eines unter vielen anderen Unterrichtsthemen, und die Physik nur eines von vielen anderen Schulfächern. Was hängt bleibt, ist die Erinnerung an ein irgendwie vertracktes Verhalten von Längen und Zeitintervallen bei Bezugssystem-Wechsel. Die Gleichung  $E = mc^2$  kannte man ohnehin schon früher, weil Sie einem auf Graffiti, Buchtiteln oder Briefmarken begegnet ist. Was die Theorie eigentlich ausmacht, kommt unter die Räder.

### Herkunft

Der Name wurde sehr früh vergeben. 1906 ging Planck zunächst von der Bezeichnung „Lorentz-Einstein-Theorie“ über auf „Relativtheorie“, woraus kurze Zeit später der Name „Relativitätstheorie“ wurde, der ab 1907 auch von Einstein benutzt wurde.

Man stelle sich einmal vor, der Verlauf der Geschichte sei etwas anders gewesen, die SRT sei auf einem anderen Weg entstanden, etwa aus der experimentellen Beobachtung, dass Energie Trägheit und Schwere hat, dass es sich also bei Energie und Masse um dieselbe physikalische Größe handelt. Wie hätte man die Theorie dann genannt? Vielleicht Äquivalenztheorie? Es hätte sich sicher eine ganz andere Unterrichtstradition entwickelt.

### Entsorgung

Statt Relativitätstheorie oder Relativistische Physik gebe man dem entsprechenden Kapitel eine andere Überschrift, etwa wie Wheeler: Physik der Raumzeit.

Oder, falls man sich entschließen kann, das Thema nicht mit der Kinematik, sondern mit der Dynamik zu beginnen, könnte die Überschrift etwa lauten: „Die Grenzgeschwindigkeit“, oder „Die Identität von Masse und Energie“.

## Die Postulate der Relativitätstheorie

### 4.2 Die Postulate der Relativitätstheorie

#### Gegenstand

Aus einem Schulbuch: „Das ist wichtig: Die Relativitätstheorie beruht auf zwei Postulaten ...“, nämlich dem Relativitätsprinzip und der Invarianz der Lichtgeschwindigkeit. Und etwas später: „Folgerungen aus den Postulaten: ... Zeitdehnung, ... Längenkontraktion, ... Gleichzeitigkeit, ... Energie und Masse eines Körpers sind äquivalent ...“

#### Mängel

1. Zunächst eine Kleinigkeit: Ich reagiere auf manche Wörter allergisch. „Postulat“ ist ein solches Wort. Wo gibt es Postulate in der Physik? Newtons Postulate? Nein, Newtons Axiome! (Das Wort Axiom wird hier übrigens nicht in der Bedeutung verwendet, die es in der Mathematik hat.) Die Postulate der Thermodynamik? Nein, die Hauptsätze. Wo dann? Ach ja, Bohr; die Bohr'schen Postulate! Und was ist damit gemeint? Was versteht man unter einem Postulat? Eine Annahme, eine Vermutung, eine Voraussetzung, die sich durch ihre Konsequenzen bestätigt. Es gibt mehrere Wörter, die jeder kennt, und die die Sache gut treffen. Warum also dieses Imponiergehabe, warum solche Verschleierungswörter?

Wir erziehen die Schülerinnen und Schüler, aber auch die Studierenden an der Universität dazu, im richtigen Augenblick (nämlich in der Prüfung) das richtige Wort fallen zu lassen, mit dem sie beweisen, dass sie zur Klasse der Eingeweihten gehören.

Wer mir nicht folgen möchte, mag bei Kant nachlesen: Ein Postulat ist ein „praktischer unmittelbar gewisser Satz oder ein Grundsatz, der eine mögliche Handlung bestimmt, bei welcher vorausgesetzt wird, dass die Art, sie auszuführen, unmittelbar gewiss sei.“ Verstanden? War das bei den Bohr'schen und bei den Postulaten der Relativitätstheorie wirklich gemeint?

2. Zum Inhalt der Aussage: Wenn man sagt, die Relativitätstheorie beruhe auf diesen oder jenen Postulaten (Annahmen, Gesetzen), so legt man nahe, anders komme man nicht zur Relativitätstheorie. Das ist aber nicht zutreffend. Es ist richtig, dass man aus diesen Voraussetzungen andere Sätze der Relativitätstheorie ableiten kann; man kann aber auch auf viele andere Arten beginnen, und die Sätze, die hier als Postulate bezeichnet werden, daraus ableiten. So kann man auch beginnen mit der Energie-Masse-Äquivalenz, oder mit der Invarianz des Viererabstandes, oder mit den Lorentztransformationen von Länge und Zeitintervallen, oder den Transformationsgleichungen für Energie und Impuls.

#### Herkunft

- 1 Man denkt zu wenig über den Gebrauch der Wörter nach. Man lädt den historischen Müll im eigenen Kopf vor den Schülern ab. Vielleicht hält man dieses Geschwurbel auch für einen Teil des Weltkulturerbes.
- 2 So war der historische Gang, es war der zufällig als Eingang zur Relativitätstheorie gewählte oder gefundene Weg.

#### Entsorgung

Man vermeide in der Physik den Gebrauch von Wörtern wie Postulat, Axiom, Prinzip, Hauptsatz, etc. siehe [1].

Warum nicht Bohr'sche Annahme oder Vermutung, oder auch Bohr'sches Gesetz? Das sind gute deutsche Wörter, die jeder Schüler versteht. Man könnte mit der Abrüstung auch noch einen Schritt weiter gehen: Man verwendet für das, was man sagen möchte, gar kein Substantiv, sondern sagt einfach: Bohr oder Einstein hat gefunden oder angenommen ...

[1] F. Herrmann, *Die Namen der Gasgleichung*, Altlasten der Physik

### 4.3 Inertialsystem und Trägheitsgesetz

#### Gegenstand

Der Begriff „Inertialsystem“ spielt in der Physik von Schule und Hochschule eine wichtige Rolle. Man braucht ihn, um das Trägheitsgesetz zu formulieren:

„Ein kräftefreier Körper bewegt sich geradlinig gleichförmig.“

Dieser Satz gilt nur, wenn man den entsprechenden Vorgang im „richtigen“ Bezugssystem beschreibt, nämlich in einem Inertialsystem. Und was ist ein Inertialsystem?

„In der Physik ist ein Inertialsystem (von lateinisch *in* „untätig, träge“) ein Koordinatensystem, in dem sich kräftefreie Körper geradlinig, gleichförmig bewegen.“

Ein Inertialsystem kann man näherungsweise „realisieren“: „Eine fast vollkommene Annäherung an ein Inertialsystem wäre erst durch eine antriebslose Rakete im interstellaren Raum, fern von allen Massen realisiert, falls sie nicht rotiert.“

In einem Gutachten der Deutschen Physikalischen Gesellschaft wird dem Karlsruher Physikkurs vorgeworfen, dass der Begriff Inertialsystem nicht eingeführt wird [1].

## Mängel

Nehmen wir uns als erstes den Trägheitssatz vor: „Ein kräftefreier Körper bewegt sich geradlinig gleichförmig.“

Nun bewegt sich jeder beliebige Körper geradlinig gleichförmig, wenn man nur das Bezugssystem geeignet wählt. Der Trägheitssatz kann also nicht allgemein gelten. Er gilt, so lernt man (gewöhnlich erst nachträglich) nur in bestimmten Bezugssystemen, den Inertialsystemen. Wir können damit den Trägheitssatz besser formulieren: „In einem Inertialssystem bewegt sich ein kräftefreier Körper geradlinig gleichförmig.“ Woher weiß man aber, ob ein Bezugssystem ein Inertialssystem ist? Man nimmt einen Körper, von dem man weiß, dass er „kräftefrei“ ist, d. h., dass keine Kraft auf ihn wirkt, als Bezugskörper. Dieser legt das Inertialssystem fest. Wir können dann von jedem beliebigen anderen Körper sagen, ob er sich geradlinig gleichförmig bewegt oder nicht. So weit, so gut.

Eine Frage bleibt aber: Woran erkennen wir, dass der Bezugskörper kräftefrei ist? Wir können nicht sagen: „An seiner geradlinig-gleichförmigen Bewegung“ – denn er ist es ja gerade, der festlegt, was wir unter geradlinig-gleichförmig verstehen. Also müssen wir über die Kräftefreiheit anders entscheiden. Das scheint zunächst kein Problem zu sein. Wir kennen die Naturkräfte, wir kennen ihre Quellen und die entsprechenden Abstandsge setze – wenigstens glauben wir das – und können so, eventuell im Gedankenexperiment, dafür sorgen, dass ein Körper kräftefrei ist: Wir richten es ein, dass keine elektrischen oder magnetischen Kräfte und auch keine Kontaktkräfte angreifen. Außerdem müssen wir dafür sorgen, dass keine Gravitationskraft angreift. Und hier haben wir nun doch ein Problem. Wir können Gravitationskräfte nicht ausschließen. Solange man glaubte, dass man „gravitostatische“ Kräfte (d. h. Kräfte, die durch Newtons Gravitationsgesetz beschrieben werden) von Trägheitskräften unterscheiden kann, gab es das Problem nicht, siehe oben: Man braucht nur in den interstellaren Raum zu gehen. Wenn man aber zugibt, dass diese beiden Arten von Kräften grundsätzlich nicht zu unterscheiden sind, so zerrinnt einem das Argument zwischen den Fingern. Wir können von einem Körper grundsätzlich nicht sagen, er sei kräftefrei oder er sei nicht kräftefrei. Er ist es in einem Bezugssystem, und in einem anderen ist er es nicht.

Gehen wir in den interstellaren Raum und lassen die Raketentriebwerke laufen. Gilt jetzt das Trägheitsprinzip nicht? Natürlich gilt es. Ein Körper, den wir in der Rakete loslassen oder auch anstoßen, bewegt sich nicht mehr geradlinig gleichförmig, aber er ist ja auch nicht mehr kräftefrei. Im Bezugssystem der Rakete ist die

Gravitationsfeldstärke nicht mehr null, wir haben also eine Gravitationskraft, die auf unseren Körper wirkt, und die den Körper in Übereinstimmung mit dem 2. Newton'schen Gesetz beschleunigt. Die Newton'schen Gesetze gelten also auch in diesem „Nichtinertialssystem“. Wozu dann aber noch der Begriff Inertialssystem?

## Herkunft

Wenn man das Bezugssystem, für das der Trägheitssatz angeblich gilt, meistens nicht ausdrücklich nennt, so wohl deshalb, weil es in der Newton'schen Formulierung auch nicht vorkommt. Newton braucht aber, wenn er sein erstes Gesetz ausspricht, diese Festlegung nicht, denn bei ihm ist klar, gegen wen sich der Körper bewegt: gegen den absoluten Raum, den er wenige Seiten vorher eingeführt hat. Bei ihm ist auch klar, was man unter „kräftefrei“ versteht: wenn keine Kräfte wirken außer denen, die er Scheinkräfte nannte. Und ob eine Kraft eine echte Kraft, also keine Scheinkraft ist, erkannte man daran, dass man einen Körper benennen konnte, der die Kraft ausübt. Bei Scheinkräften war das nicht der Fall.

Allerdings wurde schon zu Newtons Zeit, zwanzig Jahre nach der Veröffentlichung seiner Principia, diese Meinung erschüttert. Der irische Philosoph George Berkeley (1685 – 1753) schlug vor, dass die die Scheinkräfte verursachenden Körper die Sterne sind. Dieser Gedanke wurde viel später von Ernst Mach aufgegriffen. Damit wäre das Scheinkraftkriterium natürlich nicht mehr erfüllt. Die Scheinkräfte werden zu echten Kräften.

In der Gravitationsphysik bestand lange Zeit eine merkwürdige Situation: Man wusste, dass träge und schwere Masse gleich sind, hatte aber keinerlei Erklärung dafür. Einstein formuliert es 1916 so: „Die schwere und die träge Masse eines Körpers sind einander gleich. Die bisherige Mechanik hat diesen wichtigen Satz zwar registriert, aber nicht interpretiert.“ [2]

Die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) lehrt uns nun, dass eine Erscheinung, die man in einem Bezugssystem durch die Trägheit erklärt, ihre Erklärung in einem anderen durch ihre Schwere erhält. Damit verschwindet die Unterscheidung von träger und schwerer Masse, genauso wie die zwischen Inertial- und Nichtinertialssystem.

Einstein schreibt 1922: „Die eigentliche Leistung der (allgemeinen) Relativitätstheorie liegt darin, dass sie die Physik von der Notwendigkeit der Einführung des „Inertialsystems“ (bzw. der Inertialssysteme) befreit hat. Das Unbefriedigende in diesem Begriff liegt darin: Er wählt ohne Begründung unter allen denkbaren Koordinatensystemen gewisse Systeme aus. Es wird dann ange-

## Inertialsystem und Trägheitsgesetz

nommen, dass die Gesetze der Physik nur in Bezug auf solche Inertialsysteme gelten (z. B. der Trägheitssatz und das Gesetz von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit). Dadurch wird dem Raum als solchem eine Rolle im System der Physik zuerteilt, die ihn vor den übrigen Elementen der physikalischen Beschreibung auszeichnet: Es wirkt bestimmt auf alle Vorgänge, ohne dass diese auf ihn zurückwirken; eine solche Theorie ist zwar logisch möglich, aber andererseits doch recht unbefriedigend. Newton hatte diesen Mangel deutlich empfunden, aber auch klar verstanden, dass es für die damalige Physik keinen anderen Weg gab. Unter den Späteren war es besonders Ernst Mach, der diesen Punkt klar ins Licht brachte.“ [3]

### Entsorgung

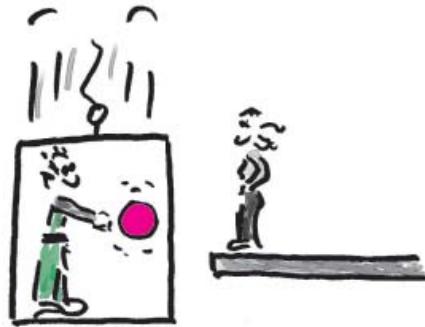
Man könnte glauben, dass man auf den Begriff Inertialsystem nur dann verzichten kann, wenn man die Gravitation im Rahmen der ART behandelt. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass jede Aussage der ART voraussetzt, dass man die Tensorrechnung beherrscht und die Einsteinschen Feldgleichungen durchschaut. Das ist aber gewiss übertrieben. Die Identität von träger und schwerer Masse ist zwar in der ART enthalten, sie ist aber auch ohne diese zu verstehen. Man muss eben zu dem alten Wissen nur hinzunehmen, dass die Gleichheit von schwerer und träger Masse kein Zufall ist. Hier sei kurz skizziert, wie man mit dem Thema in der Schule, etwa in Klasse 11, umgehen kann.

Wir betrachten die Situation von Abb. 4.1. Willy befindet sich in dem berühmten fallenden Aufzug, Lilly steht außerhalb. Für Willy (im Bezugssystem des Aufzugs) bewegt sich die Kugel nicht, sie schwebt. Willy findet das normal, denn für ihn ist die Gravitationsfeldstärke null, die Kugel ist kräftefrei. Lilly interpretiert das Geschehen anders: Die Feldstärke ist nicht null, auf die Kugel wirkt eine Kraft. Die Gravitationsfeldstärke ändert also, wie viele andere Größen auch, bei Bezugssystemwechsel ihren Wert.

In Abb. 4.2 geht es darum, zu begründen, weshalb die Feder gedehnt ist. Willy meint, die Gravitationsfeldstärke ist überall null. Die Feder ist gedehnt, weil der Körper, der an der Feder hängt, beschleunigt wird. Wegen seiner Trägheit widersetzt er sich der Beschleunigung. Lilly dagegen meint, die Dehnung der Feder habe nichts mit Trägheit zu tun, sondern komme durch das Gravitationsfeld und die Schwere zustande.

Wir sehen also: Die Masse äußert sich, je nach Bezugssystem als Schwere oder als Trägheit.

Die Unterscheidung zwischen schwerer und träger Masse ebenso wie die Unterscheidung zwischen richtigen und Scheinkräften oder zwischen Inertial- und



**Abb. 4.1** Willy: „Die Kugel schwebt, die Gravitationsfeldstärke muss gleich null sein.“ Lilly: „Die Kugel fällt beschleunigt, die Feldstärke ist nicht null.“



**Abb. 4.2** Willy: „Die Feldstärke ist null. Die Feder ist gedehnt, weil der träge Körper über die Feder beschleunigt wird.“ Lilly: „Die Feder wird gedehnt, weil der schwere Körper an ihr zieht.“

## Die Schreibweise der Gleichung $E = mc^2$

Nichtinertialsystemen ist ein Artefakt der vorrelativistischen Physik.

Wir wollen die beiden Betrachtungsweisen von Willy und Lilly noch im Impulsstrombild diskutieren, Abb. 4.1. Willy sagt: Der Impuls ändert sich nicht; das muss auch so sein, denn die Gravitationsfeldstärke ist null, also haben wir auch keinen Impulsstrom durch das Gravitationsfeld in den Körper. Lilly dagegen sagt, der Impuls ändert sich; das muss so sein, denn es fließt über das Gravitationsfeld Impuls in den Körper hinein.

[1] „Präzise Begriffe der Trägheit, des Inertialsystems und des Reaktionsprinzips stehen dem KPK nicht mehr zur Verfügung.“ siehe: Ergänzende Bemerkungen zum DPG-Gutachten über den Karlsruher Physikkurs von Matthias Bartelmann, Fabian Bühler, Siegfried Großmann, Wolfhard Herzog, Jörg Hüfner, Rudolf Lehn, Rudolf Löhken, Karlheinz Meier, Dieter Meschede, Peter Reineker, Metin Tolan, Jochen Wambach und Werner Weber [www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen\\_gutachter/kpk-ergaenzung.pdf](http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen_gutachter/kpk-ergaenzung.pdf)

[2] A. Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Akademie-Verlag, Berlin, 1973, S. 54

[3] A. Einstein, *Grundzüge der Relativitätstheorie*, Akademie-Verlag, Berlin, 1970, S. 138

$$y = xb + c + x^2a.$$

Diese Konvention erleichtert es, eine Funktion schnell zu erfassen.

Der Brauch, die Konstante vor die abhängige Variable zu schreiben, wird auch in der Physik weitgehend gepflegt.

Bei der Gleichung

$$E_{\text{kin}} = \frac{m}{2}v^2$$

denkt man an den quadratischen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und kinetischer Energie, und nicht so sehr an den linearen Zusammenhang zwischen kinetischer Energie und Masse, denn die Masse wird gewöhnlich als Konstante angesehen. Wir schreiben also nicht

$$E_{\text{kin}} = \frac{v^2}{2}m.$$

Ähnlich steht es mit vielen anderen Gleichungen.

Man schreibt  $U = R \cdot I$  und nicht  $U = I \cdot R$ ,

oder  $Q = C \cdot U$  und nicht  $Q = U \cdot C$ ,

oder  $E = h \cdot f$  und nicht  $E = f \cdot h$ ,

oder  $Q = I \cdot t$  und nicht  $Q = t \cdot I$ .

Immer steht die Größe, die man am ehesten als variabel ansieht, rechts. Diejenige, die in der betrachteten Situation konstant ist, steht davor.

Dieser Gewohnheit entsprechend würde man die Gleichung

$$E = mc^2$$

so interpretieren: Die Energie ist proportional zum Quadrat der Lichtgeschwindigkeit, der Proportionalitätsfaktor ist die Masse.

Tatsächlich ist aber die Aussage der Gleichung eine andere: Je größer die Masse eines Körpers ist, desto größer ist seine Energie. Der Proportionalitätsfaktor ist  $c^2$ .

Es wäre aus dieser Sicht also besser, die Gleichung so zu schreiben:

$$E = c^2 m.$$

Aber auch in dieser Form hat sie noch einen Makel. Warum soll man den Proportionalitätsfaktor in einer so verklausulierten Form schreiben, wie es hier geschieht?

### Herkunft

Einstein hat die Gleichung so geschrieben, und niemand ist auf die Idee gekommen, sie umzudrehen. Über den Grund könnte man spekulieren: Es heißt schließlich auch

## 4.4 Die Schreibweise der Gleichung $E = mc^2$

### Gegenstand

Die Formulierung der Energie-Masse-Äquivalenz mithilfe der Gleichung  $E = mc^2$ .

### Mängel

Entsprechend einer alten Gewohnheit schreibt man in der Mathematik den linearen Zusammenhang zwischen einer unabhängigen Variablen  $x$  und einer abhängigen  $y$

$$y = ax + b,$$

und nicht etwa

$$y = b + xa.$$

Ist der Zusammenhang quadratisch, so schreibt man

$$y = ax^2 + bx + c,$$

und nicht

## Masse, Ruhmasse, invariante Masse, relativistische Masse, Energie, Ruhenergie und innere Energie

$$E_{\text{kin}} = \frac{m}{2} v^2$$

also erst die Masse, dann das Geschwindigkeitsquadrat – hier natürlich zu Recht.

### Entsorgung

Man schreibt die Beziehung so, wie man Proportionalitäten zu schreiben pflegt:

$$E = k \cdot m.$$

Hier ist  $k$  eine universelle Konstante. Sie ist gleich dem Quadrat der Grenzgeschwindigkeit.

$$E = m c^2$$

und es geht um die Namen der drei Größen  $m$ ,  $E$  und  $E_0$ . Eigentlich war durch die Entdeckung der Identität von Energie und Masse eine der Bezeichnungen Masse und Energie überflüssig geworden. Tatsächlich wurden aber mehrere neue Namen kreiert, mit dem Ergebnis, das oben beschrieben wurde.

### Herkunft

Das Problem entstand mit der Relativitätstheorie.

Zum einen haben wir die Entdeckung, dass Energie und Masse dieselbe Größe sind: Energie hat dieselben Eigenschaften wie Masse, nämlich Schwere und Trägheit.

Zum anderen gehört es zur Relativitätstheorie, dass sie die physikalische Welt mit Vierervektoren und ihren lorentzinvarianten Beträgen beschreibt. Lorentzinvarianten sind praktisch. Sie enthalten das Eigentliche, das von der Willkür der Bezugssystemwahl Befreite eines Teilchens, eines Feldes oder eines Prozesses. Da die Masse jahrhundertelang für etwas gestanden hatte, das für ein Teilchen charakteristisch ist, etwas, das einen wesentlichen Teil seiner Identität ausmacht, das nicht vom Bezugssystem abhängt, so möchte man das Wort auch in Zukunft in dieser Rolle belassen. Also benutzt man den Namen, besonders in der Teilchenphysik, für den lorentzinvarianten Betrag des Viererimpulsvektors, also das, was zunächst Ruhmasse hieß.

Es konkurrierten also zwei Anliegen:

- der Name Masse als Maß für die Trägheit (die für ein und denselben Körper in einem Bezugssystem groß und im anderen klein sein kann);
- der Name Masse für eine Größe, die ein Teilchen charakterisiert und deren Wert beugssystemunabhängig ist.

Damit war das Chaos vorprogrammiert.

Wer die Masse als universelles Trägheitsmaß benutzt, braucht einen neuen Namen für den Wert der Masse im Schwerpunktssystem. Die Bezeichnungen Ruhmasse, Eigenmasse und Ruhenergie boten sich an. Wobei mit Ruhe lediglich gemeint ist, dass der Schwerpunkt des betrachteten Systems ruht. Abgesehen davon kann beliebige Unruhe herrschen.

Wer die Bezeichnung Masse für die Lorentzinvarianten benutzte, musste für das Trägheitsmaß einen neuen Namen haben. Man nannte sie relativistische Masse. Und falls man befürchten musste, dass jemand nicht weiß, dass man die Größe  $m_0$  einfach Masse nennt, fügte man sicherheitshalber das Adjektiv invariant hinzu; sie wurde zur invarianten Masse.

## 4.5 Masse, Ruhmasse, invariante Masse, relativistische Masse, Energie, Ruhenergie und innere Energie

### Gegenstand

Der bei Bezugssystemwechsel invariante Betrag des Viererimpulsvektors wird, vor allem in der Teilchenphysik, invariante Masse oder kurz Masse genannt. Anderswo heißtt er auch Ruhmasse, oder, wenn er in anderen Einheiten angegeben wird, Ruhenergie. Gelegentlich nennt man ihn auch innere Energie. Sonst versteht man in der Physik unter Masse nicht nur diesen invarianten Anteil, sondern die sich mit der Geschwindigkeit ändernde Masse, manchmal auch relativistische Masse genannt. Wenn sie in anderen Einheiten gemessen wird, heißtt sie einfach Energie.

### Mängel

Es gibt physikalische Größen, die Ärger machen: Sie ändern im Lauf der Zeit ihre Bedeutung, oder sie werden von verschiedenen Personen in unterschiedlicher Bedeutung benutzt. Bei manchen Größen gibt es den Ärger schon lange, wenn nicht schon immer – etwa bei der Kraft und der Wärme. Bei der Masse ist das Problem neu. Sie gehörte lange Zeit, etwa 200 Jahre lang, eher zu den in dieser Hinsicht gutartigen Größen. Das Durcheinander wurde ausgelöst durch die Relativitätstheorie. Der Sachverhalt ist einfach, das Chaos aber groß.

Hier der Sachverhalt: Es gelten die Beziehungen

$$E^2 = E_0^2 + c^2 p^2$$

und

## Lichtgeschwindigkeit oder Grenzgeschwindigkeit

### Entsorgung

Wir wagen es nicht, der mächtigen Teilchenphysiker-Community einen Vorschlag zu machen. Was die Schule betrifft, so möchten wir aber eine Empfehlung aussprechen.

Man führt die Masse ein als die Größe, die die Trägheit und die Schwere von Körpern charakterisiert. Das Konzept dieser Größe ist klar. Man zeigt später, dass mit der Relativitätstheorie die Einsicht kam, dass die Energie genau dieselben Eigenschaften charakterisiert, dass also Energie und Masse ein und dieselbe Größe sind; dass die Trägheit und die Schwere zunimmt, wenn man einen Körper erwärmt, eine Feder spannt, einen Kondensator auflädt. Selbstverständlich benutzen wir für die Größe, die diese Eigenschaften misst, nach wie vor die Bezeichnung Masse. Wir brauchen dann unsere Vorstellung von der Masse nicht zu korrigieren. Noch einmal: Masse misst Trägheit und Schwere.

Die Größen  $E_0$  und  $m_0$  mag man Ruhenergie und Ruhmasse nennen, auch wenn nichts ruht an einem System, dessen Gesamtenergie gleich der Ruhenergie ist – außer seinem Schwerpunkt. Die Bezeichnungen innere Energie oder Eigenmasse wären hier vielleicht passender.

## 4.6 Lichtgeschwindigkeit oder Grenzgeschwindigkeit

### Gegenstand

Die Konstante  $c$  in der Gleichung  $E = mc^2$  nennt man Lichtgeschwindigkeit.

### Mängel

Aus der Annahme der Äquivalenz von Energie und Masse kann man die spezielle Relativitätstheorie herleiten. Die Energie-Masse-Äquivalenz kann also die Rolle eines Axioms spielen, das zur klassischen Mechanik hinzugenommen werden muss, wenn man zur Relativitätstheorie kommen will. Bei Hinzunahme dieses Axioms ergibt sich unter anderem, dass es eine universelle Grenzgeschwindigkeit gibt. Führt man einem Körper oder Teilchen immer mehr Impuls zu, so nähert sich dessen Geschwindigkeit dieser Grenzgeschwindigkeit  $c$ , und zwar um so schneller, je kleiner die Ruhmasse des Teilchens ist. Ist die Ruhmasse null, wie bei Photonen oder Gravitonen, so kann sich das Teilchen nur mit der Grenzgeschwindigkeit bewegen. Den Wert von  $c$  liefert das Experiment.

Da man die Grenzgeschwindigkeit „Lichtgeschwindigkeit“ nennt, entsteht der Eindruck, das Licht spiele in

der Relativitätstheorie eine besondere Rolle. Anscheinend müssen sich alle anderen Systeme nach dem Licht richten. Das ist sicher keine glückliche Sicht der Dinge. Alle Körper und Teilchen befolgen unabhängig voneinander dieselben universellen Gesetze.

### Herkunft

Um die Relativitätstheorie herzuleiten, benutzt man als zusätzliches Axiom gewöhnlich nicht die Energie-Masse-Äquivalenz, sondern die Tatsache, dass die Geschwindigkeit des Lichts unabhängig vom Bezugssystem ist. Damit wird dem Licht eine besondere Rolle zugewiesen.

Betrachtet man die fertige Theorie, so sieht man aber, dass sich die Photonen von anderen Teilchen nicht prinzipiell unterscheiden. Sie sind denselben Gesetzen unterworfen, wie alle anderen Teilchen, und unterscheiden sich von diesen nur in den Werten der physikalischen Größen, die sie charakterisieren. Was die Mechanik betrifft, so sind das Ruhmasse und Eigendrehimpuls.

Hinzu kommt, dass man bei der Einführung der Relativitätstheorie gewöhnlich die Kinematik in den Vordergrund stellt. Dabei spielen Lichtuhren und Lichtblitze, die in und neben fahrenden Zügen losgeschickt werden, eine wichtige Rolle. Auch das befördert die Auffassung, das Licht sei ein ausgezeichnetes System. Zu Anfang des 20. Jahrhunderts war das ein natürlicher Standpunkt. Man kannte noch keine Gravitonen, die sich mit  $c$  bewegen, keine Neutrinos, die sich mit fast  $c$  bewegen, und keine Beschleuniger, die viele andere Teilchen auf  $c$  beschleunigen.

### Entsorgung

Man sagt, es gebe für alle Körper und Teilchen eine Grenzgeschwindigkeit. Kein Körper oder Teilchen kann sich schneller bewegen. Photonen und Gravitonen bewegen sich, so weit wir es heute wissen, genau mit der Grenzgeschwindigkeit. Von den Neutrinos glaubte man das auch eine Zeit lang.

## 4.7 Relativitätstheorie und Bezugssystemwechsel

### Gegenstand

Die Spezielle Relativitätstheorie gilt als schwierig. Sie mutet uns zu, Raum und Zeit nicht, wie es unsere Erfahrung nahelegt, als zwei voneinander unabhängige Entitäten zu betrachten, sondern als eine Einheit. Bei Bezugssystemwechsel ändern sich sowohl zeitliche als auch räumliche Abstände.

## Dilatation, Kontraktion, Expansion

### Mängel

Es besteht kein Zweifel darüber, dass die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) schwierig ist. An der Mathematik liegt das gewiss nicht, denn mehr als Wurzelziehen wird vom Lernenden nicht verlangt; es reicht die Mathematik der Mittelstufe. Dass die SRT schwierig ist, muss einen anderen Grund haben, und der scheint auf der Hand zu liegen: die Verschmelzung von Raum und Zeit.

Meine Erfahrung aus vielen Diskussionen sowohl mit Anfängern auf dem Gebiet als auch mit Kollegen, die das Thema schon öfter in der Vorlesung oder im Unterricht behandelt haben, lässt mich etwas anderes vermuten.

Ich möchte einen kleinen Umweg machen. Man stelle sich vor, es ist der letzte Samstag im Oktober, 6 Uhr abends. In der kommenden Nacht geht die Sommerzeit zu Ende. Jemand sagt: „Morgen um diese Zeit ist es schon dunkel.“ Jemand anders sagt: „Morgen um diese Zeit ist es erst 5 Uhr.“ Wer von beiden hat recht?

Kaum jemand kann die Richtigkeit der beiden Aussagen beurteilen, ohne eine Weile nachzudenken. Worin besteht das Problem? Nichts von dem, was Physik und Mathematik an Schwierigkeiten bereithält, kann man dafür verantwortlich machen: keine Vektoranalysis, keine Differenzialgleichungen, keine Raumkrümmung, keine Unschärfebeziehung. Die Ursache, dass wir stolpern, ist nichts weiter als der Wechsel des zeitlichen Bezugssystems. In der SRT hat man es mit Schwierigkeiten derselben Art zu tun, allerdings in gesteigertem Umfang.

Um ein Problem, insbesondere in der Mechanik und der Elektrodynamik, mathematisch zu behandeln, muss man ein Bezugssystem wählen. Die Gefahr, dass man den Überblick verliert, entsteht immer dann, wenn man das Bezugssystem im Verlauf der mathematischen Behandlung wechselt.

Das berühmte Zwillingsparadoxon ist ein Beispiel dafür. Im Prinzip ist es leicht erklärt. Und doch wurden zu seiner Analyse unzählige Artikel geschrieben, Vorträge gehalten, etc. In einem im Übrigen sehr schön und klar geschriebenen Buch zur Relativitätstheorie [1], dessen Autoren sich ausdrücklich vorgenommen hatten, eine Darstellung zu liefern, die mit Mittelstufenmathematik auskommt und trotzdem umfassend und streng ist, nimmt das Zwillingsparadoxon 11 Seiten ein.

Die Schwierigkeiten entstehen dadurch, dass man sich darauf versteift, das Problem, das man in einem vernünftig gewählten Bezugssystem, nämlich dem des nichtreisenden Zwillings, schon gelöst hat und dessen Lösung einfach war, in das Bezugssystem des zweiten Zwillings zu übertragen, was eine ausgesprochen ungeschickte Wahl darstellt, da dieses Bezugssystem nicht frei schwebend ist, sondern einem zeitlich veränderlichen Gravitationsfeld entspricht.

Auch in der klassischen, nichtrelativistischen Physik käme wohl kaum jemand, von Ptolemäus einmal abgesehen, auf die Idee, ein solches Bezugssystem zu wählen.

### Herkunft

Die Relativitätstheorie ist entstanden aus der Forderung nach Bezugssystemunabhängigkeit der physikalischen Gesetze und insbesondere der Lichtgeschwindigkeit. Sie hat aber Ergebnisse geliefert, die weit über die Aussagen, was bei Bezugssystemwechsel passiert, hinausgehen, die also nichts mit Bezugssystemwechseln zu tun haben.

Dass auch heute noch die Konstanz (eigentlich besser Invarianz) der Lichtgeschwindigkeit an den Anfang oder in den Mittelpunkt gestellt wird, ist wieder einmal ein typischer Effekt der Erstarrung der Lehre.

Unglücklicherweise enthält ja auch der Name der Theorie implizit den Bezugssystemwechsel. Dass dieser Name unglücklich gewählt ist, wurde schon sehr früh bemerkt.

### Entsorgung

Die wichtigsten Gleichungen der (speziell-)relativistischen Dynamik lassen sich in wenigen Zeilen herleiten aus der Forderung der Identität von Masse und Energie. Bezugssystemwechsel kommen dabei nicht vor.

Bei der Gelegenheit sei an eine Regel erinnert, die jeder Physiker ohnehin beherzigt, wenn er ein Problem mathematisch beschreibt:

- wähle am Anfang dasjenige Bezugssystem, in dem die Beschreibung am einfachsten ist;
- wechsle das BS nicht im Verlauf des zu beschreibenden Prozesses.

Es mag auch hilfreich sein, das entsprechende Kapitel nicht mit „Relativitätstheorie“ zu überschreiben, sondern, etwa wie Wheeler „Physik der Raumzeit“ [2].

[1] G. Beyvers und E. Krusch, *Kleines 1x1 der Relativitätstheorie*, Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2007, S. 67-77

[2] E. F. Taylor und J. A. Wheeler, *Physik der Raumzeit*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1994

## 4.8 Dilatation, Kontraktion, Expansion

### Gegenstand

Die Begriffe Längenkontraktion und Zeitdilatation

## Mängel

In der Umgangssprache und auch in der Sprache der Technik bezeichnet man mit Kontraktion und Dilatation Vorgänge, d.h. etwas, das in der Zeit abläuft. Etwas war erst länger, später ist es kürzer, es hat sich kontrahiert; etwas ist erst kürzer und dann länger, es dilatiert sich. Das meint man aber nicht, wenn man von Längenkontraktion und Zeitdilatation spricht. Der Wert der Länge oder der Dauer ändert sich nur deshalb, weil man das Bezugssystem wechselt, also, weil man für denselben Vorgang eine andere mathematische Beschreibung wählt.

Dass sich die Werte physikalischer Größen bei Bezugssystemwechsel ändern, ist in der Physik die Regel.

So ändert sich etwa, wenn man das Bezugssystem wechselt, der Wert der kinetischen Energie. Man wird aber nicht sagen, die Energie habe zugenommen. Diese Aussage würde in die Frage münden, wie denn die Änderungsrate  $dE/dt$  der Energie ist.

Wenn man das Bezugssystem wechselt, ändert sich der Wert des Impulses. Man wird aber nicht sagen, der Impuls habe zugenommen, denn dann müsste man die Frage nach der Änderungsrate des Impulses  $dp/dt$  beantworten, und welche Kraft diese Änderung verursacht.

Man könnte denken, dass es sich hier um eine Bagatelle handelt: jeder weiß doch, was gemeint ist. So wäre es vielleicht, wenn es nicht gerade um die Relativitätstheorie ginge.

Der Anfänger lernt mit Mühe, was es mit der Längenkontraktion und der Zeitdilatation auf sich hat. Nichts an dem verkürzten Maßstab hat sich verändert und nichts an der Uhr, die aus Sicht von anderen Uhren langsamer läuft; denn beim Bezugssystemwechsel ist nicht nur der Maßstab kürzer geworden, sondern die ganze Welt, und daher merkt man es nicht, wenn man in dieser Welt lebt.

Dann bekommt er (der Anfänger) es aber mit anderen Themen der Relativitätstheorie zu tun, wo sich auch etwas verlängert oder verkürzt, und er wird es für einen Effekt derselben Art halten, wie beim Bezugssystemwechsel. Etwa das Michelson-Interferometer, mit dem Gravitationswellen nachgewiesen werden. Der Abstand der Spiegel ändert sich, so lernt er, also ändert sich der Lichtweg und damit das Interferenzmuster. Aber ändern sich nicht alle anderen Längen mit: die Wellenlänge des verwendeten Lichts; alle Längenmessgeräte und auch die Körpergröße der Forscher? Dann dürfte die Längenänderung doch gar nicht nachweisbar sein.

Das ist natürlich nicht zutreffend. Man hat es mit einem echten Prozess zu tun, der nicht bei einem Wechsel des Bezugssystems wieder verschwindet. Diese Einsicht

wird erschwert, wenn man die Begriffe „physikalischer Prozess“ und „Bezugssystemwechsel“ nicht deutlich auseinanderhält.

Zu dem Problem trägt auch noch die immer wiederholte Beteuerung bei, es gebe keinen Äther, der Raum sei leer; dann wäre natürlich die Aussage, er dehne sich aus, sinnlos.

## Herkunft

Die Bezeichnung Längenkontraktion war im Rahmen der Lorentz'schen Vorstellungen [1] angebracht. Nach Lorentz' Theorie handelte es sich bei der Längenkontraktion genannten Erscheinung um eine echte Verkürzung der Abstände in materiellen Objekten. Schon in der Vorstellung eines Vorgängers von Lorentz, Fitz Gerald [2], Abb. 4.3, handelt es sich um eine echte Längenänderung.

**LETTERS TO THE EDITOR.**

*\* Correspondents are requested to be as brief as possible. The writer's name is in all cases required as proof of good faith. The editor will be glad to publish any queries consonant with the character of the journal. Twenty copies of the number containing his communication will be furnished free to any correspondent on request.*

**The Ether and the Earth's Atmosphere.**

I HAVE read with much interest Messrs. Michelson and Morley's wonderfully delicate experiment attempting to decide the important question as to how far the ether is carried along by the earth. Their result seems opposed to other experiments showing that the ether in the air can be carried along only to an inappreciable extent. I would suggest that almost the only hypothesis that can reconcile this opposition is that the length of material bodies changes, according as they are moving through the ether or across it, by an amount depending on the square of the ratio of their velocity to that of light. We know that electric forces are affected by the motion of the electrified bodies relative to the ether, and it seems a not improbable supposition that the molecular forces are affected by the motion, and that the size of a body alters consequently. It would be very important if secular experiments on electrical attractions between permanently electrified bodies, such as in a very delicate quadrant electrometer, were instituted in some of the equatorial parts of the earth to observe whether there is any diurnal and annual variation of attraction, — diurnal due to the rotation of the earth being added and subtracted from its orbital velocity; and annual similarly for its orbital velocity and the motion of the solar system.

GEO. FRAS. FITZ GERALD,  
Dublin, May 2.

**Abb. 4.3** Prärelativistische Vorstellung zur Längenkontraktion

## Entsorgung

Darauf achten, dass nicht der Eindruck entsteht, die Lorentz'sche Formel beschreibe einen Prozess. Insbesondere wird man die Bezeichnungen Längenkontraktion und Zeitdilatation vermeiden. Beim Gravitations-Interferometer dagegen spricht man klar aus, dass der Abstand der Spiegel zunimmt; entsprechend bei der Expansion des Universums. Hier kann man von Dilatation und Kontraktion oder von Expansion sprechen, und man tut es ja auch. Wobei man sich die Frage gefallen lassen muss, wer sich denn ausdehnt. Und wenn man das Wort Äther zum Unwort erklärt hat, muss man sich

## Bewegung in der Raumzeit

eine andere Bezeichnung für das expandierende Gebilde überlegen. Wenn man es einfach Raum nennt, so wird man dem Lernenden sicher keinen Gefallen tun. Denn das Vorverständnis dieses Konzepts ist einfach: „Platz für etwas“. Und in diesem Sinne kann der Raum vielleicht größer werden, sich aber nicht ausdehnen.

[1] H. A. Lorentz, *Die relative Bewegung der Erde und des Äthers*, Zittingsverlag, Amsterdam, Akad. v. Wet., 1, 1892, p. 74

[2] G. F. Fitz Gerald, *The Ether and the Earth's Atmosphere*, Science, Vol. XIII, No. 328, Letters to the editor, p. 390

## 4.9 Bewegung in der Raumzeit

### Gegenstand

- 1 „Geodätenhypothese: Ein punktförmiges Objekt bewegt sich auf einer Geodäte durch die Raumzeit. Massive Objekte bewegen sich dabei auf zeitartigen, masselose auf lichtartigen Geodäten.“
- 2 „... as Krikalev hurtled along at 17 000 miles an hour onboard the Mir space station, time did not flow at the same rate for him as it did on Earth.“
- 3 „When mass — be it a star, a planet or a human being — is present, spacetime bends around it so that an object traveling nearby must follow a rounded trajectory that takes it closer to the mass. Just as it is impossible to move in a straight line on the surface of a sphere, it is likewise impossible to move in a straight line through curved spacetime ...“

### Mängel

Die Tatsache, dass man die Welt nicht mehr im dreidimensionalen Raum beschreibt, wo die Zeit nur ein Parameter ist, der die Anordnung der verschiedenen Zustände ermöglicht, sondern in der Raumzeit, bei der Raum und Zeit zu einem einzigen Gebilde verschmolzen sind, hat Konsequenzen für die Sprache, die nicht immer berücksichtigt werden. In der Umgangssprache, die ja immer die Grundlage auch für die Beschreibung physikalischer Erscheinungen ist, ist die Trennung von Raum und Zeit, so wie sie durch die klassische Physik beschrieben wird, fest verankert. Man spricht über Dinge, die passieren, die sich bewegen, von Ereignissen, die die Ursache von späteren Ereignissen sind.

All das klappt nicht mehr so recht, wenn wir die Raumzeit ernst nehmen. Wenn wir bei der Beschreibung von Vorgängen in der Raumzeit die alte Sprache verwenden, müssen wir damit rechnen, dass wir Verwirrung stiften.

Die drei Zitate zeigen das auf drei unterschiedliche Arten. Wir wollen sie nacheinander diskutieren.

- In der klassischen Physik und in der von uns wahrgekommenen Alltagswelt bewegt sich ein Körper auf einer Bahn. Die Bahn ist eine Kurve im Ortsraum, die 4. Dimension, die Zeit, bringen wir dadurch zum Ausdruck, dass wir sagen, der Körper bewege sich auf der Bahn. Auf der Weltlinie kann er sich nicht bewegen. Wenn man sagt, er bewege sich auf einer Weltlinie, so ist man in Gedanken schon wieder bei der Bahnkurve im dreidimensionalen Ortsraum. In der Raumzeit hat das Konzept Bewegung keinen Sinn mehr. Dasselbe trifft auch zu für das Konzept Strom, den wir uns bekanntlich als eine kollektive Bewegung eines Stoffes vorstellen, oder wie im Fall der physikalischen Größen, eines gedachten Stoffes.
- Eine Rate ist in der Physik eine Änderung, die auf ein Zeitintervall bezogen ist. Die Änderungsrate der elektrischen Ladung ist  $\Delta Q/\Delta t$ . In unserem Zitat wird von einer Rate des Flusses der Zeit gesprochen. Aber wie groß ist denn die Rate im Raumschiff und wie groß auf der Erde? Alles, was man in diesem Zusammenhang tun kann, ist, ein Eigenzeitintervall durch ein Koordinatenzeitintervall zu teilen. Rechtfertigt das die Aussage, für Krikalev vergehe die Zeit mit einer größeren Rate als auf der Erde? In der Alltagssprache ist es durchaus üblich zu sagen, man bewege sich in der Zeit, oder die Zeit fliege dahin, oder die Zeit vergehe manchmal schneller und manchmal langsamer. Aber das ist keine Physik, sondern Psychologie.
- Hier haben wir noch einmal die Bewegung durch die Raumzeit, siehe Punkt 1. Hinzu kommt, dass der Autor wohl einfach meint, dass die Lichtstrahlen im Ortsraum gekrümmt sind. Wenn das gemeint ist, wäre es aber übertrieben zu sagen, dass eine gerade Bewegung unmöglich ist: Licht von einem einzigen Stern bewegt sich durchaus geradlinig vom Stern weg. Und schließlich: Wenn sich zwei Linien, die dicht nebeneinander parallel starten, einander annähern oder voneinander entfernen, so kann das zwei Ursachen haben: Entweder die Linien sind krumm oder der Raum ist krumm. Im Fall der Kugeloberfläche wäre es wohl geschickter zu sagen, dass die „Großkreise“ gerade Linien in einem gekrümmten Raum sind. (Es können natürlich auch sowohl die Linien als auch der Raum gekrümmmt sein, und die Wirkung der beiden Krümmungen auf das Linienpaar kann sich sogar aufheben; siehe zwei benachbarte Breitenkreise auf der Erde: Ihr Abstand ändert sich nicht, wenn man auf den Linien forschreitet, obwohl sie als Linien gekrümmmt sind, was jeder Flugzeugpilot oder Schiffskapitän sicher weiß.)

## Herkunft

Wir haben es mit einer Theorie zu tun, die die Grundkategorien unserer Beschreibung der Welt unbrauchbar macht. Den Wissenschaftlern, die die Theorie entwickelt haben, kann man keinen Vorwurf machen, denn das Aufbereiten ihrer Theorie für die Lehre ist nicht unbedingt ihr Job.

Es scheint eher so zu sein, dass sich Lehrer und Publizisten, die die Theorie unters Volk bringen, des Problems nicht hinreichend bewusst sind.

## Entsorgung

Unsere normale Sprache versagt. Die Sprache der Mathematik dagegen funktioniert.

Das Einzige, was man hier empfehlen kann, ist wahrscheinlich, sich vorsichtig auszudrücken.

- Also nicht: „Der Körper K bewegt sich auf der Weltlinie AB“, sondern „AB ist die Weltlinie des Körpers K“.
- Zwischen zwei Uhrenvergleichen ist für Krikalev (und seine Armbanduhr) mehr Zeit vergangen als für seinen Kollegen (und dessen Armbanduhr) auf der Erde. Eventuell auch: Eine Uhr, die die Koordinatenzeit anzeigt, zeigt mehr an, als die Uhr, die die Eigenzeit anzeigt. Oder: Die Zeiger der Eigenzeituhr, bewegen sich schneller als die Zeiger einer Koordinatenzeituhr am selben Ort.
- Eine Geodäte (in einem zwei- oder dreidimensionalen Ortsraum) würde man als gerade bezeichnen, denn sie ist in dem Raum nicht krumm.

## 4.10 Die Relativität der Gleichzeitigkeit

### Gegenstand

Wenn in Schulbüchern die spezielle Relativitätstheorie behandelt wird, ist die Relativität der Gleichzeitigkeit ein wichtiges Thema, ebenso wie Zeitdilatation und Längenkontraktion. Oft wird ein Lehrsatz formuliert, der etwa so lautet: „Gleichzeitigkeit ist relativ.“

### Mängel

Wir sind der Meinung, dass das Thema, im Vergleich zu anderen Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) zu viel Raum einnimmt. Es ist verwickelt, hat aber kaum Auswirkungen auf irgendetwas, das von Belang ist.

Der Fragestellung, ob zwei Ereignisse, die an verschiedenen Orten stattfinden, gleichzeitig sind, entspringt der Überzeugung, dass es eine von Ort und Geschwindigkeit unabhängige Zeit gibt, gewissermaßen

einen Parameter, mit dem man die Zustände der Welt als Ganzem anordnen kann. Um überhaupt eine Antwort auf die Frage geben zu können, muss man ein Verfahren angeben, dass es gestattet von zwei räumlich entfernten Ereignissen zu sagen, ob sie gleichzeitig sind oder nicht. Das tut man, indem man erklärt, wie man Uhren, die sich an verschiedenen Orten befinden, „synchronisiert“.

Um etwas Abstand zu gewinnen, wollen wir eine andere, aber doch ähnliche Frage stellen: Ist auch die „Gleichzeitigkeit“ relativ? In etwas flüssigerer Sprache: Passieren zwei Ereignisse, die für eine Person am gleichen Ort stattfinden, auch für jede andere am gleichen Ort? Mit dem „für eine Person“ und „für jede andere“ meinen wir: „in einem Bezugssystem“ bzw. „in jedem anderen Bezugssystem“. Die Antwort ist natürlich „nein“. Sie ist so selbstverständlich, dass niemand auf die Idee käme, die Frage überhaupt zu stellen.

Dass auch die Aussage über die Gleichzeitigkeit eher unbedeutend ist, sieht man am besten, wenn man sie aus Sicht der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) betrachtet. Denn dort zerrinnt einem die Frage gewissermaßen zwischen den Fingern; der Begriff der Gleichzeitigkeit verliert seinen Sinn, denn man kann zwei baugleiche Uhren im Allgemeinen nicht mehr „synchronisieren“. Es sei denn, man entschließt sich, unter Synchronisation etwas anderes zu verstehen. Etwa die Synchronisation der Uhren im GPS-System: Man montiert in den Satelliten eine Uhr, die, wenn sie ruhend neben der Erduhr stünde, langsamer liefe. Im Satelliten läuft sie dann zu den Erduhren „synchron“: Bei jedem erneuten Vergleich der Satelliten- mit einer der Erduhren zeigen beide dasselbe an. Aber Achtung: Dieses Synchronlaufen ist nicht gemeint, wenn man im Zusammenhang mit der SRT von Uhrensynchronisation spricht.

Wie Längenkontraktion und Zeitdilatation, so hat auch die Relativität der Gleichzeitigkeit mit dem Wechsel des Bezugssystems zu tun. Bezugssystemwechsel geben oft Anlass zu Verwirrung – schon in der klassischen Physik; Verwirrung nicht nur bei den Schülerinnen und Schülern, sondern auch bei gestandenen Physikern [1]. Wenn man das Bezugssystem wechselt, muss man stets im Kopf behalten: Es ändert sich nichts in der Natur oder in der realen Welt. Was sich ändert ist nur die mathematische Beschreibung. Etwas übertrieben könnte man sogar sagen: Die Werteänderungen physikalischer Größen und die sich daraus ergebenden Änderungen in der Interpretation einer Erscheinung bei Bezugssystemwechsel sind Ausdruck einer Unzulänglichkeit der Beschreibung. Leider haben wir aber keine andere Wahl.

Warum hat aber die Relativität der Gleichzeitigkeit keine wichtigen Konsequenzen? Weil die Beziehung

## Geschwindigkeitsaddition

zwischen Ereignissen, die in einem Bezugssystem gleichzeitig sind und in allen anderen nicht, raumartig ist. Das eine der Ereignisse ist mit dem anderen nicht kausal verbunden. Die Umkehr der zeitlichen Reihenfolge hat daher keine Konsequenzen.

### Herkunft

Das Thema Synchronisation und Relativität der Gleichzeitigkeit behandelt Einstein in seiner berühmten Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ [2] gleich am Anfang, und zwar ausführlich auf drei Seiten. Jeder, der sich mit Einsteins Theorie beschäftigt, wird damit als Erstes konfrontiert.

Einstein selbst konnte zu dieser Zeit noch nicht ahnen, was für ein merkwürdiges Ende das Konzept der Gleichzeitigkeit nehmen würde, und zwar durch die Theorie, die er selbst in den folgenden zehn Jahren entwickelte.

Während es 1905 noch ein wichtiges Anliegen zu sein schien, sich mit einer menschlichen Erwartung zu beschäftigen, nämlich, dass man von zwei Ereignissen an verschiedenen Orten und in verschiedenen Bezugssystemen eindeutig entscheiden kann, ob sie gleichzeitig sind oder nicht, offenbart sich dieses Bemühen aus Sicht der ART nur als verzweifelter Versuch, ein Misskonzept unserer Anschauung zu retten.

### Entsorgung

Die Entsorgung ist mit einem Zeitgewinn verbunden: Man verzichtet, wenigstens in der Schule, auf die Behandlung des Themas. Es gibt wichtigere Aussagen im Zusammenhang mit der Raumzeit, die gewöhnlich zu kurz kommen.

[1] F. Herrmann, *Relativitätstheorie und Bezugssystemwechsel*, Altlasten der Physik

[2] A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik und Chemie, Jg. 17, 1905, S. 891–921

## 4.11 Geschwindigkeitsaddition

### Gegenstand

„Wenn wir mithilfe von [...] nach  $u$  auflösen, erhalten wir

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u' + v}{c^2}}.$$

Das ist das relativistische (oder Einstein'sche) Additionstheorem für Geschwindigkeiten.“

### Mängel

Die Formel, um die es hier geht, sagt uns, wie sich die Größe Geschwindigkeit bei einem Bezugssystemwechsel transformiert. Es gibt entsprechende Formeln für die Transformation von Längen und Zeitintervallen, von Energie und Impuls, von elektrischer und magnetischer Feldstärke und von anderen Größen. Nur im Fall der Geschwindigkeit von Addition, statt von Transformation zu sprechen, trägt sicher nicht zur Klarheit bei.

Vor allem sollte man aber nicht vergessen, dass das Wort Addition schon belegt ist, nämlich für die jedem bekannte Rechenoperation.

Hinzu kommt noch, dass man glauben könnte, es wäre grundsätzlich falsch, Geschwindigkeiten auf normale Art, d.h. im Sinn der Mathematik, zu addieren; dabei könnte die Lichtgeschwindigkeit überschritten werden, und das darf ja wohl nicht sein. Dieses Argument ist aber nicht korrekt. Man darf und man muss Geschwindigkeiten addieren, egal wie groß die Summe wird, etwa wenn man den Mittelwert der Geschwindigkeit aus Einzelgeschwindigkeiten berechnen will.

### Herkunft

Einstein selbst spricht von Geschwindigkeitsaddition [1]. Dass man diese Sprechweise so bereitwillig übernimmt, hängt sicher damit zusammen, dass die Transformation im Fall kleiner Geschwindigkeiten tatsächlich auf eine Addition hinausläuft.

### Entsorgung

Wenn man sich auf die Gleichung bezieht, spricht man besser von Transformation als von Addition.

[1]. A. Einstein, *Grundzüge der Relativitätstheorie*, Akademieverlag, Berlin, 1970, S. 39

## 4.12 GPS-Korrektur und ART

### Gegenstand

Die relativistischen Abweichungen, die bei den Uhren in GPS-Satelliten korrigiert werden müssen, sind von zweierlei Art: Die eine kommt von der „Zeitdilatation“, die mit der Geschwindigkeit des Satelliten zu tun hat. Die andere kommt daher, dass sich der Satellit im Gravitationsfeld auf einem höheren Potenzial befindet als die terrestrischen Uhren. Der erste dieser Effekte ist ein speziell-relativistischer Effekt (im Folgenden SRT-Effekt), der zweite, so wird oft gesagt, sei ein Effekt der allgemeinen Relativitätstheorie (ART-Effekt). Manchmal wird behauptet, die Anzeige der Satellitenuhr sei

größer, weil sich der Satellit in einem schwächeren Feld befindet.

### Mängel

Mit dem Effekt, der der ART zugeschrieben wird, gibt es zwei Probleme.

- Er hat nichts mit der Feldstärke am Ort der Uhr zu tun, sondern hängt lediglich vom Potenzial ab. Auch in der Näherung, dass das Feld homogen ist, dass also die Feldstärke unabhängig von der Höhe ist, tritt der Effekt auf.
- Die Aussage, dass es sich um einen ART-Effekt handelt, ist sicher ungeschickt. Man kann natürlich darüber streiten, welche Effekte man der ART zurechnet. Ist allein die Tatsache, dass man die Äquivalenz von träger und schwerer Masse ernst nimmt, eine ART-Aussage? Bedeutet die Tatsache, dass man in ein beschleunigtes Bezugssystem wechselt, dass man ART macht? Wohl eher nicht. Es ist passender, die Abgrenzung zwischen ART- und Nicht-ART-Effekt so zu definieren: Alles, was sich mit einem flachen Minkowski-Raum beschreiben lässt, gehört nicht in die Kategorie der ART-Effekte.
- Wenn man sich an dieses Kriterium hält, ist der Eigenzeit-Unterschied zwischen Uhren in verschiedenen Höhen kein ART-Effekt. Er tritt auch im homogenen Gravitationsfeld auf, und für dieses ist der Riemann-Tensor gleich null, oder in anderen Worten: Man kann das Feld wegtransformieren, indem man in ein frei fallendes Bezugssystem geht.

Wir betrachten das berühmte Beispiel der Zwillinge (A und B), von denen der eine in einem Hochhaus oben wohnt und der andere unten. Sie treffen sich zunächst auf halber Höhe und gleichen ihre Uhren ab. Wenn sie, nachdem sie eine gewisse Zeit oben bzw. untern verbracht haben, ihre Uhren erneut vergleichen, zeigt die Uhr des oberen Zwillings mehr an als die des unteren. Diesen Eigenzeitunterschied kann man bequem mit der SRT erklären, indem man das Hochhaus samt A und B in einem frei schwebenden Bezugssystem beschreibt. Man nimmt an, dass eine dritte Person C beim ersten Uhrenvergleich von A und B hochspringt, und zwar so, dass sie beim zweiten Uhrenvergleich wieder bei den Zwillingen A und B ankommt. Die Person C ist zwischen den beiden Ereignissen frei schwebend oder fallend, während sich die Zwillinge und das Hochhaus beschleunigt entfernen und wieder zurückkommen. Den Unterschied zwischen den Eigenzeiten der beiden Zwillinge kann C mit seinem schwebenden Bezugssystem mit den Mitteln der SRT bestimmen. Der Effekt ist von derselben Art wie beim klassischen Zwillingsparadoxon, bei dem die Zwillinge auf

## Der Äther und das Vakuum

unterschiedlichen Weltlinien von einem Raumzeitpunkt zu einem anderen gelangen.

### Herkunft

Bei der Behauptung, der Effekt hänge mit einer unterschiedlichen Feldstärke zusammen, mag das Argument so sein: die Tatsache, dass die eine Uhr schneller läuft als die andere muss eine lokale Ursache haben; irgendetwas am Ort der Uhren muss unterschiedlich sein. Die Natur der Raumzeit wurde also nicht verstanden.

Dass es sich um einen ART-Effekt handelt, mag man so zu begründen versuchen: Immer wenn ein Gravitationsfeld im Spiel ist, gilt die SRT nicht mehr. Man kann ja das Feld nur dadurch wegtransformieren, dass man sich beschleunigt bewegt. Beschleunigungen, so scheint man zu glauben, gehören aber nicht in die SRT.

### Entsorgung

Man behandelt beide Effekte im Rahmen der SRT.

## 4.13 Der Äther und das Vakuum

### Gegenstand

Den Äther als Träger von elektromagnetischen Feldern gibt es nicht, er ist eine „unnötige Annahme“. „Die Vorstellung eines Äthers [...] als Träger elektromagnetischer Wellen im Vakuum, wurde erst in der Relativitätstheorie überwunden.“

### Mängel

Man kann ein Problem nicht dadurch aus der Welt schaffen, dass man behauptet, es gebe den Gegenstand der Betrachtung nicht. Das Problem war das merkwürdige Verhalten des Äthers bei Bezugssystemwechsel, das sich zum Beispiel im Michelson-Morley-Experiment äußert. Die Existenz eines Äthers wurde zwar einige Jahrzehnte lang durchaus ernsthaft infrage gestellt, und einige Wissenschaftler hätten ihn gern aus der Physik verbannt. Auf jeden Fall wurde er aber bald nach dieser teilweisen Verbannung offiziell wieder eingeführt, allerdings unter einem neuen Namen (man könnte fast denken, damit keiner die Blamage bemerkt). Damit wäre die Sache im Grunde wieder in Ordnung gebracht, wenn nicht in sehr vielen Büchern der Raum immer noch leer wäre, wie die Zitate belegen, und wie man auch daran sieht, wie der Feldbegriff eingeführt wird: Ein Feld ist leerer Raum mit Eigenschaften. Nach moderner Auffassung ist ein Feld ein angeregter Zustand dieses neuen Äthers. Noch ein kleinerer Mangel, der aber durchaus mehr als nur ein Schönheitsfehler ist: Der neue Äther trägt den Namen

## Das Michelson-Morley-Experiment

Vakuum. Wer etwas Sensibilität für die Sprache hat, wird Anstoß daran nehmen, dass etwas Vorhandenes eine Bezeichnung bekommen hat, die gerade ein Nichtvorhandensein zum Ausdruck bringt.

### Herkunft

Aus der Tatsache, dass das Michelson-Morley-Experiment unerwartet ausgegangen war, folgte, dass eine neue Theorie her musste, die die altehrwürdige Mechanik ablöst. Die Existenz des Äthers in Abrede zu stellen, war nur eine Verzweiflungstat. Gelöst wurde das Problem dadurch nicht. Mit der allgemeinen Relativitätstheorie und später erst recht mit der Quantenphysik und der Quantenelektrodynamik ist die Schimäre des leeren Raums wieder verschwunden, und der Äther kam unter neuem Namen zurück. Auf keinen Fall sollte Einstein als Zeuge gegen den Äther angeführt werden, denn für ihn hatte der Äther nie aufgehört zu existieren [1].

### Entsorgung

Es mag Situationen geben, in denen es gerechtfertigt ist, über den leeren Raum zu sprechen, so wie sicher nichts dagegen einzuwenden ist, von einer leeren Flasche zu sprechen. Eine leere Schnapsflasche ist bekanntlich eine Flasche, in der sich kein Schnaps befindet. Dass keine Luft oder kein Licht mehr in der Flasche ist, ist mit dem „leer“ nicht gemeint. Es gibt aber Zusammenhänge, in denen Aussagen über den leeren Raum Ursache größerer Lernschwierigkeiten sind: wenn man nämlich zu verstehen gibt, im leeren Raum befindet sich gar nichts, oder es befindet sich dort das Nichts. Man gehe also mit dem leeren Raum sparsam um. Vor allem, wenn es um die Einführung des Feldbegriffs geht, sollte man ihn vermeiden [2].

[1] A. Einstein, *Äther und Relativitätstheorie*, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1920, S. 12: „Diese raum-zeitliche Veränderlichkeit der Beziehungen von Maßstäben und Uhren zueinander [...], hat die Auffassung, dass der Raum physikalisch leer sei, wohl endgültig beseitigt.“ – S. 15: „Gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie ist ein Raum ohne Äther undenkbar; denn in einem solchen gäbe es nicht nur keine Lichtfortpflanzung, sondern auch keine Existenzmöglichkeit von Maßstäben und Uhren, also auch keine raum-zeitlichen Entfernung im Sinne der Physik. Dieser Äther darf aber nicht mit der für ponderable Medien charakteristischen Eigenschaft ausgestattet gedacht werden, aus durch die Zeit verfolgbaren Teilen zu bestehen; der Bewegungsbegriff darf auf ihn nicht angewendet werden.“

[2] F. Herrmann, *Das Feld als Raumbereich mit Eigenschaften*, Altlasten der Physik

## 4.14 Das Michelson-Morley-Experiment

### Gegenstand

„Die Einführung eines ‘Lichtäthers’ wird sich insofern als überflüssig erweisen, als nach der zu entwickelnden Auffassung weder ein mit besonderen Eigenschaften ausgestatteter ‘absolut ruhender Raum’ eingeführt, noch einem Punkte des leeren Raumes, in welchem elektromagnetische Prozesse stattfinden, ein Geschwindigkeitsvektor zugeordnet wird.“ [1]

„Es lässt sich also keine experimentelle Basis für die Vorstellung eines bevorzugten Bezugssystems, eines Äthers, finden, weder für einen ruhenden, noch für einen mitgeführten.“ [2]

### Mängel

Die Experimente von Michelson und Morley haben gezeigt, dass die Lichtgeschwindigkeit unabhängig vom Bezugssystem ist. Dieser Versuchsausgang hatte für die Physik verschiedene Konsequenzen. Eine davon war von epochaler Wichtigkeit: Es entstand die Relativitätstheorie. Die andere hat damit nur mittelbar etwas zu tun: Man schloss, dass es keinen Äther gibt. Beide Konsequenzen werden oft im Zusammenhang formuliert – fast so, als wäre die Nichtexistenz eines Äthers einfach eine der zahlreichen neuen Aussagen der Relativitätstheorie. Tatsächlich wird sie manchmal auch nur nebenbei erwähnt, wie etwa in Einsteins Arbeit von 1905 [1]; oder es wird unterstellt, dass die Nichtexistenz eines ausgezeichneten Bezugssystems mit der Aussage, es gebe keinen Äther, identisch sei, siehe unser zweites Zitat.

Dass es sich dabei um verschiedene Aussagen handelt, und dass die eine nicht aus der anderen folgt, wollen wir mit einem Gedankenexperiment zeigen. Ein Auto fahre mit hoher Geschwindigkeit auf einem Transportband, das zunächst ruht. Die Geschwindigkeit des Autos relativ zu seiner Unterlage sei fast gleich der Grenzgeschwindigkeit  $c$ . Wir schalten nun das Transportband ein, und zwar zunächst so, dass es sich in dieselbe Richtung wie das Auto bewegt. Wir würden feststellen, dass sich das Auto praktisch immer noch mit  $c$  bewegt. Und auch wenn wir das Transportband in die andere Richtung laufen lassen, würde die Geschwindigkeit des Autos nahezu gleich  $c$  bleiben. Nehmen wir nun an, dieses Experiment sei anstelle des Michelson-Morley-Experiments gemacht worden. Was hätte man daraus geschlossen? Man hätte geschlossen, dass es eine Grenzgeschwindigkeit gibt und dass Geschwindigkeiten bei Bezugssystemwechsel nicht einfach addiert werden. Diese Feststellung hätte dann vielleicht zur speziellen Relativitätstheorie geführt. Man hätte aber aus der

Beobachtung des Autos sicher nicht abgeleitet, dass der Träger des Autos, nämlich das Transportband, nicht existiert. Genau ein solcher Schluss wurde aber beim echten Michelson-Morley-Experiment gezogen: Aus der Tatsache, dass sich die Geschwindigkeit des Lichts bei Bezugssystemwechsel nicht ändert, wurde geschlossen, dass ein Träger der Lichtwelle nicht existiert.

### Herkunft

Solange es die Relativitätstheorie noch nicht gab, schien der Schluss auf die Nichtexistenz des Äthers die einzige mögliche Interpretation des Michelson-Morley-Ergebnisses zu sein. Durch die Einstein'sche Theorie wurde das Problem aber auf eine völlig andere Art gelöst. Dass Einstein selbst zunächst meinte, der Äther sei überflüssig, darf man wohl als Ausrutscher einstufen. Bald darauf schreibt er ja auch: „... einen leeren Raum, d.h. einen Raum ohne [Gravitations-]Feld, gibt es nicht“ [3], und etwas später noch deutlicher: „Gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie ist ein Raum ohne Äther undenkbar;...“ [4]

### Entsorgung

Man lasse den Äther aus dem Spiel, solange man es nicht wirklich mit ihm zu tun hat. Man verfängt sich sonst nur allzu leicht im Wirrwarr der Begriffe Äther, Raum, Gravitationsfeld und Vakuum. Und man folge Einstein auch bis zu seinen jüngeren Aussagen über den Äther.

[1] A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik und Chemie, Jg. 17, 1905, S. 891-921

[2] R. Resnick, *Einführung in die spezielle Relativitätstheorie*, Stuttgart, Ernst Klett, Klett Studienbücher Physik, 1968, S. 35

[3] A. Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, WTB, Akademieverlag, Berlin, 1973, S. 125

[4] A. Einstein, *Äther und Relativitätstheorie*, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1920, S.12

zu untersuchen, handelt, ist kaum nötig zu bemerken. Ueber den absoluten Raum und die absolute Bewegung kann niemand etwas aussagen, sie sind bloße Gedankendinge, die in der Erfahrung nicht aufgezeigt werden können.“ [2]

3 „Dazu war es nötig, die Worte „absolute Zeit“, „absoluter Raum“ als unbewiesene, ungeprüfte magische Vorurteile vorrelativistischer Physik zu entlarven.“ [3]

### Mängel

Man kann die Phänomene der Gravitation in zwei Klassen einteilen.

Die einen haben zu tun mit der Gravitationswechselwirkung von Körpern, die sich nicht beschleunigt gegeneinander bewegen. Sie werden klassisch durch das Gravitationsgesetz beschrieben und sind den Erscheinungen der Elektrostatik sehr ähnlich. Man könnte sie als gravitostatisch bezeichnen. Die Körper spüren den Teil des Gravitationsfeldes, den man über das bekannte Vektorfeld der Gravitationsfeldstärke beschreibt.

Die anderen Erscheinungen treten auf, wenn Körper beschleunigt werden. Statt durch ein Feld beschreibt man diese Wirkungen heute (zusammen mit den statischen) mit der Allgemeinen Relativitätstheorie, d.h. mithilfe des metrischen Tensors. Ein Körper spürt sie, wenn er relativ zu anderen Körpern beschleunigt wird. Das Abstandsverhalten der entsprechenden Kräfte ist anders als das der statischen Gravitationskraft: Körper in größerer Entfernung haben ein größeres Gewicht [4]. Daher spürt man Beschleunigungskräfte nur relativ zu den riesigen weit verteilten Massen im Kosmos, während die Beschleunigung von näheren Körpern bisher noch nicht nachgewiesen wurde. Sie würde sich im Lense-Thirring-Effekt (auch gravitomagnetischer Effekt genannt) äußern. Man ist aber überzeugt, dass dieser Effekt existiert.

Wie ging Newton mit diesen beiden Effekten um? Den ersten, den gravitostatischen beschrieb er bekanntlich mit seinem Gravitationsgesetz. Dass diese Gravitationswirkung nach seiner Theorie über eine Distanz vermittelt wird, empfand er als einen Mangel, und er sagte das auch sehr deutlich. Sein Unbehagen ließ ihn aber nicht so weit gehen, ein Medium einzuführen, das die Bewegungsmenge (quantitas motus) übertragen könnte. Wir kennen alle sein „*Hypotheses non fingo*“.

Eigentlich wäre es konsequent gewesen, als Ursache des zweiten Effektes – der Trägheitskräfte – die Sterne anzunehmen, so wie es der etwas jüngere George Berkeley vorschlug. Hier hat Newton eine Interpretationsmöglichkeit vorgezogen, die eigentlich die gesundere ist. Die Beschleunigungskräfte kommen nicht durch entfernte

## 4.15 Der absolute Raum

### Gegenstand

1 „Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand stets gleich und unbeweglich.“ [1]

2 „Dass Newton auch in den eben mitgetheilten Überlegungen gegen seine Absicht, nur das Thatsächliche

## Der absolute Raum

Körper zustände, sondern durch den „absoluten Raum“, d. h. durch etwas, das sich am selben Ort wie der Körper befindet. Er benutzt hier also eine lokale Beschreibung. Man kann es auch so sehen: Mit seinem absoluten Raum hat er das eingeführt, was man später ein Feld nannte und was schließlich in der Raumzeit aufging.

Die Mach'sche Kritik an Newton greift also etwas kurz, und das etwas blindwütige Einschlagen auf den absoluten Raum – und damit auch auf seinen Erfinder – fördert nicht gerade eine distanzierte Beurteilung der Newton'schen Ideen.

### Herkunft

Sie wurde unter „Mängel“ bereits angedeutet. Ein Grund dafür, dass wir die statischen und die dynamischen Gravitationswirkungen so unterschiedlich behandeln, mag sein, dass eine Fernwirkungstheorie der Beschleunigungswirkungen nicht rechtzeitig entstanden ist, obwohl das Programm dafür durch Berkeley eigentlich vorgegeben war.

### Entsorgung

Etwas mehr Respekt vor Newtons absolutem Raum. Die Idee war nicht so schlecht, wie sie oft gemacht wird.

- [1] I. Newton, aus E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Brockhaus, Leipzig, 1897, S. 221
- [2] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Brockhaus, Leipzig, 1897, S. 223
- [3] Dorn-Bader, *Physik*, Gymnasium Gesamtbund, Schroedel, Hannover, 2000, S. 405
- [4] D. W. Sciama, *The Physical Foundations of General Relativity*, Doubleday & Company, New York, 1969, S. 22-3

# 5 THERMODYNAMIK

## 5.1 Entropie

### Gegenstand

Als Entropie  $S$  wird eine Größe bezeichnet, die in der klassischen Thermodynamik als eine durch ein Integral definierte, abstrakte Funktion eingeführt wird. Dieser Zugang verleiht der Größe einen derart abgehobenen Charakter, dass selbst die Spezialisten ihres Faches Mühe im Umgang mit diesem Begriff haben. Inzwischen kennt man andere, leichtere Zugänge, die die Entropie in die Reichweite des Schulunterrichts gerückt haben. Zurzeit ist ihre Deutung als Unordnungsmaß ein vor allem unter Chemikern beliebter Ansatz, um wenigstens ein grobes Verständnis von ihrer Bedeutung zu vermitteln.

### Mängel

Dass die Entropie qualitativ erfassbar wird, ist zwar ein Fortschritt, genügt aber nicht dem Anspruch eines Physikers. Ihm gilt eine Größe erst dann als definiert, wenn er ein direktes oder indirektes Verfahren zu ihrer Quantifizierung angeben kann. Störend ist auch der Umstand, dass der makroskopisch definierbaren Größe anscheinend kein einfaches makroskopisches Merkmal zugeordnet werden kann.

### Herkunft

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde mit zunehmender Erfahrung immer deutlicher, dass die von S. Carnot und anderen angenommene Erhaltung der Wärme unhaltbar ist. Das veranlasste R. Clausius im Jahre 1850, eine Neuordnung der Wärmelehre aufgrund der Annahme zu versuchen, dass Wärme und Arbeit ineinander umwandelbar sind [1]. Im Zuge dieser Umgestaltung konstruierte Clausius auch die Größe  $S$ , um die Beschränkungen beschreiben zu können, denen diese wechselseitige Umwandlung unterliegt.

### Entsorgung

In einem Festvortrag vor der Physical Society of London wies ihr damaliger Präsident H. Callendar [2] im Jahre 1911 darauf hin, dass  $S$  nichts weiter ist als eine komplizierte, abstrakte Rekonstruktion derjenigen Größe, die bei Carnot Wärme hieß. Der einzige Unterschied war, dass die Wärme nun erzeugbar, aber wie bisher unzerstörbar war. Diese Erkenntnis kam ein halbes Jahrhundert zu spät, um die Entwicklung noch korrigieren zu können. Man kann aber daraus schließen, dass die Größe  $S$  nicht nur eine ähnlich sinnfällige Bedeutung besitzen muss wie die Wärme früher, sondern auch auf ähnlich einfache Weise quantifizierbar sein muss. Dadurch sollte sich das formalistische Gespenst  $S$  der klassischen Thermodynamik auf einen bereits für Mittelstufenschüler fassbaren und handhabbaren Begriff reduzieren und zugleich das damit überflüssig werdennde Arsenal mathematischer Hilfsmittel entsorgen lassen. Diese Erwartung wird inzwischen durch vielerlei Schulerfahrung bestätigt [3]. In der Rolle der Wärme wird  $S$  selbst unter dem nichtssagenden Namen Entropie zu einer Größe, die kaum anspruchsvoller ist als die Begriffe Länge, Dauer, Masse. Dass die Größe in der Informatik, der statistischen Physik oder den atomistischen Vorstellungen der Chemiker in einem anscheinend ganz anderen Gewand auftritt, steht ihrer Rolle als Wärme in der Makrophysik keineswegs im Wege.

[1] G. Job, *Äquivalenz von Wärme und Arbeit*, Altlasten der Physik

[2] H. L. Callendar, Proc. Phys. Society of London 23, 1911, S. 153. Hier findet sich auch der Vorschlag, die Einheit J/K, die heute die gesetzliche Entropieeinheit ist, als „Carnot“ zu bezeichnen.

[3] neben den Erfahrungen einzelner Lehrer auch ein Großversuch im Rahmen der Erprobung des Karlsruher Physikkurses

## Der Entropiesatz

### 5.2 Der Entropiesatz

#### Gegenstand

Der zweite Hauptsatz begegnet den Studierenden in verschiedenen Formulierungen.

- 1 Wärme fließt von selbst immer nur vom wärmeren zum kälteren Körper, nie umgekehrt.
- 2 Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die nichts anderes tut als Wärme in Arbeit zu verwandeln.
- 3 Es gibt irreversible Vorgänge.

#### Mängel

Der zweite Hauptsatz macht eine einfache Aussage über die Entropie: Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden. Wir wollen ihn in dieser Form Entropiesatz nennen. Er gehört damit in die Reihe von ähnlichen Aussagen über die Erhaltung oder Nichterhaltung mengeartiger Größen. Nur selten wird er aber so ausgesprochen. Stattdessen formuliert man ihn oft, ohne den Begriff Entropie zu verwenden. Wie ist das aber überhaupt möglich? Indem man Konsequenzen aus dem „unsymmetrischen“ Verhalten der Entropie beschreibt.

Diese Art, mit der Kernaussage des zweiten Hauptsatzes umzugehen, hat Nachteile.

Wir wollen einige Formulierungen, die bekannten Lehrbüchern entnommen sind, die zum Teil auf die Arbeiten der großen Thermodynamiker Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts zurückgehen, diskutieren.

- Clausius, dem ja die Erfindung oder Einführung der Entropie zugeschrieben wird, formulierte den zweiten Hauptsatz auf verschiedene Arten, unter anderem so: „Die Wärme kann nicht von selbst aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen.“ [1]
- Ganz ähnlich findet man diese Aussage auch in modernen Lehrbüchern, etwa: „Ein Prozess, bei dem letztlich nichts anderes geschieht, als dass Wärmeenergie einem kälteren Reservoir entnommen und dieselbe Menge an Wärmeenergie einem wärmeren Reservoir zugeführt wird, ist unmöglich.“
- oder: „Wärme fließt von selbst immer nur vom wärmeren zum kälteren Körper, nie umgekehrt.“

Wenn wir es uns nicht versagen, das Wort Entropie zu verwenden, können wir den verbotenen Prozess, von dem in den vorstehenden Aussagen die Rede ist, auch so beschreiben: Wärme  $Q$  geht nicht von selbst von einem kälteren zu einem wärmeren Körper über. Wegen der Gültigkeit von

$$dQ = T dS \quad (5.1)$$

ist mit einem Wärmestrom ein Entropiestrom verbunden. Es gilt also auch: Entropie fließt von selbst

immer nur vom wärmeren zum kälteren Körper. Nun wird beim Übergang der Entropie vom wärmeren zum kälteren Körper zusätzliche Entropie erzeugt. Beim umgekehrten Vorgang müsste also Entropie vernichtet werden. Das verbietet aber der zweite Hauptsatz.

Wir sehen, dass der Satz im Wesentlichen dieselbe Aussage macht, wie etwa der folgende: *Wasser fließt von selbst immer nur den Berg hinunter, nie umgekehrt.*

Auch diese Tatsache folgt aus dem zweiten Hauptsatz und könnte als Ersatzaussage für den Entropiesatz herhalten. Dass wir sie als trivial empfinden, weist darauf hin, dass die Konsequenzen aus dem zweiten Hauptsatz zu unseren alltäglichen Erfahrungen gehören. Auch die Aussage, dass die Wärme von heiß nach kalt und nicht umgekehrt fließt, ist für den, der beginnt, die Thermodynamik zu lernen, keine Neuigkeit. Wenn man diese Aussagen oder Beobachtungen im Zusammenhang mit dem zweiten Hauptsatz diskutiert, so wäre es sicher angebracht, auch die anderen Erscheinungen, bei denen ein dissipativer Strom fließt, zu nennen: Elektrische Ladung fließt von selbst von Stellen höheren zu Stellen niedrigeren elektrischen Potenzials, eine chemische Reaktion läuft so, dass das chemische Potenzial der Produkte niedriger ist als das der Edukte, Impuls geht bei einem Reibungsvorgang vom Körper höherer zum Körper niedrigerer Geschwindigkeit, etc.

- Auch Planck gibt für den zweiten Hauptsatz mehrere Formulierungen an, darunter: „Es ist unmöglich, eine periodisch funktionirende Maschine zu konstruiren, die weiter nichts bewirkt als Hebung einer Last und Abkühlung eines Wärmereservoirs.“ [2]
- Und auch in dieser Form findet man den zweiten Hauptsatz in verschiedenen moderneren Lehrbüchern, etwa: „Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die nichts anderes bewirkt als Erzeugung mechanischer Arbeit und Abkühlung eines Wärmebehälters.“
- oder: „Es ist unmöglich, eine zyklisch arbeitende Wärmekraftmaschine zu konstruiren, die keinen anderen Effekt bewirkt, als Wärme aus einem einzigen Reservoir zu entnehmen und eine äquivalente Menge an Arbeit zu verrichten.“

Wegen Gleichung (5.1) sind diese Aussagen äquivalent zu der Feststellung, dass Entropie nicht vernichtet werden kann. Dass sie erzeugt werden kann, wird hier nicht gesagt. Die Sätze sind also nur zu der einen Hälfte des Entropiesatzes äquivalent: Entropie kann nicht vernichtet werden. Sie machen damit eine ähnliche Aussage wie der folgende Satz: „Es gibt kei-

ne periodisch arbeitende Maschine, die nichts anderes bewirkt als Erzeugung mechanischer Arbeit und Entladung eines elektrisch geladenen Körpers.“

Diese hypothetische Maschine kann nicht funktionieren, da die Ladung nicht vernichtet werden kann, sondern irgendwo bleiben muss.

- Das Bestreben, den zweiten Hauptsatz ohne Erwähnung der Entropie zu formulieren, treibt manchmal merkwürdige Blüten.

Im Gerthsens/Meschede [3] wird er herunter gebrochen auf die kurze Aussage: „**Es gibt irreversible Vorgänge.**“ Der Satz ist als Lehrsatz hervorgehoben. Er beschreibt eine triviale Erfahrung, die auch jedem, der nicht physikalisch gebildet ist, bekannt ist. Er lässt keinen Schluss auf eine physikalische Ursache der Irreversibilität zu. Als Physiker kann man aus ihm bestenfalls schließen, dass irgendeine der extensiven Größen entweder erzeugbar und nicht vernichtbar (wie die Entropie), oder auch vernichtbar aber nicht erzeugbar ist.

Wenn man mit einer solchen Aussage zufrieden ist, könnte man gleich einen weiteren Lehrsatz von ähnlicher Aussagekraft nachschieben: Es gibt reversible Vorgänge.

Aus diesem wäre dann der Schluss zu ziehen, dass eine oder mehrere Größen erhalten sind, wobei man aber auch hier nicht wüsste, welche es sind.

- Bemerkenswert ist auch, dass man den zweiten Hauptsatz häufig auf mehrere Arten formuliert; dass man also mehrere Konsequenzen aus dem Entropiesatz als alternative Formulierungen des zweiten Hauptsatzes einführt – ein Hinweis darauf, dass die Autoren selbst mit keinem Einzigem so recht glücklich sind. So werden im Macke [4] fünf verschiedene Formulierungen in einem Lehrsatz-Kasten zusammengefasst. Niemand käme auf die Idee, entsprechend mit der Erhaltung der elektrischen Ladung umzugehen, was durchaus möglich wäre.

## Herkunft

Der zweite Hauptsatz konnte zunächst noch nicht in seiner einfachen, modernen Form formuliert werden, denn als die Entropie durch Clausius eingeführt worden war, war noch nicht klar, dass diese Größe zu einer Klasse von Größen mit bestimmten besonders einfachen Eigenschaften gehört: den bilanzierbaren oder mengenartigen Größen. Zu jeder von ihnen lassen sich eine Dichte, eine Stromstärke und eine Stromdichte und gegebenenfalls eine Erzeugungsrate definieren. Zu ihnen gehören unter anderen die elektrische Ladung, der Impuls und die Masse. Dass auch die Entropie zu dieser Größenklasse gehört wurde erst nach und nach klar.

• Unter diesen Umständen war es schwer, den Satz leicht verständlich zu formulieren. Clausius selbst gibt mehrere Versionen an, etwa [5]: „**Die algebraische Summe aller in einem Kreisprozesse vorkommenden Verwandlungen kann nur positiv seyn.**“

- oder [6]: „**Nennt man zwei Verwandlungen, welche sich, ohne dazu eine sonstige bleibende Veränderung zu erfordern, gegenseitig ersetzen können, äquivalent, so hat die Entstehung der Wärmemenge  $Q$  von der Temperatur  $T$  aus Arbeit den Aequivalenzwerth**

$$\frac{Q}{T},$$

und der Uebergang der Wärmemenge  $Q$  von der Temperatur  $T_1$  zur Temperatur  $T_2$  den Aequivalenzwerth

$$Q \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

worin  $T$  eine von der Art des Prozesses, durch welchen die Verwandlung geschieht, unabhängige Temperaturfunktion ist.“

- oder [7]: „**Wenn man dann das Wärmeelement durch die dazugehörige absolute Temperatur dividiert, und den dadurch entstehenden Differentialausdruck für den ganzen Kreisprozess integriert, so gilt für das so gebildete Integral die Beziehung:**

$$\int \frac{dQ}{T} \leq 0,$$

worin das Gleichheitszeichen in solchen Fällen anzuwenden ist, wo alle Veränderungen, aus denen der Kreisprozess besteht, in umkehrbarer Weise vor sich gehen, während in solchen Fällen, wo die Veränderungen in nicht umkehrbarer Weise geschehen, das Zeichen  $<$  gilt.“

- Aber auch wie oben schon zitiert: „**Die Wärme kann nicht von selbst aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen.**“ [1]

Die drei ersten dieser Aussagen sind heute ohne weitere Erklärungen kaum noch zu verstehen. Sie machen verständlich, warum man den zweiten Hauptsatz für ein schwieriges Thema hielt.

Dass es sich bei der Entropie um eine bilanzierbare Größe handelt, ist bei Clausius noch nicht zu erkennen. Die Literatur dieser Zeit beschäftigt sich vor allem damit, die Auswirkungen der neuen „Einsicht“, dass Wärme eine Energieform ist, auf die Arbeit von Carnot zu diskutieren. Carnots Wärmebegriff ist so beschaffen, dass in eine Wärmekraftmaschine genau so viel „Wärme“ auf hoher Temperatur ein- wie auf niedriger wieder

## Der Entropiesatz

austritt. Wenn man die Wärme als Energie interpretiert, so verlässt die Maschine aber weniger „Wärme“ als eintritt. Hieraus wurde geschlossen, dass Carnot sich geirrt habe, denn es wurde als selbstverständlich unterstellt, dass Wärme etwas Naturgegebenes ist, und dass man ihre wahre Natur, nämlich eine Energieform zu sein, aufgedeckt hatte. Unter dieser Annahme hätte aber Carnot Unrecht. Nur langsam deutete sich an, dass Carnots Aussagen nicht falsch waren. Man hatte es einfach mit zwei verschiedenen Begriffen zu tun. Carnots Wärme war einfach eine andere physikalische Größe als die Energie-Wärme. Carnots Wärmebegriff deckte sich mit der neu eingeführten Größe Entropie, was auch bedeutete, dass die von Clausius eingeführte Größe gar nicht so neu war.

- Ostwald sagt es 1908 in recht klarer Form [8]: „Die Größe aus der Wärmelehre aber, welche man mit der Wassermenge vergleichen könnte, ist dem allgemeinen Bewusstsein noch ganz ungewohnt. Sie hat den wissenschaftlichen Namen Entropie erhalten und spielt eine ihrer Bedeutung angemessene Rolle in der Theorie der Wärmeerscheinungen. Aber in die Schule und somit in die Kenntnisse des Durchschnittsgebildeten ist der Gebrauch dieser Größe noch nicht eingedrungen und so muss hier die Nachricht genügen, dass sie wirklich der Wassermenge vergleichbar ist, insofern sie sich beim Durchgang durch die (ideale) Maschine gleichfalls ihrer Menge nach nicht ändert.“

Ostwald bezieht sich hier auf den Carnot'schen Vergleich der Wärmekraftmaschine mit einem Wasserrad.

Dass man das Carnot'sche Caloricum nicht mit der Energie, sondern mit der Entropie zu identifizieren hat, und dass die Clausius'sche Einführung der Entropie unnötig kompliziert ist, wurde schließlich drei Jahre später von Callendar gezeigt [9,10].

Im selben Jahr 1911 publizierte Jaumann [11] eine Arbeit, in der er für die Entropie eine Bilanzgleichung formuliert. Es gibt dort einen Entropiestrom, eine Entropiedichte, eine Stromdichte und eine Erzeugungsrate.

Spätestens zu diesem Zeitpunkt war es also möglich, den zweiten Hauptsatz in einer Art zu formulieren, die analog ist zu den Erhaltungssätzen für Energie, Impuls oder elektrische Ladung: **Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden, Impuls kann weder erzeugt noch vernichtet werden, elektrische Ladung kann weder erzeugt noch vernichtet werden.**

Diesen Schritt sind nur wenige Lehrbücher gegangen. So findet man etwa im Grimsehl [12]: „**In einem abgeschlossenen System spielen sich Vorgänge stets so ab, dass die Entropie niemals abnimmt.**“

oder im Joos [13]: „**Alle in einem abgeschlossenen System auftretenden Zustandsänderungen laufen so, dass die Entropie zunimmt.**“

Beide Bücher sind schon etwas betagt. Man erkennt daran, dass eine Lehrgewohnheit, die sich einmal etabliert hat, auch durch bessere Einsicht einiger, nicht mehr auszurotten ist. Mehr als hundert Jahre nach Ostwald ist die Entropie immer noch nicht in „die Kenntnisse des Durchschnittsgebildeten eingedrungen“.

## Entsorgung

Die Entsorgung ist besonders einfach: Man führe die Entropie im Carnot'schen Sinn als Wärmemengenmaß ein. Dann sagt der zweite Hauptsatz, dass Wärme erzeugt, aber nicht vernichtet werden kann, was auch jeder physikalische Laie aufgrund seiner alltäglichen Erfahrung bestätigen kann.

- [1] R. Clausius, *Zur Geschichte der mechanischen Wärmetheorie*, Annalen der Physik, Band 221, Heft 1, 1872, S. 132
- [2] M. Planck, *Thermodynamik*, Verlag von Veit & Comp., Leipzig, 1897, S. 80
- [3] D. Meschede, *Gerthsen Physik*, 21. Auflage, Springer, Berlin, 2002, S. 248
- [4] W. Macke, *Thermodynamik und Statistik*, Akademische Verlagsgesellschaft, Geest & Portig K.-G., Leipzig, 1962, S. 120
- [5] R. Clausius, *Über eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie*, Annalen der Physik und Chemie, Band XCIII, 1854, S. 504
- [6] R. Clausius, *Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie*, Erste Abtheilung, Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1864, S. 143
- [7] R. Clausius, *Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie*, Zweite Abtheilung, Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1867, S. 3
- [8] W. Ostwald, *Die Energie*, Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1908, S. 77
- [9] H. L. Callendar, *The caloric theory of heat and Carnot's principle*, Proc. Phys. Soc. London 23, 1911, S. 153
- [10] H. L. Callendar, *Science*, Vol. XXXVI, No. 924, 1912, S. 321
- [11] F. Jaumann, *Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze*, Wiener Berichte CXX, Abt. IIa, 1911, S. 385 – 530
- [12] W. Schallreuter, Grimsehl, *Lehrbuch der Physik*, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1957, S. 467
- [13] G. Joos, *Lehrbuch der Theoretischen Physik*, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1959, S. 488

## 5.3 Die Messung der Entropie

### Gegenstand

Die Entropie wird, wenn überhaupt, so eingeführt, dass der Eindruck entsteht, es handele sich um eine Größe, deren Werte man nur durch komplizierte mathematische Berechnungen erhalten kann.

### Mängel

Die Entropie ist, neben der Temperatur, die wichtigste Größe der Wärmelehre. Sie ist die zur intensiven Temperatur gehörende extensive Größe. Entropie und Temperatur gehören genauso zusammen wie elektrische Ladung und elektrisches Potenzial oder wie Impuls und Geschwindigkeit. Entropieströme sollten demnach in der Wärmelehre dieselbe Rolle spielen, wie elektrische Ströme in der Elektrizitätslehre oder Kräfte (Impulströme) in der Mechanik. Die übliche Einführung der Entropie wird dieser wichtigen Rolle nicht gerecht.

Bei ihrer ersten Erwähnung wird sie uns gewöhnlich präsentiert als „Zustandsfunktion“ [1]. Warum wird ausgerechnet bei der Entropie betont, sie sei eine Funktion? Die Entropie ist zunächst eine physikalische Größe. Zur Funktion wird sie erst, wenn man sie in Abhängigkeit von anderen Größen darstellt. Je nachdem, welche anderen Größen man wählt, ist der funktionale Zusammenhang natürlich ein anderer.

Und warum wird betont, sie sei eine Zustandsfunktion oder Zustandsgröße? Alle extensiven physikalischen Größen sind Zustandsgrößen (und noch viele andere mehr), aber diese Tatsache ist so selbstverständlich, dass man sie normalerweise nicht erwähnt. Da die übliche Einführung der Entropie keine anschauliche Vorstellung vermittelt, klammert man sich an diese eine Eigenschaft, in der sie sich allerdings von den meisten anderen Größen gar nicht unterscheidet.

Der wohl wichtigste Mangel bei der Einführung der Entropie ist, dass man kein Messverfahren vorstellt. Die komplizierte Einführung der Größe hinterlässt dann den Eindruck, die Messung der Entropie sei schwierig, vielleicht sogar unmöglich.

Tatsächlich ist die Entropie aber eine der am leichtesten zu messenden Größen überhaupt. Man kann Entropiewerte mit recht guter Genauigkeit mithilfe von Geräten bestimmen, die man in jeder Küche findet.

### Herkunft

Siehe die Altlast Entropie

### Entsorgung

Es geht natürlich nicht um die Entsorgung der Entropie oder die Entsorgung ihrer Messung, sondern um die

Beseitigung des Vorurteils, die Entropie sei schwer zu messen.

Wie misst man Entropien? Wir formulieren zunächst die Messaufgabe genauer: Man bestimme die Entropiedifferenz zwischen 5 Liter Wasser von 60 °C und 5 Liter Wasser von 20 °C.

Man beginnt mit dem Wasser bei 20 °C und heizt es mit einem Tauchsieder auf 60 °C. Man röhrt gut um, sodass die Temperatur überall im Wasser gleich ist, und man misst während des Heizens die Temperatur als Funktion der Zeit. Der Energiestrom  $P$ , der aus dem Tauchsieder ins Wasser fließt (die Leistung), ist bekannt. Aus  $dE = T \cdot dS$  folgt

$$dS = \frac{dE}{T} = \frac{Pdt}{T}.$$

Eine kleine Entropiezunahme  $dS$  erhält man also einfach als Quotienten aus der Energiezufuhr  $dE = Pdt$  und der Temperatur  $T$ . Da sich die Temperatur des Wassers beim Heizen ändert, muss man, um die gesamte zugeführte Entropie zu erhalten, von der niedrigen Temperatur bis zur hohen aufintegrieren oder aufsummieren. Solange die Temperaturänderung beim Heizen klein gegen die mittlere absolute Temperatur  $\bar{T}$  ist, kann man aber statt der veränderlichen Temperatur auch diese mittlere Temperatur verwenden, und man erhält

$$\Delta S = \frac{P\Delta t}{\bar{T}}.$$

Also: Entropiezunahme gleich Energiestrom des Tauchsieders mal Heizzeit durch mittlere Temperatur.

[1] Gerthsen, Kneser und Vogel, *Physik*, Springer-Verlag, Berlin, 1977, S. 183

## 5.4 Noch einmal: die Messung der Entropie

### Gegenstand

Die Entropie gilt als schwierige Größe – unter anderem deshalb, weil man meint, sie sei schwer zu messen.

### Mängel

Die Kenntnis eines Messverfahrens ist wichtig für das Verständnis einer neu eingeführten physikalischen Größe. Je leichter das Messverfahren zu durchschauen ist, desto besser. Man kann auch sagen: je „direkter“ die Messung, desto direkter die Anschauung [1].

Oft ist aber das Messverfahren, das am leichtesten zu durchschauen ist, nicht gleichzeitig das genaueste und

## Noch einmal: die Messung der Entropie

bequemste. Um ein Verständnis, eine „Anschauung“ für eine Größe zu erlangen, kann es daher zweckmäßig sein, ein Messverfahren vorzustellen, das zwar nicht genau und das vielleicht auch technisch schwer zu realisieren ist, das dafür aber transparent und begrifflich einfach ist.

Wie steht es in dieser Hinsicht mit der Entropie? Sie wird gewöhnlich eingeführt auf die Clausius'sche Art: „Wir ordnen ... jedem Zustand des Systems eine Funktion  $S$  zu, die wir als die Entropie des Zustandes bezeichnen und deren vollständiges Differenzial  $dS$  bei einer reversiblen Änderung

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

ist, wobei  $dQ$  die aufgenommene Wärmemenge, und  $T$  die Temperatur ist, bei der die Aufnahme erfolgt.“ [2]

Was für eine Messung man anstellen muss, um die Werte der Entropie zu bestimmen, ist aus einer solchen Definition allerdings schwer zu erschließen. Woran erkennt man, dass die Zustandsänderung des Systems, an dem man die Messung ausführen möchte, reversibel ist? Wie misst man die aufgenommene Wärmemenge? Oder kurz: Wie macht man's konkret?

Nun kann man die Entropie sehr bequem messen, indem man gerade die Erzeugbarkeit, also die Irreversibilität, ausnutzt [3]. Das wäre das technisch einfache (und billige und genaue) Verfahren. Wie könnte aber ein begrifflich einfaches Verfahren aussehen?

Zur Beantwortung dieser Frage orientieren wir uns daran, wie man andere Größen misst, die mit der Entropie eine wichtige Eigenschaft gemeinsam haben: die mengenartigen oder extensiven Größen.

Für solche Größen kann die Messung im Prinzip immer folgendermaßen ablaufen: Man überträgt den zu messenden Betrag der Größe auf das Messgerät. Das Messgerät reagiert mit einem Ausschlag oder einer Anzeige.

In dieser Lage ist man etwa bei der elektrischen Ladung. Man überträgt die zu messende Ladung auf ein Elektrometer. Das Elektrometer zeigt einen dem Wert der Ladung entsprechenden Ausschlag. Die Messung ist zwar ungenau; sie zeigt aber deutlich eine Eigenschaft der elektrischen Ladung, nämlich, dass geladene Körper Kräfte aufeinander ausüben, und vor allem wird deutlich, dass die Größe Mengencharakter hat.

Analog kann man mit dem Impuls verfahren: Man überträgt ihn auf das „Messgerät“, und dieses reagiert sichtbar mit einem Ausschlag. Das ballistische Pendel stellt ein solches Messgerät dar. Ein ähnliches Verfahren der Impulsmessung wird in [4] beschrieben.

Kann man auf analoge Art die Entropie messen? Das entsprechende Gerät zeigt Abb. 5.4: ein Behälter mit ei-



**Abb. 5.4** Man führt der Eis-Wasser-Mischung den zu messenden Entropiebetrag zu. Die Menge des dabei schmelzenden Eises ist ein Maß für die zugeführte Entropie.

ner Eis-Wasser-Mischung. (Eine etwas kompliziertere und technisch perfektere Variante ist das Bunsen'sche Eiskalorimeter.) Man führt der Eis-Wasser-Mischung die zu messende Entropiemenge zu. Dabei wird ein Teil des Eises geschmolzen. Die Menge des geschmolzenen Eises ist ein Maß für die zugeführte Entropie.

Da 1 g flüssiges Wasser 1,40 J/K mehr Entropie hat als 1 g Eis, kann man an der Menge des geschmolzenen Eises direkt auf die zugeführte Entropie schließen. Da das flüssige Wasser eine größere Dichte hat als das Eis, kann man die Entropie auch direkt am Steigrohr ablesen.

Als technisches Messgerät ist das Gerät nicht geeignet. Das Problem ist: Man muss die zu messende Entropie auf das Messgerät bringen, ohne dabei neue Entropie zu erzeugen, d. h. in einem reversiblen Prozess. Das ist im Prinzip möglich, im Labor aber nicht leicht zu realisieren. Einzelheiten sind in [5] beschrieben.

## Herkunft

Dass man ein so einfaches und im Grunde nahe liegenden Messverfahren gewöhnlich nicht vorstellt, hat wohl damit zu tun, dass man die Entropie nicht als mengenartige, bilanzierbare Größe versteht. Tatsächlich ist diese Eigenschaft kaum zu erkennen, wenn sie auf die Clausius'sche Art eingeführt wird.

So wurde erst 1911, also über 50 Jahre nach Clausius Arbeit, von Jaumann die lokale Bilanzgleichung, für die Entropie formuliert [6], übrigens im selben Jahr, als Callendar zeigte, dass die Clausius'sche Entropie mit dem Carnot'schen Caloricum übereinstimmt [7].

### Entsorgung

Man lasse von der Behauptung ab, die Entropie sei eine schwer messbare Größe. Ihre Messung ist begrifflich von derselben Art wie die der elektrischen Ladung. Die praktische Messung, etwa im Physikunterricht der Schule ist sogar besonders einfach.

- [1] F. Herrmann, *Direkte und indirekte Messung*, Altlasten der Physik
- [2] Gerthsen, Kneser, Vogel, *Physik*, 13. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, S. 183
- [3] F. Herrmann, *Die Messung der Entropie*, Altlasten der Physik
- [4] F. Herrmann und M. Schubart, *Measuring momentum without the use of  $p = mv$  in a demonstration experiment*, Am. J. Phys. 57, 1989, S. 858
- [5] G. Job und R. Rüffler, *Physikalische Chemie: Eine Einführung nach neuem Konzept mit zahlreichen Experimenten*, Vieweg und Teubner, 2010, S. 59
- [6] F. Jaumann, *Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze*, Wiener Berichte CXX, Abt. IIa, S. 385-530
- [7] H. L. Callendar, *The caloric theory of heat and Carnot's principle*, Proc. Phys. Soc. London 23, 1911, S. 153

## 5.5 Der dritte Hauptsatz

### Gegenstand

„Es gibt keinen in endlichen Dimensionen verlaufenden Prozess, mit dem ein Körper bis zum absoluten Nullpunkt abgekühlt werden kann.“ Das ist eine von vielen möglichen Fassungen des dritten Hauptsatzes der Wärmelehre.

### Mängel

Warum erscheint uns dieser Satz überhaupt erwähnenswert? Unmöglichkeitsaussagen dieser Art gibt es in großer Zahl. Es gibt keinen in endlichen Dimensionen verlaufenden Prozess, mit dem ein luftgefüllter Kanister absolut leer gepumpt werden könnte. Es ist unmöglich, einen Suppenteller vollständig auszulöffeln. Feststellungen dieser Art empfinden wir als trivial und schon gar nicht als Naturgesetze. Anders bei der Entropie. Wir lernen sie meist nur in so esoterischer Verpackung kennen, dass uns ein unbefangener Umgang mit dieser Größe außerordentlich schwerfällt. Aussagen über die Entropie bekommen einen Stellenwert, der in keinem Vergleich zu ihren einfachen physikalischen Eigenschaften steht. Wir begegnen der Entropie mit so viel Ehrfurcht und legen in diesen Begriff so viel Metaphysi-

sches hinein, dass es geradezu respektlos erscheint, den dritten Hauptsatz mit dem Auslößeln von Suppe in Zusammenhang zu bringen. Und doch sind beides Aussagen derselben Art. Die simple Analogie beschreibt den Sachverhalt viel klarer als alle gängigen Formulierungen dieses Satzes.

### Herkunft

Der Satz geht auf W. Nernst zurück. Von seinem Schüler F. Simon stammt die Fassung „Es ist unmöglich, eine Substanz vollständig ihrer Entropie zu berauben“. Der Satz schließt eine Lücke, die der 2. Hauptsatz lässt, indem er in der Entropieberechnung den Wert der Integrationskonstanten näher bestimmt.

### Entsorgung

Die Achtung vor den Schöpfern des Wärmesatzes sollte uns nicht daran hindern, die Dinge etwas nüchtern zu sehen. Der Satz gehört nicht auf den Altar, sondern in die Kiste zu unserem üblichen Handwerkszeug.

## 5.6 Der nullte Hauptsatz

### Gegenstand

„Befinden sich zwei Systeme A und B im thermischen Gleichgewicht mit einem dritten System C, so sind auch A und B miteinander im thermischen Gleichgewicht.“ Diese Aussage bezeichnet man als den nullten Hauptsatz der Thermodynamik, siehe zum Beispiel [1].

### Mängel

Zwei Systeme, die Wärme leitend miteinander verbunden sind, d. h. die Entropie austauschen können, ändern ihren Zustand so lange, bis ihre Temperaturen gleich sind. Der Zustand, den sie schließlich erreichen, und aus dem sie von selbst nicht wieder herauslaufen, nennt man thermisches Gleichgewicht.

Wenn sich zwei Systeme im thermischen Gleichgewicht befinden, sind ihre Temperaturen gleich, und wenn ihre Temperaturen gleich sind, befinden sie sich im thermischen Gleichgewicht. Aus dieser Tatsache folgt der Satz, den man den nullten Hauptsatz nennt. Die Aussage ist zwar richtig. Sie stellt aber eine so simple Folgerung dar, dass man nicht versteht, wie sie den Status eines Hauptsatzes erlangen konnte.

Die Bezeichnung „Hauptsätze“ und die Nummerierung von eins bis drei, bzw. null bis drei in der Thermodynamik legt nahe, es handele sich um eine vollständige Grundlage der Thermodynamik, etwas wie ein Axiomensystem. Das trifft aber nicht zu.

## Die Entropie als Irreversibilitätsmaß

Wer glaubt, dass hinter dem „Nullten Hauptsatz“ doch etwas Tiefesinigeres steckt, sei daran erinnert, dass mehrere analoge Sätze über andere Gleichgewichte gelten, die aber nicht formuliert werden, und schon gar nicht als Hauptsätze, weil ihre Aussage selbstverständlich ist.

Da der nullte Hauptsatz besonders gern im Kontext der statistischen Thermodynamik formuliert wird, wollen wir zum Vergleich zunächst das chemische Gleichgewicht betrachten. Das chemische Potenzial spielt in der statistischen Thermodynamik eine ähnliche Rolle wie die Temperatur: Es ist zusammen mit der Temperatur einer der beiden Parameter in der Wahrscheinlichkeitsverteilung über der Energie. Man könnte also einen zum nullten Hauptsatz analogen Satz für chemische Gleichgewichte formulieren: „Befinden sich zwei Systeme A und B im chemischen Gleichgewicht mit einem dritten System C, so sind auch A und B miteinander im chemischen Gleichgewicht.“

Die phänomenologische Thermodynamik zeigt uns, dass man noch mehrere weitere „nullte Hauptsätze“ formulieren kann: Einen zu jedem Term in der Gibbs'schen Fundamentalgleichung:

$$dE = T dS - p dV + \mu dn + v dp + F ds + \omega dL + \psi dm + \varphi dQ + I d\Phi \dots$$

(Hier sind:  $T$  = absolute Temperatur,  $S$  = Entropie,  $p$  = Druck,  $V$  = Volumen,  $\mu$  = chemisches Potenzial,  $n$  = Stoffmenge,  $v$  = Geschwindigkeit,  $p$  = Impuls,  $F$  = Impulsstrom,  $s$  = Verschiebung,  $\omega$  = Winkelgeschwindigkeit,  $L$  = Drehimpuls,  $\psi$  = Gravitationspotenzial,  $m$  = Masse,  $\varphi$  = elektrisches Potenzial,  $Q$  = elektrische Ladung,  $I$  = elektrische Stromstärke,  $\Phi$  = magnetischer Fluss.)

So könnte man für drei Körper, zwischen denen inelastische Stöße stattgefunden haben, sodass sie sich alle drei mit derselben Geschwindigkeit bewegen, formulieren: „Befinden sich zwei Körper A und B im Geschwindigkeitsgleichgewicht mit einem dritten Körper C, so sind auch A und B miteinander im Geschwindigkeitsgleichgewicht.“

### Herkunft

Das Bedürfnis nach einer Aussage, wie sie der nullte Hauptsatz macht, scheint aufzutreten, wenn man absolute Temperatur, chemisches Potenzial und Entropie über die Statistik einführt. Es muss dann gezeigt werden, dass der eine der beiden Parameter in einer Wahrscheinlichkeitsverteilung die Eigenschaften derjenigen Größe hat, die man als Temperatur kennt. Allerdings ist auch im Rahmen dieser Herleitungen der nullte Haupt-

satz nichts anderes als Ausdruck der Transitivität einer physikalischen Größe.

### Entsorgung

Den nullten Hauptsatz behandeln wir in der Schule nicht. Was hat das Thema dann überhaupt mit der Schulphysik zu tun? Es hilft zu verstehen, warum die Thermodynamik an Hochschule und Schule so unbeliebt ist. Mit keiner intensiven Größe werden so viele Umstände gemacht wie mit der Temperatur; mit keiner extensiven Größe werden so viele Umstände gemacht, wie mit der Entropie. Die Thermodynamik lässt manchmal an die Geschichte von des Kaisers neuen Kleidern denken.

Speziell um die Entsorgung der Erblast „nullter Hauptsatz“ müssen wir unsere Kollegen von der Hochschule bitten. Den Studierenden empfehlen wir: Lassen Sie sich kein Problem aufschwätzen, wo keins ist.

[1] F. Reif, *Physikalische Statistik und Physik der Wärme*, de Gruyter, Berlin 1976, S. 119

## 5.7 Die Entropie als Irreversibilitätsmaß

### Gegenstand

Die Entropie wird manchmal eingeführt als Maß für die Irreversibilität eines Vorgangs. So kann man sich eine gewisse Anschauung von der Größe bilden, die sonst als unanschaulich gilt.

### Mängel

- 1 Führt man die Entropie als Irreversibilitätsmaß ein, so gerät die Frage leicht in den Hintergrund, was denn mit der einmal erzeugten Entropie passiert. Ebenso die Frage, welche Bedeutung die Entropie hat, über deren Herkunft wir nichts oder nur wenig wissen. Die Entropie des Universums ist mit hoher Genauigkeit konstant. Die Entropieerzeugung, die wir ständig in unserer Nähe beobachten, ist auf kosmischer Skala ganz und gar vernachlässigbar. Aber auch auf terrestrischer Skala spielt die erzeugte Entropie in der Gesamtbilanz nur eine kleine Rolle. Die in der Erdkugel enthaltene Entropie ist etwa eine Million mal so groß wie die ganze an der Erdoberfläche (im Wesentlichen bei der Absorption des Lichts) in einem Jahr erzeugte Entropie. Wenn man die Entropie nur als Irreversibilitätsmaß kennlernt, wird man mit dieser gespeicherten Entropie nicht viel anfangen können.

## 2 Die Entropie begegnet uns in der Gleichung

$$P = T \cdot I_S. \quad (5.2)$$

Die Gleichung sagt, dass ein Entropiestrom stets mit einem Energiestrom verknüpft ist. Sie ist von derselben Art, wie die bekanntere Gleichung

$$P = U \cdot I.$$

Gleichung (5.2) wird etwa für die Beschreibung von Wärmekraftmaschinen gebraucht. Das Funktionsprinzip ist leicht zu verstehen: Durch die Maschine strömt Entropie hindurch; die Stromstärke am Eingang ist gleich der am Ausgang. In der Maschine geht sie von hoher zu niedriger Temperatur, und treibt dabei etwas an, d. h. die Maschine gibt über eine Welle Energie ab (genauso wie bei einem Wasserrad Wasser aus einer größeren auf eine kleinere Höhe gelangt und dabei Energie über eine Welle abgegeben wird). Wir brauchen zur Erklärung die Entropie. Da der entsprechende Vorgang reversibel ist, hilft uns die Deutung der Entropie als Irreversibilitätsmaß nicht.

3 Wenn man ein Irreversibilitätsmaß einführen möchte, so ist die Entropie selbst nicht ganz die richtige Größe. Stellen wir uns vor, wir wollten zwei Prozesse an den Systemen A und B hinsichtlich ihrer Irreversibilität vergleichen. Es sollen also Prozesse beurteilt werden und nicht Zustände. Daher ist eine Aussage über die Entropie der beteiligten Systeme nicht nützlich. Passender ist es, die Entropieproduktionsrate zu betrachten. Wenn diese nun bei Prozess A größer ist als bei Prozess B, so muss das aber immer noch nicht bedeuten, dass A der „irreversiblere“ Prozess ist. Wenn System A viel größer ist als System B, wird man Prozess A trotz der höheren Entropieproduktionsrate als den reversibleren bezeichnen wollen. Man muss das Irreversibilitätsmaß also noch auf die Größe des Systems beziehen. Als brauchbares Maß für die Irreversibilität eines Prozesses ergibt sich damit die molare Entropieproduktionsrate.

## Herkunft

Das Fehlen einer Anschauung von der in einem System gespeicherten Entropie und der Versuch, zur statistischen Deutung als Unordnungsmaß noch eine phänomenologische Deutung hinzuzufügen.

## Entsorgung

Wird die Entropie als Wärme interpretiert, so ergibt sich die Bedeutung der molaren Entropieproduktionsrate als Maß für die Irreversibilität als Nebenprodukt.

## 5.8 Die Entropiezunahme beim Mischen von Pfeffer und Salz

### Gegenstand

„Entropie kann sich ändern, ohne dass Wärme entsteht oder verschwindet (Pfeffer und Salz).“ [1]

### Mängel

1 Zunächst ein sprachliches Problem: Wenn etwas entsteht, so war es vorher nicht da, und nachher ist es da; wenn etwas verschwindet, so war es vorher da und ist es nachher nicht mehr. Daher kann die Wärme  $Q$  der Physik weder entstehen noch verschwinden. So verhält es sich wenigstens, wenn man mit den Begriffen „Entstehen“ und „Verschwinden“ so umgeht, wie es allgemein üblich ist. Ich denke, es handelt sich hier nicht einfach um einen Ausrutscher des Autors [1], sondern um eine in der Physik recht verbreitete Nachlässigkeit. Man braucht sich nicht zu wundern, wenn Studenten, und erst recht Schüler, Probleme dabei haben, mit der sogenannten Prozessgröße  $Q$  im Sinne der Physik richtig umzugehen.

2 In der statistischen Physik ist die Entropie durch die Gleichung

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i \quad (5.3)$$

definiert.

Sie kann angewendet werden auf eine beliebige diskrete Zufallsvariable  $X$ .  $p_i$  ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Wertes  $X_i$ .

Das Unspezifische dieser Definition macht einerseits ihre Eleganz aus; andererseits führt es aber auch zu Missverständnissen. Zur Berechnung der Entropie braucht man nichts als eine Wahrscheinlichkeitsverteilung. Man muss dabei nur wissen, was zwei verschiedene Zustände sind, aber man braucht nicht zu wissen, worin sich die Zustände unterscheiden, ja man braucht nicht einmal zu wissen, wie stark sie sich unterscheiden. Man kann die Entropie damit in die Reihe anderer Größen stellen, mit denen man statistische Verteilungen beschreibt: der Mittelwert, die Streuung und die höheren Momente einer Verteilung. Das bedeutet, dass man die Gleichung auf Situationen oder Systeme anwenden kann, die mit dem, was wir Thermodynamik nennen, nicht mehr viel zu tun haben.

So kann man eine Entropie auch für Systeme berechnen, die sich nicht im thermodynamischen Gleichgewicht befinden, in denen also weder eine Temperatur noch ein chemisches Potenzial definiert ist. Ist das System außerdem noch so beschaffen, dass sich ein solches Gleichgewicht gar nicht einstellen kann,

## Entropie und Leben

so verliert die durch (5.3) definierte Entropie ihre thermodynamische Bedeutung.

Trotzdem werden oft entsprechende Beispiele im Zusammenhang mit der Thermodynamik diskutiert. So berechnet man etwa die Entropiezunahme beim Mischen von Karten [2] oder man betrachtet, wie in unserem Zitat, die Entropiezunahme beim Mischen von Pfeffer und Salz. In beiden Fällen lassen sich keine Temperatur und kein chemisches Potenzial definieren, und es stellt sich auch bei beliebig langem Warten oder thermischer Aktivierung kein Zustand ein, für den diese Größen definiert sind. Die Entropie, die man berechnet, hat keine größere Bedeutung als die, die man nach Gleichung (5.3) etwa aus der Notenverteilung einer Klassenarbeit berechnen würde, wenigstens, solange man sich für die Thermodynamik der entsprechenden Systeme interessiert. Die Entropiebetrachtung bei diesen Systemen ist eine hübsche Spielerei, aber nicht mehr.

- 3 Wir vermuten, dass mit dem Pfeffer-und-Salz-Beispiel gezeigt werden sollte, dass sich beim Mischen trotz Entropiezunahme die Temperatur nicht erhöht. Normalerweise zeigt man das mit dem Gay-Lussac-Experiment. Man lässt ein Gas, das unter hohem Druck steht, ins Vakuum expandieren. Dabei nimmt die Entropie um  $\Delta S$  zu. Wenn dem Gas diese Entropie  $\Delta S$  zugeführt würde, ohne dass es sein Volumen vergrößert, so würde sich seine Temperatur deutlich messbar erhöhen. Bei der Gay-Lussac-Expansion bleibt diese Temperaturerhöhung aus.

Mit dem Pfeffer-und-Salz-Experiment kann man aber gar nicht entscheiden, ob eine solche Temperaturerhöhung stattfindet oder nicht. Die Entropiezunahme  $\Delta S$  ist in diesem Fall etwa  $10^{-23}$ -mal die Ausgangsentropie [3]. Entsprechend gering wäre die Temperaturerhöhung, wenn ihr nicht auch noch unser Argument aus Punkt 2 im Wege stände. Das Experiment kann also darüber, ob sich die Temperatur erhöht oder nicht, keine Aussage machen.

### Herkunft

Man verbindet mit der Entropie als makroskopischer Größe keine eigene Anschauung. Also klammert man sich an die statistische Deutung. Hier scheint es sich anzubieten, die Berechnung anhand von Systemen zu erläutern, für deren Zustände die Wahrscheinlichkeiten bekannt oder leicht zu ermitteln sich, etwa Würfel und Kartenspiele, oder wie in unserem Fall Pfeffer und Salz.

### Entsorgung

Wie andere physikalische Größen führt man die Entropie ein als Maß für eine bestimmte Eigenschaft eines

Körpers oder physikalischen Systems. So wie die Masse das misst, was man als Trägheit bezeichnet, oder der Impuls ein Maß ist für das, was man Schwung nennt, so misst die Entropie das, was man als Inhalt an Wärme wahrnimmt. So kommt man schnell zu einem physikalisch gesunden Verständnis von Vorgängen unserer täglichen Erfahrung und von wichtigen technischen Anwendungen. Es ist wichtiger zu lernen, dass die Entropie beim Durchströmen einer Dampfturbine unverändert bleibt als dass die Entropie beim Mischen von Pfeffer und Salz um  $10^{-23}$  zunimmt.

Die mikroskopische Deutung der Entropie kann man später immer noch behandeln, genau so wie die der Temperatur, des elektrischen Widerstandes, des Reibungskoeffizienten oder auch der Masse.

[1] Der Satz entstammt einer Präsentation (Folie 9), die auf der Web-Site der Deutschen Physikalischen Gesellschaft veröffentlicht ist und die offenbar die Meinung der Gutachter zum KPK wiedergibt.

[http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen\\_gutachter/vortrag-meier.pdf](http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen_gutachter/vortrag-meier.pdf)

Er ist wahrscheinlich so zu verstehen: Beim Mischen von Pfeffer und Salz entsteht Entropie, aber es entsteht keine Wärme, denn wenn Wärme entstünde, müsste sich das in einer Temperaturerhöhung äußern. Eine Temperaturerhöhung stellt man aber nicht fest.

[2] D. Meschede, *Gerthsen Physik*, 21. Auflage, Springer Berlin, S. 244

[3] F. Herrmann und G. Bruno Schmid, *An analogy between information and energy*, Eur. J. Phys. 7, 1986, S. 174 – 176

## 5.9 Entropie und Leben

### Gegenstand

Biologische Systeme sind hoch geordnete Systeme, die spontan entstehen. Hier wird oft ein Problem gesehen. Man könnte glauben, so wird gesagt, dass die Entstehung lebender Organismen dem zweiten Hauptsatz widerspricht, demzufolge die Entropie in einem abgeschlossenen System nicht abnehmen kann. Tatsächlich, so wird dann erklärt, wird der zweite Hauptsatz aber nicht verletzt, denn biologische Systeme sind offene Systeme. Ihre Entropie könnte durchaus abnehmen, wenn dabei die Entropie der Umgebung zunimmt.

### Mängel

Es wird zunächst als ein Problem, manchmal gar als Paradoxon hingestellt, dass die Ordnung eines biologi-

schen Systems von selbst zunimmt, und dann wird das Rätsel gelöst: Wir können beruhigt sein, es geht alles mit rechten Dingen zu.

Nun kann man das Thema allerdings schon in einem früheren Stadium aus der Welt schaffen, und zwar noch bevor es zum Problem oder zum Paradoxon wird. Tatsächlich ist nämlich der Entropieinhalt biologischer Systeme in keiner Weise auffällig. Ein Mensch zum Beispiel besteht zu etwa 60 % aus Wasser. Bei 25 °C hat Wasser eine Entropie von 3,9 J/(K·g), bei der mittleren Körpertemperatur ist es etwas mehr. Den Rest des menschlichen Körpers bilden im Wesentlichen Proteine, Lipide und Kohlenhydrate, deren Entropie pro Masse nicht sehr verschieden ist von der anderer kondensierter organischer Verbindungen. Sie liegt also zwischen 1 und 3 J/(K·g). Es ist daher nicht schwer, ein nichtbiologisches „Vergleichssystem“ zu konstruieren, das mit dem Menschen nicht nur in Masse, Volumen und Temperatur, sondern auch noch in der Entropie übereinstimmt. Eine Besonderheit des biologischen Systems ist an der Entropie nicht zu erkennen.

Vergleicht man den Menschen gar mit einem Haufen Sand derselben Masse und derselben mittleren Temperatur, so schneidet er, was die Entropie betrifft, sogar viel schlechter ab. Die Entropie des Sandes beträgt, da er aus kristalliner Materie besteht, nur etwa 1/4 der des Menschen.

Beim Wachsen eines biologischen Systems nimmt die Entropie übrigens nicht ab, sondern zu, und zwar weil die Masse des Systems zunimmt. Wenn ein Mensch um 2 kg zunimmt, so wächst seine Entropie um etwa 4 kJ/K.

Die Entropie ist also keine Größe, deren Werte sich an lebenden Systemen auffälliger verhalten als die von Masse oder Volumen.

## Herkunft

Es kommt wohl einiges zusammen. Erstens: die nichtwissenschaftlichen Konnotationen der Entropie. Ihr wird offenbar zugetraut, sich im Zusammenhang mit einem so komplexen Vorgang wie dem organischen Leben irgendwie charakteristisch zu verhalten. Zweitens: die Unkenntnis ihrer Werte (die man übrigens leicht in Tabellenwerken oder im Internet findet). Drittens: der Versuch, sich von der Entropie eine Anschauung über die Unordnung zu bilden, was im Prinzip durchaus korrekt, aber offenbar keine besonders praktische Methode zur Abschätzung der Größenordnung ihrer Werte ist.

## Entsorgung

Man führe die Entropie ein als Wärmemaß, sodass der Lernende eine klare Vorstellung von den Werten der

Größe erhält. Die Vermutung, dass die Entropie von biologischen Systemen irgendeine Besonderheit zeigt, stellt sich dann erst gar nicht ein.

## 5.10 Negative Entropie und Negentropie

### Gegenstand

In manchen Lehrbüchern der Biologie oder verwandter Fachrichtungen findet man Aussagen, in denen von negativen Werten der Entropie die Rede ist: „Die lebenden Systeme produzieren beständig positive Entropie. Um dem Zerfall ins thermodynamische Gleichgewicht zu entgehen, bedürfen sie der beständigen Zufuhr negativer Entropie. Die einzige ergiebige Quelle negativer Entropie, die den lebenden Systemen zur Verfügung steht, ist die Anregungsenergie der [...] Pigmente. Die Anregung erfolgt durch die Lichtquanten. Die einzige natürliche Quelle für Lichtquanten ist die Sonne.“

Manchmal wird negative Entropie auch Negentropie genannt, und diese wiederum, so wird gesagt, sei identisch mit der Shannon'schen Datenmenge oder Information.

### Mängel

Zum Teil verstößen solche Aussagen nur gegen physikalische Gewohnheiten, zum Teil sind sie falsch.

1 Wenn der Betrag einer mengenartigen Größe  $X$  in einem System A zu- und in einem anderen System B abnimmt, weil zwischen A und B ein Strom der Größe  $X$  fließt, so hat man zunächst einmal die Wahl, diesen Sachverhalt auf zwei Arten in Worte zu fassen: Entweder man sagt, es fließe ein Strom von positivem  $X$  von A nach B oder man sagt, es fließe negatives  $X$  von B nach A. Die Theorie (genauer: die Kontinuitätsgleichung) gestattet uns nicht, zwischen diesen beiden Sprechweisen zu unterscheiden. Nur in dem besonderen Fall, dass sich dem Strom eindeutig eine Geschwindigkeit zuordnen lässt, d.h., dass man die Stromdichte  $j_X$  als Produkt aus Dichte  $\rho_X$  und Geschwindigkeit  $v$  schreiben kann, also

$$j_X = \rho_X \cdot v,$$

ist eine solche Unterscheidung zu rechtfertigen. Ist nämlich die Dichte  $\rho_X$  an den Stellen, wo der Strom fließt, negativ, so kann man mit einem gewissen Recht sagen, es fließe negatives  $X$  von B nach A. Ist  $\rho_X$  positiv, so würde man sagen, es fließt positives  $X$  von A nach B. Notwendig ist diese Unterscheidung aller-

## Negative Entropie und Negentropie

dings nicht [1]. Wenn nun aber die Größe  $X$  grundsätzlich nur positive Werte annehmen kann, wie etwa die Masse oder die Entropie, so ist die Aussage, negatives  $X$  fließe von B nach A, einfach unpassend, denn sie legt nahe, es gebe eine negative Massen- bzw. Entropiedichte.

Wenn man in dem anfangs zitierten Zusammenhang von negativer Entropie spricht, so verfolgt man natürlich eine bestimmte Absicht: Man möchte das Verdienst für das Nichtanwachsen der Entropie gern der Sonne zuschreiben. Und hier wird nun der Fehler gemacht. Denn wenn man sich schon darüber hinwegsetzt, dass es keine negative Entropiedichte gibt, so müsste doch der Strom der negativen Entropie, der in das System hineinfließen soll, denselben Weg durchlaufen (nur in entgegengesetzter Richtung), wie der Strom der positiven Entropie, der tatsächlich aus dem System herausfließt. Da die positive Entropie in die Umgebung abfließt, könnte man also bestenfalls sagen, es fließe negative Entropie aus der Umgebung in das lebende System hinein. Die Aussage, die negative Entropie komme von der Sonne, ist also sicher falsch. Da der betrachtete Gegenstand sehr komplex ist, fällt dieser Fehler offenbar nicht auf.

Um die Unstimmigkeit noch etwas deutlicher zu machen, wollen wir die Aussage auf ein System übertragen, bei dem die Verhältnisse durchsichtiger sind: auf den Glühdraht einer elektrischen Heizung. Die normale (und korrekte) Beschreibung der Entropiebilanz lautet so: Im Glühdraht wird Entropie erzeugt. Diese verlässt den Draht und geht in die Umgebung. Die zu der oben zitierten Beschreibung analoge Behauptung würde etwa so lauten: Mit der elektrischen Energie wird dem Draht negative Entropie zugeführt. Durch die Entropieerzeugung im Draht wird diese kompensiert. Diese Aussage ist gewiss nicht zutreffend.

**2** Wenn die negative Entropie oder Negentropie mit der Information oder Datenmenge identifiziert wird, so macht man einen Fehler anderer Art. Es sei zunächst daran erinnert, dass man die Entropie  $S$  und die Datenmenge  $H$  nach derselben Formel berechnet:

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i \quad H = -f \sum_i p_i \ln p_i$$

Hier ist  $p_i$  die Wahrscheinlichkeit dafür, das System in dem (Mikro-)Zustand mit der Nummer  $i$  zu finden.  $k$  ist die Boltzmann-Konstante und  $f$  ein konstanter Faktor, der so gewählt ist, dass  $H$  in der Maßeinheit bit herauskommt. Beide Größen werden also, bis auf den konstanten Vorfaktor, nach demselben

Verfahren bestimmt. Es muss sich daher bei beiden um dieselbe physikalische Größe handeln. Die Entropie eines Systems und die in seinem Mikrozustand gespeicherte Datenmenge sind (bis auf einen konstanten Faktor) identisch.

Nun wird manchmal die folgende Ungeschicklichkeit begangen: Statt zu sagen, die Daten seien in dem betrachteten System, nennen wir es A, gespeichert oder enthalten, sagt man,  $H$  sei der Betrag der Datenmenge, der dem Beobachter fehlt. Und man geht noch einen Schritt weiter: Man sagt nicht nur, ihm fehlt die Datenmenge  $H$ , sondern er hat die Negentropie

$$N = -H.$$

Statt dem System A, für das der Wert von  $H$  berechnet wurde, diesen Wert zuzuordnen, nimmt man das Negative davon und ordnet es dem Komplement von A zu, nämlich der Umgebung oder dem Beobachter, der ja Teil der Umgebung ist. Es ist so, als würde man die Masse  $m$  eines Gegenstandes dadurch beschreiben, dass man sagt, die Umgebung habe die „Negamasse“  $n = -m$ . Eine solche Beschreibungsweise lässt sich sicher eine Weile lang durchhalten, aber es besteht wohl kein Zweifel daran, dass sie äußerst unbehaglich ist.

## Herkunft

Die negative Entropie hat eine lange Tradition. Schon der Thermodynamiker und Freund von Lord Kelvin, Peter Guthrie Tait, hat daran gedacht, eine negative Entropie einzuführen, sah aber noch davon ab [2]: „Es wäre wünschenswert, ein Wort für die Verfügbarkeit von Arbeit der Wärme eines gegebenen Speichers zu haben [...]. Leider wird das sehr schöne Wort Entropie, das Clausius in diesem Zusammenhang eingeführt hat, von ihm auf das Negative von dem angewendet, was wir natürlicherweise ausdrücken möchten.“

Wirklich in die Physik Einzug gehalten hat die negative Entropie dann wohl durch Schrödinger. In seinem Büchlein „Was ist Leben?“ aus dem Jahr 1944, das weitgehend frei von Mathematik ist, schreibt er: „Was ist denn dieses kostbare Etwas in unserer Nahrung, das uns vor dem Tode bewahrt? Das ist leicht zu beantworten. Jeder Vorgang, jedes Ereignis, jedes Geschehen – man kann es nennen, wie man will, – kurz alles, was in der Natur vor sich geht, bedeutet eine Vergrößerung der Entropie jenes Teiles der Welt, in welchem es vor sich geht. Damit erhöht ein lebender Organismus ununterbrochen seine Entropie – oder, wie man auch sagen könnte, er produziert eine positive Entropie – und

strebt damit auf den gefährlichen Zustand maximaler Entropie zu, der den Tod bedeutet. Er kann sich ihm nur fernhalten, d.h. leben, indem er seiner Umwelt fortwährend negative Entropie entzieht — welche etwas sehr Positives ist, wie wir gleich sehen werden. Das, wovon ein Organismus sich ernährt, ist negative Entropie. Oder, um es etwas weniger paradox auszudrücken, das Wesentliche am Stoffwechsel ist, dass es dem Organismus gelingt, sich von der Entropie zu befreien, die er, solange er lebt, erzeugen muss.“

Diese Aussagen stießen bei seinen Fachkollegen sofort auf Widerstand. Schrödinger verteidigte sich dagegen, allerdings etwas halbherzig.

Die Bezeichnung Negentropie wurde 1956 von Brillouin eingeführt [3]. Das war die Zeit, in der viel über den Zusammenhang zwischen der thermodynamischen Größe Entropie und der kurz zuvor von Shannon eingeführten Datenmenge publiziert wurde. Brillouin hielt seine Idee für so wichtig, dass er sie als „Negentropie-Prinzip der Information“ bezeichnete. Brillouins Ungeschicklichkeit besteht, wie schon erläutert wurde, darin, die Information dem Beobachter zuzuordnen und nicht dem System, für das sie berechnet wird.

Mit Schuld an dieser unpassenden Zuordnung ist möglicherweise auch der Name, der für die Größe oft verwendet wird: Information. Nehmen wir an, für einen Computerspeicher (oder für die Mikrozustände eines idealen Gases) sei berechnet worden  $H = x$  MByte. Wenn man die Größe  $H$  Information nennt, so ist es sicher nahe liegend zu sagen: „Mir fehlt die Information  $x$  MByte über den Speicher (oder über das ideale Gas).“ Bezeichnet man  $H$  dagegen als Datenmenge, so ist eine andere Aussage passender: „Die Menge der Daten, die im Speicher oder in dem idealen Gas enthalten sind, beträgt  $x$  MByte.“ Bei Verwendung der Bezeichnung Datenmenge ordnet man also die Größe automatisch dem richtigen System zu.

### Entsorgung

- 1 Man braucht keine negative Entropie. Alles ist klarer, wenn man sich mit der positiven bescheidet.
- 2 Man ordne die Information dem Datenspeicher zu (oder den thermodynamischen Mikrozuständen) und nicht dem Beobachter.

[1] F. Herrmann, *Die konventionelle Stromrichtung*, Altlasten der Physik

[2] P. G. Tait, *Sketch of Thermodynamics*, Edmonston & Douglas, Edinburgh, 1868, S. 100: „It is very desirable to have a word to express the Availability for work of the heat in a given magazine; a term for that possession, the wast of which is called Dissipation. Unfortunately the

excellent word Entropy, which Clausius has introduced in this connection, is applied by him to the negative of the idea we most naturally wish to express.“

[3] L. Brillouin, *Science and Information Theory*, Academic Press, New York, 1962, S. 152f

## 5.11 Mischungsentropie

### Gegenstand

Zwei verschiedene gasförmige Stoffe befinden sich in zwei Behältern. Verbindet man die Behälter miteinander, so vermischen sich die Gase. Dabei nimmt die Entropie des Gesamtsystems zu. Diese Entropiezunahme heißt Mischungsentropie.

### Mängel

Der Name ist ungeschickt gewählt und er ist überflüssig. Wenn man die Bezeichnung benutzt, erweckt man die Erwartung, ein Gasgemisch habe mehr Entropie als die reinen Stoffe einzeln. Das setzt voraus, dass man zwei Systeme miteinander vergleicht: ein Gemisch mit einem Nichtgemisch. Das könnte auf drei Arten geschehen, je nachdem, wie man sich das Mischen vorstellt.

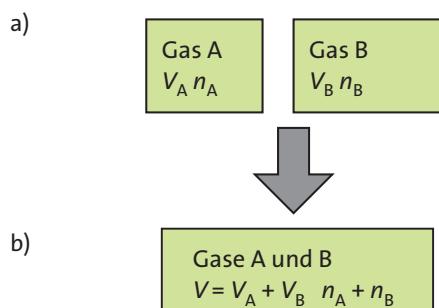


Abb. 5.5 Gas A dehnt sich vom Volumen  $V_A$  auf  $V$  aus, Gas B von  $V_B$  auf  $V$ .

- 1 Wir gehen aus von zwei Behältern mit den Gasen A und B, Abb. 5.5a. In dem Behälter mit dem Volumen  $V_A$  befindet sich die Stoffmenge  $n_A$ , im Behälter mit dem Volumen  $V_B$  befindet sich die Menge  $n_B$ . Wir verbinden die beiden Behälter, sodass ein einziger Behälter mit dem Volumen  $V = V_A + V_B$  entsteht, Abb. 5.5b. Die Gase vermischen sich und die Entropie nimmt zu um:

$$\Delta S = n_A \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_A} + n_B \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_B} \quad (5.4)$$

Diese Zunahme ist es, die man als Mischungsentropie bezeichnet. Nun hat diese Zunahme aber mit

## Keine Temperatur – keine Entropie?

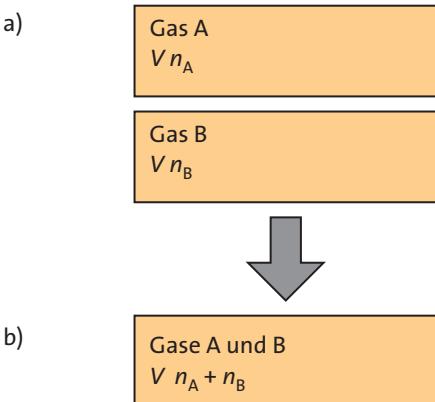
dem Mischungsvorgang gar nichts zu tun. Der Übergang ist nichts anderes als eine Expansion der beiden Gase von ihrem jeweiligen Ausgangsvolumen  $V_A$  bzw.  $V_B$  auf das Endvolumen  $V$  bei konstanter Temperatur. Die Entropiezunahme bei einer solchen Expansion ist

$$\Delta S_A = n_A \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_A}$$

für Gas A und

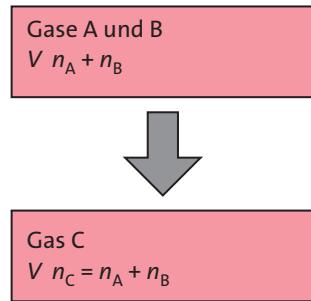
$$\Delta S_B = n_B \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_B}$$

für Gas B. Die gesamte Entropiezunahme aufgrund der Expansion ist also gerade gleich  $\Delta S$  von Gleichung (5.4).



**Abb. 5.6** Gas A und Gas B werden ohne Volumenvergrößerung in denselben Behälter gebracht.

- Wir versuchen eine andere Interpretation des Mischens. Wir gehen aus von zwei Behältern des gleichen Volumens  $V$ , Abb. 5.6a. In dem einen befindet sich ein Gas A, im anderen ein Gas B. Wir vergleichen mit der Situation von Abb. 5.6b: Beide Gase befinden sich zusammen in einem Behälter des Volumens  $V$ . Die Entropien sind in beiden Fällen gleich. (Wir setzen voraus die Gase seien ideal.) Es gibt nichts, was man hier als Mischungsentropie bezeichnen könnte.
- Schließlich noch ein dritter Versuch, Abb. 5.7: Wir vergleichen die Entropie der verschiedenen Gase A und B (Stoffmengen  $n_A$  und  $n_B$ ) in einem Behälter des Volumens  $V$  mit der eines einheitlichen Gases C der Stoffmenge  $n_C = n_A + n_B$  in einem Behälter mit demselben Volumen  $V$ . Wir fragen nach dem Unterschied der Entropien: Wie wirkt es sich aus, dass ein Unterscheidungsmerkmal zwischen den beiden Ga-



**Abb. 5.7** Die Gase A und B werden ersetzt durch die gleiche Menge eines einzigen Gases C.

sen A und B wegfällt? Auch dieser Unterschied wäre ein Namenskandidat für die Mischungsentropie. Der Unterschied hängt hier aber von der Natur der Gase ab und entspricht damit nicht dem durch Gleichung (5.4) gegebenen Wert.

### Herkunft

Wahrscheinlich orientierte man sich bei der Erfindung der Bezeichnung an der Vorstellung, dass die Entropie ein Maß für Unordnung ist. Diese Interpretation ist zwar korrekt, aber der Umgang mit ihr ist nicht immer leicht.

### Entsorgung

Wenn man weiß, dass die Entropie bei konstanter Temperatur mit dem Volumen zunimmt (und bei konstantem Volumen mit der Temperatur), braucht man die Bezeichnung Mischungsentropie nicht.

## 5.12 Keine Temperatur – keine Entropie?

### Gegenstand

Kürzlich habe ich (in einem Zusammenhang, der hier nicht interessiert) gelesen: „Das System hat Entropie, also hat es auch eine Temperatur.“

Gemeint war nicht, dass die Temperatur des Systems einen Wert hat, der größer als null ist, sondern, dass die Größe Temperatur überhaupt einen Wert hat.

### Mängel

Zunächst eine allgemeine Bemerkung zu dem „hat“ im Zusammenhang mit einer physikalischen Größe. Wenn wir sagen, das Teilchen hat keine elektrische Ladung, das Photon hat keine Ruhmasse, oder das Auto hat keinen Impuls, so meinen wir immer: Der Wert der entsprechenden physikalischen Größe ist null, also  $Q = 0 \text{ C}$ ,

$m_0 = 0 \text{ kg}$  bzw.  $p = 0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ . Etwas anderes ist gemeint, wenn man sagt, ein System habe keine Temperatur. Es bedeutet nicht  $T = 0 \text{ K}$ . (Das Entsprechende gilt für das chemische Potenzial.) Es bedeutet vielmehr, dass sein Zustand nicht durch eine Temperatur beschrieben werden kann. Anders ausgedrückt: Das System befindet sich nicht im thermodynamischen Gleichgewicht, oder die Besetzungsverteilung der Mikrozustände entspricht nicht einer der bekannten statistischen Funktionen.

Wenn das mit dem oben zitierten Satz gemeint ist, so ist die Aussage nicht unbedingt korrekt. Man kann aus  $S > 0$  nicht schließen, dass das betrachtete System eine Temperatur hat. Es hat nur dann eine Temperatur, wenn es sich im thermodynamischen Gleichgewicht befindet: wenn alle „zugänglichen Mikrozustände“ mit gleicher Wahrscheinlichkeit besetzt sind. Die Entropie berechnet sich dann einfach zu

$$S = k \ln W \quad (5.5)$$

Im Allgemeinen gilt aber

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i \quad (5.6)$$

Gleichung (5.5) geht aus Gleichung (5.6) hervor, wenn alle  $p_i$  untereinander gleich sind, wenn also

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \dots = p_n = 1/W$$

ist.

Aber ist nicht alles, was uns umgibt in guter Näherung im thermodynamischen Gleichgewicht? Stellt sich nicht das thermodynamische Gleichgewicht bei jeder Änderung äußerer Parameter so schnell ein, dass Nichtgleichgewichtszustände gar keine Rolle spielen?

Durchaus nicht. Dass sich das Gleichgewicht nicht einstellt, kann zwei Ursachen haben:

Erstens: Die Dichte der wechselwirkenden Teilchen ist zu gering. Ein Beispiel ist die Atmosphäre der Erde in großer Höhe.

Zweitens: Die Dichte ist zwar hoch, aber die Teilchen wechselwirken nicht miteinander. Diese Erscheinung ist allgegenwärtig: Licht, das nicht schon mit einer bestimmten Temperatur erzeugt wurde, hat später keine Chance mehr, von selbst ins thermodynamische Gleichgewicht zu gelangen, es sei denn, es nimmt Hilfe in Anspruch – etwa das berühmte Planck'sche Kohlestäbchen.

Ein Beispiel für Licht, das nicht im Gleichgewicht ist, ist das Licht, das wir von der Sonne bekommen. Die Voraussetzungen sind eigentlich günstig: Es wird erzeugt durch einen praktisch schwarzen Strahler. Und die Fre-

quenzverteilung des Sonnenlichts, das hier bei uns ankommt, entspricht in recht guter Näherung der von Licht im thermodynamischen Gleichgewicht. Was aber gar nicht zum Gleichgewicht passt, ist die Winkelverteilung. Damit das Licht im thermodynamischen Gleichgewicht ist, müsste es isotrop verteilt sein, und das ist es ganz und gar nicht. So kommt es, dass der Zusammenhang zwischen Energie- und Entropiestrom für das Licht von der Sonne nicht

$$P = T \cdot I_S$$

ist, wie man es für einen Transport mit Licht im thermodynamischen Gleichgewicht erwarten würde, sondern es gilt:

$$P = (3/4) T \cdot I_S,$$

wobei das  $T$  in dieser Gleichung die Temperatur der Sonnenoberfläche und auch die des Lichts in der Sonne ist, aber eben nicht mehr die des Lichts, das uns interessiert, nämlich des Lichts, das hier auf der Erde ankommt.

### Herkunft

Wohl die Tatsache, dass die Formel  $S = k \ln W$  (oder  $S = k \ln \Omega$ ) so emblematisch für die Entropie geworden ist, Abb. 5.8. (Ähnlich ging es Einsteins Gleichung  $E = mc^2$ .)

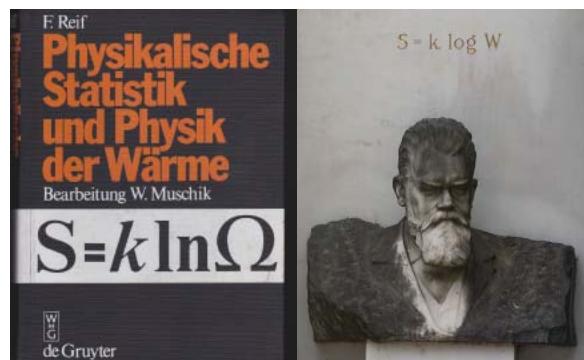


Abb. 5.8 Titelseite eines Lehrbuchs zur statistischen Thermodynamik; Boltzmanns Grab auf dem Wiener Zentralfriedhof

Die Formel (5.6) wird eher als Kuriosität wahrgenommen, oder auch als Maß für Datenmengen.

### Entsorgung

1 Ich empfehle, sorgfältig mit der Sprache umzugehen, wenn man sich auf die Werte physikalischer Größen bezieht. Über extensive („mengenartige“) Größen kann und sollte man sprechen wie über einen Stoff:

## Die Entropie des Universums

Ein System hat viel oder wenig oder gar keine Entropie (oder elektrische Ladung, Masse, Impuls). Der sprachliche Umgebung von intensiven Größen ist ganz anders: eine Temperatur (ein elektrisches Potenzial, eine Geschwindigkeit) ist hoch oder niedrig, und im Fall von Temperatur und chemischem Potenzial kann es auch sein, dass ein System diese Größen gar nicht hat.

- 2 Man führt die Formel (5.6) für die Entropie ein, bevor man den (zwar häufig realisierten) Sonderfall des thermodynamischen Gleichgewichts behandelt. So sieht man, dass die Entropie eine viel allgemeinere Bedeutung hat als die Temperatur (und das chemische Potenzial, das wir hier nicht diskutiert haben).
- 3 Man muss mit Ungereimtheiten rechnen, wenn man Licht, das nicht der thermodynamischen Gleichgewichtsverteilung entspricht, einfach die Temperatur der Lichtquelle zuordnet.

## 5.13 Die Entropie des Universums

### Gegenstand

Man ist den größten Teil des Studiums ohne den Kosmos ausgekommen. Aber dann kommt er endlich: in der Thermodynamik – die Thermodynamik scheint ihn zu brauchen.

- 1 So findet man den 2. Hauptsatz in einem Lehrbuch für die Hochschule: „Bei einem reversiblen Prozess ist die Entropieänderung des Universums gleich null. Unter „Universum“ verstehen wir die Gesamtheit von System und Umgebung.“
- 2 „Bei einem irreversiblen Prozess nimmt die Entropie des Universums zu.“
- 3 „Es gibt keinen Prozess, durch den die Entropie des Universums abnimmt.“
- 4 Oder in einem Schulbuch: „Die Entropie des Universums nimmt ständig zu oder ändert sich nicht mehr.“
- 5 Oder in Wikipedia unter dem Stichwort Exergone und endergone Reaktion: „Triebkraft für das Ablauen einer chemischen Reaktion ist die Zunahme der Entropie S im Universum ...“

### Mängel

- Die Frage, wie es mit der Entropie des Universums steht, ist schwierig, und man sollte sich in einem so schlichten Kontext wie dem 2. Hauptsatz vielleicht lieber nicht auf das verminzte Gebiet der Thermodynamik des Kosmos begeben. Um von der Entropie des Universums zu sprechen, müsste man ja die Bei-

träge aller Teile des Universums aufsummieren. Aber wie macht man das? Die Entropie, die alle Teile jetzt haben? Dann ist die Frage, wie man über die Gleichzeitigkeit weit entfernter Raumzeitpunkte entscheidet.

- Nehmen wir an, die Größe des Universums sei unendlich. (Diese Vorstellung ist zwar etwas metaphysisch, aber offenbar hat damit kaum jemand ein Problem.) Dann entsteht das Problem, dass die Entropie auch unendlich ist, und folglich auch schon immer unendlich gewesen sein muss. Kann sie dann noch zunehmen? Gewiss kann sie das. Man muss es nur lokal formulieren, aber das heißt eben ohne das Universum. Schon 1897 weist Planck [1] in seiner Thermodynamik darauf hin, dass die Entropie des Universums „nicht zu definieren ist“.
- Warum muss das Universum ausgerechnet bei der Formulierung des Entropiesatzes, nicht aber bei der Formulierung der Erhaltung der elektrischen Ladung oder des Impulses oder der Baryonenzahl erhalten? Warum formulieren wir nicht etwa: „Es gibt keinen Prozess, durch den sich die elektrische Ladung des Universums ändert.“

Die Antwort ist klar: weil es viel einfacher geht.

- Auch hier wird die Vorstellung befördert, die Entropie sei eine besonders transzendentale Größe. Die Entropie braucht wieder einmal eine Extrawurst.

### Herkunft

Schon in ihren Anfängen kam man auf die Idee, die Frage nach der Bedeutung der Entropie für die Entwicklung des „Weltalls“ zu stellen. Aufgebracht wurde sie wohl von W. Thomson [2]. Clausius [3] bemerkt 1865 dazu: „... Die Anwendung dieses Satzes [des zweiten Hauptsatzes] auf das gesamte Weltall führt zu einem Schlusse, auf den zuerst W. Thomson aufmerksam gemacht hat, und von dem ich schon in einer vor Kurzem veröffentlichten Abhandlung gesprochen habe. Wenn nämlich bei allen im Weltall vorkommenden Zustandsänderungen die Verwandlungen von einem bestimmten Sinne diejenigen vom entgegengesetzten Sinne an Größe übertreffen, so muss der Gesamtzustand des Weltalls sich immer mehr in jenem ersten Sinne ändern, und das Weltall muss sich somit ohne Unterlass einem Grenzzustand nähern.“ (Clausius benutzt die Bezeichnung „Verwandlung“ für die Größe, die er später auf den Namen Entropie taufte.)

Aus damaliger Sicht schienen diese Bemerkungen noch unproblematisch, denn niemand konnte ahnen, in was für einen schwierigen Kontext die Aussagen durch die Allgemeine Relativitätstheorie und die moderne Kosmologie gestellt werden würden. Auch die Möglichkeit, den zweiten Hauptsatz lokal d. h. durch eine Konti-

nuitätsgleichung auszudrücken, lag noch weit in der Zukunft. Die lokale Entropiebilanz wurde erstmals 1911 durch Jaumann [4] formuliert.

### Entsorgung

Auch in diesem Zusammenhang empfehle ich den Ratsschlag von Wheeler zu beherzigen: „*Physics is simple only when analyzed locally*“.

Wenn es darum geht, die Größe Entropie zu charakterisieren, so genügt es zu sagen: Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden. Diesen Satz versteht jeder.

Wenn man es mathematischer möchte, so schreibt man die lokale Bilanzgleichung (= Kontinuitätsgleichung)[4] auf:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_s = \sigma_s$$

( $\rho_s$  = Entropiedichte,  $j_s$  = Entropiestromdichte,  $\sigma_s$  = Dichte der Erzeugungsrate) und merkt an, dass der Erzeugungsterm auf der rechten Seite nie negativ ist.

[1] M. Planck, *Vorlesungen über Thermodynamik*, Verlag von Veit & Comp. Leipzig, 1897, S. 94

[2] W. Thomson, *On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy*, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, Series 4, 1852, S. 306. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786445208647126>

„Within a finite period of time past the earth must have been, and within a finite period of time to come the earth must again be, unfit for the habitation of man as at present constituted, unless operations have been, or are to be performed, which are impossible under the laws to which the known operations going on at present in the material world are subject.“

[3] R. Clausius, Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie, Annalen der Physik und Chemie, Band CXXV, No. 7, S. 397 – 400

[4] G. Jaumann, *Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze*, Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Mat.-Naturw. Klasse, Abt. IIA 120, 1911, S. 385 – 530.

## 5.14 Äquivalenz von Wärme und Arbeit

### Gegenstand

Wärme ist ungeordnete Energie meinen die einen [1], die kinetische Energie der ungeordneten Molekülbewe-

gung die anderen [2], die kinetische und potenzielle Energie der thermischen Molekülbewegung die dritten [3], einem Gegenstand durch thermischen Kontakt zuführbare Energie die vierten [4], ein Kurzname für den Ausdruck  $\Delta U - W$  die fünften [5], die gebundene Energie  $T \cdot S$  die sechsten [6], das Integral  $\int T \cdot dS$  die siebten [7], ein fragwürdiger und überflüssiger Begriff die achten [8]. Was ist sie wirklich?

### Mängel

Clausius selbst benutzte zwei Wärmegrößen, die in einem Gegenstand „enthaltene Wärme“  $H$ , die er sich als Bewegungsenergie der Moleküle vorstellte, und die einem Gegenstand „zugeführte Wärme“  $Q$ , wobei  $Q = \Delta H$  jedoch nur in Ausnahmefällen gilt. Unter den oben genannten Beispielen erkennt man unschwer die Nachfahren dieser beiden Eltern wieder. Die Meinungsvielfalt ist Ausdruck des ärgerlichen Umstandes, dass es keine Energiegröße gibt, die gleichzeitig alle wünschenswerten Aspekte des Wärmebegriffes abzubilden vermag. Wie bei einer zu kurzen Bettdecke ist man gezwungen, auf die eine oder andere Eigenschaft zu verzichten. Je nachdem, was man für besonders wert erachtet, fällt der Kompromiss anders aus. Dass man trotz dieser Vieldeutigkeit zu denselben Rechenergebnissen gelangt, lässt darauf schließen, dass die von Clausius geforderte Äquivalenz für den thermodynamischen Kalkül belanglos ist. Wofür ist sie dann aber gut?

### Herkunft

Die Frage ist so alt wie die Physik. Die Antwort, die R. Clausius darauf 1850 in seinem ersten Hauptsatz gab, in dem er die Äquivalenz von Wärme und Arbeit fordert, ist in der Kernaussage bis heute gültig, aber offenbar vieldeutig.

### Entsorgung

Wenn wir auf diese Forderung verzichten, gewinnen wir eine neue Freiheit. Um den Energiesatz aufzustellen, benötigen wir sie nicht. Um die Wärme zu definieren, auch nicht. Der Wärmebegriff lässt sich leicht „fundamental metrisieren“, wie man in der Wissenschaftstheorie sagt. Dieses Verfahren wird in der Physik meist nur zur Definition einiger Basisgrößen benutzt, etwa Länge, Dauer, Masse, indem beispielsweise festgelegt wird, wie Gleichheit und Vielfachheit der Werte festzustellen sind und was als Einheit gelten soll. Man kann jedoch dieses Verfahren, das einen gegebenen Begriff direkt auf eine Größe abbildet, auch in vielen anderen Fällen heranziehen, etwa zur Definition von Energie, Impuls, Drehimpuls, Ladung, Stoffmenge, Entropie oder zur Metrisierung von Begriffen wie Wärmemenge, Datenmenge,

## Streben zum Energieminimum

Unordnung oder Zufälligkeit. Das verblüffendste Ergebnis hierbei ist, dass der landläufige, wissenschaftlich unbelastete Begriff Wärmemenge hierbei keine energetische Größe liefert, sondern direkt die Clausiussche Entropie  $S$  [9]. Dieser spielende Zugang zu der neben der Temperatur wichtigsten thermodynamischen Größe erlaubt eine weitgehende Entrümpelung der Thermodynamik. Begriffe wie Enthalpie, freie Energie, Energieentwertung, Prozessgröße, Zustandsfunktion lassen sich gleich mitentsorgen. Dass ein Missgriff nicht im Kalkül einer Wissenschaft, sondern in ihrer Semantik so weitreichende Folgen haben kann, sollte Theoretiker warnen, deren Augenmerk allein der Stimmigkeit des Kalküls gilt, und Didaktiker alarmieren, die sich mit diesen Folgen herumschlagen müssen.

- [1] F. J. Dyson, "What is heat?" *Scientific American* 1954, S. 58.
- [2] R. W. Pohl, *Mechanik, Akustik, Wärmelehre*, Springer, Berlin, 1962, S. 248
- [3] C. Gerthsen, O. H. Kneser und H. Vogel, *Physik*, Springer, Berlin, 1986, S. 193
- [4] C. Kittel, *Physik der Wärme*, Wiley & Sons, Frankfurt, 1973, S. 133
- [5] M. Born, *Physikal. Zeitschr.* 22 (1921), S. 218
- [6] H. H. Steinour, *Heat and Entropy*, *J. Chem. Educ.* 25 (1948), S. 15
- [7] G. Falk u. W. Ruppel, *Energie und Entropie*, Springer, Berlin, 1976, S. 92
- [8] G. M. Barrow, *Thermodynamics...*, *J. Chem. Educ.* 65 (1988), S. 122
- [9] Folgende Annahmen zusammen mit der Wahl einer Wärmeeinheit genügen bereits zur eindeutigen Metrisierung:

- 1 Jeder Gegenstand enthält Wärme, deren Menge nicht abnehmen kann, wenn er wärmedicht umhüllt ist.
- 2 Nach Art und Zustand gleiche Gegenstände enthalten gleiche Wärmemengen.
- 3 Der Wärmeinhalt eines zusammengesetzten Gegenstandes ist die Summe der Wärmeinhalte seiner Teile.

## 5.15 Streben zum Energieminimum

### Gegenstand

Auf die Frage nach der Ursache vieler Vorgänge gibt es eine gängige Antwort. Es geschieht, weil das System dadurch einen Zustand geringerer Energie erreicht:

- Ein Pendel kommt in seinem Tiefpunkt zur Ruhe,
- ein schwimmendes Brett kippt auf die Seite,

- eine Seifenblase formt sich zur Kugel,
- ein Schwamm saugt sich voll Wasser,
- ein Ladungsfleck zerfließt auf einem Leiter,
- angeregte Gasatome emittieren Photonen,
- positive und negative Ionen ordnen sich zu einem Kristallgitter,
- überschwere Kerne neigen zum Zerfall.

### Mängel

Hinter dieser Art der Begründung steckt unausgesprochen die Annahme, jedes System strebe einen Zustand kleinster Energie an und nehme diesen auch an, wenn es nicht durch besondere Umstände daran gehindert wird. In dieser Form ist die Annahme jedoch sinnlos. Wenn nämlich ein System ein Energieminimum erreicht, muss wegen der Energieerhaltung das dazu komplementäre System, die Umgebung, ein Energiemaximum annehmen. Dasselbe Argument, angewandt auf die Umgebung, würde folglich das gegenteilige Ergebnis liefern. Die obige Annahme kann also nicht allgemein gelten. Für welche Systeme gilt sie dann aber? Die Antwort liefert die Thermodynamik. Das System muss, wie es W. Gibbs 1873 ausdrückte, abgeschlossen sein bis auf eine zur Konstanthaltung seiner Entropie notwendige Energieabfuhr. Die durch Vorgänge im System erzeugte Entropie  $S_e$  erscheint dann ausschließlich in der Umgebung und mit ihr die dem System entstammende Energie  $T \cdot S_e$ , wenn  $T$  die Umgebungstemperatur ist. Da  $S_e$  und  $T$  stets positiv sind, verliert das System dabei stets Energie, da ja jeder sonstige Energieaustausch, der die Verluste ausgleichen könnte, verboten ist. So gesehen ist das Streben zum Energieminimum lediglich eine Folge des Entropieprinzips, angewandt auf eine spezielle Klasse von Systemen.

### Herkunft

In der Mechanik sieht man von den thermischen Eigenschaften der Materie ab. Hebel, Rollen, Federn, Klötze, Seile usw. werden wie Dinge behandelt, die sich nicht erwärmen lassen, deren Temperatur und Entropie also unveränderlich sind. Durch Reibung erzeugte Entropie wird stillschweigend der Umgebung zugerechnet, etwa indem man sie sich dort entstehend oder dorthin abgeführt denkt. Wenn man alle sonstigen, an einem Energieaustausch mitwirkenden Teile dem System zurechnet, ist die von Gibbs genannte Voraussetzung erfüllt, sodass wir hier zu Recht von einem Streben zum Energieminimum sprechen können. Ähnliches gilt für Systeme aus vielen anderen Gebieten der Physik – Hydromechanik, Elastizitätslehre, Elektrizitätslehre und so weiter. Da die Entropieerzeugung als Ursache nie erwähnt wird, entsteht der Eindruck eines eigenständigen Naturprinzips.

### Entsorgung

Wie so oft verleitet uns unser gespanntes Verhältnis zur Entropie zu fragwürdigen Ersatzkonstruktionen. Das Grundübel, das einen Rattenschwanz von Schwierigkeiten nach sich zieht und jeden Versuch zur Abhilfe konterkariert, ist das seit anderthalb Jahrhunderten liebevoll gepflegte, im ersten Hauptsatz der Wärmelehre verankerte Dogma von der Wärme als einer besonderen Form der Energie. Nur wenn wir an dieser Stelle zu irgendeiner Revision bereit sind, ist eine nachhaltige Besserung zu erwarten.

## 5.16 Nutzbare Energie

### Gegenstand

In Veröffentlichungen von Energiewirtschaft, Behörden und Universitäten findet man sogenannte Energieflussbilder [1, 2, 3, 4]. Sie geben die Energiebilanz einer Volkswirtschaft wieder, etwa unter dem Titel: „Energieflussbild der Bundesrepublik Deutschland“. Es wird dargestellt, mit welchen Primärenergieträgern die Energie in das System, also eine Volkswirtschaft, eintritt, welche Anteile in welche anderen Energieformen umgewandelt werden, wie groß die Verluste dabei sind und in welchen Formen die Energie das System wieder verlässt. Am Ausgang wird unterschieden zwischen End- oder Nutzenergie einerseits und Verlustenergie andererseits.

### Mängel

Es entsteht der folgende Eindruck: Für die Anwendungen der Endverbraucher wird die Energie in einer bestimmten Form gebraucht. Daher muss sie umgewandelt werden, und dabei geht ein Teil verloren. Man versucht, die Umwandlungsverluste so gering wie möglich zu halten, aber ein beträchtlicher Teil davon ist unvermeidlich, denn er hat prinzipielle physikalische Ursachen. Einmal beim Verbraucher angekommen, kann die Energie für das verwendet werden, wofür man sie wirklich braucht.

Diese Sicht trifft die Sache nicht ganz. Man kann es sich klar machen, wenn man bedenkt, dass jeder Energieverlust auf Entropieerzeugung beruht. Erzeugte Entropie muss an die Umgebung abgeführt werden — sie muss gewissermaßen entsorgt werden —, und dazu braucht man die Energie

$$P_V = T_0 \cdot I_S.$$

$P_V$  ist der Verlustenergiestrom,  $T_0$  die Umgebungstemperatur und  $I_S$  der Strom der zu entsorgenden Entropie.

Aus dieser Feststellung folgt zweierlei:

- 1 Von der Physik aus gesehen sind die Umwandlungsverluste nicht unvermeidlich. Jeder Prozess kann auch reversibel geführt werden. Das ist zwar aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht möglich, aber die Physik verbietet es nicht. Auch die „Umwandlung“ der chemischen Energie der Kohle (+ Sauerstoff) in elektrische Energie, bei der man gewöhnlich den Carnotfaktor für den schlechten Wirkungsgrad verantwortlich macht, kann im Prinzip reversibel vonstatten gehen, etwa in einer idealen Brennstoffzelle. Man könnte daher schon die in das Flussbild eintretende Energie als Nutzenergie bezeichnen.
- 2 Auch beim sogenannten Endverbraucher wird alle, wirklich alle Energie schließlich zur Entropieerzeugung verwendet oder verschwendet, sodass die Energie, die ihm als Nutzenergie verkauft wird, schließlich zu 100 % als Verlustenergie endet. Auch für den Endverbraucher gilt übrigens: Jeder Prozess, an dem der Endverbraucher interessiert ist, kann im Prinzip reversibel geführt werden.

Es soll damit nicht gesagt werden, dass an den Flussbildern etwas fehlerhaft sei; auch nicht, dass sie nutzlos wären. Wir meinen nur, dass eine falsche Botschaft davon ausgeht. Es ist nicht so, dass von der Primärenergie ein bestimmter, objektiv berechenbarer Anteil „wirklich“ genutzt wird. Die Primärenergie endet nach einem vielstufigen Prozess zu 100 % in der Entropieerzeugung, und die zitierten Flussbilder zeigen davon nur den ersten Teil.

### Herkunft

Warum hören Energieflussbilder an einer bestimmten Stelle auf? Warum zeigen sie nicht, wie die ganze „Nutzenergie“ schließlich auf der thermischen Deponie landet? Weil sie erstellt werden von Institutionen, die bestimmte Interessen haben. Für die Energiewirtschaft hört das Bild an der Zahlgrenze auf, dort, wo die Lieferanten die Hand aufhalten. Die Verluste vor dieser Grenze sind Gegenstand ihrer Betrachtung. Was der Kunde dann mit seiner Energie macht, ist den Erstellern des Flussbildes egal.

### Entsorgung

Man klärt darüber auf, dass die ganze Primärenergie zur Entropieproduktion verwendet wird, und dass es keine physikalische Grenze dafür gibt, diese zu vermindern. Prinzipiell sind alle Aufgaben, für die Energie eingesetzt wird, auch ohne Entropieproduktion zu erreichen. Man diskutiert, welche technischen Probleme entstehen, wenn

## Voll- und minderwertige Energie

man versucht, sich diesem Ziel zu nähern. Dabei können die Schülerinnen und Schüler viel Physik (und auch Chemie) lernen.

- [1] <http://www.zw-jena.de/kkimages/energieflussbild1995.gif>
- [2] <http://www.bpb.de/files/WQ93Q3.pdf>
- [3] <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=64>
- [4] <http://www.energyliteracy.com/?p=293>

## 5.17 Voll- und minderwertige Energie

### Gegenstand

Die Meinung, dass Wärme eine minderwertige Form der Energie darstellt, ist weit verbreitet. Als Grund gilt, dass Wärme wegen des zweiten Hauptsatzes nur teilweise in Arbeit umwandelbar ist. Dagegen gilt kinetische, potenzielle, elektrische Energie als vollwertig, da sie dieser Einschränkung nicht unterliegen. Umwandlung einer anderen Energieform in Wärme, wird gern argumentiert, hat einen Verlust an Arbeitsfähigkeit zur Folge und bedeutet damit eine Entwertung der Energie.

### Mängel

Energie ist im Überfluss vorhanden, und doch haben wir große Mühe, diese gewaltigen Vorräte anzuzapfen und die Energie für unsere Zwecke nutzbar zu machen. 1 kg aus dem 320 Trillionen Kilogramm Meerwasser enthaltenden Atlantik besitzt beispielsweise

- am Äquator aufgrund der Erddrehung rund 100 kJ an kinetischer Energie,
- gegenüber dem Temperaturnullpunkt  $T = 0$  etwa 700 kJ an Wärmeenergie,
- gegenüber dem Erdmittelpunkt rund 20 000 kJ an potenzieller Energie,
- ungefähr 80 000 000 000 kJ an Fusionsenergie (wegen der möglichen Umwandlung von Wasserstoff in Sauerstoff) und schließlich
- rund 90 000 000 000 000 kJ an Ruheenergie  $mc^2$ .

Alle diese Energiebeträge sind für uns unzugänglich und damit wertlos — aus verschiedenen Gründen. Um die kinetische Energie nutzen zu können, müssten wir das Kilogramm Wasser gegenüber der sich drehenden Erde zur Ruhe bringen. Dazu müssten wir den darin steckenden Impuls oder Drehimpuls, die ja unzerstörbar sind, fortschaffen, und zwar auf einen Körper, der nicht zusammen mit der Erde rotiert. Da kein solcher

Körper verfügbar ist, bleibt uns der Zugriff auf diese Energie verwehrt.

Aus ähnlichen Gründen können wir die 700 kJ an Wärmeenergie und die 20 000 kJ an potenzieller Energie nicht nutzen. Um das zu erreichen, müssten wir die (wie Impuls oder Drehimpuls) unzerstörbare Entropie  $S$  aus dem Wasser an einen absolut kalten, entropieleeren Ort schaffen bzw. die ebenfalls unzerstörbare Wassermasse  $m$  an die absolut tiefste Stelle bringen, hier den Erdmittelpunkt. Beides ist zwar prinzipiell vorstellbar, scheitert aber daran, dass diese Orte nicht verfügbar oder nicht zugänglich sind. An die 80 000 000 000 kJ an Fusionsenergie kommen wir nicht heran, weil es uns nicht gelingen will, die Kernverschmelzung in Gang zu setzen, und die 90 000 000 000 000 kJ an Ruheenergie freizusetzen, schaffen wir nicht, weil die Erhaltung der Baryonen- und Leptonenladung dies verhindert.

Kinetische, potenzielle und thermische Energie unterscheidet sich keineswegs grundsätzlich in ihrer Nutzbarkeit. Die Ersteren beiden erscheinen uns nur deswegen wertvoller, weil wir die für uns unverwertbaren Anteile stillschweigend weglassen, während wir bei der thermischen Energie genau umgekehrt gewohnt sind, den energetischen Ballast in Überlegungen und Rechnungen ständig mitzuschleppen.

Ein Beispiel: Bei einem Gezeitenkraftwerk betrachten wir als die den Turbinen zugeführte Energie die Differenz der potenziellen Energie des zu- und abfließenden Wassers,  $E = mgh_2 - mgh_1$ . Dadurch heben sich von vornherein die je Kilogramm Wasser nicht verwertbaren 20 000 kJ an potenzieller Energie heraus. Bei einem Wärmekraftwerk geht man anders vor. Statt der Differenz der mit der zu- und abfließenden Entropie beförderten Energie betrachtet man hier  $E = ST_2$  als die zur Nutzung bereitgestellte Energie, obwohl von vornherein feststeht, dass der Beitrag  $ST_1$  nicht verwertbar ist, wenn  $T_1$  die Umgebungstemperatur bedeutet. Diese Doppelmoral schafft Unterschiede, wo von Natur aus keine vorhanden sind. Überhaupt trifft die Vorstellung, dass die Umwandlung irgendeiner Energieform in Wärme der Grund für den Verlust an Arbeitsfähigkeit ist, nicht das Wesentliche. Die Arbeit  $W$  beispielsweise, die an einer rückläufig betriebenen Carnotmaschine verrichtet wird, um die Wärme  $Q_1$  von einem kälteren Speicher in einen wärmeren zu pumpen, erscheint zusammen mit  $Q_1$  als Wärme  $Q_2$  im zweiten Speicher,  $Q_2 = W + Q_1$ . Die Arbeit  $W$  ist also vollständig in Wärme verwandelt worden, kann aber unbeschadet dessen durch Umkehren des Vorganges restlos zurückgewonnen werden. Was ist dann aber der eigentliche Grund dafür, dass wir immer wieder neue Energie bereitstellen müssen, weil die alte, obwohl sie nicht verschwinden

kann, uns dennoch ständig wieder entzogen wird? Was schmälert den Gebrauchswert der Energie, deren Menge doch immer gleich bleibt?

Schuld an diesem scheinbaren Wertverlust der Energie hat allein die Entropie. Ihre Erzeugbarkeit aber Unzerstörbarkeit liefert unmittelbar die logische Begründung für diesen Tatbestand, ohne dass wir der Energie neben ihrem Wert in Joule irgendeine andere Art von Wert zuordnen müssten. Erzeugte Entropie  $S$  fällt bei allen selbstlaufenden Vorgängen als unvermeidlicher „Müll“ an, dessen Abfuhr und Lagerung auf einer Deponie mit der Temperatur  $T$  die Energie  $TS$  kostet. Dieser Energiebetrag steht uns für andere Zwecke nicht mehr zur Verfügung und stellt in diesem Sinne einen Verlust dar. Umlagerung der Entropie  $S$  aus der Deponie in ein Endlager mit verschwindender Temperatur würde den bereits als Verlust abgebuchten Energiebetrag  $TS$  wieder für beliebige Zwecke verfügbar und damit voll arbeitsfähig machen. Von irgendeiner qualitativen Veränderung der Energie, die sie weniger wertvoll macht, kann also gar keine Rede sein.

### Herkunft

Während man vor Aufstellung des Energiesatzes um 1850 herum noch glaubte, dass Arbeit zwar nicht erschaffen, wohl aber vernichtet werden könne (etwa durch Reibung) und damit Arbeitsverluste selbstverständlich waren, ließ sich diese alltägliche Erfahrung danach nicht mehr ohne Weiteres verstehen. Das Konzept der Energieentwertung, von W. Thomson nach 1850 atomistisch als Energiezerstreuung gedeutet, half diese Lücke zu schließen – mehr schlecht als recht.

### Entsorgung

Unser gebrochenes Verhältnis zur Entropie veranlasst uns, dieser Größe möglichst aus dem Wege zu gehen und die in ihren Zuständigkeitsbereich fallenden Erscheinungen durch irgendwelche Hilfskonstruktionen zu umschreiben. Erst wenn es uns gelingt, die Entropie als normale physikalische Größe zu begreifen und zu handhaben, können wir auf nachhaltige Besserung hoffen. Die Größe  $S$  selbst böte dafür die besten Voraussetzungen, wenn wir diese nicht durch Betriebsblindheit und Ungeschick leichtfertig verspielen würden.

## 5.18 Frei werdende Energie

### Gegenstand

Energie wird frei oder wird freigesetzt, im Englischen „released“, im Französischen „libérée“.

### Mängel

Man sagt oft, Energie werde frei oder werde freigesetzt. Ich muss zugeben, dass ich nicht so recht weiß, was damit gemeint ist. Nehmen wir eine Aussage wie diese:

- Die frei werdende Energie wird dabei durch Emission eines Photons abgegeben.

Nun ja, das Photon fliegt davon, frei wie ein Vogel. Da leuchtet es schon ein, dass die Energie jetzt frei ist. Aber sollten wir dann nicht konsequent sein und sagen, dass die Energie bei einem Absorptionsprozess wieder eingefangen wird? Aber das sagt niemand. Dass die Energie davonfliegt, kann also nicht das Kriterium für das Freiwerden sein.

Hier eine andere Vermutung: Man interessiert sich für einen Vorgang, bei dem Energie abgegeben wird. Man interessiert sich dabei nur für das System, das die Energie abgibt, nicht aber dafür, was dann mit der Energie geschieht. Es ist einem egal, ob damit etwas angeholt, erwärmt, chemisch verwandelt, verdampft, komprimiert oder beschleunigt wird. Dafür spricht das folgende Zitat:

- „Stoffumwandlungen, bei denen Energie in Form von Wärme abgegeben wird, nennt man exotherme chemische Reaktionen. Es wird dabei Energie freigesetzt, die z. B. genutzt werden kann, um Wärme und Licht abzugeben oder um elektrische bzw. mechanische Arbeit zu verrichten.“

Dagegen sprechen allerdings Aussagen wie die folgenden:

- „Die beim Bremsen freigesetzte Energie wird in Form von elektrischer Energie zurückgewonnen, in Batterien gespeichert und [...] über einen Elektromotor wieder für den Antrieb verwendet.“

Hier wird klar gesagt, was mit der beim Bremsen abgegebenen Energie passiert. Oder wird sie vielleicht in der Batterie dann wieder eingesperrt? Denn sicher wird sie ja erneut frei, wenn sie die Batterie wieder verlässt und vom Elektromotor „für den Antrieb verwendet“ wird? Oder wird sie immer nur frei und freier?

Wie die Formulierung „Energie wird frei“ benutzt wird, bekommt man schön vorgeführt, wenn man die Wortkombination bei *Linguee* eingibt. *Linguee* spuckt einem zig Zitate aus. Man kann es auch mit dem englischen oder französischen Pendant versuchen. Was man in jedem Fall feststellt, ist: Wenn man das „frei werden“ ersetzt durch „abgeben“, bleiben alle gefundenen Sätze klar und richtig.

Noch eine andere Bemerkung: Beim Umgang mit mengenartigen (extensiven) Größen hat man eine gro-

## Carnot'scher Wirkungsgrad

ße Freiheit in der Wortwahl. Wir können etwa sagen, elektrische Ladung wird gespeichert, verteilt, konzentriert, sie kann strömen, fließen, kommen und gehen und sich verkrümeln. All diese Sprechweisen kann man mit Recht und mit Nutzen im Zusammenhang mit allen extensiven Größen verwenden. Aber versuchen wir es mal mit dem Freisetzen. Würde man sagen, man setzt elektrische Ladung frei, wenn sich ein geladener Körper entlädt, oder man setzt Impuls frei, wenn ein Auto bremst?

### Herkunft

Wohl ein Überbleibsel aus der Zeit, als es noch keinen Energiestrom und keine Energiedichten, und keine lokale Bilanzgleichung für die Energie gab, also grob aus der Zeit vor 1900.

### Entsorgung

Eine einfache Regel, die ich jedem meiner Lehramtsstudentinnen und -studenten mitgebe: Sprecht über die Energie wie über einen Stoff. Stellt immer die Fragen: „Wo ist sie?“, „Wo kommt sie her?“, „Wo geht sie hin?“

Und wenn Ihr mal glaubt, eine Situation anzutreffen, die es rechtfertigt, die Metapher vom Freiwerden zu verwenden, vergesst nicht zu sagen, dass die Energie vorher eingesperrt war, und dass sie nachher auch wieder einfangen wird.

## 5.19 Carnot'scher Wirkungsgrad

### Gegenstand

Dass sich Wärme grundsätzlich nur beschränkt in Arbeit umwandeln lässt, bedingt den vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine. Der Anteil der Wärme, der im Idealfall als Arbeit nutzbar ist, heißt Carnot'scher Wirkungsgrad. Wenn  $T_2$  und  $T_1$  die Temperaturen des Zu- und Abwärmespeichers sind, beträgt er

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}.$$

### Mängel

Was uns hier als eine Besonderheit von Wärmekraftmaschinen erscheint, ist Ausdruck einer eigentümlichen Doppelmoral. Betrachten wir zum Vergleich ein – schon von Carnot herangezogenes – mechanisches Beispiel:

Einer Mühle, sagen wir im Schwarzwald  $h_2 = 1000$  m über dem Meeresspiegel, mit einem  $h_2 - h_1 = 5$  m ho-

hen, oberschlächtigen Wasserrad, fließen mit jedem kg Wasser rund  $m \cdot g \cdot h = 10$  kJ potenzieller Energie zu, von denen sie im Idealfall  $m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) = 50$  J nutzen kann. Ihr „Carnot'scher“ Wirkungsgrad beträgt

$$\eta = \frac{h_2 - h_1}{h_2} = 0,005.$$

Die gleiche Wassermühle am Niederrhein, sagen wir  $h = 20$  m über dem Meeresspiegel, hätte einen Wirkungsgrad von 0,25. Dabei haben wir großzügig für die potenzielle Energie nur den Wert gegenüber Normalnull in Anschlag gebracht. Bezogen auf die rund 20 MJ an potenzieller Energie, die 1 kg Wasser gegenüber dem Erdmittelpunkt besitzt, wird das Ergebnis für beide Mühlen noch bedrückender:  $\eta = 2,5 \cdot 10^{-6}$ .

Wir spüren sofort, dass hier irgendetwas nicht stimmt. Offenbar hat der Carnot'sche Wirkungsgrad nichts mit der Mühle und anscheinend auch nichts mit der Dampfmaschine zu tun, sondern mit der Lage der beiden wirksamen Niveaus  $h_1$  und  $h_2$  bzw.  $T_1$  und  $T_2$  zu einem fiktiven Bezugsniveau. Er ist dem falschen Objekt zugeordnet. Wir haben uns jedoch so daran gewöhnt, thermische und nichtthermische Vorgänge mit zweierlei Maß zu messen, dass wir an derlei Ungereimtheiten keinen Anstoß mehr nehmen.

### Herkunft

S. Carnot, der seine Gedanken noch vor der Aufstellung des Energiesatzes niederschrieb, kannte die Größe  $\eta$  nicht. Er verglich eine Dampfmaschine mit einer Wassermühle. Die Arbeit stammte für ihn, wie bei der Mühle, gleichsam aus dem Unterschied der „potenziellen Energie“ der Wärme im Zu- und Abwärmespeicher. Erst die von R. Clausius geforderte beschränkte Äquivalenz von Wärme und Arbeit schuf das Bedürfnis für eine solche Größe.

### Entsorgung

So unnötig wie in der Mechanik ist der Begriff auch in der Thermodynamik. Formuliert als „Entropiemühle“, ist eine Wärmekraftmaschine so trivial wie eine Wassermühle.

## 5.20 Wirkungsgrad und Carnotfaktor

### Gegenstand

Der Wirkungsgrad einer Maschine wird definiert durch den Quotienten aus der abgegebenen Nutzenergie und dem hierfür nötigen Aufwand an Energie:

$$\eta = \frac{\text{Nutzenergie}}{\text{aufgewendete Energie}}$$

Für eine gewöhnliche Widerstandsheizung erhält man mit dieser Formel einen Wirkungsgrad von  $\eta = 1$ .

Bei einer Wärmekraftmaschine setzt man für den Nenner dieses Ausdrucks diejenige Energie ein, die von der Wärmequelle kommt und in die eigentliche Kraftmaschine hineinfließt. Falls die Maschine ideal ist, d. h., falls keine Entropieerzeugung stattfindet, ergibt sich für den Wirkungsgrad der Carnotfaktor:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Bei einer Wärmepumpe setzt man für die in der gewünschten Form abgegebene Energie die Energie, die die Wärmepumpe auf der hohen Temperatur  $T_2$  verlässt, und es ergibt sich

$$\eta = \frac{T_2}{T_2 - T_1}.$$

### Mängel

Der Wirkungsgrad ist ungeschickt definiert. Man erwartet von einem vernünftig definierten Wirkungsgrad, dass

- seine Werte zwischen 0 und 1 liegen;
- eine ideale Maschine den Wirkungsgrad 1 hat;
- eine nichtideale Maschine einen Wirkungsgrad  $< 1$  hat.

Eine Maschine ist ideal, wenn sie reversibel arbeitet oder in anderen Worten: wenn in ihr keine Entropie erzeugt wird.

Keine dieser drei Bedingungen wird durch die oben angegebene Definition des Wirkungsgrades erfüllt. Der Wirkungsgrad der Wärmepumpe ist größer als 1, die erste Bedingung ist also verletzt. Die ideale, also reversibel arbeitende Carnotmaschine bekommt einen Wirkungsgrad, der kleiner als 1 ist, d.h., die zweite Bedingung ist verletzt. Die Widerstandsheizung, ein extrem nichtreversibel arbeitendes Gerät und notorischer Energieverschwender, bekommt den Wirkungsgrad 1. Damit ist die dritte Bedingung verletzt.

### Herkunft

Die Definition eines Wirkungsgrades, Nutzeffektes oder ökonomischen Coeffizienten ging einher mit dem sich über fast hundert Jahre hinziehenden, verwickelten Prozess der Differenzierung zwischen Energie und Entropie. In Carnots Arbeit gibt es ihn noch nicht. Man kann sich auch nicht vorstellen, dass Carnot die heutige

übliche Definition geschätzt hätte. Bei Helmholtz ist er aber schon zu finden. Ob Helmholtz der Erfinder dieses Maßes ist, konnten wir nicht feststellen. Die Definition war sicher schon in den alten Zeiten kein glücklicher Griff. Immerhin war das Vorgehen aber verständlich.

Einerseits gab es noch keine Wärmepumpe, also ein Gerät, das nach der Definition einen Wirkungsgrad liefert, der größer als eins ist. Andererseits gab es noch keine Brennstoffzelle, und es schien so, als sei die Verbrennung prinzipiell die einzige Möglichkeit, die Energie aus der Reaktion von Kohle und Sauerstoff nutzbar zu machen, sodass es keine Rolle spielte, ob man für den niedrigen Wirkungsgrad einer Dampfmaschine die Feuerung oder die eigentliche Maschine verantwortlich machte.

### Entsorgung

Man benutze für den Wirkungsgrad die folgende Definition:

$$\eta = \frac{P_{\text{ideal}}}{P_{\text{real}}}$$

$P_{\text{real}}$  ist der Energieverbrauch der realen Maschine, deren Wirkungsgrad man bestimmen möchte.  $P_{\text{ideal}}$  ist der Energieverbrauch einer Maschine oder Anlage, die dasselbe leistet, aber reversibel, d. h. ohne Entropieproduktion arbeitet.

Für die reversibel arbeitende Carnotmaschine erhält man  $\eta = 1$ , denn sie ist mit der idealen Maschine, die dasselbe leistet, identisch.

Für die Wärmepumpe ergibt sich immer ein  $\eta$ -Wert, der kleiner oder gleich 1 ist. Arbeitet die Maschine verlustfrei, also ohne Reibungsverluste, Wärmeverluste oder Verluste in elektrischen Leitungen, so ist sie ideal, und der Wirkungsgrad wird gleich 1. In dem Maße, wie solche Verluste vorhanden sind, wird  $\eta$  kleiner als 1.

Eine ideale Maschine, die dasselbe leistet, wie die Widerstandsheizung, nämlich einen bestimmten Entropiestrom (Wärmestrom)  $I_S$  auf einer hohen Temperatur  $T_2$  zu liefern, ist eine Wärmepumpe, die diese Entropie auf der Umgebungstemperatur  $T_1$  aufnimmt. Der Energieverbrauch der Widerstandsheizung ist

$$P_{\text{real}} = T_2 \cdot I_S,$$

Der Energieverbrauch der Wärmepumpe, die denselben Wärmestrom  $T_2 \cdot I_S$  liefert, ist

$$P_{\text{ideal}} = (T_2 - T_1) \cdot I_S,$$

Für den Wirkungsgrad erhält man also den Carnotfaktor:

## Der Carnot'sche Kreisprozess

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Die Widerstandsheizung verschwendet in der Tat um so mehr Energie, je höher die Umgebungstemperatur ist, denn je höher  $T_1$  ist, mit desto weniger Aufwand hätte man sich den gewünschten Wärmestrom beschaffen können.

Aufgrund derselben Überlegung erhält jede Anlage, deren Aufgabe es ist, Wärme zu liefern, und die die entsprechende Entropie zu 100 % erzeugt, als Wirkungsgrad den Carnotfaktor. In einem Kohlekraftwerk bekommt daher auch die irreversibel arbeitende Feuerung die „schlechte Note“ und nicht die fast reversibel arbeitende Turbine.

Die hier vorgeschlagene Definition ist in der thermodynamischen Literatur bekannt unter dem Namen exergetischer Wirkungsgrad [1]. Sie wird allerdings dargestellt als ein Konzept für Fortgeschrittene. Wir schlagen vor, nur diesen Wirkungsgrad, und zwar von Anfang an, zu behandeln und ihn einfach „Wirkungsgrad“ zu nennen.

[1] H. D. Baehr, *Thermodynamik*, Springer-Verlag, Berlin, 1981, S. 142

## 5.21 Der Carnot'sche Kreisprozess

### Gegenstand

In der Experimentalphysikvorlesung lernen die Studentinnen und Studenten den Carnot'schen Kreisprozess kennen. Ein ideales Gas durchläuft eine Folge von vier Teilprozessen – zwei isothermen und zwei isentropen – und gelangt am Ende in seinen Ausgangszustand zurück. Es wird gezeigt, dass sich bei einem solchen Prozess nur ein bestimmter Anteil der Wärme in Arbeit verwandeln lässt. Oft wird die Rechnung noch auf einen beliebigen Kreisprozess (mit einem idealen Gas) verallgemeinert, indem man den Prozess in infinitesimale isotherme und isentrope Teilstücke zerlegt. Dargestellt wird der Prozess gewöhnlich im  $p$ - $V$ -Diagramm.

### Mängel

1 Carnots Werk besteht in der Darstellung und Begründung einer einzigen großartigen Idee: Das „Caloricum“ (im Original „Calorique“) gelangt in einer ideal arbeitenden Wärmekraftmaschine von einer höheren zu einer niedrigeren Temperatur und verrichtet dabei Arbeit (bei Carnot puissance motrice,

also etwa Antriebskraft). Die Arbeit ist proportional zur Temperaturdifferenz und zur Menge des umgesetzten Caloricums („Quantité de calorique“). Die Wärmekraftmaschine funktioniert nach Carnot ähnlich wie ein Wasserrad, bei dem das Wasser von einer größeren zu einer geringeren Höhe gelangt und dabei Arbeit verrichtet. Er stellt diese Idee am Anfang seines Werkes vor. Erst danach führt er aus, wie man sich den Aufbau einer thermischen Maschine im Einzelnen vorstellen kann. Heute sind die Rechnungen das Einzige, was die Studierenden davon noch lernen. Von der Idee, die dahinter steckt, erfahren sie nichts.

2 Am Carnot'schen Kreisprozess sind zwei Energieformen beteiligt:  $p dV$  und  $T dS$ . Wenn man den Kreisprozess unbedingt behandeln will, so stellt man ihn am besten sowohl in den Koordinaten der einen Energieform als auch in denen der anderen grafisch dar, also im  $T$ - $S$ -Diagramm und im  $p$ - $V$ -Diagramm, Abb. 5.9. Das  $T$ - $S$ -Diagramm zeigt, wie einfach der Prozess ist. Hier kommt die Carnot'sche Idee deutlich zum Ausdruck: Das Caloricum (heute nennen wir es Entropie) wird bei konstanter hoher Temperatur von der Maschine aufgenommen (Prozessschritt

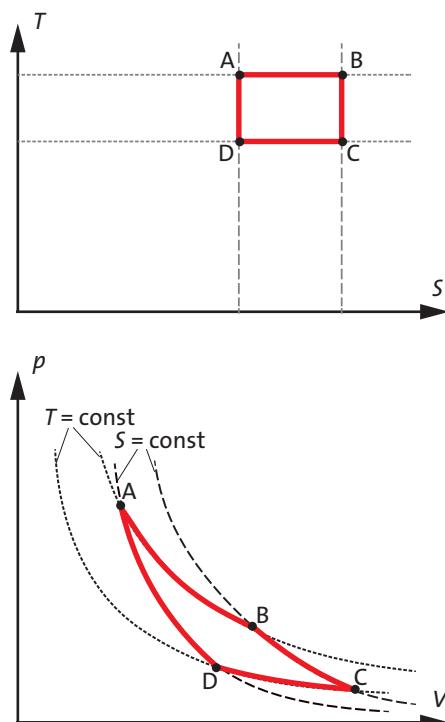


Abb. 5.9  $T$ - $S$ - und  $p$ - $V$ -Diagramm des Carnot'schen Kreisprozesses. In einem Zyklus nimmt die Maschine Entropie auf hoher Temperatur auf und gibt sie auf niedriger Temperatur wieder ab.

A-B) und bei konstanter niedriger Temperatur wieder abgegeben (Prozessschritt C-D). Das  $T$ - $S$ -Diagramm ist unabhängig davon, was für eine Arbeitssubstanz verwendet wird, das  $p$ - $V$ -Diagramm nicht. Das ist eine wichtige Tatsache, die Carnot hervorhebt, noch bevor er das Beispiel „ideales Gas“ diskutiert.

Man kann aber auch, so wie Carnot selbst, auf beide Diagramme verzichten, denn das  $T$ - $S$ -Diagramm ist trivial, das  $p$ - $V$ -Diagramm uninteressant.

- 3 Ein Verständnis der Wärmekraftmaschinen erlangt man leichter, wenn man nicht eine zyklisch (also in einem Kreisprozess) arbeitende Maschine betrachtet, sondern eine kontinuierlich arbeitende (eine Strömungsmaschine), ähnlich wie man es bei anderen Energiewandlern auch tut.

### Herkunft

1 Da man das Carnot'sche Caloricum in den fünfziger Jahren des 19. Jahrhunderts in der allgemeinen Euphorie, die die Entdeckung der Energie begleitete, als Energieform interpretierte, erschienen Carnots Überlegungen teilweise falsch. Sein Caloricum läuft durch die thermische Maschine hindurch. Auf dem Weg vom Wärmereservoir der hohen zu dem der niedrigen Temperatur ändert sich seine Menge nicht. Dieses Verhalten entspricht aus modernerer Sicht dem der Entropie. Man kann also Carnots Caloricum-Menge mit der später wiederentdeckten Entropie identifizieren. Wenn man es aber als Energie interpretiert, so entsteht eine falsche Aussage, denn im Reservoir mit der niedrigen Temperatur kommt weniger Energie an, als das Reservoir der hohen Temperatur abgegeben hat. (Die Differenz entspricht der von der Maschine geleisteten Arbeit.)

Die Verkennung oder misslungene Interpretation der Carnot'schen Idee hat sich bis heute erhalten, obwohl im Laufe der weiteren Entwicklung mehrfach auf den Fehler hingewiesen worden war.

- 2 Damit hängt zusammen, dass die Entropie in der Physik als eine unanschauliche Größe überlebt. Man versucht, ihr, wo es nur geht, aus dem Weg zu gehen. Dabei bleibt gewöhnlich auch das einfachere  $T$ - $S$ -Diagramm auf der Strecke.
- 3 Kreisprozesse erschienen zu Carnots Zeit im Zusammenhang mit thermischen Maschinen als die normalen Prozesse, denn die einzigen thermischen Maschinen, die man kannte, d. h. die Dampfmaschinen, arbeiteten zyklisch. Dampfturbinen gab es noch nicht. Das Wasserrad, das Carnot als Analogon anführt, ist auch eine kontinuierlich arbeitende Maschine.

### Entsorgung

Was hat das Thema in einer Schulzeitschrift zu suchen? Ist es nicht eindeutig ein Thema für die Universität? In der Tat: Wenn man es so kompliziert darstellt, wie es üblich ist, so ist es der Schule nicht zuzumuten, und es würde auch kaum eine Einsicht bringen. Wenn man es aber so klar darstellt, wie es Carnot getan hat, dann passt und gehört es in die Schule.

## 5.22 Innere Energie und Wärme

### Gegenstand

Wenn man einem Körper Wärme zuführt, so enthält er danach mehr Wärme. Gibt er welche ab, so hat er danach weniger. Gegen diese Sätze wird ein physikalisch nicht gebildeter Mensch sicher nichts einwenden. Die Physik lehrt uns aber, dass die Aussagen nicht richtig sind: Man kann einem Körper Wärme zuführen, und er hat danach trotzdem keine, und obwohl er keine hat, kann man ihm welche entziehen. Es sieht fast aus wie Zauberei. Der Zylinderhut ist leer, und es kommt ein Kaninchen heraus. Die Physik sagt uns, dass sich durch das Zuführen oder Entziehen von Wärme nicht der Wärmehalt eines Systems ändert, sondern, je nach den Umständen der Wärmezufuhr, seine innere Energie oder seine Enthalpie. Dass man die Energie, sobald sie im Körper steckt, nicht mehr Wärme nennen darf, ist dabei nicht einfach eine Verabredung. Es ist nicht etwa so, dass man der Wärme, sobald sie im Körper angekommen ist, nur einen anderen Namen gibt. Es ist also nicht so, dass man die Energie im Körper nicht Wärme nennen darf, sondern man kann es gar nicht. Dieser ärgerliche Sachverhalt schlägt sich in den Physiklehrbüchern auf unterschiedliche Art nieder. Manche Autoren sprechen ihn mutig aus [1], manche riskieren zweifelhafte Begründungen, indem sie Zerlegungen der inneren Energie in Anteile behaupten, die sie aber nicht aufrechterhalten könnten, wenn sie die Anteile quantitativ angeben sollten [2, 3] (siehe auch [4]), und manchmal werden Wärme und innere Energie kurzerhand identifiziert [5].

### Mängel

Ich kann mir nicht vorstellen, dass auch nur ein einziger Schüler versteht, warum es falsch ist zu sagen, die einem Körper zugeführte Wärme stecke in dem Körper drin. Ich kann mich auch an keinen Studenten des Lehramts Physik erinnern, der mir diesen Sachverhalt begründen konnte. Auch die meisten Physikstudenten zum Zeitpunkt ihrer Diplomprüfung haben es nicht verstanden. Die Behauptung erscheint den Lernenden entweder nur

## Thermische Energie

als Sophisterei, oder sie wird mit den zahlreichen Themen abgespeichert, die man nicht verstanden hat, aber auch nicht unbedingt zu verstehen braucht.

### Herkunft

Es geht um die Beschreibung von Vorgängen, für die man eigentlich ein Mengenmaß der Wärme brauchte. Die „Wärme“ der Physik als „Prozessgröße“ [6] taugt hierzu genau so wenig wie die innere Energie oder die bei den Chemikern beliebtere Enthalpie. Siehe auch [7, 8].

### Entsorgung

Sie ist besonders einfach. Man beschreibe die betrachteten Vorgänge mit der Entropie. Sie gibt genau das wieder, was sich der ungebildete oder unverbildete Mensch unter Wärme vorstellt. Wenn man etwas erwärmt, führt man sie zu, und nachdem man sie zugeführt hat, steckt sie drin. Man kann quantitativ leicht angeben, wie viel Entropie ein Körper enthält, und noch leichter, um wie viel sich sein Entropieinhalt beim Erwärmen ändert [9].

[1] Galileo 9, Oldenbourg, 2000, S. 98: „Achtung! Unterscheide sehr sorgfältig zwischen Wärme, innerer Energie und Temperatur: Ein Gegenstand besitzt keine Wärme, sondern innere Energie!“

[2] Spektrum Physik, Schroedel Verlag, Hannover, 2000, S. 17: Unter der Überschrift „Die Anteile der inneren Energie“ werden aufgeführt: die Bewegungsenergie der Teilchen; die Energie, die im Zusammenhalt der Teilchen steckt; chemische Energie und nukleare Energie.

[3] Galileo 9, Oldenbourg, 2000, S. 93: „Die Energie eines Gegenstandes, die nicht als mechanische Energie (potenzielle oder kinetische Energie) zu beschreiben ist, bezeichnet man als innere Energie  $E_i$ . Zur inneren Energie gehören z. B. die Atomenergie, die chemische und die biologische Energie. Ein wesentlicher Anteil ist auch die Energie, die mit der Temperatur des Gegenstandes zusammenhängt.“

[4] G. Job, *Energieformen*, Altlasen der Physik

[5] Metzler-Physik, Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1988, S. 60: „Die Körper verrichten in jedem Fall auch noch Reibungsarbeit; dadurch wird ein Teil dieser mechanischen Energie in eine Energieform umgewandelt, aus der sie nicht in mechanische Energie zurückverwandelt werden kann, sondern als Wärmeenergie oder innere Energie an die Umgebung im oder außerhalb des Systems abgegeben wird.“

[6] F. Herrmann, *Zustandsgrößen*, Altlasen der Physik

[7] G. Job, *Äquivalenz von Wärme und Arbeit*, Altlasen

[8] G. Job, *Entropie*, Altlasen der Physik

[9] F. Herrmann, *Die Messung der Entropie*, Altlasen der Physik

## 5.23 Thermische Energie

### Gegenstand

Aus einem Schulbuch: „Die thermische Energie ist Teil der inneren Energie und wird weitgehend durch die Temperatur bestimmt. Da man in vielen Fällen von der Konstanz der anderen Bestandteile ausgehen kann, wird mitunter nur die thermische Energie betrachtet. ...“

Die Wärme gibt an, wie viel thermische Energie von einem System auf ein anderes übertragen wird. ...

Für den Zusammenhang zwischen übertragener Wärme und Energieänderung gilt:

$$Q = \Delta E_{\text{therm}} .$$

Aus einem anderen Schulbuch: „Die potenzielle und die kinetische Energie der Teilchen wird zusammenfassend auch als thermische Energie bezeichnet.“

Aus einem dritten Schulbuch: „Die gesamte Energie eines thermodynamischen Systems, die aus thermischer Energie (potenzielle und kinetische Energie der Teilchen), aus chemischer Energie und nuklearer Energie besteht, ist die innere Energie  $U$ .“

### Mängel

Die Absicht, die den Definitionen der thermischen Energie zugrunde liegt, ist klar: Man möchte ein Maß für den Wärmeinhalt eines Systems einführen. Dieses Maß soll unter anderem die folgenden Eigenschaften haben:

- 1 Es soll für ein gegebenes System in einem gegebenen Zustand einen wohl definierten Wert haben, d. h., es soll eine Zustandsgröße sein.
- 2 Es soll ein energetisches Maß sein, d. h. eine extensive Größe, die man in Joule misst.
- 3 Es soll ein Anteil der inneren Energie sein. Ein anderer Anteil wäre die „chemische Energie“.
- 4 Seine Änderung soll mit dem übereinstimmen, was man in der Physik als Wärme  $Q$  bezeichnet.

Eine Größe, die diese Forderungen erfüllt, lässt sich aber nicht definieren. Man kann nicht kinetische und potenzielle Energie der Teilchen von einem Anteil unterscheiden, den man chemische Energie nennen würde. Jede Temperaturerhöhung führt zur Zunahme von elektronischen Anregungen, Schwingungsanregungen, Anregungen des Spinsystems, zur Dissoziation von Molekülen, zur Umlagerung von Atomen, d. h. chemischen Reaktionen, und schließlich auch zu Kernreaktionen. Es gibt keine Möglichkeit und auch keinen Grund dafür, die an diesen Prozessen beteiligte Energie auf eindeutige Art in Summanden zu zerlegen.

Gäbe es eine solche Zerlegung, so würde sie sich thermodynamisch darin äußern, dass der eine Summand (die thermische Energie) nur von der Temperatur und nicht vom chemischen Potenzial abhängt, und ein anderer nur vom chemischen Potenzial und nicht von der Temperatur.

### Herkunft

Physik, Chemie und technische Thermodynamik brauchen ein Mengenmaß für die Wärme, ein Maß für den Wärmeinhalt eines Systems. Unser gesunder Menschenverstand legt es auch nahe, dass sich eine solche Größe definieren lässt, denn wir operieren intuitiv ständig damit, und zwar erfolgreich. Bei der Suche nach einem Wärmemaß im 19. Jahrhundert wurde allerdings der Fehler gemacht, dass man annahm, eine solches Maß müsse eine energetische Größe sein [1]. Die Definition eines energetischen Wärmemaßes mit den erwünschten Eigenschaften konnte aber nicht gelingen. Herausgekommen sind stattdessen Ersatzkonstruktionen, die einige Erwartungen an ein Wärmemaß erfüllen, andere aber nicht. So hat die Größe  $Q$ , die ja auch „Wärme“ genannt wird, den Nachteil, dass sie keine physikalische Größe im üblichen Sinn ist. Man sagt, sie sei eine Prozessgröße, denn es hat keinen Sinn, nach ihrem Wert für ein gegebenes System in einem gegebenen Zustand zu fragen. Die Chemiker behelfen sich gern mit einer anderen Ersatzkonstruktion, der Enthalpie  $H$ . In der Tat verhält sich die Enthalpie wie ein Wärmeinhalt, solange man nur Prozesse bei konstantem Druck zulässt – für einen Physiker allerdings eine inakzeptable Einschränkung.

Keine der beiden Größen  $Q$  und  $H$  erfüllt also die Anforderungen, die man berechtigerweise an ein Wärmemaß stellt. Was liegt also näher, als ein neues Wärmemaß zu konstruieren, das sich vernünftig verhält, nämlich die thermische Energie?

Es ist interessant, dass man den Begriff „thermische Energie“ nur in Schulbüchern findet, nicht aber in Hochschulbüchern. Müssen wir also den Schulphysikern den Vorwurf machen, dass sie aus Unkenntnis der Thermodynamik unhaltbare Konzepte erfinden? Ja und nein. Ja, denn ihre Konstruktion funktioniert nicht. Nein, weil die Schuld, dass die Wärmelehre so unbeliebt und so wenig bekannt ist, bei der Hochschule liegt. Die Thermodynamik hat den Ruf, abstrakt zu sein, und die Hochschullehre macht diesem Ruf alle Ehre: Zusammenhänge zwischen vier Variablen, die sich alle gleichzeitig ändern, verschachtelte partielle Ableitungen, Variablenwechsel, unanschauliche Größen wie Enthalpie, freie Energie, Gibbs'sche freie Energie gehören zur Ausstattung des Gruselkabinetts. Für die Erklärung eines so

### Was ist eigentlich Energie? Was ist eigentlich Entropie?

einfachen Vorgangs wie der Kompression der Luft in einem Dieselmotor benutzt man den sogenannten Adiabatenexponenten, der definiert wird als Quotient aus zwei partiellen Ableitungen, die sich darin unterscheiden, dass einmal eine, einmal eine andere Variable konstant gehalten wird. So ist gar nicht zu erwarten, dass ein Student ein unverkrampftes Verhältnis zur Wärmelehre entwickelt. Wie soll er dann aber später als Lehrer diese Sachverhalte schülergerecht darstellen? Es ist nur zu verständlich, dass er sich eine einfachere Welt zusammenbastelt.

### Entsorgung

Sie ist viel einfacher als man befürchten könnte. Man lasse ab von der Idee eines energetischen Wärmemaßes. Alle Schwierigkeiten verschwinden, wenn man die Entropie als Wärmemaß einführt.

[1] G. Job, *Äquivalenz von Wärme und Arbeit*, Altlasten der Physik

## 5.24 Was ist eigentlich Energie? Was ist eigentlich Entropie?

### Gegenstand

Auf einem Symposium im Rahmen der WCPE (World Conference on Physics Education) über die Einführung der Energie im Unterricht im vergangenen Juli wurden die Referentinnen und Referenten nicht müde zu betonen, dass die Energie eine abstrakte Größe sei. Dabei waren sie in guter Gesellschaft. Schließlich wissen wir auch von Feynman [1]: „Es ist wichtig, sich klar zu machen, dass wir heute in der Physik keine Vorstellung davon haben, was Energie ist.“

Nicht anders steht es mit der Entropie. Der große John von Neumann erklärt uns [2]: „Niemand weiß, was Entropie eigentlich ist, sodass man in einer Debatte immer im Vorteil ist.“ Oder der Karlsruher Mathematiker Harro Heuser [3]: „Der Entropiebegriff gehört ohnehin zu den okkultesten Begriffen unserer Physik, ....“

### Mängel

Was ist eigentlich Energie? Was ist eigentlich Entropie?

1 Die Fragen sind schlecht gestellt, das „eigentlich“ sollte raus. Und die eingangs zitierten Bemerkungen sind unnötig fatalistisch. Statt Warnungen oder Einschüchterungen auszusprechen, sollte man als erste Antwort auf die Fragen einfach sagen: Beides sind physikalische Größen und damit ein Maß für etwas. Natürlich erzwingt diese Antwort gleich eine neue

## Verdampfungswärme, Verdampfungsenergie, Verdampfungsenthalpie

Frage: Wofür sind sie denn ein Maß? Aber diese Frage hört sich längst nicht mehr so transzendent an wie die ursprüngliche Frage, und man kann sie auch beantworten.

- 2 Man fragt immer nur nach diesen beiden Größen, aber nie danach, was „eigentlich“ die Masse, die elektrische Ladung, die Temperatur oder der Druck ist. Dabei sind diese Fragen genau so interessant, und sie sind genau so schwer oder leicht zu beantworten.
- 3 Eine gut gestellte Frage definiert ein Ensemble von Antworten, von denen eine die richtige ist. Die Frage: „Wer hat die ‘Eins’ in der Klassenarbeit geschrieben?“ legt fest, dass die Antwort einer der Namen der Schülerinnen und Schüler sein muss. Es gibt auch weniger gut gestellte Frage und es gibt schlecht gestellte Fragen. Bei den schlecht gestellten liegen die möglichen Antworten nicht fest, und es ist damit fast unmöglich es dem Fragenden Recht zu machen. Eltern wissen ein Lied davon zu singen. Es sind vor allem die Fragen, die mit „Warum“ beginnen. Man beantwortet sie, und es kommt das nächste Warum. Ähnlich steht es mit der Frage: Was ist eigentlich...? Mit welcher Antwort wäre denn der Fragenformulierer zufrieden?

- 4 Wir wollen es mit einer Antwort versuchen.

Was ist Energie? Dasselbe wie Masse. Die entsprechende Formel wird öfter zitiert als jede andere physikalische Gleichung, und trotzdem ist die Botschaft nach mehr als hundert Jahren immer noch nicht angekommen. Man könnte natürlich weiter fragen: Und was ist Masse? Aber das fragt niemand. Wohl zu Recht. Man mag einwenden, die Einstein'sche Antwort sei im Rahmen der klassischen Physik nicht relevant, da sich die Relativitätstheorie nur bei hohen Geschwindigkeiten bemerkbar macht. Der Einwand passt hier aber nicht. Trägheit und Schwere manifestieren sich allenthalben und das sind die Eigenschaften der Energie-Masse. Dass man den Gewichtsunterschied zwischen einer vollen und einer entladenen Batterie nicht mit der Waage feststellen kann, hat nichts damit zu tun, dass irgendeine Geschwindigkeit nicht relativistisch genug ist, sondern nur mit der Messgenauigkeit der Waage.

Und was ist Entropie? Das was man umgangssprachlich Wärme nennt. Wem die Antwort zu einfach ist, der mag gern weiter fragen: welche mikroskopisch-statistische Deutung man der Entropie geben kann usw. Aber man sage nicht: Man wisse nicht, was Entropie „eigentlich“ ist.

### Herkunft

Es herrscht das historisch entstandene Missverständnis, dass die Energie ein Etwas ist, eine Art Stoff, den man in

der Natur vorfindet, dessen Natur aber schwer zu ergründen ist.

Dass man die Frage bei der elektrischen Ladung nicht stellt, dass man glaubt zu wissen, was sie „eigentlich“ ist, beruht auf demselben Missverständnis: Die physikalische Größe Ladung wird oft mit dem physikalischen System Elektron verwechselt.

### Entsorgung

Man führt beide, die Energie und die Entropie, über ein Modell ein. Man stellt sie sich vor als ein Fluidum, für dessen Menge die Größen ein Maß sind. Das eine Fluidum steht für die Trägheit und Schwere, das andere für die Wärme. Eine solche Einführung ist leicht zu verstehen und sie ist tragfähig.

[1] Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands, *Vorlesungen über Physik*, Band I, 5. Auflage, Oldenbourg Verlag, München 2007, S. 46

[2] M. Tribus, E. C. McIrvine, *Energy and Information*, Sci. Am. 224, Sept. 1971, S. 178 – 184

[3] Harro Heuser, *Unendlichkeiten*, B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden 2008, S. 30

## 5.25 Verdampfungswärme, Verdampfungsenergie, Verdampfungsenthalpie

### Gegenstand

1 „Für die Phasenumwandlung flüssig → gasförmig ist eine bestimmte (temperaturabhängige) Umwandlungswärme  $Q_{fg}$  erforderlich.“

2 „Für das Verdampfen einer Flüssigkeit muss die Verdampfungsenthalpie aufgebracht werden. Der Umgebung bzw. der Flüssigkeit wird Wärme entzogen.“

3 „Die Wärmeenergie, die erforderlich ist, um einen Körper aus der flüssigen in die Dampfphase zu bringen, nennt man latente Verdampfungswärme. [...] Statt latente Wärme kann man auch die Bezeichnung Umwandlungsenthalpie verwenden.“

4 „Da bei der Verdampfung gegen die molekularen Anziehungskräfte Arbeit verrichtet werden muss, wird Wärme verbraucht. Die Wärmemenge, die der Masse 1 g einer Flüssigkeit zugeführt werden muss, um sie bei konstanter Temperatur zu verdampfen, bezeichnet man als spezifische Verdampfungswärme  $\lambda$ . [...] Die Verdampfungswärme besteht aus einem inneren und einem äußeren Anteil. Die äußere Wärme wird dazu verbraucht, das ursprüngliche Volumen [...] auf das Volumen von 1 g Dampf auszudehnen.“

## Verdampfungswärme, Verdampfungsenergie, Verdampfungsenthalpie

- 5 „Ebenso ist Energie nötig, um die Teilchen eines Körpers beim Übergang flüssig → gasförmig voneinander zu lösen. Ursache für den Energiebedarf beim Schmelzen und Verdampfen sind die zwischen den Teilchen der Materie existierenden anziehenden elektrischen Kräfte. Die dabei zugeführte Energie ist dann in der Materie, in dem sogenannten thermodynamischen System, als potentielle Energie der Teilchen gespeichert...“
- 6 „Wenn Wasser verdampft, rücken die Wassermoleküle weit auseinander. Sie müssen dabei gegen die Anziehungskräfte, die zwischen ihnen wirken, anlaufen und außerdem die Luft wegschieben. Die dazu erforderliche Energie kommt meistens von einem Heizgerät. [...] Wasserdampf hat die zusätzliche Energie gespeichert. Beim Kondensieren geht sie wieder auf andere Körper [...] über.“

### Mängel

Obwohl sich die Autoren sehr unterschiedlich ausdrücken, krankt jedes der Zitate daran, dass ein Vorgang mit einer unpassenden Größe beschrieben wird, nämlich mit der Energie. Dass das zu sprachlichen und auch zu begrifflichen Unstimmigkeiten führt, zeigen die Zitate auf unterschiedliche Art.

- Zitat 1 sagt: „Für die Phasenumwandlung flüssig → gasförmig ist eine bestimmte [...] Umwandlungswärme  $Q_{fg}$  erforderlich“. Denn, so würde man gern fortfahren, das Gas enthält mehr Wärme als die Flüssigkeit. So denkt man vielleicht, aber so ist es nicht. Man denkt so, weil die entsprechende Formulierung in einem anderen Kontext durchaus so ergänzt werden kann. „Zum Düngen eines Gartens sind zwei Sack Torf erforderlich.“ Der Torf wird zum Düngen verwendet, und befindet sich demzufolge, nachdem man ihn im Garten zerstreut hat, im Garten. Wie sollte es anders sein? Im Fall der Phasenumwandlung ist es aber anders. Aus zwei Gründen: Die Wärme ist prinzipiell nicht irgendwo, sie ist eine Prozessgröße. Ein sprachlicher Umgang mit dieser Differentialform, der ihren mathematischen Eigenschaften angemessen ist und der gleichzeitig erlaubt, sich ein Bild von dem entsprechenden Vorgang zu machen, ist kaum möglich.

Die Energie, die „in Form von Wärme“ zugeführt wird, befindet sich nach dem Zuführen nur zum Teil dort, wo man sie vermutet: im Gas. Der andere Teil geht in ein System, das mit dem Phasenübergang kaum etwas zu tun hat: ins Gravitationsfeld.

(Wer es schon vergessen oder nie erfahren hat: Die Energie, die man zuführt, geht teilweise in den verdampfenden Stoff, denn 1 kg Wasserdampf enthält

bei derselben Temperatur mehr Energie als 1 kg flüssiges Wasser. Aber nicht alle Energie endet dort. Der andere Teil wird gebraucht, „die Atmosphäre anzuheben“. Der Dampf braucht mehr Platz als das flüssige Wasser. Dieser Anteil der Energie geht also ins Gravitationsfeld.)

- Zitat 2 sagt es richtig, könnte man denken, denn in der Tat bewirkt die zugeführte Energie nicht eine gleich große Zunahme der Energie des verdampfenden Stoffes. Sie ist vielmehr gleich seiner Enthalpiezunahme. Also: Richtig gemeint, aber wieder nicht sehr verständlich. Denn was heißt es, Enthalpie „aufzubringen“. Es heißt doch wohl, dass man sie sich irgendwoher beschafft. Das ist aber wieder falsch, denn man beschafft sich nicht Enthalpie, sondern Energie.
- Der Autor von Zitat 3 glaubt, dem Leser dadurch helfen zu können, dass er erklärt, latente Wärme und Verdampfungsenthalpie seien nur zwei Bezeichnungen für dieselbe Sache, was nicht zutrifft. Alle Mühe, die man sich gibt, um den Studenten zu erklären, was eine Prozessgröße ist, wird durch solche Äußerungen durchkreuzt.
- Gemäß Zitat 4 besteht die Verdampfungswärme aus zwei Anteilen, einem „inneren“ und einem „äußeren“. Wenn etwas aus zwei Teilen besteht, so müsste man ihm das irgendwie ansehen. Das ist aber hier nicht der Fall. Wenn man Leitungswasser einerseits zum Trinken und Kochen verwendet, und andererseits zum Spülen und Waschen, so wird man wahrscheinlich nicht sagen, das ankommende Wasser „bestehe“ aus zwei Anteilen, dem Waschwasser und dem Trinkwasser.
- A propos „erforderlich“, Zitate 1 und 3. Man kann es so sagen. Aber in welchen Situationen benutzt man das Wort eigentlich sonst? Schauen wir bei Linguee nach, wie man außerhalb der Physik mit dem Wort umgeht: „Es sind Anstrengungen erforderlich“, „alles veranlassen, was erforderlich ist“, „die Kompetenz, die für die Ausführung der Arbeiten erforderlich ist“, „die Aufbewahrung der Daten ist nicht erforderlich“, „das Bezugsrecht der Aktionäre auch insoweit auszuschließen, als es erforderlich ist“, „obwohl bedeutende Investitionen in die Energieinfrastruktur erforderlich sind“, „nach der Satzung oder nach der Geschäftsordnung für den Vorstand Entscheidungen des Aufsichtsrats erforderlich waren“. Und nehmen wir uns auch gleich noch das „aufbringen“ aus Zitat 2 vor. Wie ist der übliche Gebrauch des Verbs? Wieder ein Blick in Linguee: „Investitionssummen aufbringen“, „Flexibilität aufbringen“, „Vorschuss aufbringen“, „Mut aufbringen“.

## Vorläufige Temperaturskalen

In beiden Fällen, dem „Erforderlichsein“ und dem „Aufbringen“, wird nahe gelegt, dass es um die Vorbereitung eines Vorgangs geht, und nicht um das Zuführen von etwas, das Mengencharakter hat. Man wird nicht ermutigt zu fragen: Wo kommt es her? Wo geht es lang? Wo geht es hin?

Ich kann mir vorstellen, dass derjenige, der im Umgang mit diesen Konzepten geübt ist, die vorangehenden Bemerkungen für pedantisch hält. Als Lehrer weiß ich aber nur zu gut, dass begriffliche Ungenauigkeit eine der Hauptursachen von Lernschwierigkeiten ist.

- Schulbuchautoren wissen, dass man Aussagen, wie wir sie gerade angesprochen haben, Schülern nicht zumuten kann. Und zwar nicht deshalb, weil die Schüler zu dumm sind. Daher begibt man sich in Schulbüchern auf sichereres Terrain, Zitate 5 und 6: Keine Aussagen über die „Prozessgrößen“ Wärme und Arbeit, keine Aussage über die Legendre-Transformierte „Enthalpie“, sondern nur über die gutmütige, lokal bilanzierbare Zustandsgröße Energie. So kann man auf jeden Fall eine den Schülern verständliche Sprache benutzen. Trotzdem ist man das Problem nicht los. Dass ein Teil der Energie in das Gravitationsfeld geht, wird manchmal einfach übergangen, Zitat 5. Man kann allerdings Verständnis hierfür aufbringen, denn das ist schließlich nur ein unerwünschter Nebeneffekt. Korrekt ist es aber nicht. In Zitat 6 wird dieser Effekt angesprochen. Nach unserer Meinung wäre das also der bestmögliche Umgang mit dem Thema. Trotzdem läuft auch hier etwas nicht rund. Ich möchte versuchen, es mithilfe eines Gleichnisses zu erläutern.

Man möchte vergleichen, wie viel Stahl zum Bau verschiedener Hängebrücken verwendet wurde. Die Brücken haben alle dieselbe Länge, Tragfähigkeit etc., sind aber verschieden gebaut. Man nimmt als Maß für die gesuchte Eigenschaft das Geld, das der Bau der Brücke gekostet hat. In der Tat dient (so nehmen wir hier an) der größte Teil des finanziellen Aufwandes dem Ankauf des Stahls. Nun wird aber ein Teil der finanziellen Aufwendungen noch für andere Zwecke gebraucht, vor allem für die Bezahlung der Baufirmen. Man hat also zur Bewertung dessen, worum es eigentlich ging, das falsche Maß genommen: den Geldwert des Brückenbaus, statt der eigentlich interessierenden Größe, nämlich der Menge des Stahls. Ähnlich ist es bei der quantitativen Beschreibung des Verdampfungsvorgangs. In Ermanglung eines besseren Maßes (nämlich der Entropie) benutzt man eine Ersatzgröße, die Energie, die aber nur teilweise das charakterisiert, was einen eigentlich interessiert.

## Herkunft

- 1 Man geht mit der Energie um, wie Ende des 19. Jahrhunderts. Die folgende Entwicklung wird ignoriert. Erst seit der Wende zum 20. Jahrhundert konnte man die Energie lokal bilanzieren, siehe etwa [1].
- 2 Man bilanziert die unpassende Größe. Mit der Entropie wird alles einfacher. Dass auch sie lokal bilanziert werden kann, wurde 1911 gezeigt [2], ist aber in den meisten Hochschulbüchern noch nicht angekommen.

## Entsorgung

Wenn man das Verdampfen, etwa von Wasser, mithilfe der Energie beschreiben will:

Man führt der Portion Wasser, die verdampfen soll, Energie zu. Diese steckt nachher teilweise im Dampf, teilweise als sogenannte potenzielle Energie in der Atmosphäre, die der Dampf verdrängen oder anheben muss. (Noch besser ist es, das Gravitationsfeld als Energiespeicher zu bezeichnen.) Man kann die gesamte Energie allein durch Variablen des Systems „verdampfendes Wasser“ ausdrücken:  $E + pV$ . Man kann also auch sagen man führt einer Wasserportion die Energie  $\Delta E$  zu. Die Änderung  $\Delta H$  ihrer Enthalpie ist gleich der zugeführten Energie  $\Delta E$ . Die restliche Energie wurde weitergegeben.

Einfacher und klarer wird die Beschreibung, wenn man statt der Energie die Entropie bilanziert. Die Entropie verhält sich genau so, wie es uns der gesunde Menschenverstand sagt: Man führt dem flüssigen Wasser Entropie zu, dadurch verdampft es. Die zugeführte Entropie steckt in dem neu entstandenen Wasserdampf. Die Verdampfungsentropie lässt sich genau so leicht messen wie die Verdampfungswärme [3].

[1] G. Mie, *Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung*, Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, CVII. Band VIII. Heft 1898, S. 1113

[2] F. Jaumann, *Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze*, Wiener Berichte CXX, Abt. IIa, S. 385-530

[3] F. Herrmann, *Die Messung der Entropie*, Altlasten der Physik

## 5.26 Vorläufige Temperaturskalen

### Gegenstand

Die Temperatur wird fast immer zunächst vorläufig über die thermische Ausdehnung der Stoffe, insbeson-

## Die thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper

dere der Gase skaliert und erst nachträglich, wenn überhaupt, als „absolute“, das heißt von jeder Thermometersubstanz unabhängige Größe  $T$  definiert, etwa durch die Forderung, dass der Wirkungsgrad  $\eta$  eines Carnot-Prozesses mit den Arbeitstemperaturen  $T_2$  und  $T_1$  durch

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

gegeben sein soll.

### Mängel

Beachten wir, dass sich dünne Gase in ihrer thermischen Ausdehnung gleichen, sodass man eine für alle Gase einheitliche thermometrische Skale  $\Theta$  definieren kann, und vergessen wir alle übrigen Thermometersubstanzen, so haben wir es nur noch mit zwei Temperaturgrößen,  $\Theta$  und  $T$ , zu tun, deren Definition, Handhabung und Zusammenhang zu diskutieren ist. Das Ergebnis ist  $\Theta \sim T$  und damit  $\Theta \equiv T$ , wenn man nur für eine Stelle – etwa für den Tripelpunkt des Wassers –  $\Theta = T$ , verlangt. Die Herleitung ist nicht schwierig, wird aber fast immer unterschlagen.

Noch einfacher ist es, auf vorläufige Temperaturskalen und Carnotprozesse ganz zu verzichten, die Entropie  $S$  direkt zu metrisieren und die Temperatur  $T$  etwa über die mit einem Entropiestrom  $I_S$  einem Körper zufließenden Energiestrom  $P$  zu definieren:  $P = T \cdot I_S$ . Für die so eingeführte Größe  $T$  kann man mühelos zeigen, dass sie alle uns gewohnten Eigenschaften einer Temperatur besitzt und damit mit den üblichen Thermometern gemessen werden kann. Zur Einmessung („Eichung“) lässt sich die unschwer herleitbare Eigenschaft nutzen, dass bei Stoffen, deren innere Energie nur von  $T$  abhängt (z. B. dünne Gase), der Druck  $p$  bei konstantem Volumen  $T$  proportional sein muss, sodass man mit solchen Thermometersubstanzen  $T$  über  $p$  messen kann. Die Physik einfacher Wärmekraftmaschinen und Wärmezpumpen fällt uns in den Schoß. Es genügen zwei, drei Zeilen und die vier Grundrechenarten, wofür man sonst Arbeits- und Wärmediagramme sowie die Differenzial- und Integralrechnung mehrstelliger Funktionen bemüht.

### Herkunft

Schul- und Lehrbücher wiederholen hier die geschichtliche Entwicklung. Dass Flüssigkeitsthermometer nach wie vor überall im Gebrauch sind, lässt den Einstieg über die thermische Ausdehnung natürlich erscheinen. Im Zusammenhang mit dem Gasgesetz, das als wichtiges Lernziel gilt, liegt die Behandlung der gasthermometrischen Skale nahe. Nach allgemeiner Überzeugung liegt die Entropie jenseits des Schulhorizontes und da-

mit außerhalb des Blickfeldes und Interesses eines Pädagogen.

### Entsorgung

Sie kann nur gelingen, wenn man die durch anderthalb Jahrhunderte gepflegten und damit schlechterdings zur physikalischen Grundbildung gehörenden Vorurteile gegenüber der Entropie aufgibt, die sie zu einer komplizierten Zustandsgröße in einem abstrakten Kalkül stempeln und ihr rundweg grundlos und ungeprüft jede mit unseren Sinnen fassbare Eigenschaft absprechen.

## 5.27 Die thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper

### Gegenstand

Die thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper

### Mängel

Für Temperaturänderungen im Bereich von  $10^\circ\text{C}$  ist der Effekt von der Größenordnung Promille. Effekte dieser Größenordnung gibt es unzählige. Man kann es sich im Allgemeinen nicht leisten, solche Effekte im Anfängerunterricht zu behandeln.

Als Grund für die Behandlung des Themas käme in Betracht, dass es Erscheinungen in der Alltagswelt gibt, die man durch thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper erklären kann.

So beruht die Funktionsweise des Quecksilberthermometers auf diesem Effekt. Nun gibt es aber andere, ebenso wichtige Temperaturmessverfahren, deren Erklärung man längst nicht so viel Zeit widmet.

Oft wird die Ausdehnung von Brücken oder Eisenbahnschienen als Beispiel für die thermische Ausdehnung von festen Körpern angeführt. Die Behandlung dieser Erscheinungen erscheint uns etwas fraglich. Wenn man die Ausdehnung von Brücken erklärt, müsste man doch redlicherweise auch erklären, warum sich die meisten anderen Objekte bei Temperaturzunahme nicht ausdehnen: Häuser, Straßen, ja die ganze Erde. Und zu den Eisenbahnschienen müsste man erklären, warum man früher die Schienenstöße hatte, warum sich die Schienen also früher ausgedehnt haben, heute aber nicht mehr.

Es gibt einen Effekt, den man leicht mit der thermischen Ausdehnung bei konstantem Druck verwechselt: die thermische Druckänderung bei konstantem Volumen. Dies ist im Gegensatz zur thermischen Ausdeh-

## Zustandsgrößen

nung ein großer und eindrucksvoller Effekt. Tatsächlich werden aber Volumenänderung bei konstantem Druck und Druckänderung bei konstantem Volumen durch zwei voneinander unabhängige Materialgrößen beschrieben. Obwohl die Druckänderung bei konstantem Volumen sehr groß ist, würden wir aber auch sie im Anfängerunterricht nicht behandeln, und zwar einfach wegen ihrer für Anwendungen zu geringen Wichtigkeit. Schließlich müssen wir bei jedem Unterrichtsthema abwägen, ob es nicht Wichtigeres gibt. Und es gibt vieles Wichtige, das wir im Unterricht nicht behandeln. Ein Beispiel aus der Wärmelehre: die sehr auffällige und jedem Kind bekannte Erscheinung, dass es auf einem hohen Berg kälter ist als im Tiefland.

### Herkunft

Dass der kleine Effekt in den Unterricht gekommen ist, hat eine einfache Erklärung: Er ist ein Überbleibsel aus vergangenen Zeiten. Früher war die thermische Ausdehnung des Quecksilbers die Grundlage der Definition der Temperaturskala. Diese Definition ist aber längst einer anderen gewichen.

### Entsorgung

Man widmet dem Thema viel weniger Zeit. Es würde kein Schaden entstehen, wenn man es ganz streicht.

## 5.28 Zustandsgrößen

### Gegenstand

Im Zusammenhang mit der Einführung des ersten Hauptsatzes der Wärmelehre wird oft betont, dass die innere Energie eine Zustandsgröße ist. Falls die Entropie eingeführt wird, wird auch herausgestellt, dass diese eine Zustandsgröße ist. Neuerdings ist der Name Zustandsgröße noch im Zusammenhang mit dem Druck in Gebrauch gekommen, besonders in der Schulbuchliteratur.

### Mängel

Der Name Zustandsgröße wurde eingeführt, um zum Ausdruck zu bringen, dass eine Größe in einem Zustand einen bestimmten Wert hat. Nun ist das allerdings für alle physikalischen Größen der Fall mit nur zwei Ausnahmen: der Arbeit und der Wärme. Wenn man aber bei nur einigen wenigen Größen betont, sie seien Zustandsgrößen, so entsteht der Eindruck, Zustandsgrößen seien nicht der Normalfall, sondern die Ausnahme. Dass eine Größe in einem Zustand einen bestimmten Wert hat, ist ohnehin eine Eigenschaft, die man erwartet. Wenn man etwas hervorheben will, so sollte

man also eher betonen, dass es zwei Größen gibt, die der vernünftigen Erwartung nicht entsprechen.

### Herkunft

Sie ist bei innerer Energie, Entropie und Druck etwas verschieden. Die erste mathematische Formulierung der Energieerhaltung geschah in Form des ersten Hauptsatzes der Wärmelehre. In ihm tritt neben den beiden Nicht-Zustandsgrößen Arbeit und Wärme die innere Energie auf. Wenn man in diesem Zusammenhang darauf hinwies, dass die innere Energie eine Zustandsgröße ist, so wollte man wohl betonen, dass immerhin einer der Terme eine Größe mit normalen Eigenschaften ist. Es erschien bemerkenswert, dass die Summe aus zwei Nicht-Zustandsgrößen eine Zustandsgröße ergibt.

Nun zur Entropie. Seit den Anfängen der Wärmelehre bemühte man sich, ein Mengenmaß für das einzuführen, was man umgangssprachlich als Wärme bezeichnet, eine Zustandsgröße selbstverständlich. Ende des 18. Jahrhunderts führte Joseph Black eine (Zustands-) Größe Wärme (auf Englisch 'quantity of heat') ein, die man aus heutiger Sicht am besten mit der Entropie identifiziert. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wurde aber der Name Wärme für eine sogenannte Energieform, d. h. eine Nicht-Zustandsgröße, verwendet. Das alte Mengenmaß für die Wärme verschwand damit zunächst wieder aus der Physik, bis es durch Clausius unter dem Namen Entropie neu eingeführt wurde. Da Clausius die Entropie über die Nicht-Zustandsgröße Wärme definierte, erschien es bemerkenswert, dass die Entropie selbst wieder eine Zustandsgröße ist. Dass die neu eingeführte Entropie im Wesentlichen identisch ist mit dem Wärmebegriff aus der Zeit von Black und Carnot, wurde erst viel später erkannt [1, 2].

Dass der Druck als Zustandsgröße bezeichnet wird, hat wieder einen anderen Grund. Man führt den Druck fast ausnahmslos über die Kraft ein. Eine Kraft wird immer von einem Körper auf einen anderen ausgeübt, sie ist eine Begriffsbildung aus der Zeit, in der man mechanische Wechselwirkungen als Fernwirkungen deutete. Es ist natürlich, dass der Lernende auch beim Druck nach einem Körper sucht, der den Druck ausübt und einem, auf den er ausgeübt wird. Um ihn von dieser falschen Erwartung abzubringen, betont man, der Druck sei eine Zustandsgröße. Der Erklärungsbedarf entsteht also erst dadurch, dass man den Druck ungeschickt einführt [3].

### Entsorgung

Kleine Lösung: Man sage nicht, dass innere Energie und Entropie Zustandsgrößen sind — das sollte aufgrund des Unterrichts sowieso klar werden —, sondern man

betone, dass Arbeit und Wärme zwei ungewöhnliche Konstruktionen sind, die gar nicht so recht ins sonstige Schema hineinpassen.

Große Lösung: Man verzichte ganz und gar auf die Einführung eigener Symbole und eigener Namen für die Ausdrücke, die man gewöhnlich als Arbeit und Wärme bezeichnet. Als Lehrer wird man vielleicht zunächst das Gefühl haben, es fehle etwas Wichtiges. Man wird aber bald entdecken, dass nichts fehlt und dass man sich und den Schülern gleichzeitig einige begriffliche Probleme vom Halse schafft.

Die Bezeichnung Zustandsgröße im Zusammenhang mit dem Druck kann man auch getrost weglassen. Statt die einfache Größe Druck auf die schwierige Größe Kraft zurückzuführen, führt man den Druck als eigenständige Größe ein, etwa über Druckdifferenzen: Eine Druckdifferenz ist die Ursache für einen Wasser- oder Luftstrom. Dass der Druck eine ganz normale Größe – eine „Zustandsgröße“ – ist, braucht man dann nicht mehr zu betonen. Der Verdacht, dass es anders wäre, kommt gar nicht mehr auf.

[1] H. L. Callendar, *The caloric Theory of Heat and Carnot's Principle*, Proc. Phys. Soc. London 23, 1911, S. 153: „Finally, in 1865 when its importance [the importance of caloric] was more fully recognised, Clausius gave it the name of 'entropy', and defined it as the integral of  $dQ/T$ . Such a definition appeals to the mathematician only. In justice to Carnot, it should be called caloric, and defined directly by his equation..., which any schoolboy could understand. Even the mathematician would gain by thinking of a caloric as a fluid, like electricity, capable of being generated by friction or other irreversible processes.“

[2] G. Job, *Neudarstellung der Wärmelehre – Die Entropie als Wärme*, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main 1972

[3] F. Herrmann, *Einige Vorschläge zur Einführung des Drucks*, Praxis der Naturwissenschaften 5, 1997, S. 37.

Durch Wärmeleitung, wobei die Wärme durch ein festes Medium oder stagnierendes Fluid fließt; durch Konvektion, wobei die Wärme durch Bewegung des Mediums (meist handelt es sich um ein Fluid) transportiert wird und durch Strahlung, wobei die Wärme in Form elektromagnetischer Wellen übertragen wird.“

### Mängel

Der Satz „Im Garten gibt es Bäume, Nutzpflanzen, Gemüse und Unkraut“ ist zwar nicht falsch, aber etwas daran stört: Er suggeriert, dass die genannten Kategorien eine Klasseneinteilung der Pflanzen des Gartens gestatten, und das ist nicht der Fall. Es gibt Pflanzen, die man mehreren Kategorien zuordnen kann, z. B. die Karotten oder den Kirschbaum.

Von dieser Art sind auch unsere Zitate zum Wärmetransport. Sie legen nahe, dass jeder Wärmetransport in eine der Kategorien Leitung, Konvektion und Strahlung eingeordnet werden kann, oder dass man wenigstens angeben kann, zu wie viel Prozent ein Transport in die eine und zu wie viel in die andere Kategorie gehört. Es gibt aber Wärmetransporte, die sich in dieses Schema nicht eindeutig einordnen lassen.

Bevor wir Beispiele betrachten, wollen wir die Charakteristika der drei Kategorien noch einmal gegenüberstellen:

#### 1. Wärmeleitung

Die Wärme (genauer: die Entropie) fließt durch ein Material hindurch; das Material bewegt sich nicht. Der Transport ist dissipativ, d. h., es wird neue Entropie erzeugt. Der Antrieb für den Transport ist ein Temperaturgradient.

#### 2. Konvektion

Die Wärme (die Entropie) wird einem Stoff (z. B. Wasser oder Luft) zugeführt. Der Stoff bewegt sich und nimmt die Entropie mit. Ein Temperaturgradient wird nicht gebraucht. Damit sich der Stoff bewegt, muss aber ein anderer Antrieb vorhanden sein, etwa ein Druckgradient.

#### 3. Wärmestrahlung

Die Wärme wird von elektromagnetischer Strahlung transportiert.

Man sieht, weshalb das keine Klasseneinteilung sein kann: Die beiden ersten Definitionen (Leitung und Konvektion) machen Aussagen darüber, welcher Natur der Antrieb für den Wärmestrom ist. Die Natur der Trägerteilchen spielt hier keine Rolle. Man sieht es daran, dass zu dieser Kategorie sowohl die Wärmeleitung in Nicht-

## 5.29 Drei Arten des Wärmetransports

### Gegenstand

Aus einem Schulbuch: „Die Übertragung von Energie in Form von Wärme kann durch Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung erfolgen.“

Aus einer naturwissenschaftlichen Enzyklopädie zum Stichwort Wärmeübertragung: „Die Übertragung der Wärme kann auf drei verschiedene Arten erfolgen:

## Die Namen der Gasgleichung

metallen (Trägerteilchen Phononen), als auch die in Metallen (Trägerteilchen Elektronen) und die in Gasen (Trägerteilchen Moleküle oder Atome) gezählt werden.

Die dritte Kategorie dagegen ist nur durch die Trägerteilchen charakterisiert, nämlich die Photonen. Dabei ist noch zu beachten, dass nicht jeder Energietransport mit Photonen Wärmestrahlung ist. Mikrowellenstrahlung einer einzigen Wellenlänge transportiert keine Entropie und es gibt daher keinen Grund, sie als Wärmestrahlung zu bezeichnen [1].

Ein Beispiel für einen Transport, der nicht in dieses Schema passt, ist der Wärmefluss innerhalb der Sonne von der Reaktionszone im Innern nach außen zur Sonnenoberfläche. (Auf dem letzten Zehntel des Weges vom Sonnenzentrum zur Oberfläche ist der Transport konvektiv. Dieser Teil interessiert uns hier nicht.) Der Energie- und Entropietransport im Innern der Sonne geschieht mit Photonen. Also Kategorie drei? Jedes Photon läuft aber nur eine kurze Strecke und wird dann absorbiert, und es wird ein neues emittiert, das in eine beliebige Richtung läuft. Die Strahlung geht vor und wieder zurück, nach rechts und links, und nach oben und unten: Es ist ein „diffusiver“ Prozess, genauso wie die normale Wärmeleitung. Und es ist ein Wärmestrahlungsprozess, der nur stattfindet, wenn ein Temperaturgradient existiert. (Der beträgt in der Sonne im Mittel 30 K/km.) Daher gehört dieser Transport nicht nur in die dritte, sondern auch in die erste Kategorie.

Ein anderes Beispiel: Von der Erdoberfläche wird Entropie zur Oberseite der Troposphäre transportiert, um von dort in den Weltraum abgestrahlt zu werden. Ein kleiner Teil des Transports (etwa 8 %) geschieht in einem Prozess, der dem in der Sonne ähnlich ist. Von der Erde wird Strahlung emittiert. Diese wird wieder absorbiert, erneut emittiert usw. Auch dieser Transportvorgang gehört sowohl in die Kategorie Leitung als auch in die Kategorie Strahlung.

Es gibt noch andere Transporte, bei denen die Einordnung schwerfällt: ein Strahl thermischer Atome oder Elektronen oder Ionen oder ein Fluss thermischer Neutrinos in einem kollabierenden Stern.

Man kann in diesem Zusammenhang auch eine andere Frage stellen: Wenn es drei Arten von Entropieströmen (Wärmeströmen) geben soll, gibt es vielleicht auch drei Arten von elektrischen Strömen, Impulströmen usw.? In der Tat könnten auch für andere Ströme Kategorien eingeführt werden. Allerdings trifft man dabei dieselben Probleme an wie beim Wärmestrahlung. Was für und wie viele elektrische Ströme gibt es? Elektronenströme in Leitern, Ionenströme in Salzlösungen, freie Elektronenstrahlen, Ströme verschiedener Ladungsträger in einem Plasma, bewegte Konduktorku-

geln, Supraströme erster und zweiter Art. ... Man käme wohl nicht auf die Idee, apodiktisch eine Regel zu formulieren: „Es gibt drei (oder vier oder zehn) Arten des elektrischen Ladungstransports.“

### Herkunft

Man gab den drei Wärmestrahlungen, die man kannte, Namen, schloss etwas leichtsinnig, es gebe keine anderen und erklärte sie zu Kategorien. So geschehen, als man noch nichts über das Innere der Sonne und von der Strahlungsbilanz der Atmosphäre wusste, noch nichts von elektromagnetischen Feldern, Photonen und Plasmen, und erst recht nichts von Neutrinos. Es ist nicht auszuschließen, dass auch etwas Zahlenmystik im Spiel war: Aller guten Dinge sind drei.

### Entsorgung

Wenn einem daran gelegen ist, kann man eine tragfähige Klasseneinteilung versuchen. Dabei stellt man fest, dass es mehrere Möglichkeiten gibt: Z. B. nach der Natur der Trägerteilchen, oder danach, ob der Transport dissipativ ist oder nicht, oder danach wie der Antrieb ist: ein Temperaturgradient, ein anderer Gradient oder gar kein Gradient.

Man würde aber feststellen, dass man dabei nicht viel gewinnt. Es gilt hier, wie so oft beim Versuch einzuteilen oder zu definieren: Lass es lieber sein.

Wo bleiben dann aber unsere drei Transporte, die wir als Leitung, Konvektion und Strahlung bezeichnet hatten? Die wollen wir doch sicher unterscheiden? Natürlich. Wir unterscheiden auch die Karotten von den Brennesseln ohne Kategoriensystem. Behalten wir also die drei Namen der Transportarten ruhig bei. Nur sollten wir sie nicht als Klasseneinteilung verkaufen.

[1] F. Herrmann und P. Würfel, Wärmestrahlung, Altlasten der Physik

## 5.30 Die Namen der Gasgleichung

### Gegenstand

Die Gleichung  $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$  wird unter verschiedenen Namen eingeführt: Gasgleichung, allgemeine Gasgleichung, universelle Gasgleichung, thermische Zustandsgleichung des idealen Gases und andere. Da es eine Beziehung zwischen mehr als nur zwei Größen ist, kann man auch den Zusammenhang zwischen nur zwei Variablen, bei Konstanthalten der beiden anderen, betrachten. Die entsprechenden Beziehungen sind auch unter

bestimmten Namen bekannt. So heißt der Zusammenhang zwischen  $p$  und  $V$  das Boyle-Mariotte'sche Gesetz, der  $V\cdot T$ -Zusammenhang ist das Gay-Lussac'sche Gesetz, die  $p\cdot T$ -Proportionalität das Gesetz von Amon tons, die  $V\cdot n$ -Beziehung ist das Gesetz von Avogadro. In der englischsprachigen Literatur heißt das Boyle-Mariotte'sche Gesetz nur Boyle's law, und das Gay-Lussac'sche Gesetz heißt Charles's law.

### Mängel

- 1 Durch einen Namen wird die Wichtigkeit einer Gleichung betont. Man kann sich mithilfe des Namens auch bequem auf die Gleichung beziehen. Die Gasgleichung (wir wollen sie hier so nennen) ist wichtig. Ihre Gültigkeit ist unabhängig von der Natur des Gases. Sie gilt für Materie in einem sehr weiten Sinn, vorausgesetzt der Stoff ist hinreichend verdünnt und/oder die Temperatur hinreichend hoch. So gilt sie nicht nur für Gase im üblichen Sinn, also etwa die uns umgebende Luft, sondern auch für das Gelöste in verdünnten Lösungen oder für das verdichtete Plasma im Innern der Sonne. Also hat die Gleichung einen Namen verdient. Eine andere Frage ist es, ob Zusätze wie „allgemein“ oder „universell“ im Gleichungsnamen angebracht sind. Die Formel spielt dann natürlich in einer höheren Liga. Das Qualifikativ „universell“ ist wohl kaum noch zu überbieten, und eine ganze Reihe anderer Gesetze könnten Forderungen nach Höherstufung geltend machen.
- 2 Es ist sicher ein schöner Brauch, Gleichungen nach Forscherpersönlichkeiten zu benennen. Wie die Gasgleichung zeigt, kann das allerdings auch übertrieben werden. Wir haben hier den Fall, dass mit einer einzigen Gleichung sechs Forscher geehrt werden. Eine Schwierigkeit beim Benennen einer Gleichung nach einem Forscher kennt man von der Benennung von Straßen her. Jemand kommt nachträglich zu unerwarteten Ehren, weil die zunächst als kleines Nebensträßchen angelegte Straße später zu einer Hauptverkehrsader wird. Andererseits haben es manche großen Forscher nie zum Patron einer wichtigen Gleichung gebracht. Es sei erinnert etwa an Leibniz oder Descartes. Wieder andere werden mit etwas geehrt, was in ihrem Schaffen eher unbedeutend war, wie etwa Huygens mit den Elementarwellen und Faraday mit dem etwas mickrigen Faraday-Effekt oder dem kuriosen Faraday-Becher.

### Herkunft

In der üblichen Behandlung der Gasgleichung bzw. der Teilproportionalitäten erkennt man die „Ablagerungen“ aus den verschiedenen Epochen ihrer Entstehungsge-

schichte. Man sieht auch, dass die Sicht der Geschichte in verschiedenen Ländern verschieden sein kann.

### Entsorgung

Mit Namen für Gleichungen gehe man sparsam um. Im Fall der Gasgleichung schlagen wir vor, den Einzelproportionalitäten keine eigenen Namen zu geben. Besondere Zurückhaltung empfehlen wir bei der Vergabe von Prädikaten wie „allgemein“ und „universell“.

## 5.31 Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases und die Ungrößen Entropie und chemisches Potenzial

### Gegenstand

Es scheint Konsens darüber zu bestehen, dass die allgemeine Gasgleichung

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (5.7)$$

die wichtigste Gleichung zur Beschreibung der Thermodynamik der Gase ist. Sie ist meist auch die Einzige, die in Schule und Hochschule behandelt wird.

Zustandsgleichungen beschreiben reale Systeme, gewöhnlich Materie, und Materie ist kompliziert. Was für ein Glück, dass sich Gase in guter Näherung durch eine so fantastisch einfache Zustandsgleichung beschreiben lassen. Es kommt nicht eine einzige Materialkonstante darin vor (außer man macht's wie die Meteorologen, bei denen statt der Stoffmenge die Masse steht, sodass die Gaskonstante materialabhängig wird, eine Art Masochismus sozusagen). Und sie gilt nicht nur für die normalen Gase; auch andere Systeme, die man gar nicht als Gase bezeichnet, befolgen das Gesetz: Stoffe in verdünnter Lösung.

Gewiss, Gase haben, auch wenn sie hinreichend ideal sind, individuelle und komplizierte Eigenschaften, und darum braucht man manchmal außer der allgemeinen Gasgleichung noch andere Zustandsgleichungen, etwa die kalorische Zustandsgleichung. Uns interessiert hier aber nur die allgemeine Gasgleichung.

### Mängel

Wir stellen eine nahe liegende Frage: Welche Variablen hat das betrachtete System, d. h. das Gas? Man kann natürlich sagen: beliebig viele — denn es steht uns frei beliebig viele zu konstruieren oder definieren.

## Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases und die Ungrößen Entropie und chemisches Potenzial

Wenn wir nach den Variablen im Rahmen der bewährten Regeln der Physik und hier speziell der Thermodynamik fragen, gehen wir anders vor: Wir schreiben die Gibbs'sche Fundamentalform auf:

$$dE = T dS - p dV + \mu dn \quad (5.8)$$

Sie sagt uns, dass die Energie unseres Systems auf drei Arten geändert werden kann, nämlich, indem wir die Entropie  $S$ , das Volumen  $V$  oder die Stoffmenge  $n$  ändern, oder auch zwei davon gleichzeitig oder alle drei gleichzeitig. In anderen Worten: Unser System hat drei Freiheitsgrade. Das haben wir entschieden, indem wir Gleichung (5.8) hingeschrieben haben. (Wir hätten auch anders entscheiden können: z. B., dass wir die Stoffmenge des Gases nicht verändern wollen. Dann hätten wir den Term  $\mu dn$  weggelassen. Oder dass wir das Gas beschleunigen wollen. Dann hätten wir einen Term  $\bar{v} d\bar{p}$  hinzugeschrieben.)

Wenn wir uns nun für Gleichung (5.8) entscheiden und fragen, welches die Variablen des Systems sind, so lautet die Antwort: an erster Stelle die Energie und dann noch 6 andere, oder 3 Pärchen, nämlich,  $S$  und  $T$ ,  $p$  und  $V$  sowie  $\mu$  und  $n$ .

Schauen wir uns die allgemeine Gasgleichung an, so stellen wir aber fest, dass zwei der sechs Variablen nicht vorkommen. Wo sind die geblieben? Wir können natürlich sagen: Glück gehabt. Wenn die noch da wären, wäre die Gleichung vielleicht viel komplizierter. Außerdem und vor allem: Glück gehabt, denn  $S$  und  $\mu$  sind gerade die Größen, mit denen man vielleicht nicht so viel am Hut hat.

Dass sie nicht vorkommen, ist auch aus folgendem Grund ganz praktisch: Das System hat drei Freiheitsgrade, Gleichung (5.7) hat 4 Variablen. Man kann also aus drei willkürlich vorgebbaren die Vierte berechnen.

Für den, der dabei bleibt, nach den beiden Größen  $S$  und  $\mu$  zu fragen, ist die Frage aber nicht beantwortet: Wie verhalten sich  $S$  und  $\mu$ , wenn man an den anderen Variablen dreht?

Es gibt natürlich Zusammenhänge, die man ohne zusätzliche Information über die Natur des Systems nicht herausbekommt, etwa: Wie hängt die Temperatur von der Entropie ab bei festgehaltenem Volumen und festgehaltener Stoffmenge. Darüber verrät uns Gleichung (5.7) nichts. Denn eine Zustandsgleichung ist eine Zustandsgleichung. Sie ist keine Hamilton-Lagrange- oder Massieu-Gibbs-Funktion, die alle Information über das System enthält.

Trotzdem: Kann man ohne weitere Information denn gar nichts über das chemische Potenzial und die Entropie aussagen? Selbstverständlich kann man das.

Eine kurze Rechnung führt (ausschließlich unter Verwendung von Gleichung (5.7) zu

$$S(V) - S(V_0) = n \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_0} \quad (5.9)$$

$$\mu(p) - \mu(p_0) = R \cdot T \cdot \ln \frac{p}{p_0} \quad (5.10)$$

Gleichung (5.10) kann man auch in der Form

$$\mu(c) - \mu(c_0) = R \cdot T \cdot \ln \frac{c}{c_0} \quad (5.11)$$

schreiben, wo  $c$  die Konzentration ist.

Die drei Gleichungen gelten für Prozesse, bei denen  $V$  bzw.  $p$  verändert, die Temperatur aber konstant gehalten wird.

Auch hier geht natürlich keine Materialkonstante ein.

Gleichung (5.9) sagt uns, dass bei konstanter Temperatur die Entropie mit dem Volumen zunimmt. Oder mit anderen Worten: Wenn sich ein Gas bei konstanter Temperatur ausdehnt, nimmt es Wärme auf.

Gleichung (5.10) sagt uns: Das chemische Potenzial nimmt (bei konstanter Temperatur) mit dem Druck zu. Aus der Gleichung folgt unmittelbar das Massenwirkungsgesetz. (Man kann auch sagen, Gleichung (5.10) ist das Massenwirkungsgesetz.) Sie gestattet auch, die barometrische Höhenformel in wenigen Zeilen herzuleiten, ohne dass man Kräftegleichgewichte zu Hilfe nehmen müsste.

Gleichung (5.11) sagt uns unter anderem: Der Antrieb für die Diffusion eines Stoffes zwischen zwei Stellen, an denen die Konzentration sich um einen Faktor 10 unterscheidet, ist immer derselbe, egal, ob es von 0,1 mol/l nach 0,01 mol/l geht, oder von 0,00001 mol/l nach 0,000001 mol/l. Sie ist zuständig für die Funktion jeder elektrochemischen Zelle.

Auch die Gleichungen (5.9) bis (5.11) sind mathematisch einfach, und sie sind Ausdruck einer Faustregel: Beim idealen Gas geht alles linear oder logarithmisch.

### Herkunft

Der Grund für die stiefmütterliche Behandlung der Gleichungen (5.9) bis (5.11) ist wohl, dass man ein etwas distanziertes Verhältnis zu den Größen  $\mu$  und  $S$  hat. Eine Folge ist, dass man viele interessante Fragen, die man mit ihrer Hilfe beantworten könnte, gar nicht erst stellt.

### Entsorgung

Auch ohne dass man, oder noch bevor man die kalorische Zustandsgleichung behandelt, stellt man für das ideale Gas auch die Gleichungen (5.9) bis (5.11) auf. Ein

Nebeneffekt ist, dass die thermische Zustandsgleichung in ihrer Wichtigkeit etwas zurechtgerückt wird. Genau so, wie man Gleichung (5.9) oder (5.10) aus (5.7) herleiten kann, so kann man auch Gleichung (5.7) aus (5.9) oder (5.10) herleiten.

## 5.32 Wärmemenge und Wärmekapazität

### Gegenstand

Die im ersten Hauptsatz mit  $Q$  bezeichnete Prozessgröße nennt man Wärmemenge oder Wärmeenergie, oder auch einfach Wärme. Die Wärmekapazität  $C$  ist definiert als Quotient aus der zugeführten Wärmemenge  $\Delta Q$  und der dadurch bedingten Temperaturerhöhung  $\Delta T$ :

$$C = \Delta Q / \Delta T.$$

Gewöhnlich benutzt man die auf die Masse bezogene spezifische Wärmekapazität. Für unseren Zweck ist es aber ausreichend, die nicht massebezogene Wärmekapazität zu betrachten.

### Mängel

Dem Namen „Wärmekapazität“ ist derselbe Vorwurf zu machen wie dem Namen „elektrische Kapazität“, siehe [1], denn die Maßeinheit der Wärme ist das Joule, die von  $C$  aber Joule durch Kelvin. Wir wollen aber hier von diesem Mangel absehen, denn im Fall der Wärme taucht ein noch gravierenderes Problem auf.

Es offenbart sich schon im Namen derjenigen „Größe“, um deren Speicherung es geht. Spricht man von Wärmemenge oder von Wärmeenergie, so weckt man die Erwartung, dass  $Q$  für irgendeinen betrachteten Gegenstand, z. B. eine Tasse heißen Kaffees, einen bestimmten Wert hat. Außerdem wird man erwarten, dass der Wert um so größer ist, je mehr von dem heißen Kaffee in der Tasse ist, in anderen Worten, dass  $Q$  eine mengenartige Größe ist. Tatsächlich hat die Wärme  $Q$ , so wie sie in der Physik definiert ist, nicht diese Eigenschaften.  $Q$  ist keine physikalische Größe im üblichen Sinn, siehe [2], sondern eine sogenannte Differenzialform. Man kann daher, auch wenn man den Zustand noch so genau kennt, keinen Wärmeinhalt angeben. Führt man einem System die Wärme  $\Delta Q$  zu, so kann man auch nicht sagen, der Wärmeinhalt des Systems ändere sich um diesen Betrag, sondern man muss sich auf eine eher kryptische Formulierung beschränken: Die Zufuhr der Wärme  $\Delta Q$  hat eine Änderung der inne-

ren Energie um den entsprechenden Betrag zur Folge. (Es ist so als dürfe man die folgende Aussage nicht machen: „Ich fülle 1/2 Liter Wasser in die Flasche, also nimmt der Wasserinhalt der Flasche um 1/2 Liter zu“, während die richtige Aussage etwa lauten müsste: „Ich fülle 1/2 Liter Wasser in die Flasche, also nimmt der Flüssigkeitsinhalt um 1/2 Liter zu“.) Es hört sich an wie Sophisterei, ist es aber nicht. Das Problem ist die ungeschickte Namensgebung: Zu  $\Delta Q$  passt nicht ein Name, der suggeriert, die „Größe“ habe Mengencharakter. Alles wäre einfacher, wenn die Differenzialform weder ein eigenes Symbol noch einen eigenen Namen hätte. Dann würden nicht erst Erwartungen geweckt, die später nicht erfüllt werden können.

Wenn man prinzipiell keinen Wärmeinhalt angeben kann, so kann man natürlich auch kein „Fassungsvermögen“ für Wärme definieren. Die Größe  $C$  kann also auch aus diesem Grunde nicht die Bedeutung einer Wärmekapazität haben.

Wer die Wärmelehre unterrichtet hat, weiß wie schwer es ist, klar zu machen, dass  $Q$  keine „Zustandsgröße“ ist. Durch die ungeschickt vergebenen Namen Wärmemenge für  $Q$  und Wärmekapazität für  $C$  werden diese Anstrengungen konterkariert.

### Herkunft

Sowohl der Name Wärme als auch die Bezeichnung Wärmekapazität, stammen aus dem 18. Jahrhundert, also einer Zeit, als die Prozessgröße  $Q$  noch nicht existierte. Der Name Wärme wurde verwendet für eine mengenartige Zustandsgröße, die gerade das erfassste, was man auch umgangssprachlich als Wärmemenge bezeichnen würde. Als die Energie um die Mitte des 19. Jahrhunderts in die Physik Einzug hielt, wurde die alte Zustandsgröße ihres Namens beraubt, und unter „Wärme“ verstand man fortan eine sogenannte Energieform. Da diese Ungröße die hässliche Eigenschaft hat, in einem bestimmten Zustand keinen bestimmten Wert zu haben, spricht man beschönigend von einer Prozessgröße [2].

### Entsorgung

Man operiert in der Thermodynamik von Anfang an mit der Entropie. Man führt sie ein als das, was man im täglichen Leben Wärmemenge nennt. Von ihr kann man stets sagen, wie viel in einem System enthalten ist, und zu ihr lässt sich auch eine Kapazität (mit der in [1] diskutierten Einschränkung) angeben, nämlich  $dS/dT$ . Mit der etablierten „Wärmekapazität“ hängt diese Entropiekapazität auf einfache Art zusammen:

$$C = T \cdot dS/dT.$$

## Die Adiabatengleichungen

(Die Entropiekapazität geistert übrigens in manchen Festkörperphysikbüchern unter dem Namen Sommerfeldkonstante herum [3].)

Die Ungröße  $Q$  wird dann überflüssig.

[1] F. Herrmann, *Die elektrische Kapazität*, Altlasten der Physik

[2] F. Herrmann, *Zustandsgrößen*, Altlasten der Physik

[3] R. Kubo und T. Nagamiya, *Solid State Physics*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1969, S. 94

## 5.33 Die Adiabatengleichungen

### Gegenstand

Für reversible adiabatische Prozesse eines idealen Gases gelten die Adiabatengleichungen

$$\begin{aligned} p \cdot V^\gamma &= \text{const} \\ T \cdot V^{\gamma-1} &= \text{const} \\ T \cdot p^{(1/\gamma)-1} &= \text{const} \end{aligned}$$

Hier ist  $\gamma$  der Quotient der Wärmekapazitäten bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen,

$$\gamma = c_p / c_V.$$

### Mängel

Im Prinzip ist alles in Ordnung. Nur: Welche Idee von den angesprochenen Prozessen kommt bei den Studierenden an?

1 Für ein ideales Gas konstanter Stoffmenge, d. h. ein typisches thermodynamisches System, lautet die Gibbs'sche Fundamentalform

$$dE = T dS - p dV, \quad (5.12)$$

das System hat also zwei Freiheitsgrade.

Man lernt, dass man die Thermodynamik der Gase besser versteht, wenn man nicht an allen Variablen gleichzeitig dreht. Man betrachtet also gern Prozesse, bei denen man eine der fünf auftretenden Variablen konstant hält. Damit reduziert man das System auf einen Freiheitsgrad. Den entsprechenden Prozessen hat man eigene Namen gegeben: isotherm, isobar, isochor, isoenergetisch und ... ? Adiabatisch!

„Adiabatisch“ bedeutet bekanntlich etwa „unüberschreitbar“. Statt die Größe zu benennen, die man bei dem Prozess konstant hält, nämlich die Entropie, also statt den Prozess isentrop zu nennen, sagt uns der Name, wie man es anstellen soll, damit die Entro-

pie konstant bleibt: Man muss die Wände undurchdringlich für die Wärme machen. Man entgegne nicht, isentrop sei ja etwas anderes als adiabatisch, denn man kann einen adiabatischen Prozess realisieren, bei dem Entropie erzeugt wird, der also nicht isentrop ist, und man kann einen isentropen Prozess ausführen, bei dem die Wände nicht wärmeisolierend sind. Diese Bemerkungen sind zwar richtig, aber gebraucht und benutzt wird der Begriff adiabatisch praktisch nur für die Prozesse, die gleichzeitig adiabatisch und isentrop sind.

2 Man kann eine große Zahl Koeffizienten, die ein System charakterisieren, definieren und messen. Im Fall des Systems von Gleichung (5.12) sind es die Kompressibilität bei konstanter Temperatur, die Kompressibilität bei konstanter Entropie, der Volumenausdehnungskoeffizient, der Druckkoeffizient, die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck und konstantem Volumen und andere, die keine eigenen Namen haben. Nur drei davon sind unabhängig voneinander; die anderen können aus diesen berechnet werden. Für den Unterricht (an Schule und Hochschule) stellt sich nicht nur die Frage, welche dieser Koeffizienten man einführt, sondern auch, wie man sie einführt. Stellt man einen bestimmten Koeffizienten vor als Repräsentanten einer bestimmten Eigenschaft des Systems, oder als einen Ausdruck, dessen Bedeutung sich einem nur erschließt, wenn man ihn auf andere Koeffizienten zurückführt? Letzteres macht man, wenn es um das  $\gamma$  in der „Adiabatengleichung“ geht. Auf die Frage: „Welches ist die Bedeutung von  $\gamma$ “ lautet die Antwort: der Quotient aus spezifischer Wärme bei konstantem Druck und spezifischer Wärme bei konstantem Volumen. Nun ist es schon nicht ganz einfach, sich eine anschauliche Vorstellung von  $c_p$  und  $c_V$  einzeln zu bilden. Was soll man sich aber unter ihrem Quotienten vorstellen?

3 Man kann auf zwei extreme Arten über die thermischen Variablen verfügen: Entweder man hält die Temperatur konstant, indem man einen perfekten Entropieaustausch mit der Umgebung zulässt, oder man hält die Entropie konstant, indem man den Entropieaustausch vollständig unterbindet [1]. Diese beiden Situationen sind komplementär, sie sind von gleicher Wichtigkeit und sie sollten in einem gemeinsamen Kontext diskutiert werden. So laufen Prozesse in kleinen Systemen vorzugsweise isotherm ab, in großen isentrop. Je kleiner das System, desto näher ist man am isothermen Grenzfall, je größer, desto näher am isentropen. Ebenso gilt: Je langsamer, desto näher ist man am isothermen, je schneller, desto näher am isentropen Grenzfall; also als Regel:

Klein und langsam → isotherm; groß und schnell → isentrop. Auf mikroskopischer Skala ist alles isotherm, auf makroskopischer ist alles isentrop. „Kleine Fische sind isotherm, große isentrop.“ Wetterphänomene sind großskalig, sie sind weitgehend isentrop.

- 4 Diejenige Adiabatengleichung, die gewöhnlich an erster Stelle steht, siehe oben, ist die uninteressanteste, denn die  $p$ - $V$ -Zusammenhänge des Gases bei einem isothermen und einem isentropen Prozess unterscheiden sich nur wenig. Viel interessanter sind die zweite und die dritte, die man aber am besten noch anders schreibt. Mit

$$\alpha = \frac{1}{\gamma - 1}$$

wird nämlich

$$V \cdot T^\alpha = \text{const} \quad (5.13)$$

sowie

$$p \cdot T^{(1+\alpha)} = \text{const} \quad (5.14)$$

Gleichung (5.13) sagt uns etwa, dass und wie sich ein Gas beim Entspannen abkühlt und Gleichung (5.14) sagt uns, dass die Luft in großer Höhe, wo der Druck niedriger ist, kälter ist. Einige Werte von  $\alpha$  sind in der Tab. 5.1 aufgeführt.

In unserer natürlichen und technischen Umwelt sind

	$\alpha$
Luft	2,5
Wasserdampf	3,3
Kohlenstoffdioxid	3,4
Helium	1,5
Licht	3,0

Tab. 5.1

die isentropen Prozesse die wichtigeren. Sie sind das, was man in einer Wärmekraftmaschine anstrebt und auch weitgehend erreicht, und sie sind bei Wetterphänomenen die maßgeblichen Prozesse.

- 5 Wenn man den Exponenten in Gleichung (5.13) über die Wärmekapazitäten definiert, erscheint das Verhalten eines Gases bei isentroper Kompression als ein unanschaulicher Vorgang. Dass sich ein Gas so verhält, kann man aber leicht verständlich machen, ohne auf die Wärmekapazitäten Bezug zu nehmen: Beim Zusammendrücken des Gases wird auch die Entropie „komprimiert“, die Entropiedichte wird erhöht. Es ist aber eine allgemeine Erfahrung, dass

der Wert der intensiven Größe ansteigt, wenn die Dichte der extensiven erhöht wird.

### Herkunft

Die Entropie-Berührungsängste wirken sich auch auf die Behandlung der isentropen Prozesse aus.

### Entsorgung

Man führt die Gleichungen

$$V \cdot T^\alpha = \text{const} \quad (5.13)$$

und

$$p \cdot T^{(1+\alpha)} = \text{const} \quad (5.14)$$

ein. Den Exponenten begründet man nicht über die spezifischen Wärmen. Die Gleichungen sagen uns, wie stark die Temperatur auf eine Volumen- bzw. Druckänderung reagiert.

[1] G. Job, *Die Temperaturschichtung der Atmosphäre*, Alllasten der Physik

## 5.34 Wärmestrahlung

### Gegenstand

Wir beschäftigen uns mit drei Aussagen über die Wärmestrahlung, die man in Lehrbüchern findet und die zum Teil miteinander im Widerspruch stehen, mitunter einfach nicht korrekt sind. Man findet nicht unbedingt alle drei Aussagen in ein und demselben Lehrbuch.

- 1 Die Ausbreitung von Wärme erfolgt durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion.
- 2 An das rote Ende des sichtbaren Spektrums schließt sich der Bereich der Wärmestrahlung an.
- 3 Mit dem Sonnenlicht kommt Wärme von der Sonne zur Erde, und diese äußert sich in einer Temperaturerhöhung des Körpers, von dem sie absorbiert wird.

### Mängel

Die elektromagnetische Strahlung, um die es hier geht, wird auch thermische Strahlung oder Temperaturstrahlung genannt. Man charakterisiert mit diesen Namen zunächst ein bestimmtes Verfahren der Erzeugung elektromagnetischer Strahlung: Ein Körper emittiert elektromagnetische Strahlung, wenn er eine von Null verschiedene Temperatur hat. Es gibt auch andere Erzeugungsverfahren elektromagnetischer Strahlung. Die entsprechende Strahlung heißt dann nicht-thermische

## Wärmestrahlung

Strahlung. So werden die Mikrowellen eines Klystrons, die Lumineszenzstrahlung einer Halbleiterdiode oder Laserlicht nicht als thermische Strahlung bezeichnet.

Zunächst ein etwas trivialer, trotzdem aber wichtiger Einwand gegen eine der oben zitierten Formulierungen: Thermische Strahlung ist nicht auf den Infrarotbereich beschränkt. Sonnenlicht ist thermische Strahlung, aber die meiste Energie wird im sichtbaren Bereich des Spektrums transportiert. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist thermische Strahlung. Ihr Energiemaximum liegt bei einer Wellenlänge von 1 mm im Mikrowellenbereich. Im Innern eines Sterns befindet sich thermische Strahlung im Röntgenbereich.

Ein schwerwiegenderer, aber viel subtilerer Mangel hat mit der Aussage zu tun, elektromagnetische Strahlung transportiere Wärme. Um diese Aussage zu analysieren, müssen wir zunächst klären, was man damit überhaupt meint, wenn man sagt, bei irgendeinem Vorgang werde Wärme oder Energie in Form von Wärme transportiert. Unter einem Wärmetransport versteht man allgemein einen Energietransport, der von einem Entropietransport begleitet ist. Energiestrom  $P$  und Entropiestrom  $I_S$  hängen miteinander zusammen über die Temperatur  $T$ :

$$P = T \cdot I_S \quad (5.15)$$

Im Allgemeinen wird ein Energiestrom mehrere Anteile haben oder aus mehreren „Energieformen“ bestehen: Wärme, Arbeit, elektrische und chemische Energie. Als Wärme bezeichnet man dann nur den Anteil, der durch Gleichung (5.15) beschrieben wird.

Um zu entscheiden, ob oder zu welchem Anteil eine bestimmte elektromagnetische Strahlung Wärme ist, muss man also zum einen den transportierten Entropiestrom betrachten, zum anderen muss man die Temperatur der Strahlung kennen. Bei schwarzer Strahlung gibt es in dieser Hinsicht kein Problem. Es wird aber umso schwieriger, je selektiver der Strahler ist, weil man der Strahlung ihre Temperatur immer schlechter ansieht. Einfach sind die Verhältnisse erst wieder bei der Strahlung, die von nichtthermischen Strahlern ausgeht, wie der Mikrowellenstrahlung eines Klystrons oder den elektromagnetischen Wellen eines Radiosenders. Hier ist der Entropiestrom praktisch null und man wird diese Strahlungen nicht als Energie in Form von Wärme bezeichnen. Dass die Dinge so kompliziert sind, wird leicht übersehen, wenn man nur den Effekt der Einstrahlung elektromagnetischer Wellen auf einen Absorber sieht. Der Absorber wird erwärmt.

Wir kommen damit zu einem klaren Fehler in den oben angeführten Aussagen. Die Erwärmung des Ab-

sorbers ist völlig unabhängig davon, ob die einfallende Strahlung Wärme transportiert oder nicht. Sie beruht darauf, dass die Strahlung Energie transportiert, egal in welcher Form, und darauf, dass diese Energie im Absorber dissipiert wird. Eine völlig „entropiefreie“ Strahlung, die von einem nicht-thermischen Strahler ausgeht, führt zu derselben Erwärmung wie thermische Strahlung von einem schwarzen Strahler, wenn nur beide Strahlungen dieselbe Energie transportieren, und beide vollständig absorbiert werden.

Die Situation ist im Prinzip dieselbe, aber vielleicht noch etwas deutlicher, bei anderen Arten von Strahlung. Wir betrachten z. B. den Schall. Auch wenn Schall absorbiert wird, erwärmt sich der Absorber und die Erwärmung hängt nur von der transportierten Energie ab, nicht aber davon, ob der Schall Wärme transportiert oder nicht. In der Tat ist auch beim Schall beides möglich. Eine „monochromatische“, ebene Schallwelle transportiert keine Entropie, also auch keine Wärme. Thermischer Schall dagegen, d.h. Phononen, die von einem warmen Körper emittiert und von einem kälteren absorbiert werden, transportieren Wärme. Das ist der Mechanismus der Wärmeleitung.

Also: Man kann aus einer Erwärmung beim Absorptionsvorgang einer Strahlung nicht auf einen Wärmetransport durch die Strahlung schließen.

Tatsächlich wird gerade in den Fällen, in denen man das Argument der Erwärmung gern heranzieht, nämlich beim Sonnenlicht und bei der Infrarotstrahlung, die von einem glühenden Körper ausgeht, bei der Absorption viel mehr Entropie erzeugt, als die Strahlung selbst transportiert.

Wenn das Warmwerden des Absorbers einer Strahlung kein Beweis dafür ist, dass die Strahlung Wärme transportiert, gibt es aber doch einen anderen, fast ebenso einfachen Indikator dafür, ob elektromagnetische Strahlung Entropie transportiert: das Kaltwerden der Strahlungsquelle. Wenn sich ein heißer Körper, der keine materielle Verbindung mit der Umgebung hat, abkühlt, genauer, wenn seine Entropie abnimmt, muss der Körper Entropie abgegeben haben, denn da nach dem zweiten Hauptsatz Entropie nicht vernichtet werden kann, besteht die einzige Möglichkeit der Entropieabnahme darin, die Entropie mit der elektromagnetischen Strahlung abzugeben. Diese Erfahrung macht man allerdings längst nicht so oft und so deutlich wie die der Erwärmung eines Körpers durch die Absorption elektromagnetischer Strahlung.

### Herkunft

Die Wärmestrahlung wurde untersucht, lange bevor man in der Lage war zu erkennen, dass die Natur der

Strahlung dieselbe wie die des Lichts ist, und bevor man den Zusammenhang zwischen Energie und Wärme verstanden hatte. Der Name „strahlende Wärme“ stammt wahrscheinlich von Scheele [1]. Pictet [2] meinte noch 1790, dass sowohl Licht als auch Wärme allein vorkommen. Insbesondere glaubte er gezeigt zu haben, dass Mondlicht nicht von Wärme begleitet wird. In den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts wuchs aber schließlich die Überzeugung von der Identität von Licht- und Wärmestrahlen. Zur endgültigen Klärung der Frage bedurfte es aber noch zweier großer Theorien: der Elektrodynamik von Maxwell und der statistischen Thermodynamik des Lichts von Planck [3].

### Entsorgung

Man sage nicht, Wärmetransport sei charakteristisch für die Infrarotstrahlung.

Von der elektromagnetischen Strahlung, etwa der von der Sonne, sage man, dass sie Energie, nicht aber dass sie Wärme transportiert. Damit ist die bei der Absorption entstehende Wärme schon erklärt. Eine Aussage über die transportierte Entropie ist dann wichtig, wenn man wissen will, mit welchem Wirkungsgrad eine Wärmekraftmaschine, die die aufgenommene Entropie ja nur wieder mit Wärme abführen kann, aus Sonnenwärme elektrische Energie gewinnen kann. Als Begründung dafür, dass elektromagnetische Strahlung Entropie und damit Wärme transportiert, führe man nicht die Erwärmung des Absorbers, sondern die Abkühlung der Strahlungsquelle an.

Dass warme Körper elektromagnetische Strahlung emittieren, sagt man am besten, ohne die Strahlung genauer zu benennen (Wärmestrahlung, thermische Strahlung, Temperaturstrahlung). Wenn man möchte, kann man den Strahler mit einem Namen versehen: thermischer Strahler oder Temperaturstrahler.

- [1] E. Mach, *Die Principien der Wärmelehre*, Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1919, S. 126.
- [2] M. A. Pictet, *Essai sur le feu*, Genève, 1790
- [3] M. Planck, *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1913

## 5.35 Temperatur und Wärme bei der Expansion ins Vakuum

### Gegenstand

Die Entropie stimmt in ihren Eigenschaften und ihrem Verhalten in vieler Hinsicht mit dem überein, was man umgangssprachlich Wärme nennt. Es gibt allerdings ein

### Temperatur und Wärme bei der Expansion ins Vakuum

berühmtes Experiment, bei dem diese Übereinstimmung nicht zu bestehen scheint: Die Expansion ins Vakuum, auch bekannt unter dem Namen Gay-Lussac-Expansion.

### Mängel

Den Lehrern, die die Entropie als Maß dessen einführen, was man umgangssprachlich Wärme nennt, wird manchmal entgegengehalten, dass bei der Gay-Lussac-Expansion die Entropie zunimmt, dass aber trotzdem keine „Wärme entsteht“ [1].

Hierzu ist Verschiedenes zu bemerken:

- 1 Die Übereinstimmung zwischen einer physikalischen Größe und dem, was ihr Name zu versprechen scheint, ist nie vollständig. Beispiele hierfür sind etwa die Größe  $Q$  und ihr eingebürgerter Name „Wärme“. So ist für den Lernenden schwer zu akzeptieren, dass man nicht sagen kann, in einem heißen Körper sei Wärme gespeichert. Noch schlechter sieht es aus mit der Übereinstimmung von Namen und physikalischer Bedeutung bei der Größe  $F$ , genannt Kraft [2].
- 2 Im vorliegenden Fall geht es allerdings nicht um die Übereinstimmung zwischen dem Namen einer Größe und ihrer physikalischen Bedeutung, denn der Name der Größe  $S$  ist Entropie. Es geht lediglich darum, ob es geraten scheint, bei der Einführung der Entropie zu bemerken, dass ihre Eigenschaften mit denen des umgangssprachlichen Wärmebegriffs weitgehend übereinstimmen. Tatsächlich ist die Übereinstimmung hier so gut wie bei nur wenigen anderen physikalischen Größen.

Nehmen wir zum Vergleich die Kraft. Es ist üblich, sich bei der Einführung der Kraft auf eine Muskelempfindung oder ein Muskelgefühl zu berufen [3]. Das „Muskelgefühl“ weist aber genauso auf eine Kraft (einen Impulsstrom) wie auf einen Energiestrom hin. Trotzdem nimmt an diesem Vergleich kaum jemand Anstoß.

- 3 Nun zur Expansion eines Gases ins Vakuum. Zunächst: Es ist ein Experiment, das man nicht gleich am Anfang der Wärmelehre diskutiert. Man tut es später, wenn die Gase behandelt werden. Die Diskussion läuft etwa so: Ein Gas expandiert ins Vakuum. Nachdem sich das thermodynamische Gleichgewicht eingestellt hat, ist die Temperatur nahezu die gleiche wie vor der Expansion. Also hat die Wärme (das Wort im umgangssprachlichen Sinn benutzt) nicht zugenommen? Auf den ersten Blick, nein. Nun ist es aber leichtsinnig, den Entropieinhalt, bzw. den umgangssprachlichen Wärmeinhalt vor und nach der Expansion nur aufgrund der Temperatur zu beurteilen, denn es hat sich ja das Volumen des Gases geändert. Man wird daher das Gas wieder auf sein

## Dampfmaschinen

altes Volumen bringen, und zwar so, dass man dabei weder Wärme zu- oder abführt, noch dass man welche erzeugt. Nachdem man das getan hat, ist das Gas wärmer als am Anfang. Es enthält mehr (umgangssprachliche) „Wärme“, d. h. Entropie.

### Herkunft

Wir vermuten, dass die Abwehr gegen die Vorstellung der Entropie als umgangssprachliche Wärme gar nicht damit zu tun hat, dass die Übereinstimmung nicht perfekt ist. Vielmehr sucht man nach Beispielen, in denen die Behauptung nicht zutrifft, aus Angst davor, dass sich die Aussage bewahrheiten sollte; aus Angst vor der Einsicht, dass die Entropie nicht so kompliziert und schwierig ist, wie man es sein Leben lang geglaubt hat.

### Entsorgung

Man führe die Entropie ein, indem man sie mit der umgangssprachlichen Wärme assoziiert. Die Übereinstimmung zwischen Namen und physikalischem Konzept ist besser als bei den meisten anderen physikalischen Größen, bei deren Einführung man sich ohne größere Bedenken an der alltäglichen Erfahrung orientiert.

[1] M. Bartelmann, F. Bühler, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschede, P. Reineker, M. Tolan, J. Wambach und W. Weber, *Gutachten über den Karlsruher Physikkurs*; in Auftrag gegeben von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

[http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen\\_gutachter/Stellungnahme\\_KPK.pdf](http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen_gutachter/Stellungnahme_KPK.pdf)

[2] F. Herrmann, *Kraftübertragung, Drehmomentübertragung und Leistungsübertragung*, Altlasten der Physik

[3] F. Herrmann, Eine Anschauung von der Kraft, Altlasten der Physik

## 5.36 Dampfmaschinen

### Gegenstand

Ich habe kürzlich im Unterricht die Dampfmaschine als Anwendungsbeispiel einer isentropen Expansion behandelt. Zur Veranschaulichung wollte ich aus dem Internet eine animierte Schnittzeichnung einer Dampfmaschine herunterladen. Ich wurde schnell fündig; es gibt etliche solche Videos. Man erkennt gut die einzelnen Bauteile und den Weg des Dampfes. Während sich der Kolben nach der einen Seite bewegt, lässt der Schieber den Dampfeintritt von der anderen Seite offen. Kurz bevor der Kolben am Umkehrpunkt angekommen ist, wird der Dampfeinlass gesperrt.

### Mängel

Die Autoren der Animationen haben sich nicht so sehr von thermodynamischen, sondern vor allem von mechanischen Argumenten leiten lassen. Der Dampf soll gegen den Kolben drücken, und das so kräftig wie möglich. Also bleibt der Dampfeinlass über den ganzen Weg des Kolbens geöffnet.

Die Thermodynamik lehrt uns, dass in einer gut konstruierten Wärmekraftmaschine die Entropie von hoher zu niedriger Temperatur gelangt und dabei den Antrieb der Maschine liefert, so wie Wasser über ein Wasserrad von hohem zu niedrigem Gravitationspotenzial gelangt und dabei das Wasserrad antreibt. Wichtig ist, dass die Entropie die Maschine auf Umgebungstemperatur verlässt, so wie das Wasser das Wasserrad erst verlassen soll, wenn es auf dem Niveau des Wasserabflusses angekommen ist. Der Dampfeinlass darf daher nur auf einem kleinen Teil des Kolbenweges geöffnet bleiben. Danach entspannt er sich im Zylinder, sodass seine Temperatur, wenn der Kolben den Umkehrpunkt erreicht hat, Umgebungstemperatur ist.

(Bei Dampflokomotiven wurde, wenn vorübergehend eine sehr hohe Leistung gebraucht wurde, der Dampfeinlass auf dem ganzen Kolbenweg offen gelassen. Das ging auf Kosten des Wirkungsgrades. Dass eine Lokomotive in diesem Betriebszustand arbeitete, äußerte sich auf eindrucksvolle Weise: Der ins Freie expandierende Dampf erzeugte das bekannte Husch-Husch-Husch des anfahrenden oder den Berg hinauffahrenden Zuges.)

Eine Dampfmaschine, bei der sich der Dampf erst beim Öffnen des Auslassventils ins Freie entspannt, wie etwa die Dampfmaschinen der angesprochenen Animationen, kann man grob vergleichen mit einem Wasserrad, dem man mehr Wasser zuführt, als gebraucht wird, sodass ein Teil des Wassers einfach neben dem Rad hinfällt.

Auch in Dampfturbinen entspannt sich der Dampf so, dass er am Ausgang nahezu Umgebungstemperatur hat. Man kann die riesigen Auslasskanäle einer Dampfturbine mit der Hand berühren, ohne sich zu verbrennen.

### Herkunft

**1** Mangelnde Kenntnis der Thermodynamik. Man scheint nicht zu wissen, wie einfach die Beschreibung thermischer Maschinen wird, wenn man statt der unseligen Wärme die Entropie als Bilanzgröße nimmt.

**2** Die Mechanik wird, wenn es um das Verständnis der thermischen Maschinen geht, zu stark in den Vordergrund gestellt. Auch die Pioniere der Dampfmaschinen, Newcomen, Watt, Trevithick und andere

haben im Wesentlichen mechanisch gedacht. Sie konnten nicht anders, denn Carnots Arbeit entstand erst später. Man kann auch sagen: Man hatte vor Carnot die thermischen Maschinen schlicht und einfach noch nicht verstanden.

Der Wirkungsgrad der Maschinen war im 18. Jahrhundert auch entsprechend gering.

In der Lehre sind die Carnot'schen Ideen bis heute nicht angekommen. In der Thermodynamikvorlesung wird zwar der Carnotprozess behandelt, aber man lernt nicht, wozu er dienen soll, denn es gibt keine Maschine, in der dieser Prozess genutzt wird. Die umständliche Behandlung dieses Prozesses trägt wohl auch dazu bei, den Studenten den Spaß an der Thermodynamik zu verderben. Von Carnots genialer Idee, nämlich die Wärmekraftmaschine mit einem Wasserrad zu vergleichen, erfahren die meisten Studenten nichts.

### Entsorgung

Carnot beschreibt die Wärmekraftmaschine so: „Die bewegende Kraft des fallenden Wassers hängt ab von seiner Höhe und von der Flüssigkeitsmenge; die bewegende Kraft der Wärme hängt ab von der Menge des verwendeten Caloricums und von dem, was man seine Fallhöhe nennen könnte, nämlich der Temperaturdifferenz der Körper, zwischen denen der Austausch des Caloricums stattfindet.“

Wenn wir die Sprache ein wenig modernisieren, können wir Carnots Sätze einfach übernehmen: „Die Energie, die das Wasser abgeben kann, hängt ab von seiner Höhe und von der Wassermenge; die Energie, die eine Wärmekraftmaschine abgeben kann, hängt ab von der Menge der verwendeten Entropie und von dem, was man ihre Fallhöhe nennen könnte, nämlich der Temperaturdifferenz der Körper, zwischen denen der Entropieaustausch stattfindet.“

## 5.37 Sieden und verdunsten

### Gegenstand

Wasser (und auch jede andere Flüssigkeit) kann auf zwei Arten verdampfen: Es kann verdunsten und es kann sieden. Wenn man Wasser Wärme zuführt, so nimmt die Temperatur zunächst zu. Ist die Siedetemperatur erreicht, so steigt die Temperatur nicht weiter. Eine analoge Unterscheidung beim Schmelzen gibt es nicht.

Hierzu einige typische Bemerkungen aus Lehrbüchern: „Wird der Dampfdruck gleich dem auf der Flüs-

sigkeit lastenden Druck eines anderen Gases, so siedet die Flüssigkeit. Dann tritt die Dampfentwicklung nicht nur an der Oberfläche der Flüssigkeit, sondern auch im Innern auf; es bilden sich Dampfblasen.“ [1]

„Eine Flüssigkeit siedet, sobald ihr Dampfdruck dem auf der Flüssigkeit lastenden Luftdruck gleicht. Die Siedetemperatur hängt daher vom Luftdruck ab.“ [2]

„Sieden: Beim Sieden entstehen im Innern der Flüssigkeit Dampfblasen. Während des Siedens ändert sich die Temperatur nicht.... Verdunsten: Die Gasbildung findet auch ständig an der Oberfläche der Flüssigkeit bei Temperaturen unterhalb der Siedetemperatur statt.“ [3]

### Mängel

Man findet keine überzeugenden Antworten auf die folgenden nahe liegenden Fragen:

- 1 Warum geht der Verdampfungsprozess beim Verdunsten langsam und beim Sieden schnell vor sich?
- 2 Warum steigt die Temperatur des Wassers nicht mehr, wenn der Siedepunkt erreicht ist?

Dabei sind die Antworten leicht zu geben:

Die Geschwindigkeit des Verdunstungsprozesses ist dadurch bestimmt, wie schnell der entstehende Wasserdampf von der Wasseroberfläche weggelangt zu Stellen, an denen der Partialdruck des Wasserdampfes kleiner ist. Das ist ein Diffusionsprozess, und Diffusionsprozesse sind notorisch langsam. Man kann den Abtransport des Dampfes bekanntlich dadurch beschleunigen, dass man pustet, also durch Konvektion nachhilft. Die Geschwindigkeit der Verdampfung wird beim Sieden nicht mehr durch Diffusion begrenzt. Da der Dampfdruck über der Wasseroberfläche gleich dem Atmosphärendruck ist, das Gas dort also reiner Wasserdampf ist, ist der Abtransport nicht mehr ein Diffusions-, sondern ein praktisch widerstandsloser Strömungsprozess. Der Dampf fließt jetzt ungehindert ab. Die Nachlieferung hängt nur noch davon ab, wie schnell das flüssige Wasser geheizt wird.

Führt man flüssigem Wasser, dessen Temperatur noch unterhalb der Siedetemperatur liegt, Entropie genügend schnell zu, so kann der entstehende Dampf diese nicht abtransportieren. Die Entropie staut sich, und die Temperatur des Wassers steigt. Ist die Siedetemperatur erreicht, so existiert dieser „Flaschenhals“ nicht mehr. Der Dampf entsteht in dem Maße, wie die zur Verdampfung nötige Entropie nachgeliefert wird. Das gilt auch dann, wenn der Atmosphärendruck nicht 1 bar ist, wenn also die Siedetemperatur nicht 100 °C beträgt.

Die Bläschenbildung ist zwar ein auffälliger, aber für das Sieden nicht notwendiger Effekt. Erhitzt man näm-

## Kühlen mit flüssigem Stickstoff

lich die Flüssigkeit von oben mit einer Infrarotlampe, so beginnt das Sieden, sobald die Oberfläche die Siedetemperatur erreicht, ohne dass Bläschen entstehen.

Es ist auch sicher nicht geschickt, vom auf der Flüssigkeit lastenden Druck zu sprechen. Der Druck ist eine lokale Größe und man kann nicht sagen, dass der Druck eines Systems auf einem anderen lastet. Wenn derjenige Druck gemeint ist, den das Gas über der Flüssigkeitsoberfläche hat, so wäre es wohl besser, ihn nicht als Luftdruck zu bezeichnen. Denn je mehr man sich der Siedetemperatur nähert, desto weniger Sauerstoff und Stickstoff enthält das Gas an dieser Stelle. Ist die Siedetemperatur erreicht, so ist das Gas reiner Wasserdampf.

### Herkunft

Das Augenscheinliche, die Bläschen, scheinen den Blick auf das Wesentliche zu verstellen.

### Entsorgung

Man kommt um die Betrachtung des Wasserdampfpartialdrucks über der Wasseroberfläche nicht herum. Beim Verdunsten ist er kleiner als der Atmosphärendruck. Das verdampfende Wasser kann nur über den langsamem Diffusionsprozess entweichen. Beim Sieden ist das Gas über der Wasseroberfläche reiner Wasserdampf. Für dessen Abtransport gibt es keinen Widerstand mehr. Man erklärt die Bläschenbildung, klärt aber gleichzeitig, dass diese nur dann ein Indiz für das Sieden sind, wenn das Wasser von unten geheizt wird. Noch bequemer wird die Erklärung, wenn man das chemische Potenzial einführt, denn sowohl der Phasenübergang als auch der anschließende Stofftransport werden durch ein chemisches Potenzialgefälle angetrieben.

[1] Gerthsen-Kneser-Vogel, *Physik*, Springer-Verlag, Berlin, 1977, S. 189

[2] Sexl, Raab, Streeruwitz, *Das mechanische Universum*, Band I, Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt, 1980, S. 205

[3] GROSS-BERHAG, *Physik*, Ernst Klett Schulbuchverlag, Stuttgart, 1996, S. 92

## 5.38 Kühlen mit flüssigem Stickstoff

### Gegenstand

„Das Kühlen mit tiefkalt verflüssigtem Stickstoff bringt eine Reihe von Vorteilen mit sich. Geringe Investitions- und niedrige Betriebskosten sind neben der einfachen

und wartungsarmen Anwendung nur einige Gründe. Nicht nur wirtschaftlich, sondern auch sicherheits- und umwelttechnisch bringt diese Kühlmethode weitere Vorteile. Flüssiger Stickstoff ist unbrennbar, ungiftig und es entstehen keinerlei Abfallprodukte.“

„Magnete in großen Beschleunigeranlagen wie dem CERN in Genf werden meist mit flüssigem Helium fast auf den absoluten Nullpunkt gekühlt. Auch der europäische Infrarotsatellit Herschel war mit Helium auf tiefste Temperaturen gebracht worden, um für die Wärmestrahlung der kosmischen Objekte besonders empfindlich zu sein.“

„Kühlungen werden in vielen technischen Geräten, die sich erwärmen, eingesetzt. Zumeist wird jedoch eine passive Kühlung, das heißt die Abgabe der Wärme über Kühlkörper an die umgebende Luft, genutzt. Das bekannteste Beispiel ist der Kühlschrank zur Konservierung von Lebensmitteln. In Kraftfahrzeugen wird meist eine Wasserkühlung benutzt, in Computern kommen überwiegend Luftkühlungen zum Einsatz. Ein weiteres großes Einsatzgebiet ist z. B. die Klimaanlage.“

„Prozessorkühlung: Man unterscheidet zwischen Luftkühlung, Wasserkühlung, Siedekühlung, Peltierkühlung und Trockeneiskühlung.“

### Mängel

Kühlen bedeutet, dass man einen Gegenstand auf eine niedrige Temperatur bringt oder auf einer niedrigen Temperatur hält. Man tut das, indem man dem Körper Entropie entzieht.

Dabei gibt es im Prinzip zwei Möglichkeiten:

- 1 Man hat eine Umgebung, die kälter ist als der zu kühlende Körper. Dann muss man nur dafür sorgen, dass die Entropie ihrem natürlichen Trieb von warm nach kalt folgt. Beispiel: die Kühlung des Automotors.
- 2 Hat man eine solche Umgebung nicht (weil die Temperatur, die der zu kühlende Körper haben soll, unter der Umgebungstemperatur liegt), so muss man die Entropie von der niedrigen auf die höhere Umgebungstemperatur befördern. Dazu braucht man Energie und ein Gerät: die Wärmepumpe (die eigentlich besser Entropiepumpe heißen sollte).

In der Mechanik gibt es das analoge Problem. Um einen Körper (etwa ein Fahrzeug) auf eine höhere Geschwindigkeit zu bringen, oder auf einer hohen Geschwindigkeit zu halten, muss man ihm Impuls zuführen.

Auch hier gibt es zwei Möglichkeiten:

- 1 Man koppelt den Körper an ein System, das schon eine hohe Geschwindigkeit hat. Der Impuls folgt dann seinem natürlichen Trieb von der hohen zur

niedrigen Geschwindigkeit. Dasselbe tut man auch beim Bremsen: Die Bremse stellt eine impulsleitende Verbindung zwischen Fahrzeug und Erde her, und der Impuls fließt von selbst in die Erde.

2. Wenn man keine „Umgebung“ mit der gewünschten, höheren Geschwindigkeit hat, muss man den Impuls unter Energieaufwand aus der Umgebung in das Fahrzeug pumpen. Genau das tut der Motor.

Wir sparen uns die entsprechende elektrische und chemische Geschichte.

Wenn vom Kühlen mit flüssigem Stickstoff, Helium oder Eiswürfeln die Rede ist, entsteht der Eindruck, das sogenannte Kühlmittel sei das Entscheidende. Man kühlt die Spulen mit flüssigem Helium. Aber das heißt ja nur, man kühlt etwas mit etwas anderem, das schon kalt ist. Kühlen wird reduziert auf das Anpassen von zwei Temperaturen.

Aber wer kühlt denn das Helium? Wie wird das Helium seine Entropie los? Davon wird, wenigstens in unseren Zitaten, nichts gesagt. Es wird eben einfach verflüssigt.

In unserem dritten Zitat ist vom Kühlschrank und der Klimaanlage die Rede. Wenn ich den Text richtig verstanden habe, geht es dem Autor aber nur darum, wie die Entropie in dem Wärmetauscher an der Rückseite des Kühlschranks an die Umgebungsluft weiter gegeben wird. Hier wird offenbar der Kühlschrank gekühlt. Das, was den Kühlschrank ausmacht, nämlich seine Wärmepumpe, scheint weniger wichtig zu sein.

Im letzten Zitat (aus Wikipedia, aber etwas verfremdet) geht es lustig durcheinander. Peltierelement und Trockeneis werden in einem Atemzug genannt. Das Erste ist eine Wärmepumpe, das Zweite nur ein kalter Stoff, aus dem Entropie vorher herausgepumpt worden war.

Das für das Kühlen entscheidende Element, die Wärmepumpe, wird entweder gar nicht erwähnt oder erscheint nur als ein technisches Detail. Man braucht sie ja „nur“ zum Verflüssigen oder zum Erzeugen der Eiswürfel für die Cola.

### Herkunft

Wie soll man es auch klarer ausdrücken, wenn man die Entropie nicht erwähnen möchte oder kann? Entsprechend kann man natürlich auch nicht vom Hochpumpen der Entropie sprechen. Und mit den Ersatzkonstruktionen thermische Energie oder Enthalpie wird es kompliziert. Da sagt man lieber gar nichts.

### Entsorgung

Ganz allgemein: Man reduziere die Arbeit von Carnot nicht auf den etwas verwickelten Kreisprozess, der ja in

seiner Arbeit nur ein Beispiel ist. Man mache sich vielmehr seine geniale Idee zu eigen: den Vergleich der Wärmekraftmaschine mit einem Wasserrad. Dass er den Vergleich der Wärmepumpe mit einer Wasserpumpe noch nicht anführen konnte, lag nur daran, dass es damals noch keine Wärmepumpen gab.

Und wenn man vom Kühlen spricht, stelle man die Kühlmaschine (Wärmepumpe) in den Vordergrund. Ihre Funktion ist leicht zu beschreiben: Die Wärmepumpe bringt unter Energieaufwand Entropie von kalt nach warm – genauso wie eine Wasserpumpe Wasser von niedrigem auf hohen Druck bringt. Das kann man leicht erklären. Die technischen Tricks, die dabei Anwendung finden, kann man anschließend behandeln. Oder man lässt sie ganz weg.

Schließlich noch ein Vorschlag: Man mache nicht die Unterscheidung zwischen Wärmepumpe und Kältemaschine. Gewiss, die Geräte sind gewöhnlich unterschiedlich gebaut, aber mindestens ein Hinweis darauf, dass sie dasselbe tun, wäre für die Studenten hilfreich.

## 5.39 Seeklima und Wärmekapazität des Wassers

### Gegenstand

Dass die ausnehmend hohe spezifische Wärmekapazität  $c$  des Wassers verantwortlich ist für milde Winter und kühle Sommer in küstennahen Ländern, gehört zur physikalischen Allgemeinbildung.

### Mängel

Wieso vergleichen wir hier die Wärmekapazitäten von 1 kg der Stoffe und nicht die von 1 mol oder von 1  $\text{m}^3$ ? Sinnvoll ist hier weder die massenbezogene Wärmekapazität  $C/m = c$  noch die volumenbezogene  $C/V = c_p$ , sondern allenfalls die flächenbezogene

$$C/A = c\rho h,$$

wobei  $A$  die Oberfläche und  $h$  die wirksame Dicke der Wärme austauschenden Schicht bezeichnet.  $h$  können wir mit der Tiefe gleichsetzen, bis zu der die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen hinabreichen.

Um  $h$  abzuschätzen, betrachten wir die Wärme  $Q$ , die während des Sommerhalbjahres  $J/2$  durch die Oberfläche  $A$  aufgenommen wird, und zwar – stark vergröbert – bei fester Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und konstantem Temperaturgefälle  $\Delta T/h$  in der Schicht:

## Der Wärmetransport durch die Atmosphäre

$$Q = (1/2) \cdot J \cdot A \cdot \lambda \cdot \Delta T / h.$$

Andererseits lässt sich  $Q$  aus der Wärmekapazität  $C = c \rho h A$  und der mittleren Übertemperatur  $(1/2)\Delta T$  der betroffenen Schicht überschlagen:

$$Q = c \rho h A \cdot (1/2)\Delta T.$$

Durch Gleichsetzen und Auflösen nach  $h$  erhalten wir:

$$h = \frac{\lambda J}{c \rho} \text{ und } \frac{C}{A} = \sqrt{\lambda c \rho}.$$

Die Werte der Tab. 5.2 zeigen, dass das Wasser bei diesem Vergleich schlecht abschneidet. Erst wenn wir bedenken, dass durch die Umwälzung des Wassers der Wärmeaustausch im Meer viel mächtigere Schichten als die berechneten 2 m erfassen kann und dass 1 m Jahresniederschlag (nicht untypisch für Europa) mit einem Wärmeumsatz verbunden ist, der ausreicht, um die Temperatur einer 60 m dicken Wasserschicht um 10 K zu ändern, wird die Klimawirksamkeit des Wassers verständlich. Dass das Wasser flüssig und flüchtig ist, sind offenbar die entscheidenden Merkmale, nicht seine hohe spezifische Wärmekapazität, die wegen seiner geringen Massendichte und Wärmeleitfähigkeit nicht zum Tragen kommt.

### Herkunft

Der Versuchung, aus einer auffälligen Parallelität auf einen ursächlichen Zusammenhang zu schließen, erliegen wir leicht, und das um so mehr, als uns der Schluss von fachkundiger Seite nahegelegt wird. Einmal eingebürgert besticht das Argument durch seine Einfachheit und überlebt, weil es zu schwer zu widerlegen ist.

### Entsorgung

Durch höfliches Übergehen allein sind solche Schlussweisen, die weiter verbreitet sind, als der Physik lieb ist, nicht auszumerzen.

## 5.40 Der Wärmetransport durch die Atmosphäre

### Gegenstand

Die Atmosphäre ist für Sonnenlicht fast vollständig durchlässig. Sonnenlicht wird daher nicht von der Atmosphäre, sondern fast nur von der Erdoberfläche absorbiert. Für das von der Erde emittierte Infrarotlicht dagegen ist die Atmosphäre fast vollständig undurchlässig. Die Infrarotstrahlung, die (vom Weltraum aus gesehen) von der Erde kommt, wird erst in größerer Höhe von der Luft der Atmosphäre emittiert. Die entsprechende Energie gelangt von der Erdoberfläche bis in diese „Emissionshöhe“ aufgrund verschiedener Mechanismen, die man mithilfe von Energieflussbildern darzustellen pflegt, Abb. 5.10.

Es fällt auf, dass zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche zwei Strahlungsenergiestrome fließen, deren Beiträge größer sind als der von der Sonne kommende Energiestrom.

### Mängel

Eine Darstellung wie die von Abb. 5.10 suggeriert, dass der wichtigste Transportmechanismus der Wärme von der Erdoberfläche in die obere Troposphäre die Strahlung ist. Die entsprechenden Flusspfeile sind die breitesten, und die Energiestromdichtewerte sind die größten. Auch der Text, mit dem solche Bilder beschrieben werden, unterstützt diesen Eindruck.

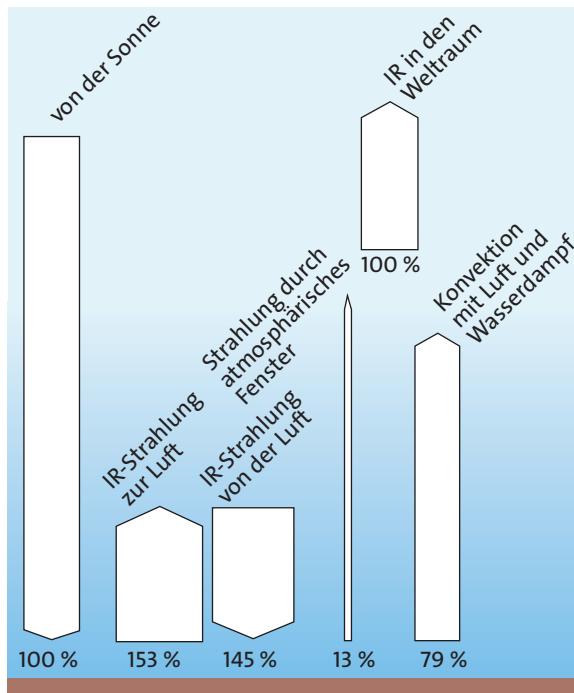
Die Darstellung täuscht aber. Der Nettostrahlungsenergiestrom von der Erde zur oberen Troposphäre ergibt sich aus Abb. 5.10, wenn man die beiden breiten Flüsse addiert. Als Ergebnis erhält man 8 % des von der Erde absorbierten Energiestroms. Das entsprechende Energieflussbild zeigt Abb. 5.11. Man sieht jetzt, dass nicht die Strahlung, sondern die Konvektion der dominante Transportmechanismus ist, ja dass man für eine gröbere Beobachtung die Strahlung sogar ignorieren kann.

	$\rho$ Mg m <sup>-3</sup>	$\lambda$ J m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	$C/n$ kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	$C/V$ MJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	$C/V$ MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	$h$ m
Wasser	1,0	0,6	4,2	4,2	9	2
Granit	2,8	3,6	0,8	2,3	16	7
Basalt	2,9	2,1	0,9	2,5	13	5
Flusssand <sup>1</sup>	1,6	1,1	1,0	1,7	7	5
Erdreich <sup>2</sup>	2,0	2,3	1,3	2,5	14	5

<sup>1</sup> feinkörnig mit 0,07 g/g Feuchte

<sup>2</sup> gewachsener, lehmiger, feinsandiger Boden mit 0,14 g/g Feuchte

Tab. 5.2

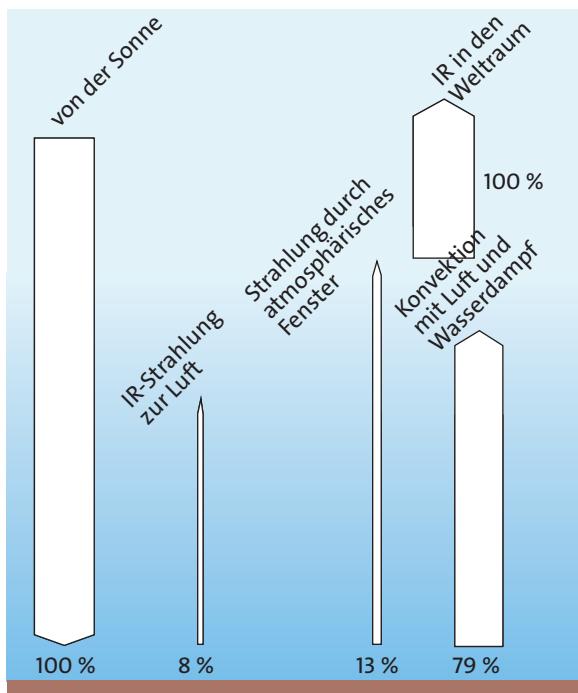


**Abb. 5.10** Der Energiestrom, der der Infrarotstrahlung entspricht, die innerhalb der Atmosphäre auf- und abwärts fließt, ist größer als der Energiestrom, der von der Sonne kommt.

Man mag geneigt sein, die Darstellung von Abb. 5.10 mit dem Argument zu verteidigen, sie enthalte doch mehr Information als Abb. 5.11. Nun ist diese Information hier aber nicht gefragt, und sie führt, wie die Erfahrung zeigt, manch einen Schüler oder Studenten in die Irre.

Tatsächlich kann man auch jeden anderen Strom in Komponenten zerlegen, und das sogar auf unendlich viele Arten. So kann man die ruhende Luft in einem Zimmer in Gedanken in zwei Hälften zerlegen. Die eine Hälfte besteht aus den Molekülen, die sich gerade nach rechts bewegen, die andere aus denen, die sich nach links bewegen. So entstehen zwei sehr große, gegeneinanderlaufende Luftströme. Ähnlich könnte man verfahren mit den Elektronen in einem stromlosen elektrischen Leiter: Es entstehen zwei sehr starke, gegeneinanderlaufende elektrische Ströme. Auch die Horizontalkomponente der thermischen Infrarotstrahlung in der Atmosphäre kann man auf diese Art zerlegen.

Noch ein Beispiel, das dem vertikalen Strahlungsfluss durch die Atmosphäre besonders gut entspricht: der Wärmestrom in einem Festkörper, etwa einem Kupferstab, der am einen Ende geheizt und am anderen ge-



**Abb. 5.11** Der Netto-Infrarot-Energiestrom durch die Atmosphäre ist klein gegen den Strom des konvektiven Wärmetransports.

kühlt wird. Was in der Atmosphäre die Photonen, sind im Kupferstab die Phononen. Was in der Atmosphäre die Lichtgeschwindigkeit, ist im Kupferstab die Schallgeschwindigkeit. Niemand käme hier auf den Gedanken, den Wärmestrom in zwei gegeneinander laufende Phononenströme zu zerlegen, wenn es lediglich darum geht, die Wärmebilanz des Kupferstabes aufzustellen.

Natürlich ist keine der beiden Beschreibungen – die mit dem Nettostrom und die mit den Teilströmen – falsch. Nur ist die mit den Teilströmen eben erstens komplizierter, und zweitens irreführend.

### Herkunft

Wahrscheinlich die Tatsache, dass sich die Teilenergieströme bequem messen lassen, die Nettostromstärke aber nicht.

### Entsorgung

Man stelle die Energieflüsse in der Atmosphäre durch die unzerlegte Energiestromdichte dar. Diese Größe hat in jedem Punkt eines Strahlungsfeldes einen einzigen eindeutigen Wert. Es wird dann klar, dass der dominante Wärmetransportmechanismus durch die untere Atmosphäre die Konvektion ist.

## Die Temperaturschichtung der Atmosphäre

### 5.41 Die Temperaturschichtung der Atmosphäre

#### Gegenstand

In großen Höhen ist es kalt. Auf den Bergen treibt man noch Wintersport, während im Tal schon die Krokusse blühen. Die auch sommers schneebedeckten Alpengipfel sind ein jedermann geläufiges Bild. Aufsteigende schwüle, überwärmte Luft kann kilometerhohe Gewitterwolken auftürmen mit eisigem Regen und Hagelschlag als Folge. Wolken, Schnee und Regen danken ihre Entstehung der Kühle in der Höhe, einer Kühle, die sich trotz des ständigen Durchröhrens der Luft dauerhaft erhält. Warum?

#### Mängel

Die Antwort darauf suchen wir in der Schulphysik vergeblich. Obwohl sie durchaus ein waches Auge für Effekte in der Größenordnung von Promillen haben kann wie die thermische Ausdehnung fester Körper, fehlt ihr der Blick für das tägliche Schauspiel in der Atmosphäre. Dabei ist der fragliche Effekt leicht zu benennen, leicht vorzuführen und leicht einsichtig zu machen und außer für Wintersport und Wettergeschehen auch anderweitig höchst bedeutsam: Kühlsschränke, Wärmepumpen, Dampfturbinen, Autotrennen und pneumatische Feuerzeuge nutzen ihn. Das Aufglühen von Sternschnuppen und Meteoren, die Notwendigkeit von Hitzeschilden für rückkehrende Raumkapseln und die sogenannte Hitzemauer, die die Geschwindigkeit von Luftfahrzeugen beschränkt, sind spektakuläre Folgen dieses Effektes. Es ist der Tatbestand, dass Gase, aber auch Flüssigkeiten und Feststoffe, beim Verdichten warm werden und beim Entspannen wieder kalt, ohne dass dazu Wärme zu- oder abgeführt werden muss. Die Wirkung ist drastisch. Sternschnuppen verglühen durch die Hitze der vor ihrem Bug aufgestauten Luft. Dieselmotoren zünden hierdurch das Ölnebel-Luft-Gemenge im Zylinder. Auch die Lufthülle der Erde verdankt ihre stabile Temperaturschichtung mit  $+15^{\circ}\text{C}$  am Boden und  $-50^{\circ}\text{C}$  in 10 km Höhe diesem Effekt. Ursache ist, dass aufsteigende Luft sich wegen des Druckabfalls ausdehnt, damit abkühlt und, wenn sie feucht genug ist, Wolken bildet, während absinkende Luft sich infolge der Druckzunahme erwärmt. Selbst bei dickster Wolkendecke und stürmischem Wetter herrscht am Boden klare Sicht, weil heruntergewirbelte Wolkenfetzen sich in der erwärmten Luft auflösen. Luftumwälzung behindert die Ausbildung der Temperaturschichtung nicht, sondern im Gegenteil, sie fördert sie.

#### Herkunft

In Gasblasen von 1 cm Durchmesser gleichen sich Temperaturunterschiede innerhalb 1 s aus. Die Abklingzeit nimmt jedoch mit dem Quadrat des Durchmessers zu, sodass bei 100 m bereits Abklingzeiten von  $10^8$  s herauskommen. Mit wachsenden Abmessungen tritt der Wärmeaustausch mit der Umgebung mehr und mehr in den Hintergrund. Adiabatische oder besser gesagt, isentrope Vorgänge beherrschen daher im Großraum Atmosphäre die Szene, während es im Kleinraum Labor die isothermen Vorgänge sind. Die physikalische Beschreibung ist an der Laborerfahrung ausgerichtet mit der Temperatur  $T$  als dominanter Größe, während die Entropie  $S$  dort als Folge ihrer verspäteten Einführung und schwerfälligen Handhabung möglichst ausgeklammert wird und mit ihr eine Reihe von Erscheinungen und Begriffen, die sich ohne die Entropie nur schwer fassen lassen. So heißt eine Kurve konstanter Temperatur Isotherme, eine Kurve konstanter Entropie aber Adiabate. Einzelne Isothermen lassen sich durch die zugehörigen Temperaturen  $T_1$ ,  $T_2$  kennzeichnen, während wir uns bei Adiabaten mit Umschreibungen behelfen müssen. Die Druckverteilung wird mittels der barometrischen Höhenformel nur für die unrealistische isotherme Atmosphäre diskutiert.

#### Entsorgung

Zur Behandlung isentroper Vorgänge sind wir schlecht gerüstet, wenn wir mit der Entropie auf Kriegsfuß stehen. Die größten Hindernisse lassen sich beseitigen, wenn wir bedenken, dass das umgangssprachliche Wort Wärme (im Sinne eines wärmenden Etwas) sehr genau das Merkmal trifft, welches in der Physik durch die Größe Entropie quantifiziert wird. Wenn wir von der Entropie reden wie von der Wärme im Alltag, bekommen wir bereits eine weitgehend richtige und trotzdem anschauliche Beschreibung.

### 5.42 Die barometrische Höhenformel

#### Gegenstand

Im Zusammenhang mit dem Thema „Atmosphärendruck“ wird die barometrische Höhenformel behandelt. Dabei wird betont, dass die der Herleitung zugrunde liegende Annahme einer von der Höhe unabhängigen Temperatur nicht realistisch ist.

1 „Mithilfe der ... Gleichung lässt sich aus dem Luftdruck in zwei verschiedenen Höhen die Höhendifferenz bestimmen (barometrische Höhenmessung). Die

- Voraussetzung konstanter Temperatur ist in Wirklichkeit nicht gegeben. Für nicht zu große Höhenunterschiede kann man das arithmetische Mittel aus den Temperaturen in den Höhen  $h_0$  und  $h$  verwenden.“
- 2 „Diese Gleichung, die man gewöhnlich barometrische Höhenformel nennt, gibt die Möglichkeit, die Höhendifferenz zwischen zwei Punkten zu berechnen, wenn man Luftdruck und Lufttemperatur an beiden Stationen kennt. Die beiden Gleichungen (...) gelten für eine isotherme Atmosphäre; in der Natur ist die Temperatur normalerweise mit der Höhe veränderlich. Man kann jedoch ohne größeren Fehler die Formeln für die isotherme Atmosphäre auch auf die natürliche Atmosphäre anwenden, wenn man für  $T$  den Mittelwert der Temperatur zwischen den beiden Niveaus einsetzt.“
- 3 „Unter der (unrealistischen) Voraussetzung, dass die Erdatmosphäre die einheitliche Temperatur  $T$  besitzt, lässt sich eine Formel für die Abhängigkeit des Gasdruckes  $p$  von der Höhe  $h$  angeben: ...“
- 4 „Hier ist allerdings, da das Boyle-Mariotte'sche Gesetz benutzt wurde, Temperaturkonstanz vorausgesetzt; zutreffender ist eine auf dem adiabatischen Gesetz  $p/\rho^\kappa = \text{const}$  beruhende Höhenformel, die auf analoge Weise abgeleitet wird.“
- 5 „In Wirklichkeit nimmt die Temperatur i. Allg. in der Troposphäre (bis 10 km – 12 km) mit der Höhe ab. Die Troposphäre wird für trockene Luft besser durch die adiabatisch-indifferente Schichtung beschrieben.“

### Mängel

Zunächst wird die barometrische Höhenformel unter der Annahme, die Atmosphäre befände sich in vertikaler Richtung im thermischen Gleichgewicht, hergeleitet, etwa in der Form

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}$$

und dann wird dementiert.

Manchmal (Zitate 1 und 2) wird noch vorgeschlagen, wie man trotz dieser Unzulänglichkeit mit der Formel etwas anfangen kann: indem man sie auf kleine Höhenintervalle anwendet und den Mittelwert der Temperatur verwendet.

Durch die mathematische Behandlung des Problems wird zunächst der Eindruck eines strengen Vorgehens erweckt. Dann wird aber eingestanden, dass die Voraussetzungen der Rechnung „in Wirklichkeit nicht gegeben“ sind, dass sie „unrealistisch“ sind. Es wird sogar erklärt, wie es eigentlich besser gemacht werden könnte – Zitate 4 und 5 –, aber es wird nicht besser gemacht.

Man mag geneigt sein, dieses Vorgehen damit zu begründen, dass es sich dabei um eine Idealisierung handle, etwa so, wie wenn man in der Mechanik annimmt, dass keine Reibung vorhanden ist. Bei der barometrischen Höhenformel steht es anders: Um sie herzuleiten, wurde nicht irgendein störender Einfluss oder Effekt weggelassen. Es wurde vielmehr, was den vertikalen Entropieaustausch betrifft, das Gegenteil von dem angenommen, was in der Natur realisiert ist.

Man kann zwei Extremfälle thermodynamischer Prozesse betrachten: isotherme und isentrope. Im Fall der Atmosphäre ist das isentrope Verhalten, genauer: die Annahme konstanter molarer Entropie, eine gute Näherung; die Annahme, dass sich Temperaturen ausgleichen, ist eine schlechte. Man hat hier also nicht einen störenden Einfluss zunächst weggelassen, wie man es im Fall der Mechanik mit der Reibung tut. „Isotherm“ ist nicht die erste Näherung „isentrop“, sondern das Gegenteil davon [1].

Dass die Annahme einer höhenunabhängigen Temperatur eine schlechte Annahme ist, ist offensichtlich. Sie setzt voraus, dass sich die Luft in großer Höhe mit der in geringer Höhe im thermischen Gleichgewicht befindet. Das thermische Gleichgewicht kann sich aber nur einstellen, wenn ein Entropietransport stattfinden kann, der nicht konvektiv ist, d.h. ein Entropieaustausch zwischen einer Luftportion und einer anderen. Eine Bewegung der Luft, auch ein kräftiges Umrühren durch Turbulenz, schafft kein thermisches Gleichgewicht zwischen Luftportionen in verschiedenen Höhen. Im Gegenteil: Kräftiges Durchmischen der Luft ist die Voraussetzung dafür, dass sich der natürliche Temperaturgradient einstellt.

Offenbar wird der natürliche Temperaturgradient nicht so ernst genommen wie der Druckgradient. Wer käme auf die Idee, das Temperaturgefälle zu berechnen und dabei schnell mal den Druck als konstant anzunehmen.

Zwei Mechanismen können den Temperaturaustausch zwischen verschiedenen Luftportionen fördern: Wenn Wasser in niedriger Höhe oder auf dem Erdboden verdampft und in großer Höhe kondensiert, und dann als Regen durch die Luft hindurch wieder nach unten gelangt, hat man einen Entropietransport durch die Luft hindurch von unten nach oben, mit der Tendenz, das Temperaturgefälle zu vermindern; ebenso die (Netto-)Strahlung von unten nach oben, die in dieselbe Richtung wirkt. Dies sind zusätzliche Effekte, die man, wenn man die Atmosphäre verstehen will, zunächst unberücksichtigt lässt. Man beginnt also mit der „trocken-isentropen“ (oder wie man gewöhnlich sagt, der „trocken-adiabatischen“) Atmosphäre.

## Sternschnuppen und Raumkapseln

Dass die barometrische Höhenformel ein sehr einfaches Gesetz ist, das man einem Anfänger gut zumuten kann, kann auch keine Rechtfertigung für die Annahme konstanter Temperatur sein, denn die Druckabnahme der trocken-isentropen Atmosphäre ist nicht komplizierter. Es ist eine Potenzfunktion (mit gebrochenem Exponenten):

$$p(h) = p(0) \left( 1 - \frac{Mg}{c_p T(0)} h \right)^{\frac{c_p}{R}}$$

Die Temperaturabnahme mit der Höhe, von der man annimmt, dass es sie gar nicht gibt, befolgt ein noch einfacheres Gesetz. Sie ist linear<sup>1</sup>:

$$T(h) = T(0) - \frac{Mg}{c_p} h$$

Noch eine Merkwürdigkeit, die in den Zitaten 1 und 2 zum Ausdruck kommt.

Man bemüht sich zu erklären, wie man die Höhe über eine Druckmessung bestimmen kann. Da die barometrische Höhenformel nicht besonders geeignet ist, wird vorgeschlagen, sich auf kleine Höhenintervalle zu beschränken. Die Abb. 5.12 zeigt den Druckverlauf mit der Höhe, so wie er aus der barometrischen Höhenformel folgt und wie es der trocken-isentropen Atmosphäre entspricht.

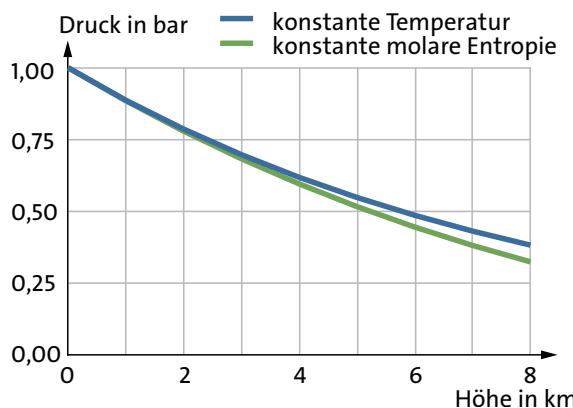


Abb. 5.12 Druckverlauf mit der Höhe

<sup>1</sup> Dieses Gesetz würde dazu führen, dass die Temperatur in einer Höhe von etwa 30 km, also weit oberhalb der Troposphäre, den absoluten Nullpunkt erreicht. Die Luft wäre vorher natürlich schon flüssig geworden, sodass die Voraussetzungen der Herleitung nicht mehr erfüllt sind.

Man sieht: Wenn man eine Höhenbestimmung in kleinen Intervallen macht, ist es tatsächlich egal, welche der beiden Formeln man benutzt. Allerdings kann man sich dann auch die ganze Mühe sparen: Eine lineare Näherung tut es ebenso.

### Herkunft

- Wenn man mit der Entropie nicht zurechtkommt, wird einem die Bedingung konstanter Entropie als unanschaulicher erscheinen als die Bedingung konstanter Temperatur. Sie ist auch schwerer zu formulieren, wenn man dabei vermeiden will, die Entropie zu erwähnen.
- Die barometrische Höhenformel ist willkommen, weil sie ein einfaches Beispiel für das Wirken der Boltzmann-Formel zu sein scheint.
- Man kann das Gesetz allein mit Mitteln der Mechanik herleiten. So vermeidet man, es mit der ungeliebten Thermodynamik zu tun zu bekommen. Wenigstens entsteht dieser Eindruck. Aus der Thermodynamik übernimmt man nur das Boyle-Mariottesche Gesetz, in dem aber nur die mechanischen Größen  $p$  und  $V$  auftreten. Dass diese bei einem Gas stark an die thermischen Größen gekoppelt sind, fällt dabei nicht weiter auf. Das Konstanthalten der Temperatur scheint hier eine Maßnahme derselben Art zu sein, wie das Konstanthalten der Temperatur etwa beim Nachweis des Ohm'schen Gesetzes.

### Entsorgung

- Man mache klar, dass in der Atmosphäre im Gleichgewicht nicht nur ein natürliches Druckgefälle herrscht, sondern auch ein natürliches Temperaturgefälle, und dass dieses nicht mit der Bemerkung abgetan werden kann, das thermische Gleichgewicht habe sich noch nicht eingestellt.
- Man behandelt als Idealisierung die trockene Atmosphäre. Hier ist der Temperaturverlauf besonders einfach, nämlich linear.

[1] G. Job, *Die Temperaturschichtung der Atmosphäre*, Altlasten der Physik, Aulis Verlag Deubner (2002), Köln, S. 117

## 5.43 Sternschnuppen und Raumkapseln

### Gegenstand

Die hohen Temperaturen, die auftreten, wenn ein Space-shuttle, eine Raumkapsel oder ein Meteorit in die Erd-

atmosphäre eintritt, werden oft durch die Reibung erklärt, und zwar nicht nur in populärwissenschaftlichen Texten, sondern auch in Schul- und Hochschulbüchern:

- 1 „In dieser Phase steigen die Temperaturen aufgrund der Reibung auf der Außenhaut der Raumfahre auf bis zu 1600 Grad Celsius – bei diesen Temperaturen würde sogar Gestein schmelzen.“ [1]
- 2 „Kleine Materiestücke werden beim Eintritt in die Atmosphäre durch die Reibung so stark aufgeheizt, dass sie als hell leuchtende Sternschnuppen verdampfen.“ [2]
- 3 „Sie [die Meteoren] treten mit Geschwindigkeiten von etwa 30 km/s in die Erdatmosphäre ein und verdampfen dabei infolge der Reibung an den Lufteinchen.“ [3]

### Mängel

Durch Reibung entsteht Wärme, und Wärme bedeutet Temperaturerhöhung. Jeder hat die entsprechenden Erfahrungen gemacht. Bremsen werden heiß, einen stumpfen Bohrer bringt man leicht zum Glühen, das stumpfe Sägeblatt einer Kreissäge führt dazu, dass das Holz, das man sägen möchte, verkohlt. Was liegt näher, als die hohen Temperaturen, die beim Eintritt des Spaceshuttle oder eines Meteoriten in die Atmosphäre durch Reibung zu erklären? Und doch ist diese Erklärung nicht korrekt.

Ein Körper, der sich sehr schnell durch die Luft bewegt, komprimiert diese an seiner Vorderseite. Ist die Geschwindigkeit größer als die Schallgeschwindigkeit, so bildet sich vor dem Flugkörper ein „Verdichtungsstoß“: ein Sprung zu höheren Werten von Druck, Dichte und Temperatur und einem niedrigeren Wert der Geschwindigkeit (im Bezugssystem des Flugkörpers). Je höher die Geschwindigkeit des Flugkörpers, desto größer ist dieser Sprung. Bei einer „Wiedereintrittskapsel“ erreicht die Temperatur etwa 20 000 K. (Der Hitzeschild erwärmt sich dadurch bis auf etwa 2 000 K.) Bei der anschließenden Entspannung und den dabei ablaufenden Reibungs- und Verwirbelungsvorgängen nimmt die Temperatur wieder ab. Die hohen Temperaturen entstehen also vor der „Nase“ des Flugkörpers und nicht dort, wo die Reibungsvorgänge stattfinden.

Zwei Fragen stellen sich:

- Warum nimmt die Temperatur im Verdichtungsstoß zu?
- Warum nimmt die Temperatur nicht mehr zu, wenn die Reibung einsetzt?

Wir finden die Antworten auf beide Fragen, wenn wir klären, was mit der Entropie geschieht. Wir erinnern uns daran, dass die Entropie einer gegebenen Gasmenge

von der Temperatur und vom Volumen abhängt: Je größer die Temperatur (bei festem Volumen) und je größer das Volumen (bei fester Temperatur), desto mehr Entropie enthält das Gas.

Zurück zum Shuttle: Wie betrachten eine bestimmte Luftportion. Im Verdichtungsstoß wird sie sehr schnell, und daher praktisch isentrop („adiabatisch“) komprimiert [4,5]. Ihre Entropie ändert sich also nicht. Da aber ihr Volumen abnimmt, muss die Temperatur zunehmen. Der Effekt ist derselbe wie die Temperaturzunahme einer absinkenden Luftmasse in der Atmosphäre.

Um den zweiten, wohl eher unerwarteten Effekt zu verstehen – nämlich, dass trotz Reibung die Temperatur nicht zunimmt –, betrachten wir ein Modellsystem, das geometrisch einfacher ist als die umströmte Raumkapsel oder der umströmte Meteorit, bei dem aber im Wesentlichen derselbe Vorgang abläuft: eine stationäre Gasströmung in einem Rohr mit einem Strömungswiderstand, Abb. 5.13.



**Abb. 5.13** Luft fließt durch einen Strömungswiderstand. Ihre Temperatur nimmt ab, da ihre Geschwindigkeit zunimmt.

Da sich die Luft beim Passieren des Widerstandes entspannt, ist der Volumenstrom (die „Liter pro Sekunde“) rechts vom Widerstand größer als links. Wenn es sich um ein ideales Gas handelt, so gilt für den Vorgang die überraschend einfache Gleichung [6,7]:

$$c_p \cdot T + \frac{M}{2} v^2 = \text{const.}$$

Hier ist  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck,  $T$  die absolute Temperatur,  $M$  die molare Masse und  $v$  die Geschwindigkeit. Die Gleichung sagt, dass der Ausdruck an jeder Stelle einer Stromlinie denselben Wert hat. In Worten: Wo die Geschwindigkeit hoch ist, ist die Temperatur niedrig und umgekehrt.<sup>1</sup> (Voraussetzung ist, dass das Gas zwischen den beiden Stellen, die man miteinander vergleicht, keine Energie über die Rohrwände austauscht.) Die Gleichung gilt auch dann, wenn sich im Rohr ein Strömungswiderstand befindet. Für den Fall der Abb. 5.13 sagt die Gleichung, dass die Temperatur des Gases hinter dem Widerstand niedriger ist als davor, denn da das Gas hinter dem Widerstand eine geringere Dichte hat, muss dort seine Geschwindigkeit größer sein als davor. Indem wir

## Temperatur und kinetische Energie der Teilchen

den Rohrquerschnitt hinter dem Widerstand entsprechend größer machen, können wir dafür sorgen, dass die Geschwindigkeiten vor und hinter dem Widerstand gleich sind, Abb. 5.14.

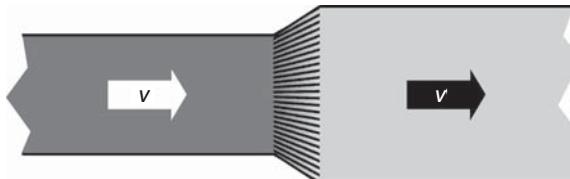


Abb. 5.14 Die Geschwindigkeiten vor und hinter dem Strömungswiderstand sind gleich. Daher sind auch die Temperaturen gleich.

Jetzt kann man auch verstehen, warum es der Widerstand nicht schafft, die Temperatur des Gases zu erhöhen. Dem Gas wird durch die Reibung Entropie zugeführt. Diese Entropie äußert sich in dem entspannten Gas rechts vom Widerstand nicht in einer höheren Temperatur, sondern in einem größeren Volumen. Die konstante Temperatur in Abb. 5.14 hat also dieselbe Erklärung wie die bei der bekannten Gay-Lussac-Expansion.

Wieder zurück zum Spaceshuttle. Auch hier haben wir eine Expansion mit Reibungsvorgängen. Allerdings nimmt hier die Geschwindigkeit zu, und die Luft vermischt sich mit der umgebenden Luft. Beides führt dazu, dass die Temperatur sogar abnimmt.<sup>2</sup>

Also: Ein Gas wird beim (isentropen) Komprimieren warm, beim Entspannen nimmt seine Temperatur wieder ab. Oder noch kürzer: Ein Gas wird nicht durch Reibung warm, sondern durch Kompression. Die intuitive Erklärung, nämlich Bewegung → Reibung → Wärme, die für feste und flüssige Stoffe korrekt ist, ist also für Gase falsch. An welcher Besonderheit der Gase liegt das? Daran, dass sie die ideale Gasgleichung befolgen, oder qualitativ: dass sie komprimierbar sind.

### Herkunft

Temperaturänderungen bei isentroper Kompression und Expansion sind allgegenwärtige Effekte. Die auffälligste und bekannteste Erscheinung ist sicher der Schnee auf den Spitzen der Berge [4]. Der physikalische Laie hat für viele thermische Effekte Erklärungen, die einer physikalischen Analyse durchaus standhalten. In diesem Fall fehlt ihm aber eine solche Erklärung, denn er sieht bei dem Schnee auf den Bergen wohl den Zusammenhang der Temperatur mit der Höhe, nicht aber den Zusammenhang mit dem Druck. Temperatureffekte dagegen, die auf Reibung beruhen, kennt er, und er erklärt sie auch richtig. Was liegt also näher, als auch die hohe Temperatur vor dem Spaceshuttle der Reibung zuzu-

schreiben? Manche Fachleute scheinen hier gegenüber dem Laien allerdings kaum einen Vorsprung zu haben. Ihr Problem ist es wohl, dass sie mit dem im Prinzip einfachen Erklärungswerkzeug „Entropie“ nicht so recht umgehen können.

### Entsorgung

Man zeigt, dass isentrope Kompression und Expansion die Ursache vieler auffälliger thermischer Effekte sind. Die hohe Temperatur, die für die Leuchterscheinung der Meteoriten, für das Abschmelzen ihrer äußeren Schichten oder für die Gefährdung des Spaceshuttle verantwortlich ist, ist nur einer dieser Effekte.

<sup>1</sup> Ein Beispiel ist die Luft, die aus einem Autoreifen austritt, wenn man das Ventil öffnet. Im Reifen ist die Geschwindigkeit null, unmittelbar nach dem Austreten ist sie hoch. Daher nimmt ihre Temperatur ab.

<sup>2</sup> Tatsächlich sind die Vorgänge beim Shuttle noch komplizierter, da aufgrund der hohen Temperaturen elektronische Anregungen, Dissoziation und andere chemische Reaktionen ablaufen. All das hat aber nur noch eine weitere Abnahme der Temperatur zur Folge.

- [1] [www.wissenschaft-online.de](http://www.wissenschaft-online.de)
- [2] Sexl, Raab, Streeruwitz, *Eine Einführung in die Physik*, Band I, Diesterweg, Frankfurt am Main, S. 121
- [3] G. H. Liljequist, K Cehak, *Allgemeine Meteorologie*, Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1984, S. 378
- [4] G. Job, *Die Temperaturschichtung der Atmosphäre*, Altlasen der Physik
- [5] J.-P. Petit, *Die Abenteuer des Anselm Wüfftegern, Die magnetische Schallmauer*, Physik-Verlag, Weinheim 1984, S. 52
- [6] H. Oertel, *Aerothermodynamik*, Springer-Verlag, Berlin, 1994, S. 8
- [7] F. Herrmann, *Skripten zur Experimentalphysik, Thermodynamik*, [www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de](http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de), S. 86

## 5.44 Temperatur und kinetische Energie der Teilchen

### Gegenstand

„Durch Zufuhr von Wärme wird die kinetische Energie der Gasteilchen erhöht. Die Temperatur ist ein Maß für den zeitlichen Mittelwert der kinetischen Energie eines Teilchens. ... Durch den Zusammenhang zwischen Energie und absoluter Temperatur erhält die Temperatur eine anschauliche Bedeutung.“

### Mängel

- Wenn man den Zusammenhang mit der kinetischen Energie der Teilchen nicht kennt, ist die Temperatur unanschaulich? Der physikalische Laie hat mit der Temperatur kein Problem. Er hat ein Gefühl für heiß und kalt, und er hat sich daran gewöhnt, dass man für dieses Heiß- und Kaltsein ein quantitatives Maß benutzt. Dass die Vorstellung von sich bewegenden Teilchen die Anschauung verbessern soll, kann nur einem Physiker in den Sinn kommen, wohl ein Fall von Déformation professionelle. Es sei auch daran erinnert, dass die Teilchen, die sich der um Anschauung bemühte Student vorstellen soll, d.h. die herumwimmelnden und -wackelnden Körperchen, nur ein grobes Modell sind, denn die vielen verschiedenen Anregungen in festen und flüssigen Körpern, in denen sich die Temperatur äußert, passen nur schlecht zu dieser Vorstellung.
- Es wird nahegelegt, dass die Temperatur und die mittlere kinetische Energie der Teilchen bis auf einen konstanten Faktor dasselbe seien. Das sind sie aber nicht. Die Temperatur ist in der statistischen Physik ein Parameter in der Boltzmann'schen Energieverteilungsfunktion. Dabei spielt es keine Rolle, in welchen Freiheitsgraden die Energie gespeichert ist. Der Freiheitsgrad der Translationsbewegung ist nur einer von vielen. Energie steckt nicht nur in der Translationsbewegung, sondern auch in Rotationen und Schwingungen der Moleküle, in elektronischen Anregungen, in verschiedenen Ionisierungszuständen, in plasmonischen und magnetischen Anregungen. Man könnte argumentieren, dass die Bewegung wenigstens als Indikator für die Temperatur gesehen werden kann. Das kann sie zwar, aber warum gerade die Bewegung? Die sehen wir doch genauso wenig wie die anderen Anregungen. Wir sehen sie vielleicht indirekt über die Brown'sche Molekularbewegung, aber wir sehen auch andere Anregungen indirekt, etwa elektronische Anregungen, wenn ein Körper glüht und wir fühlen die Schwingungsanregungen, wenn er im Infraroten strahlt.

### Herkunft

Wahrscheinlich ein Nachleuchten der Auseinandersetzung über die Natur der Wärme, die Ende des 18. Jahrhunderts in vollem Gange war. Es ging um die Frage, ob das Wesen der Wärme Bewegung oder ob die Wärme ein Stoff sei [1].

Da die Stofftheorie verworfen werden musste, blieb die Deutung der Wärme als Bewegung zunächst einfach übrig. Mitte des 19. Jahrhunderts wurde sie dann als Energieform interpretiert. Seit 1911 wurde sie auch mit der Entropie identifiziert [2].

### Entsorgung

Man kann durchaus sagen, dass die kinetische Energie der Teilchen mit der Temperatur linear zunimmt. Aber man lasse nicht den Eindruck entstehen, dies sei die einzige Art, wie sich die Temperatur auf der mikroskopischen Ebene äußert, denn wenn die Temperatur zunimmt, werden auch alle anderen „Energiespeicher“ gefüllt. Und was die Anschauung betrifft: Da brauchen wir im Unterricht nicht nachzuhelfen; die hat auch jeder physikalische Laie.

[1] Joseph Black, *Lectures on the elements of chemistry*, herausgegeben von John Robinson, LLD., Vol I, Mündell and Son, Edinburgh, 1802, S. 30 – 34

[2] H. L. Callendar, Proc. Phys. Soc. London, 23, 1911, S. 153

## 5.45 Die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung

### Gegenstand

Die von Maxwell berechnete Verteilungsfunktion der Molekülgeschwindigkeiten in einem Gas hat bei  $v = 0$  den Wert null. Sie läuft mit zunehmender Geschwindigkeit über ein Maximum und geht dann für  $v \rightarrow \infty$  wieder gegen null. Die wahrscheinlichste Geschwindigkeit, die mittlere Geschwindigkeit und die Wurzel aus dem mittleren Geschwindigkeitsquadrat haben verschiedene Werte. Man misst die Verteilungsfunktion mithilfe eines Molekularstrahls. Man kann die Verteilung auch in einem Modellexperiment sichtbar machen: Bewegte Kugelchen, die aus einem Modellgas austreten, werden nach ihren Geschwindigkeiten sortiert.

### Mängel

- Das Aussehen der Kurve der Abb. 5.15, die man gewöhnlich Maxwellverteilung nennt, könnte einen überraschen.

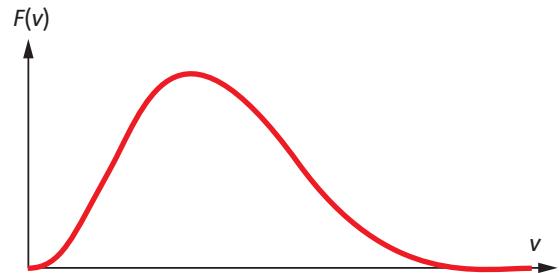


Abb. 5.15 Verteilung des Geschwindigkeitsbetrages

## Die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung

Dass hohe Geschwindigkeiten selten sind, so wie es die Kurve wiedergibt, erwartet man. Aber sollte die Wahrscheinlichkeit nicht immer größer werden, je kleiner die Geschwindigkeit ist? Diese nahe liegende Frage wird gewöhnlich nicht diskutiert. Im Grunde ist dieses Verhalten der Funktion aber nur ein Artefakt einer ungeschickten Darstellung.

Die Abbildung zeigt nämlich die Verteilung der Beiträge der Geschwindigkeit. Nun ist die Geschwindigkeit ein Vektor. Alle Gesetze der Mechanik würden kompliziert und schwerfällig, wenn man sie für die Beiträge der mechanischen Größen (Geschwindigkeit, Impuls, Kraft) formulierte. Fragt man hier nicht danach, wie die Wahrscheinlichkeit für das Antreffen eines Moleküls mit einem Geschwindigkeitsbetrag in einem Intervall  $dv$  ist, sondern für das Antreffen eines Moleküls mit einem Geschwindigkeitsvektor in einem Intervall  $dv_x \, dv_y \, dv_z$ , so bekommt man eine Gaussverteilung mit ihrem Maximum bei  $\bar{v} = 0$ .

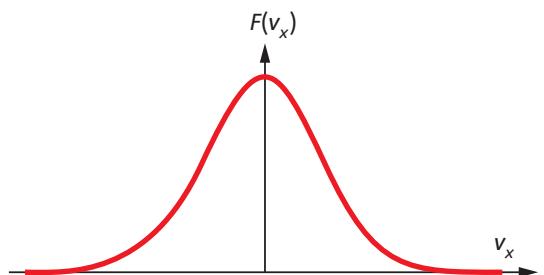


Abb. 5.16 Verteilung der  $x$ -Komponente der Geschwindigkeit

In Abb. 5.16 ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine Komponente des Geschwindigkeitsvektors dargestellt, siehe auch Gleichung (5.16) in Tab. 5.3. Dass bei der Auftragung der Verteilung des Geschwindigkeitsbetrages die Funktion für  $v \rightarrow 0$  wieder gegen null geht, liegt daran, dass man hier nicht gleiche Volumina im Geschwindigkeitsraum miteinander vergleicht, sondern gleiche Intervalle von  $dv$ . Das zu  $dv$  gehörende Volumen  $4\pi v^2 dv$  im Geschwindigkeitsraum nimmt bei festgehaltenem  $dv$  quadratisch mit dem Geschwindigkeitsbetrag zu – siehe Gleichung (5.17) in Tab. 5.3. Die großen Geschwindigkeiten werden bei diesem Vorgehen bevorzugt bzw. die kleinen benachteiligt. In Maxwells Originalarbeit wird deutlich zwischen den beiden Darstellungsmöglichkeiten unterschieden.

- Man betont, dass die Kurve von Abb. 5.15 nicht symmetrisch ist. Dabei wird gewöhnlich nicht gesagt, was mit „symmetrisch“ gemeint ist: dass nur die Kurve selbst nicht symmetrisch ist, oder auch, dass sie

Teilchen mit Geschwindigkeitsvektor  $\bar{v}$

$$F_1(\bar{v}) = A \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (5.16)$$

Teilchen mit Geschwindigkeitsbetrag  $v$

$$F_2(v) = B \cdot v^2 \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (5.17)$$

Teilchenstrom mit Geschwindigkeit  $v$  in Molekularstrahl

$$F_3(v) = C \cdot v^3 \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (5.18)$$

Teilchen mit Energie  $E$

$$F_4(v) = D \cdot \sqrt{E} \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (5.19)$$

Tab. 5.3 Verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Konstanten wurden zu den Faktoren A,B,C bzw. D zusammengefasst.

nicht symmetrisch zur Ordinatenachse liegt. Weil sie nicht symmetrisch ist, so wird betont, fallen verschiedene charakteristische Werte der Geschwindigkeit nicht zusammen: die wahrscheinlichste Geschwindigkeit, die mittlere Geschwindigkeit und der quadratische Mittelwert der Geschwindigkeit. Zwischen diesen, so heißt es, müsse man unterscheiden. Das Problem für den Lernenden ist, dass er nicht erfährt, in welchem Zusammenhang er die Geschwindigkeiten auseinanderhalten muss. Wahrscheinlich bekommt er nie eine Gelegenheit, sie zu verwechseln.

- 3 Die Gleichungen (5.16) und (5.17) machen Aussagen über die Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle in einem Gas, das sich im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Oft wird gesagt oder nahe gelegt, dass man diese Verteilung auch in einem Teilchenstrahl antrifft, und mithilfe eines Teilchenstrahls direkt messen kann. Nun hat die Geschwindigkeitsverteilung in einem Teilchenstrahl zwar qualitativ dieselbe Gestalt wie die Verteilung der Geschwindigkeitsbeträge im Gleichgewichtsfall, der Funktionsverlauf ist aber nicht derselbe, siehe Gleichung (5.18). Hier steht die Geschwindigkeit vor dem Boltzmannfaktor in der dritten Potenz [1]. (Zunächst tritt aus geometrischen Gründen wieder ein Faktor  $v^2$  auf. Es kommt aber noch ein weiterer Faktor  $v$  hinzu, weil ein schnelles Molekül in einem Strahl stärker zur Stromdichte beiträgt als ein langsames.)
- 4 Man betont gern die Wichtigkeit der Verteilung der Geschwindigkeitsbeträge, aber es ist nicht zu erkennen, wozu man sie schließlich braucht. Mit der Ver-

teilungsfunktion der Geschwindigkeitskomponenten kann man etwa den Druck berechnen. Für viele andere Zwecke braucht man die Verteilung der kinetischen Energie. Auch sie sieht übrigens der Verteilung des Geschwindigkeitsbetrages ähnlich, Gleichung (5.19). Sie beantwortet etwa die folgenden Fragen [2]: „Wie viele Gasmoleküle haben genügend Energie, um eine endotherme chemische Reaktion auszulösen, einem anderen Teilchen ein Elektron zu entreißen (Stoßionisation) oder es zur Strahlung anzuregen (Stoßanregung), dem Schwerefeld der Erde oder eines anderen Planeten zu entweichen, die zwischen den Atomkernen herrschende elektrostatische Abstoßung zu überwinden (eine Kernfusion auszuführen)?“ Die einzige Verteilung, die nicht gebraucht wird, ist die des Geschwindigkeitsbetrages.

### Herkunft

- Die Verteilung der Geschwindigkeitsbeträge steht bei Maxwell [3]. Man gibt das Ergebnis einfach weiter. Schließlich war Maxwell ein bedeutender Physiker.
- Vielleicht der Versuch, die Vorstellung zu rechtfertigen, die mittlere Geschwindigkeit sei ein Maß für die Temperatur.
- Die unkritische Interpretation des Modellexperiments mit den Kugelchen.

### Entsorgung

Andere Verteilungen sind interessanter, etwa die des (vektoriellen) Impulses oder der Energie. Auf das Kugelchengerät kann man verzichten.

[1] W. Döring, *Einführung in die theoretische Physik V, Statistische Mechanik*, Sammlung Göschen, Band 1017, S. 16

[2] H. Vogel, *Physik*, Gerthsen – Kneser – Vogel, 13. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1977, S. 169

[3] J. C. Maxwell, *Erläuterungen zur dynamischen Theorie der Gase, Kinetische Theorie*, Band I, Wissenschaftliche Taschenbücher, Akademie-Verlag, Berlin, S. G. Brush (Hrsg.), 1970, S. 221 – 222

## 5.46 Mikroskopisch - makroskopisch

### Gegenstand

Nach allgemeiner Auffassung ist die Entropie eine schwierige physikalische Größe. Ein wahres Verständnis bekommt man erst dann, wenn man Klarheit über

ihre mikroskopische Bedeutung hat, nämlich entweder als ein bestimmtes Charakteristikum einer Wahrscheinlichkeitsverteilung oder, etwas anschaulicher, als Maß für die Unordnung in der Besetzung der Mikrozustände eines Systems, oder auch als Maß für die in den Mikrozuständen gespeicherte Information.

### Mängel

- Die phänomenologische Thermodynamik ist eine Theorie, die statistische Thermodynamik eine andere. (Bei der sich an der Informationstheorie orientierenden Interpretation wird nur eine andere Sprache benutzt. Die Theorie ist im Wesentlichen dieselbe wie die der statistischen Thermodynamik.) Eine Theorie ist eine mathematische Beschreibung eines bestimmten Bereichs der Natur. Sie ist ein mathematisches Modell dieses Bereichs. Man kann zu jeder Klasse von Naturerscheinungen mehrere Theorien erfinden. Die Theorien können sich darin unterscheiden, wie genau sie bestimmte Erscheinungen beschreiben, aber auch darin, welche Aspekte sie überhaupt wiedergeben. Es ist also im Allgemeinen nicht so, dass die eine Theorie falsch und die andere richtig ist. Ein bekanntes Beispiel sind die verschiedenen Theorien zur Beschreibung des Lichts. Eine davon ist die Strahlenoptik, eine andere die Wellenoptik, eine dritte die Thermodynamik des Lichts und eine vierte die Quantenelektrodynamik. Jede dieser Theorien hat ihre Berechtigung. Es würde Niemandem in den Sinn kommen, zu behaupten, dass wir die Strahlenoptik nicht mehr brauchen, da wir die Quantenelektrodynamik haben. Es kann passieren, dass eine Theorie für die Beschreibung einer Erscheinung völlig nutzlos wird. So hilft uns etwa die Quantenelektrodynamik nicht weiter, wenn wir eine Linse berechnen wollen. Aber auch die Wellenoptik wird dafür nur am Rande gebraucht.

Aus dieser Sicht ist die phänomenologische Thermodynamik nicht schlechter als die statistische. Und es ist ganz normal, dass für bestimmte Probleme die phänomenologische Thermodynamik gut zu gebrauchen ist und die statistische nicht weiter hilft und umgekehrt.

- Man kann die Natur auf den verschiedensten Größenskalen oder Komplexitätsebenen beschreiben. Die Erwartung ist, dass es in die Richtung des Kleinen immer einfacher wird. Man sucht nach dem Unteilbaren (Atom), dem Elementaren, nach den punktförmigen Teilchen, entdeckt aber immer wieder, dass das Ziel, sobald man einen Schritt weiter ins Mikroskopische eindringt, einen Schritt weiter weg-

## Das Teilchenmodell

rückt. In der anderen Richtung wird es aber nicht immer chaotischer und unübersichtlicher, wie man vielleicht befürchten könnte, sondern aus der Komplexität wachsen immer wieder neue, einfache Gesetze heraus. Aus dieser Betrachtung kann man schließen, dass gewiss nicht gilt, dass die mikroskopische Beschreibung fundamentaler ist als die makroskopische. Auch aus dieser Sicht ist also die phänomenologische Thermodynamik nicht schlechter oder weniger fundamental als die statistische.

- Für den Gebrauch in der Schule und der Einführungsvorlesung in die Thermodynamik und die Phänomene, die dort abgehandelt werden oder werden sollten, ist die phänomenologische Thermodynamik geeigneter als eine mikroskopische Betrachtung. Die Entropie ist, wenn sie nur geschickt eingeführt wird, eine besonders anschauliche Größe. Der Umgang mit ihr ist so einfach, dass jedes Kind damit zurechtkommt. Und man kommt im Nu zu einer unverkrampften Beschreibung der wichtigsten thermischen Erscheinungen, und zwar quantitativ: Wärmeinhalt, Wärmeleitung, Phasenübergänge, thermische Maschinen und deren Wirkungsgrad. Die drei sogenannten Hauptsätze erscheinen als Selbstverständlichkeiten.
- Niemand käme wohl auf die Idee zu behaupten, man versteünde die Vorgänge in einem elektrischen Stromkreis mit einem Widerstand nur dann, wenn man die mikroskopische Deutung des spezifischen Widerstandes, nämlich den Mechanismus der Elektron-Phonon-Kopplung verstanden hat. Niemand käme auf die Idee, die Mechanik damit zu beginnen, dass man die mikroskopische Deutung oder Ursache der Masse behandelt, nämlich über das Higgsfeld. Die mikroskopische Ursache dafür, dass Teilchen wie Elektronen oder Quarks (und damit Protonen) diejenige Masse haben, die sie haben, ist noch nicht einmal ganz geklärt, und man könnte sogar sagen, dass der Zustand der Physik noch ganz provisorisch ist, solange man für diese merkwürdigen Werte keine Erklärung hat. Das hindert uns aber nicht daran, Newton'sche Mechanik zu betreiben und uns die Masse vorzustellen als ein Maß für Trägheit und Schwere. Den Wert der Elektronenmasse misst man einfach oder man schlägt in einer Tabelle nach, und man fragt nicht weiter nach dem Warum oder Woher.

### Herkunft

Das Zurückführen aufs Kleine und das Zurückführen auf die Mechanik, war für viele Forscher im 19. Jahrhundert wissenschaftliches Programm, und es gab da-

mals gute Gründe, dieses Programm für vernünftig zu halten. Alles schien sich ihm unterzuordnen. Die Mechanik war perfektioniert und ihre Theorie hatte gegenüber dem Rest der Physik einen Vorsprung von hundert Jahren. So wurde auch in allen anderen Naturerscheinungen die Mechanik gesucht, und diese Suche war zunächst sehr erfolgreich. Für Maxwell war seine Elektrodynamik eine mechanische Theorie des Äthers. Mit der kinetischen Gastheorie und der statistischen Physik konnten die thermischen Phänomene auf die Mechanik zurückgeführt werden. Es sah also aus, als könnte alles physikalische Geschehen auf die Mechanik, und das heißt auf die Bewegung und die Wechselwirkung kleiner elementarer Körperchen zurückgeführt werden, und dass dies die ultimative Erklärung für das ganze Naturgeschehen ist. Erst nach 1900 zeigte sich, dass die nichtmechanischen Theorien die robusteren waren, und dass die mechanischen Beschreibungen eine ganze Menge Fiktion enthielten.

### Entsorgung

Man führt in der Wärmelehre die Entropie so ein, wie man die Masse in der Mechanik einführt: als direkt messbare Größe, mit der sich eine sehr einfache Anschauung verbinden lässt. Wie die Masse ein Maß für Trägheit und Schwere ist, so ist die Entropie ein Maß für den Wärmeinhalt. Die so eingeführte Masse ist eine tragfähige Größe für die ganze klassische Mechanik bis zum Niveau von Universitätsphysik und weiten Bereichen der technischen Mechanik. Entsprechend ist die so eingeführte Entropie eine tragfähige Größe für die ganze klassische Thermodynamik bis zum Niveau von Universitätsphysik und weiten Bereichen der technischen Thermodynamik.

## 5.47 Das Teilchenmodell

### Gegenstand

In der Schule wird das Teilchenmodell eingeführt. Man findet es in Lehrbüchern der Orientierungsstufe, der Mittelstufe und der Oberstufe. Es scheint ein wichtiges Thema zu sein. Was versteht man unter dem Teilchenmodell? Hier einige als Merksätze gekennzeichnete Aussagen:

#### 1 Physikbuch, Klassen 5 und 6:

##### Teilchenmodell

1. Alle Stoffe bestehen aus Teilchen (Kügelchen).
2. Die Teilchen befinden sich in ständiger Bewegung.
3. Zwischen den Teilchen treten Kräfte auf.

- 2 Physikbuch, Klassen 7 und 8:  
Modell für gasförmige Körper: Gase bestehen aus Teilchen, die sich frei im Raum bewegen.
- 3 Physikbuch, Sek. II:  
Modellvorstellung für ideale Gase:
  - 1 Die Teilchen verhalten sich bei Zusammenstößen vollelastisch.
  - 2 Außer während des Zusammenstoßes üben die Teilchen keine Kräfte aufeinander aus.
  - 3 Die Teilchen werden an der Wand des Behälters wie Kugeln elastisch reflektiert.
  - 4 Bei der ungeordneten Bewegung der Teilchen sind alle Bewegungsrichtungen gleichberechtigt.
  - 5 Das Eigenvolumen aller Teilchen zusammen ist vernachlässigbar gegenüber dem Volumen des Gases.

### Mängel

Zunächst zwei Begriffsklärungen: Was versteht man unter einem Teilchen und was unter einem Modell?

Zum Teilchen: im umgangssprachlichen und durchaus auch im wissenschaftlichen und technischen Sinn: ein kleines Objekt. Im Allgemeinen gibt es viele davon. Typisch etwa: ein Staubteilchen, ein Rußteilchen. (Im Gegensatz zu dem Nicht-Diminutiv „Teil“: ein Teil ist kein Objekt, sondern eben ein Teil von Etwas, von einem Objekt.)

Und zum Modell: Ein Modell ist immer ein Modell von etwas anderem. B sei ein Modell von A. A besteht aus Elementen, zwischen denen gewisse Beziehungen existieren. Da B ein Modell von A ist, muss auch B aus Elementen bestehen, die durch Beziehungen miteinander verknüpft sind. Die Elemente und Beziehungen von A werden auf die von B abgebildet; man kann eine Art Wörterbuch aufstellen. Man kann nun in B irgendwelche Schlüsse ziehen und diese mithilfe des Wörterbuchs in Schlüsse innerhalb von A übersetzen. Sind solche Schlüsse in A oft korrekt, so ist das Modell ein gutes Modell; sind sie oft falsch, so ist das Modell schlecht. In jedem Fall stimmen aber Original und Modell in den meisten Eigenschaften nicht überein. Es gibt keine falschen und richtigen, sondern nur mehr oder weniger brauchbare Modelle.

Nun zu unseren Zitaten. Es ist nicht zu erkennen, warum der Begriff „Modell“ benutzt wird. Wer ist hier ein Modell von wem? Sollen Teilchen das Modell der Atome und Moleküle sein? Da müsste man erklären, warum ein Atom kein Teilchen ist. Außerdem wird in den Texten durchweg gesagt, die Atome und Moleküle selbst seien die Teilchen.

Eine passende Verwendung der Bezeichnung Modell finden wir etwa beim Bohrschen Atommodell. Das

Atom (A) ist gebaut und verhält sich in mancher Hinsicht wie ein Planetensystem (B). In den meisten Eigenschaften sind sich Atom und Planetensystem gar nicht ähnlich, aber in einigen, auf die es einem gerade ankommt, sehr wohl.

Nur in einem Chemiebuch habe ich gefunden, dass der Autor sich bemühte, die Bezeichnung Modell zu rechtfertigen, allerdings auf eine Art, die ich nicht ganz verstanden habe: „Die kleinsten Teilchen sind jedoch ohne Hilfsmittel nicht sichtbar. ... Dieses Modell ist daher eine Denkhilfe. Es ist ein Gedankenmodell über den möglichen Bau der Stoffe. Beim Teilchenmodell stellt man sich vor, dass die Teilchen der Stoffe kleinen Kugeln sehr ähnlich sind. ...“

Nun ist die Unsichtbarkeit gewiss kein Anlass von einem Modell zu sprechen. Dass ich die Luft nicht sehe, veranlasst mich auch nicht, ein sichtbares Modell der Luft einzuführen. Und wo ist die Denkhilfe? Soll man etwa glauben, „in Wirklichkeit“ bestehen die Stoffe gar nicht aus Atomen? Die Atome seien nur eine Denkhilfe?

Von einem Teilchen-„Modell“ zu sprechen hat durchaus einen Sinn, nämlich dann, wenn die Objekte, von denen man spricht, wesentliche Eigenschaften der umgangssprachlichen Teilchen nicht mehr haben: Wenn bei sehr tiefen Temperaturen die Ortsunschärfe der Atome deutlich größer als ihr Durchmesser wird, wenn zwei (oder mehr) „Teilchen“ verschränkt sind, so dass man eigentlich nur noch von einem delokalisierten Teilchen sprechen kann, oder wenn die Teilchen so wenige innere Freiheitsgrade haben, dass zwei „Teilchen“ nicht mehr unterscheidbar sind, sodass nach einer Vertauschung der Teilchen derselbe Zustand vorliegt wie vorher.

Nun sind das Zustände und Vorgänge, die man, wenn man das „Teilchenmodell“ einführt, sicher nicht im Sinn hat. Übrigens: Wenn diese Erscheinungen, die die Teilchenvorstellung etwas strapazieren, schließlich behandelt werden, wird die Bezeichnung Teilchen wieder mit einer überraschenden Unbekümmertheit verwendet.

Aber ist es denn schlimm, wenn gelegentlich mal ein Wort nicht ganz passt? Das Problem ist, dass unsere Lehrbücher viele Formulierungen enthalten, die suggerieren, hier sei etwas Tiefsinniges verborgen. Es ist eine von vielen Kleinigkeiten, die, zusammengenommen, die Physik so unansehnlich machen; die sie komplizierter erscheinen lassen, als sie ist. Was dann bei den Schülerinnen und Schülern ankommt, ist: Wichtig ist nicht das Verstehen, sondern das Nachsprechen.

### Herkunft

Der Begriff Teilchenmodell kommt wohl aus den Lehrplänen. Wie er dort hineingekommen ist, kann ich nicht

## Das Teilchenmodell

sagen. Dass die Lehrbuchautoren etwas hilflos sind, ist kein Wunder. Sie müssen etwas darüber schreiben, wissen aber nicht was. Oder finden sie vielleicht, dass das Wort so hübsch klingt, so tiefssinnig-epistemologisch?

## Entsorgung

Wir Lehrer, Lehrplanmacher, Lehrbuchautoren (Männer und Frauen) sind schuld daran, dass die Physik das meist gehasste Unterrichtsfach ist. Was not tut ist Abrüstung. Die Entsorgung im konkreten Fall ist einfach: Lass die Bezeichnung Modell weg. Es ist sowieso angebracht, dass die Schüler erstmal die Physik lernen. Wenn man in der Oberstufe Zeit übrig hat, kann man dann gern auch etwas Metaphysik machen.

# 6 ELEKTRODYNAMIK

## 6.1 Symmetrien in der Elektrodynamik

### Gegenstand

Die Elektrodynamik ist reich an inneren Strukturen, Symmetrien oder Analogien. Diese äußern sich in den Phänomenen und werden sichtbar in der theoretischen Beschreibung. Einige Beispiele:

- Coulomb hat seinen heute als Coulomb'sches Gesetz bezeichneten Zusammenhang entdeckt und nachgewiesen sowohl für elektrisch geladene Körper als auch für Magnetpole.
- Auf einen elektrisch geladenen bewegten Körper wirken zweierlei Kräfte, die oft als analog zueinander dargestellt werden: die eine ist proportional zur elektrischen Feldstärke  $\vec{E}$ , die andere, die Lorentzkraft, ist proportional zur magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$ .
- In der Elektrotechnik spielen Kondensator und Spule, und damit auch Kapazität  $C$  und Induktivität  $L$  analoge Rollen. Dies wird etwa beim elektrischen Schwingkreis deutlich.

### Mängel

Die Strukturen, um die es hier geht, bestehen darin, dass physikalische Größen sowie mathematische Beziehungen zwischen diesen Größen aufeinander abgebildet werden können. Wenn man in einer Gleichung die in ihr auftretenden Größen nach bestimmten, die Analogie charakterisierenden Übersetzungsregeln ersetzt, so erhält man eine neue Gleichung, die wieder korrekt ist.

Ein Problem, das manchmal nicht gesehen wird, ist, dass es innerhalb eines Teilbereichs der Physik mehrere konkurrierende Analogien oder Abbildungen gibt, die auf unterschiedlichen Zuordnungen der Größen beruhen. Ein Beispiel ist die Elektrodynamik. Die oben genannten Beispiele beruhen auf solchen konkurrierenden Analogien.

Wenn man sich der Tatsache nicht bewusst ist, dass es nicht nur *eine* Analogie gibt, wird man immer wieder in Konflikte geraten. Welches ist die zu  $\vec{E}$  analoge magnetische Größe,  $\vec{B}$  oder  $\vec{H}$ ? Manchmal scheint es die eine zu sein, manchmal die andere. Oft hat man sogar den Eindruck, es werden ideologische Standpunkte vertreten: Die „richtige“ oder „eigentliche“ magnetische Feldstärke sei  $\vec{B}$  (oder  $\vec{H}$ ); in manchen Schulbüchern wird die Flussdichte sogar kurzerhand umbenannt in magnetische Feldstärke.

Das Problem löst sich erst, wenn man sich vergegenwärtigt, dass es sich um verschiedene Abbildungen handelt, und dass man beide (oder in unserem Fall alle drei) kennt. Es kann dann nur noch um die Frage gehen, welche die dem Problem angemessene ist.

elektrische Vektorfeldgrößen	magnetische Vektorfeldgrößen
elektrische Feldstärke $\vec{E}$	magnetische Feldstärke $\vec{H}$
elektrische Flussdichte $\vec{D}$	magnetische Flussdichte $\vec{B}$
Polarisation $\vec{P}$	Magnetisierung $\vec{M}$
elektrische Ladung	magnetische Ladung
Gesamtladung $Q$	Gesamtladung $Q_m$
Ladungsdichte	Ladungsdichte
Gesamtladung $\rho$	Gesamtladung $\rho_m$
freie Ladung $\rho_f$	freie Ladung $\rho_{mf} = 0$
Polarisationsladung $\rho_p$	Polarisationsladung $\rho_{mp}$
Erste Maxwellgleichung	Zweite Maxwellgleichung
$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_f + \rho_p$	$\operatorname{div} \vec{B} = \rho_{mf} = 0$
$\operatorname{div} \vec{P} = -\rho_p$	$\operatorname{div} \vec{M} = -\rho_{mp}$
$\epsilon_0 \operatorname{div} \vec{E} = \rho_f + \rho_p$	$\mu_0 \operatorname{div} \vec{H} = \rho_{mf} + \rho_{mp} = \rho_m$
elektrische Stromdichte	magnetische Stromdichte
Leitungsstrom $\vec{j}_L$	Leitungsstrom $\vec{j}_{ml} = 0$
Verschiebungsstrom $\vec{j}_v = \dot{\vec{D}}$	Verschiebungsstrom $\vec{j}_{mv} = \dot{\vec{B}}$
Dritte Maxwellgleichung	Vierte Maxwellgleichung
$\operatorname{rot} \vec{E} = -\vec{j}_{ml} - \dot{\vec{B}} = -\dot{\vec{B}}$	$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}_L + \dot{\vec{D}}$
Kraftgesetze	Kraftgesetze
$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$	$\vec{F} = Q_m \cdot \vec{H}$
$ \vec{F}  = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$	$ \vec{F}  = \frac{1}{4\pi\rho_0} \frac{Q_{m1} \cdot Q_{m2}}{r^2}$

### Energiestromdichte

$$\vec{j}_E = \vec{E} \times \vec{H}$$

**Tab. 6.1** Analogie, bei der sich  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$  entsprechen. Die freie elektrische Ladung und der elektrische Leitungsstrom haben kein magnetisches Analogon.

## Symmetrien in der Elektrodynamik

Quellen des elektrischen Feldes	Quellen des magnetischen Feldes
elektrische Ladungsdichte $\rho$	elektrische Stromdichte $\vec{j}$
elektrische Vektorfeldgröße	magnetische Vektorfeldgröße
elektrische Feldstärke $\vec{E}$	magnetische Flussdichte $\vec{B}$
Potenzialgröße	Potenzialgröße
elektrisches Potenzial $\varphi$	magnetisches Vektorpotenzial $\vec{A}$
Ableitung des Potenzials	Ableitung des Potenzials
$\vec{E} = -\text{grad } \varphi$	$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$
Kraftgesetze	Kraftgesetze
$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$	$\vec{F} = I \cdot (\vec{s} \times \vec{B})$ (Lorentzkraft)
$ \vec{F}  = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$	$ \vec{F}  = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot \ell}{r}$ (zwei parallele Ströme)

Tab. 6.2 Analogie, bei der sich  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  entsprechen.

Die drei Analogien der Elektrodynamik seien mithilfe von drei Tabellen noch einmal in Erinnerung gebracht. Jede Tabelle enthält sowohl die sich entsprechenden Größen als auch einige sich entsprechende Gleichungen.

### 1. Die Analogie $\vec{E} - \vec{H}$

Sie offenbart sich in den Maxwellgleichungen, Tab. 6.1.

Sie ist besonders hilfreich bei der Behandlung der Magnetostatik, da das  $\vec{H}$ -Feld Quellen hat und sich damit ein  $\vec{H}$ -Feldlinienbild genau so leicht zeichnen lässt wie ein  $\vec{E}$ -Feldlinienbild in der Elektrostatik. Bekanntlich haben Studenten (und nicht nur die) Schwierigkeiten mit dem Zeichnen von magnetischen Feldlinienbildern [1].

### 2. Die Analogie $\vec{E} - \vec{B}$

Sie beruht auf der Darstellung der Elektrodynamik mit Vierervektoren. Hier entspricht die zeitartige Komponente eines Vierervektors den drei raumartigen Komponenten. So wie Zeit und Ort, oder Energie und Impuls, entsprechen sich elektrische Ladungsdichte und Stromdichte, elektrisches Potenzial  $\varphi$  und magnetisches Vektorpotenzial  $\vec{A}$ . Die räumliche Ableitung der Potenziale, also der Gradient von  $\varphi$  und die Rotation von  $\vec{A}$

## physikalische Größen

elektrische Ladung  $Q \Leftrightarrow$  magnetischer Fluss  $-\Phi$

elektrische Spannung  $U \Leftrightarrow$  elektrische Stromstärke  $I$

Kapazität  $C \Leftrightarrow$  Induktivität  $L$

elektrischer Widerstand  $R \Leftrightarrow$  elektrischer Leitwert  $G$

Energie  $E \Leftrightarrow$  Energie  $E$

Energiestrom  $P \Leftrightarrow$  Energiestrom  $P$

## Gleichungen

$$I = \frac{dQ}{dt} \Leftrightarrow U = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$P = U \cdot I \Leftrightarrow P = U \cdot I$$

$$Q = C \cdot U \Leftrightarrow \Phi = L \cdot I$$

$$E = \frac{C}{2} U^2 \Leftrightarrow F = \frac{L}{2} I^2$$

## Bauelemente

Kondensator  $\Leftrightarrow$  Spule

spannungsstabiles Netzgerät  $\Leftrightarrow$  stromstabiles Netzgerät

## topologische Regeln

Reihenschaltung  $\Leftrightarrow$  Parallelschaltung

Kurzschluss  $\Leftrightarrow$  Leerlauf

Tab. 6.3 Für die Elektrotechnik wichtige Analogie. Es entsprechen sich nicht nur physikalische Größen und Gleichungen, sondern auch technische Bauelemente und topologische Regeln.

ergeben die beiden Vektorgrößen  $\vec{E}$  bzw.  $\vec{B}$ , mit denen man die Kraftgesetze formuliert, Tab. 6.2

### 3. Die Analogie $U - I$

Sie ist besonders in der Elektrotechnik nützlich. Sie ist eine Variante der  $\vec{E} - \vec{H}$ -Analogie. Allerdings wird die Abbildung hier „über Kreuz“ gemacht: Es wird nicht die elektrische Ladung auf die magnetische Ladung abgebildet, sondern auf den magnetischen Fluss, Tab. 6.3.

Diese Analogie ist von anderer Art als die beiden zuvor beschriebenen: Hier wird ein Stromkreis auf einen anderen abgebildet, und es wird die Übersetzungstabelle gleichzeitig von links nach rechts und von rechts nach links angewendet. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einem *Dualismus*. Man ersetzt also etwa Spannung durch Stromstärke und Stromstärke durch

Spannung, Kondensator durch Spule und Spule durch Kondensator oder Parallelschaltung durch Reihenschaltung und Reihenschaltung durch Parallelschaltung etc.

Eigentlich würde dazugehören, dass man den elektrischen Fluss auf die magnetische Ladung abbildet. Die zugehörigen technischen Bauelemente wären der „magnetische Kondensator“ sowie eine Spule, durch deren „Leitungen“ ein „magnetischer Strom“ fließt. Da es keine freie magnetische Ladung und keine magnetischen Leistungsströme gibt (sondern nur gebundene Ladung und Verschiebungsströme), sind beide Bauteile eher uninteressant.

### Herkunft

Die Analogie  $\vec{E} - \vec{H}$  war aufgrund der klassischen Elektrodynamik in der Maxwell'schen Formulierung die nahe liegende. Mit der Relativitätstheorie und der Minkowski-Raumzeit kam die Viererbeschreibung in die Physik, und damit wurde die  $\vec{E} - \vec{B}$ -Analogie beliebt. Die dritte Analogie verdankt ihre Beliebtheit der Tatsache, dass sie in der Elektrotechnik besonders nützlich, und darüber hinaus die Grundlage für eine Analogie zwischen Elektrotechnik und Mechanik ist (wobei dem Kondensator die Feder, der Spule der träge Körper und dem Widerstand der Stokes'sche Reibungsdämpfer entspricht [2]).

Der Streit, ob  $\vec{H}$  oder  $\vec{B}$  geeigneter, richtiger oder wahrer ist, mag zwei Ursachen haben:

- Man kennt die eine der Analogien; die andere ist einem unbekannt oder suspekt.
- Man identifiziert das System Feld mit der Größe Feldstärke, d.h. man ignoriert die Tatsache, dass physikalische Größen menschliche Erfindungen oder Konstruktionen sind.

Selbst der große Sommerfeld schien der Meinung gewesen zu sein, dass es bei der Wahl der Darstellung um richtig oder falsch geht, und nicht einfach nur um zweckmäßig oder weniger zweckmäßig [3]: „Die Faraday-Maxwellsche Induktionsgleichung zeigt, dass zugleich mit der elektrischen Feldstärke  $\vec{E}$  die magnetische Induktion eine Intensitätsgröße ist;  $\vec{B}$ , nicht  $\vec{H}$  verdient den Namen magnetische Feldstärke. [...] Daß  $\vec{B}$  mit  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  mit  $\vec{D}$  zusammengehöre, erhellt unzweideutig aus der Relativitätstheorie, wo die Größen  $c\vec{B}$  und  $-i\vec{E}$  einerseits, die Größen  $\vec{H}$  und  $-i\vec{D}$  andererseits je zu einem Sechservektor (antisymmetrischen Tensor) verkoppelt werden.“

### Entsorgung

- Vor allem kein Dogmatismus; keine Behauptungen darüber, welche Größe die wirkliche Feldstärke sei.

- Den Studierenden klar machen, dass es in der Elektrodynamik verschiedene Analogien gibt.

[1] F. Herrmann, *Das Feld von Dauermagneten*, Altlasten der Physik

[2] F. Herrmann, *Die Induktivität*, Altlasten der Physik

[3] A. Sommerfeld, *Elektrodynamik*, 4. Auflage, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig, 1964, Vorwort, S. VI

## 6.2 Elektronenüberschuss – Elektronenmangel

### Gegenstand

Die Anschlüsse von Netzgeräten und Batterien werden mit „plus“ und „minus“ gekennzeichnet. Im Zusammenhang mit der Diskussion des elektrischen Stromkreises, besonders in Schulbüchern, wird oft betont, am Pluspol herrsche Elektronenmangel, am Minuspol Elektronenüberschuss.

### Mängel

Wir haben es hier mit zwei Unstimmigkeiten zu tun, die aber miteinander zusammenhängen. Wir wollen zeigen, dass

- es ungeschickt ist, die Anschlüsse einer elektrischen Energiequelle durch „plus“ bzw. „minus“ zu kennzeichnen;
- meist unangebracht, oft aber auch falsch ist, von Elektronenüberschuss oder -mangel zu sprechen.

Das Plus- und Minuszeichen suggeriert, irgendeine physikalische Größe habe an den Anschläßen einer Batterie einen positiven bzw. negativen Wert. Gibt es eine solche Größe?

Man könnte zunächst an die elektrische Ladung denken. Wie groß ist die Ladung, die auf den Anschläßen einer Batterie einschließlich der entsprechenden Elektrode sitzt? Ihr Wert hängt ab zum einen von der Kapazität  $C_B$  der Batterie selbst. Man betrachtet also die Batterie als einen Kondensator. Die Ladung auf den beiden Polen (einschließlich den Leitern im Innern der Batterie) ist dann

$$Q = C_B \cdot U_B \quad (6.1)$$

$U_B$  ist hier die Spannung der Batterie.  $Q$  wäre die gesamte Ladung der Pole, wenn sich die „Mitte“ der Batterie gerade auf Erdpotenzial befände: Der Pluspol müsste um  $U_B/2$  über, der Minuspol um  $U_B/2$  unter dem Erd-

## **Elektronenüberschuss – Elektronenmangel**

potenzial liegen. Dies ist natürlich ein Sonderfall, der fast nie realisiert ist. Im Allgemeinen befindet sich die Batterie als Ganzes auf einem anderen Potenzial, so dass sie noch eine Nettoladung trägt, deren Gegenladung auf der Erde sitzt. Diese Nettoladung berechnet sich nach

$$Q = C_{\text{plus}} \cdot U_{\text{plus}} + C_{\text{minus}} \cdot U_{\text{minus}},$$

wo  $C_{\text{plus}}$  und  $C_{\text{minus}}$  die Kapazität des Pluspuls bzw. Minuspols der Batterie gegen Erde sind und  $U_{\text{plus}}$  und  $U_{\text{minus}}$  die Spannungen zwischen Plus- bzw. Minuspol und Erde. Die Kapazitäten  $C_{\text{plus}}$  und  $C_{\text{minus}}$  sind im Allgemeinen von derselben Größenordnung wie  $C_B$ .  $U_{\text{plus}}$  und  $U_{\text{minus}}$  hängen davon ab, in was für einen Stromkreis die Batterie eingebaut ist, ob der Stromkreis irgendwo geerdet ist oder ob der Stromkreis als Ganzes elektrostatisch geladen ist. Jedenfalls kann man im Allgemeinen nicht sagen, der Pluspol sei positiv, der Minuspol negativ geladen.

Unsere Überlegung zeigt außerdem, dass ein anderer Kandidat, auf den sich das Plus- und das Minuszeichen beziehen könnte, auch ausfällt: das elektrische Potenzial. Der Pluspol muss sich nicht auf positivem und der Minuspol nicht auf negativem elektrischen Potenzial befinden. Und es gibt auch keine andere Größe, die am Pluspol einen positiven Wert und am Minuspol einen negativen annimmt.

Die Bezeichnungen Plus und Minus geben also sicher Anlass zu falschen Schlüssen.

Auch die Behauptung, am Pluspol herrsche Elektronenmangel, am Minuspol Elektronenüberschuss trifft im Allgemeinen nicht zu. Der Lernende wird ja die Aussage, am Pluspol herrsche Elektronenmangel, so verstehen, dass der Pluspol nicht elektrisch neutral, sondern positiv geladen ist. Wir haben gerade gezeigt, dass das nicht der Fall zu sein braucht.

Selbst wenn wir es aber so einrichten, dass sich der Pluspol auf positivem und der Minuspol auf negativem Potenzial befindet (der Potenzialnullpunkt ist das Erdpotenzial), sodass in der Tat der Pluspol positiv und der Minuspol negativ geladen ist, so wäre es doch sehr ungeschickt, diese Tatsache heranzuziehen, um die Pole zu charakterisieren.

Die Kapazität  $C_B$  in Gleichung (6.1) ist von der Größenordnung  $10^{-10}$  F. Da die Spannung von der Größenordnung 1 Volt ist, ergibt sich für die elektrische Ladung eine Größenordnung von  $10^{-10}$  C. Wenn man von Elektronenüberschuss und -mangel spricht, so suggeriert man aber, dass dieser Überschuss bzw. Mangel mit der Ladung zu tun hat, die bei geschlossenem Stromkreis durch die Batterie fließt. Die Ladungen, die man dabei

betrachtet, sind aber um viele Größenordnungen größer. Die Ladung, die durch die Batterie in einer Sekunde hindurchfließt, wenn etwa ein Glühlämpchen angeschlossen ist, ist um 10 Größenordnungen größer.

Wie unangebracht es ist, von Elektronenmangel und -überschuss zu sprechen, sieht man auch, wenn man die Batterie im elektrischen Stromkreis mit einer Wasserpumpe in einem Wasserstromkreis vergleicht. Einer Batterie, an die nichts angeschlossen ist, entspricht dann eine Pumpe, die zwar läuft und die auch mit Wasser gefüllt ist, deren Eingang und Ausgang aber zugeflanscht sind. So wie man bei der Batterie von Elektronenüberschuss und -mangel an den beiden Polen spricht, müsste man bei der Pumpe von Wasserüberschuss und Wassermangel an den beiden zugeflanschten Anschlüssen sprechen. In der Tat wäre das bei der Pumpe, aufgrund der Kompressibilität des Wassers, noch eher gerechtfertigt. Nun hat aber dieser Wasserüberschuss bzw. -mangel nichts mit der Funktion der Pumpe zu tun. Die Pumpe würde genauso gut arbeiten, wenn das Wasser ganz inkompressibel wäre. Und so ist es auch bei der Batterie. Es würde sich nichts Wesentliches an der Batterie ändern, wenn die Kapazität nicht  $10^{-10}$  F, sondern 0 F betrüge. Mangel und Überschuss wären dann exakt null, die Batterie würde aber immer noch arbeiten.

### **Herkunft**

Die meisten der von uns in den Altlasten beanstandeten Aussagen hatten früher einmal ihre Berechtigung. Hier haben wir ein Beispiel für eine Unstimmigkeit, die wohl von Anfang an existiert hat. Es ist irgendwann eine ungeschickte Festlegung getroffen worden („Pluspol“ und „Minuspol“), und es ist irgendwann ein zwar einleuchtender, aber nicht korrekter Lehrsatz formuliert worden („Am Pluspol herrscht Elektronenmangel, am Minuspol Elektronenüberschuss“), und beide Fehlentscheidungen sind von Generation zu Generation weitergegeben worden.

### **Entsorgung**

Statt mit Plus und Minus bezeichnet man die Anschlüsse von Batterien und Netzgeräten mit „Hoch“ und „Niedrig“. Die Aussage bezieht sich auf das Potenzial der Quelle bei offenen Klemmen. In der Digitalelektronik ist diese Bezeichnungsweise auch anzutreffen (als H für high und L für low). Alternativ könnte man auch eine Aussage über die kurzgeschlossene Quelle machen. Dann wären die Bezeichnungen Eingang und Ausgang für die (positive) elektrische Ladung angebracht.

Die Aussage über Elektronenmangel und -überschuss sollte man vermeiden.

## 6.3 Zwei Arten elektrischer Ladung

### Gegenstand

Es gibt zwei Arten elektrischer Ladung. Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

### Mängel

Die Sprechweise legt nahe, es handele sich bei den beiden Ladungsarten um zwei verschiedene physikalische Größen. Nennen wir sie einmal  $Q_A$  und  $Q_B$ . Tatsächlich kann man den elektrischen Ladungszustand eines Körpers beschreiben, indem man angibt, wie viel er von der Größe  $Q_A$  und von der Größe  $Q_B$  enthält. Nun haben aber die Größen  $Q_A$  und  $Q_B$  eine unerwünschte Eigenschaft: Für sie gelten keine Erhaltungssätze. Allerdings sind Erzeugung und Vernichtung von  $Q_A$  und  $Q_B$  aneinandergekoppelt: Wenn  $Q_A$  erzeugt wird, muss gleichzeitig dieselbe Menge  $Q_B$  erzeugt werden. Es ist mathematisch und begrifflich viel einfacher, eine einzige Größe „elektrische Ladung“ einzuführen, die, wie viele andere Größen auch, positive und negative Werte annehmen kann. Für diese Größe gilt natürlich ein Erhaltungssatz.

Noch verfahrener ist die Situation bei Magnetpolen. Während bei der Elektrizität wenigstens im Namen („positiv“ und „negativ“) die mathematische Beziehung zwischen den beiden „Arten“ noch zum Ausdruck kommt, lassen die Namen „Nord“ und „Süd“ bei der Bezeichnung der Magnetpole von dem einfachen Sachverhalt, dass die Stärke eines Magnetpols durch eine einzige extensive Größe beschrieben werden kann, kaum noch etwas ahnen. Die Bezeichnungen täuschen vor, dass die Pole eines Magneten unterschiedliche Qualitäten haben, ähnlich etwa den Qualitäten „männlich“ und „weiblich“ für Mensch und Tier.

### Herkunft

Bei den ersten Beschreibungsversuchen elektrostatischer Erscheinungen ging es um die Frage, ob es zwei verschiedene oder nur ein einziges elektrisches „Fluidum“ gebe. Die entsprechende Frage stellte sich auch beim Magnetismus. Die Zweifluidumstheorie hat sich in der Sprache der Physik bis heute erhalten.

### Entsorgung

Man vermeidet es, von zwei Arten elektrischer Ladung zu sprechen. Es gibt eine einzige Größe elektrische Ladung, die sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann. Die beiden Pole eines Magneten werden der positive und der negative Magnetpol genannt. Statt

von gleichnamigen und ungleichnamigen Ladungen (Magnetpolen) spricht man von Ladungen (Magnetpolen) gleichen bzw. entgegengesetzten Vorzeichens.

## 6.4 Der Strom und sein Artikel

### Gegenstand

Die folgenden Formulierungen, in denen das Wort „Strom“ ohne Artikel benutzt wird, sind Physiklehrbüchern entnommen: „Strom ist fließende Ladung.“, „Ist der Schalter geschlossen, so fließt elektrischer Strom, ... die Lampe leuchtet.“, „Keine Versuche mit Strom aus der Steckdose!“, „Für Versuche mit elektrischem Strom musst du einige Hinweise beachten.“, „Stromfluss ist Bewegung von elektrischen Ladungen.“ In einer kürzlich erschienenen Nummer der Physikalischen Blätter habe ich den folgenden Satz gefunden: „Auf- und Entladung des Plasmas beruht auf Gleichstromfluss.“

### Mängel

Die meisten Lehrer kennen die Probleme, die im Zusammenhang mit der Behandlung elektrischer Stromkreise auftreten: Verwechslung von elektrischer Stromstärke und elektrischer Spannung, Verwechslung von Energiestrom und elektrischem Strom, Verwechslung der entsprechenden Maßeinheiten. Von berufener Seite hört man Klagen darüber, dass die umgangssprachliche Benutzung des Wortes „Strom“ eine andere sei als die der Fachphysik. Hierzu zwei Bemerkungen:

- In der Tat wird das Wort Strom, sofern es im Zusammenhang mit elektrischen Erscheinungen benutzt wird, umgangssprachlich fast immer für das verwendet, was die Physik elektrische Energie nennt. So sprechen die Unternehmen, die uns mit elektrischer Energie versorgen, von Stromversorgung, Stromerzeugung usw. Man beachte, dass das Wort „Strom“ nicht synonym für Energiestrom benutzt wird, sondern für das, was wir in kWh messen, also die Energiemenge. Man mag diese Diskrepanz zwischen Umgangs- und Fachsprache bedauern. Der Versuch, eine Änderung im Gebrauch des Wortes in der Umgangssprache durchzusetzen, der nach Meinung der Fachphysik zweckmäßiger ist, wäre aber sicher völlig aussichtslos. Andererseits ist es aus verschiedenen Gründen der Fachphysik nicht zuzumuten, den umgangssprachlichen Gebrauch des Wortes zu übernehmen.
- Wie wird das Wort in der Physik verwendet? Wenn man in Hochschulbüchern oder Fachlexika nachschaut, wird man sehen, dass etwa der folgende Kon-

## Die konventionelle Stromrichtung

sens besteht: Der elektrische Strom ist fließende elektrische Ladung. Ein Maß dafür, wie viel elektrische Ladung pro Zeiteinheit durch eine vorgegebene Fläche fließt, ist die elektrische Stromstärke.

Der elektrische Strom ist also eine Erscheinung, ähnlich wie ein Wasserstrom, ein Menschenstrom oder ein Geldstrom. Auch in der Fachliteratur sind aber durchaus noch andere Definitionen anzutreffen<sup>1</sup>. Diese Abweichungen vom allgemeinen Konsens sind aber nicht Gegenstand unserer Betrachtung.

Ich habe nun auch in einigen Mittelstufenbüchern nachgeschaut, wie das Wort erklärt und wie es benutzt wird und die oben zitierten Sätze gefunden. Möglicherweise ist dem Leser an diesen Formulierungen nichts Beanstandenswertes aufgefallen. Werfen wir jedoch einen Blick in den Duden [1]: „*Stoffbezeichnungen werden ohne Artikel gebraucht, wenn ganz allgemein die jeweilige Art oder eine unbestimmte Menge des Stoffes gemeint ist: Er trinkt nur Wein. ... Gold schmilzt bei 1063 °C. ... Ich brauche Geld.*“

Wenn wir wollen, dass man sich unter einem Strom einen Vorgang vorstellt, und nicht eine Menge von irgendetwas, so muss man seine Aussagen so formulieren, wie man es beim Umgang mit einem Wasserstrom, einem Menschenstrom oder einem Geldstrom tut. Hier wird das Wort stets mit Artikel verwendet. Lässt man, wie in den oben zitierten Sätzen, den Artikel weg, so ist das eine klare, wenn auch nicht beabsichtigte Aussage: Das, wovon ich spreche, ist eine Art Stoff, ein Zeug, eben wie Wein, Gold oder Geld. Besonders interessant erscheint unter diesem Gesichtspunkt die Wortschöpfung „Stromfluss“. Der Strom allein strömt offenbar noch nicht, denn er hat auch hier Mengencharakter (wie das Wasser in dem Wort „Wasserfluss“). So bringt

<sup>1</sup> Zum einen fällt auf, dass oft nicht von fließender Ladung, sondern fließenden Ladungen – im Plural – gesprochen wird. Es wird also eine Portionierung der Größe  $Q$  als für die Erklärung notwendig erachtet. Eine andere Abweichung von unserer Konsensdefinition stellen die Texte dar, in denen zwischen dem Phänomen „Strom“ und der physikalischen Größe Stromstärke nicht unterschieden wird. Die schönste Stilblüte dieser Art habe ich im Berkeley Kurs gefunden, wo zwei aufeinanderfolgende Sätze miteinander in Konflikt geraten: „*Elektrische Ströme werden durch die Bewegung von Ladungsträgern verursacht. [Hier ist der Strom eine Erscheinung.] Der elektrische Strom in einem Draht ist ein Maß für die Menge der elektrischen Ladung, die an irgendeinem Punkt des Drahtes pro Zeiteinheit vorbeikommt. [Hier ist „Strom“ der Name einer Variable.]*“

man ihn eben durch den hinzugefügten Fluss zum Strömen. Vielleicht könnte man es auch mal mit einem „Flussstrom“ versuchen?

### Herkunft

Wohl einfach ein etwas sorgloser Umgang mit den Wörtern und ihrer Bedeutung durch Experten, die aus dem Kontext heraus durchaus immer das Richtige verstehen (und deren Anliegen wohl weder die Sprachpflege noch die Verbesserung des Physikunterrichts ist).

### Entsorgung

- Man erkläre den Schülern ausdrücklich, dass das Wort „Strom“ in der Umgangssprache die Bezeichnung für elektrische Energie ist.
- Man verwende das Wort „Strom“ im Physikunterricht als Bezeichnung für einen Vorgang, und daher mit Artikel. Man mag sich vielleicht auch noch dadurch dem Fachjargon anpassen, dass man das Wort als Kurzform für „elektrische Stromstärke“ benutzt, aber nur, wenn man den Schülern deutlich sagt, dass das Wort jetzt auch im Physikunterricht in zwei verschiedenen Bedeutungen benutzt wird – ähnlich übrigens wie bei dem Wort „elektrischer Widerstand“, welches sowohl ein elektrisches Bauelement bezeichnet, als auch die physikalische Größe  $R$ .
- Wenn man davon spricht, dass etwas fließt oder strömt, so muss man es auch benennen, und zwar von Anfang an, also die elektrische Ladung oder Elektrizität. Dabei ist es nicht notwendig, dass für die Ladung schon ein Messverfahren eingeführt wird.

[1] Duden, Band 4, *Grammatik*, Bibliografisches Institut Mannheim, 1973, S. 169

## 6.5 Die konventionelle Stromrichtung

### Gegenstand

Die Richtung des elektrischen Stroms beruht auf einer Konvention. Bevor man etwas von Elektronen wusste, hatte man festgelegt, dass der elektrische Strom vom Pluspol einer Stromquelle durch den äußeren Teil des Stromkreises zum Minuspol fließt.

### Mängel

Wenn man nach der Richtung des elektrischen Stroms fragt, so fragt man nach der Orientierung eines Vektors. Der Vektor, der die elektrische Stromrichtung charakterisiert, ist der elektrische Stromdichtevektor, – genauso

wie der Energiestromdichtevektor die Stromrichtung der Energie und der Massenstromdichtevektor die Richtung des Massenstroms festlegt.

Die Richtung des elektrischen Stromdichtevektors beruht nun aber nicht auf einer Konvention, sondern folgt aus der Kontinuitätsgleichung für die elektrische Ladung, die die elektrische Ladungsdichte  $\rho$  mit der elektrischen Stromdichte  $\vec{j}$  verknüpft:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j} = 0$$

Die Gleichung besagt, dass die Ladungsdichte  $\rho$  an einer Stelle abnimmt, wenn dort die Divergenz der Stromdichte  $\vec{j}$  positiv ist. In anderen Worten: Die elektrische Ladung in einem Raumgebiet nimmt ab, wenn aus dem Gebiet ein elektrischer Strom herausfließt. Man sieht, dass die Orientierung des Stromdichtevektors  $\vec{j}$  festliegt, sobald man über das Vorzeichen der elektrischen Ladung (und damit der Ladungsdichte  $\rho$ ) verfügt hat. Man kann also die Stromrichtung tatsächlich umdefinieren, allerdings nur, indem man das Vorzeichen der elektrischen Ladung umdefiniert. Das ist aber mit den oben zitierten Aussagen nicht gemeint.

### Herkunft

Die „Stromrichtung“, von der behauptet wird, sie beruhe auf einer Konvention, ist nicht die Richtung des Stromdichtevektors  $\vec{j}$ , sondern die mittlere Bewegungsrichtung der Ladungsträger, d.h. die Richtung des Driftgeschwindigkeitsvektors  $\vec{v}$  der Ladungsträger. Die beiden Vektorgrößen hängen zusammen über die Beziehung

$$\vec{j} = \rho \cdot \vec{v}.$$

Hier ist  $\rho$  die Ladungsdichte der „freien Ladungsträger“. Aus der Gleichung folgt, dass es einerlei ist, ob sich positive Ladungsträger ( $\rho > 0$ ) nach rechts oder negative Ladungsträger ( $\rho < 0$ ) nach links bewegen: Die Richtung von  $\vec{j}$  ist beide Male nach rechts. Die Richtung von  $\vec{v}$  fällt nun auch zusammen mit der Massenstromdichte und der Stoffmengenstromdichte der Ladungsträger. Man kann den Fehler, der gemacht wird, daher auch so charakterisieren: Der Ladungsstrom wird mit dem Massen- oder Stoffstrom verwechselt.

### Entsorgung

Man unterscheide sorgfältig zwischen Ladung und Ladungsträgern. Man unterscheide also zwischen zwei „Bewegungs“-Richtungen: der der elektrischen Ladung und der der Ladungsträger. Während die elektrische Ladung außerhalb der elektrischen Energiequelle vom ho-

hen zum niedrigen Potenzial fließt, bewegen sich die Ladungsträger in die eine oder andere Richtung, je nach dem Vorzeichen ihrer Ladung.

Um diese Unterscheidung klarzumachen, mache ich im Unterricht gern das folgende „Experiment“: Ich lasse rote und blaue Spielmarken durch eine Bankreihe hindurchreichen. Wir stellen uns vor, jede rote Marke sei 10 € wert, jede blaue -10 €. Jeder Schüler, mit Ausnahme der beiden an den Enden, besitzt immer gerade eine rote und eine blaue Marke, d.h., er hat den Geldwert null. Wir realisieren nun Geldwertströme vom Schüler am linken Ende der Kette zu dem am rechten Ende. Der erste Geldwerttransport läuft so: Ich lasse ein Metronom schlagen, und auf jeden Schlag gibt jeder der Schüler seine rote Marke an den rechten Nachbarn weiter. Jeder Schüler in der Kette bleibt so bei seinem Geldwert null, nur der am linken Ende wird immer ärmer und der am rechten reicher. Als Nächstes realisieren wir einen Geldwerttransport von links nach rechts auf die folgende Art: Auf jeden Metronomschlag gibt jeder Schüler eine blaue Marke weiter an seinen linken Nachbarn. Wieder bleibt bei jedem Schüler – außer bei denen an den beiden Enden – der Geldwert null, und wieder wird der linke ärmer und der rechte reicher. Eine dritte Methode besteht darin, dass man auf jeden Metronomschlag sowohl eine rote Marke nach rechts als eine blaue nach links weiterreicht. In jedem der drei Fälle fließt Geldwert von links nach rechts, die Geldwertträger aber können sich nach rechts oder nach links bewegen.

## 6.6 Die elektrische Kapazität

### Gegenstand

Die elektrische Kapazität ist definiert als Quotient aus Ladung  $Q$  und Spannung  $U$ :

$$C := Q/U.$$

### Mängel

Das deutsche Wort Kapazität kommt vom Lateinischen *capacitas*. In der Umgangssprache hat es seine ursprüngliche Bedeutung – Fassungsvermögen – im Wesentlichen beibehalten. Auch in den romanischen Sprachen und im Englischen wird es in diesem Sinn gebraucht. Bei der Einführung der physikalischen Größe „elektrische Kapazität“ wird in manchen Physiktexten auf diese Bedeutung ausdrücklich hingewiesen. Wenn man sich aber an der Bedeutung des Wortes Kapazität orientiert, versteht man die Größe  $C$  falsch.

## Magnetpole

Das Fassungsvermögen eines Systems für irgendeine Menge misst man nämlich in derselben Einheit wie diese Menge selbst: das eines Lastwagens in Tonnen, der Einheit für die Last; das eines Datenspeichers in Bit, der Einheit für die Menge der gespeicherten Daten; das einer Flasche in Liter, der Einheit für den Rauminhalt einer Flüssigkeit; das einer Batterie in Joule, der Einheit für die gespeicherte Energie; das eines Aufzugs in Personen oder Stück. Durch die Bezeichnung Kapazität wird uns nahe gelegt, die Größe  $C$  messe das Fassungsvermögen eines Kondensators für die elektrische Ladung. Träfe das zu, so müsste  $C$  in Coulomb gemessen werden.

Tatsächlich sagt aber die Größe  $C$  gar nichts über das Fassungsvermögen. Sie sagt vielmehr, wie leicht es ist, einen Kondensator zu laden. Ein echtes Fassungsvermögen  $Q_{\max}$  eines Kondensators für elektrische Ladung lässt sich berechnen aus  $C$  und der maximalen Spannung  $U_{\max}$ , die der Kondensator verträgt.

$$Q_{\max} = C \cdot U_{\max}.$$

Außer der Kapazität wird bei einem Kondensator  $U_{\max}$  auch stets angegeben.

Man mag sich fragen, ob ein unpassender Name überhaupt nennenswerte Lernschwierigkeiten verursachen kann. Sicher tut er das nicht immer. Wenn die Bedeutung des Namens gar nicht mehr bewusst ist, so stört der unpassende Name das Lernen natürlich nicht, ein passender fördert es dann allerdings auch nicht. Das mag der Fall sein etwa bei der „Permeabilität“ (der Name trifft die Bedeutung der Größe  $\mu$  schlecht, da er eher den Kehrwert charakterisiert), der „Permittivität“ (der Name ist so blass, dass er fast nichts über  $\epsilon$  aussagt) oder der „Suszeptibilität“ (der Name trifft die Bedeutung von  $\chi$  sehr gut). Je besser verständlich, je suggestiver ein Name ist, desto mehr muss man aber damit rechnen, dass er den Lernprozess beeinflusst.

## Herkunft

Wir haben die erste Benutzung des Namens Kapazität nicht gefunden. Auf jeden Fall wurde er aber schon von Maxwell in der Bedeutung benutzt, die er noch heute in der Physik hat.

## Entsorgung

Es wäre unrealistisch, einen Vorschlag für einen anderen Namen zu machen. Wir betonen daher im Unterricht, dass  $C$  kein Fassungsvermögen ist, sondern dass uns der Wert dieser Größe sagt, wie leicht es ist, einen Kondensator zu laden.

## 6.7 Magnetpole

### Gegenstand

Als Pole eines Magneten werden die Stellen bezeichnet, an denen die Anziehung am stärksten ist, oder an denen die meisten Eisenspäne oder Nägel hängen bleiben. Die Pole werden durch rote bzw. grüne Färbung gekennzeichnet.

### Mängel

Die Magnetisierung ist ein Vektorfeld, das die magnetische Dipoldichte beschreibt. Die Pole eines Magneten sind die Stellen, an denen die Feldlinien der Magnetisierung beginnen oder enden. Die Größe, mit der man magnetische Pole quantitativ beschreiben kann, ist die magnetische Polstärke oder magnetische Ladung  $Q_m$  [1]. Sie ist das magnetische Analogon der elektrischen Ladung, genauer: der gebundenen elektrischen Ladung, wie sie an der Oberfläche eines polarisierten Dielektrikums auftritt. Nun wird aber die magnetische Ladung in den meisten Lehrbüchern gar nicht eingeführt. Ohne sie ist es aber sehr schwer, Dauermagneten quantitativ zu beschreiben.

Die der elektrostatischen Beziehung

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$$

entsprechende Gleichung

$$\vec{F} = Q_m \cdot \vec{H}$$

kann ebenso wenig formuliert werden wie das Coulomb'sche Gesetz für Magnetpole. Von der einfachen und quantitativen Bilanzaussage, derzufolge die gesamte magnetische Ladung eines jeden Körpers gleich null ist [2], bleibt nur die blasse Feststellung, jeder Magnet habe zweierlei Arten von Polen.

Bei einem normalen Stabmagneten enden die Magnetisierungslinien an den Stirnflächen. Das heißt, dass hier die magnetische Ladung sitzt. Die Pole sind also die Stirnflächen des Magneten. Diese sind nun aber nicht identisch mit den Stellen, an denen Weicheisenspäne hängen bleiben. Die Späne hängen nämlich an denjenigen Stellen eines Dauermagneten, an denen die magnetische Feldstärke einen großen Wert hat. Im Feldlinienbild bedeutet das: Wo die Feldlinien am dichtesten sind, hängen die meisten Späne. Nun treten aber Feldlinien nicht nur an den Polen aus, sondern auch an allen anderen Stellen des Magneten, beim Stabmagneten auch an der Seite [3, 4]. Die Weicheisenspäne sind also kein Indikator für Pole, sondern für eine hohe Feldstärke. Die Verwechslung der Orte hoher Feldstärke mit den Mag-

netpolen wird durch die rot – grüne Färbung der Magneten noch gestützt.

### Herkunft

Die magnetische Ladung oder magnetische Polstärke war früher in jedem Lehrbuch der Elektrodynamik zu finden. Dass sie später aus vielen Büchern verschwand, hat seine Ursache vermutlich in einem Missverständnis. Aus der Tatsache, dass man keine isolierten magnetischen Monopole gefunden hat, wurde geschlossen, dass man eine Größe, mit der man solche Monopole beschreiben würde, nicht benutzen darf. Nun sind aber physikalische Größen nicht etwas, was man in der Natur vorfindet, sondern Konstruktionen des Menschen. Ob man eine neue Größe einführt oder nicht, ist nur eine Frage der Zweckmäßigkeit. Dass die Einführung der magnetischen Ladung zweckmäßig ist, sieht man zum Beispiel daran, dass man ohne sie das Coulomb'sche Gesetz des Magnetismus nicht formulieren kann.

Dass das Coulomb'sche Gesetz für elektrische Ladungen im Physikkanon eine so große Rolle spielt und das entsprechende magnetische Gesetz fast gar keine, zeigt, dass Lehrinhalte manchmal eher durch Konvention als durch Sachzwänge entstehen.

### Entsorgung

Man führt die extensive Größe magnetische Ladung ein. Man formuliert den Lehrsatz: „Die Gesamtladung jedes Magneten ist gleich null.“ Die Gültigkeit des Satzes zeigt man in Experimenten, z. B. so: Ein kleiner Stabmagnet wird mit Korkstückchen versehen, sodass er im Wasser schwimmen kann. Er dreht sich in Nord-Süd-Richtung, ohne eine Translationsbewegung auszuführen. (Dieser Versuch wurde schon von Maxwell vorgeschlagen [2].)

Dass beim Durchbrechen eines Magneten neue Pole mit entgegengesetzt gleicher magnetischer Ladung entstehen, ist eine einfache Konsequenz dieses Lehrsatzes.

Man zeigt, dass die Pole von Hufeisenmagneten die Stirnflächen sind, indem man zwei gleiche Magneten so aufeinandersetzt, dass sich die Pole kompensieren: Das zusammengesetzte Gebilde zieht keine größeren Eisenstücke mehr an. (Man braucht dazu zwei völlig gleiche Magneten. Schon der normale Unterrichtsbetrieb führt dazu, dass sich die Magnetisierung mit der Zeit ändert. Ich bewahre deshalb zwei Magneten speziell für diesen Versuch auf, und benutze sie nicht für andere Versuche, die die Magnetisierung ändern könnten.)

Man beachte, dass es u-förmige Schulmagneten gibt, die aus drei verschiedenen Teilen bestehen: aus einem

dicken Stabmagneten und zwei Schenkeln aus Weicheisen. Weicheisen ist leicht magnetisierbar: Das Magnetisierungsfeld, und damit auch die Lage der Pole ändert sich unter dem Einfluss eines äußeren Feldes. Bei diesen Weicheisensteilen ist die rot-grüne Kennzeichnung also besonders unpassend, da sich am grünen Schenkel leicht ein Nordpol, und am roten ein Südpol erzeugen lässt.

- [1] W. Macke, *Elektromagnetische Felder*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1960, S. 77
- [2] J. C. Maxwell, *Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus*, Zweiter Band, Verlag von Julius Springer, Berlin 1883, S. 7: „In jedem Magnete ist die Gesamtmenge an Magnetismus algebraisch genommen gleich Null.“
- [3] A. Sommerfeld, *Vorlesungen über Theoretische Physik*, Band III, Elektrodynamik, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1964, S. 78
- [4] F. Herrmann, *Magnetische Eigenschaften von Materialien im Unterricht*, Praxis der Naturwissenschaften 8, 1995, S. 17

## 6.8 Die Hysteresiskurve

### Gegenstand

Unter der Überschrift „Materie im Magnetfeld“ werden die Erscheinungen Dia-, Para- und Ferromagnetismus vorgestellt. Für ferromagnetische Stoffe ist das Auftreten eines Hystereseffektes charakteristisch. Es wird unter anderem der Begriff Restmagnetismus eingeführt.

### Mängel

Nicht nur Schüler, sondern auch Physikstudenten und Physiklehrer sind im Umgang mit den Erscheinungen der Magnetostatik viel weniger sicher als im Umgang mit Phänomenen der Elektrostatik, und das, obwohl die bei Magneten auftretenden Kräfte viel größer und dem Experiment leichter zugänglich sind als elektrostatische Kräfte. Hieran hat unter anderem die Tatsache Schuld, dass man den Ferromagnetismus stets im Zusammenhang mit der Hysteresiskurve vorstellt. Es entsteht beim Lernenden der Eindruck, das Verhalten von Magneten werde durch die komplizierte Hysteresiskurve bestimmt.

Tatsächlich kann man die Hysterese auch auffassen als Ausdruck der Unvollkommenheit magnetischer Materialien. Unter magnetisch perfekten Materialien wollen wir die ideal weichmagnetischen und die ideal hartmagnetischen Stoffe verstehen. Für ideal weichma-

## Monopol und magnetische Ladung

gnetische Stoffe gilt, dass sie kein Magnetfeld in sich eindringen lassen. In ihrem Innern ist  $|\vec{H}| = 0$  A/m. Sie stellen damit das Analogon zu Metallen hinsichtlich der elektrischen Eigenschaften dar: Metalle dulden in ihrem Innern keine elektrischen Felder, es ist  $|\vec{E}| = 0$  V/m. Ideal hartmagnetische Materialien haben die Eigenschaft, dass sie eine bestimmte Magnetisierung haben, und dass sich diese Magnetisierung durch ein von außen angelegtes Feld nicht ändern lässt, es ist  $|\vec{M}| = \text{const.}$  Genau diese Eigenschaft soll ja ein Dauermagnet haben. Ein Dauermagnet, dessen Magnetisierung sich von außen leicht ändern lässt, wäre ein schlechter Dauermagnet. Tatsächlich lassen sich seit einiger Zeit beide Typen von perfekten Materialien in guter Näherung realisieren. Die Hysteresis bringt zum Ausdruck, dass man mit hinreichend starken Feldern einen Dauermagneten eben doch kaputt machen kann, bzw. dass das Weicheisen eines Transformatoren bei zu starker Belastung doch in die Sättigung gerät. Unter normalen Bedingungen werden aber diese Erscheinungen keine große Rolle spielen. Mit der Hysterese zu beginnen bedeutet also, mit komplizierten, für viele technischen Anwendungen unvollkommenen Materialien zu beginnen. Es ist so, als würde man das Studium der Feder damit beginnen, dass man sie überdehnt. Auch hier tritt ja ein Hystereseffekt auf.

### Herkunft

Noch vor wenigen Jahrzehnten war eine Behandlung ferromagnetischer Erscheinungen, die mit der Hysterese beginnt, durchaus angemessen. Die Materialien, die man herzustellen in der Lage war, waren von dem idealen Hart- oder Weichmagneten noch weit entfernt. Dauermagneten ließen sich leicht ummagnetisieren. Bei ungeeigneter Geometrie haben sie nicht einmal ihrem eigenen Feld standgehalten. Es war den Verhältnissen angemessen, die geringe Magnetisierung, die zurückblieb, wenn man das äußere Feld abschaltete, als remanente oder Restmagnetisierung zu bezeichnen.

### Entsorgung

Man beginnt die Diskussion des Magnetismus der Materie mit der Einführung des idealen hartmagnetischen und des idealen weichmagnetischen Materials. Für hartmagnetische Stoffe ist  $M = \text{const}$  und für weichmagnetische  $H = 0$  A/m. Die konstante Magnetisierung eines Dauermagneten nennt man nicht diskriminierend Restmagnetismus. Die Hysterese lässt man zunächst ganz weg. Dia- und Paramagnetismus gehören in die Festkörperphysikvorlesung der Universität.

## 6.9 Monopol und magnetische Ladung

### Gegenstand

Es gibt keine Teilchen, die magnetische Ladung tragen. Man sagt auch, es gebe keine magnetischen Monopole. Daraus folgt, so wird manchmal argumentiert, dass es auch die Größe „magnetische Ladung“ oder „magnetische Polstärke“ nicht gibt.

### Mängel

Zunächst zwei Begriffsklärungen:

### Die magnetische Ladungsdichte

Sie ist definiert über

$$\mu_0 \operatorname{div} H = \rho_m \quad (6.2)$$

Sie beschreibt also die Quellen des  $\vec{H}$ -Feldes. Wegen

$$\mu_0 \operatorname{div} H = -\operatorname{div} M \quad (6.3)$$

beschreibt sie ebenso die Senken der Magnetisierung. Das Raumintegral darüber nennt man „magnetische Polstärke“, magnetische Ladung oder, wie bei Maxwell, Menge an Magnetismus.

### Der magnetische Monopol

Der Gebrauch des Wortes ist nicht einheitlich.

Wenn man sagt, es gebe keine magnetischen Monopole, so meint man mit der Bezeichnung ein Teilchen, also ein real existierendes Objekt, das magnetische Ladung trägt (oder dessen Polstärke von null verschieden ist). Solche „Monopole“ wurden bisher nicht nachgewiesen.

Das Wort wird aber auch gebraucht als Name für die Quelle eines magnetischen „Coulomb-Feldes“, also eines  $H$ -Feldes, dessen Feldstärke mit  $1/r^2$  abklingt. Ein solches Feld gibt es in beliebig guter Näherung. Es ist das Feld in der Umgebung eines Pols eines dünnen, langen Magneten.

Wegen dieser Zweideutigkeit des Wortes wollen wir im Folgenden magnetisch geladene Teilchen nicht einfach „Monopole“ nennen, sondern „Monopolteilchen“. Die Aussage, es gebe keine magnetische Ladung wird begründet mit der Feststellung, dass es keine Monopolteilchen gibt. Nun kann man aber nur dann erklären, was ein solches Teilchen ist, wenn man vorher die Größe magnetische Ladung eingeführt hat, etwa über Gleichung (6.2).

Ob es eine physikalische Größe gibt oder nicht, kann man nie aus einer Beobachtung der Natur folgern, denn

Größen werden vom Menschen konstruiert [1]. Man führt eine physikalische Größe ein, wenn es zweckmäßig ist; wenn man sie zur Beschreibung der Natur gebrauchen kann. Und es ist zweckmäßig, eine Größe „magnetische Ladung“ einzuführen. Man braucht sie unter anderem:

- zur Beschreibung der Tatsache, dass es keine magnetischen Monopolteilchen gibt;
- zur Beschreibung der Tatsache, dass die Pole eines zweipoligen Magneten betragsmäßig die gleiche Ladung tragen;
- zur Formulierung des Coulomb'schen Gesetzes für Magnetpole [2].

Natürlich könnte man auf die Einführung der Größe verzichten. Dann würde man etwa formulieren: Es gibt keine Teilchen, für die das Volumenintegral der Divergenz der magnetischen Feldstärke über einen Raumbereich, der das Teilchen enthält, von null verschieden ist. Aber auf die entsprechende Art könnte man auch die Größe elektrische Ladung abschaffen, was wohl niemandem in den Sinn kommen würde.

## Herkunft

Was wir hier magnetische Ladung nennen, ist eine altehrwürdige Größe, die allerdings unter verschiedenen Namen auftritt. Zur Zeit von Coulomb stellte man sich vor, der Magnetismus sei durch zwei magnetische Fluida verursacht (analog zu den elektrostatischen Erscheinungen, die durch elektrische Fluida zustande kämen).

Sowohl für die elektrischen wie für die magnetischen Fluida entdeckte Coulomb das quadratische Abstandsge setz [3].

Bei Maxwell taucht die magnetische Ladung (in der deutschen Übersetzung) unter dem Namen „Stärke eines Poles“ auf [4]: „Zwei magnetische Pole stoßen einander in Richtung ihrer Verbindungs linie und mit einer Kraft ab, welche dem Produkt ihrer Stärken direct, dem Quadrate ihres Abstandes von einander umgekehrt proportional ist.“

Zwei Seiten weiter benutzt er die Bezeichnung „Menge an Magnetismus“: „Die Menge Magnetismus, die ein Pol eines Magnets beherbergt, ist stets der Größe nach gleich und dem Zeichen nach entgegengesetzt der Menge Magnetismus, die der andere Pol derselben in sich birgt.“

In jedem Magneten ist die Gesamtmenge an Magnetismus algebraisch genommen gleich Null.“

In einem Lehrbuch aus dem Jahr 1912 wird das Coulomb'sche Gesetz für den Magnetismus behandelt, und die magnetische Ladung heißt hier „magnetische Menge“ [5]. Auch Max Born benutzt diese Bezeichnung [6].

Obwohl das Coulomb-Gesetz für magnetische Pole leichter nachzumessen ist als das für elektrisch geladene Körper, ist es heute aus den Lehrbüchern vollständig verschwunden. Das geschah in demselben Maß, wie die magnetische Feldstärke  $H$  in den Hintergrund gedrängt wurde. Wenn man nicht mehr nach der Feldstärke fragt, so kann man auch mit der Gleichung

$$\mu_0 \operatorname{div} H = \rho_m$$

nichts mehr anfangen.

Ein etwas moderneres Buch, das konsequent mit der magnetischen Ladung operiert und die Größe auch so nennt, ist der Macke [7]: „Ein bedeutender Unterschied zwischen den elektrostatischen und den magnetostatischen Erscheinungen besteht darin, daß magnetische Ladungen in der Natur nie einzeln auftreten, sondern stets paarweise. Es existieren keine einzelnen Magnetpole, sondern nur magnetische Dipole. Dieser Tatbestand ändert die Theorie aber in keiner Weise.“

## Entsorgung

Im Schulunterricht führt man die magnetische Ladung gleich am Anfang der Magnetostatik ein als eigenständige physikalische Größe, ähnlich wie man es mit der elektrischen Ladung in der Elektrostatik tut. Man hat hier aber die Besonderheit, dass die gesamte magnetische Ladung eines Magneten stets null ist. An der Universität führt man zunächst Gleichung (6.3) ein und definiert dann die magnetische Ladung über:

$$\rho_m = \mu_0 \operatorname{div} H$$

- [1] G. Falk und W. Ruppel, *Mechanik, Relativität, Gravitation*, Springer-Verlag, Berlin 1973, S. 2
- [2] A. Sommerfeld: *Elektrodynamik*, 4. Auflage, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1964, S. 38 – 39
- [3] C. A. Coulomb, *Second Mémoire sur l'Électricité et le Magnétisme, Où l'on détermine, suivant quelles loix le Fluide magnétique, ainsi que le Fluide électrique, agissent, soit par répulsion, soit par attraction*, Mémoires de l'Academie Royale des Sciences, 1785, S. 593
- [4] J. C. Maxwell, *Lehrbuch der Electrizität und des Magnetismus*, Zweiter Band, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1883, S. 5 – 7
- [5] E. Riecke, *Lehrbuch der Physik*, Zweiter Band, Leipzig 1912, Verlag von Veit & Comp., S. 15f
- [6] M. Born, *Die Relativitätstheorie Einsteins*, Heidelberg Taschenbücher, Springer-Verlag, Berlin 1969, S. 133
- [7] W. Macke, *Elektromagnetische Felder*, Leipzig 1960, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, S. 78

## Das Feld von Dauermagneten

### 6.10 Das Feld von Dauermagneten

#### Gegenstand

In vielen Schulbüchern findet man das Feldlinienbild des Feldes eines Stabmagneten. Abb. 6.1 zeigt einige Beispiele.

#### Mängel

Die Pole eines normalen Stabmagneten sind die Stirnflächen des Stabes [1]. Das korrekte magnetische Feld im Außenraum des Magneten zeigt Abb. 6.2a [2]. Zwischen  $H$ - und  $B$ -Feldlinien braucht man hier nicht zu unterscheiden, denn beide haben denselben Verlauf. In allen Schulbüchern, die ich konsultiert habe, enthält das entsprechende Bild Fehler. (Ich habe 10 zum Teil deutsche, zum Teil ausländische Schulbücher durchgesehen.) Man vergleiche die Teilbilder von Abb. 6.1 mit Abb. 6.2a. Die Fehler können nicht damit entschuldigt werden, es sei eine andere Polverteilung vorausgesetzt worden, denn es gibt keine Polverteilungen, die zu Feldlinienbildern führen, wie sie Abb. 6.1 zeigt. In den verschiedenen Büchern werden unterschiedliche Fehler gemacht.

- 1 Feldlinien treten nur an den Stirnflächen aus, Abb. 6.1a, Abb. 6.1b und Abb. 6.1c. Tatsächlich treten sie auch seitlich aus.
- 2 Die Feldlinien treten nur senkrecht zur Oberfläche des Magneten aus, Abb. 6.1a und Abb. 6.1b. Tatsächlich verlaufen nur die Feldlinien in der Mitte der Stirnflächen senkrecht zur Oberfläche.
- 3 Die an der Seite ein- oder austretenden Feldlinien haben an der Oberfläche des Magneten die falsche Richtung, Abb. 6.1d, Abb. 6.1e, Abb. 6.1f, Abb. 6.1g und Abb. 6.1h.

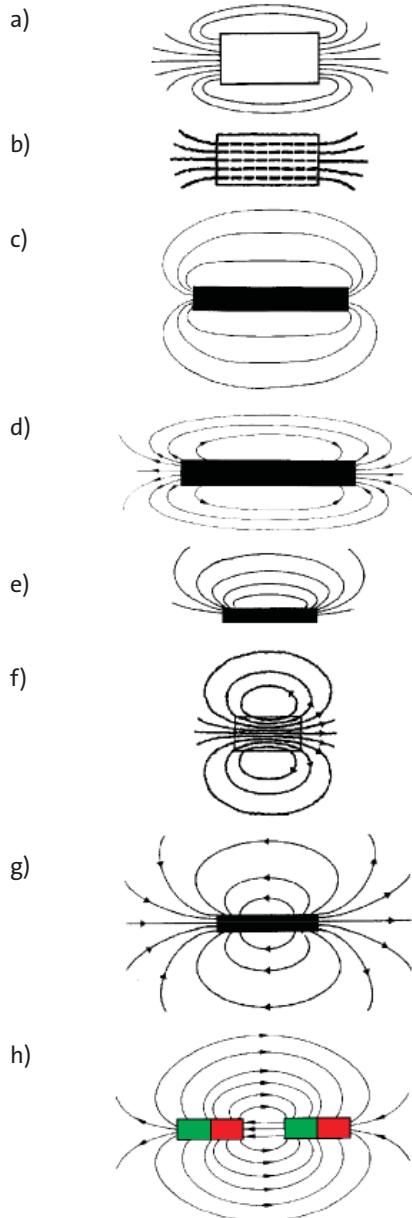
Analoge Fehler findet man bei Feldlinienbildern des Hufeisenmagneten sowie beim Magnetfeld der Erde.

Oft findet man außer der Skizze noch ein Foto, bei dem der Feldlinienverlauf mit Eisenfeilspänen sichtbar gemacht wurde. Man sieht dann, in ein und demselben Buch, häufig auf Abbildungen, die unmittelbar nebeneinanderstehen, die Diskrepanz zwischen dem, was die Skizze behauptet und der Realität.

Eines der Bilder, das ich gefunden habe, Abb. 6.1h, enthält noch gröbere Fehler: Am Nordpol beginnen nicht nur Feldlinien, sondern es enden dort auch welche. Auch am Südpol beginnen und enden Feldlinien.

#### Herkunft

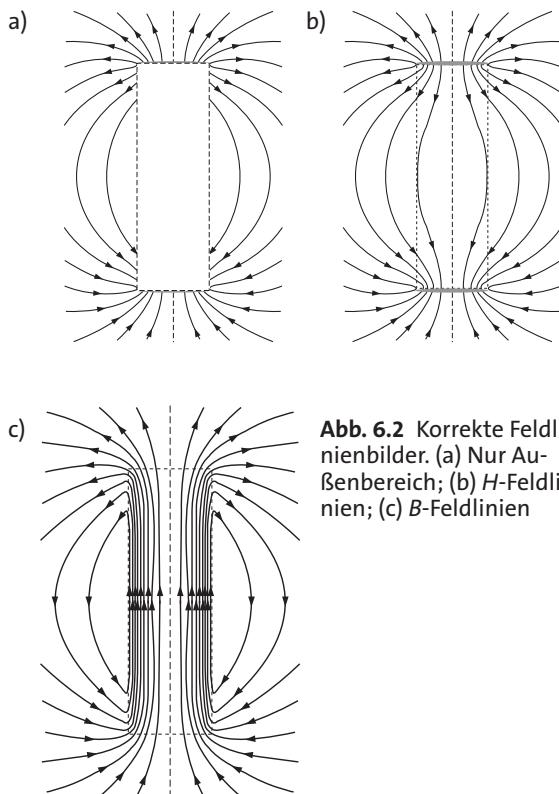
Feldlinienbilder, wie andere Abbildungen auch, müssen nicht in jeder Hinsicht präzise sein. Sie sollen das We-



**Abb. 6.1** Feldlinienbilder von Stabmagneten aus verschiedenen Schulbüchern. Keines der Bilder ist korrekt.

sentliche zeigen. Unwichtige Details dürfen durchaus zugunsten der Übersichtlichkeit weggelassen werden. Nun wird allerdings in den Büchern, von denen hier die Rede ist, nicht vereinfacht. Mit den Bildern werden Sachverhalte mitgeteilt, die nicht zutreffen.

Die falschen Aussagen werden von den Lernenden durchaus wahrgenommen, und sie werden im Gedächtnis behalten. Man kann sich in Gesprächen mit Studenten leicht davon überzeugen. Viele Studenten scheinen



**Abb. 6.2** Korrekte Feldlinienbilder. (a) Nur Außenbereich; (b)  $H$ -Feldlinien; (c)  $B$ -Feldlinien

tatsächlich zu glauben, dass die Feldlinien von den Stirnflächen aus senkrecht nach außen wegläufen. Bittet man einen Studenten, er möge das Feldlinienbild eines Stabmagneten zeichnen, so wird fast immer ein falsches Bild gezeichnet. Offenbar zeichnet man einfach nach der Erinnerung an etwas, das man in Büchern gesehen hat. Fragt man nach einer Begründung für den Verlauf, so ist die Reaktion gewöhnlich Hilflosigkeit.

Tatsächlich sind die falsch gezeichneten Bilder sogar plausibel. Dem Fehler bei der Austrittsrichtung an der Seite des Magneten mag auf die folgende Art zustande kommen: Man kennt die Tatsache, dass das  $B$ -Feld divergenzfrei ist, die  $B$ -Feldlinien haben weder Anfang noch Ende. Die  $B$ -Feldlinien werden also in Gedanken durch das Innere des Magneten hindurch ergänzt. Dabei macht man wohl den Fehler anzunehmen, dass die Feldlinien beim Eintreten in den Magneten keinen oder nur einen möglichst kleinen Knick machen. In einem der Lehrbücher wurden die Feldlinien tatsächlich so gezeichnet, Abb. 6.1f. Noch glatter würden die Linien durch den Magneten durchlaufen, wenn sie gar nicht erst an den Seiten ein- und austreten würden, sondern nur an den Enden. Auch das ist in einem der Bücher zu finden, Abb. 6.1c. (Die Abbildungen Abb. 6.1b und Abb. 6.1f entstammen demselben Buch, sie stimmen aber nicht miteinander überein.) Den korrekten Verlauf der

$B$ -Feldlinien zeigt Abb. 6.2b. Man beachte den scharfen Knick beim seitlichen Ein- bzw. Austritt der Feldlinien.

Wer die Feldlinien nur an der Stirnfläche austreten lässt, mag wohl glauben, dass die  $B$ -Feldlinien im Innern des Magneten mit den Magnetisierungslinien identisch sind, was nicht zutrifft. (Die Magnetisierungslinien bilden ein homogenes Feld.)

Wer die Feldlinien nur senkrecht aus dem Magneten austreten lässt, scheint zu meinen, hier gelte eine ähnliche Regel wie bei den elektrischen Feldlinien an der Oberfläche eines elektrischen Leiters.

Es ist interessant, dass in Hochschulbüchern, in denen das Thema behandelt wird, die Feldlinienbilder durchweg richtig sind. Es besteht also eine langjährige Koexistenz von Richtigem und Falschem. Dies deutet darauf hin, dass es eine Schulphysik gibt, die ein von der Universitätsphysik weitgehend unabhängiges Eigenleben führt. Es zeigt auch, dass neue Bücher durchaus nicht immer neu sind. Man findet gelegentlich einfach die alten Fehler in neuer Verpackung.

### Entsorgung

Man zeichne die Feldlinien richtig. Eine Hilfe: Man zeichne nicht die  $B$ -, sondern die  $H$ -Feldlinien, Abb. 6.2bc. Die Magnetpole sind die Quellen der  $H$ -Feldlinien [3]. Man kann sich die Stirnflächen auch elektrisch statt magnetisch geladen vorstellen. Das Problem, die elektrischen Feldlinien zu zeichnen, hat dann dieselbe Lösung wie das ursprüngliche magnetische Problem. Das Feldliniengesetz ist das von zwei (recht weit voneinander entfernten) nichtleitenden, elektrisch geladenen Platten.

- [1] F. Herrmann, *Magnetpole*, Altlasten der Physik
- [2] A. Sommerfeld, *Vorlesungen über Theoretische Physik*, Band III, Elektrodynamik, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1964, S. 78
- [3] F. Herrmann, *Magnetische Eigenschaften von Materialien im Unterricht*, Praxis der Naturwissenschaften 8, 1995, S. 17

## 6.11 Elektromagnete

### Gegenstand

Die Funktionsweise von Elektromagneten wird etwa so erklärt: Schiebt man in eine Spule einen Weicheisenkern hinein, so wird das Weicheisen magnetisiert, es verwandelt sich selbst in einen Magneten. Das Feld dieses Magneten kommt zu dem der Spule hinzu, sodass insgesamt ein stärkeres Feld resultiert als ohne Eisenkern.

## Die Permeabilitätszahl

### Mängel

Die Erklärung legt die Erwartung nahe, dass die Magnetisierung des Eisens um so größer ist, je größer die Permeabilitätszahl  $\mu$  ist. Man würde also erwarten, dass der Elektromagnet ein umso stärkeres Feld hat, je größer  $\mu$  ist. Das ist aber nicht der Fall. Damit eine Spule zum Elektromagneten wird, reicht es, dass  $\mu$  groß gegen 1 ist. Es macht praktisch keinen Unterschied, ob  $\mu$  gleich 1 000, 10 000 oder gar 100 000 ist.

### Herkunft

Der Elektromagnet ist leicht und direkt zu erklären mithilfe der ersten Maxwell'schen Gleichung, die eine Aussage über die magnetische Feldstärke  $H$  macht. Nun hat es sich eingebürgert, magnetische Felder durchgehend mit der Vektorgröße  $B$  zu beschreiben. Diese Beschränkung auf  $B$  wird oft begründet mit Argumenten, die in der Physik nichts zu suchen haben:  $B$  sei das eigentliche oder fundamentale Feld,  $H$  dagegen eine abgeleitete oder Hilfsgröße. Hier wird ein Fehler gemacht, den wir unseren Schülern sonst nicht nachsehen: Man verwechselt physikalische Größe und physikalisches System. Der Satz „An der Feder hängt eine Masse“ ist nicht richtig, denn eine physikalische Größe kann nicht an einer Feder hängen. Ebenso kann weder  $B$  noch  $H$  das Feld sein, denn  $B$  und  $H$  sind physikalische Größen, das magnetische Feld dagegen ist ein physikalisches System.

Die Beschreibung der Wirkung des Eisenkerns ist nun mithilfe der Größe  $H$  viel einfacher als mit  $B$ . Zum einen lässt sich mit  $H$  sehr leicht definieren, was man unter einem weichmagnetischen Stoff versteht: Im Innern eines solchen Stoffs ist  $H = 0$  A/m, egal wie das Feld außen ist [1]. (Diese Eigenschaft geht verloren, wenn das Material in die Sättigung gerät. Es ist dann nicht mehr weichmagnetisch.) Zum anderen kann man mit  $H$  eine Größe beschreiben, die beim Hineinschieben des Eisenkerns ihren Wert nicht ändert, eine Invariante also: das Wegintegral über einen Weg, der die Strom führenden Drähte gerade einmal umschlingt. Wenn nun auf einem Teil des Integrationsweges, nämlich im Innern des Eisenkerns, die Feldstärke  $H$  zu null gemacht wird, so muss der Beitrag zum Integral auf dem restlichen Weg, also im Außenbereich der Spule, entsprechend zunehmen. Wenn man die Erklärung ohne die magnetische Feldstärke, d.h. nur mit der Flussdichte versucht, hat man es zum einen schwerer, die Eigenschaften des weichmagnetischen Materials zu beschreiben, und zum anderen fehlt einem die Invariante beim Vorgang des Hineinschiebens des Eisenkerns.

### Entsorgung

Zur Erklärung von Phänomenen, die mit der Magnetisierung von Materie zu tun haben, benutzt man die mag-

netische Feldstärke  $H$ . Nimmt man  $H$  als Maß dafür, was man unter viel oder wenig Feld verstehen will, so kann man die Tatsache, dass im Innern von weichmagnetischen Stoffen  $H = 0$  A/m ist, so formulieren: Weichmagnetische Stoffe lassen kein magnetisches Feld in sich eindringen, — genauso wie elektrische Leiter das elektrische Feld nicht in sich hereinlassen. So kann man nun auch den Elektromagneten leicht verstehen: Schiebt man einen Weicheisenkern in eine Spule, während man die elektrische Stromstärke konstant hält, so drängt der Eisenkern das magnetische Feld aus dem Innern der Spule hinaus.

[1] F. Herrmann, *Die Hysteresiskurve*, Altlasten der Physik

## 6.12 Die Permeabilitätszahl

### Gegenstand

Für die magnetische Flussdichte  $B$  in einem langen Elektromagneten (Länge  $l$ , Windungszahl  $N$ , Permeabilitätszahl des Kernmaterials  $\mu_r$ ) wird oft die folgende Formel angegeben:

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{N \cdot I}{l} \quad (6.4)$$

Dabei wird angenommen, dass die elektrische Stromstärke nicht so groß ist, dass das Material in die magnetische Sättigung gerät, und dass die Stromstärke in der Spule vor und nach dem Einbringen des Materials dieselbe ist.

Auch die zu (6.4) äquivalente Gleichung

$$B = \mu_r \cdot B_0 \quad (6.5)$$

trifft man in manchen Büchern an. Hier ist  $B$  die Flussdichte im Kernmaterial der Spule mit Kern und  $B_0$  die in der leeren Spule, also derselben Spule ohne Kern.

### Mängel

Die Gleichungen (6.4) und (6.5) sind nicht richtig. Sie gelten nur, wenn der ganze Raum, den das Feld einnimmt, mit dem Material der Permeabilität  $\mu_r$  erfüllt ist: „In den Fällen, wo ein homogenes und isotropes Magnetikum den gesamten Raumbereich des Magnetfeldes oder einen Teil davon in einer Weise ausfüllt, dass die Induktionslinien des magnetisierenden Feldes die Oberfläche des magnetisierten Stoffes nicht schneiden, gilt im Innern

$$B = \mu_r \cdot B_0,$$

wobei  $\mu_r$  die relative magnetische Permeabilität des Magnetikums bedeutet, die angibt ...“ [1].

Die Gleichungen gelten also zum Beispiel für eine Ringspule mit geschlossenem Kern.

Um zu verstehen, warum die Gleichungen nicht für einen normalen, gestreckten Elektromagneten gelten, wollen wir zunächst den Ausdruck, der den Gleichungen (6.4) und (6.5) entspricht, für eine Spule mit einem ringförmigen Kern, der einen Spalt hat, herleiten, Abb. 6.3. Wir werden danach auf das Verhalten einer langen, geraden Spule schließen.

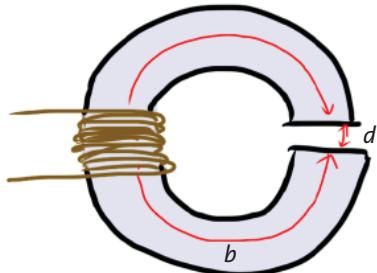


Abb. 6.3 Die Flussdichte im Eisenkern und im Spalt ist nur dann proportional zu  $\mu_r$ , wenn die Spaltweite  $d$  hinreichend klein ist.

Wir nehmen an, dass die Spaltbreite  $d$  klein gegen den Spulenradius ist. Dann kann man das Feld im Spalt in guter Näherung als homogen betrachten.

Da wir fern von der Sättigung sind und ein isotropes Material voraussetzen, gilt

$$B = \mu_0 \mu_r H. \quad (6.6)$$

Die Spule habe  $N$  Windungen und es fließe ein elektrischer Strom der Stärke  $I$ . Es gilt dann

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{r} = N \cdot I,$$

wobei über einen Weg integriert wird, der dem Ring folgt.

Wir nehmen nun noch an, dass der Radius des Ringes groß gegen den Spulenradius ist. Wir können dann den Wert des Linienintegrals leicht angeben:

$$b \cdot H_m + d \cdot H_s = N \cdot I \quad (6.7)$$

Der Index m bezieht sich auf das Material, s bezieht sich auf den Spalt.  $b$  ist der Teil des Integrationsweges, der im Material und  $d$  der, der im Spalt verläuft.

Da das Flussdichtefeld divergenzfrei ist, gilt

$$B_m = B_s = B.$$

Die Flussdichte ist also im Material und im Spalt dieselbe. Mit Gleichung (6.6) folgt daraus

$$\mu_r \cdot H_m = H_s.$$

In Gleichung (6.7) eingesetzt erhält man

$$H_m = \frac{N \cdot I}{b + \mu_r d}$$

und mithilfe von Gleichung (6.6)

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot I}{b + \mu_r d}. \quad (6.8)$$

Die Abhängigkeit der Flussdichte von  $\mu_r$  ist also anders, als es Gleichung (6.4) behauptet.

Für die leere Spule gilt

$$B_0 = \mu_0 \frac{N \cdot I}{d},$$

wo  $l$  der gesamte Integrationsweg ist. Damit wird aus (6.8)

$$B = \frac{\mu_r \cdot l}{b + \mu_r d} B_0.$$

Damit ist der Zusammenhang zwischen  $B$  und  $B_0$  anders als es Gleichung (6.5) behauptet.

Wir wollen Gleichung (6.8) für zwei Spezialfälle auswerten:

- Wenn die Spule keinen Spalt hat, wenn also  $d = 0$  ist, oder auch näherungsweise wenn  $b \gg \mu_r d$  ist, bekommt man

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{N \cdot I}{b}. \quad (6.9)$$

Die Flussdichte ist also in dieser Näherung unabhängig von der (kleinen) Spaltbreite und proportional zur Permeabilitätszahl. Da in diesem Fall der Weg im Innern des Materials  $b$  gleich (oder fast gleich) dem Gesamtweg im Ring  $l$  ist, ist die Formel identisch mit Gleichung (6.4). Wir sehen also, dass Gleichung (6.4) nur dann gilt, wenn der Kern keinen Spalt hat, oder wenn die Spaltweite klein ist gegen  $b/\mu_r$ .

- Wenn  $b \ll \mu_r d$  ist, wird aus Gleichung (6.8) näherungsweise

$$B_0 = \mu_0 \frac{N \cdot I}{d} \quad (6.10)$$

Jetzt ist  $B$  unabhängig von  $\mu_r$ , aber umgekehrt proportional zur Spaltbreite. Der Vergleich mit der Flussdichte der leeren Spule ergibt:

## Die Permeabilitätszahl

$$B = \frac{l}{d} B_0. \quad (6.11)$$

Auch in dieser Form sieht man, dass  $B$  von  $\mu_r$  unabhängig ist.

Welche der beiden Näherungen entspricht nun der in den Schulbüchern diskutierten Situation?

Nehmen wir einen Ringmagneten mit einer Gesamtlänge  $b = 50$  cm an, wie es typisch ist für einen Aufbau mit den Spulen und Eisenkernen der Schulsammlung, und nehmen wir an, dass der Spalt nicht kleiner als 0,2 cm ist – sonst passt die Hallsonde nicht mehr hinein. Nehmen wir ferner an, dass das  $\mu = 1000$  ist, und vergleichen die beiden Summanden im Nenner von Gleichung (6.8), so finden wir, dass der erste Summand  $b$  deutlich kleiner ist als der zweite Summand  $\mu_r d$ . Die Summanden verhalten sich wie 1 zu 4. Wir befinden uns also eher im Gültigkeitsbereich der Gleichungen (6.10) und (6.11), als dem von Gleichung (6.9).

Nun benutzt man aber zur  $\mu_r$ -Bestimmung in der Schule nicht eine Ringspule, sondern eine gerade Spule. Da ist der Abstand zwischen den beiden Polflächen des Eisenkerns aber noch viel größer, sodass man mit der Näherung deutlich im Bereich von Gleichung (6.10) liegt. Tatsächlich liefern diese Experimente auch  $\mu_r$ -Werte, die um mindestens einen Faktor 10 zu niedrig sind.

Die Gleichungen (6.4) und (6.5) würden einen erwarten lassen, dass die Flussdichte im Eisenkern eines Elektromagneten in demselben Maße größer wird, wie man die Permeabilitätszahl vergrößert. Das würde bedeuten, dass auch die Flussdichte außerhalb, an der Oberfläche des Eisenkerns, um diesen Faktor wächst. Ein Elektromagnet mit einem Kern mit  $\mu_r = 100\,000$  hätte damit ein hundertmal so starkes Feld wie einer mit einem Kern mit  $\mu_r = 1000$ . Gleichung (6.10) und auch schon der gesunde Menschenverstand sagen uns aber, dass das nicht zutreffen kann. Ein Elektromagnet mit  $\mu_r = 500$  lässt sich nicht dadurch verbessern, dass man ein anderes Material für den Spulenkern verwendet. (Das bedeutet nicht, dass es nicht Anwendungen gäbe, wo ein extrem großes  $\mu_r$  wünschenswert ist, z.B. magnetische Abschirmungen).

## Herkunft

Wir haben die falschen Formeln in allen fünf Schulbüchern gefunden, die wir konsultiert haben, dagegen in keinem Hochschulbuch oder Physiklexikon. Das gibt einen Hinweis darauf, wie der Fehler entstanden ist. Die Schulphysik bemüht sich aus verständlichen Gründen, mit möglichst wenigen physikalischen Größen auszukommen. Man suchte nach einem Weg für die Einführung

der Permeabilitätszahl, bei dem die magnetische Feldstärke nicht gebraucht wird. Der Fehlschluss mag nun gewesen sein, dass es sich beim magnetischen Feld so verhält, wie man es vom elektrischen kennt, wenn man die Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  einführt.

Hier schiebt man in den Feldbereich eines Kondensators ein Dielektrikum hinein und misst die Abnahme der Spannung und damit der elektrischen Feldstärke. Die Feldstärke mit Dielektrikum hängt mit der ohne Dielektrikum zusammen über

$$\vec{E}_0 = \epsilon_r \cdot \vec{E}.$$

Gegen die Gültigkeit dieser Beziehung gibt es nun, anders als im Fall des magnetischen Feldes, keine Einwände. Denn erstens wird hier der ganze felderfüllte Raum mit dem Dielektrikum ausgefüllt. Und zweitens hat  $\epsilon_r$  für die Materialien, die man normalerweise verwendet, längst nicht so große Werte wie  $\mu_r$  für Weicheisen.

## Entsorgung

Die Beschreibung der Erscheinungen der Magnetostatik wird übersichtlicher, wenn man  $H$  statt  $B$  verwendet. Dann kann man die folgende einfache Regel formulieren: Ein weichmagnetisches Material verdrängt das magnetische Feld aus seinem Innern, so wie ein Metall das elektrische Feld aus seinem Innern verdrängt.

Ob das Feld nun, je nach dem Wert von  $\mu_r$ , zu 99,9% oder zu 99,9999 % verdrängt wird, spielt für die meisten Anwendungen keine Rolle.

Das Vermeiden der Einführung der Feldstärke hat man ohnehin teuer erkauft. Man stellt eine Beziehung auf zwischen den Werten einer Größe vor und nach Einbringen eines Materials. Ein solcher Vergleich ist immer schwerer zu durchschauen, als der Vergleich der Werte von zwei Größen am selben Ort und zur selben Zeit. In unserem Fall heißt das: Statt nach dem Zusammenhang zwischen  $B$  vorher und  $B$  nachher fragen wir lieber danach, wie die Materie auf ein magnetisches Feld reagiert. Am klarsten lässt sich diese Frage stellen und beantworten, wenn man sie so formuliert: Wie hängt die Magnetisierung des Materials von der magnetischen Feldstärke ab? Für den Fall einer großen Permeabilitätszahl ist die Antwort einfach: Die Magnetisierung stellt sich so ein, dass die magnetische Feldstärke im Material null wird (so wie sich in einem elektrisch leitenden Material die Ladungsverteilung so einstellt, dass die elektrische Feldstärke im Material null wird).

[1] B. M. Jaworski und A. A. Detlaf, *Physik griffbereit*, Akademie-Verlag, Berlin 1972, S. 410

## 6.13 Die Induktivität

### Gegenstand

Die Induktivität wird in Schulbüchern fast durchweg über das Induktionsgesetz eingeführt, nämlich als Proportionalitätsfaktor zwischen induzierter Spannung (oder „elektromotorischer Kraft“) und zeitlicher Änderung des induzierenden Stroms:

$$U_{\text{ind}} = -L \frac{dI}{dt} \quad (6.12)$$

### Mängel

Die Elektrotechnik kennt drei passive, lineare Bauelemente: den Widerstand, den Kondensator und die Spule. (Die mechanischen Analoga sind der Stoßdämpfer mit Stokes'scher Reibung, der Massenpunkt und die Hooke'sche Feder.) Für jedes der drei Bauelemente gilt eine lineare Beziehung:

$$\text{Widerstand: } U = R \cdot I$$

$$\text{Kondensator: } Q = C \cdot U \quad (6.13)$$

$$\text{Spule: } n\Phi = L \cdot I \quad (6.14)$$

$R$ ,  $C$  und  $L$  hängen von den geometrischen Maßen und den Materialeigenschaften des entsprechenden Bauelements ab. Während im Widerstand Energie dissipiert wird, stellen Kondensator und Spule Energiespeicher dar. Für Netzwerke, die außer elektrischen Energiequellen nur diese Bauelemente enthalten, gilt eine innere Symmetrie: Ersetzt man das Netzwerk gemäß bestimmter, einfacher Übersetzungsregeln durch ein anderes, so wird dieses neue Netzwerk durch Gleichungen derselben mathematischen Struktur beschrieben wie das Ausgangsnetzwerk. Ein bekanntes, wenn auch etwas triviales Beispiel dafür sind der  $RC$ -Kreis und der  $RL$ -Kreis. Die wichtigsten Übersetzungsregeln sind:

$U$ (elektrische Spannung)	$\Leftrightarrow$	$I$ (elektrische Stromstärke)
$Q$ (elektrische Ladung)	$\Leftrightarrow$	$n\Phi$ (magnetischer Fluss)
$C$ (Kapazität)	$\Leftrightarrow$	$L$ (Induktivität)
$R$ (Widerstand)	$\Leftrightarrow$	$1/R = G$ (elektrischer Leitwert)
Knoten	$\Leftrightarrow$	Masche
Reihenschaltung	$\Leftrightarrow$	Parallelschaltung
spannungsstab. Quelle	$\Leftrightarrow$	stromstabilisierte Quelle

Der Doppelpfeil ist so zu verstehen:  $U$  wird durch  $I$  und  $I$  durch  $U$  ersetzt,  $Q$  durch  $n\Phi$  und  $n\Phi$  durch  $Q$  usw. Das Auftreten der Windungszahl  $n$  in der zweiten Zeile, das die Ästhetik etwas stört, erklärt sich dadurch, dass man unter dem magnetischen Fluss  $\Phi$  in einer Spule ge-

wöhnt ist das Produkt aus magnetischer Flussdichte  $B$  und Querschnittsfläche der Spule versteht. (Es wäre also konsequenter, statt  $\Phi$  die Größe  $\Phi' = n\Phi$  zu benutzen, denn die effektive Fläche, durch die die magnetischen Feldlinien hindurchtreten, ist  $n$  mal so groß wie die Querschnittsfläche.)

Definiert man nun die Induktivität über Gleichung (6.12), so verschleiert man diese Symmetrie. Die Analogie zwischen Kondensator und Spule ist weniger offensichtlich.

Wie ungeschickt die Einführung von  $L$  über Gleichung (6.12) ist, erkennt man auch, wenn man die Kapazität auf die entsprechende Art einführt, nämlich über die zu (6.12) analoge Gleichung

$$I = C \frac{dU}{dt} \quad (6.15)$$

Die Gleichung beschreibt Auf- und Entladevorgänge. Benutzt man sie zur Einführung von  $C$ , so entsteht der Eindruck, die Kapazität sei nur im Zusammenhang mit solchen Vorgängen von Bedeutung. Die Einführung über Gleichung (6.13) ist direkter:  $C$  erscheint als ein Maß dafür, wie aufwendig es ist, eine bestimmte Ladungsmenge zu speichern: Braucht man eine hohe oder reicht eine niedrige Spannung?

Genau so ist es bei der Induktivität. Führt man sie über Gleichung (6.12) ein, so entsteht der Eindruck, die Induktivität sei nur im Zusammenhang mit Induktionsvorgängen von Bedeutung. Die Einführung über Gleichung (6.14) dagegen sagt uns etwas über die Bedeutung von  $L$ , ohne Bezug auf die Induktion zu nehmen. Sie sagt uns, wie aufwendig es ist, in einer Spule einen bestimmten magnetischen Fluss zu erzeugen: Braucht man eine hohe, oder genügt eine geringe Stromstärke?

### Herkunft

Man kann die Induktivität, genauso wie Kapazität, Widerstand und viele andere Größen, über jede Gleichung einführen, in der sie auftritt. Für die Definition der Induktivität ist außer den Gleichungen (6.12) und (6.14) noch die folgende Gleichung in Gebrauch:

$$E = \frac{L}{2} I^2 \quad (6.16)$$

Sie gibt den Energieinhalt des magnetischen Feldes einer Spule an.

Diese drei Wege der Einführung von  $L$  – über die Gleichungen (6.12), (6.14) oder (6.16) – koexistieren schon solange es die Induktivität gibt. Wieder zeigt sich, dass die Schulphysik gegen die Hochschulphysik relativ gut abgeschottet ist.

## Das Feld als Raumbereich mit Eigenschaften

### Entsorgung

Der magnetische Fluss wird eingeführt als  $B \cdot A$ . Man zeigt experimentell, dass die Flussdichte  $B$  in einer Spule proportional zur elektrischen Stromstärke in der Spule ist. Damit ist auch der Gesamtfluss der Spule  $n\Phi$  proportional zur Stromstärke:

$$n\Phi \sim I.$$

Wir nennen den Proportionalitätsfaktor Induktivität:

$$L := \frac{n\Phi}{I}$$

Um Gleichung (6.12) zu erhalten, setzt man in das Induktionsgesetz

$$U_{\text{ind}} = -L \frac{dI}{dt}$$

ein.

keit unterscheidet. Wie andere Systeme, so hat auch ein Feld Energie, Impuls, Drehimpuls und je nach Zustand auch Entropie. Wie andere „materielle“ Systeme, so hat es auch einen Druck und je nach Zustand auch eine Temperatur. Und wie andere Systeme, so besteht es auch aus Elementarportionen, im Fall des elektromagnetischen Feldes aus Photonen.

Es ist deshalb gerechtfertigt, sich von einem Feld eine ebenso konkrete Anschauung zu bilden wie von einem materiellen Stoff, wie von Luft oder Wasser zum Beispiel.

In einigen der oben zitierten Definitionen wird das Feld als „Raum“ bezeichnet. Raum stellt sich aber heute wohl jeder Schüler oder Student als leer vor. Dieser leere Raum soll nun aber bestimmte Eigenschaften haben. Wie kann er das, wenn er leer ist? Nach einer der Definitionen ist das Feld sogar die Eigenschaft selbst. Wer hat aber diese Eigenschaft? Einigen Definitionen zufolge „besteht“ im Raum ein Feld. Warum „befindet sich“ das Feld nicht im Raum? Wir brauchen uns nicht zu wundern, wenn der so eingeführte Feldbegriff schlecht in die Köpfe der Schüler hineingeht.

## 6.14 Das Feld als Raumbereich mit Eigenschaften

### Gegenstand

Das Feld gilt als ein schwieriger Begriff. Wenn man Lehrbücher liest, bekommt man den Eindruck, es handle sich geradezu um ein geheimnisvolles Gebilde: „Die Anziehung ... ist von der zwischenliegenden Materie unabhängig und erfolgt auch im leeren Raum, also ohne Materie! Dies gibt dem Raum um einen Magneten eine besondere physikalische Bedeutung; man nennt ihn ein magnetisches Feld ...“ [1]. „Der – auch materiefreie, leere – Raum wird zum Träger einer physikalischen Eigenschaft. Einen solchen Raum nennt man ein Feld“ [2]. „Den Raum um einen Magneten, in dem eine magnetische Wirkung zu beobachten ist, bezeichnet man als Magnetfeld“ [3]. „Im Raum um einen Magneten werden auf ferromagnetische Körper und andere Magnete Kräfte ausgeübt. Man nennt diese Eigenschaft des Raumes magnetisches Feld“ [4]. „In der Umgebung von Dauermagneten und stromführenden Leitern bestehen magnetische Felder; ...“ [5]. „Hat ein Raum die Eigenschaft, dass in jedem Raumpunkt ein magnetischer Dipol Kräfte erfährt, so sagen wir, in dem Raum bestehe ein Magnetfeld ...“ [6].

### Mängel

Ein Feld ist ein physikalisches System, das sich nicht wesentlich von anderen Systemen, wie etwa einem idealen Gas, einem starren Körper oder einer idealen Flüssig-

### Herkunft

Die Herkunft dieser Altlast lässt sich sehr deutlich erkennen. Für Faraday, den Erfinder des Feldbegriffs, und für seine Zeitgenossen war das Feld noch etwas sehr einfaches, – ein Konzept, das keine hohen Ansprüche an das Abstraktionsvermögen stellte. Der ganze Raum war von einem Medium erfüllt, dem Äther, von dem man eine recht konkrete Vorstellung hatte. Felder waren nicht weniger konkrete Gebilde: Sie waren Bereiche des Äthers, die sich in einem bestimmten, veränderten Zustand befanden. Der Feldzustand des Äthers zeichnete sich vor allem dadurch vom Nichtfeldzustand aus, dass der Äther hier unter mechanischer Spannung stand.

Maxwell, der den Faraday'schen Ideen eine mathematische Form gab, definierte das Feld so: „Man bezeichnet den Raum in der Umgebung eines electrisierten Körpers, insofern sich in demselben die electrischen Phänomene abspielen, als Electrisches Feld“ [7]. Man beachte, dass auch für Maxwell der ganze Raum mit Äther erfüllt war, dass also Raum und Äther für ihn dasselbe waren. Aus dem Michelson-Morley-Experiment und der speziellen Relativitätstheorie folgte, dass der Äther nicht die einfachen mechanischen Eigenschaften hatte, die man zunächst angenommen hatte. Ein wohl etwas voreiliger Schluss, den viele zogen, war, dass es den Äther gar nicht gibt. Tatsächlich verschwand der Begriff aus vielen Physikbüchern – wenn auch durchaus nicht aus allen. Dadurch verlor nun aber der Feldbegriff seine Grundlage. Vorher war das Feld ein besonde-

rer Zustand des Äthers, nun wurde er zu einem besonderen Zustand von etwas, das nicht existiert. Der logische Bruch, der entstand, wurde allerdings offenbar gar nicht als solcher wahrgenommen, hatte doch Maxwell selbst das Feld als einen Raumbereich definiert. Tatsächlich war aber für Maxwell Raum ohne Äther gar nicht denkbar.

Die Zeit, in der das Feld keine begriffliche Grundlage mehr hatte, hätte aber gar nicht lange zu dauern brauchen. Es wurde nämlich zur selben Zeit, d. h. zu Anfang dieses Jahrhunderts, immer klarer, insbesondere durch die Arbeiten von Planck zur Wärmestrahlung, dass das elektromagnetische Feld ein physikalisches System ist wie andere Systeme. Leider hat aber der Feldbegriff in dem unschönen Zustand, in den er kurz nach der Veröffentlichung der speziellen Relativitätstheorie geraten ist, bis heute überlebt.

Außer dieser komplizierten historischen Entwicklung des Feldbegriffs trägt zur Verwirrung noch eine andere Tatsache bei: Das Wort Feld wird außer als Name für ein physikalisches System noch in einer anderen Bedeutung verwendet, nämlich als mathematischer Begriff. Als solcher bezeichnet es die Verteilung der Werte einer Größe im Raum. So spricht man von einem Temperatur-, einem Druck- oder einem Dichtefeld. Oft werden aber die beiden Bedeutungen des Wortes Feld nicht auseinandergehalten. So ist in Lehrbüchern manchmal einfach von einem „elektrischen Feld  $\vec{E}$ “ die Rede. Solche Aussagen sollte man vermeiden, denn sie lassen nicht erkennen, ob das *physikalische System „elektrisches Feld“* oder die *räumliche Verteilung  $\vec{E}(x, y, z)$*  der physikalischen Größe „elektrische Feldstärke“ gemeint ist.

### Entsorgung

Man orientiere sich, wenn man den Feldbegriff einführt, daran, wie man andere, materielle Systeme einführt oder einführen würde. Wenn man jemandem erklären sollte, was ein ideales Gas ist, so könnte man etwa so beginnen: „Ein ideales Gas ist ein System oder ein Stoff oder ein Gebilde mit den folgenden Eigenschaften ...“ Ähnlich sollte man mit der Einführung etwa des elektrischen Feldes beginnen: „Ein elektrisches Feld ist ein Gebilde mit den folgenden Eigenschaften ...“

Wie ungeschickt es ist, ein Feld einzuführen als Raum mit besonderen physikalischen Eigenschaften, erkennt man, wenn man bedenkt, dass es durchaus nicht falsch wäre, wenn man zum Beispiel Luft definierter „als einen Raum mit einer besonderen physikalischen Bedeutung“ oder „als Raum, der eine physikalische Eigenschaft trägt“. Selbstverständlich würde das niemand tun.

- [1] Dorn-Bader, *Physik*, Mittelstufe, Hermann Schrödel Verlag KG, Hannover, 1980, S. 264
- [2] Metzler *Physik*, J. B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1991, S. 86
- [3] *Physik für Gymnasien*, Länderausgabe B, Gesamtband, Cornelsen, Berlin 1991, S. 250
- [4] W. Kuhn, *Physik*, Band I. Westermann, Braunschweig 1990, S. 217
- [5] *Einführung in die Physik*, Sekundarstufe I, Ausgabe E, Diesterweg, Sauerländer, Frankfurt, 1987, S. 294
- [6] *Felder*, GROSS BERHAG, Ernst Klett Stuttgart, 1985, S. 60.
- [7] J. C. Maxwell, *Lehrbuch der Electrizität und des Magnetismus*, Verlag von Julius Springer, Berlin 1883, S. 47

## 6.15 Äquipotenzialflächen

### Gegenstand

Um Felder grafisch darzustellen, werden gewöhnlich Feldlinienbilder gezeichnet. Elektrostatische Felder werden gelegentlich durch die Orthogonalfächen zu den Feldlinien, die hier Äquipotenzialflächen heißen, dargestellt.

Ein Feldlinienbild bringt zwei Aspekte eines Feldes zum Ausdruck:

- 1 Es zeigt die Richtung des Feldstärkevektors in jedem Punkt des Feldes: Die Feldstärkevektoren liegen tangential zu den Feldlinien.
- 2 Es sagt uns, wo die „Quellen“ des Feldes liegen: dort wo Feldlinien beginnen oder enden.

Manchmal wird behauptet, dass man am Feldlinienbild auch den Betrag des Feldstärkevektors ablesen kann. Tatsächlich kann man das nur in Sonderfällen [1, 2].

### Mängel

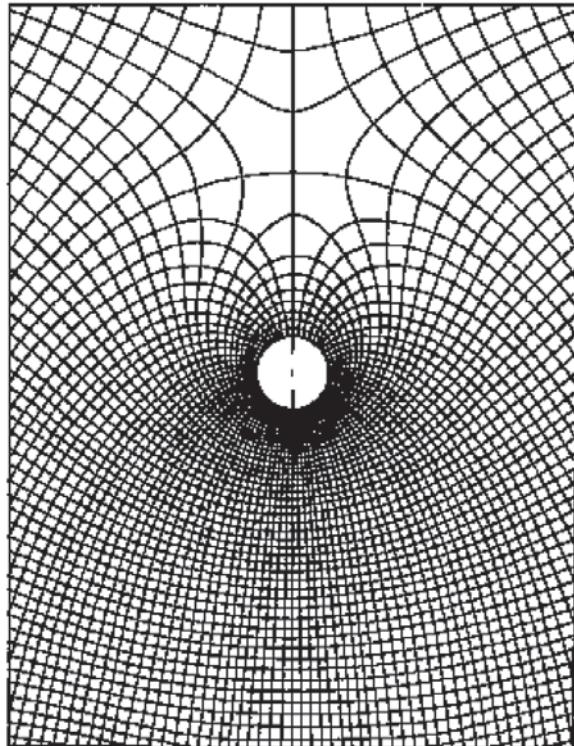
Der grafischen Darstellung eines Feldes sieht man auf einen Blick an, was sich in Worten nur umständlich ausdrücken ließe. Obwohl es verschiedene Möglichkeiten einer solchen Darstellung gibt, beschränkt man sich meist auf ein einziges Verfahren: das Feldlinienbild. Wir haben uns so an diese Art der Darstellung gewöhnt, dass uns die Frage nach Alternativen gar nicht mehr in den Sinn kommt. Eine sehr nützliche Alternative stellen die zu den Feldlinien orthogonalen Feldflächen dar.

Da man vom Feld eine sehr unkonkrete Vorstellung vermittelt, werden die Feldlinien nur zu leicht zum Strohhalm, der die Rettung bringen soll. So kommt es, dass Schüler oder Studenten das Feld oft mit den Feldlinien identifizieren.

## Äquipotenzialflächen

### Herkunft

Die Feldlinien hießen früher Kraftlinien, die Feldflächen Niveauflächen. Für Maxwell war es selbstverständlich, für alle Felder beide darzustellen, Abb. 6.4.



**Abb. 6.4** Überlagerung des magnetischen Feldes eines elektrischen Stromes (senkrecht zur Zeichenebene) und eines homogenen magnetischen Feldes in *Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus* von Maxwell

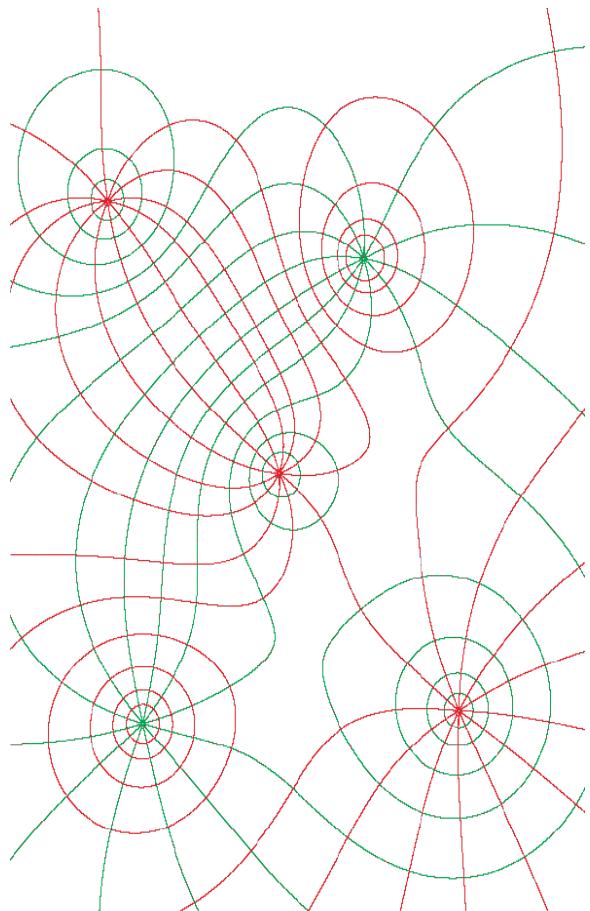
Dieses Verfahren war für ihn ein Mittel, von einem unsichtbaren Objekt eine aussagekräftige Abbildung herzustellen. Um die Jahrhundertwende, als man versuchte, den Äther aus der Physik zu verbannen, ist dann das Feld zu einem sehr abstrakten Konzept verkommen. Feldlinien waren von nun an nicht mehr als mathematische Hilfslinien, die es gestatteten, die Richtung der Kraft auf einen Probekörper darzustellen. Die Orthogonalflächen haben nur in Form von Äquipotenzialflächen in einer bestimmten Klasse von Feldern überlebt, nämlich in Gradientenfeldern. Die herrschende Vorstellung wurde: Ein Potenzial kann man nur in einem Potenzialfeld definieren, also gibt es auch Äquipotenzialflächen nur in einem solchen Feld. Man übersah, dass das, was stört, nur der Name ist. Tatsächlich kann man die Flächen nach wie vor zeichnen. Es sind zwar keine Äquipotenzialflächen mehr, aber ihren Nutzen zur Dar-

stellung des Feldes haben sie dadurch nicht verloren. Im Gegenteil: Bei Nichtpotenzialfeldern werden sie erst richtig nützlich, denn sie sagen uns, an welchen Stellen im Feld die Rotation von null verschieden ist.

### Entsorgung

Wir wollen im Folgenden die Stellen, wo Feldlinien beginnen oder enden, d.h., wo die Divergenz des Vektorfeldes von null verschieden ist, Flussquellen nennen. Als Wirbelquellen bezeichnen wir die Stellen, wo die Rotation von null verschieden ist.

So wie die Feldlinien auf den Flussquellen beginnen oder enden, so beginnen oder enden die Feldflächen auf den Wirbelquellen. Man erkennt auf einem Feldlinienbild besonders deutlich die Lage der Flussquellen, auf einem Feldflächenbild die Lage der Wirbelquellen. Man stellt daher am besten sowohl die Feldlinien als auch die orthogonalen Feldflächen (im zweidimensionalen Schnitt ebenfalls Linien) dar.



**Abb. 6.5** Feld mit zwei Flussquellen und drei Wirbelquellen (Feldlinien: rot, Feldflächen: grün)

## Wo befindet sich das Feld?

Betrachten wir als Beispiel ein elektrisches Feld. Die Flussquellen sind hier elektrische Ladungen, die Wirbelquellen sind Stellen mit sich zeitlich änderndem magnetischem Fluss. Abb. 6.5 enthält zwei Linienladungen (elektrisch geladene dünne Drähte, die senkrecht zur Zeichenebene liegen), sowie drei dünne (linienförmige) Spulen mit sich änderndem magnetischem Fluss. Die Spulen stehen senkrecht zur Zeichenebene und erscheinen daher auch als Punkte.

Das Bild kann auch als magnetisches Feld interpretiert werden. Die Flussquellen sind dann magnetische Ladungen (linienförmige magnetische Pole), die Wirbelquellen elektrische Ströme.

[1] A. Wolf, S. J. van Hook und E. R. Weeks, *Electric field line diagrams don't work*, American Journal of Physics 64, 1996, S. 714

[2] F. Herrmann, H. Hauptmann und M. Suleder, *Representations of Electric and Magnetic Fields*, American Journal of Physics 68, 2000, S. 171

## 6.16 Wo befindet sich das Feld?

### Gegenstand

Zur grafischen Darstellung von Feldern verwendet man fast durchweg Feldlinien.

### Mängel

Feldlinien geben eine etwas irreführende Auskunft darüber, „wo sich das Feld befindet“. Was soll man überhaupt auf die Frage antworten, wo sich ein Feld befindet? Was ist damit gemeint? Schließlich ist das Feld im Raum verteilt, die Feldstärke ändert sich von Ort zu Ort. Hat die Frage dann überhaupt einen Sinn? Sie hat es. Wenn man etwa die Frage stellt, wo sich die Luft der Erdatmosphäre befindet, so weiß man, wie man antworten kann; man macht eine Aussage über ihre Dichteverteilung, also qualitativ etwa: unten viel, oben wenig und oberhalb von 40 km fast nichts mehr.

Die einzige Größe, die beim elektrischen oder magnetischen Feld die Rolle der Dichte übernehmen kann, ist die Energiedichte. Wenn wir uns eine Vorstellung darüber machen wollen, wo sich das Feld befindet, so ist es vernünftig, nach der Verteilung der Energiedichte zu fragen. Darüber gibt aber das Feldlinienbild eine schlechte Auskunft, denn wir lesen ein Feldlinienbild intuitiv wie ein Stromlinienbild.

Betrachten wir eine elektrisch leitende geladene Kugel mit dem Radius  $R$ . Der Fluss der elektrischen Feldstärke ist weit draußen, also für einen großen Abstand  $r$ ,

genau so groß wie für kleine  $r$ . Die Feldliniendarstellung suggeriert, dass in einem Element  $dr$  weit draußen „genau so viel Feld“ enthalten ist, wie in einem Element  $dr$  weiter innen.

Für einen strahlenden kugelförmigen Körper, also etwa einen Stern, ist ein solcher Schluss auch richtig, wenn man die Energie als Maß für viel oder wenig Strahlung nimmt: Die in einem Abstandselement  $dr$  enthaltene Strahlungsenergie ist für alle  $r$  gleich.

Für ein statisches elektrisches Feld wäre der Schluss aber falsch. Die elektrische Feldstärke nimmt nach außen mit der zweiten Potenz von  $r$  ab, die Energiedichte also mit der vierten. Hier befinden sich 90 % der Feldenergie innerhalb einer Kugel mit dem Radius 10  $R$ , 99 % innerhalb einer Kugel mit dem Radius 100  $R$ . Das Feld ist also in diesem Sinn auf einen recht kleinen Bereich in der Umgebung der Kugel konzentriert.

Betrachten wir ein anderes Beispiel: das magnetische Feld einer Spule. Das Feldlinienbild suggeriert, das Feld sei im Innern der Spule zwar konzentrierter als außen, aber was die „Feldmenge“ betrifft, so legt es nahe, dass sich außerhalb doch ein beträchtlicher Teil des Feldes befindet. Wieder ist der Eindruck ganz anders, wenn man statt der Feldlinien die Energiedichte betrachtet. Bei einer nicht zu kurzen Spule befindet sich praktisch die ganze Energie im Innern der Spule, so wie sich bei einem Kondensator praktisch die ganze Feldenergie zwischen den Platten befindet.

### Herkunft

Man definiert das Feld als einen Raumbereich, in dem Kräfte wirken, und die Kräfte erkennt man an Richtung und Dichte der Feldlinien. So ist das Einzige, was bei dieser Definition etwas Substanz zu haben scheint, die Feldlinie. So wurden die Feldlinien zum Repräsentanten des Feldes.

### Entsorgung

Man führt das Feld als eigenständiges System ein, d.h. nicht nur als mathematisches Mittel zur Berechnung von Kräften. Da das System ausgedehnt ist, ist es nahe liegend, das Feld durch eine Dichteverteilung zu beschreiben, und zwar noch bevor man darauf eingeht, welche Kräfte auf einen Körper ausgeübt werden, den man in das Feld hineinbringt. Dass das System anisotrop ist, d.h. eine Richtung auszeichnet, ist erst der zweite Schritt.

Wenn man das Material Holz beschreibt, wird man auch nicht damit beginnen, Linien zu zeichnen, die seine Maserung zum Ausdruck bringen, sondern man wird zunächst etwa sagen, dass es ein homogenes Material einer bestimmten Dichte ist.

## 6.17 Potenzialfelder und Wirbelfelder

### Gegenstand

Als Student lernt man, dass ein induziertes elektrisches Feld kein Potenzial hat: „Dass durchaus nicht jedes Feld ein Potenzial besitzt, zeigen elektrische Wirbelfelder [...]. Sie haben in sich geschlossene Feldlinien. Beim Umlauf auf diesen [...] kann eine Ladung beliebig viel Energie gewinnen.“

### Mängel

Wir beschränken unsere Betrachtungen auf elektrische Felder. Sie gelten aber entsprechend auch für magnetische Felder und für Flüssigkeitsströmungen. Zunächst zur Begriffsklärung. Unter den elektrischen Feldern gibt es zwei Klassen mit besonderen Eigenschaften: Potenzialfelder und Wirbelfelder. Ein Potenzialfeld ist ein Feld, das nirgends Wirbel (auch Wirbelquellen genannt) hat, für das also überall  $\vec{E} = 0$  ist. Das bedeutet, dass das Feld irgendwo Quellen (auch Flussquellen genannt) haben muss, d. h., es darf nicht überall  $\operatorname{div} \vec{E} = 0$  sein, denn sonst hätten wir kein Feld mehr.

Ein reines Wirbelfeld ist ein Feld für das irgendwo  $\vec{E} \neq 0$  und überall  $\operatorname{div} \vec{E} = 0$ .

Ein beliebiges, allgemeines Feld wird weder zu der einen noch zu der anderen Klasse gehören. Trotzdem spielen die Begriffe in der Elektrodynamik eine große Rolle. Der Grund dafür ist, dass man sich gern vorstellt, in der ganzen Welt befände sich nichts weiter als z. B. ein elektrischer Dipol, ein Kondensator oder eine stromdurchflossene Spule. Über solche einfachen Felder kann man dann Aussagen machen wie: Das elektrische Feld eines elektrischen Dipols ist ein Potenzialfeld, oder das elektrische Feld in der Umgebung einer Spule, deren magnetischer Fluss sich zeitlich ändert, ist ein Wirbelfeld.

Die Einfachheit dieser Klassifizierung gibt manchmal Anlass zu einer Schlussfolgerung, mit der man übers Ziel hinausschießt – wie die in unserem Zitat: Ein induziertes elektrisches Feld habe kein Potenzial.

Um das Problem zu sehen, das dabei entstehen kann, müssen wir uns zunächst Klarheit darüber verschaffen, wie man das Wort „Feld“ verwendet.

Man spricht einerseits vom elektrischen Feld einer Punktladung, eines Dipols oder eines Kondensators (oder dem magnetischen Feld einer Spule, einer Leiterschleife, eines Dauermagneten ...). Dabei stellt man sich vor, dass es nichts in der Welt gibt als diese Punktladung oder diesen Dipol. Falls es doch noch andere felderzeugende Objekte gibt, so meint man mit dem Feld des Dipols, den Beitrag zur Gesamtfeldstärke, der

dem Dipol allein entspricht. (Hier wird das Wort Feld gebraucht im Sinne von „Feldstärkeverteilung“ [1]. Die Energie des Gesamtfeldes kann man nicht in Teile zerlegen, die den einzelnen Feldquellen zugeordnet werden könnten.)

Andererseits spricht man aber auch von dem Feld in einem gewissen Raumbereich. Und dabei legt man zunächst keinen Wert darauf, die Quellen oder die Ursachen des Feldes zu benennen.

Aussagen wie die unseres Zitates liegt der Feldbegriff der ersten Art zugrunde. Es sind prinzipielle Aussagen, sie beziehen sich auf Systeme mit unendlicher Ausdehnung. Sie sind gut, um bestimmte Einsichten zu vermitteln, aber unpassend, wenn die Elektrodynamik auf ein praktisches Problem angewendet werden soll. Bei praktischen Problemen geht es nie um Aussagen über die Welt als Ganzes, sondern um Aussagen über wohlbegrenzte Raumbereiche. So fragt man: Befinden sich in diesem Raumbereich Fluss- oder Wirbelquellen? Wenn sich dort keine Wirbelquellen befinden, so kann man ein Potenzial einführen. Befinden sich Wirbelquellen an einigen Stellen, so kann man ein einfache zusammenhängendes Gebiet herausschneiden, das keine Wirbelquellen enthält, und für dieses Gebiet ein Potenzial definieren. Ob außerhalb des Raumbereichs Wirbelquellen liegen, hat für die Entscheidung für oder gegen die Beschreibung mit einem Potenzial keine Bedeutung.

Die Aussage, ein Feld habe kein Potenzial, ist ohnehin etwas unvorsichtig. Das Feld ist ein Begriff aus der realen Welt. Dass ein Feld existiert, ist unabhängig davon, ob wir es mathematisch beschreiben oder nicht. Das elektrische Potenzial ist eine physikalische Größe, d. h. eine Erfindung des Menschen. Die Frage sollte also nicht sein, ob es ein Potenzial gibt oder nicht, sondern ob man ein Potenzial mit Nutzen einführen kann.

Wenn man sich von der Aussage unseres Zitats abschrecken oder beeindrucken ließe, müsste man fast immer ohne das nützliche Werkzeug „Potenzial“ auskommen. So dürfte man nicht sagen, der eine Pol der Steckdose befände sich auf Erdpotenzial, und das Potenzial des anderen Pols ändere sich sinusförmig, denn das Gesamtfeld des Stromkreises hat irgendwo im Transformatorhäuschen ein  $\vec{E} \neq 0$  (abgesehen davon, dass zum tatsächlichen Feld in dem Raum, dessen Steckdose wir betrachten, noch unzählige andere Quellen beitragen). Oder betrachten wir die Schaltung irgendeines elektronischen Geräts. Läuft das Gerät im Batteriebetrieb, so könnten wir den verschiedenen Punkten der Schaltung ein Potenzial zuordnen. Sobald wir das Ladegerät einschalten, wären die Potenziale verboten.

### Herkunft

In der Elektrodynamik operiert man gern mit Punktladungen, Dipolen, Spulen etc. und beschreibt sie so, als gebe es sonst nichts auf der Welt. Das ist für den Anfang ein vernünftiges Vorgehen. Regeln, die man dabei formuliert und die für die Welt als Ganzes gelten, sind aber für räumlich begrenzte Systeme nicht unbedingt verbindlich.

### Entsorgung

Wenn man die Aussage für wichtig hält, so mache man es ordentlich, etwa wie im Bergmann-Schaefer [2], wo (für den Fall magnetischer Felder) die folgenden Lehrsätze formuliert werden: „Im Außenraum eines Stromleiters existiert ein vieldeutiges magnetisches Potenzial; für die Berechnung des Feldes spielt die Vieldeutigkeit keine Rolle.“ ... „Im Innenraum eines stromdurchflossenen Leiters existiert kein magnetisches Potenzial.“

Wem das zu betulich ist, der wird das Thema einfach nicht so hoch hängen, und vor allem nicht einen Satz formulieren wie: „Induzierte elektrische Felder haben kein Potenzial.“

Ob eine Beschreibung mit einem elektrischen Potenzial möglich ist, entscheidet man immer nur in Bezug auf den für das jeweilige Problem relevanten Raumbereich. Oder man wählt den Raumbereich von vornherein so, dass sich in ihm keine Stellen mit rot  $\vec{E} \neq 0$  befinden.

- [1] F. Herrmann, *Das Feld als Raumbereich mit Eigenschaften*, Altlasten der Physik  
 [2] Bergmann-Schaefer, *Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band II, Elektrizität und Magnetismus, Walter de Gruyter, Berlin, 1971, S. 176

## 6.18 Die elektrische Probeladung

### Gegenstand

Die elektrische Feldstärke wird gewöhnlich definiert über die Gleichung

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}.$$

„Unter der Feldstärke versteht man das Verhältnis der auf eine Ladung im Feld wirkenden Kraft zur Größe dieser Ladung.“

Manche Autoren glauben sorgfältiger zu sein, wenn sie definieren:

$$\vec{E} = \lim_{Q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{Q}.$$

### Mängel

Wenn man die elektrische Feldstärke über

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \quad (6.17)$$

einführt, so möchte man erstens ein Verfahren vorstellen, mit dem man die Werte der *Feldstärke*, also einer physikalischen Größe, bestimmen kann, und zweitens möchte man eine Anschauung vom Feld, also eines physikalischen Systems, erzeugen oder fördern. Das sind zwei verschiedene Anliegen, und wir glauben, dass die Gleichung weder für das eine noch für das andere besonders geeignet ist.

1 Ich kann mich nicht daran erinnern, in meinem langen Physikerleben jemals eine elektrische Feldstärke mithilfe von Gleichung (6.17) gemessen zu haben – was nicht heißt, dass ich es nie mit Feldstärken zu tun gehabt hätte. Im Gegenteil. Ich habe viele Male Feldstärken berechnet und experimentell bestimmt – nur nicht mit der Gleichung  $\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$ . Die elektrischen Kräfte sind auf der makroskopischen Skala so winzig, dass man mit einer solchen Messung nicht viel Freude hätte. Es werden zwar entsprechende Demonstrationsversuche empfohlen, aber diese sind nicht leicht zu durchschauen: Eine elektrisch geladene Kugel, die an einem Faden zwischen den Platten des Demonstrationskondensators hängt, wird ausgelenkt. Da die Platten elektrisch leitend sind, bewirkt die Kugel aber eine Verschiebung der Ladung auf den Platten, und wenn das Ergebnis einigermaßen korrekt herauskommt, so weiß man nicht, warum eigentlich.

Wie bestimmt man aber eine Feldstärke praktisch? Im Prinzip eignet sich jede Gleichung, in der die elektrische Feldstärke auftritt. Im Fall des homogenen Feldes eines Kondensators geht es besonders bequem mithilfe von  $|\vec{E}| = U/d$ . Recht gut geht es auch über die mechanische Spannung im Feld:

$$\sigma = \frac{\epsilon_0}{2} \vec{E}^2$$

Die mechanische Spannung  $\sigma$  oder Impulsstromdichte bestimmt man aus Kraft (= Impulsstrom) und Fläche. Beim Kondensator misst man die Kraft, die die eine Platte auf die andere ausübt (den Impulsstrom, der durch das Feld von der einen zur anderen Platte fließt).

Ein weiteres Problem bei der Messung, bzw. Definition über  $\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$  ist, dass das Verfahren etwas un-

## Mechanische Spannungen im elektrischen und im magnetischen Feld

durchsichtig ist. Denn die Feldstärke, die man misst, hat einen anderen Wert, als die des Feldes, das sich im Augenblick der Messung am Ort der Probeladung befindet. Das ist wohl auch der Grund dafür, dass manche Autoren den Wert der Probeladung gegen null gehen lassen. So schafft man scheinbar begriffliche Klarheit. Dass die Probeladung klein sein soll, ist plausibel, und man weiß ja auch von anderen Messungen, dass das Messgerät den zu messenden Wert nicht verändern soll. (Ein Voltmeter soll einen hohen Innenwiderstand haben, ein Thermometer eine geringe Wärmekapazität.) In unserem Fall ist es aber nicht so, dass eine große Probeladung die Messung verfälscht (wenigstens solange man von Influenzeffekten absehen kann, d.h. solange alle Ladungen fixiert sind). Tatsächlich darf die Probeladung beliebig groß sein. Sie darf auch viel größer sein als die Ladungen, die das zu messende Feld erzeugen. Das Feld, dessen Feldstärke man messen will, wird dann zwar völlig entstellt, aber trotzdem liefert die Messung den korrekten Wert.

Man muss die Probeladung also gar nicht klein wählen. Wenn man sie doch klein wählt, entsteht das praktische Problem, dass der ohnehin schon kleine Effekt noch kleiner wird.

- 2 Wenn die Anschauung vom Feld nur auf Gleichung (6.17) beruht, entsteht der Eindruck, die Kraft auf eine Probeladung sei das einzige Merkmal des Feldes, seine einzige Eigenschaft. Das ist aber ein schlechter Ausgangspunkt für ein Verständnis der Elektrodynamik, das voraussetzt, dass man Felder als eigenständige Gebilde kennenlernt.

Das meiste „elektromagnetische Geschehen“ in der Welt hat nichts mit der elektrischen Ladung zu tun. Die Ladung stellt nur die Verbindung zwischen elektromagnetischem Feld und Materie dar.

### Herkunft

Maxwell macht es so — auf einer der ersten Seiten seines über 1000-seitigen Werkes. Es mag damit zusammenhängen, dass es Maxwell natürlich erschien, die Elektrodynamik auf die Mechanik zurückzuführen.

### Entsorgung

Man koppelt die Anschauung vom Feld nicht an erster Stelle an die Kraft auf die Probeladung. Man führt das Feld ein als eigenständiges System mit verschiedenen Eigenschaften, insbesondere auch als Energiespeicher. Man zeigt dann, dass man es mit einer einzigen vektoriellen Größe eindeutig charakterisieren kann. Und erst dann gibt man Messverfahren für diese Größe an, aber nicht nur das eine mit Kraft durch Probeladung, sondern auch andere.

## 6.19 Mechanische Spannungen im elektrischen und im magnetischen Feld

### Gegenstand

Elektrische und magnetische Felder stehen unter mechanischer Spannung. Diese Spannungen sind kräftig und für jedermann erkennbar. Sie berechnen sich nach einer einfachen Gleichung. Trotzdem werden sie in Schul- und in Hochschulbüchern kaum angesprochen. Manchmal werden sie als fiktive Spannungen abgetan.

### Mängel

Wenn man elektrische und magnetische Kräfte ohne die Zugspannungen in den Feldern behandelt, so erscheinen diese Kräfte zwangsläufig als Fernwirkungen. Wenn man sagt, dass sich zwei Kondensatorplatten anziehen, ohne zu erklären, dass das zwischen ihnen liegende Feld unter Zugspannung steht, so kann man nur schließen, dass zwischen den Platten eine Fernkraft wirkt. Eine solche Vorstellung hält aber niemand mehr für möglich, seit es die Maxwell'sche Elektrodynamik gibt. Schon Newton hatte Fernwirkungen für eine unsinnige Idee gehalten, und auch Maxwell sagt immer wieder, dass er von einer *actio in distans* nichts hält.

### Herkunft

Das Problem ist, dass der Kraftbegriff, den wir benutzen, Fernwirkungen nahelegt. Newton hatte den Kraftbegriff und die zugehörige Sprache widerwillig eingeführt. Er konnte nicht anders, denn er hatte den Feldbegriff noch nicht. Als mit Faraday und Maxwell die Felder in die Physik kamen, war es schon zu spät [1]. Die Newton'sche Notlösung (Körper A übt auf Körper B eine Kraft aus, ohne dass das dazwischenliegende Medium dabei eine Rolle spielt) war zur Konvention geworden. Es kam aber noch ein anderes Unglück hinzu: Mit dem Verschwinden des Äthers aus der Physik wurde das Feld zu einer Schimäre, kaum mehr als ein mathematisches Hilfsmittel zur Berechnung von Kräften. Ein Gebilde, das unter mechanischer Spannung steht, war viel zu konkret, um zu der Vorstellung vom Feld zu passen, die das ätherlose Interregnum charakterisierte. Als sich der leere Raum mit der allgemeinen Relativitätstheorie und mit der Quantenelektrodynamik wieder zu füllen begann, war es längst zu spät. Die mechanischen Spannungen im Feld blieben fiktiv, oder schlimmer: Sie wurden einfach ignoriert.

### Entsorgung

Man nehme das Feld als Gegenstand Ernst. Es hat alle Standardeigenschaften, die materielle Systeme auch ha-

ben, nur eben in anderer Ausprägung. Die mechanischen Spannungen im elektrischen und im magnetischen Feld lassen sich leicht aus den Feldstärken berechnen. Für das elektrische Feld ist die (Zug-)Spannung (Kraft pro Fläche) in Feldlinienrichtung:

$$\sigma_{\parallel} = -\frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}|^2$$

Die (Druck-)Spannung quer zu den Feldlinien ist:

$$\sigma_{\perp} = +\frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}|^2$$

Die Beträge sind also gleich der Energiedichte im Feld. Die Ausdrücke für das magnetische Feld sind analog: Statt  $\epsilon_0$  steht  $\mu_0$ , und statt  $\vec{E}$  steht  $\vec{H}$ .

Um zu helfen, sich das Feld als etwas Konkretes, wirklich Vorhandenes vorzustellen, erwähne ich im Unterricht gern die Tatsache, dass ein Liter Magnetfeld eines Neutronensterns eine Masse von 1 kg hat und dass dieser Liter dort  $2 \cdot 10^{11}$ -mal so viel wiegt wie ein Körper von 1 kg auf der Erde.

[1] J. C. Maxwell: *Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus*, Erster Band, Artikel 105, S. 155: „Abstrahirt man aber von einer *actio in distans* und sucht die Einwirkung zweier *electrischer Systeme* aufeinander aus einem Zwange, der in gewisser Weise im Zwischenmedium verteilt ist, abzuleiten, so ist klar, dass man die ganze mechanische Wirkung von  $E_2$  auf  $E_1$  muss berechnen können, wenn man die Zwangskräfte in jedem Punkte einer Fläche  $s$ , welche  $E_1$  von  $E_2$  trennt und  $E_1$  ganz einschliesst, kennt.“

(Quellen) ausgehen und an negativen Ladungen (Senken) enden.“ [2]

### Mängel

- Wenn hier von magnetischen Feldlinien gesprochen wird, sind die Feldlinien der magnetischen Flussdichte  $\vec{\Phi}$  gemeint. Dass Feldlinien Anfang und Ende haben können, ist keine Besonderheit des elektrischen Feldes. Genauso wie die  $\vec{E}$ -Feldlinien elektrostatischer Anordnungen Anfang und Ende haben, so haben auch die  $\vec{H}$ -Feldlinien magnetostatischer Anordnungen Anfang und Ende: Sie beginnen am Nordpol und enden am Südpol eines magnetisierten Körpers.
- Aus der Tatsache, dass das  $\vec{B}$ -Feld divergenzfrei ist, folgt nicht, dass die  $\vec{B}$ -Feldlinien geschlossen sind, und sie sind es auch im Allgemeinen nicht. Die Gleichung

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

sagt lediglich, dass die  $B$ -Linien keinen Anfang und kein Ende haben.

Was meint man überhaupt, wenn man sagt, Feldlinien seien geschlossen? Wahrscheinlich stellt sich jeder, der die zitierten Sätze liest, Folgendes vor: Man hat einen elektrischen Strom, der auf einem wohl definierten Weg fließt, also typischerweise in einem Draht. Eine beliebig ausgewählte Feldlinie läuft um diesen Strom herum. Wenn man an einem Punkt der Linie beginnt und der Linie folgt, so kommt man, nachdem man einmal um den Strom herumgelaufen ist, wieder an den Ausgangspunkt zurück.

Nun gibt es keinen physikalischen Grund dafür, dass sich eine Feldlinie, nachdem sie eine Runde gedreht hat, schließt. Praktisch hat sie auch kaum eine Chance dazu. Wenn sie es ausnahmsweise doch tut, so hat das keinen physikalischen, sondern einen geometrischen Grund. Es ist etwa der Fall, wenn der Draht gerade und unendlich lang ist oder oder wenn ein endlicher Stromkreis ganz in einer Ebene verläuft. Schon eine kleine Abweichung davon führt dazu, dass eine Feldlinie nach einmaligem Umlauf ihren Ausgangspunkt verfehlt. Man mag glauben, auch das Feld einer zylindrischen oder torusförmigen Spule sei so beschaffen, dass die Feldlinien geschlossen sind. Sie sind es aber nicht [3]. Die unvermeidliche Helizität jeder Spule bewirkt, dass eine Feldlinie nach einmaligem Umlauf ihren Ausgangspunkt nicht wieder trifft.

Dass sich die Feldlinien nicht schließen, sieht man etwa an der Stromverteilung von Abb. 6.6: ein gerader

## 6.20 Geschlossene magnetische Feldlinien

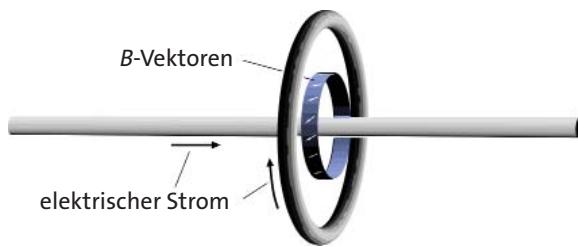
### Gegenstand

Es wird oft gesagt, dass die magnetischen Feldlinien geschlossen sind:

1 „Der [...] Unterschied liegt darin, dass elektrische Feldlinien immer auf positiven Ladungen beginnen und auf negativen Ladungen enden, während es für magnetische Feldlinien keine Punkte im Raum gibt, an denen sie anfangen oder enden, denn es existieren keine magnetischen Monopole. Stattdessen bilden die magnetischen Feldlinien geschlossene Schleifen.“ [1]

2 „Das Magnetfeld eines Stromes hat immer in sich geschlossene Kraftlinien, im Gegensatz zu den elektrostatischen Feldlinien, die von positiven Ladungen

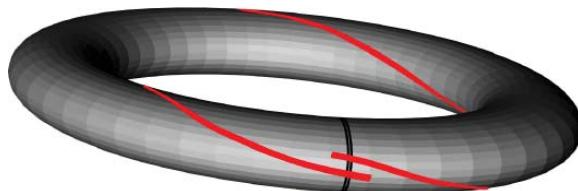
## Geschlossene magnetische Feldlinien



**Abb. 6.6** Gerader Strom und Ringstrom. Die Feldlinien in der Nähe der Ringebene bilden innen eine Linksschraube und außen eine Rechtsschraube.

elektrischer Strom und ein Ringstrom. Wir betrachten die Feldvektoren in der Ringebene. Innerhalb des Rings ergibt die Überlagerung der Felder von Ringstrom und geradem Leiter ein Feld mit einer Linksschraubenstruktur, außerhalb bilden die Feldlinien eine Rechtsschraube. Die Wahrscheinlichkeit, dass man auf einer Feldlinie genau zu seinem Ausgangspunkt zurückkommt, ist daher null.

Ein anderes Beispiel für nicht geschlossene Feldlinien zeigt Abb. 6.7. Ein homogen magnetisierter, biegsamer Dauermagnet mit zylindrischer Querschnittsfläche wird um die Zylinderachse verdrillt, dann verbogen und zu einem Torus geschlossen. Die Magnetisierungslinien, und damit die  $B$ -Linien, winden sich nun spiralförmig um die Torus-Achse (die vorher die Zylinderachse war) herum und treffen sich im Allgemeinen nicht wieder.



**Abb. 6.7** Ein biegsamer, ursprünglich zylinderförmiger Dauermagnet wird verdrillt und dann zu einem Torus verbogen.

Bei magnetischen Feldern in der Natur, etwa dem Feld im Innern der Erde oder bei kosmischen Magnetfeldern, sind die Feldlinien so verwickelt, dass man wohl gar nicht auf die Idee käme, man könnte, wenn man einer Linie folgt, je wieder zu seinem Ausgangspunkt zurückkommen.

Ein Beispiel aus der Technik, bei dem die Feldlinien nach einmaligem Umkreisen eines Stroms den Aus-

gangspunkt weit verfehlt, ist das Magnetfeld im Plasma eines Fusionsreaktors.

Dass  $B$ -Feldlinien nicht geschlossen sind, wurde 1951 in einem schönen Artikel (ohne eine einzige Gleichung oder Abbildung) von Joseph Slepian im *American Journal of Physics* begründet. In den folgenden Jahrzehnten entstand eine umfassende Literatur über den Verlauf von Feldlinien, siehe [3], [4] und [5] und die dort zitierte Literatur.

### Herkunft

- 1 Wir haben es im Unterricht und in der Elektrodynamikvorlesung meist nur mit sehr einfachen magnetischen Feldern zu tun, nämlich mit den Feldern von Stab- und Hufeisenmagneten, und mit Feldern von elektrischen Strömen in geraden elektrischen Leitern, in Leiterschleifen und in Spulen. Bei einem idealen Stabmagneten, d. h. einem Magneten, der exakt homogen magnetisiert ist, ebenso wie bei einem idealen Hufeisenmagneten, wären die Feldlinien tatsächlich geschlossen; ebenso beim ideal geraden Draht und bei der idealen Leiterschleife. Im Fall der Spule sind sie es noch annähernd. Dieses Umfeld verleiht wohl zu dem Schluss, die Feldlinien seien immer geschlossen.
- 2 Man hört manchmal, die Feldlinien müssten geschlossen sein, weil  $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ . Dass dieser Schluss nicht stimmen kann, ist aber leicht einzusehen: Dann müsste ja aus der Tatsache, dass eine Wasserströmung divergenzfrei ist, auch folgen, dass die Stromlinien der Wasserströmung (genauer: die der Masseströmung) geschlossen sein müssten, was wohl niemand behaupten würde.
- 3 Feldlinien sind ein Werkzeug zur grafischen Darstellung von Feldstärkeverteilungen. Wahrgenommen werden sie aber oft als etwas, dem eine physikalische Realität zukommt. Wenn man sich die Feldlinien als physikalische Gebilde vorstellt, scheint ein Argument dafür zu sprechen, dass sich jede Feldlinie einmal schließen muss, auch wenn es nicht gleich beim ersten Umlauf ist. Wir betrachten statt der Feldlinien einen Zwirnsfaden. Jemand hat aus einem solchen Faden ein wirres Käneel gemacht und uns versichert, dass der Faden keinen Anfang und kein Ende habe. In diesem Fall ist der Schluss, dass der Faden geschlossen ist, richtig. Warum funktioniert dieses Argument nicht bei Feldlinien? Feldlinien sind keine physikalischen Gebilde, sondern mathematische Objekte, nämlich Linien. Man könnte also höchstens sagen, dass man, wenn man einer Feldlinie folgt, seinem Ausgangspunkt irgendwann einmal wieder beliebig nahekommt.

### Entsorgung

Man vermeidet die Aussage, die Feldlinien seien geschlossen. Es genügt zu sagen, sie haben keinen Anfang und kein Ende. Allerdings liegt das Übel tiefer und man hätte so nur ein Symptom beseitigt. Die eigentliche Ursache der Fehlvorstellung ist, dass die Feldlinien oft als etwas physikalisch Reales betrachtet werden.

Wichtiger ist es daher, dass man die Behandlung des Feldes nicht damit beginnt, dass man Feldlinienbilder zeichnet. Das erste Bild eines Feldes, das man zeigt, könnte z. B. eine Darstellung der Energiedichte durch Grautönungen sein, Abb. 6.8.

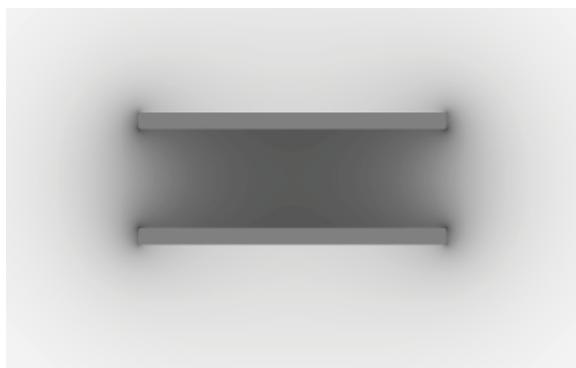


Abb. 6.8 Darstellung des Feldes einer Spule mit Grautönung

Erst danach spricht man die Tatsache an, dass ein Feld in jedem Punkt eine ausgezeichnete Richtung hat, also nicht isotrop ist. Um diese Eigenschaft grafisch darzustellen, zeichnet man zunächst keine Feldlinien, sondern Vektorpfeile. Danach kommt man zu einer Darstellung, bei der nicht nur Feldlinien, sondern auch die Feldflächen gezeichnet werden, Abb. 6.9.

Mit „Feldflächen“ meinen wir die Orthogonalflächen zu den Feldlinien (die in Potenzialfeldern mit den Äqu

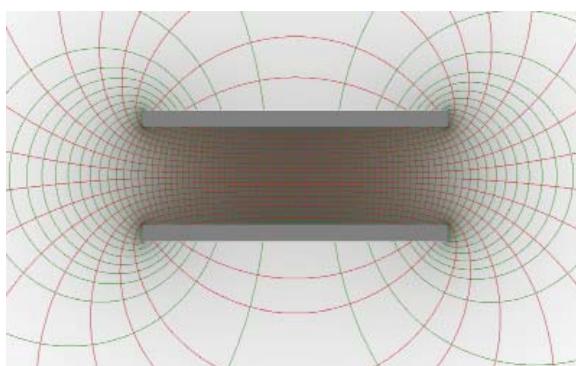


Abb. 6.9 Darstellung des Feldes einer Spule mit Feldlinien, Feldflächen und Grautönung

potenzialflächen identisch sind). Für Maxwell war es selbstverständlich, in jedem seiner Bilder Feldlinien und Feldflächen darzustellen [6]. Feldlinien und Feldflächen haben auch eine leicht verständliche Bedeutung: In Richtung einer Feldlinie herrscht Zug-, in allen Richtungen quer dazu, also den Richtungen parallel zu den Feldflächen, Druckspannung. Wenn man das weiß, wird man die Feldlinien nicht mehr als fadenartige Gebilde sehen, die sich durch das Feld hindurchziehen, sondern als ein Mittel, die mechanischen Spannungen im Feld darzustellen.

- [1] P. A. Tipler, *Physik*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2003, S. 816
- [2] Gerthsen, Kneser, Vogel, *Physik*, 13. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1977, S. 256
- [3] M. Lieberherr, *The magnetic field lines of a helical coil are not simple loops*, Am. J. Phys. 78, 2010, S. 1117-1119
- [4] M. Schirber, *Magnetic Fields in Chaos*, Phys. Rev. Focus, <http://focus.aps.org/story/v24/st24>
- [5] J. Slepian, *Lines of Force in Electric and Magnetic Fields*, Am. J. Phys. 19, 1951, S. 87-90
- [6] J. C. Maxwell, *Lehrbuch der Elektricität und des Magnetismus*, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1838, Tafeln XII bis XXI

## 6.21 Pole einer Spule

### Gegenstand

Das Feld einer zylindrischen Spule hat im Außenraum dieselbe Gestalt wie das eines Stabmagneten derselben geometrischen Maße. Auf diese Übereinstimmung der Felder wird bei der Einführung der Spule gewöhnlich hingewiesen. Darüber hinaus wird oft erklärt, die Spule habe an ihren Enden Pole: „**Stromführende Spulen haben Pole wie Stabmagneten**“ [1]. Manchmal enthält eine Abbildung des Feldes der Spule noch ein „N“ und ein „S“ an den beiden Spulenenden.

Ähnliches wird auch von einem Kreisring, in dem ein elektrischer Strom fließt, behauptet: „Der stromführende Kreisring ist ein Magnet mit zwei Polen“ [1]. Auf der entsprechenden Abbildung ist über der Leiterschleife eine kreisförmige Fläche aufgespannt, auf welcher der Buchstabe „N“ steht. Das zugehörige „S“ hat man sich auf der Rückseite der Fläche zu denken.

### Mängel

Wo magnetische Pole liegen, erkennt man am besten an der Magnetisierung  $\vec{J}$ . Die Magnetisierung ist eine Vektorgröße, die den magnetischen Zustand von Materie

## Pole einer Spule

beschreibt. Sie sagt uns von jedem Volumenelement, wie groß dessen magnetisches Dipolmoment ist und welche Richtung es hat. Abb. 6.10 zeigt die Magnetisierung einer Magnetscheibe, deren Pole auf ein und derselben Seite der Scheibe liegen, zusammen mit dem zugehörigen  $J$ -Feldlinienbild.

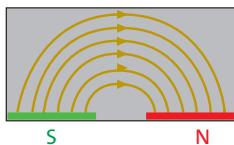


Abb. 6.10 Magnetisierungslinien und Pole eines Magneten

Dort wo die Magnetisierungslinien beginnen, befindet sich ein Südpol, wo sie enden ein Nordpol. Weder die Spule noch der Stromring haben eine von null verschiedene Magnetisierung. Folglich haben sie auch keine Pole.

Um die Lage von magnetischen Polen festzustellen, kann man auch das Feldlinienbild der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$  betrachten. Am Nordpol (wo die Magnetisierungslinien enden) beginnen die  $H$ -Feldlinien, und am Südpol (wo die Magnetisierungslinien beginnen) enden sie. Die  $H$ -Feldlinien einer Spule und jeder anderen Stromverteilung haben keine Divergenzen, also existieren auch keine Pole.

Es trifft durchaus zu, dass das Feld der Spule im Außenraum mit dem des zylindrischen Stabmagneten übereinstimmt, und das der Stromschleife mit dem eines magnetischen Blattes. Man mag auf diese Übereinstimmung hinweisen. Warum geht man aber so weit zu behaupten, die Spule und der Ringstrom haben Pole? Dann ist der Vergleich nämlich keine Hilfe mehr, sondern eine ernsthafte Behinderung. Er führt dazu, dass man nicht mehr versteht, was ein Magnetpol bei einem Dauer- oder Elektromagneten wirklich ist.

Es gibt auch berechtigte Zweifel darüber, ob der Hinweis auf die Ähnlichkeit der Felder eine Hilfe darstellt. Welche Gestalt muss denn das magnetische Blatt haben, damit sein Feld gleich dem der Stromschleife ist? Im Fall einer ebenen Stromschleife ist man sicher geneigt, ein ebenes magnetisches Blatt als Ersatzmagneten zu wählen. Das muss aber nicht sein. Jede beliebige andere Fläche tut es auch, vorausgesetzt nur, ihr Rand stimmt mit dem Verlauf des Stroms überein.

Und schließlich: Wenn eine Spule und auch ein Kreisstrom Pole haben, muss dann nicht auch jede andere Stromverteilung Pole haben? Wo liegen die Pole, wenn die Stromschleife verknotet oder verknäult ist? Und wo liegen die Pole bei einem geraden Draht? (In

diesem Fall wird gewöhnlich ausdrücklich betont, dass es keine Pole gibt.)

## Herkunft

Der Vergleich der Felder von Dauermagneten und Stromverteilungen gehört zu den Standardthemen der Elektrodynamikkurse der Universität. Er ist dort durchaus am Platz, denn man lernt etwas über Übereinstimmung und Unterschiede zwischen Fluss- und Wirbelquellen: Wie müssen Divergenzen verteilt sein, damit das resultierende Feld dieselbe Gestalt hat wie ein durch Rotationen verursachtes Feld? Offenbar hat hier die Schulphysik mit wohl gemeinter Absicht eine Anleihe gemacht. Dass dabei mit der Elektrodynamik auf unzulässige Art umgegangen wird, ist den Autoren offenbar nicht bewusst. Es wurde schon früher gezeigt [2], dass die Passagen über Magnetpole in den meisten Schulbüchern fehlerhaft sind.

Die Vorstellung, dass Ströme Magnetpole verursachen, wird auch dadurch am Leben gehalten, dass man in der Geografie vom magnetischen Nord- und Südpol der Erde spricht. Im Sinn der Physik sind diese „Pole“ keine magnetischen Pole, denn erstens wird das magnetische Feld der Erde durch Ströme verursacht, und zweitens sind die „magnetischen Pole“ der geografischen Definition zufolge Punkte der Erdoberfläche (die Punkte, in denen die Horizontalkomponente der magnetischen Feldstärke gleich null ist). Auch wenn das Feld der Erde ferromagnetischen Ursprungs wäre, so wären die Pole nicht Punkte an der Erdoberfläche, sondern ausgedehnte Bereiche im Erdinnern.

Man findet auch gelegentlich die Aussage, die Erde selbst sei ein Magnet [3, 4]. Die Vorstellung geht auf Gilbert zurück, der erkannte, dass die Ursache dessen, was wir heute das magnetische Feld der Erde nennen, im Innern der Erde, und nicht etwa am Himmel zu suchen ist. Er vermutete, dass sich im Innern der Erde ein Magnet befindet. Sein Werk „De Magnete ...“ erschien im Jahr 1600, also 220 Jahre vor Oersteds Entdeckung des Zusammenhangs zwischen elektrischem Strom und magnetischem Feld, und lange bevor man wusste, dass es im Innern der Erde so heiß ist, dass kein Material ferromagnetisch sein kann. Die Aussage, die Erde sei ein Magnet, ist zwar plausibel, aber nicht zutreffend. Wenn man einen Vergleich sucht, so wäre es schon richtiger zu sagen, die Erde sei ein stromdurchflossenes Drahtknäuel.

## Entsorgung

Man mag darauf hinweisen, dass das magnetische Feld der Spule im Außenraum mit dem eines Stabmagneten übereinstimmt. Schon bei der Stromschleife ist ein entsprechender Hinweis aber nicht mehr hilfreich. Man

sage auf keinen Fall, eine Spule oder eine Stromschleife habe magnetische Pole. In Abbildungen von magnetischen Wirbelfeldern gehören nicht die Bezeichnungen „N“ und „S“. Beim Elektromagneten vermeide man zu sagen, der Elektromagnet habe Pole. Es ist klarer, wenn man sagt, am Eisenkern des Elektromagneten bilden sich Pole.

- [1] Dorn-Bader, *Physik*, Mittelstufe, Schroedel Schulbuchverlag, 1997, S. 146
- [2] F. Herrmann, *Das Feld von Dauermagneten*, Altlasten der Physik, Aulis Verlag, Köln, 2002, S. 163
- [3] GROSS BERHAG, *Physik für die Sekundarstufe I*, Ernst Klett Schulbuchverlag, Stuttgart, 1996, S. 112
- [4] *Einblicke Physik und Chemie*, Regionalausgabe Rheinland-Pfalz, Ernst Klett Schulbuchverlag 1996, S. 93

## 6.22 Die Lenz'sche Regel und das Minuszeichen im Induktionsgesetz

### Gegenstand

Im Oberstufenunterricht wird im Rahmen der Elektrodynamik die Lenz'sche Regel (in manchen Büchern auch „Lenz'sches Gesetz“ genannt) formuliert. Nach der Lenz'schen Regel sind induzierte Ströme so gerichtet, dass sie die Bewegung, durch welche sie erzeugt werden, zu hemmen versuchen, oder dass das Magnetfeld des induzierten Stroms die Änderung des bestehenden Feldes hindert. Die Lenz'sche Regel macht eine Aussage über die Richtung eines Vektors: des Stromdichtevektors eines induzierten elektrischen Stroms.

Außerdem versucht man zu zeigen, wie das Minuszeichen im Induktionsgesetz

$$U = -n \frac{d\Phi}{dt}$$

aus der Lenz'schen Regel folgt. Die Argumentation geht etwa so: In eine Spule, die an eine Batterie angeschlossen ist, schiebt man einen Eisenkern hinein. Man beobachtet, dass die elektrische Stromstärke für kurze Zeit abnimmt.  $d\Phi/dt$  ist positiv (sagt man), die induzierte Spannung negativ, also gehört ein Minuszeichen ins Induktionsgesetz.

Diesem Minuszeichen wird nun gewöhnlich noch eine besondere Bedeutung gegeben, indem man, oft recht ausführlich, zeigt, dass der Energiesatz verletzt wäre, wenn statt des Minus- ein Pluszeichen im Induktionsgesetz stände.

### Mängel

Wir haben es hier mit einem recht komplizierten Geflecht von durch Tradition in den Unterricht gelangten Aussagen einerseits und schlichten Fehlern in der Schlusskette andererseits zu tun.

- Wenn man ein Vorzeichen in einer Gleichung erklärt, so sollte die Aussage, die das Vorzeichen macht, anhand der Gleichung selbst nachprüfbar sein. Das Minuszeichen im Induktionsgesetz besagt, dass die induzierte Spannung das zur Änderung des magnetischen Flusses entgegengesetzte Vorzeichen hat. Um diese Aussage zu prüfen, muss man wissen, wie man Flussänderung und elektrische Spannung vorzeichenrichtig messen kann.

Man stelle sich vor, die folgende Flussänderung werde realisiert: Der  $B$ -Vektor weist in die positive  $x$ -Richtung und sein Betrag, und damit seine  $x$ -Komponente nimmt zu. Welches Vorzeichen hat  $d\Phi/dt$ ? Bleibt das Vorzeichen dasselbe, wenn man das Koordinatensystem um  $180^\circ$  dreht, sodass der  $B$ -Vektor in die negative  $x$ -Richtung weist? Dieser Fluss werde nun von einem Leiter umschlossen, der in der  $y$ - $z$ -Ebene liegt und durch ein Voltmeter unterbrochen ist. Wie sieht man es dem Voltmeter an, ob die induzierte Spannung positiv oder negativ ist?

Die Schüler lernen nicht, diese Fragen zu beantworten. Daher ist für sie das mühsam erarbeitete Minuszeichen im Induktionsgesetz wertlos.

- In manchen Büchern begegnet man bei der Herleitung des Minuszeichens einem Fehler. Dieser scheint ein Eigenleben zu führen, denn obwohl man das Minuszeichen auf die unterschiedlichsten Arten begründen könnte, findet man ein bestimmtes Begründungsmuster mitsamt seinem Fehler immer wieder. Beim Einschalten des elektrischen Stroms in einer Spule, so liest man, ist  $d\Phi/dt > 0$ . Dieser Schluss ist nicht korrekt. Der magnetische Fluss hängt mit der Feldstärke zusammen gemäß

$$\Phi = \int \vec{B} d\vec{A}$$

Da das Flächenelement  $d\vec{A}$  ein Vektor ist, erhält man den Fluss  $\Phi$  positiv oder negativ, je nachdem, wie man die Integrationsfläche orientiert.

- Wenn man dem Minuszeichen in einer Gleichung so viel Aufmerksamkeit schenkt, so müssten nicht nur die Minuszeichen, sondern natürlich auch die Pluszeichen in unzähligen anderen Gleichungen einer ähnlichen Betrachtung Wert sein. Was bedeutet es, dass im Ohm'schen Gesetz, im zweiten Newton'schen Gesetz oder in  $P = v \cdot F$  ein Pluszeichen steht? Und welches Vorzeichen gehört ins Hooke'sche Gesetz?

## Die Lenz'sche Regel und das Minuszeichen im Induktionsgesetz

Betrachten wir eine senkrecht hängende Feder. Wir können unter vier Kräften wählen: die Kraft der Feder auf die obere Aufhängung, die Kraft der Feder auf die untere Aufhängung, die Kraft der oberen Aufhängung auf die Feder und die der unteren Aufhängung auf die Feder. Alle vier Kräfte sind dem Betrage nach gleich, zwei weisen nach oben, zwei nach unten. Wir haben die Wahl. Obwohl die Frage sicher nicht leichter zu beantworten ist als die nach dem Vorzeichen im Induktionsgesetz, wird sie gewöhnlich recht kurz abgetan.

- Warum betont man ausgerechnet hier, dass ein falsches Vorzeichen zur Verletzung des Energiesatzes führt? Es entsteht der Eindruck, als hätte die Induktion in dieser Hinsicht eine besondere Überraschung zu bieten. Es gibt unzählige andere Gesetze, aus denen eine Verletzung des Energiesatzes folgt, wenn man ein Vorzeichen umkehrt, etwa  $U = R \cdot I$ ,  $P = v \cdot F$  oder  $F = -D s$ . Ebenso kann man durch Setzen eines falschen Vorzeichens jeden anderen Erhaltungssatz, so etwa auch den Entropiesatz verletzen.
- Wir haben nichts dagegen einzuwenden, einen Wissenschaftler dadurch zu ehren, dass man ein Gesetz mit seinem Namen verbindet. Es ist aber vielleicht doch etwas übertrieben, die Orientierung eines Stromdichtevektors, die ohnehin aus den Maxwell'schen Gleichungen folgt, mit einem solchen Namen zu verbinden oder sogar zu einem eigenen Gesetz zu erheben.

### Herkunft

Gewöhnlich entsteht eine umfassende Theorie aus Vorläufern, manchmal aus mehreren. Wir leisten uns nun oft den Luxus, jeder neuen Generation von Lernenden, nicht nur die letzte und meist klare Version der Theorie vorzustellen, sondern zusätzlich noch die Vorläufer. Die Lenz'sche Regel ist eines von vielen Beispielen.

Lenz hatte sie 1834, drei Jahre nach Faradays Entdeckung der Induktion, so formuliert: „Fließt in dem primären Kreise A ein Strom und wird in dem secundären Kreise B dadurch, daß man den primären oder auch den secundären Kreis bewegt, ein Strom inducirt, so verläuft die Richtung dieses derartig, daß die electromagnetische Kraftwirkung zwischen dem inducirenden und dem inducirten Strom der relativen Bewegung der Kreise Widerstand leistet“ [1]. Zu dieser Zeit war die Frage nach der Stromrichtung eines induzierten Stroms eine nicht triviale Frage und Lenz' Aussage war eine neue Aussage. Erst 13 Jahre später stellte Helmholtz Energiebilanzen auf, und zeigte, dass die

Lenz'sche Regel aus dem Energiesatz folgte. Und noch einmal 25 Jahre vergingen bis zu Maxwells umfassender Formulierung der Elektrodynamik, in der die Lenz'sche Regel aufgegangen ist.

Dass dem Vorzeichen im Induktionsgesetz so viel Aufmerksamkeit gewidmet wird, ist eine Konvention, deren Ursprung wir nicht kennen. Man bedenke, dass ein physikalisches Problem erst dadurch zum Unterrichtsproblem wird, dass der Lehrer es dazu macht.

### Entsorgung

Was die Lenz'sche Regel betrifft: Wir verzichten darauf, sie als eigene Regel zu formulieren. Stattdessen benutzen wir zwei „Faust-Regeln“: die bekannte Regel für die rechte Hand und eine zu ihr analoge, viel weniger verbreitete Regel für die linke Hand. Die Rechte-Faust-Regel ist Ausdruck der ersten Maxwell'schen Gleichung, die Linke-Faust-Regel folgt aus der zweiten.

Faustregel der rechten Hand: Zeigt der Daumen der rechten Hand in die Richtung des elektrischen Stroms oder in die Richtung der Änderung  $d\vec{E}$  der elektrischen Feldstärke, so weisen die gekrümmten Finger in die Richtung der magnetischen Feldstärke des entstehenden magnetischen Feldes.

Faustregel der linken Hand: Zeigt der Daumen der linken Hand in die Richtung der Änderung  $d\vec{B}$  der magnetischen Flussdichte, so weisen die gekrümmten Finger in die Richtung der elektrischen Feldstärke des induzierten elektrischen Feldes.

Für den Umgang mit dem Vorzeichen im Induktionsgesetz bieten sich zwei Möglichkeiten an.

Entweder man erklärt mit viel Sorgfalt, was positive und negative Werte der verschiedensten physikalischen Größen bedeuten; insbesondere, wie man entscheidet, ob ein elektrischer Strom oder eine elektrische Spannung einen positiven oder einen negativen Wert hat [2]. Will man das Minuszeichen im Induktionsgesetz verstehen, so ist es allerdings damit nicht getan. Man muss auch diskutieren, wie die Konvention lautet, durch die das Vorzeichen des Wegintegrals, mit dem des Flächenintegrals im Stokes'schen Integralsatz miteinander verknüpft sind: Weist der Daumen der rechten Hand in die positive Richtung der Fläche des Flächenintegrals, so zeigen die gekrümmten Finger in die Richtung des Integrationsweges des Linienintegrals. Wir empfehlen, diesen Weg nicht zu gehen, denn er macht den Unterricht schwerfällig und formal, und man gewinnt durch die zusätzliche Mühe kaum physikalische Einsichten.

Die zweite Möglichkeit: Man zögere nicht, wie man es ja ohnehin in vielen Fällen tut, das Induktionsgesetz mit Beträgen, also ohne Minuszeichen, zu formulieren.

[1] J. C. Maxwell, *Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus*, Zweiter Band, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1883, S. 232

[2] F. Herrmann, Stromrichtung und Vorzeichen der Stromstärke, *Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts*, Heft 5, 1982, S. 26

## 6.23 Zwei Ursachen der Induktion

### Gegenstand

Bei der Einführung der Induktion wird manchmal zwischen zwei Realisierungen von Induktionsexperimenten unterschieden.

Einmal wird ein elektrischer Leiter durch ein homogenes, zeitlich konstantes magnetisches Feld bewegt, Abb. 6.11a. Die Erklärung für das Auftreten einer Spannung lautet dann etwa so: Durch die Lorentzkraft werden die Ladungsträger so lange verschoben, bis die entstehende elektrostatische Kraft der Lorentzkraft das Gleichgewicht hält. Zwischen den Enden des Leiterstücks, das sich im Magnetfeld befindet, herrscht dann eine elektrische Potenzialdifferenz, die man mit einem Voltmeter messen kann.

Beim zweiten Induktionsexperiment lässt man die Induktionsleiterschleife ruhen und verändert stattdessen die magnetische Feldstärke – etwa, indem man einen Magneten bewegt, Abb. 6.11b. Wieder schlägt das Voltmeter aus. Mit der Lorentzkraft kann man dieses Experiment nicht erklären, es scheint sich um einen anderen physikalischen Effekt zu handeln.

Die Ergebnisse der beiden Experimente fasst man im Induktionsgesetz

$$U_{\text{ind}} = -d\Phi/dt$$

zusammen. Das Vorgehen wird dann etwa so kommentiert: „Zwei physikalisch unterschiedliche Ursachen für die Induktion lassen sich somit überraschenderweise durch eine Gleichung beschreiben.“

### Mängel

Es handelt sich in den beiden Fällen um ein und dasselbe Experiment, das in zwei verschiedenen Bezugssystemen beschrieben wird.

Wir betrachten zunächst noch einmal das oben als „zweites“ bezeichnete Induktionsexperiment, Abb. 6.11b. Die Leiterschleife ruht und der Dauermagnet bewegt sich. Zur Erklärung der Induktionsspannung brauchen wir die zweite Maxwell'sche Gleichung:

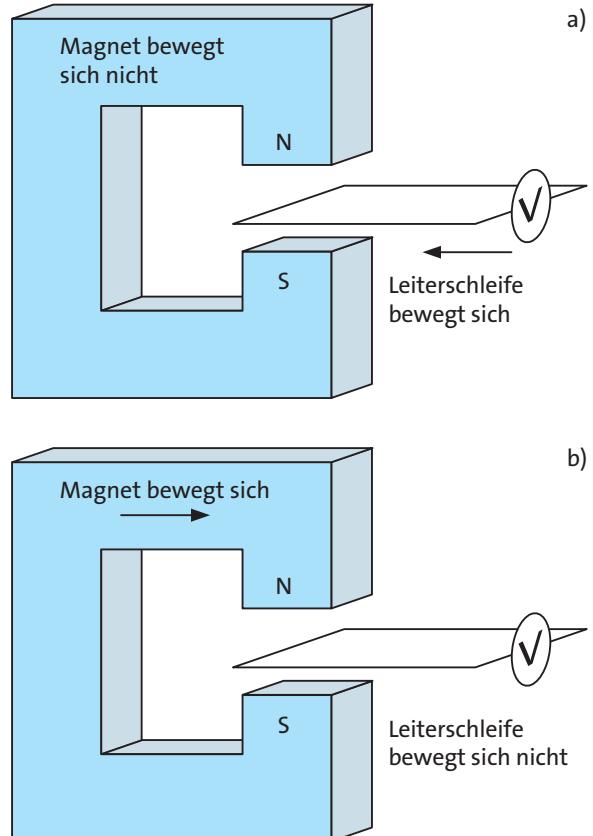


Abb. 6.11 Induktionsexperiment in zwei verschiedenen Bezugssystemen. Oben: Der Magnet ruht, die Leiterschleife bewegt sich. Unten: Der Magnet bewegt sich, die Leiterschleife ruht.

$$\text{rot } \vec{E} = -\dot{\vec{B}} \quad (6.18)$$

Im Innern der Leiterschleife ändert sich die magnetische Flussdichte. Dabei entsteht ein elektrisches Feld mit geschlossenen Feldlinien, also ein elektrisches Wirbelfeld. Mithilfe der integralen Form der zweiten Maxwellgleichung

$$\oint \vec{E} \, d\vec{r} = -\dot{\Phi} \quad (6.19)$$

kann man es so ausdrücken: Der magnetische Fluss durch die Leiterschleife ändert sich. Dadurch entsteht in der Leiterschleife eine Ringspannung.

Nun zu dem anderen, dem oben als „erstes“ bezeichneten Induktionsexperiment, 6.11a. Auf die Ladungsträger in dem Leiterstück, das sich im Magnetfeld befindet, wirkt die Lorentzkraft. Dieser hält eine elektrostatische Kraft das Gleichgewicht. Es entsteht also ein elektrostatisches, d. h. rotationsfreies elektrisches Feld. Die mag-

## Zwei Ursachen der Induktion

netische Flussdichte ist bei diesem Experiment zeitunabhängig. Um auch dieses Experiment mit der zweiten Maxwell'schen Gleichung in Einklang zu bringen, benutzt man einen etwas unlegantem mathematischen Trick. Bei der Berechnung des magnetischen Flusses als Flächenintegral über die Flussdichte nimmt man eine zeitlich veränderliche Integrationsfläche an. Genau genommen entspricht das aber einem versteckten Bezugssystemwechsel.

Wir sehen, dass ein und dasselbe Experiment in zwei Bezugssystemen unterschiedlich beschrieben wird. Beim Übergang vom einen ins andere Bezugssystem transformieren sich die Feldstärken. Nur dadurch ist es möglich, dass wir in einem Fall ein rotationsfreies elektrisches Feld haben und im anderen ein Wirbelfeld.

Um die Konsequenzen eines Bezugssystemwechsels besser zu übersehen, betrachten wir ein noch einfacheres Experiment: Ein einzelner magnetischer Nordpol P

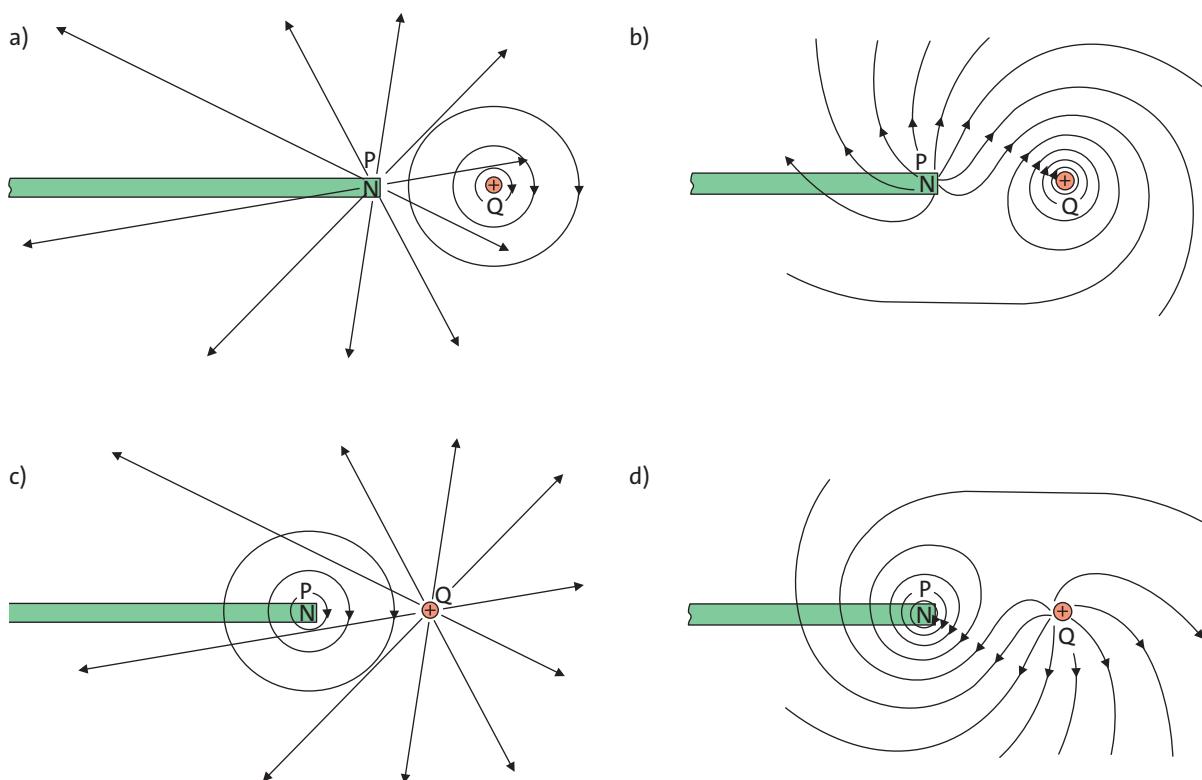
(das Ende eines langen Dauermagneten) bewegt sich relativ zu einem einzelnen positiv geladenen Körper Q, Abb. 6.12.

Die Bewegung erfolgt quer zur Verbindungsgeraden zwischen P und Q. Was passiert, beschreiben wir einmal im Bezugssystem von P (obere Bilder) und einmal in dem von Q (untere Bilder).

### 1. Bezugssystem von P

Die sich mit dem Körper Q bewegende elektrische Ladung (Abb. 6.12a, Bewegung in die Bildebene hinein) stellt einen elektrischen Strom dar. Dieser hat ein magnetisches Feld um sich herum. (Dafür zuständig ist die erste Maxwell'sche Gleichung.) P spürt das magnetische Feld und erfährt eine Kraft nach oben. Auf Q wirkt die nach unten gerichtete Lorentzkraft.

Die Wechselwirkung zwischen P und Q geschieht also über das magnetische Feld. Im linken Teilbild sind



**Abb. 6.12** Ein elektrisch geladener Körper Q bewegt sich relativ zu einem Magnetpol P. Der Vorgang wird in zwei verschiedenen Bezugssystemen beschrieben: a) der Magnet ruht, der geladene Körper bewegt sich nach hinten, in die Bildebene hinein, c) der Körper ruht, der Magnetpol bewegt sich nach vorn, aus der Bildebene heraus. Die Feldlinien im Teilbild a) und b) sind magnetische, in c) und d) elektrische Feldlinien. In den Teilbildern a) und c) sind jeweils die Beiträge von Magnetpol und Ladung zum Feld einzeln dargestellt. Die Teilbilder b) und d) zeigen das resultierende Feld.

die Beiträge von P und Q zum magnetischen Feld einzeln dargestellt. So erkennt man die Kraft auf P im Feld von Q und die auf Q im Feld von P. Man sieht die Kräfte auf P und Q auch dem rechten Teilbild an, in dem das resultierende magnetische Feld dargestellt ist. Oberhalb von Q liegen die Feldlinien dichter als unterhalb. Da quer zu den Feldlinien Druckspannung herrscht, wird Q vom Feld nach unten gedrückt. Auch oberhalb von P sind die Feldlinien dichter als unterhalb. Da in Feldlinienrichtung Zugspannung herrscht, wird P vom Feld nach oben gezogen.

## 2. Bezugssystem von Q

Der sich bewegende Magnetpol P stellt einen magnetischen (Verschiebungs-)Strom dar (Abb. 6.12c, Bewegung aus der Bildebene heraus). Dieser hat ein elektrisches Feld um sich herum. (Dafür zuständig ist die zweite Maxwell'sche Gleichung.) Q spürt das elektrische Feld und erfährt eine Kraft nach unten. Auf P wirkt eine nach oben gerichtete Kraft: das elektrische Analogon zur magnetischen Lorentzkraft (magnetischer Strom im elektrischen Feld). Die Wechselwirkung zwischen P und Q geschieht also über das elektrische Feld. Auch hier kann man die Kräfte sowohl aus dem linken als auch dem rechten Teilbild ablesen.

Das Beispiel zeigt, dass ein Bezugssystemwechsel in der Elektrodynamik dazu führen kann, dass ein Effekt einmal durch die erste und einmal durch die zweite Maxwell'sche Gleichung beschrieben wird, und dass ein und dieselbe Wechselwirkung einmal über das elektrische und einmal über das magnetische Feld erfolgt.

## Herkunft

Bezugssystemwechsel diskutieren wir gewöhnlich nur in der Mechanik und wir sind ungeübt, wenn es um ihre Auswirkungen in der Elektrodynamik geht.

## Entsorgung

Schon aus der Mechanik wissen wir, dass Bezugssystemwechsel Komplikationen bringen, und dass ein ungeschickt gewähltes Bezugssystem die Beschreibung eines Phänomens erschweren kann. Wenn Bezugssystemwechsel nicht das eigentliche Unterrichtsthema sind, so sollte man ihnen lieber aus dem Weg gehen. Um das Phänomen der Induktion zu beschreiben, wählen wir als Bezugssystem dasjenige, indem sich die magnetische Feldstärke zeitlich ändert, also das der Induktionsspule.

Wenn man formuliert: „Durch ein sich änderndes magnetisches Feld entsteht zwischen den Anschlüssen einer Spule eine Spannung“, so hat man das Bezugssystem implizit schon so gewählt.

## 6.24 Die Induktionsspannung

### Gegenstand

- 1 Aus einem Physikbuch für die Oberstufe zur Induktion: „Die Änderung der Stromstärke induziert nämlich in der Spule ein elektrisches Feld, das die Ladungen in gleicher Richtung weitertreibt.“
- 2 Aus einem anderen Oberstufenbuch: „Die Änderung der Stromstärke  $I$  in einer Spule bzw. die zu ihr proportionale Änderung der Magnetfeldstärke  $\vec{B}$  erzeugt in der felderzeugenden Spule selbst eine induzierte elektrische Feldstärke  $\vec{E}_{\text{ind}}$  und eine mit ihr verbundene induzierte Spannung  $U_{\text{ind}}$ , die der Änderung entgegenwirken.“
- 3 Aus einem dritten Oberstufenbuch: „Ändert man die elektrische Stromstärke in der großen Spule, so ändert sich die magnetische Feldstärke, und in der kleinen Spule wird eine Spannung induziert.“
- 4 Aus einem Hochschulbuch zur Experimentalphysik: „Auch für Wechselströme gelten die beiden Kirchhoff'schen Gesetze:
  1. Knotenregel: An jeder Stromverzweigung ist die Summe der zufließenden Ströme gleich der der abfließenden.
  2. Maschenregel: Jede Masche, d. h. jeder geschlossene Teilkreis der Schaltung, hat die Gesamtspannung null. M. a. W.: zwischen zwei Punkten in der Schaltung kommt die gleiche Spannung heraus, gleichgültig, längs welches Zweiges man sie misst ...“

### Mängel

Die Werte der physikalischen Standardgrößen beziehen sich auf eines der folgenden vier topologisch unterschiedlichen Gebilde: einen Punkt (Beispiel: Temperatur), eine orientierte Linie (Beispiel: elektrische Spannung), eine orientierte Fläche (Beispiel: Kraft) oder einen Raumbereich (Beispiel: Masse). (Eine Größe, die sich auf ein komplizierteres Gebilde bezieht, wie der elektrische Widerstand oder die Kapazität, ist im Grunde eine Abkürzung für eine spezielle Kennlinie: der linearen  $I$ - $U$ -Kennlinie.) Wenn man den Wert einer Größe angibt, so muss klar sein, welcher Punkt, welche Fläche oder Linie oder welcher Raumbereich gemeint ist.

Also etwa: Die Temperatur im Punkt P beträgt  $20^{\circ}\text{C}$ , die Masse des Körpers K (im Raumbereich, den K einnimmt) beträgt 500 g, die Kraft an der Schnittfläche S des Seiles beträgt 40 N.

In unseren Zitaten hält man sich weder bei der Spannung noch bei der elektrischen Feldstärke an diese Regel. Beide Größen werden vage einer Spule zugeordnet – aber dort gehören sie nicht hin.

## Die Induktionsspannung

Wir betrachten zunächst Spannungsangaben allgemein. Man kann die elektrische Spannung definieren als Wegintegral über die elektrische Feldstärke:

$$\oint \vec{E} d\vec{r} = -n \phi$$

Eine Spannung bezieht sich auf ein orientiertes Wegstück, in Abb. 6.13 das Wegstück  $s$  von  $P$  nach  $Q$ . Der Integrationsweg kann auch geschlossen sein. Dann bezieht sich die Spannung auf einen geschlossenen orientierten Weg. (Man spricht dann auch von einer Ringspannung.)

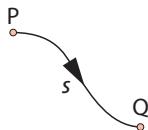


Abb. 6.13 Eine Spannung bezieht sich auf ein orientiertes Wegstück.

Falls das betrachtete elektrische Feld ein Potenzialfeld ist, ist der Wert der Spannung nur vom Anfangs- und vom Endpunkt des Wegstückes abhängig. Wenn  $\varphi_P$  und  $\varphi_Q$  die Werte des Potenzials in den Punkten  $P$  und  $Q$  sind, so kann man eine Spannung  $U_{QP} = \varphi_Q - \varphi_P$  berechnen. Diese Spannung gehört zu dem geordneten Punktpaar  $(P; Q)$ . Der Wert der Spannung  $U_{PQ} = \varphi_P - \varphi_Q = -U_{QP}$ , die zu dem umgekehrt geordneten Punktpaar  $(Q; P)$  gehört, hat das entgegengesetzte Vorzeichen.

Oft kommt es einem nur auf den Betrag der Spannung an. Es hat sich eingebürgert, dass man dann einfach von der Spannung „zwischen zwei Punkten“ spricht, ohne eine Reihenfolge anzugeben – so wie man vom Abstand „zwischen zwei Punkten“ spricht und damit einen positiven Wert meint. Gegen ein solches Vorgehen ist nichts einzuwenden, solange man sich der Möglichkeit von damit verbundenen Fehlschlüssen bewusst ist.

Was folgt daraus für die Aussagen über die Induktionsexperimente in unseren Zitaten?

Wir betrachten der Übersichtlichkeit halber einen  $R$ - $L$ -Kreis, dessen Spule nur eine einzige Windung hat, Abb. 6.14.

Für das Umlaufintegral über die elektrische Feldstärke gilt:

$$\oint \vec{E} d\vec{r} = -\iint \vec{B} d\vec{A}$$

Als Integrationsweg wählen wir einen Weg, der dem elektrischen Stromkreis folgt. Er verläuft also im Innern des elektrischen Leiters und des Widerstandes. Die Orientierung des Flächenelements  $d\vec{A}$  und des Wegelementes  $d\vec{r}$

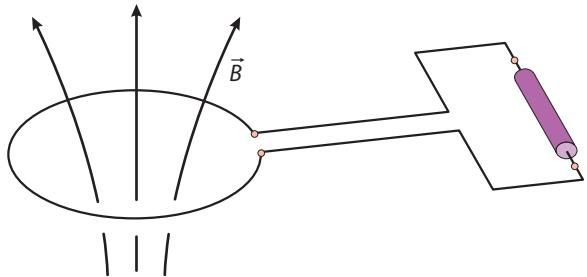


Abb. 6.14 Nur am Widerstand entsteht ein Beitrag zum Integral über die elektrische Feldstärke auf dem geschlossenen Weg des  $R$ - $L$ -Kreises.

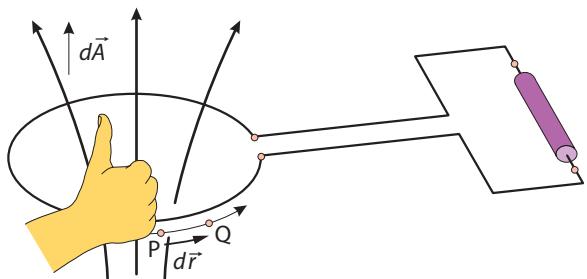


Abb. 6.15 Die Orientierung von Flächenelement und Wegelement in der zweiten Maxwellgleichung hängen über die Rechte-Hand-Regel miteinander zusammen.

des  $d\vec{r}$  hängen über die Rechte-Hand-Regel miteinander zusammen: Wenn der Daumen in Richtung von  $d\vec{A}$  weist, zeigen die gekrümmten Finger der rechten Hand die Richtung von  $d\vec{r}$  an, Abb. 6.15. Wie wir  $d\vec{A}$  orientieren, ist egal, nur muss  $d\vec{r}$  entsprechend gerichtet werden. Das Vorzeichen der Ringspannung bezieht sich auf den so orientierten Integrationsweg.

Wie verteilt sich nun die Spannung auf die verschiedenen Abschnitte des Stromkreises? Welche Werte hat das Integral

$$U = \int_P^Q \vec{E} d\vec{r}$$

für verschiedene gewählte Punkte  $P$  und  $Q$ ? Wir achten darauf, dass wir im Stromkreis immer in Richtung von  $d\vec{r}$  integrieren, d.h., wir integrieren immer so, dass  $Q$  vor  $P$  liegt.

Nun gilt für jeden Leiterabschnitt zwischen zwei beliebig gewählten Punkten  $P$  und  $Q$  das Ohm'sche Gesetz:

$$U = \frac{R}{I}$$

Wir nehmen an, dass der Widerstand der Drähte von Induktionsschleife plus Zuleitungen vernachlässigbar klein ist im Vergleich zum Widerstand des Bauelements

„Widerstand“. Das bedeutet, dass die Spannung auf allen Wegstücken  $PQ$  außerhalb des Widerstandes gleich null ist. Zum Ringintegral trägt nur der Weg im Bauelement Widerstand bei. Nur im Widerstand ist die elektrische Feldstärke von null verschieden, nur dort braucht der elektrische Strom einen Antrieb.

Die Überlegung bleibt im Wesentlichen dieselbe, wenn wir statt der Leiterschleife eine Spule mit  $N$  Windungen betrachten. Der Gesamtfluss durch den Stromkreis ist dann  $N$  mal dem Fluss durch eine einzige Spulenwindung, und die Integrationsfläche hat eine etwas verwickelte Gestalt. Am Ergebnis ändert sich aber nichts: Zur Ringspannung trägt nur das Wegstück im Widerstand bei.

Nun zu unseren Zitaten 1, 2 und 3: Es wird gesagt, in der Spule werde eine Spannung erzeugt. Wie ist das gemeint? Eigentlich müsste ja ein Integrationsweg angegeben werden. Die Angabe „in der Spule“ suggeriert, dass ein Integrationsweg innerhalb der Spule gemeint ist. Auf einem solchen Weg ist aber der Beitrag zum Ringintegral null. Die Spannung „in der Spule“ ist also null. Auch die elektrische Feldstärke, die in den beiden ersten Zitaten angesprochen wird, ist im Draht der Spule gleich null.

Die Ungeschicklichkeit ist nicht nur in Schulbüchern anzutreffen. Unser 4. Zitat stammt aus einem Hochschulbuch. Hier wird die Maschenregel benutzt, um die Differenzialgleichung für einen elektrischen Schwingkreis aufzustellen. Es wird sogar betont, dass die Spannung längs eines Weges gemessen werden muss. Dass auf beiden Wegen derselbe Spannungswert herauskommt, wie es behauptet wird, ist aber nicht richtig. Die Maschenregel gilt nicht mehr, sobald sich der magnetische Fluss durch die Masche ändert. (So wie die Knotenregel nicht mehr gilt, sobald sich im Knoten Ladung anhäuft.)

## Herkunft

Im Unterricht und in der Vorlesung wird die Größe Spannung durchweg im Zusammenhang mit konservativen Feldern eingeführt. In diesem Fall kann man die Spannung zwei Punkten zuordnen. Der Verlauf des Integrationsweges zwischen den Punkten braucht nicht angegeben zu werden. Er ist beliebig und spielt für den Wert der Spannung keine Rolle. Wenn man mit dieser Gewohnheit an die Beschreibung von Induktionsvorgängen geht, gerät man zwangsläufig in Schwierigkeiten.

Damit hängt auch die Überzeugung zusammen, die Spannung könne operational über das Voltmeter erklärt werden: „Die elektrische Spannung ist das, was man mit dem Voltmeter misst.“ Ein Voltmeter scheint ja richtig

angeschlossen zu sein, sobald man seine Anschlüsse mit zwei Punkten eines Stromkreises verbunden hat. Bei einem Stromkreis wie dem von Abb. 6.14 kann man aber zwischen zwei fest gewählten Punkten jede beliebige Spannung messen, je nachdem wie man die (isolierten) Zuleitungen des Voltmeters verlegt. (Man beachte, dass man aus den Zuleitungen selbst eine Spule bilden kann.)

## Entsorgung

Wenn man es mit einem Potenzialfeld zu tun hat, so ist die Spannung gleich der Potenzialdifferenz. Man gibt die Spannung an in Bezug auf zwei Punkte in geordneter Reihenfolge. Das Benennen der Ordnung der beiden Punkte macht die Angabe allerdings schwerfällig und es wird auch kaum gemacht. Man erspart sich diese Schwerfälligkeit, wenn man von vornherein mit den Potenzialen operiert.

Nur wenn es einem auf das Vorzeichen der Spannung nicht ankommt, kann man einfach von der Spannung „zwischen zwei Punkten“ sprechen.

Wenn Induktion im Spiel ist, geht es nicht mehr so einfach. Je nach Adressaten schlagen wir ein unterschiedliches Vorgehen vor:

Hochschule: Bei der Angabe einer Spannung benennt man stets die zugehörige orientierte Linie. Diese Linie kann Anfang und Ende haben, oder sie kann geschlossen sein. Falls die Linie geschlossen und mit einem Stromkreis identisch ist, genügt es, den Stromkreis zu benennen. Um zu betonen, dass es sich um einen geschlossenen Weg handelt, kann man von einer Ringspannung sprechen, also etwa: „... die in der Leiterschleife induzierte Ringspannung beträgt ...“

Schule: Man hat es gewöhnlich mit Stromkreisen zu tun, bei denen die magnetische Flussänderung in einer Spule stattfindet (also nicht mit einer kurzgeschlossenen Leiterschleife). Man schneidet dann die Spule (in Gedanken) aus dem Stromkreis heraus und macht Aussagen nur für durchgehende (nicht durchgeschnittene) Wegstücke. Mit diesen kann man umgehen, wie man es vom Gleichstromkreis gewohnt ist, d.h., man kann jedem Punkt ein Potenzial zuordnen.

## 6.25 Wirbelströme

### Gegenstand

In der physikalischen und technischen Literatur benutzt man den Begriff Wirbelstrom, und auch in Schulbüchern werden Wirbelströme eingeführt. Was ein Wirbelstrom ist, wird in Sätzen oder Definitionen wie den Folgenden erklärt:

## Wirbelströme

- 1 „Induktionsspannungen und -ströme treten nicht nur bei Leiterschleifen und Spulen auf. Ändert sich das Magnetfeld, das von einem massiven Metallkörper umfasst wird, so tritt ebenfalls elektromagnetische Induktion auf. Aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Leiter entstehen Ringströme, die als Wirbelströme bezeichnet werden.“
- 2 „Derartige Induktionsströme in Metallen besitzen keine vorgeschriebenen Strombahnen wie etwa in einem Draht oder einer Spule. Wir bezeichnen sie als Wirbelströme.“
- 3 „Bei der Induktion entstehen Spannungen und damit auch Ströme, die scheinbar ungeordnet verlaufen. Diese Ströme erzeugen Magnetfelder, die der Bewegungsrichtung entgegenwirken und die Bewegung bremsen. Diese Ströme werden Wirbelströme genannt.“
- 4 „Wenn der Trafo einen Kern aus massivem Eisen besitzt, treten solche Ströme auch im Kern selbst auf und erwärmen ihn [...]. Diese Ströme bezeichnet man als Wirbelströme.“
- 5 „Wenn die Scheibe sich im inhomogenen  $B$ -Feld bewegt, ändert sich für jedes Metallstück das Feld, das es durchsetzt. In seinem Umfang wird also eine Ringspannung induziert. Die entsprechenden Kreisströme oder Wirbelströme, die überall im Metall fließen, erfahren im  $B$ -Feld Lorentz-Kräfte ...“
- 6 „... Man nennt sie Wirbelströme, weil die Induktionsstromlinien wie Wirbel in sich geschlossen sind. Wirbelströme erzeugen gemäß der Lenz'schen Regel ein ihrer Ursache, also dem ursprünglichen Magnetfeld, entgegengesetztes Magnetfeld.“
- 7 „Wirbelstrom: Der durch ein magnetisches Wechselfeld oder bei Bewegung in einem inhomogenen Magnetfeld in einem elektrischen Leiter induzierte Wechselstrom. Die dabei im Leiter erzeugte Joule-Wärme kann z.B. zum Schmelzen von Metallen (Induktionsofen) benutzt werden. Im Allgemeinen tritt sie als unerwünschte Verlustleistung (Wirbelstromverluste) auf, die z.B. in Eisenkernen von Transformatoren durch Unterteilung des Kerns in dünne, gegeneinander isolierte Bleche verringert wird. Anwendung z.B. in der Wirbelstrombremse (Bremse), zur Dämpfung elektrischer Messgeräte und zur Erzeugung des Gegendrehmoments in Wechselstromzählern.“
- 8 „Ein von außen angelegtes Magnetfeld induziert einen Kreisstrom, der im Inneren des Supraleiters ein entgegengesetztes Feld aufbaut, welches das äußere kompensiert.“
- 9 „Gleiches gilt für das Anlegen äußerer Magnetfelder. Diese induzieren einen Kreisstrom, der das Magnetfeld vollständig herausdrängt. In einer Spule aus supraleitendem Blei startete Kamerlingh Onnes einen Ringstrom und schaltete die Batterie ab.“

## Mängel

Es ist schwer zu erkennen, was das Charakteristikum eines Wirbelstroms eigentlich ist.

Die meisten Definitionen betonen, dass es geschlossene Ströme oder Ringströme sind. Nun gilt das aber für andere Ströme auch, egal, ob sie induziert sind oder von einer Batterie angetrieben. Nur wenn irgendwo in einem Stromkreis  $dQ/dt$  ungleich null ist, ist der Strom nicht geschlossen – allerdings auch nur dann, wenn man Verschiebungsströme nicht gelten lässt.

In der Definition 2 wird betont, dass dem Wirbelstrom der Weg nicht vorgeschrieben sei. Was meint man denn mit „vorschreiben“? Jeder Strom fließt (in einem isotropen normalleitenden Medium) in Richtung der elektrischen Feldlinien. Man kann also sagen, die elektrischen Feldlinien schreiben ihm den Weg vor. Das gilt aber für einen Strom in einem Draht genau so wie für den sogenannten Wirbelstrom im Kern eines Transformators oder in einer Wirbelstrombremse. Das elektrische Feld, das über die Richtung des Stroms bestimmt, hat gewöhnlich zwei Beiträge: Einen, der durch Induktion, und einen der durch elektrische Ladungen zustande kommt. Bei einem Strom in einem Draht ist die Induktion dafür verantwortlich, dass die Ladung stationär fließt. Die Ladungen an der Oberfläche der Drähte sorgen dafür, dass das elektrische Feld, und damit auch der elektrische Strom den Kurven und Knicken des Drahtes folgt. Das Entsprechende gilt aber auch für einen Strom in einem Eisenkern.

Eine ähnliche Aussage macht die Definition unseres Zitats 3. Der Weg des Stroms sei scheinbar ungeordnet. Ist damit gemeint, dass wir den Weg des Stromes nicht genau kennen können? Oder nur, dass wir uns nicht die Mühe gemacht haben, ihn zu berechnen?

Die Zitate 1 und 4 betonen, dass der Körper, in dem die Wirbelströme induziert werden, massiv ist. Was ist hier mit massiv gemeint? Ist nur gemeint, dass die Ausdehnung des Körpers groß ist? Normalerweise ist ja ein Draht dünn, und die Scheibe der Wirbelstrombremse ist groß und dick. Nun gibt es aber auch dicke Drähte, und man kann winzige Wirbelstrombremsen bauen.

In mehreren Definitionen wird auf die Wirkung der Wirbelströme Bezug genommen. Zum einen wird die Wärmeerzeugung genannt (4 und 7), und zum anderen, die Bremswirkung aufgrund der Lenz'schen Regel (3)

und 7). Nun haben aber auch Nicht-Wirbelströme eine Wärmewirkung, z. B. in der Glühlampe oder im Bügelleisen. Und auch die Bremswirkung hat man bei jedem anderen Induktionsstrom. Jeder Generator wird durch den Strom, den er hervorbringt, gebremst.

Im Grunde sieht man den Definitionen die Hilflosigkeit der Definierer an, etwa wenn, wie in Definition 7, gesagt wird: „Wirbelstrom: Der durch ein magnetisches Wechselfeld oder bei Bewegung in einem inhomogenen Magnetfeld in einem elektrischen Leiter induzierte Wechselstrom.“ Das ist nämlich die Definition eines ganz gewöhnlichen Induktionsstroms.

Schließlich noch eine Bemerkung zu den Bezeichnungen Ringstrom und Kreisstrom, siehe die Zitate 8 und 9. Gemeint ist ja nur, dass die Stromlinien geschlossen sind. Man könnte also auch sagen „geschlossener Strom“. Allerdings besteht in den Situationen, in denen man von Kreis- oder Ringströmen spricht, gewöhnlich gar kein Zweifel darüber, dass der Stromkreis geschlossen ist. Von dem Strom, der durch einen Staubsauger oder einen CD-Player fließt, wird man auch nicht sagen, es handele sich um einen Kreisstrom.

Wir können also feststellen: Ein und derselben Erscheinung wird je nach Umständen, unter denen man sie beobachtet, ein anderer Name gegeben. In der Bremse fließt ein Wirbelstrom. Im Supraleiter wird ein Ringstrom oder Kreisstrom induziert. Durch das Bügeleisen aber fließt ein ganz gewöhnlicher Strom.

Das Differenzieren durch verschiedene Bezeichnungen ist nützlich, wenn dadurch ein wesentliches Merkmal erfasst wird. Andernfalls ist es kontraproduktiv. Es ist dann besser, durch eine einheitliche Wortwahl zum Ausdruck zu bringen, dass kein Unterschied oder kein wesentlicher Unterschied besteht.

Der Lernende vermutet hinter den Spezialausdrücken Wirbelstrom, Kreisstrom und Ringstrom unterschiedliche Phänomene. Der Wirbelstrom scheint sich von einem Nicht-Wirbelstrom prinzipiell zu unterscheiden. Die unbestimmte Stromverteilung könnte, so vermutet er vielleicht, von derselben Art sein, wie die chaotische Stromverteilung bei der Turbulenz – was sie gewiss nicht ist.

## Herkunft

1824 entdeckte François Arago, dass eine frei drehbare Magnetnadel von einer horizontalen rotierenden Kupferplatte in Drehung versetzt wird. Diese Beobachtung führte 1831 zur Entdeckung der Induktion durch Faraday. Eine zwischen zwei Magnetpolen schnell rotierende Kupferplatte wird gebremst. Foucault schloss 1855, dass sich die für die Rotation der Platte aufgewendete Arbeit als Wärme wiederfinden muss. Das konnte er in

eindrucksvollen Experimenten nachweisen. Auf Französisch heißen Wirbelströme *Courants de Foucault*. So wohl der Bremseffekt als auch die Erwärmung werden noch heute als die wesentlichen Merkmale der Wirbelströme angesehen, obwohl sie bei jedem induzierten Strom auftreten.

Die besonderen Umstände der Entdeckung haben also zur Bildung des Begriffs geführt, insbesondere wohl die Tatsache, dass der Brems- oder Mitnahmeeffekt noch vor der allgemeinen Erklärung durch Faraday entdeckt wurde.

Es verhält sich ähnlich wie mit der Lenz'schen Regel, die auch ihre Verallgemeinerung überlebt hat, siehe auch [1].

## Entsorgung

Man benutzt keinen speziellen Namen für Ströme, die in Transformatorkernen oder Bremsen induziert werden. Der Name Wirbelstrom tritt also weder in einer Definition noch in einer Kapitelüberschrift auf. Selbstverständlich ändert das nichts daran, dass man die Induktion in Transformatorkern und Bremse diskutiert. Die Bremse nennen wir, um sie von mechanischen Reibungsbremsen zu unterscheiden, Induktionsbremse. Wenn ein Zweifel darüber bestehen sollte, dass ein Strom nicht geschlossen ist, so nennen wir ihn nicht Wirbel-, Ring- oder Kreisstrom, sondern einfach geschlossenen Strom, aber wirklich nur, wenn ein Zweifel besteht. Das wird wohl in den meisten Fällen nicht zu treffen.

[1] F. Herrmann, *Die Lenz'sche Regel und das Minuszeichen im Induktionsgesetz*, Altlasten der Physik

## 6.26 Das Streufeld des Transformators

### Gegenstand

- 1 „Ein elektrisches oder magnetisches Feld, das sich außerhalb einer bestimmten Einrichtung ausbreitet. Das S. kann zu Verlusten oder Störungen führen.“ [1]
- 2 „..., der Magnetfluss  $\Phi$  soll ganz im Eisenkern konzentriert sein, d. h. beide Spulen in gleicher Stärke durchsetzen (kein Streufluss).“ [2]
- 3 „Dass die Sekundärspannung sich bei genauerer Messung kleiner herausstellt, als die Rechnung erwarten lässt, ist einerseits auf (Ohmsche) Wärmeverluste ... zurückzuführen, ... . Die andere Ursache ist, dass vom Induktionsfluss in der Primärspule infolge Streuung nur ein Teil durch die Sekundärspule geht.“ [3]

## Das Streufeld des Transformators

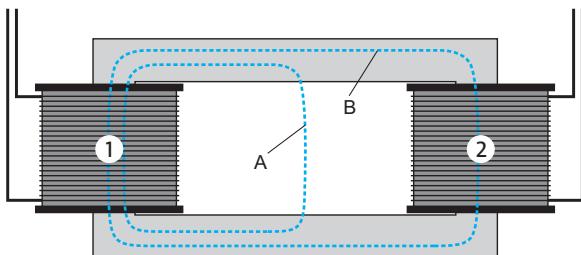
## Mängel

Streufelder lernt man kennen als etwas, das es zu vermeiden gilt. Sie sind im Prinzip nicht notwendig und man darf sie sich, ohne ein fundamentales physikalisches Prinzip zu verletzen, wegdenken. Es ist also ähnlich wie bei der mechanischen Reibung. Auch diese tritt häufig nur als Störeffekt auf, den man zu vermeiden trachtet.

Ein etwas gröberer Vergleich ist ein Leck in einem Gartenschlauch. Der Schlauch mag zwar einige Löcher haben oder an den Schraubverbindungen nicht ganz dicht sein. Diese Lecks lassen sich aber, im Prinzip wenigstens, beliebig gut schließen. Tatsächlich ist das Entsprechende auch bei Streufeldern oft der Fall. Eine metallische Abschirmung verhindert das Herausquellen eines elektrischen Feldes, eine Mu-Metall-Verkleidung schließt ein magnetisches Feld ein oder hält ein äußeres magnetisches Feld von einem Gerät fern.

Nun spricht man aber von Streufeldern auch in Fällen, wo die Funktion des Gerätes genau auf diesem Feld beruht. Es gibt dafür mehrere Beispiele, von denen wir hier nur den Transformator ansprechen wollen.

Wir betrachten einen Transformator, wie man ihn aus der Schulsammlung kennt: ein rechteckig-geschlossener Eisenkern, auf dem die beiden Spulen sitzen, Abb. 6.16.



**Abb. 6.16** Nur auf dem Stück des Integrationsweges, das außerhalb des Eisenkerns verläuft, ist die magnetische Feldstärke von null verschieden.

Wir machen die üblichen Annahmen:

- die Ohm'schen Widerstände der Spulen seien klein gegen die entsprechenden induktiven Widerstände;
  - der Lastwiderstand sei klein gegen den induktiven Widerstand der Sekundärspule;
  - der Lastwiderstand sei groß gegen die Ohmschen Widerstände der beiden Spulen;
  - die Permeabilität  $\mu$  des Kernmaterials sei groß gegen 1.

Wir wenden nun das Ampère'sche Gesetz auf den Transformator an. Wir integrieren zunächst über den Weg A:

$$\int_A \vec{H} d\vec{r} = n_1 \cdot I_1$$

Der Wert des Integrals ist gleich dem Gesamtstrom  $n_1 \cdot I_1$ , den der Integrationsweg umschlingt. ( $n$  ist die Windungszahl, die Indizes beziehen sich auf die Primär- bzw. Sekundärspule.) Nun ist die magnetische Feldstärke im Innern des Eisenkerns Größenordnungsmäßig um den Faktor  $\mu$  kleiner als außerhalb. Da typische  $\mu$ -Werte über 1000 liegen, ist der Beitrag zum Integral auf dem Weg im Eisen gegen den Beitrag außerhalb vernachlässigbar. Zum Wert des Integrals trägt also praktisch nur das „Streufeld“ bei.

Wir betrachten nun den Integrationsweg B. Er umschlingt beide Spulen. Da er ganz innerhalb des Eisens verläuft, ist das Integral gleich null:

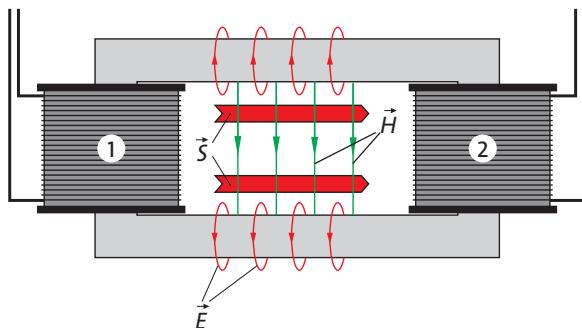
$$\int_B \vec{H} d\vec{r} = n_1 \cdot I_1 - n_2 \cdot I_2 = 0$$

Es folgt die bekannte Beziehung:

$$n_1 \cdot I_1 = n_2 \cdot I_2,$$

Ohne das „Streufeld“, d. h., wenn dessen Feldstärke null wäre, könnte diese Gleichung nicht gelten.

Man sieht die Wichtigkeit des verunglimpften Feldes aber noch auf eine andere Art.



**Abb. 6.17** Felder zwischen den Schenkeln eines Trans- formators. Der Energiestrom läuft von links nach rechts.

In Abb. 6.17 sind sowohl die  $H$ -Feldlinien als auch die Feldlinien der elektrischen Feldstärke schematisch eingezeichnet. (Die Flussänderung im Eisenkern ist die Ursache eines elektrischen Wirbelfeldes um die Schenkel des Transformators herum.) Außerdem zeigt die Abbildung den „Poynting-Vektor“

$$\vec{S} \equiv \vec{E} \times \vec{H} \quad (6.20)$$

d. h. die Energiestromdichte im Feld. Man sieht, dass die Energie von der Primär- zur Sekundärspule durch das Feld fließt.

Die Situation ist analog zum Energietransport mit einem normalen elektrischen Kabel, nur sind hier elektrisches und magnetisches Feld gegeneinander vertauscht, Abb. 6.18. Da sich die beiden Leitungen auf unterschiedlichem elektrischem Potenzial befinden, laufen elektrische Feldlinien von der einen Leitung zur anderen, und da in den Leitungen ein elektrischer Strom fließt, sind sie von einem magnetischen Wirbelfeld umgeben. Die Energieströmung hat dieselbe räumliche Verteilung wie die im Transformator.

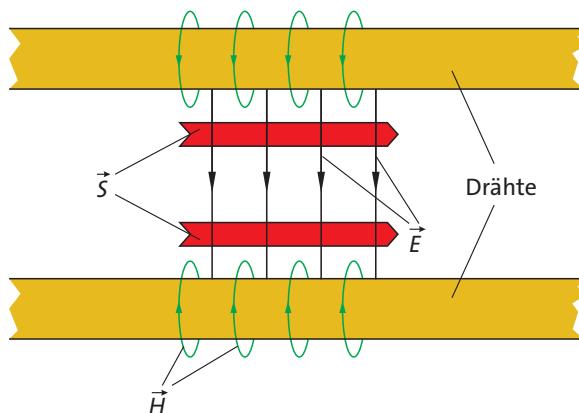


Abb. 6.18 Felder zwischen den beiden Drähten eines Kabels. Der Energiestrom läuft von links nach rechts.

Das (magnetische) Streufeld ist am Energieverlust eines Transformators genau so wenig Schuld wie das (elektrische) „Streufeld“ am Verlust eines elektrischen Kabels. Der Wirkungsgrad wird vielmehr in beiden Fällen begrenzt durch Dissipation. Diese findet beim Transformator außer in den Spulen im Eisenkern statt, nämlich bei der ständigen Ummagnetisierung. Ein Maß für diese Dissipation ist die magnetische Feldstärke im Innern des Eisenkerns. Sie sollte im Idealfall null sein, genau so wie die elektrische Feldstärke in den beiden Drähten eines Kabels im Idealfall eines widerstandslosen Leiters gleich null ist. Da die Dissipation in Eisenkernen besonders hoch ist, macht man bei technischen Transformatoren den Weg von der Primär- zur Sekundärspule möglichst kurz.

### Herkunft

Bei der herkömmlichen Erklärung der Funktionsweise des Transformators betrachtet man nicht die magnetische Feldstärke, sondern man beschränkt sich auf die Rolle der magnetischen Flussdichte. Da diese im Eisen sehr viel größer ist als außerhalb, entsteht der Eindruck, das Feld außerhalb habe keine entscheidende Funktion. Dies ist eines von zahlreichen Beispielen dafür, dass die einseitige Beschreibung von magnetischen Feldern

durch die Flussdichte zu Fehlvorstellungen führt, siehe auch [4], [5] und [6].

Hinzu kommt, dass man bei der Diskussion von Energiebilanzen der nahe liegenden Frage nach dem Verlauf der Energieströmung gern aus dem Weg geht.

### Entsorgung

- Man werfe nicht alle „Streufelder“ in einen Topf. Da das Wort „Streufeld“ nun schon mal die Konnotation von etwas Unerwünschtem und Vermeidbarem hat, sollte man das magnetische Feld zwischen den Schenkeln eines Transformators am besten gar nicht als Streufeld bezeichnen.
- Man diskutiere beim Transformator neben dem Verlauf der Feldlinien der Flussdichte auch den der magnetischen Feldstärke.
- Man stelle bei möglichst vielen Gelegenheiten die Fragen: „Wo ist die Energie?“ und „Welchen Weg geht die Energie?“

[1] <http://www.elektroniknet.de/elex/index.php>

[2] Gerthsen, Physik, 21. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2002, S. 414

[3] Handbuch der experimentellen Schulphysik, Elektrizitätslehre III, Aulis Verlag, Köln, 1965, S. 70

[4] F. Herrmann, Magnetpole, Altlasten der Physik

[5] F. Herrmann, Das Feld von Dauermagneten, Altlasten der Physik

[6] F. Herrmann, Elektromagnete, Altlasten der Physik

## 6.27 Der Hertz'sche Dipol

### Gegenstand

Als Vorbereitung der Einführung der elektromagnetischen Wellen behandelt man zunächst den elektrischen Schwingkreis: zuerst freie Schwingungen, dann gedämpfte und schließlich erzwungene. Zur Erzeugung erzwungener Schwingungen wird die Meißner'sche Rückkopplungsschaltung eingeführt. Man erklärt dann, wie man höhere Frequenzen erreicht, nämlich mithilfe der Dreipunktschaltung (in manchen Texten Hartley-Generator genannt). Der Röhrengenerator wird besprochen. Spule und Kondensator des Schwingkreises werden zu einfachen Drahtstücken reduziert, damit die Frequenz noch höher wird. Der entstandene Schwingkreis wird aufgebogen, sodass man einen schwingenden Dipol erhält. Man diskutiert, wie das elektrische und das magnetische Feld in der Nähe des Dipols aussehen, das Nahfeld, und man behauptet dann, und zeigt es auch im Experiment, dass der Dipol

## Der Hertz'sche Dipol

eine elektromagnetische Welle emittiert. Sie stellt das Fernfeld dar.

### Mängel

Diesem Vorgehen sind mehrere Vorwürfe zu machen:

- 1 Die Erklärung zielt von vornherein auf das komplizierte Feld eines strahlenden Dipols. Man hat es nicht nur mit einer verwinkelten Feldverteilung zu tun, sondern auch noch mit der schwierigen Unterscheidung zwischen Nah- und Fernfeld. Beides müsste aber nicht sein. Es gibt viel einfachere Wellen, und um die Prinzipien der Wellenausbreitung zu erklären, sollte man sich auf diese einfachen Fälle beschränken: auf ebene Sinuswellen. Man könnte sogar mit einem noch einfacheren Fall beginnen: mit dem ebenen Rechteckpuls.
- 2 Bei der traditionellen Einführung der elektromagnetischen Wellen spielt die Erklärung der Erzeugung mithilfe einer Dipolschwingung eine große Rolle. Man ist wohl der Meinung, man verstehe die Wellen besonders gut, wenn man dieses Erzeugungsverfahren verstanden hat. Tatsächlich ist aber die Erzeugungsmethode schwerer zu verstehen als die Welle selbst. Es ist so, als würde man, um jemandem zu erklären, was Schallwellen sind, damit beginnen, die Funktionsweise der Klarinette zu erläutern. Die Klarinette ist ein Resonator, aus dem ein kleiner Anteil des Energiestroms, der im Resonator hin- und herfließt, ausgekoppelt und emittiert wird. Genauso, wie die Klarinette viel schwerer zu erklären ist, als das Phänomen der Schallwelle, so ist auch die Erzeugung von elektromagnetischen Wellen mit dem Hertz'schen Dipol viel verwickelter als die Wellenerscheinung selbst. Auch der Dipol ist ein Resonator, und auch hier wird nur ein kleiner Bruchteil der Energie, die ständig in die Antenne hinein und aus ihr herausfließt, emittiert.
- 3 Die technischen Tricks, die man anwendet, um Schwingungen hoher Frequenz zu erzeugen, sind Spezialistenwissen. Im Rahmen eines allgemeinbildenden Unterrichts wird man versuchen, solche Themen zu vermeiden. Damit zusammen hängt auch die Proliferation von Fachausdrücken: Meißner'sche Rückkopplungsschaltung, Dreipunktschaltung, Röhrengenerator, Nah- und Fernfeld, Lecherleitung, Reflexklystron, Gunn-Diode und andere.
- 4 Trotz dieses Aufwands bei der Einführung der elektromagnetischen Wellen wird schließlich aber doch das Ziel verfehlt. Man versucht ja, in kleinen Schritten von dem einfachen Schwingkreis zur vermeintlich komplizierten Welle zu gelangen. Genau an der wesentlichen Stelle bleibt aber eine Lücke. Man ver-

steht zwar, dass der Dipol aufgrund des elektrischen Stroms, der in ihm fließt und der elektrischen Ladung, die an seinen Enden sitzt, von einem elektrischen und einem magnetischen Feld umgeben sein muss. Warum ein kleiner Teil dieses sich ständig neubildenden und wieder verschwindenden Feldes den Nahbereich der Antenne verlässt, wird aber nicht erklärt, sondern nur behauptet und experimentell gezeigt. Wenn elektrische und magnetische Feldstärke im Nahfeldbereich um  $\pi/2$  phasenverschoben wären, so wie es suggeriert oder in der Nahfeldnäherung auch explizit angenommen wird, würde die Antenne gar nicht emittieren.

### Herkunft

Die elektromagnetischen Wellen wurden von Heinrich Hertz entdeckt und auf eine ganz bestimmte Art erzeugt. Hertz konnte für seine Experimente keinen Hochfrequenzgenerator aus dem Schrank nehmen. Er musste eine raffinierte selbstschwingende Vorrichtung ersinnen, um seine Wellen zu erzeugen. Der komplizierte Hertz'sche Oszillator hat nun im Unterricht überlebt. Hertz konnte, als guter Theoretiker, auch die Felder seines Oszillators berechnen, und auch diese Rechnung steht in vielen Lehrbüchern der Elektrodynamik an prominenter Stelle. In der Hertz'schen Rechnung ist natürlich schon am Nahfeld zu erkennen, dass die Phasenverschiebung zwischen elektrischem und magnetischem Feld von  $\pi/2$  abweicht. Dass man die Methoden der Hochfrequenzzeugung im Unterricht so stark in den Vordergrund stellt, kommt wohl daher, dass man in einer schlüssigen Folge von Experimenten vom Schwingkreis zu den Wellen kommen möchte, was aber schließlich doch nicht gelingt.

### Entsorgung

Man beschränkt die Diskussion auf Wellen einfacher Geometrie: auf ebene Sinus- oder Rechteckwellen. Man verzichtet auch auf die Diskussion von Hochfrequenzgeneratoren.

Die Erzeugung erklärt man nur qualitativ, etwa so: In einer ausgedehnten Metallplatte beginnt plötzlich ein elektrischer Strom zu fließen. In unmittelbarer Nähe der Platte beginnt ein Magnetfeld zu entstehen. Dieses sich ändernde Magnetfeld hat ein elektrisches Feld zur Folge. Das elektrische Feld befindet sich überall dort, wo bereits Magnetfeld ist. Von der Leiterplatte entfernt sich also eine Front, die felderfüllten Raum von feldfreiem Raum trennt. Wird der elektrische Strom wieder abgeschaltet, so folgt eine zweite Front, hinter der sich wieder feldfreies Gebiet befindet. Das Gebiet zwischen den beiden Fronten stellt eine ebene Rechteckwelle dar.

## 6.28 Zündfunken und elektromagnetische Strahlung

### Gegenstand

Jeder weiß, dass elektrische Funken den Radioempfang stören. Während eines Gewitters, wenn ein Lichtschalter betätigt wird oder wenn ein Gleichstrommotor läuft, kann man beim Empfang eines amplitudenmodulierten Signals ein Knacken oder Rauschen hören. Auch die Zündung von Benzinmotoren würde den Radioempfang stören, wenn die Zündanlage nicht „entstört“ wäre. Beim Hertz'schen Experiment zum Nachweis der elektromagnetischen Wellen spielt eine Funkenstrecke eine wichtige Rolle.

Die Auffassung scheint verbreitet zu sein, dass die Störstrahlung von der Funkenstrecke ausgeht:

- 1 „Die Zündfunken erzeugen hochfrequente Störimpulse, die unterdrückt werden müssen. Dazu gibt es folgende Maßnahmen: ...“
- 2 „... mit einem Funken setzen Entladungen in Form elektrischer Schwingungen ein; dieser Funke springt von einer Kugel zur anderen; damit dient die Kugelfunkenstrecke als Sender; ...“
- 3 „Eine schwingende elektromagnetische Störung (z.B. Funkenentladung) erzeugt elektromagnetische Wellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.“

Man findet auch Abbildungen des Hertz'schen Experiments, auf denen die elektromagnetische Welle von der Funkenstrecke, die die beiden Hälften des Oszillators überbrückt, auszugehen scheint.

### Mängel

Nicht die Funkenstrecke emittiert die Welle, sondern ein elektrischer Leiter, von dem die Funkenstrecke meist nur ein kleiner Teil ist – im Fall des Hertz'schen Oszillators die ganze Antenne. Die Funkenstrecke spielt nur die Rolle eines Schalters, der schließt, sobald die Spannung einen bestimmten Wert erreicht.

Beim Hertz'schen Oszillotor muss zwischen den beiden Hälften der Antenne eine hohe elektrische Spannung aufgebaut werden, damit die elektrische Feldstärke hoch ist, und nach dem Schließen des Schalters ein starker Strom fließt, damit auch die magnetische Feldstärke groß ist. Zum Aufladen müssen die Antennenhälften zunächst getrennt sein. Statt sie mit einem Schalter zu überbrücken, benutzt man die viel einfachere Methode der Funkenstrecke: Sobald der Funke gezündet ist, ist eine elektrisch leitende Verbindung vorhanden. Auch wenn bei der anschließenden hochfrequen-

ten Schwingung die Spannung durch null läuft, reißt der Funke nicht gleich wieder ab: Die Ionisierung der Luft überlebt.

Genauso geschieht im Fall des Schaltfunkens eines Lichtschalters oder der Funken an den Bürsten eines Elektromotors die Emission der elektromagnetischen Störung nicht nur durch den Funken, sondern durch den ganzen Leiter, in dem die Stromstärke fluktuiert. Der Funke ist in diesen Situationen eine Voraussetzung für das Entstehen der Welle, die Quelle der Strahlung ist aber der ganze Leiter, in dem eine schnelle Stromänderung vonstatten geht.

### Herkunft

Jeder weiß: Wenn es funkelt, knackt es auch. Der Funke ist auffällig, von ihm geht Licht und ein Geräusch aus. Es scheint plausibel, dass auch die elektromagnetische Störwelle von der Funkenstrecke ausgeht. (Mit elektromagnetischer Störwelle ist hier natürlich nicht das Licht gemeint, das tatsächlich nur von der Funkenstrecke ausgeht.)

Das Misskonzept überlebt, obwohl es im Widerspruch zu dem steht, was man über den Hertz'schen Oszillator lernt, nämlich dass die ganze Antenne für die Abstrahlung verantwortlich ist. Warum sollte ausgerechnet eine Funkenstrecke eine elektromagnetische Welle ausstrahlen?

### Entsorgung

Man macht deutlich, dass die Funkenstrecke nur den Schalter darstellt, der Funke stellt eine leitende Verbindung zwischen zwei metallischen Leitern her.

## 6.29 Verstärker

### Gegenstand

Im Unterricht wird gezeigt, dass Transistoren (oder auch Röhren) dazu verwendet werden können, den elektrischen Strom oder die elektrische Spannung zu verstärken. Man unterscheidet entsprechend zwischen Strom- und Spannungsverstärkung. Um die beiden Vorgänge zu erklären, muss die Funktionsweise des Transistors verstanden werden. Hierzu werden zahlreiche Fachausdrücke eingeführt und es werden Kennlinien untersucht.

### Mängel

Wie so oft im Physikunterricht legt man auch hier mehr Wert auf nebensächliche und komplizierte Details, als auf das Wesentliche und gleichzeitig Einfache.

## Verstärker

Der Transistorverstärker wird in all seinen Einzelheiten behandelt. Elektronische Schaltungen und Kennlinien werden diskutiert. Es wird zwischen Strom- und Spannungsverstärkung unterschieden. Nicht einmal erwähnt wird dagegen, was ein Gerät mit einem Signaleingang und einem Signalausgang überhaupt zum Verstärker macht: Ein Verstärker muss den modulierten Energiestrom, der das Signal begleitet, vergrößern:

$$P_{\text{heraus}} > P_{\text{hinein}}.$$

Falls es sich um einen elektrischen Verstärker handelt, und nicht um einen mechanischen, akustischen oder optischen, lässt sich der Energiestrom schreiben:

$$P = U \cdot I$$

Für einen solchen Verstärker ist also:

$$U_{\text{heraus}} \cdot I_{\text{heraus}} > U_{\text{hinein}} \cdot I_{\text{hinein}}$$

Natürlich kann diese Bedingung auf verschiedene Arten erfüllt werden. Dabei darf sogar der Wert einer der beiden Größen  $U$  und  $I$  abnehmen.

Auch mit einem Transformator kann man die elektrische Spannung oder die elektrische Stromstärke „verstärken“. Der Transformator ist trotzdem nicht das, was man einen Verstärker nennt, denn für ihn gilt nicht, dass  $P$ , d.h. das Produkt aus  $U$  und  $I$ , zunimmt.

## Herkunft

Das Thema ist vermutlich durch Fachleute auf dem Gebiet der Elektronik in die Schule gekommen. Die einfache Tatsache, dass ein Verstärker den Energiestrom, den ein Signal begleitet, vergrößert, ist für Elektronikfachleute wohl so selbstverständlich, dass es ihnen gar nicht auffällt, wenn sie im Unterricht nicht erwähnt wird.

## Entsorgung

Wir führen den Verstärker etwa so ein: Um Daten zu übertragen, braucht man Energie. Wie bei jedem anderen Transport, so geht auch bei jedem Datentransport auf dem Weg Energie verloren, sie wird zur Wärme-(Entropie-) Produktion verwendet. Der Datentransport braucht daher von Zeit zu Zeit neue Energie, neue „Wegzehrung“. Diese bekommt er im Verstärker. Der Verstärker hat einen Eingang und einen Ausgang für die Daten, mitsamt ihrer Energie. Die Datenstromstärke – gemessen in bit/s – ist an Eingang und Ausgang gleich. Da die Energiestromstärke  $P_{\text{heraus}}$  am Ausgang größer ist als die am Eingang  $P_{\text{hinein}}$ , braucht der Verstärker noch einen zusätzlichen Eingang für die Energie: Er

wird an die Steckdose oder an eine Batterie angeschlossen. Abb. 6.19 zeigt das Flussdiagramm eines elektrischen Verstärkers.

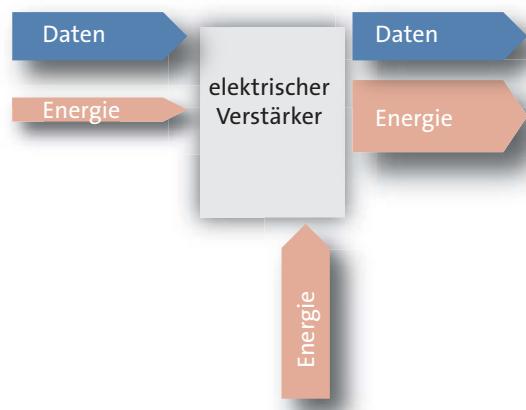


Abb. 6.19 Elektrischer Verstärker

## Das Verhältnis

$$\nu = P_{\text{heraus}} / P_{\text{hinein}}$$

ist der Verstärkungsfaktor.

Es werden spezielle Beispiele von Verstärkern behandelt – auch nichtelektrische. Dabei wird in jedem Fall betont, dass der Energiestrom zunimmt.

# 7 SCHWINGUNGEN UND WELLEN

## 7.1 Resonanzfrequenz und Eigenfrequenz

### Gegenstand

Bei der Behandlung von erzwungenen Schwingungen wird darauf hingewiesen, dass die Resonanzfrequenz nicht genau, sondern nur näherungsweise mit der Eigenfrequenz des Resonators übereinstimmt.

### Mängel

Man weiß nicht so recht, was man mit der Aussage anfangen soll. Anscheinend hat es die Natur nicht geschafft, die Schwingungen so einzurichten, wie es vernünftig wäre. Wir lernen zunächst, dass Resonanz auftritt, wenn der Schwinger im Takt mit dem Erreger ist. Die Erscheinung besteht darin, dass der Schwinger mit dem anregenden System kräftig mitschwingt. Als wollte jemand das Spiel verderben, stellt sich aber heraus, dass Resonanz- und Eigenfrequenz nicht genau übereinstimmen. Ist dann aber die Vorstellung, die wir uns von dem Vorgang gemacht haben, überhaupt noch richtig? Es entsteht ein Unbehagen.

Die Unstimmigkeit lässt sich leicht auflösen: Resonanz bedeutet immer, dass die Energie, die der Schwinger absorbiert und dissipiert, ihr Maximum hat. Wegen  $P = v \cdot F_0$  liegt dieses Maximum an derjenigen Stelle auf der Frequenzachse, bei der auch das Geschwindigkeitsmaximum liegt. (Wir nehmen an, dass der Erreger eine konstante Kraftamplitude  $F_0$  liefert. Das Argument läuft völlig analog, wenn der Erreger eine konstante Geschwindigkeitsamplitude erzeugt.) Das Maximum der Geschwindigkeitsamplitude liegt nun tatsächlich genau bei der Eigenfrequenz. Das Maximum der Ortsamplitude muss dann natürlich an einer anderen Stelle liegen und das der Beschleunigungsamplitude wieder an einer anderen. Aus

$$x(t) = x_0(\omega) \cdot \sin(\omega t)$$

folgt

$$x'(t) = \omega \cdot x_0(\omega) \cdot \cos(\omega t) = v_0(\omega) \cdot \cos(\omega t)$$

und

$$x''(t) = -\omega^2 \cdot x_0(\omega) \cdot \sin(\omega t) = a_0(\omega) \cdot \sin(\omega t).$$

Wenn die Geschwindigkeitsamplitude  $v_0(\omega) = \omega \cdot x_0(\omega)$  an einer Stelle  $\omega_{\text{Res}}$  ein Maximum hat, so kann dort weder die Ortsamplitude  $x_0(\omega)$  noch die Beschleunigungsamplitude  $a_0(\omega) = \omega^2 \cdot x_0(\omega)$  ein Maximum haben. Die scheinbar falsche Lage des Resonanzmaximums kommt also dadurch zustande, dass man die falsche Größe betrachtet. Man kann zahlreiche andere Größen als Funktion der Kreisfrequenz auftragen und wird das Maximum der Funktion an den verschiedensten Stellen finden. Man wird daraus aber sicher nicht schließen, dass der Resonanzvorgang, je nach betrachteter Größe, bei einer anderen Frequenz stattfindet.

### Herkunft

Vermutlich unsere Neigung, das, was wir mit den Augen wahrnehmen, in den Vordergrund zu stellen. Wir haben uns daran gewöhnt, ein mechanisches Problem dann als gelöst zu betrachten, wenn wir die Bahnen der Körper berechnet haben, d. h. den Ort als Funktion der Zeit.

### Entsorgung

Wir müssen uns immer wieder belehren lassen, dass in der Mechanik die dynamischen Größen Impuls und Energie die fundamentaleren Größen sind. Man definiere also die Resonanz nicht über die Ortsamplitude, d. h. das Augenscheinliche. Nicht das Maximum der Ortsamplitude sagt uns, was Resonanz ist, sondern die vom Schwinger absorbierte Energie.

## Die rücktreibende Kraft

### 7.2 Die rücktreibende Kraft

#### Gegenstand

Für einen mechanischen harmonischen Schwinger, bei dem ein Körper eine Hin- und Herbewegung macht, ist die Kraft auf den Körper proportional zur Auslenkung. Dass dieser Aussage große Bedeutung beigemessen wird, sieht man daran, dass sie oft, und besonders in Schulbüchern, als Merksatz formuliert wird. Hier zwei Beispiele:

- 1 „Eine freie mechanische Schwingung ist genau dann harmonisch, wenn sie dem linearen Kraftgesetz  $F = -D \cdot s$  genügt.  $s$  gibt die Elongation aus der Gleichgewichtslage an.“
- 2 „Definition: Eine periodische Bewegung, die durch die Rückstellkraft  $F$  hervorgerufen wird, für die ein lineares Kraftgesetz in der Form  $F = -D \cdot y$  gilt, heißt harmonische Schwingung.“

#### Mängel

- Die Sätze stellen eine Strenge zur Schau, der sie nicht ganz gerecht werden.

Zu 1: Es gibt auch freie harmonische Schwingungen, für die nicht die Kraft zur Auslenkung, sondern das Drehmoment zum Winkel proportional ist. Ohne das „genau dann“ würde man über diesen Mangel wohl eher hinwegsehen.

Zu 2: Auch auf einen Kolben, der von einem Schwungrad (oder sogar von einem Motor) über eine Pleuelstange hin und her bewegt wird, wirkt eine Kraft, für die ein (nahezu) lineares Kraftgesetz gilt.

- Ein Merksatz tritt uns immer mit einem hohen Anspruch entgegen: „Was ich aussage, ist wichtig!“ Die oben zitierten Aussagen verdienen diesen Wichtigkeitsstatus aber nicht. Wir bemerken zunächst, dass an demselben Schwinger noch zwei andere Größen proportional zueinander sind, nämlich Impuls und Geschwindigkeit. Die beiden Beziehungen

$$p = m \cdot v$$

und

$$F = -D \cdot y$$

haben, was den mathematischen Formalismus betrifft, eine analoge Bedeutung. Sie charakterisieren die beiden Teile, aus denen das System besteht, im Sinne der Physik vollständig: die erste den Körper und die zweite die Feder. Zum Aufstellen der Differenzialgleichung braucht man außer ihnen nur noch die Impulserhaltung.

Dass man der einen der beiden Proportionalitäten einen Merksatz widmet, der anderen aber nicht, mag man damit erklären, dass die Gültigkeit der ersten Gleichung als selbstverständlich vorausgesetzt werden kann, denn um Abweichungen von ihr zu beobachten, muss sich ein Körper mit relativistischer Geschwindigkeit bewegen. Die Proportionalität als Bedingung für die harmonische Bewegung herauszustellen, würde pedantisch wirken. Aber wie steht es denn mit dem anderen Term? Wenn man den Schwinger vorstellt als ein Gerät, das aus Körper und Feder besteht, so ist auch die zweite Gleichung eine Selbstverständlichkeit, denn wer denkt schon daran, die Feder zu überdehnen.

Eine gute Methode, Abstand zu einem mechanischen Problem zu gewinnen, besteht darin, das Problem in ein elektrisches zu übersetzen. Tatsächlich schwingt auch der elektrische Schwingkreis nur dann harmonisch, wenn zwei lineare Beziehungen gelten, die die beiden Konstituenten des Schwingkreises, den Kondensator und die Spule, charakterisieren:

$$Q = C \cdot U$$

und

$$n\Phi = L \cdot I.$$

Zum Aufstellen der Differenzialgleichung braucht man, außer diesen beiden, nur noch die Ladungserhaltung.

Hier ist es nun besonders leicht, die Proportionalitäten zu verletzen: wenn man entweder einen Elektrolytkondensator verwendet, oder eine Spule mit einem Eisenkern, der in die Sättigung gerät. Trotzdem kommt wohl kaum jemand auf die Idee, zu formulieren: „Eine freie elektrische Schwingung ist genau dann harmonisch, wenn ... .“ Und warum nicht? Weil die Aussagen keinen Merksatz wert sind.

- 3 Braucht die Kraft beim Schwinger unbedingt einen eigenen Namen? Müssten wir dann nicht konsequenterweise auch die Spannung am Kondensator eines Schwingkreises benennen, etwa „Entladespannung“?

#### Herkunft

Die Aussagen sind nur eines von vielen Beispielen dafür, dass die Mechanik eine Extrawurst bekommt. Ihre alte Vormachtstellung ist nach wie vor unangefochten.

#### Entsorgung

Man mache aus dem Merk- einen Nebensatz.

## 7.3 Phasendifferenzen bei erzwungenen Schwingungen

### Gegenstand

Im Zusammenhang mit der Behandlung erzwungener mechanischer Schwingungen lernt man, dass im Fall der Resonanz die Phasendifferenz zwischen der Ortskoordinate des Erregers und der des Schwingers  $\pi/2$  beträgt. Das Ergebnis wird für so wichtig gehalten, dass man es als Merksatz hervorhebt, z. B.:

1 „Im Resonanzfall stellt sich eine Phasendifferenz von  $\Delta\varphi = \pi/2$  ein“;

oder:

2 „Im Resonanzfall hinkt das Pendel der Erregerschwingung um eine Viertelperiode hinterher.“

### Mängel

- Eine Phasendifferenz bezieht sich immer auf zwei Größen, die eine sinusförmige Zeitabhängigkeit aufweisen. Dass hier die Ortskoordinate des Erregers die eine und die Ortskoordinate des Schwingers die andere dieser beiden Größen ist, wird in den Merksätzen nicht gesagt. Es wird ohnehin nur von den Ortsfunktionen gesprochen, sodass es einem gar nicht in den Sinn kommt, nach der Phasendifferenz zwischen anderen Größen zu fragen. Nun hätte man aber ebenso gut noch etliche andere Phasendifferenzen untersuchen können. So könnte die eine Größe außer dem Ort noch die Geschwindigkeit, die Beschleunigung oder der Impuls des schwingenden Körpers sein, oder auch die Kraft, die auf ihn wirkt. Die andere Größe könnte die Ortskoordinate, die Geschwindigkeit oder die Beschleunigung des Erregers sein. Von diesen Größen könnte man zwei beliebige miteinander kombinieren und nach der entsprechenden Phasendifferenz fragen. Die meisten dieser Phasendifferenzen sind allerdings recht schwer zu interpretieren. Das trifft wohl auch für die Phasendifferenz zu, die der Gegenstand der zitierten Lehrsätze ist. Was bedeutet es denn, dass diese Phasendifferenz zwischen den Ortskoordinaten von Erreger und schwingendem Körper im Fall der Resonanz  $\pi/2$  beträgt?

- Ein mechanischer Federschwinger, den man zu erzwungenen Schwingungen erregt, besteht aus den folgenden Komponenten: 1. der schwingende Körper, 2. die Feder, 3. der Erreger. Dass die Schwingung gedämpft ist, wollen wir dadurch zum Ausdruck bringen, dass wir als 4. Komponente noch einen Dämpfer hinzunehmen (im elektrischen Analogon wäre das ein Ohmscher Widerstand). Man kann diese vier Bauelemente auf verschiedene Arten kombi-

nieren; der mechanische „Stromkreis“ kann unterschiedliche Topologien haben (genauso wie der entsprechende elektrische Schwingkreis). Damit das Verhalten des Schwingers eindeutig bestimmt ist, muss auch noch darüber verfügt werden, welche Eigenschaft die Energiequelle, d. h. der Erreger hat. Es genügt nicht, festzulegen, dass die Erregung sinusförmig ist. Es muss noch festgelegt werden, ob beim „Durchdrehen“ der Frequenz die Ortsamplitude, die Geschwindigkeitsamplitude, die Kraftamplitude oder vielleicht sogar die Amplitude des Energiestroms (die Leistungsamplitude) des Erregers konstant gehalten wird, denn je nach konstant gehaltener Größe sieht die Resonanzkurve anders aus. Unter all diesen Kombinationsmöglichkeiten gibt es nun zwei, für die das Problem besonders übersichtlich wird. Man könnte sie als die Grundformen des Schwingers bezeichnen:

1. Man schaltet alle 4 Bauelemente parallel, und man hält beim Durchfahren der Resonanzkurve die Kraftamplitude des Erregers konstant.

2. Man ordnet die 4 Bauelemente in Reihe an, und man hält die Geschwindigkeitsamplitude des Erregers konstant.

(Auch beim elektrischen Schwingkreis gibt es diese Grundformen. Beim Parallelschwingkreis hält man die Stromamplitude, beim Reihenschwingkreis die Spannungsamplitude des Erregers konstant.)

Die zitierten Sätze über die Phasendifferenz zwischen den Ortsamplituden gelten nun weder für die eine, noch für die andere Grundform, sondern für eine Mischform aus Parallel- und Reihenschaltung. Entsprechend ist hier auch die Interpretation der Aussage über die Phasenbeziehung etwas schwierig. Im Fall der beiden Grundformen dagegen ist sie einfach. Wir wollen sie diskutieren am Beispiel des Parallelschwingers.

Resonanz bedeutet, dass der zeitlich gemittelte Energiestrom vom Erreger zum Schwinger

$$\bar{P} = \overline{v_E \cdot F_E}$$

maximal ist. Mit  $v_E = \hat{v}_E \sin(\omega t)$  und  $F_E = \hat{F}_E \cdot \sin(\omega t - \varphi)$  wird

$$\bar{P} = \frac{\hat{v}_E \cdot \hat{F}_E}{2} \cos \varphi$$

In diesem Ausdruck können im Prinzip alle drei Faktoren, nämlich  $\hat{v}_E$ ,  $\hat{F}_E$  und  $\cos \varphi$ , frequenzabhängig sein.

Für den Parallelschwinger, Abb. 7.1, ist die Kraftamplitude konstant, d. h. unabhängig von der Frequenz. Jeder der beiden anderen Faktoren hat bei der Reso-

## Stimmgabel und Resonanzkasten

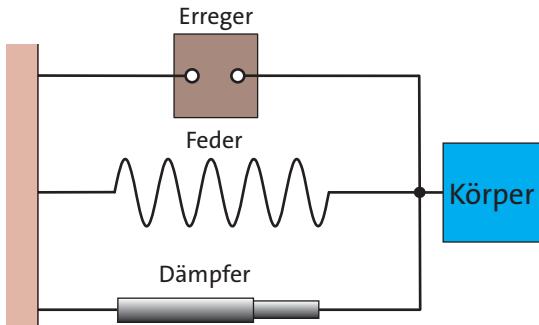


Abb. 7.1 Parallelschwinger mit konstanter Erregerkraftamplitude

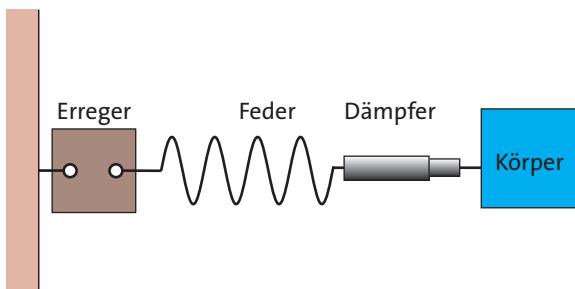


Abb. 7.2 Reihenschwinger mit konstanter Erregergeschwindigkeitsamplitude

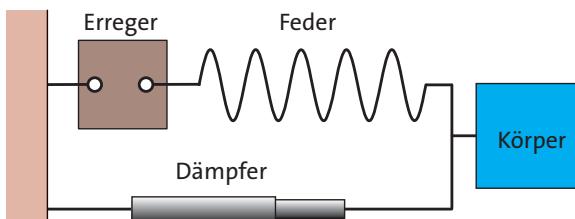


Abb. 7.3 Mischform aus Parallel- und Reihenschwinger

nanzfrequenz ein Maximum. Insbesondere ist also für die Resonanz  $\cos \varphi = 1$ , oder  $\varphi = 0$ . Geschwindigkeit und Kraft des Erregers sind in Phase. Diese Aussage ist einleuchtend. Wenn man einen Schwinger optimal anregen, d. h. in Resonanz bringen will, so muss man dann am stärksten ziehen oder drücken, wenn er sich am schnellsten bewegt.

Beim Reihenschwinger, Abb. 7.2, ist die Geschwindigkeitsamplitude frequenzunabhängig. Kraftamplitude und  $\cos \varphi$  haben bei der Resonanzfrequenz ein Maximum, und wie beim Parallelschwinger ist  $\varphi = 0$ .

Die Schwingertopologie, die man in der Mechanik am häufigsten betrachtet, ist die von Abb. 7.3. Es zeigt sich, dass dieser Schwinger mathematisch äquivalent ist zum Parallelschwinger. Als Kraft hat man hier

$$D \cdot \hat{x}_E \cdot \sin(\omega t)$$

zu setzen. Im Resonanzfall ist diese Kraft mit der Geschwindigkeit des Schwingers in Phase, was formal genauso begründet werden kann wie die Phasendifferenz null beim Parallelschwingkreis. Da der Ort des Schwingers gegen seine Geschwindigkeit um  $\pi/2$  phasenverschoben ist, ergibt sich daraus auch die Aussage der am Anfang zitierten Sätze.

### Herkunft

Siehe die frühere Altlast [1]. Dass man die Ortsamplituden von Schwinger und Erreger in den Mittelpunkt der Betrachtung stellt, entspricht der Tradition der Mechanik, ein Problem dann als gelöst zu betrachten, wenn man den Weg-Zeit-Zusammenhang bestimmt hat, also das, was man mit den Augen sieht. Man versteht aber die Mechanik besser, wenn man die Variablen Impuls und Energie, sowie deren Ströme in den Vordergrund stellt. Dass man dem Schwinger der Abb. 7.3 den Vorzug gibt, mag auch daran liegen, dass er sich leichter in quantitativ auswertbaren Experimenten realisieren lässt. Die Rotationsversion dieser Anordnung ist das beliebte Pohl'sche Rad.

### Entsorgung

Es lohnt nur dann, eine Phasenbeziehung als Funktion der Erregerfrequenz zu betrachten, wenn man die entsprechende Funktion auch interpretiert. Leicht interpretierbar ist die Phasendifferenz zwischen Geschwindigkeit und Kraft. Das Produkt aus beiden ist der Strom der im Schwinger dissipierten Energie. Die Phasendifferenz null trägt dazu bei, dass dieses Produkt bei der Eigenfrequenz des Schwingers maximal wird.

[1] F. Herrmann, *Resonanzfrequenz und Eigenfrequenz*

## 7.4 Stimmgabel und Resonanzkasten

### Gegenstand

- 1 „Bringt man den Fuß einer angeschlagenen Stimmgabel in Kontakt mit einem Resonanzkörper wie einer Tischplatte oder gar dem Schädelknochen, so wird der erzeugte Ton verstärkt und ist viel deutlicher zu hören.“
- 2 „Eine Stimmgabel wird angeschlagen und an verschiedene Gegenstände gehalten. Der Ton wird manchmal lauter. Der Ton ist am lautesten bei einer Stimmgabel mit Klangkasten.“

3 „Die von einer schwingenden Stimmgabe produzierten Schallwellen sind sehr leise. Eine harte Unterlage dient als Resonanzkörper für die Stimmgabe, sodass die Schwingung verstärkt und für uns hörbar wird.“

### Mängel

Schon im Pohl [1] kann man lesen: „Oft hört man, „die Schwingungen würden durch Resonanz verstärkt.“ Das ist eine ganz schiefe Ausdrucksweise.“ Aber Pohl ist lange her, und was er damals schrieb, hat sich offenbar nicht herumgesprochen. Unsere Zitate, die typisch sind, belegen es: Auch heute noch hört (oder liest) man, der Schall werde durch einen Resonanzkörper oder -kasten verstärkt, oder einfach, der Ton werde lauter. Das ist zwar nicht falsch, aber „schief“, wie Pohl es schon sagte. Denn es hört sich an, als bekomme man hier etwas umsonst.

Die Aussage ist ähnlich wie die folgende: Wenn man viel Geld ausgibt, erhöht sich der Umsatz. Auch das hört sich zunächst gut an. Hier sieht man aber das Problem deutlicher: Wenn man in der ersten Woche des Monats einen hohen Umsatz erzeugt, bleibt nichts mehr für die folgenden drei Wochen.

Ähnlich ist es beim Schall: Mit Resonanzkasten ist der Ton der Stimmgabe lauter, dauert dafür aber entsprechend weniger lange. Wegen der Abstrahlung wird die Schwingung des Resonanzkastens stark gedämpft, und durch den Resonanzkasten wird die Schwingung der Stimmgabe gedämpft.

Es ist ähnlich wie bei der elektrischen Schaltung von Abb. 7.4.

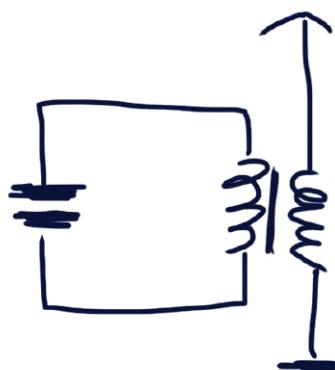


Abb. 7.4 Der Schwingkreis links wird zunächst mit Energie geladen. Wäre er nicht an den Antennenschwingkreis gekoppelt, so würde er lange schwingen. Wegen der Kopplung verliert er aber seine Energie schnell. Die Energie geht mit der emittierten elektromagnetischen Welle weg.

Der Schwingkreis links allein genommen ist schwach gedämpft; er würde, nachdem er einmal mit Energie geladen worden ist, lange schwingen. Er ist aber an den Antennenschwingkreis gekoppelt. Der Antennenschwingkreis ist gedämpft, weil er eine elektromagnetische Welle abstrahlt. Wegen der induktiven Kopplung wird dem ersten Schwingkreis schnell seine Energie entzogen, sodass er nur noch kurze Zeit schwingt.

Hier von „verstärken“ zu sprechen, ist sicher nicht geschickt, denn normalerweise benutzt man das Wort in Naturwissenschaft und Technik in einer anderen Bedeutung: In einem Verstärker geht ein Signal mit einem kleinen Energiestrom hinein, und es kommt mit einem großen heraus. Damit das möglich ist, muss der Verstärker an eine Energiequelle angeschlossen sein. Der Resonanzkasten dagegen sorgt nur dafür, dass die Energie der Stimmgabe schnell abfließt.

### Herkunft

Die sich aufdrängende Sinneswahrnehmung steht im Vordergrund, nicht die Bilanz der Erhaltungsgröße Energie.

### Entsorgung

Man erklärt, dass der Resonanzkasten dafür sorgt, dass die Energie schneller abfließt. Der Energiestrom ist stärker, und der Ton ist lauter, dauert aber nicht so lange wie ohne Resonanzkasten.

[1] R. W. Pohl, *Mechanik, Akustik, Wärmelehre*, Springer-Verlag, Berlin, 1969, S. 235

## 7.5 Gekoppelte Pendel, gekoppelte Schwingungen und Synchronisation

### Gegenstand

Überschriften in verschiedenen Physikwerken:

- „Gekoppelte Pendel“
- „Gekoppelte Schwingungen“
- „Koppelschwingungen“

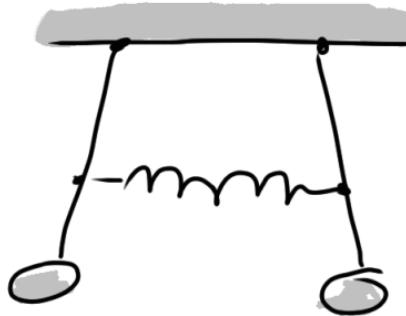
Gemeint ist jedes Mal dasselbe. Zwei Pendel oder Feder-Schwinger sind mithilfe einer schwachen Feder aneinander gekoppelt.

### Mängel

Die Pendel, Abb. 7.5, sind gekoppelt. Zu sagen, dass die Schwingungen gekoppelt sind, ist eher ungeschickt,

## Gekoppelte Pendel, gekoppelte Schwingungen und Synchronisation

denn die Einsicht besteht gerade darin, dass man es mit zwei voneinander unabhängigen, also nicht gekoppelten Bewegungen zu tun hat. Von Kopplung spricht man in der Physik immer dann, wenn ein System nicht in zwei wechselwirkungsfreie Teilsysteme zerlegt werden kann. Oder in anderen Worten: wenn die Hamilton- oder allgemeiner, die Massieu-Gibbs-Funktion nicht in variablenfremde Summanden zerfällt.



**Abb. 7.5** Gekoppelte Pendel, aber keine gekoppelten Schwingungen

Das Pendelsystem zerfällt aber bei geeigneter Wahl der Koordinaten, nämlich der Normalkoordinaten, in zwei wechselwirkungsfreie Teilsysteme. Jede der beiden Koordinaten beschreibt eine der beiden Normalschwingungen.

Die Tendenz, die Pendel einzeln zu betrachten statt die entkoppelten Eigenschwingungen, sieht man auch an den Erklärungsmustern der sogenannten Synchronisation, einem überraschenden Phänomen, das Huygens entdeckt hat: Mehrere baugleiche Pendeluhrnen, die in einem gemeinsamen Gehäuse montiert sind, schwingen, wenn man ihnen etwas Zeit lässt, exakt synchron und mit einer ganz bestimmten Phasenbeziehung. Es erscheint zunächst fast als Wunder, dass sich die einzelnen Pendel von den Nachbarn hereinreden lassen, nicht nur, mit welcher Phase sie schwingen sollen, sondern auch mit welcher Frequenz. Hat nicht jedes seine eigene Lieblingsfrequenz? Wie soll man die denn verändern?

So greifen die üblichen Erklärungen auf ein etwas wuchtiges Werkzeug zurück: Der Vorgang sei nichtlinear. Eine solche Erklärung ist zwar umfassend und korrekt, aber unnötig einschüchternd. Eine nützliche Regel der Lehre der Physik wird nicht beherzigt: Erkläre ein Phänomen am einfachsten Beispiel, bei dem es auftritt. Bei den normalen Schwingungen verfahren wir schließlich auch so: erst die ungedämpfte harmonische Schwingung, und, wenn noch Zeit übrig ist, auch: die gedämpfte, die erzwungene, die selbsterregte, die nichtlineare, die Kippschwingung ...

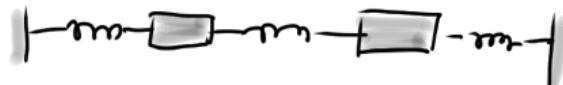
## Herkunft

Die Neigung, das zur Grundlage der Beschreibung zu machen, was wir mit den Augen wahrnehmen. Im vorliegenden Fall die Bewegungen der Einzelpendel.

## Entsorgung

Man spricht nicht von gekoppelten Schwingungen, sondern, wenn man unbedingt will, von gekoppelten Pendeln. Man könnte auch sagen: ein harmonischer Schwinger mit zwei Freiheitsgraden.

Was die Synchronisation betrifft: Man betrachtet das einfachste Beispiel, etwa den Federschwinger von Abb. 7.6. Wenn man das System irgendwie anregt, werden die beiden Körper im Allgemeinen ungeordnet herumwackeln.



**Abb. 7.6** Federschwinger mit zwei Freiheitsgraden

Man führt dann eine Dämpfung ein, in Abb. 7.7 durch die Schwingungsdämpfersymbole repräsentiert. Im Allgemeinen werden die beiden Eigenschwingungen unterschiedlich stark gedämpft sein. Die eine Schwingung stirbt also früher weg als die andere. Wenn es sich um eine selbsterregte Schwingung handelt, wie bei Huygens' Uhren, so wird sich das System die Energie vorzugsweise im Takt der nicht wegsterbenden Schwingung holen, sodass die eine Schwingung aufrechterhalten wird, der anderen dagegen Energie entzogen wird.



**Abb. 7.7** Federschwinger mit Dämpfung. Eine der Eigenschwingungen ist stärker gedämpft als die andere.

Dieses Verhalten erscheint uns als Synchronisation: Wenn wir die beiden Körper als Teilsysteme sehen, so scheinen sie sich gegenseitig abzusprechen, sich auf eine gemeinsame Frequenz und Phase zu einigen – ein Wunder. Richten wir den Blick dagegen auf die beiden Eigenschwingungen, so entpuppt sich der Vorgang als ein Wegsterben der einen. Ein solches Verhalten ist für zwei unabhängige Schwingungen zu erwarten. Es wäre ganz unwahrscheinlich, dass beide gleich stark gedämpft sind.

# 8 OPTIK

## 8.1 Die Bestandteile des Lichts

### Gegenstand

Man sagt, weißes Licht bestehe aus Licht verschiedener Wellenlängen oder Frequenzen:

- 1 „Fällt weißes Licht so auf ein Prisma, dass es zweimal gebrochen wird, dann wird es in seine Bestandteile zerlegt ...“
- 2 „In der Natur, speziell bei der Sonnenstrahlung (Planck'scher Strahler), liegt aufgrund der Entstehung der Strahlung eine Überlagerung von Wellenlängen vor.“
- 3 „... womit der Beweis erbracht ist, dass 'weißes' Licht aus den verschiedenen Wellenlängen des Spektrums besteht.“
- 4 „Licht besteht aus Photonen; ein Photon hat eine bestimmte Wellenlänge; Licht besteht aus Anteilen verschiedener Wellenlängen.“
- 5 „Why does white light consist of many different wavelengths?“
- 6 „White light consists of a mixture of all wavelengths of light.“

### Mängel

Wir sehen ab von Schnitzern wie „Weißes Licht besteht aus verschiedenen Wellenlängen“, oder „Weißes Licht besteht aus verschiedenen Frequenzen“, d. h. Formulierungen, die jedem, der an begriffliche Klarheit gewöhnt ist, weh tun müssen. Hier geht es um etwas anderes.

Man kann Licht auf verschiedene Arten beschreiben. In anderen Worten: Es gibt verschiedene Theorien des Lichts: die Strahlenoptik, die sich mit der optischen Abbildung befasst, die nichtabbildende Optik, bei der die Energiestromverteilung im Mittelpunkt steht, die Wellenoptik, die im Wesentlichen eine elektrodynamische Beschreibung ist, die thermodynamische Beschreibung, die bei der Berechnung des Wirkungsgrades von Solarzellen eine Rolle spielt, und schließlich die Quantenoptik. Keine der Theorien ist falsch – selbstverständlich nicht. Man kann auch nicht sagen, dass eine besser sei als die andere. Welche The-

orie zum Einsatz kommt, hängt nur davon ab, was für ein Problem man lösen will.

Wir beschränken uns im Folgenden auf die in der Schule beliebteste Beschreibung, nämlich die Wellenoptik sowie auf die Thermodynamik des Lichts.

Zurück zu unseren Zitaten, die sicher als typisch gelten können: Danach besteht Licht aus Anteilen verschiedener Wellenlängen.

Nun besteht aber Licht keineswegs aus Sinus-Bestandteilen, wenn man den Ausdruck „bestehen aus“, so verwendet, wie es in der Umgangssprache üblich ist. „Bestehen aus“ heißt: Die Bestandteile eines Objekts sind in dem Objekt enthalten und darin erkennbar. Statt „bestehen aus“ könnte man also besser sagen: Man kann das Licht in Beiträge verschiedener Wellenlängen zerlegen.

Denn man kann es nicht nur in Sinus-Anteile zerlegen. Es gibt beliebig viele Möglichkeiten der Zerlegung.

Sagen wir denn, dass die Wasserwellen auf dem Meer aus Wellen verschiedener Wellenlängen bestehen? Wenn es jemand sagen würde, würden wir ihm wahrscheinlich spontan entgegnen: Man sieht doch, dass das keine Sinuswellen sind. Bis uns einfällt, dass man die unordentliche Bewegung des Wassers genauso in Fourier-Komponenten zerlegen kann wie das Sonnenlicht.

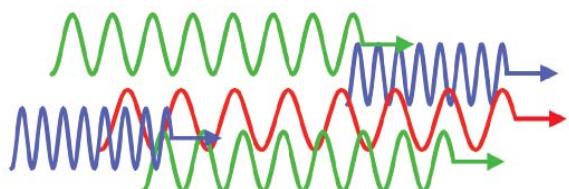


Abb. 8.1 Bestandteile des Lichts? Photonen?

Es ist zu befürchten, dass wir in den Köpfen der Schülerinnen und Schüler oder der Studierenden ein Bild erzeugen, das etwa wie in Abb. 8.1 aussieht, wobei man möglicherweise die Wellenschwünze gleich als Photonen verkauft. (Man sagt vielleicht auch noch, dass ein Photon eine bestimmte Wellenlänge habe, siehe Zi-

## Das Huygens'sche Prinzip

tat 4. Dann müsste es allerdings unendlich lang sein. Gleichzeitig gibt man aber zu verstehen, dass es doch nicht sehr lang ist, sondern eher punktförmig, und über die Breite äußert man sich schon gar nicht.)

Es wäre passender, die Beschreibung des Zustandes des elektromagnetischen Feldes, der im Sonnenlicht vorliegt, zu beginnen, ohne auf die Fourierzerlegung Bezug zu nehmen: Das Feld befindet sich im Zustand maximaler Unordnung oder maximaler Entropie; man kann auch sagen maximaler Verschmierung im Phasenraum oder maximaler Inkohärenz. Der zeitliche Verlauf des Feldstärkebetrages sieht etwa aus, wie es Abb. 8.2 zeigt.



**Abb. 8.2** Weißes Licht: Feldstärkeverlauf an einem Ort als Funktion der Zeit

Man ist als Physiker geneigt, ein solches Feld hässlich zu finden. In der Nachrichtentechnik würde man es Rauschen nennen, und Rauschen ist eine Erscheinung, die es zu vermeiden gilt. Ist nicht das monochromatische Licht am besten zum Experimentieren geeignet? Und auch die mathematische Beschreibung von monochromatischem Licht ist doch viel einfacher als die des chaotischen weißen Lichts, oder nicht? Nicht unbedingt. Denn das maximal ungeordnete oder „thermische Licht“ ist auf eine andere Art sehr einfach. Man kann es beschreiben durch den Wert von nur zwei Variablen: der Temperatur und dem chemischen Potenzial – wobei das chemische Potenzial in den meisten interessierenden Fällen auch noch null ist. Das, was uns aus einem Blickwinkel als maximal kompliziert erscheint, ist also aus einem anderen besonders einfach. Von den Wissenschaftstheoretikern wird eine solche aus dem Durcheinander herauswachsende Einfachheit durch den Begriff Emergenz erfasst.

### Herkunft

An erster Stelle wohl vom Prisma: Wenn hinten Lichtbeiträge verschiedener Farben herauskommen, so ist der Schluss naheliegend, dass die vorher auch schon drin waren. Eine ähnliche Leichtfertigkeit im Umgang mit dem „bestehen aus“ treffen wir auch in anderen Zusammenhängen an, etwa in der Atomphysik: Man sagt, die Elektronenhülle bestehe aus Atomorbitalen. Man kann die Atomhülle aber auch anders zerlegen, und das tut man, wenn es angebracht ist. Die Anteile bekommen dann den etwas abschreckenden Namen Hybridorbitale. Dem Studenten erscheint es, als sei hier etwas grund-

sätzlich Neues und vielleicht schwer Verständliches geschehen, vielleicht auch eine Art Taschenspielertrick. Tatsächlich hat man aber den Gesamtkuchen Atomhülle nur in anders geformte Stücke zerteilt.

Zu der Vorstellung, weißes Licht bestehe aus Sinuswellen, trägt wahrscheinlich auch eine Sprachgewohnheit bei. Der Satz „Licht ist eine elektromagnetische Welle“ ist im Sinne der Physik nicht falsch. Andererseits versteht man in der Umgangssprache unter einer Welle einen regelmäßigen, periodischen Vorgang. Ein Verlauf wie ihn Abb. 8.2 zeigt würde man nicht als Welle bezeichnen.

### Entsorgung

- Sorgfalt im Umgang mit der Sprache. Deutlich machen, dass die spektrale Zerlegung nur eine von vielen Möglichkeiten der Zerlegung ist.
- Die Sinuswellen nicht als das Eigentliche, d. h. als die tiefere Wahrheit einführen. Und vor allem: Auch Bilder von Lichtverteilungen zeigen, die nicht sinusförmig sind.
- Und schließlich wieder: Etwas Thermodynamik kann nicht schaden.

## 8.2 Das Huygens'sche Prinzip

### Gegenstand

Das Huygens'sche Prinzip wird nicht nur herangezogen, um die Beugung an Einzelpalt, Doppelpalt und Gitter zu erklären, sondern man beschreibt damit auch Reflexion und Brechung.

### Mängel

- Das Huygens'sche Prinzip ist ein einfaches mathematisches Werkzeug zur Bestimmung von Auslöschung und Verstärkung bei Interferenzerscheinungen. Für die einfachsten und gleichzeitig wichtigsten Beugungsexperimente wird es allerdings nicht gebraucht. Dass von einer kleinen Einzelöffnung in einem Hindernis, gegen das eine Welle läuft, eine Kreis- bzw. Kugelwelle ausgeht, ist zu erwarten, sobald man weiß, dass es das Phänomen der Beugung gibt. Ebenso wenig bedarf es einer besonderen Erklärung, dass hinter einer Doppelöffnung zwei, und hinter einem Gitter viele solche Wellen entstehen. Hierfür, und auch für die Diskussion der entsprechenden Interferenzfiguren, wird weder ein eigener Name „Elementarwelle“ noch ein eigenes Prinzip gebraucht. Gebraucht wird das Huygens'sche Prinzip erst, wenn man einen größeren Ausschnitt aus einer einlaufenden

den Wellenfront als Quelle einer auslaufenden Welle betrachtet.

- Nicht gebraucht wird das Huygens'sche Prinzip auch zur Beschreibung der Gesetzmäßigkeiten bei Brechung und Reflexion einer ebenen Welle, denn man führt dabei lediglich das Verhalten einer ebenen Welle auf das von vielen Kugelwellen zurück. Man kann bekanntlich eine Funktion auf beliebig viele Arten zerlegen: in harmonische Anteile, in Kugelfunktionen, in Besselfunktionen und vieles andere. Zweckmässigerweise wählt man eine Zerlegung so, dass der Symmetrie des Problems Rechnung getragen wird. Das tut man aber nicht, wenn man eine ebene Welle nach Elementarwellen, also Kugelwellen zerlegt. Die ursprüngliche ebene Welle hat bereits die höchste Symmetrie, die eine Welle überhaupt haben kann. Brechung und Reflexion lassen sich unschwer mit der ebenen Welle verstehen.
- Die Bezeichnung „Prinzip“ lässt erwarten, es handele sich um eine von den sonst bekannten Gesetzen der Mechanik bzw. der Elektrodynamik unabhängige Aussage, was sicher nicht zutrifft. Der Beweis dafür, dass das Huygens'sche Prinzip aus der Wellengleichung folgt, gehört allerdings zu den eher schwierigen Themen der Optik, siehe zum Beispiel [1].
- Auch der Name Elementarwelle ist nicht recht passend, da man das Adjektiv „elementar“ gewöhnlich verwendet im Sinne von: das Eigentliche, das Grundlegende, das nicht auf etwas anderes Rückführbare. Die Huygens'schen Kugelwellen sind in diesem Sinne aber ganz und gar nicht elementar. Sie stellen nichts anderes dar, als eine von vielen möglichen mathematischen Zerlegungen.

### Herkunft

Huygens formulierte das Prinzip im 1690 erschienenen „Traité de la Lumière“. Bis zu der mit Fresnel und Young beginnenden großen Zeit der Wellenoptik waren es noch über hundert Jahre hin, bis zur Faraday-Maxwell'schen Elektrodynamik noch 150 Jahre. Bekannt waren zu Huygens' Zeit das Brechungs- und das Reflexionsgesetz, die endliche Geschwindigkeit des Lichts sowie die Tatsache, dass sich weißes Licht aus farbigen Anteilen zusammensetzt. Welche Rolle hat das Huygens'sche Prinzip damals gespielt, und warum hat es bis heute eine so große Bedeutung behalten?

Es existierte bereits eine „Korpuskulartheorie“ des Lichts, zunächst von Descartes vertreten und dann von Newton ausgebaut. Dieser stellte nun Huygens eine Wellentheorie gegenüber. Ob eine Theorie des Lichts etwas taugt, entschied sich damals vor allem daran, ob sie Brechung und Reflexion erklären konnte.

„Erklären“ hieß, wie auch heute noch, eine Erscheinung auf eine andere zurückführen, die man für fundamental und nicht mehr erklärbungsbedürftig hielt. Die Elementarwellen sollten eine solche nicht weiter erklärbungsbedürftige Erscheinung sein.

Seit Fresnel bedürfen aber Brechung und Reflexion sicher nicht mehr der Elementarwellen als Erklärung, und als schließlich mit Maxwell eine echte Wellentheorie des Lichts entstand, hatte die Huygens'sche Methode als Prinzip eigentlich endgültig ausgedient, auch wenn zunächst noch nicht klar war, warum das „Prinzip“, das auf der Annahme einer mechanischen Longitudinalwelle beruhte, auch für die komplizierteren elektromagnetischen Wellen gelten sollte. Erst Kirchhoff hat schließlich die Gültigkeit des Huygens'schen Prinzips aus der Elektrodynamik hergeleitet.

Die Rolle, die das Huygens'sche Prinzip heute im Unterricht von Schule und Hochschule spielt, ist noch stark von seiner früheren Wichtigkeit geprägt. Wie schon das Lenz'sche Gesetz oder die Kepler'schen Gesetze hat es aber die Einführung von allgemeiner gültigen Nachfolgegesetzen überlebt. Gewiss, als einfache Methode zur näherungsweisen Bestimmung von Interferenzbildern ist es immer noch geeignet, aber als solche sollte man es auch in die Kiste der anderen Werkzeuge tun.

Ein anderer Verdacht ist übrigens nicht von der Hand zu weisen: Das Thema „Beugung und Interferenz“ und damit auch das Huygens'sche Prinzip wird in seiner ungewöhnlichen Ausführlichkeit dadurch am Leben erhalten, dass es traditionell als Aufgabenquelle für das Abitur herhalten muss.

### Entsorgung

Für Einzelspalt, Doppelspalt und Gitter braucht man das Huygens'sche Prinzip nicht. Wenn man sich nicht entschließen kann, die Behandlung des breiten Spaltes der Universität zu überlassen, so könnte man es einführen. Es sollte dann aber etwas bescheidener auftreten.

[1] E. Hecht, *Optik*, Addison-Wesley, Bonn, 1989, S. 487

## 8.3 Beugung am Spalt und Interferenz des Lichts

### Gegenstand

Das Einzel- und das Doppelspaltexperiment nehmen im Physikunterricht einen wichtigen Platz ein. Die Beugungsbilder werden ausführlich diskutiert. Das Doppelspaltexperiment wird angeführt als Beweis für den Wel-

## Beugung am Spalt und Interferenz des Lichts

lencharakter des Lichts, und es wird später — vor allem in Form eines Gedankenexperiments — als Hilfsmittel benutzt, die Natur von sogenannten Quantenobjekten zu demonstrieren.

### Mängel

- Die Beugung von Licht am Einzel- und am Doppelspalt wird mit einer Sorgfalt und in einer Ausführlichkeit behandelt, die über die Ansprüche der Schulphysik, nämlich einen Beitrag zur Allgemeinbildung zu leisten, weit hinausgeht. Als Young das Doppelspaltexperiment zum ersten Mal ausführte, hatte es die Bedeutung eines Experimentum crucis. Diese Bedeutung hat es aber längst nicht mehr. Das Doppelspaltexperiment ist nur einer von vielen Hinweisen auf den Wellencharakter des Lichts. Außerdem wissen wir inzwischen, dass das Licht nur einen winzigen Ausschnitt aus dem „Spektrum“ der elektromagnetischen Wellen darstellt. Mit den Strahlungen der anderen Wellenlängen geben wir uns nicht so viel Mühe.
- Die Beugungsexperimente mit Einfach- und Doppelspalt sind kompliziert. Sie vereinigen zwei Erscheinungen, nämlich die Beugung und die Interferenz. Das Zusammenspiel ist unübersichtlich und gelegentlich wird noch beteuert, es gebe keinen Unterschied zwischen den Erscheinungen [1].
- Wenn man die Aufgabe stellt, zwei Lichtwellen zur Interferenz zu bringen, so käme wohl kaum jemand darauf, einen Doppelspalt zu verwenden. Die nahe liegende Idee wäre: Nimm zwei Lichtquellen. Erst wenn man wirklich verstanden hat, warum das nicht geht, und zwar auch nicht mit zwei Lasern, wird man akzeptieren, dass man eine andere Lösung finden muss. Bei jedem gut gewählten Experiment sollte der Schüler das Gefühl haben: „Da hättest du auch selbst drauf kommen können.“ Das ist beim Doppelspaltexperiment eher nicht der Fall.
- In der Quantenphysik muss das Doppelspaltexperiment als Schauplatz für allerlei widersprüchliche Geschichten herhalten. Man stellt sich das Licht vor als aus Photonen bestehend, d. h. kleinen Körperchen, die, wenn sie von der Lichtquelle zum Detektor kommen wollen, entweder durch den einen oder den anderen Spalt hindurchfliegen müssen. Trotz aller Warnungen, die eigentlich von der Theorie ausgehen sollten und die auch oft ausgesprochen werden, ist aber die Vorstellung von den Photonen als kleinen Körperchen nicht auszurotten. Um ihren besonderen Charakter zu betonen, nennt man sie nicht mehr, wie früher, Korpuskeln, sondern Quantenobjekte. Man spricht aber nach wie vor über sie wie man über Kör-

perchen spricht. Sobald man nämlich die Frage diskutiert, durch welchen der beiden Spalte das Photon hindurchgeht, hat man schon zugegeben, dass man die Vorstellung vom Körperchen für legitim hält. Und man hat gleichzeitig auch eine, wenn auch unausgesprochene Aussage über die Größe der Körperchen gemacht: Sie müssten (in der Querausdehnung) mindestens so klein sein, dass sie durch einen Spalt hindurchpassen.

### Herkunft

- Schon bevor die Interferenz-Experimente von Young und Fresnel gemacht wurden, hatte man gute Argumente sowohl für eine Korpuskel- als auch für eine Wellentheorie des Lichts, und man war natürlich der Überzeugung, nur eine von beiden könne die richtige sein: Entweder ist Licht eine Welle oder es besteht aus Teilchen. Mit Youngs Experiment schien die Sache entschieden zu sein. In der Folge wurden noch viele andere Argumente dafür gefunden, dass Licht eine Welle ist, aber nicht nur das: Mit Maxwells Theorie verstand man 70 Jahre nach Youngs Experiment endlich auch die Natur der Welle, oder man glaubte es wenigstens, und man fand nach und nach immer mehr elektromagnetische Wellen zu beiden Seiten des Wellenlängenbereichs des Lichts. Trotz all dieser späteren Errungenschaften hat das Young'sche Experiment in der Lehre immer noch eine Bedeutung, als wäre es das einzige, mit dem man die Wellennatur des Lichts begründen kann.
- Durch die Quantenphysik ist das Doppelspaltexperiment zu neuer Blüte gekommen. Die Quantenphysik lehrte, dass die Freude darüber, dass man die wahre Natur des Lichts aufgedeckt habe, zu früh kam.
- Es hat sich eine Aufgabentradition entwickelt, die dazu geführt hat, dass man sich ein Abitur ohne eine Aufgabe zu Interferenz und Beugung kaum noch vorstellen kann.

### Entsorgung

- 1 Wenn man die Interferenz des Lichts experimentell zeigen will, diskutiere man zuerst sorgfältig, warum das Experiment mit zwei Lichtquellen nicht geht, auch nicht mit zwei Lasern.
- 2 Experimente zu Beugung mit Interferenz mache man mit dem Gitter. Sie sind überzeugender.
- 3 Für manche Zwecke ist das Michelson-Interferometer oder das Mach-Zehnder-Interferometer geeigneter: Man braucht keinen Sinus und keine Beugung. (Es hat allerdings seine eigenen Tücken.)
- 4 Das Phänomen der Beugung diskutiert man am Beispiel von Strahlungen, bei denen die Effekte groß

sind: Schall und Radiowellen, und man stellt dann die Frage, warum der Effekt beim Licht so klein ist. Wenn man weiß, dass Licht eine Welle ist, besteht der Erklärungsbedarf nicht für die Beugung, sondern dafür, dass Licht gewöhnlich ungebeugt läuft.

- [1] E. Hecht, *Optik*, Addison-Wesley, Bonn, 1989, S. 415: „Es gibt keinen wirklichen Unterschied zwischen Interferenz und Beugung.“

## 8.4 Kohärenz

### Gegenstand

Der Kohärenzbegriff wird in Lehrbüchern auf verschiedene Arten erklärt und kommentiert. Die folgenden Zitate entstammen verschiedenen Büchern.

- 1 „Miteinander interferierende Wellenzüge werden als kohärent bezeichnet, nicht miteinander interferierende als inkohärent.“
  - 2 „Zwei Erreger, die ein gleichbleibendes Interferenzmuster erzeugen, heißen kohärent. Dazu müssen sie mit gleicher Frequenz und fester Phasendifferenz schwingen.“
  - 3 „Bei einer ausgedehnten Lichtquelle, etwa einem leuchtenden Glühlampenfaden, sind die Wellenzüge, die von zwei verschiedenen Stellen des Fadens in einem Augenblick aufs Auge treffen, inkohärent, d.h., sie haben ganz verschiedene Phasen und Polarisationsrichtungen.“
  - 4 „Nur Licht, das von einem Punkt einer Lichtquelle ausgegangen ist, kann zur Interferenz gebracht werden, nachdem es geteilt ist und verschiedene Wege durchlaufen hat.“
  - 5 „Da das spontan emittierte Licht eines heißen Körpers von einzelnen, voneinander unabhängigen Atomen ausgestrahlt wird, ist es ausgeschlossen, dass zwei verschiedene Lichtquellen zufällig die gleiche Schwingung ausführen, also kohärente Wellenzüge ausstrahlen.“
  - 6 „Ein Spalt sendet kohärentes Licht aus, solange für seine Breite  $d$  und für den Öffnungswinkel  $2\alpha$  seines Lichtkegels gilt
- $d \cdot \sin \alpha < \lambda/2$ .“

### Mängel

Mit dem Kohärenzbegriff haben nicht nur Schüler, sondern auch Studenten ihre Probleme. Die oben zitierten Erklärungen zeigen, dass das kein Wunder ist. Einige dieser Aussagen geben für sich schon Rätsel auf. Beson-

ders schwierig wird es aber, wenn man versucht, die verschiedenen Erklärungen unter einen Hut zu bringen.

Worauf bezieht sich eine Aussage über Kohärenz? Den Sätzen 1, 3 und 5 zufolge auf eine Beziehung zwischen zwei „Wellenzügen“. Was soll man aber unter einem Wellenzug verstehen? Die ganze Welle? Einen räumlichen Ausschnitt einer Welle? Welchen Ausschnitt? Nach Satz 2 drückt die Kohärenz eine Beziehung zwischen zwei „Erregern“ aus. Die Erreger müssen mit gleicher Frequenz und fester Phasendifferenz schwingen, heißt es. Demnach sollte es Erreger geben, die zwar mit gleicher Frequenz, aber doch mit sich ändernder Phasendifferenz schwingen? Wie sieht eine solche Schwingung aus? Satz 6 schließlich ordnet die Kohärenz einfach dem „Licht“ zu.

Handelt es sich hier nur um unterschiedliche Formulierungen einer und derselben Tatsache oder widersprechen sich vielleicht einige der Sätze 1 bis 6?

Satz 3 behauptet, nur Licht, das von einer und derselben Stelle kommt, sei kohärent. Satz 4 macht, auch wenn das Wort Kohärenz nicht vorkommt, eine ähnliche Aussage. Was sind aber zwei verschiedene Stellen? Wie weit dürfen die Stellen maximal voneinander entfernt sein? Satz 5 sagt es noch deutlicher: Licht, das von verschiedenen Atomen kommt, könne nicht kohärent sein. Nun benutzt man aber das Licht, das von einem Stern kommt, zur Messung des Sterndurchmessers mithilfe des Michelson'schen Sterninterferometers. Dabei bringt man Licht zur Interferenz, das von Orten des Sterns kommt, die Millionen von Kilometern voneinander entfernt sind.

### Herkunft

Alle Sätze 1 bis 6 machen Aussagen entweder darüber, wie man kohärentes Licht erzeugt oder wie man die Kohärenz nachweist. Keiner sagt, wie ein kohärentes oder inkohärentes Wellenfeld selbst beschaffen ist. Wenn man nur etwas über die Quellen sagt, wie soll man dann die Kohärenz eines Wellenfeldes beurteilen, dessen Quellen man nicht kennt, z.B. die Wasserwellen auf dem Meer?

Wir sehen hier die Tendenz, statt ein Phänomen zu beschreiben, den Herstellungsprozess oder den Nachweisprozess in den Vordergrund zu stellen. Diese Prozesse sind aber komplizierter als das Phänomen selbst. Um ein Fahrrad zu verstehen, braucht man nicht den Herstellungsprozess in der Fabrik zu kennen. Um zu verstehen, was eine Schallwelle ist, muss man nicht die Funktionsweise der Orgelpfeife oder des menschlichen Gehörs kennen. Um sich eine Anschauung vom elektrischen Feld zu bilden, braucht man nicht die Kraft auf die Probelaadung zu kennen.

## Kohärenz

Eine andere Ursache der Unstimmigkeiten ist wohl die Tendenz, ein Phänomen erst dann als erklärt zu betrachten, wenn es auf eine Aussage aus dem Bereich der Atomistik zurückgeführt ist. Nun ist aber die Kohärenz eine Erscheinung, die man erschöpfend mit den Mitteln der klassischen Wellentheorie beschreiben kann. Sobald man eine Deutung aus dem Bereich der Quantenphänomene sucht, riskiert man, sich im Gestüpp der Interpretationen und Modelle zu verlieren.

### Entsorgung

Zunächst zwei allgemeine Bemerkungen zum Kohärenzbegriff:

- 1 Mehr oder weniger ausgeprägte Kohärenz ist eine Eigenschaft des Lichts. Selbstverständlich verdankt das Licht seine Eigenschaften einer Lichtquelle. Das bedeutet aber nicht, dass die Kohärenz eine Eigenschaft der Quelle ist.
- 2 Kohärenz ist eine lokale Eigenschaft des Lichts. Das bedeutet, dass eine gegebene Lichtverteilung an einer Stelle kohärent sein kann und im Allgemeinen auch ist, als an einer anderen. So ist das Licht, das ein Stern emittiert, unmittelbar über der Sternoberfläche räumlich maximal inkohärent, während es hier auf der Erde, also in einer großen Entfernung vom Stern, fast perfekt räumlich kohärent ist. Wenn wir sagen, Kohärenz sei eine lokale Eigenschaft des Lichts, so meinen wir nicht, dass die Kohärenz einem Punkt im mathematischen Sinn zukommt. (In diesem Sinne ist keine physikalische Größe lokal.)

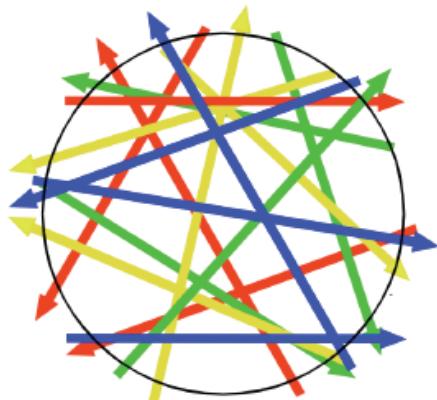
Man kann die Kohärenz auf verschiedene Arten erklären. Sie manifestiert sich in jeder der Theorien, mit denen wir das Licht zu beschreiben pflegen, und das sind im Wesentlichen die geometrische Optik, die klassische Wellenoptik, die Thermodynamik und die Quantenelektrodynamik. Da es hier darum geht, den Begriff Anfängern zu erklären, wählen wir die einfachste dieser Theorien: die geometrische Optik. Anschließend wird noch angedeutet, wie sich die Erklärung in die Wellenoptik übersetzt. Von einer atomistischen oder quantenmechanischen Erklärung raten wir ab. Das ist ein Thema für die Quantenoptik-Vorlesung der Universität. Wir beschränken uns hier auch darauf, die Kohärenz qualitativ zu beurteilen, wir definieren also kein Kohärenzmaß.

Wir wollen das Licht in einem kleinen Raumbereich, direkt vor uns, beschreiben. Was für Lichtstrahlen durchkreuzen diesen Raum? Wir betrachten vier besonders einfache Situationen.

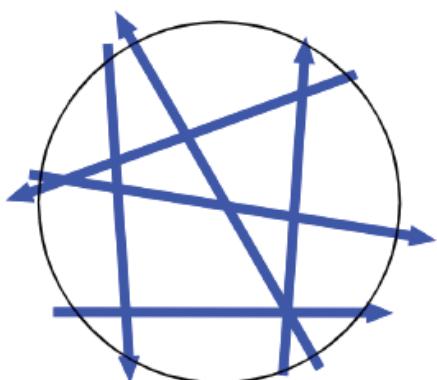
Wir befinden uns im dichten Nebel. Unser Bereich wird von Lichtstrahlen aller Richtungen durchquert,

und wir haben ein Lichtgemisch, das Licht aller Spektralfarben enthält, in Abb. 8.3 angedeutet. Als Nächstes stellen wir uns vor, es sei Nacht, wieder herrsche dichter Nebel, und wir befinden uns unter einer Straßenlaterne, die spektral reines Licht emittiert. Wieder kommt das Licht aus den verschiedensten Richtungen, Abb. 8.4. Eine dritte Situation: Es sei Nacht, kein Nebel, kein Mondschein und keine Sterne. In sehr großer horizontaler Entfernung befindet sich eine Glühlampe. Alle Strahlen in unserem Raumbereich haben dieselbe Richtung, aber es ist Licht der verschiedensten Spektralfarben, Abb. 8.5. Schließlich dieselbe Situation wie eben, nur soll diesmal die Lampe spektral reines Licht aussenden, Abb. 8.6. Alle Strahlen haben jetzt dieselbe Richtung, und das ganze Licht hat dieselbe reine Spektralfarbe.

Das Licht von Abb. 8.3 ist völlig inkohärent. Das Licht von Abb. 8.4 nennt man zeitlich kohärent. „Zeitlich kohärent“ bedeutet also dasselbe wie „spektral rein“. Das Licht von Abb. 8.5 heißt räumlich kohärent.



**Abb. 8.3** Alle Farben, alle Richtungen. Das Licht ist zeitlich und räumlich inkohärent.



**Abb. 8.4** Eine einzige Farbe, alle Richtungen. Das Licht ist zeitlich kohärent.

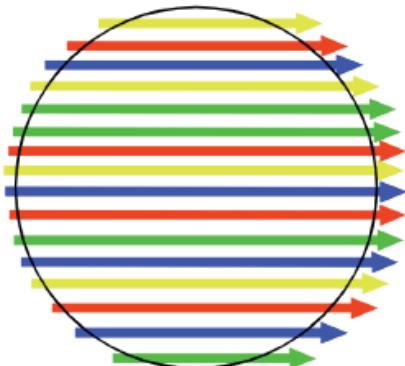


Abb. 8.5 Eine einzige Richtung, alle Farben. Das Licht ist räumlich kohärent.

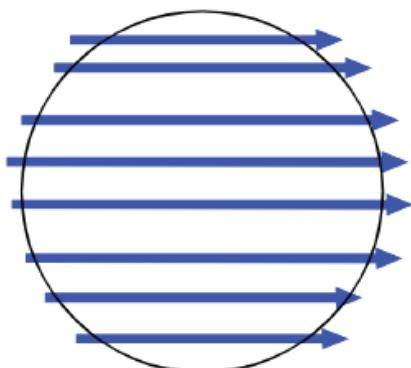


Abb. 8.6 Eine einzige Farbe, eine einzige Richtung. Das Licht ist zeitlich und räumlich kohärent.

„Räumlich kohärent“ ist also das Gegenteil von „diffus“. Das Licht von Abb. 8.6 schließlich ist zeitlich und räumlich kohärent.

Hier noch ein Gleichnis, das man den Schülern erzählen kann: Wir betrachten eine große Kiste mit vielen verschiedenen Äpfeln. Die Äpfel unterscheiden sich in zwei Eigenschaften: in der Größe und in der Farbe. Wir wollen die Äpfel sortieren. Wir beginnen damit, sie der Größe nach in 10 verschiedene Kartons einzuteilen, in jedem ein anderes Größenintervall. Die Äpfel sind jetzt, was das eine der beiden Ordnungskriterien betrifft, in jedem der Kartons einheitlich. Als Nächstes ordnen wir die Äpfel jedes Kartons nach der Farbe, indem wir sie wieder auf je 10 verschiedene, kleinere Kartons aufteilen. Insgesamt haben wir nun 100 Kartons, und in jedem befinden sich Äpfel, die nach beiden Ordnungskriterien – Größe und Farbe – einheitlich sind.

Die Übereinstimmung zwischen Äpfeln und Licht geht noch weiter. So sieht man, dass man sich aus dem gemischten Apfelhaufen nur dadurch geordnete Apfelmengen beschaffen kann, dass man alle Äpfel, die nicht

passen, aussortiert. Man kann ein Apfelmisch nicht in eine reine Apfelmenge verwandeln, genauso wie man inkohärentes Licht nicht in kohärentes verwandeln kann. Das wäre mit Entropievernichtung verbunden und würde dem zweiten Hauptsatz widersprechen. Man kann aber Apfelbäume züchten, die von vornherein nur eine Apfelsorte produzieren. Das Entsprechende geht beim Licht. Es gibt Lichtquellen, die von vornherein nur kohärentes Licht erzeugen, nämlich die Laser.

Die wellenoptische Erklärung sei hier nur angedeutet: Licht ist zeitlich kohärent, wenn die Streuung des Betrages der  $k$ -Vektoren des Lichts gering ist, es ist räumlich kohärent, wenn deren Richtungsstreuung gering ist.

Man sieht einem grafisch dargestellten Wellenfeld die Kohärenz auch direkt an. Ein ausgedehntes Wellenfeld, sagen wir von Wasserwellen auf einem See, lässt Bereiche erkennen, die aussehen wie Ausschnitte aus einer Sinuswelle mit geraden Wellenfronten. Diese Bereiche haben eine gewisse Länge und eine gewisse Breite. Die Länge ist ein Maß für die zeitliche, die Breite für die räumliche Kohärenz.

## 8.5 Unpolarisiertes Licht

### Gegenstand

Was versteht man unter unpolarisiertem Licht? Die folgenden Zitate versuchen, eine Antwort zu geben.

- 1 „Die  $\vec{E}$ -Feldvektoren der Lichtwellen schwingen in keiner Vorzugsrichtung. Von Polarisation spricht man, wenn sich die  $\vec{E}$ -Feldvektoren in einer bestimmten Weise bewegen. Weißes Licht ist im Allgemeinen unpolarisiert.“
- 2 „... handelt es sich bei elektromagnetischer Strahlung in der Regel um die Überlagerung einer Vielzahl von Einzelwellen unterschiedlicher Lage der Schwingungsebene und relativer Phase. Das meiste in der Natur vorkommende Licht ist als thermische Strahlung zunächst unpolarisiert, das heißt, die Einzelwellen sind in ihren Eigenschaften statistisch verteilt.“
- 3 „Natürliches Licht ist in der Regel nicht polarisiert. Es entsteht durch atomare Strahlungsübergänge einer großen Anzahl von Atomen. Jedes dieser Atome strahlt eine Lichtwelle ab, deren Polarisationsrichtung statistisch im Raum verteilt ist, sodass sich die Schwingungsebene des ausgesendeten Lichts fortlaufend ändert.“

Unpolarisiertes Licht wird manchmal mit einer Skizze wie der von Abb. 8.7 veranschaulicht, offenbar einer

## Unpolarisiertes Licht

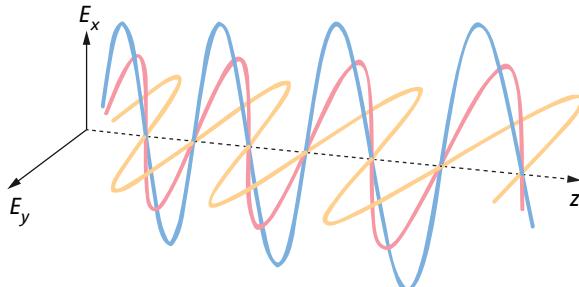


Abb. 8.7 „Momentaufnahme“ des Verlaufs der elektrischen Feldstärke einer elektromagnetischen Welle. Ist die Welle unpolarisiert?

Momentaufnahme der elektrischen Feldstärke (genauer: der Spitze des Vektorpfeils) über der Ortskoordinate in Laufrichtung des Lichtstrahls. Zu sehen sind mehrere „Wellen“ gleichzeitig am selben Ort.

### Mängel

Es ist sicher nicht schwer zu verstehen, was eine polarisierte elektromagnetische Welle ist. Auch versteht man leicht, was ein Polarisator bewirkt. Schwieriger scheint die Frage zu sein, was man sich unter unpolarisiertem Licht vorzustellen hat. In Lehrbüchern kommt dieses Thema oft etwas zu kurz.

Es gibt verschiedene Theorien des Lichts: die geometrische Optik, die klassische Elektrodynamik, die Quantenelektrodynamik, die Thermodynamik. Je nach Theorie benutzt man andere Modelle und je nach Theorie fällt die Erklärung, was unpolarisiertes Licht ist, etwas anders aus. Wir wollen uns hier auf die klassische Elektrodynamik beschränken.

Man beschreibt den Polarisationszustand eines Lichtbündels am besten, indem man eine Aussage darüber macht, wie sich der elektrische Feldstärkevektor in einer festen Schnittebene quer zum Lichtbündel im Verlauf der Zeit verhält; oder in grafischer Darstellung: wie sich die Vektorpfeilspitze bewegt. (Wir nehmen an, dass das Lichtbündel in seiner Querausdehnung homogen ist.)

Licht kann in den verschiedensten „Polarisationszuständen“ vorliegen. Unter ihnen sind die wichtigsten und bekanntesten die lineare Polarisation, die elliptische (mit dem Sonderfall der zirkularen) Polarisation und die völlige Abwesenheit von Polarisation.

Beim linear polarisierten Licht macht die Vektorpfeilspitze eine harmonische Bewegung, bei elliptischer Polarisation eine Ellipsenbewegung. Man kann noch viele andere Lichtfelder präparieren, bei denen der Vektorpfeil die verschiedensten mehr oder weniger regelmäßigen Bahnen durchläuft, z. B. Lissajous-Figuren. Bei unpolarisiertem Licht schließlich bewegt sich die Feld-

stärkevektorpfeilspitze auf einer unregelmäßigen Bahn, die keinerlei Periodizität erkennen lässt. Die mittlere Geschwindigkeit dieser Bewegung hängt von der Temperatur des Lichts ab und die mittlere Länge des Vektorpfeils von der Lichtintensität. Sowohl die Richtung als auch der Betrag des Vektors zeigen einen unregelmäßigen Verlauf. Man hätte den Vektor auch durch seine kartesischen Komponenten beschreiben können. Dann hätte man gesagt: Sowohl die  $x$ - als auch die  $y$ -Komponente des Vektors zeigen einen unregelmäßigen Verlauf. In beiden Beschreibungsweisen hat man zwei Beiträge zur „Unordnung“ des Zustandes des Lichts und damit zur Entropie, die das Lichtbündel transportiert.

Nun zu unseren Zitaten.

- Das Zitat 1 sagt, dass die  $\vec{E}$ -Feldvektoren schwingen, aber dabei keine Richtung bevorzugen. Nun versteht man unter einer Schwingung allgemein einen periodischen Vorgang. Bei weißem Licht macht aber die Vektorpfeilspitze keine periodische, sondern eine unregelmäßige Bewegung.
- Im Zitat 2 wird gesagt, dass es sich bei thermischer Strahlung um eine Überlagerung aus Einzelwellen handelt. Diese Aussage geht etwas zu weit. Zunächst müsste erklärt werden, was man unter einer Einzelwelle versteht. Man könnte annehmen, mit „Einzelwelle“ sei „Sinuswelle“ gemeint. Die Einzelwellen wären also einfach die Fourierkomponenten des Lichts. In diesem Fall wäre es aber wohl geschickter zu sagen, man kann die Strahlung in solche Komponenten zerlegen, – genauso wie man es auf noch viele andere Arten zerlegen kann. Vielleicht sind aber doch nicht die Fourierkomponenten gemeint. Einen Hinweis gibt unser Zitat 3.
- „Jedes dieser Atome strahlt eine Lichtwelle ab, ...“ Eine Lichtwelle ist also nicht eine reine Sinuswelle, denn wenn sie von einem Atom kommt, muss sie einen Anfang und ein Ende haben. Sie scheint, nach einer Ansicht, die man auch bei vielen Studenten antrifft, ein individuell verfolgbares und identifizierbares Gebilde zu sein. Und hier spukt wohl das Photon herein, auch wenn es nicht ausgesprochen wird – allerdings in einer etwas vulgarisierten Form: Ein Gebilde, das irgendwie einen Wellenschwanz darstellt und, auch wenn es Teil eines Lichtstrahls ist, im Prinzip immer seine Individualität, d. h. seine Erkennbarkeit bewahrt. Auch die Abbildungen, an denen es nie fehlt, weisen darauf hin, dass diese Vorstellung herrscht.
- Man findet oft Bilder, die die Wirkungsweise des Polarisationsfilters erklären. Darin wird das Licht vor dem Filter manchmal so dargestellt, wie es unsre Abb. 8.7 zeigt. Hier sieht man drei „Einzelwellen“.

Diese haben in einigen Darstellungen, die ich gefunden habe, alle dieselbe Wellenlänge und sind in Phase. Wie lang sie sind, ist in den Abbildungen nicht zu erkennen. Wenn man nur den dargestellten Teil betrachtet, so ergibt die Addition der Teilwellen wieder nur eine linear polarisierte Welle. Die Vorstellung von einem maximal ungeordneten Feld vermittelt die Darstellung nicht.

### Herkunft

Das Problem scheint verschiedene Ursachen zu haben.

- 1 Die Aussage, Licht sei eine Transversalwelle, die wir alle lernen, wird leicht so interpretiert, dass der elektrische Feldstärkevektor  $\vec{E}$  eine Schwingungsbewegung quer zur Laufrichtung der Welle ausführt.
- 2 Die Tendenz, die spektralen Komponenten nicht als etwas zu betrachten, was nur durch eine mathematische Zerlegung entsteht, sondern als eine Realität: Eine Welle besteht aus Wellenzügen, so wie ein Buch aus Papierblättern besteht.
- 3 Die etwas zu naiv verstandenen Photonen, die man sich als Bestandteile des Lichts vorstellt (und fast nie als Bestandteile von Radiowellen).
- 4 Die Scheu, Licht unter thermodynamischen Gesichtspunkten zu betrachten.

### Entsorgung

Weißes, in jeder Hinsicht inkohärentes Licht ist allgegenwärtig. Man zögere nicht, die Feldstärkeverteilung auch von solchem Licht zu beschreiben und die verschiedenen Dimensionen oder Typen der Unordnung zu diskutieren.

Man lasse die Vermutungen, die man von der „wahren Natur des Lichts“ haben mag, lieber beiseite und halte sich an das, was man weiß, nämlich wie der Begriff der Polarisation des Lichts (einschließlich der Abwesenheit von Polarisation) mithilfe der Elektrodynamik beschrieben werden kann. Etwas Thermodynamik ist dabei nicht schädlich.

Man vermeide im Zusammenhang mit dem unpolarisierten Licht das Wort „schwingen“, denn schwingen wird immer als etwas Regelmäßiges verstanden. Der Feldstärkevektor  $\vec{E}$  wackelt aber chaotisch herum.

## 8.6 Elektromagnetische Transversalwellen

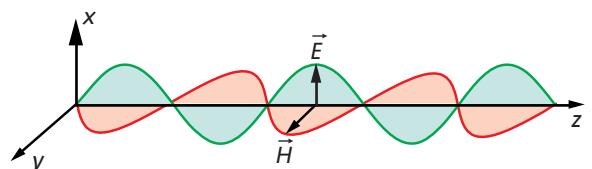
### Gegenstand

Zum Begriff Quer- und Längswelle bzw. Transversal- und Logitudinalwelle findet man ganz am Anfang der

Wellenlehre etwa die folgende Definition: „Bei einer Querwelle ist die Elongation der einzelnen Teile des Trägers quer zur Ausbreitungsrichtung. Bei einer Längswelle schwingen die Teilchen des Trägers längs der Ausbreitungsrichtung vor und zurück.“

Und später bei der Behandlung der elektromagnetischen Wellen: „Licht kann polarisiert werden, ist also eine Querwelle mit senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingenden  $\vec{E}$ - und  $\vec{B}$ -Feldern.“

Die Verteilung von elektrischer und magnetischer Feldstärke im Raum für einen gegebenen Zeitpunkt wird gewöhnlich durch ein Bild wie das von Abb. 8.8 illustriert.



**Abb. 8.8** Feldlinienbild einer ebenen elektromagnetischen Welle

### Mängel

Eine Transversalwelle ist, nach der Definition, die die Schülerinnen und Schüler lernen, eine Welle, bei der sich der Wellenträger quer zur Laufrichtung der Welle bewegt. Wenn man sich an diese Definition hielte, so wäre eine elektromagnetische Welle streng genommen keine Transversalwelle, denn in einer elektromagnetischen Welle bewegt sich nichts. Natürlich kann man sagen, es liege eine Schwingung oder Bewegung im übertragenen Sinn vor, ähnlich wie man vielleicht von einer Temperaturbewegung oder der Bewegung der Börsenkurse sprechen könnte.

Tatsächlich scheint aber die Bewegung, mindestens von den Lernenden, etwas zu ernst genommen zu werden. Dazu trägt auch die Darstellung von Abb. 8.8 bei, die in keinem Buch fehlt: eine Momentaufnahme der Bewegung der Spitze des elektrischen und des magnetischen Feldstärkevektorpeils.

Dass etwas nicht ganz verstanden wird, kann man auch leicht feststellen, wenn man an der Universität eine mündliche Prüfung im Fach Physik abnimmt. Fragt man nämlich nach dem Feldlinienbild einer Radiowelle, etwa innerhalb des Raumes, in dem die Prüfung stattfindet, so wird gewöhnlich mit einer Skizze wie der in unserer Abb. 8.8 geantwortet. Wenn man nun darauf hinweist, dass das kein Feldlinienbild ist, stößt man gewöhnlich auf Ratlosigkeit. Offenbar wird das Bild als das interpretiert, was die Sätze unserer Zitate sagen: als

eine Bewegung. Was die Interpretation des Bildes schwierig macht, ist die Tatsache, dass man zunächst den Ortsraum aufspannt, in diesen aber zwei andere physikalische Größen einzeichnet. Wir kennen das Verfahren von der Mechanik her, wo man gern in die Abbildung irgendeiner Szene im normalen Ortsraum Kraftvektoren einzeichnet. Im vorliegenden Fall kommt die Schwierigkeit hinzu, dass sich die Feldstärkevektoren von Ort zu Ort ändern, dass man diesen Verlauf aber nur als Funktion einer einzigen, nämlich der  $z$ -Koordinate darstellt. Die Suggestion einer Schwingung im Sinn einer Bewegung ist also groß.

### Herkunft

Eine etwas unbedachte Übernahme der Definition von longitudinalen und transversalen Wellen aus der Mechanik in die Elektrodynamik. Dass man die Schwingmetapher so unbekümmert übernimmt, mag auch noch eine historische Ursache haben. In früheren Zeiten lernten die Studenten: „Licht ist eine transversale Ätherwelle.“ Und das war durchaus im Sinn der mechanischen Definition des Begriffs transversal gemeint.

### Entsorgung

Man erläutert die Feldstärkeverteilung nicht mit einem Bild wie in Abb. 8.8, sondern mit einem Feldlinienbild, Abb. 8.9.

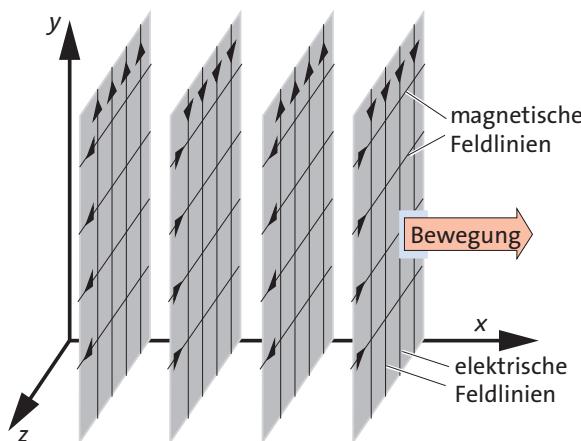


Abb. 8.9 „Momentaufnahme“ der elektrischen und magnetischen Feldstärke einer Sinuswelle

optischen Systems abnimmt, werden die Beugungseffekte weniger bedeutsam. An der Grenze dieses Konzeptes, wenn  $\lambda \rightarrow 0$  geht, gilt die geradlinige Ausbreitung in homogenen Medien, und wir erhalten den idealisierten Bereich der geometrischen Optik.“

2 „Als geometrische Optik (oder Strahlenoptik) bezeichnet man jenen Grenzfall der Wellenoptik, in dem für die Wellenlänge  $\lambda \rightarrow 0$  gilt. In der geometrischen Optik werden die Wellennatur des Lichtes und die mit ihr zusammenhängenden Beugungerscheinungen nicht berücksichtigt.“

3 „In cases where the wavelength is small compared to other length scales in a physical system, light waves can be modeled by light rays, moving on straight-line trajectories and representing the direction of a propagating light wave.“

### Mängel

Wenn die Wellenlänge klein ist, hat man die Bedingung erfüllt, dass sich das Licht „geradlinig ausbreitet“. Nun kennt aber jeder das Experiment mit dem Fresnelspiegel: Ein aufgeweitetes Laserlichtbündel wird auf den Doppelspiegel geschickt. Die beiden reflektierten Teilbündel erzeugen auf einem Schirm sehr schöne Interferenzstreifen. Obwohl das Licht die Bedingung erfüllt, dass die Wellenlänge klein ist gegen die „anderen Längenskalen“, beobachtet man einen typischen Welleneffekt.

Damit man es nicht mehr mit den Welleneigenschaften des Lichts zu tun hat, muss noch eine zweite Bedingung erfüllt sein: Das Licht muss zeitlich hinreichend inkohärent sein.

### Herkunft

Die Strahlenoptik wurde weitgehend unabhängig von der Wellenoptik entwickelt. Das Ziel war die Konstruktion optischer Geräte, die mit dem Licht der Sonne, von Sternen und von Glühlampen arbeiteten. Wegen des thermodynamischen Gleichgewichts dieser Quellen hat das Licht maximale Entropie, und ist damit auch maximal inkohärent. Wenn sich Lichtbündel durchkreuzen oder überlagern, kann man in diesem Fall die mittleren Energiestromdichten addieren. Die Feldstärken, die man in der Wellenoptik addieren würde, sind ohnehin nicht bekannt.

### Entsorgung

Man nennt genau zwei Eigenschaften, die Licht haben muss, damit die Behandlung mit der Strahlenoptik funktioniert: die kleine Wellenlänge und die Inkohärenz.

## 8.7 Strahlenoptik – Wellenoptik

### Gegenstand

1 „Wenn die Wellenlänge der Strahlungsenergie im Vergleich zu den physikalischen Dimensionen des

## 8.8 Die Sinusbedingung der Optik

### Gegenstand

Man lernt in der Schule, oft schon in Klasse 7, die Grundregeln der abbildenden Optik kennen. Dazu gehören die bekannten Regeln für die Konstruktion des Bildes eines Gegenstandes, evtl. auch die Linsengleichung.

In der Hochschulphysik lernt man es dann noch einmal ordentlich: mit dicken und dünnen Linsen, Linsenfehlern, Fermatprinzip und der Funktionsweise optischer Instrumente in allen Einzelheiten.

Eine von zahlreichen Regeln und Gesetzen, denen man dabei begegnet, ist die Sinusbedingung:

$$\Delta x_1 \cdot n_1 \sin \Delta \alpha_1 = \Delta x_2 \cdot n_2 \sin \Delta \alpha_2 \quad (1.1)$$

Sie bezieht sich auf zwei Schnittflächen 1 und 2 durch ein Lichtbündel.  $\Delta x$  ist die Querausdehnung des Lichtbündels und  $\Delta \alpha$  der Winkelbereich der Lichtstrahlen in jedem Punkt der Schnittfläche. Die Gleichung sagt, dass das Produkt dieser beiden „Ausdehnungen“ für jeden Schnitt quer zur Achse eines Lichtbündels denselben Wert hat – vorausgesetzt, dass auf dem Weg vom ersten zum zweiten Schnitt keine Streuung stattfindet.

### Mängel

Die Sinusbedingung wird eingeführt im Zusammenhang mit der mathematischen Beschreibung der optischen Abbildung, nachdem die Abbildung durch dünne und dicke Linsen behandelt wurde, nachdem Hauptebenen eingeführt, nachdem die Probleme bei achsenfernen Strahlen diskutiert, verschiedene Linsenfehler wie Astigmatismus und Bildfeldwölbung und deren Korrektur behandelt wurden. Sie wird hergeleitet, nachdem eine scheinbar ähnliche Gleichung eingeführt worden war, nämlich die „Tangensbedingung“. Sie erscheint dem inzwischen schon etwas erschöpften Studenten als weiteres Detail einer durchweg geometrischen Behandlung der optischen Abbildung. Was er nicht ahnt, ist, dass er es hier mit einer Aussage ganz anderer Art zu tun zu hat.

Tatsächlich ist die Sinusbedingung nichts anderes als die Forderung, dass bei der ganzen Rechnerei auch der zweite Hauptsatz zu beachten ist: Die Entropie des Lichts darf nicht abnehmen, während es durch die optische Anordnung läuft. Und wenn sich im Strahlengang kein Streuer befindet, muss sie sogar konstant bleiben.

Eine solche Aussage vermutet der Lernende hier gewiss nicht, denn in dem ganzen Kapitel schien es im

Grunde gar nicht um Physik zu gehen, sondern nur um Geometrie und darum, sich einer perfekten optischen Abbildung zu nähern. Es kam auch keine einzige wirklich physikalische Größe vor, sondern nur Abstände und Winkel, d. h. geometrische Größen.

### Herkunft

Wie kam es überhaupt zu einer so ausführlichen Beschäftigung mit der optischen Abbildung und mit Linsenfehlern?

Die Theorie der optischen Abbildung ist ein Stück angewandte Physik. Sie ist in dieser Hinsicht vergleichbar etwa mit der Elektrotechnik, der technischen Mechanik, der Hydrodynamik oder auch der Chemie.

Historisch hatte sich die Chemie schon früh selbstständig gemacht; es folgten technische Mechanik, Elektrotechnik und Hydrodynamik. Die Optik dagegen blieb bei der Physik. Sie hat aber typische Züge einer technischen Disziplin: Es ging um die Berechnung von Linsensystemen. Und sie hat auch typische Züge der vordigitalen Zeit: der Zeit, als man Linsensysteme nicht mit Raytracing-Methoden berechnen konnte. Ein Objektiv wie das Tessar erschien, wenn nicht als ein Kunstwerk, so doch als eine geniale Erfindung.

So wurde auch der Optik in mehrbändigen Experimentalphysikwerken ein ganzer Band gewidmet.

Die Sinusbedingung trat dabei nur als eine der Regeln auf, die die Qualität optischer Abbildungen einschränkte.

### Entsorgung

Licht ist für die Demonstration des Wirkens der Thermodynamik besonders geeignet. Es ist in mancher Hinsicht geeigneter als das sonst so beliebte ideale Gas. Der Grund ist, dass die fehlende (oder geringe) Wechselwirkung zwischen den Teilchen des Lichts, und damit verbunden die Tatsache, dass man die Dissipation, also die Entropieerzeugung, besser unter Kontrolle hat als bei materiellen Gasen. So kann man mit dem Licht besonders schön erläutern, dass sich die Entropie als Maß für die Unordnung interpretieren lässt.

Wir beschränken uns hier, der Kürze halber, auf die Betrachtung eines Lichtbündels, das von einer gleichmäßig leuchtenden Fläche ausgeht und von dem ein durch eine Eintrittspupille begrenzter Teil durch eine optische Anordnung hindurchläuft. Die Eintrittspupille stellt gewissermaßen unsere Systemgrenze dar. (Mit System meinen wir dabei das Licht – nicht die optische Anordnung.) Wir werden das Licht an verschiedenen Schnittflächen durch den Lichtstrom verglichen. Damit es sich immer um das gleiche, durch die Eintrittspupille festgelegte System handelt, muss gesichert sein,

## Abbildende und nichtabbildende Optik

dass in der Anordnung kein Licht absorbiert oder emittiert wird. Die optische Anordnung bestehe aus Objekten, an denen das Licht gebrochen und/oder reflektiert wird. Es braucht keineswegs eine optische Abbildung zu erzeugen, denn die Gültigkeit der Sinusbedingung geht weit über die abbildenden optischen Anordnungen hinaus.

Nun zu Gleichung (1.1):  $\Delta x$  ist ein Maß für die Ausdehnung des Lichtbündels in der  $x$ -Richtung, d. h. der Querrichtung; man kann auch sagen für seine Unschärfe, Verschmierung oder Unordnung in  $x$ -Richtung. Entsprechend ist  $\Delta\alpha$  ein Maß für die Verschmierung über die verschiedenen Winkel. Dass das Produkt aus beiden sich von Ort zu Ort (in  $z$ -Richtung) nicht ändert, kann man auch so ausdrücken: Man kann sich eine Vergrößerung der Ordnung im Ort nur durch eine Zunahme der Unordnung im Winkel erkaufen. Das hört sich an, als wäre ein Erhaltungssatz am Wirken – und das trifft auch zu. Es ist Ausdruck der Tatsache, dass die Entropie des Lichts beim Durchlaufen der optischen Anordnung konstant bleibt. Wenn sich unter den optischen Elementen eines befände, dass das Licht streut, so würde das Produkt zunehmen, in Übereinstimmung mit der Tatsache, dass auch die Entropie des Lichts zunimmt.

Um die Verbindung zur Entropie herzustellen, drückt man die Winkelunschärfe am besten durch die Streuung der  $x$ -Komponente des  $k$ -Vektors aus:

$$\Delta k_x = n \cdot k \cdot \sin \Delta\alpha$$

(Das  $n$  kommt vom Brechungsgesetz).

Dann wird aus Gleichung (1.1)

$$\Delta x_1 \cdot \Delta k_{x1} = \Delta x_2 \cdot \Delta k_{x2}$$

und man erkennt zwei Komponenten des sechsdimensionalen Phasenraums (des  $\mu$ -Phasenraums), oder zwei Faktoren, die zum sechsdimensionalen Volumen des Lichts im Phasenraum beitragen. Aus diesem Phasenraumvolumen berechnet sich die Entropie.

## 8.9 Abbildende und nichtabbildende Optik

### Gegenstand

So wie man die geometrische Optik lernt, scheint es ihr einziges Ziel zu sein, optische Abbildungen zu realisieren. Sie findet ihre Anwendung im Bau optischer Geräte wie Lupe, Brille, Mikroskop und Teleskop. In jedem Fall soll sich möglichst viel Licht, das von einem Punkt des

Gegenstandes ausgeht, in einem Bildpunkt wieder treffen.

### Mängel

Bei einer gelungenen optischen Abbildung werden die Punkte eines Gegenstandes auf Punkte in der Bildebene „abgebildet“: Möglichst viel Licht, das von einem Gegenstandspunkt ausgeht, soll sich in einem Bildpunkt vereinigen. Möglichst alle Lichtstrahlen, die den Weg durch das optische System antreten, sollen im Bildpunkt wieder zusammenlaufen. Man erwartet dabei außerdem noch, dass das Bild nicht verzerrt ist, dass also die Verhältnisse zwischen den Winkeln, unter denen die Bildpunkte von einem Punkt auf der optischen Achse aus gesehen erscheinen, gleich den Winkelverhältnissen sind, unter denen man die Gegenstandspunkte sehen würde.

Wenn man den bei der Abbildung ablaufenden Vorgang als einen Energietransport betrachtet, so kann man auch sagen: Man realisiert einen Energietransport mit Licht, der eine Nebenbedingung zu erfüllen hat.

Wenn man sich nun umschaut, wo in Natur und Technik Lichttransporte realisiert sind, so stellt man fest, dass die Transporte, bei denen eine optische Abbildung gewünscht ist, nur ein Spezialfall sind, der zwar in bestimmten Zusammenhängen wichtig ist – nämlich immer wenn es um Datenübertragung geht –, in anderen aber nicht.

Wenn man sich auf die Forderung beschränkt, mit dem Licht Energie von einer bestimmten Stelle an eine andere zu transportieren, ohne dass dabei eine optische Abbildung realisiert werden soll, so entdeckt man, dass die Forderungen, die man an das optische System stellen muss, nicht einfach nur lockerer, sondern dass sie ganz anders sind. Man hat es zu tun mit dem Bereich der *nichtabbildenden Optik*.

Wie die abbildende Optik gehört sie zur geometrischen Optik. Ihr Ziel ist es, möglichst viel Licht von einer Quelle, gewöhnlich einer leuchtenden Fläche, zu einem Empfänger zu bringen, konkret: Die nichtabbildende Optik ist zuständig, wenn es um Beleuchtung geht, oder um die Konzentration oder das Sammeln von Licht.

Es ist schade, dass sich in Schule und Hochschule die abbildende Optik so breitgemacht hat, dass für die nichtabbildende kein Platz mehr ist. Es entsteht, wenn auch kaum deutlich ausgesprochen, der Eindruck, Probleme, die mit der Konzentration von Licht, oder mit Beleuchtung zu tun haben, seien einfach eine etwas vergrößerte Anwendung der abbildenden Optik. Das beste Gerät, das das Problem löst, so meint man vielleicht, sei ein viellinsiges Objektiv, das die Linsenfehler möglichst

weitgehend korrigiert. Mit dieser Vorstellung würde man aber weit daneben liegen. Die neue Fragestellung führt zu einer ganz anderen Optik, in der andere Gesetze und Regeln entscheidend sind und in der ein gut korrigiertes Objektiv eine ganz schlechte Lösung ist.

### Herkunft

Wahrscheinlich sind die Fragestellungen der nichtabbildenden Optik später entstanden als die der abbildenden. Außerdem wurde die nichtabbildende Optik, wie auch zahlreiche andere technische Anwendungen der Physik, schon früh aus der Physik ausgegliedert und es entstand die Spezialdisziplin Lichttechnik, die an der Universität möglicherweise der elektrotechnischen Fakultät zugeordnet ist.

### Entsorgung

Man untersucht ein anderes Problem als bei der abbildenden Optik: Es soll möglichst viel Licht von einer emittierenden Fläche auf eine andere gebracht werden. Ein typisches Gerät der nichtabbildenden Optik ist der Konzentrator. Bei einem Konzentrator tritt Licht durch eine Öffnung mit dem Flächeninhalt  $A_1$  ein und durch eine andere Öffnung mit dem Flächeninhalt  $A_2$  wieder aus, Abb. 8.10.

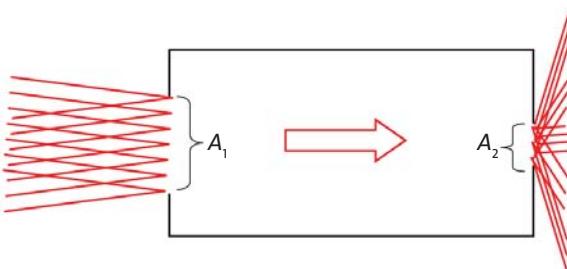


Abb. 8.10 Konzentrator schematisch

Das wichtigste Gesetz, das beim Design des Konzentrators zu beachten ist, ist die Sinusbedingung, auch Abbe'sche Sinusbedingung genannt, oder allgemeiner ausgedrückt: der 2. Hauptsatz:

$$A \cdot \sin^2 \alpha = \text{const}$$

Hier ist  $A$  die Querschnittsfläche des Lichtbündels und  $\alpha$  der Öffnungswinkel der Lichtverteilung an jeder Stelle der Schnittfläche. Die Sinusbedingung sagt uns, dass die Unordnung im Ort (d.h. die Fläche) nur verkleinert werden kann, wenn dabei die Winkelunordnung zunimmt: Entropie kann nicht vernichtet werden.

Noch bevor man daran geht, zu fragen, wie ein Konzentrator zu konstruieren sei, kann man eine wichtige Aussage über den Konzentrationsfaktor

$$c = \frac{A_1}{A_2}$$

machen. Mit der Sinusbedingung kann man schreiben:

$$c = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\sin^2 \alpha_2}{\sin^2 \alpha_1}$$

Nun kann der Öffnungswinkel  $\alpha_2$  am Ausgang des Konzentrators nicht größer als  $90^\circ$  werden. Die Konzentration kann daher höchstens den Wert

$$c_{\max} = \frac{1}{\sin^2 \alpha_1}$$

annehmen.

Diese kurze Rechnung enthält schon viel fundamentale und gleichzeitig plausible Physik:

Je kleiner der Öffnungswinkel des eintretenden Lichts ist, desto stärker kann man es konzentrieren.

Für diffuses Licht, d.h. Licht mit  $\alpha_1 = 90^\circ$ , wird der Konzentrationsfaktor gleich eins; es lässt sich nicht konzentrieren.

Für die Sonne ist  $\alpha_1 = 0,266^\circ$ . Daraus folgt ein maximaler Konzentrationsfaktor von 46 400.

Ein optimal berechneter Konzentrator schafft 96 % der theoretisch maximal möglichen Konzentration. Es lohnt sich aber gar nicht, einen solchen Konzentrator zu bauen, denn ein einfacher kegelförmiger verspiegelter Trichter schafft schon 92 %.

Man mag erwarten, dass ein korrigiertes Objektiv noch mehr schafft. Tatsächlich erreicht ein Objektiv, egal ob korrigiert oder nicht, (Öffnungsverhältnis 1,7) nur 10 % davon.

An letzterer Aussage sieht man, dass die nichtabbildende Optik nicht einfach ein Verzicht auf Abbildungsqualität ist, sondern ein ganz anderes Stück Physik, ja, man kann sagen, hier geht es, im Gegensatz zur abbildenden Optik, tatsächlich um Physik.

## 8.10 Die Strahldichte

### Gegenstand

Schaut man durch ein kleines Rohr, dessen Innenwände geschwärzt sind, auf eine einfarbige, gleichmäßig beleuchtete Wand, so kann man aufgrund dessen, was man sieht, nicht entscheiden, wie weit man von der Wand entfernt ist.

### Mängel

Das beschriebene Experiment zeigt es besonders deutlich, aber die Erscheinung äußert sich auch ohne diesen

## Sonne und Spektrallampen

experimentellen Aufwand. Sie ist allgegenwärtig. Man kann sie auch so formulieren: Die wahrgenommene Helligkeit eines Gegenstandes ändert sich nicht mit der Entfernung. Wahrgenommen wird sie durch unsere Augen, aber auch durch jede Kamera. Auge und Kamera sind gute Messinstrumente dafür. Aber wofür eigentlich? Es muss eine lokale Größe sein, denn „gemessen“ wird sie am Ort des Auges bzw. der Kamera und nicht am Ort der Fläche, von der das Licht kommt. Es ist eine physikalische Größe, die in der Schulphysik mit keinem Wort erwähnt wird und die auch in der Hochschulphysik eher selten zu finden ist: die Strahldichte  $L$ .

Ohne die Strahldichte ist auch schwer zu verstehen, warum man mithilfe von Linsen oder Spiegeln Sonnenlicht nicht so konzentrieren kann, dass sich eine Temperatur einstellt, die höher ist als an der Oberfläche der Sonne. Die einfachen Regeln der geometrischen Optik würden eine solche Konzentration zulassen.

### Herkunft

Die Inhalte des Physikunterrichts beruhen zum großen Teil auf Konvention. Und die will es nun mal, dass man das Licht mit den Werkzeugen der geometrischen Optik behandelt. Nach der Energieverteilung und der Energiestromverteilung wird nicht gefragt.

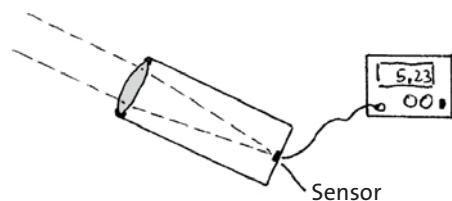
Etwas Abstoßendes bekommt das schöne Thema noch durch den Kontext, indem es einem begegnet, wenn es einem überhaupt begegnet: Wenn man sich durch die vielen Begriffe und Definitionen der Fotometrie sowie der Radiometrie hindurchgearbeitet hat, hat man wahrscheinlich die Hoffnung, dass es hier etwas Fundamentales zu verstehen gibt, längst verloren.

### Entsorgung

Unter Strahldichte versteht man die Energiestromdichte pro Raumwinkel. (Wir interessieren uns hier nicht für die Wellenlängenabhängigkeit. Wir können also annehmen, wir sprechen von monochromatischem Licht.) Sie ist eine skalare Größe, mit der man ein Strahlungsfeld lokal beschreibt. Sie hängt nicht nur vom Ort  $(x, y, z)$  im Strahlungsfeld ab, sondern in jedem Punkt auch noch von der Richtung  $(\theta, \varphi)$ .

Das hört sich kompliziert an, ist es aber nicht. Man versteht die Größe am besten, wenn man ein Strahldichtemessgerät betrachtet, siehe Abb. 8.11.

Es misst die Strahldichte am Ort des Eingangs der Linse und der Richtung der optischen Achse des Geräts. Um die Ortsverteilung der Strahlung zu bekommen, bewegt man das Gerät bei festgehaltener Richtung im Raum herum. Für die Winkelabhängigkeit dreht man es an einem festgehaltenen Ort in die verschiedensten Richtungen. (Wenn man noch die Frequenzabhängigkeit



**Abb. 8.11** Strahldichtemessgerät. Es misst die Strahldichte am Ort des Linseneingangs und der Richtung der optischen Achse des Geräts.

keit misst, bekommt man die spektrale Strahldichte. Sie beschreibt dann das Strahlungsfeld im sechsdimensionalen Phasenraum.)

Bewegt man das Gerät in Richtung seiner optischen Achse, ohne seine Orientierung zu ändern, so ändert sich der Messwert nicht, oder allgemeiner: Die Strahldichte in Richtung eines Lichtstrahls ist an jedem Ort des Strahls dieselbe. Das Licht kann dabei durch ein beliebiges optisches System aus Linsen und Spiegeln hindurchgehen — die Strahldichte ändert sich auf einem Strahl nicht. Nur wenn das Licht gestreut oder absorbiert wird, ändert sie sich. (Beim Eintritt in ein Material der Brechzahl  $n$  nimmt sie um  $n^2$  zu, beim Austritt geht sie aber wieder auf den alten Wert zurück.)

Wenn man die Größe mal hat und insbesondere diese letzte Regel kennt, so ist nicht schwer zu verstehen, warum man Sonnenlicht nur so stark konzentrieren kann, dass man wieder die Temperatur der Sonnenoberfläche erreicht. Das Höchste, was man erreichen kann, ist, dass in jedem Punkt der Bildebene Licht aus dem ganzen Halbraum kommt. Da die Strahldichte dieselbe ist wie schon beim Start an der Sonnenoberfläche, befindet man sich am Ort des Bildes gerade in derselben Situation wie direkt über der Sonnenoberfläche: Das Licht kommt aus dem ganzen Halbraum. Es ist so als hätte man den Empfänger direkt vor die Sonne gehalten. Es wird sich also bestenfalls thermisches Gleichgewicht zwischen Sonnenoberfläche und Empfänger einstellen.

## 8.11 Sonne und Spektrallampen

### Gegenstand

Man lernt als Student zwei Klassen von Lichtquellen kennen, die sich in ihrer Funktionsweise unterscheiden. Zur Ersten gehören glühende Körper, die Sonne und die gelblich-weiße Flamme von Kerzen, zur zweiten Klasse gehören Spektrallampen, Laser, Halbleiterdioden und farbige Flammen.

Zu den Lichtquellen der ersten Klasse erfährt man, dass heiße, schwarze Körper aufgrund ihrer Temperatur elektromagnetische Strahlung aussenden, die sogenannte Wärmestrahlung oder Schwarzkörperstrahlung. Das Spektrum hängt nur von der Temperatur des Strahlers ab. Man nennt die entsprechende Funktion das Planck'sche Strahlungsgesetz.

Die Emission der Lichtquellen der zweiten Klasse kommt dadurch zustande, so lernt man, dass Elektronen in Atomen, Molekülen oder im Kristallgitter von Festkörpern aus einem angeregten Zustand in einen energetisch tiefer liegenden Zustand übergehen, und dabei Photonen emittieren. Die Frequenz folgt aus der Energiedifferenz der Zustände, die Intensität aus der Übergangswahrscheinlichkeit. Die Anregung kann auf die verschiedensten Arten geschehen: elektrisch, durch optisches Pumpen oder auch thermisch.

### Mängel

Die Lichtquellen werden auf verschiedenen begrifflichen Ebenen erklärt: die einen thermodynamisch und die anderen atomphysikalisch. So entsteht womöglich der Eindruck, die Emission der Glühlampe habe nichts mit Atomphysik zu tun, oder für die Emission einer Gasflamme gelte die Thermodynamik nicht.

Tatsächlich beruhen beide Arten von Lichtquellen darauf, dass ein angeregtes System in einen energetisch tieferen Zustand zurückkehrt, und in beiden Fällen wird die Intensität durch die Gesetze der Thermodynamik mitbestimmt.

Wenn man es nur auf die Gestalt der Spektren abgesehen hat, so ist das Vorgehen vielleicht verständlich: Das Spektrum eines schwarzen Strahlers erhält man mit Argumenten der statistischen Physik. Der mikroskopische Mechanismus der Emission spielt keine Rolle. Zur Gestalt des Linienspektrums einer Spektrallampe dagegen hat die Thermodynamik nicht allzu viel zu sagen.

Wenn man aber nicht sagt, wie die beiden Erklärungsmuster miteinander zusammenhängen, kann man sich nur darauf verlassen, dass der Lernende nicht das tut, was man sich von ihm doch eigentlich wünscht: dass er Fragen stellt, wenn er etwas nicht versteht. Eine solche Frage könnte lauten: Warum hat die Sonne nicht ein Linienspektrum wie eine Spektrallampe? Sie besteht doch praktisch nur aus Wasserstoff und Helium, und ein solches Gas gibt doch wohl keine Schwarzkörperstrahlung ab.

### Herkunft

Die Theorien oder Erklärungen von Schwarzkörperstrahlung und Linienspektren sind unabhängig voneinander entstanden, und sie haben diese Unabhängigkeit in der Lehre bis heute bewahrt. Man sieht an diesem

Beispiel auch, wie unklar das definiert ist, was man als „befriedigende Erklärung“ bezeichnen würde. Einmal wird das Zurückführen auf einen mikroskopischen Mechanismus als Erklärung ins Feld geführt, ein andermal die Beschreibung des Herstellungsverfahrens und die spektralen Eigenschaften der Strahlung.

### Entsorgung

Jeder Körper, dessen Temperatur nicht gleich 0 K ist, gibt elektromagnetische Strahlung ab. Wenn der Körper bei allen Frequenzen den Emissionsgrad  $e(f) = 1$  hat, ( $e$  liegt immer zwischen 0 und 1), so ist die Energiestromdichte  $j_E$  im Frequenzintervall  $df$  der Strahlung durch das Planck'sche Strahlungsgesetz gegeben:

$$dj_E = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{f^3}{\frac{hf}{e^{kT}} - 1} df$$

Nun ist der Emissionsgrad eines Körpers für alle  $f$  gleich seinem Absorptionsgrad:  $e(f) = a(f)$ . Wenn  $e$  für alle  $f$  gleich eins ist, so ist es daher auch  $a$ , und der Körper ist völlig undurchsichtig, er ist schwarz.

(Das ist leicht zu verstehen: Wenn ein Körper bei der Frequenz  $f$  emittieren kann, so hat er einen entsprechenden erlaubten atomaren Übergang, und er muss folglich auch absorbieren.)

Ist  $e(f) = a(f)$  nicht mehr überall gleich 1, so wird aus der Planck'schen Formel:

$$dj_E = e(f) \cdot \frac{2\pi h}{c^2} \frac{f^3}{\frac{hf}{e^{kT}} - 1} df \quad (1.1)$$

Da  $e$  für alle  $f$  kleiner oder gleich eins ist, ist die spektrale Energiestromdichte für einen nichtschwarzen Körper für jedes  $f$  kleiner oder gleich der des Planck'schen Spektrums. Ein Emissionsspektrum, das unterhalb des Planck'schen Spektrums liegt, hat zum Beispiel das Licht von farbigen Flammen: das bläuliche Licht der Methanflamme oder das gelbe Licht einer Gasflamme, in die man etwas Kochsalz hineinkrümelt.

Dass man die Spektren glühender Körper thermodynamisch beschreiben kann, heißt aber nicht, dass der mikroskopische Emissionsmechanismus im Prinzip verschieden wäre von dem einer Spektrallampe. Jedes Photon, das den glühenden Körper verlässt, kommt aus einem Übergang: für die Photonen des sichtbaren Lichts aus einem elektronischen, für die langwelligen infraroten auch aus Schwingungs- und Rotationsübergängen. Da in festen Stoffen oft Übergänge aller Energien anzutreffen sind, ist der Grenzfall des Planck'schen Strahlers hier häufig realisiert. (Aber auch makroskopisch große feste Körper strahlen durchaus nicht immer mit einem

## Photonen und Phononen

Planck'schen Spektrum. Man erhitze mit der Bunsenbrennerflamme zwei nebeneinanderliegende Klötzchen aus zwei verschiedenen Materialien, zum Beispiel einerseits Eisen, und andererseits Quarz, Saphir oder auch einen weißen Kieselstein. Während das Eisen hell glüht, emittiert das Quarz- oder Saphirstück oder der Kieselstein fast kein sichtbares Licht.)

Die Sonne stellt einen besonders interessanten thermischen Strahler dar. Einerseits wissen wir, dass sie praktisch nur aus Wasserstoff und Helium besteht. Man könnte also erwarten, dass ihr Spektrum ein Linienpektrum ist, wie das einer „Wasserstoff-Helium-Spektrallampe“ (die allerdings nicht elektrisch, sondern thermisch angeregt würde). Andererseits wissen wir, dass das Sonnenlicht ein kontinuierliches Spektrum hat, das dem Planck'schen recht nahe kommt.

Wie sind diese beiden Feststellungen miteinander zu vereinbaren? Die Erklärung liefert der Faktor  $e(f) = a(f)$  in Gleichung (1.1). Für ein thermisch angeregtes Wasserstoffgas in einem Laborexperiment ist dieser Faktor für fast alle Frequenzen nahezu gleich null. Außer für einige scharfe Frequenzen im Ultravioletten ist das Gas praktisch völlig durchsichtig. Das Emissionsspektrum der Lampe unterscheidet sich daher stark von einem Planck'schen Spektrum. Der Absorptionsgrad, und damit auch der Emissionsgrad eines Körpers wird nun aber um so größer, je dicker der Körper ist. Wenn Licht in einen Körper eindringt und der Weg im Körper nur lang genug ist, so wird es irgendwann schon mal einen passenden Übergang finden. Diese Weglänge hängt natürlich von der Frequenz des Lichts ab. Bei der Sonne ist sie im ungünstigsten Fall einige Hundert Kilometer. Verglichen mit der Größe einer Spektrallampe ist das viel, aber verglichen mit dem Radius der Sonne, ist es sehr wenig. Eine 10 cm dicke Schicht Sonnenmaterie (aus der Gegend der Fotosphäre) ist völlig durchsichtig: Sie absorbiert praktisch nicht und emittiert also auch nicht (in der zur Schicht orthogonalen Richtung). Mit zunehmender Schichtdicke nimmt die Absorption, und also auch die Emission zu, und das Spektrum des emittierten Lichts ist zunächst dasselbe wie das einer Spektrallampe [2, 3]. Bei weiter zunehmender Dicke emittiert das Gas dann immer mehr in dem Bereich zwischen den Spektrallinien. Eine 1 000 km dicke Schicht, die ja alles Licht vollständig absorbieren würde, emittiert schließlich wie ein schwarzer Körper von 6 000 K.

Welches sind nun aber die Übergänge, die für diese Absorption/Emission verantwortlich sind? Selbst wenn wir nur ein reines Wasserstoff-Helium-Gemisch hätten, und wenn wir von der (schwachen) Ionisation absehen, bekommen wir auf einer Länge von einigen Hundert Kilometern aufgrund der „Breite“ der Spektrallinien voll-

ständige Absorption bei allen Frequenzen im sichtbaren Spektralbereich. Es kommen aber noch andere Absorptionsmechanismen hinzu: Das Wasserstoff-Helium-Gas ist schwach ionisiert und die freien Elektronen absorbieren. Außerdem enthält die Sonnenmaterie in geringer Konzentration auch alle anderen Elemente, deren Absorption zum Teil im sichtbaren Spektralbereich liegt. Da wir wissen, dass der Weg des Lichts innerhalb der Sonne für unsere Zwecke als beliebig lang betrachtet werden kann, brauchen wir uns, wenn wir nur etwas über das Spektrum erfahren wollen, gar keine Gedanken darüber zu machen, welcher dieser Mechanismen dominiert. Es ist ähnlich wie bei einem Karton, in den man ein kleines Loch gebohrt hat. Das Loch erscheint schwarz, egal ob die Innenwände reflektieren oder streuen, ob sie schwarz, weiß, gelb oder blau sind. Der Absorptionsmechanismus spielt für das Schwarzsein des Loches keine Rolle mehr.

- [1] P. Würfel, *Physik der Solarzellen*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1995, S. 63
- [2] M. Vollmer, *Emittiert ein heißes Gas ein Linien- oder ein Schwarzkörperspektrum?*, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Düsseldorf 2004
- [3] M. Vollmer, *Hot gases: Transition from line spectra to incandescent radiation*, Am. J. Phys. 73 (2005), S. 215–223

## 8.12 Photonen und Phononen

### Gegenstand

In jedem Physikbuch der Oberstufe werden die Photonen eingeführt – entweder als Energieportionen, die bei der Emission oder Absorption durch Materie ausgetauscht werden, oder als die Teilchen aus denen das Licht besteht. Phononen kommen in den meisten Büchern nicht vor. Dem entspricht auch, dass Studentinnen und Studenten der Physik eine recht konkrete Vorstellung von Photonen haben, aber eine eher blasse oder gar keine von den Phononen.

### Mängel

Zwischen Photonen und Phononen besteht eine weitgehende Analogie. Die klassischen Theorien von Licht und Schall haben viele Gemeinsamkeiten, genauso wie die entsprechenden Quantentheorien [1, 2]. Die Analogie äußert sich in vielerlei Effekten.

Ein Beispiel ist der Wärmetransport mit den einen und den anderen Teilchen. Die Trägerteilchen des Wärmetransports in einem Wärmeleiter (aus einem elektrisch nichtleitenden Material<sup>1</sup> zum Beispiel sind die Phononen. Der Prozess ist diffusiv, d. h. Phononen wer-

den ständig erzeugt und wieder absorbiert. Ganz ähnlich funktioniert der Wärmetransport in der Sonne von der inneren Reaktionszone nach außen, nur sind es hier Photonen, die erzeugt und wieder absorbiert werden.

Die Analogie zeigt sich auch in der Temperaturabhängigkeit der Energie in einem Photonen- und einem Phononensystem im thermodynamischen Gleichgewicht. Beide gehen mit der 4. Potenz der Temperatur (im Fall der Photonen bekannt unter dem Namen Stefan-Boltzmann-Gesetz).

Die beiden Teilchenarten haben also viele Gemeinsamkeiten und sie verdienen es nicht, in der Lehre eine so unterschiedliche Rolle zu spielen.

### Herkunft

Die Phononen sind erst durch die quantenphysikalische Behandlung der Gitterschwingungen in die Physik gekommen. Die Photonen dagegen haben als Lichtteilchen eine jahrhundertealte Tradition. Hinzu kommt, dass es Strahlungen gibt, bei denen man die Photonen leicht einzeln nachweisen kann: Röntgen- und Gamma-Strahlung.

Die Phononen nicht zu Ernst zu nehmen wird einem auch dadurch erleichtert, dass man sie vorgestellt bekommt als „Quasiteilchen“. Man verwendet die Bezeichnung für Teilchen, die Ihre Eigenschaften zum Teil ihrer lokalen Umgebung verdanken. Nun sieht es aber so aus, als dürfte es dann gar keine normalen Teilchen mehr geben, als wären alle Teilchen in diesem Sinn Quasiteilchen. Schließlich lernen wir gerade, dass die „normalen“ Teilchen ihre Masse dem Higgs-Feld verdanken.

### Entsorgung

- Weniger Abwehr gegen die Phononen. Sie sind nicht schwieriger als die Photonen. Wenn ein Schulbuch sogar die Gluonen vorstellt, warum dann nicht die uns doch viel näherliegenden Phononen.
- Ein etwas weniger leichtfertiger Umgang mit den Photonen.
- Keine Geheimnistuerei mit Bestimmungswörtern wie „quasi“ oder „virtuell“, die nur Unbehagen beim Lernenden verursachen und nichts erklären.

[1] N. W. Ashcroft und N. D. Mermin, *Solid State Physics*, Holt, Rinehart and Winston, Inc., Orlando, 1976, S. 453: „In dieser Theorie [der Quantenelektrodynamik] sind die erlaubten Energien einer Eigenschwingung des Strahlungsfeldes in einem Hohlraum durch

$$\left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega$$

<sup>1</sup>In einem elektrischen Leiter dominieren die Elektronen den Wärmeleitungsprozess.

gegeben, wo  $\omega$  die Kreisfrequenz der Eigenschwingung ist. Es ist aber allgemeiner Brauch, nicht von der Anregungsquantenzahl  $n$  der Mode zu sprechen, sondern von der Zahl  $n$  der Photonen. In genau derselben Art sagt man nun [bei einem Festkörper] nicht, dass sich die Eigenschwingung ... im  $n$ -ten angeregten Zustand befindet, sondern man sagt, dass sich im Kristall  $n$  Phononen befinden.“ (Übersetzung: F. H.)

[2] H. Vogel, Gerthsen-Kneser-Vogel, *Physik*, Springer-Verlag, Berlin, 1977, S. 598: „Eine Gitterschwingung mit der Kreisfrequenz  $\omega$  kann wie die Schwingung eines Einzelteilchens nur Energiewerte haben, die sich um ein ganzzahliges Vielfaches unterscheiden. Daher kann z. B. eine Lichtwelle an das Gitter ebenfalls nur ganzzahlige Vielfache dieses Wertes abgeben oder sie von ihm aufnehmen. Mit dem gleichen Recht wie im Fall des elektromagnetischen Wellenfeldes deutet man dies durch die Existenz von Schallquanten oder Phononen mit der Energie  $\hbar \omega$ .“

## 8.13 Der Kondensor

### Gegenstand

- 1 Mit dem Kondensor wird das Licht der Lampe auf das Dia konzentriert. Dadurch erhöht sich dessen Helligkeit.
- 2 Der Kondensor sorgt dafür, dass das Dia gleichmäßig vom Licht der Lampe beleuchtet wird.
- 3 Der Kondensor lenkt das gesamte Licht, das durch das Dia fällt, durch die Objektivlinse.
- 4 Die Kondensorlinse muss größer als das Dia sein, um eine gleichmäßige Ausleuchtung zu erreichen.
- 5 Der Kondensor muss einen größeren Durchmesser besitzen als die Diagonale des Dias. Nur so kann dieses voll ausgeleuchtet werden.
- 6 Die Kondensorlinse wird so angeordnet, dass ein möglichst großes Lichtbündel durch das Dia auf das Objektiv fällt.

### Mängel

Nach dem Grund gefragt, warum ein Projektor einen Kondensor hat, antworten mir Studenten in der Prüfung mit großer Regelmäßigkeit: „Damit das Dia ausgeleuchtet wird.“ Nun wusste ich selbst nie so recht, was ich mit einer solchen Antwort anfangen sollte. Ich verstand sie nicht, war mir aber nicht so ganz sicher, ob der Kollege, bei dem der Student die Optikvorlesung gehört hatte, den Begriff „ausleuchten“ vielleicht genauer erklärt hatte. Ich habe mich schließlich daran gemacht, einige Bücher zu konsultieren – Physikbücher der Uni-

## Einfarbiges Licht

versität, Schulphysikbücher und ein Physiklexikon – und habe ein breites Spektrum von Erklärungen für den Kondensor gefunden, aus dem oben einige typische Formulierungen, nicht ganz wörtlich, wiedergegeben sind: ein Durcheinander von Richtigem, Falschem und Unverständlichem. Wozu dient der Kondensor? Ausschließlich dazu, die Richtungsverteilung des Lichts, mit dem das Dia beleuchtet wird, so zu ändern, dass alles Licht, das auf das Dia trifft, danach auch zum Objektiv gelangt. Dazu bildet man die Lichtquelle auf das Objektiv ab.

Gehen wir die Sätze durch:

- 1 Nicht richtig. Das Licht wird nicht auf das Dia konzentriert, die Helligkeit am Ort des Dias wird nicht größer. (Nehmen wir an, mit Helligkeit ist die Energiestromdichte gemeint.)
- 2 Nicht richtig. Die Lichtverteilung auf dem Dia wird durch den Kondensor nicht gleichmäßiger. Sie braucht es auch nicht, denn sie ist auch ohne Kondensor hinreichend gleichmäßig.
- 3 Richtig
- 4 und 5: Unklar. Dass der Kondensor nicht kleiner sein darf als das Dia ist richtig, aber trivial, andernfalls stünden die äußeren Teile des Dias im Schatten der Kondensorhalterung. Der Kondensor macht die Energiestromdichteverteilung nicht gleichmäßiger.
- 6 Unklar. Was ist mit „angeordnet“ gemeint? Ihr Ort? Der sollte auf jeden Fall direkt vor dem Dia sein. Wäre er weiter weg, so müsste der Durchmesser größer als der des Dias sein, und der Kondensor würde schwerer und teurer.

### Herkunft

Die geometrische Optik legt zu viel Wert auf die optische Abbildung und zu wenig auf die Beschreibung von Lichtverteilungen.

### Entsorgung

Man erkläre die Funktion des Kondensors klar und richtig, etwa wie oben 3.

## 8.14 Einfarbiges Licht

### Gegenstand

Licht, das durch eine Sinuswelle beschrieben werden kann, nennt man monochromatisch oder einfarbig. Es kann durch eine einzige Wellenlänge bzw. Frequenz charakterisiert werden.

Hier der entsprechende Artikel aus einer wissenschaftlichen Enzyklopädie: „Monochrom, monochro-

matisch, einfarbig. Monochromatisches Licht, homogenes Licht, Licht von nur einer Wellenlänge, also einfarbiges Licht, das nicht in Spektralfarben zerlegt werden kann.“

Was man unter Farbe versteht, erklärt dieselbe Enzyklopädie an anderer Stelle: „Farbe, die Gesichtsempfindung, die normalerweise durch Lichtstrahlung im Auge ausgelöst wird.“

### Mängel

Wenn man im Rahmen der Physik von monochromatischem oder einfarbigem Licht spricht, so kann man davon ausgehen, dass verstanden wird, was gemeint ist. Trotzdem ist die Bezeichnung ungeschickt und jemand, der mit der Farbenlehre vertraut ist, muss dabei ein Unbehagen empfinden. Denn die Bezeichnung „einfarbig“ bedeutet in der Farbenlehre, wie auch in der Umgangssprache etwas anderes. Auch Licht, das sich aus mehreren spektral reinen Komponenten zusammensetzt, ruft im Auge nur einen Farbeindruck hervor, es ist also im Sinn der Farbenlehre einfarbig. Mehrfarbig könnte etwa ein Kleid oder eine Tapete sein. Mehrfarbiges Licht dagegen gibt es in diesem Sinne nicht.

Zu einem gegebenen Farbeindruck gehören im Allgemeinen viele (unendlich viele) Spektren, zu einem Spektrum aber nur eine einzige Farbe. Es gibt also viel mehr verschiedene Spektren als Farben. Man kann es auch so sagen: Der Spektralraum ist hochdimensional (er hat so viele Dimensionen, wie man Wellenlängen unterscheiden kann), der Farbraum dagegen ist dreidimensional. Aussagen über die Farbe von Licht sind also ungeeignet, ein Spektrum zu charakterisieren. Die Ausnahme von der Regel bilden die Spektralfarben, die den reinen Sinuswellen entsprechen.

### Herkunft

Die Gesetze der Farbmehrheit (die Grassmann'schen Gesetze) sind seit über 150 Jahren bekannt, also ein altes Thema. Die Physik hat sich zunächst nicht besonders dafür interessiert. Ganz anders war es etwa mit der geometrischen Optik, die in keinem Physikbuch fehlt. Der Grund war, dass man Letztere zum Bau optischer Instrumente brauchte. Die Farbenlehre dagegen wurde erst mit dem Aufkommen des Farbdrucks, und vor allem des Farbfernsehens technisch wichtig. Da waren die Weichen aber längst gestellt.

### Entsorgung

Statt monochromatisch könnte man das Licht, wenn man sich auf die Photonen beziehen will, monoenergetisch nennen. Sonst kann man von spektral reinem Licht sprechen oder einfach von Sinuswellen.

## 8.15 Grundfarben und der dreidimensionale Farbraum

### Gegenstand

In der Farbenlehre wird der Begriff Grundfarbe eingeführt. Eine typische Formulierung, die gleichzeitig als Definitionen herhalten muss, ist etwa: „Durch Addition der Grundfarben Rot, Grün und Blau lassen sich alle Lichter des Farbenkreises herstellen“. Manche Bücher unterscheiden zwischen den „additiven Grundfarben“ Rot, Grün und Blau, und den „subtraktiven Grundfarben“ Cyan, Magenta und Gelb.

### Mängel

In den Sätzen wird etwas auf umständliche Art zum Ausdruck gebracht, was sich viel einfacher sagen lässt: dass der Farbraum dreidimensional ist. Um einen Farbeindruck zu charakterisieren, braucht man drei Zahlen.

Dies ist eine bemerkenswerte Tatsache, denn erstens ist sie den meisten Normalbürgern nicht bekannt, zweitens ist sie leicht zu verstehen, wenn man den Farbraum mit einem geeigneten Koordinatensystem einführt, und drittens kann man, wenn man es mal verstanden hat, plötzlich Farben, von denen man bis dahin geglaubt hatte, sie seien nur durch umständliche verbale Umschreibungen oder spezielle Eigennamen zu charakterisieren, durch nur drei Angaben beschreiben. Man denke etwa an die Farbnamen, die in der Mode üblich sind. Es gehen einem also regelrecht die Augen auf. Dieses schöne Lernziel verfehlt man nun aber, wenn man, statt es klar zu sagen, die Tatsache so umschreibt, wie es die oben angesprochenen Definitionen tun.

Aus der Tatsache, dass der Farbraum dreidimensional ist, folgt zwar, dass man drei Grundfarben („Primärvalenzen“ in der Fachsprache) wählen kann, wie in einem Vektorraum die Basisvektoren. Dies müssen aber durchaus nicht die Farben rot, grün und blau sein. Es können beliebige drei Farben sein, vorausgesetzt sie liegen im Farbraum nicht auf einer Geraden. Sie können auch beliebig ungesättigt sein, und man kann auch noch eine ganz andere Basis für den Farbraum wählen, eine Basis, die nicht durch die Namen von Farbtönen charakterisiert ist, sondern etwa durch die Eigenschaften Farbton, Helligkeit und Sättigung.

Diese Tatsache sollte man trennen von der anderen, nämlich, dass man für das Fernsehen die Basis rot – grün – blau (RGB) wählt, und für den Druck Cyan – Magenta – Gelb – Schwarz (CMYK). Diese letztere Tatsache mag man im Unterricht erzählen. Zur Begründung wird man ohnehin nicht kommen, denn sie ist nur mög-

lich, wenn man auch die Metrik des Farbraums erläutert. Ein Fernseher, der Cyan, Magenta und Gelb als Phosphorfarben hätte, würde zwar auch alle Farbtöne realisieren können, aber die meisten, und gerade die roten, grünen und blauen würden nur eine schwache Sättigung erreichen. Beim Druck ist es umgekehrt. Druckfarben, die auf RGB beruhen, würden nur schwach gesättigte Cyan-, Magenta- und Gelbfarbtöne hervorbringen.

Wenn man die einfache und klare Tatsache, dass der Farbraum dreidimensional ist, in Sätze verpackt wie die anfangs zitierten, so begeht man eine Ungeschicklichkeit, die in einer anderen „Altlast“ schon einmal angesprochen wurde [1]: Es gibt zwei Arten von magnetischen Polen. Die beiden Wertebereiche werden mit eigenen Namen versehen und als etwas qualitativ verschiedenes einführt, statt eine einfache Aussage über die Wertestruktur zu machen, nämlich, dass die magnetische Polladung positive und negative Werte annehmen kann. Entsprechend ist es auch bei den Farben unpassend, wenn man drei Grundfarben als scheinbar verschiedene Qualitäten einführt, wo es sich doch nur um drei Punkte in einem dreidimensionalen Kontinuum handelt.

### Herkunft

Die Farbenlehre hat eine lange Geschichte, in der Personen verschiedenster Provenienz zur Bildung von Urteilen und Vorurteilen beigetragen haben; nicht nur Wissenschaftler, wie Physiker, Physiologen, Psychologen und Biologen, sondern auch Künstler und Leute aus der Welt der Mode. Entsprechend groß ist auch die Zahl der koexistierenden Meinungen und Beschreibungsverfahren.

### Entsorgung

Man beginnt die Farbenlehre mit der Einführung des dreidimensionalen Farbraums, allerdings ohne dessen Metrik anzusprechen. Man bittet etwa die Schüler, viele verschiedenfarbige Gegenstände, zum Beispiel Filzstifte, zu ordnen. Die Schüler stellen fest, dass eine Anordnung in einer Reihe, d.h. in einer Dimension, nicht möglich ist. Auch zwei Dimensionen reichen nicht aus. In drei Dimensionen schließlich gelingt es. Die Eigenschaften, die diese Dimensionen charakterisieren, sind Farbton, Helligkeit und Sättigung. Erst danach zeigt man, dass man die Punkte des dreidimensionalen Farbraums auch mit einer anderen Basis definieren kann. Die Schüler haben auch auf ihrem Computer ein Malprogramm, und sie haben die verschiedenen Arten, einen Farbeindruck zu definieren schon kennengelernt.

[1] F. Herrmann, *Zwei Arten elektrischer Ladung*, Altlasten der Physik

# 9 FESTKÖRPERPHYSIK

## 9.1 Feld- und Diffusionsstrom

### Gegenstand

Der elektrische Potenzialgradient in einem stromlosen p-n-Übergang verursacht einen „Feldstrom“. Der Feldstrom wird kompensiert durch den „Diffusionsstrom“. Der Diffusionsstrom fließt in die entgegengesetzte Richtung und ist eine Folge des Konzentrationsgradienten der Ladungsträger.

### Mängel

Wenn in einem leitfähigen Material ein elektrisches Potenzialgefälle herrscht, das chemische Potenzial der Ladungsträger aber überall denselben Wert hat, so fließt ein Strom von Ladungsträgern. Die Ladungsträger werden vom elektrischen Potenzialgradienten „angetrieben“. Es fließt aber auch dann ein Ladungsträgerstrom, wenn ein chemischer Potenzialgradient herrscht (verursacht etwa durch einen Konzentrationsgradienten) und das elektrische Potenzial überall denselben Wert hat. In diesem Fall werden die Ladungsträger durch den chemischen Potenzialgradienten angetrieben. Es gibt also zwei Möglichkeiten, an den Teilchen zu „ziehen“: Ein elektrischer Potenzialgradient zieht an der elektrischen Ladung der Teilchen, und ein chemischer Potenzialgradient zieht an ihrer Stoffmenge.

Im Allgemeinen sind beide Gradienten von null verschieden und es resultiert ein Gesamtantrieb. Diesen beschreibt man mithilfe des elektrochemischen Potenzials  $\eta$ . Das elektrochemische Potenzial ist im Wesentlichen die Summe aus elektrischem Potenzial  $\varphi$  und chemischem Potenzial  $\mu$ :

$$\eta = \mu + z \cdot F \cdot \varphi.$$

Für die elektrische Stromdichte gilt dann:

$$\vec{j} = -\frac{\sigma}{z \cdot F} \text{grad } \eta$$

$\sigma$  ist die elektrische Leitfähigkeit,  $z$  die Ladungszahl der Ladungsträger und  $F$  die Faraday-Konstante.

Es kann auch sein, wie im Fall des stromlosen p-n-Übergangs, dass die beiden Antriebe entgegengesetzt gleich sind und sich aufheben. Dann herrscht „elektrochemisches Gleichgewicht“.

Statt zu sagen, dass ein Teilchenstrom auf zwei Arten angetrieben werden kann, sagt man nun oft, dass der elektrische Potenzialgradient einen „Feldstrom“ verursacht und der chemische Potenzialgradient einen „Diffusionsstrom“, und dass diese beiden Ströme sich zu einem Gesamtstrom überlagern. Im Fall des elektrochemischen Gleichgewichts würden demnach zwei gleich große Ströme in entgegengesetzte Richtungen fließen.

Das Problem besteht darin, dass jeder Strom einzeln Entropie (und damit Wärme) erzeugen müsste. Wir wissen aber, dass beide Ströme zusammen (falls sie sich exakt kompensieren) dissipationsfrei sind, d. h., dass sie keine Entropie erzeugen. Wie sollte man sich das auch mikroskopisch vorstellen? Sollten manche Ladungsträger dem einen Antrieb folgen und andere dem anderen? Zu welchem Strom gehörte dann ein beliebig herausgegriffener Ladungsträger?

Wie ungeschickt die Beschreibung ist, sieht man auch daran, dass in einer ganz und gar analogen Situation niemand auf die Idee einer solchen Zerlegung kommen würde. Auch die Luft in der Atmosphäre unterliegt zwei Antrieben: Der Gradient des Gravitationspotenzials zieht nach unten, der Druckgradient (dem auch ein chemischer Potenzialgradient entspricht) zieht nach oben. Bei ruhiger Luft mit einheitlicher Temperatur sind beide Antriebe entgegengesetzt gleich, sie heben sich gegenseitig auf. Sollte man hier etwa auch sagen, man habe einen „Feldstrom“ der Luft nach unten und einen „Diffusionsstrom“ nach oben?

### Herkunft

Wahrscheinlich kommt einiges zusammen: 1. Das einfache und kräftige Werkzeug „chemisches Potenzial“, ob-

wohl schon vor über hundert Jahren in die Physik eingeführt, ist als Antriebsmaß weitgehend unbekannt und wird kaum genutzt. 2. Das elektrochemische Potenzial wird als physikalische Größe nicht ernst genommen.

### Entsorgung

Es gibt zwei Antriebe für Ladungsträger: einen elektrischen, der an der elektrischen Ladung zieht, und einen chemischen, der an der Stoffmenge zieht. Da Ladung und Stoffmenge fest aneinander gekoppelt sind, kann man beide Potenziale zu einem einzigen zusammenfassen: zum elektrochemischen Potenzial. Dessen Gradient oder Gefälle ist für den Teilchenstrom verantwortlich.

## 9.2 Die Halbleiterdiode als Gleichrichter

### Gegenstand

In vielen Lehrbüchern wird behauptet, für den Gleichrichtereffekt sei ein an beweglichen Ladungsträgern mehr oder weniger verarmter Bereich beiderseits der Kontaktfläche zwischen p- und n-Gebiet verantwortlich:

- 1 „Bei einem p-n-Übergang entsteht durch Diffusion und gleichzeitige Rekombination der Ladungsträger im Grenzgebiet eine hochohmige Sperrzone ...“
- 2 „Es bildet sich eine Sperrsicht, bei Durchlasspolung verschwindet sie.“
- 3 „Wenn die n-Schicht mit dem Pluspol und die p-Schicht mit dem Minuspol der Quelle verbunden ist, wird dadurch die Sperrsicht breiter. Die Diode sperrt.“
- 4 „Wird stattdessen die p-Schicht der Diode an den Pluspol und die n-Schicht an den Minuspol der Quelle angeschlossen, so dringen freie Elektronen und Elektronenfehlstellen in die Sperrsicht ein. Sie verliert ihre Wirkung und die Diode leitet.“
- 5 „... wird bei Polung in Sperrrichtung die Raumladungsschicht verbreitert und damit der Widerstand erhöht.“

### Mängel

Tatsächlich ändert die Raumladungsschicht ihre Dicke mit der angelegten Spannung, sodass der Schluss plausibel scheint. Ein solcher Schluss von der Ladungsträgerkonzentration auf den Widerstand ist aber nur dann eindeutig, wenn die Ladungsträger auf dem betrachteten Weg ihre Identität bewahren. Er ist nicht mehr zulässig, wenn die Ladungsträger an Reaktionen teilnehmen. Genau das ist aber im p-n-Übergang der Fall. Bei

Durchlasspolung reagieren Elektronen und Defektelektronen zu Photonen und Phononen. Bei Polung in Sperrrichtung läuft die Reaktion in die andere Richtung – allerdings mit viel geringerer Reaktionsrate, denn bei normalen Temperaturen sind nur wenige Phononen und Photonen vorhanden. Es ist diese Unsymmetrie im Reaktionsumsatz, die die Unsymmetrie des Widerstandes der Diode bewirkt. Die Dicke der Raumladungsschicht beträgt übrigens nur etwa 1/1000 der Dicke der Diffusionszone, d.h. des für den Gleichrichtereffekt tatsächlich zuständigen Bereichs.

### Herkunft

Die traditionelle Abneigung der Physiker gegenüber der Chemie. Sie führt zu dem aussichtslosen Versuch, das Geschehen in der Halbleiterdiode allein mit Ohm'schem Gesetz und Elektrostatik zu erklären, d.h. mit den Werkzeugen der Elektrizitätslehre. Tatsächlich kommt man bei der Erklärung der Diode sowie auch des p-n-p- und n-p-n-Transistors ohne die Mittel der Chemie nicht aus. Am elegantesten wird die Erklärung, wenn man das chemische Potenzial als eine dem elektrischen Potenzial gleichwertige Triebkraft benutzt.

### Entsorgung

Man erklärt Halbleitergleichrichter und Leuchtdiode etwa so: Bei Polung in Durchlassrichtung fließen aus dem n-Gebiet Elektronen und aus dem p-Gebiet Löcher zum p-n-Übergang hin und reagieren dort zu Photonen und Phononen. Die Diode ist für den elektrischen Strom durchlässig. Leuchtdioden sind so optimiert, dass möglichst wenige Phononen und möglichst viele Photonen entstehen. Bei Polung in Sperrrichtung müssen die Ladungsträger von der Mitte weg nach außen fließen. Da aber vom p-n-Übergang keine Elektronen und Löcher nachgeliefert werden, können auch keine wegfließen. Die Diode sperrt den elektrischen Strom, und sie emittiert kein Licht. Sieht man genauer hin, so stellt man fest, dass durch die thermische Umgebungsstrahlung bewegliche Elektronen und Löcher mit sehr geringer Rate erzeugt werden. Diese Ladungsträger bilden den Sperrstrom.

## 9.3 Die Halbleiterdiode als Fotoelement

### Gegenstand

Man findet nicht nur in Schul-, sondern gelegentlich auch in Hochschulbüchern die Behauptung, in einem Halbleiterfotoelement stelle der elektrische Potenzial-

## Der fotoelektrische Effekt

gradient in der Raumladungsschicht eines p-n-Übergangs den Antrieb für den elektrischen Strom dar:

- 1 „Diese Trennung der Elektronen und Löcher durch das innere elektrische Feld der Verarmungszone bildet den Generatoreffekt.“
- 2 „Aufgrund von elektrischen Kräften werden die freigesetzten Elektronen in die n-Schicht und die entstehenden Löcher in die p-Schicht getrieben.“

### Mängel

Bei oberflächlicher Betrachtung erscheint die Behauptung plausibel. Der elektrische Strom, den das Fotoelement verursacht, braucht einen Antrieb. Als Antrieb für einen elektrischen Strom kennen wir Physiker das elektrische Feld, also ein elektrisches Potenzialgefälle. Ein solches existiert in der Fotodiode, und es hat auch die zur Erklärung passende Richtung. Also, schließt man, wird es wohl dieses elektrische Potenzialgefälle sein, das für den Strom verantwortlich ist.

Tatsächlich kann der Antrieb für einen stationären elektrischen Strom aber gar nicht ein elektrisches Potenzialgefälle sein. Folgt man nämlich einem (positiven) Ladungsträger in dem Stromkreis auf seinem Weg „im Kreis herum“, so geht es gerade genauso viel „bergauf“ wie „bergab“. Da es nun im Verbraucherwiderstand den Potenzialberg hinunter geht, muss es in der Quelle netto bergauf gehen. Man erkennt eine elektrische Energiequelle gerade daran, dass das elektrische Potenzial am „Ladungsausgang“ höher ist als am „Ladungseingang“.

Dass es innerhalb der Energiequelle zwischendurch auch mal den Potenzialberg hinab geht, ändert an dieser Feststellung nichts. In einem elektrischen Stromkreis macht das elektrische Potenzial an jeder Stelle, an der das Material des Leiters wechselt, einen Sprung – auch in einem Stromkreis ohne Batterie. Geht man in einem Stromkreis einmal im Kreis herum, so geht es diese Potenzialstufen (die von der Größenordnung Volt sind) genauso viel hinauf wie hinunter. Darum brauchen wir uns gewöhnlich auch gar nicht um sie zu kümmern.

### Herkunft

Auch hier der verzweifelte Versuch, die Funktionsweise eines Bauelements mit den vertrauten Werkzeugen der Elektrizitätslehre zu erklären, obwohl gerade die Elektrizitätslehre zeigt, dass das Argument falsch sein muss.

### Entsorgung

Der Antrieb für einen Strom elektrischer Ladungsträger kann, aber muss nicht ein elektrischer Potenzialgradient sein. Genauso wie in jeder elektrochemischen Zelle werden die elektrischen Ladungsträger im Halbleiterfotoelement durch ein chemisches Potenzialgefälle angetrieben.

## 9.4 Der fotoelektrische Effekt

### Gegenstand

Der fotoelektrische Effekt wird in Vorlesung und Schulunterricht vorgeführt, um die Quantennatur des Lichts nachzuweisen. Er gestattet, auf einfache Art die Planck-Konstante mit recht guter Genauigkeit zu bestimmen.

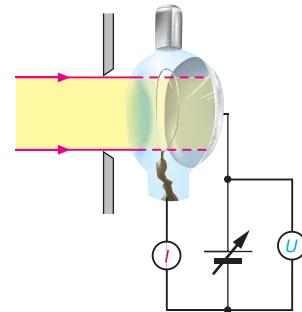


Abb. 9.1 Die Spannung wird so eingestellt, dass der Fotostrom gleich null ist.

Abb. 9.1 zeigt das Experiment schematisch. Man beleuchtet die Kathode, die aus einem Material mit geringer Elektronenaustrittsarbeit besteht, typischerweise einem Alkalimetall. Die Spannung wird dann so eingestellt, dass der Fotostrom gerade null wird.

Zur Interpretation benutzt man die Einstein-Gleichung, die in moderner Form geschrieben lautet:

$$E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_{\text{A-Kat}}. \quad (9.1)$$

Hier ist  $h$  die Planck-Konstante,  $f$  die Frequenz des eingestrahlten Lichts und  $W_{\text{A-Kat}}$  die Elektronenaustrittsarbeit der Kathode. Die ausgelösten Fotoelektronen verlieren einen Teil ihrer Energie noch im Innern der Fotokathode. Die Gleichung bezieht sich auf diejenigen Elektronen, die keinen Energieverlust erfahren, bevor sie zur Oberfläche gelangen und aus der Kathode austreten.  $E_{\text{kin}}$  stellt diese maximale kinetische Energie dar.

Es wird nun behauptet, dass

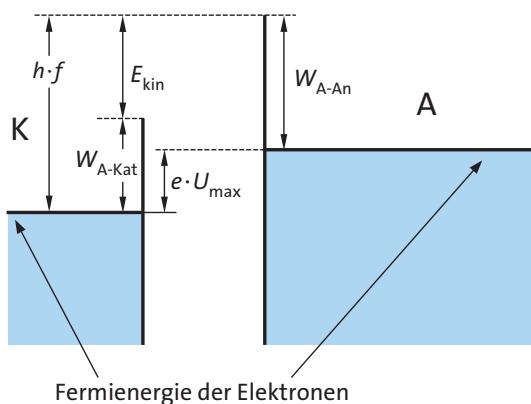
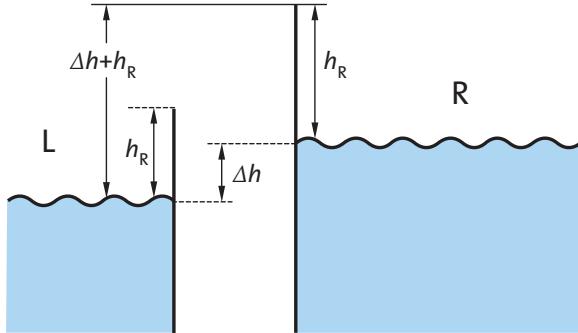
$$E_{\text{kin}} = e \cdot U_{\text{max}} \quad (9.2)$$

ist, wo  $U_{\text{max}}$  diejenige Spannung ist, die man anlegen muss, damit der elektrische Strom gerade null wird, siehe zum Beispiel [1, 2, 3, 4].

Man macht das Experiment mit Licht verschiedener Wellenlängen, trägt  $e \cdot U_{\text{max}}$  über der Frequenz des verwendeten Lichts auf und erhält eine Gerade, deren Steigung gleich  $h$  ist:

$$e \cdot U_{\max} = h \cdot f - W_{A\text{-Kat}}. \quad (9.3)$$

Der Punkt, in dem die Gerade die Hochachse schneidet, wäre dann gleich der Austrittsarbeit der Elektronen aus dem Kathodenmaterial.



**Abb. 9.2** (a) Es soll eine Wasserportion der Masse  $m$  aus dem linken in den rechten Behälter geschöpft werden. Dazu wird die Energie  $m \cdot g \cdot (\Delta h + h_R)$  gebraucht. (b) Es soll ein Elektron aus der Kathode (K) in die Anode (A) gebracht werden. Dazu wird die Energie  $eU_{\max} + W_A$  gebraucht.

### Mängel

Gleichung (9.2) ist nicht richtig. Die Spannung  $U_{\max}$ , die man im Experiment misst, entspricht nicht der kinetischen Energie von Gleichung (9.1). Folglich ist auch Gleichung (9.3) nicht korrekt.

Man macht sich das am besten an einem Modell klar, Abb. 9.2a. Wir betrachten zwei Wasserbehälter L und R (links und rechts). Die Höhe  $h_L$  des Randes von L über dem Wasserspiegel von L ist kleiner als  $h_R$ , die Höhe des rechten Randes von R über dem Wasserspiegel von R. Wir nennen den Höhenunterschied der Wasserspiegel  $\Delta h$ . Es soll nun eine Wasserportion der Masse  $m$  aus L in

R geschöpft werden. Die Energie, die dazu gebraucht wird, ist durch den Höhenunterschied zwischen dem Wasserspiegel von L und der Randhöhe von R gegeben:

$$\text{Minimale Schöpfenergie} = m \cdot g \cdot (\Delta h + h_R). \quad (9.4)$$

Die Höhe  $h_L$  spielt für diese Energie keine Rolle.

Die Übertragung auf den fotoelektrischen Effekt ist einfach. In Abb. 9.2b befindet sich links die Kathode (K) und rechts die Anode (A). Nach oben ist die Energie eines betrachteten Elektrons aufgetragen.

Den Wasserniveaus in Abb. 9.2a entsprechen in Abb. 9.2b die Fermienergien (oder elektrochemischen Potenziale) der Elektronen in der Kathode bzw. in der Anode. Dem Abstand vom jeweiligen Wasserspiegel zum oberen Rand entspricht die Austrittsarbeit  $W_K$  bzw.  $W_A$ . Der zum Schöpfen mindestens nötigen Energie entspricht die Energie  $h \cdot f$ , die ein Photon mindestens haben muss, damit ein Elektron von der Kathode zur Anode gelangen kann. Man sieht, dass man diese Energie auf zwei Arten ausdrücken kann:

Entweder

$$h \cdot f = e \cdot U_{\max} + W_{A\text{-An}} \quad (9.1)$$

oder

$$h \cdot f = E_{\text{kin}} + W_{A\text{-Kat}} \quad (9.2)$$

Aus Gleichung (9.1) folgt

$$e \cdot U_{\max} = h \cdot f - W_{A\text{-An}}.$$

Sie ist das Analogon von Gleichung (9.4). Aus Gleichung (9.2) folgt

$$E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_{A\text{-Kat}}.$$

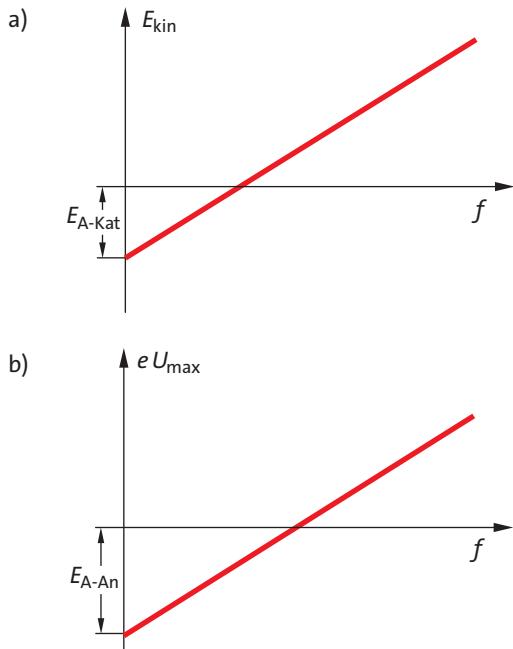
Die den beiden letzten Gleichungen entsprechenden Geraden sind in Abb. 9.3 dargestellt.

Damit man überhaupt Elektronen aus dem Kathodenmaterial herausbekommt (damit  $E_{\text{kin}} > 0$  ist), muss  $h \cdot f$  größer als die Austrittsarbeit der Kathode sein oder  $f > W_{A\text{-Kat}}/h$ .

Die Gerade von Abb. 9.3a geht aus der von Abb. 9.3b durch eine Verschiebung in Richtung der Hochachse um  $W_{A\text{-An}} - W_{A\text{-Kat}}$  hervor. Diese Differenz der Austrittsarbeiten von Anode und Kathode entspricht gerade die Kontaktspannung  $U_K$  zwischen den beiden Materialien, denn es ist:

$$e \cdot U_K = W_{A\text{-An}} - W_{A\text{-Kat}} \quad (9.3)$$

## Der fotoelektrische Effekt



**Abb. 9.3** (a) Kinetische Energie über der Frequenz. Der Abschnitt auf der Hochachse ist die Austrittsarbeit der Kathode. (b) Maximalspannung mal Elementarladung über der Frequenz. Der Achsenabschnitt ist die Austrittsarbeit der Anode.

In den meisten der von uns konsultierten Büchern ist zwar, wie in Abb. 9.3b,  $e \cdot U_{\text{max}}$  als Funktion der Frequenz dargestellt, die Achsenbeschriftungen sind aber wie in Abb. 9.3a. Eine korrekte Darstellung haben wir gefunden in Schpolski [5] und im Münchener Internetprojekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik (milq) [6].

Auch wenn man diesen Argumenten folgt, mag man aus dem folgenden Grund noch Bedenken haben: Der Versuch, so wie man ihn in der Schule vorführt, funktioniert doch schließlich, und er liefert auch in guter Näherung die Austrittsarbeit des Kathoden- und nicht des Anodenmaterials, die gewiss viel größer ist als die etwa 2 eV, die man tatsächlich misst. Die Erklärung hierfür kann nur sein, dass von der Kathode geringe Mengen von Cäsium – wir nehmen eine Cäsiumkathode an – auf die Anode gelangt ist. Darauf wird von den Herstellern auch hingewiesen. Nun genügt schon eine sehr sporadische Oberflächenbelegung der Anode mit Cäsium, damit alle Photoelektronen über diese Stellen in das Anodenmaterial hineingelangen, denn jeder kleine Fleck mit einer geringeren Austrittsarbeit ist für ein Elektron ein Potenzialminimum, das es bereitwillig aufsucht. Bei manchen Fotozellen muss man auch von Zeit zu Zeit die Ringanode ausheizen, damit das Cäsium

wieder von der Anodenoberfläche verschwindet. Auch das ist verständlich: Wenn zu viel Cäsium die Anodenoberfläche bedeckt, wirkt die Anode schließlich selbst als Quelle von Photoelektronen, die durch das Streulicht aus der Anode herausgelöst werden.

Schließlich könnte man sich noch die Frage stellen, warum die Hersteller überhaupt die Kathode aus einem Material mit geringer Austrittsarbeit machen und nicht die Anode. Dazu muss man sich nur daran erinnern, wozu Fotozellen überhaupt hergestellt werden: Nicht um in Demonstrationsexperimenten mit der Gegenfeldmethode die Planck-Konstante zu messen, sondern um Licht nachzuweisen – und dazu betreibt man sie in Durchlassrichtung. Dabei ist eine niedrige Austrittsarbeit der Kathode gut, wenn man Licht mit langen Wellenlängen nachweisen will.

### Herkunft

Einstins Arbeit aus dem Jahr 1905 zum fotoelektrischen Effekt ist keine experimentelle Arbeit. Genaue Messungen lagen zu dieser Zeit nicht vor. Worauf es Einstein ankam, war auch nur die Deutung der Tatsache, dass die kinetische Energie der einzelnen Elektronen von der Intensität des Lichts unabhängig, und dass die Zahl der emittierten Elektronen proportional zur Lichtintensität ist [7].

Mit großer Sorgfalt und Genauigkeit wurde der Effekt in den folgenden Jahrzehnten durch verschiedene Forscher vermessen. Die wichtigsten Arbeiten stammen von Millikan [8, 9] und von Lukirsky und Priležejav [10].

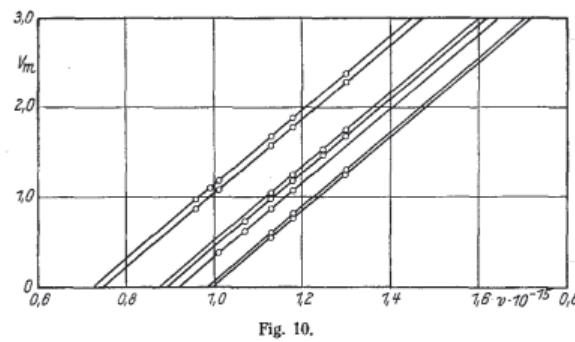


Fig. 10.  
Die Geraden entsprechen den Metallen (von links gerechnet):  
Al, Zn, Sn, Ni, Cd, Cu, Pt.

**Abb. 9.4** Die Originalergebnisse aus der Arbeit von Lukirsky und Priležejav [10]. Ordinatenachse:  $U_{\text{max}} + U_{\text{K}}$ . Abszissenachse: Frequenz des Lichts.  $U_{\text{max}}$  ist die Spannung, bei der der Fotostrom gerade gleich null wird,  $U_{\text{K}}$  ist die Kontaktspannung. Der Ordinatenachsenabschnitt (hier nicht zu sehen) entspricht der Austrittsarbeit der Kathode. Trägt man auf der Ordinate nur  $U_{\text{max}}$  auf, so entspricht der Ordinatenabschnitt der Austrittsarbeit der Anode.

Abb. 9.4 ist der Arbeit von Lukirsky et al entnommen. Sie zeigt die kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  der ausgelösten Elektronen als Funktion der Frequenz des einfallenden Lichts. Nach Gleichung (9.1) ist der Ordinatenabschnitt, bis auf einen Faktor  $e$ , gleich der Austrittsarbeit der Kathode.

Die kinetische Energie haben die Autoren bekommen, indem sie zur gemessenen Spannung  $U_{\text{max}}$  die Kontaktspannung zwischen Anode und Kathode addiert haben. Die Kontaktspannung haben sie (wie vorher auch schon Millikan) unabhängig von  $U_{\text{max}}$  gemessen.

Wie schon gesagt wurde, findet man in vielen Büchern eine ähnliche Abbildung, wobei man aber nach oben  $e \cdot U_{\text{max}}$  (oder nur  $U_{\text{max}}$ ) aufträgt und behauptet, dies sei (evtl. bis auf einen Faktor  $e$ ) die kinetische Energie. In [2] etwa wird sogar der Originalgraph von Lukirsky et al als Faksimile wiedergegeben, und die Ordinate kurzerhand mit  $U_{\text{max}}$  identifiziert.

Wie konnte ein solcher Übertragungsfehler zustande kommen? Die Bremsspannung mit der maximalen kinetischen Energie zu identifizieren ist plausibel. Wenn man sich mit Kontaktspannungen nicht auskennt, mögen sie einem einfach als eine Art Störeffekt erscheinen, den man zunächst vernachlässigen kann. Selbst im Schpolski, der den Effekt sehr sorgfältig behandelt, wird der Eindruck erweckt, die Kontaktspannung sei eigentlich nur ein Spielverderber. Selbstverständlich kann man sich auf diesen Standpunkt stellen. Dann muss man aber ganz und gar davon absehen, den Achsenabschnitt zu interpretieren, denn das, was man als Austrittsarbeit der Kathode bezeichnet, gehört in dieselbe Kategorie von Störeffekten wie die Kontaktspannung, siehe Gleichung (9.3).

Schließlich ist die Kontaktspannung nichts anderes als die Differenz der chemischen Potenziale der Elektronen in den beiden Materialien. Das chemische Potenzial der Elektronen im Material hat aber mit der Oberfläche nichts zu tun, und es ist unabhängig davon, ob die Oberfläche verschmutzt ist oder nicht. Die Austrittsarbeit ist daher eine genau so respektable Materialgröße wie Massendichte oder elektrische Leitfähigkeit. Natürlich wirkt sich eine Verschmutzung der Oberfläche auf den fotoelektrischen Effekt aus, denn man hat es dann nicht mehr mit dem chemischen Potenzial des eigentlichen Materials der Elektroden zu tun, sondern mit dem des Schmutzes.

Interessant ist nicht nur die Herkunft des Fehlers, sondern auch die Geschichte der vergeblichen Versuche, ihn zu korrigieren. 1973 erschien in der englischen Zeitschrift *Physics Education* ein kurzer Aufsatz mit dem unmissverständlichen Titel „Photoelectric effect, a

common fundamental error“ [11]. Ein Jahr später reichte eine isrealische Gruppe beim *American Journal of Physics* einen Artikel ein mit dem Titel „Concerning a widespread error in the description of the photoelectric effect“, der dort 1976 erschien [12]. Die Autoren schienen den Aufsatz in der britischen Zeitschrift nicht zu kennen. 1980 schließlich erschien in der *Praxis der Naturwissenschaften – Physik* ein Artikel mit dem eher ungewöhnlichen Titel „Die Austrittsarbeit beim Fotoeffekt“, in dem der Fehler kurz und klar beschrieben wird [13]. Der Autor zitiert den Aufsatz im *American Journal of Physics*.

Die Geschichte zeigt, dass ein Fehler überleben kann, auch wenn in angesehenen Fachzeitschriften eine Korrektur angemahnt worden ist. Hat sich eine falsche Aussage, die erstens plausibel ist und zweitens keinen allzu großen Schaden verursacht, erst einmal etabliert, so scheint eine Korrektur unmöglich zu sein.

### Entsorgung

Wir sehen drei Möglichkeiten.

- Man erklärt das Experiment korrekt, etwa mit dem Wasserbehältermodell.
- Man sieht davon ab, den Achsenabschnitt zu interpretieren.
- Man macht das Experiment gar nicht. Für einen Physiker im Jahr 1910 oder 1920 war das Experiment wichtig, es war eine Art Schlüsselexperiment. Nun müssen sich aber die Lernenden heute ihre Kenntnisse nicht unter denselben schwierigen Bedingungen beschaffen, wie es unsere Vorfahren mussten, die die entsprechende Physik selbst entwickelt haben. Wir wissen schließlich, wie die Geschichte ausging, wir kennen unzählige andere Experimente, die wir nur deuten können, wenn wir die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie als quantisiert annehmen. Wir kennen die Schrödingergleichung, und wir können uns die Photonen mit billigen Geräten einzeln ansehen. Keinem Schüler oder Studenten wird im Verständnis der Physik etwas fehlen, wenn er das Experiment mit dem lichtelektrischen Effekt nicht gesehen hat.

Schließlich sei noch bemerkt, dass es noch heute besteht Zweifel daran, ob der fotoelektrische Effekt überhaupt etwas über die Quantisierung des Lichts aussagt [14].

[1] Gerthsen, Kneser und Vogel, *Physik*, Springer-Verlag, Berlin, 1977, S. 308

[2] K. Stierstadt, *Physik der Materie*, VCH, Weinheim, 1989, S. 489

## Die Planck-Konstante mit LEDs bestimmen

- [3] E. H. Wichmann, *Quantum Physics*, Berkeley Physics Course, Volume 4, McGraw-Hill, New York, 1971, S. 28–31
- [4] E. Hecht, *Optik*, Addison-Wesley, Bonn, 1989, S. 571–574
- [5] E. W. Schpolski, *Atomphysik*, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1972, S. 315–320: „Zweitens verschiebt sich die Kurve auch, wie in allen ähnlich gelagerten Fällen, aufgrund des Kontaktpotenzials, das einer genauen Messung nur schwer zugänglich ist. Dies sowie eine Reihe anderer experimenteller Schwierigkeiten und Fehlerquellen führten dazu, dass die Einstein'sche Gleichung zunächst nicht einwandfrei bestätigt werden konnte. Erst Millikan gelang es dann, nach verschiedenen Vorarbeiten, in deren Verlauf Widersprüche aufgedeckt und überwunden wurden, den lange angestrebten experimentellen Beweis zu erbringen und  $h$  genau zu bestimmen.“
- [6] <http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~milq/>
- [7] A. Einstein, *Über einen die Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, Annalen der Physik 322, Nr. 6, 1905, S. 132–148: „Wenn jedes Energiequant des erregenden Lichtes unabhängig von allen übrigen seine Energie an Elektronen abgibt, so wird die Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen, d. h. die Qualität der erzeugten Kathodenstrahlung von der Intensität des erregenden Lichts unabhängig sein; andererseits wird die Anzahl der den Körper verlassenden Elektronen der Intensität des erregenden Lichtes unter sonst gleichen Umständen proportional sein.“
- [8] R. A. Millikan, *Einstein's Photoelectric Equation and Contact Electromotive Force*, Phys. Rev 7, 1916, S. 18–32
- [9] R. A. Millikan: *A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h"*, Phys. Rev 7, 1916, S. 355–388
- [10] P. Lukirsky, S. Priležaev, *Über den normalen Photoeffekt*, Zeitschrift für Physik 49, 1928, S. 236–258: „Werden auf der Ordinatenachse die bei Bestrahlung mit Licht von verschiedener Frequenz für ein bestimmtes Metall erhaltenen  $V_2 + K$ , auf der Abszissenachse die Frequenzen  $\nu$  aufgetragen, so erhalten wir eine Gerade, deren Tangente gleich  $h/e$  ist. Bei bekannten  $e$  finden wir daraus den Zahlenwert von  $h$ .“ ( $V_2$  steht bei Lukirsky für  $U_{\max}$ ,  $K$  für die Kontaktspannung.)
- [11] A. N. James, *Photoelectric effect, a common fundamental error*, Phys. Ed. 8, 1973, S. 382–384
- [12] J. Rudnick, D. S. Tannhauser, *Concerning a widespread error in the description of the photoelectric effect*, Am. J. Phys. 44, 1976, S. 796–798
- [13] J. Strnad, *Die Austrittsarbeit beim Photoeffekt*, Praxis der Naturwissenschaften – Physik, 1980, S. 343–344
- [14] R. Kidd, J. Ardini, A. Anatol, *Evolution of the modern photon*, Am. J. Phys. 57, 1989, S. 27–35

## 9.5 Die Planck-Konstante mit LEDs bestimmen

### Gegenstand

Die Planck-Konstante kann mithilfe von Leuchtdioden bestimmt werden. Man erhöht die Spannung, die an einer LED liegt, so lange, bis die Diode zu leuchten beginnt. Die entsprechende Schwellspannung  $U_0$  multipliziert mit der Elementarladung ist, so wird gesagt, gleich der Bandabstandsenergie und damit gleich der Energie der emittierten Photonen. Man macht den Versuch mit mehreren LEDs, die Licht unterschiedlicher Farben emittieren.

### Mängel

Eine Schwellspannung, bei der das Leuchten einsetzt, gibt es nicht. Der Lichtstrom ist proportional zum elektrischen Strom, der durch die Diode fließt. Die elektrische Stromstärke  $I$  als Funktion der Spannung  $U$  zwischen den Diodenanschlüssen befolgt in guter Näherung die Gleichung:

$$I = I_S \cdot \exp\left(\frac{eU}{\eta kT}\right) = I_S \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) \quad (9.4)$$

Hier ist  $k$  die Boltzmann-Konstante,  $T$  die absolute Temperatur und  $e$  die Elementarladung.  $\eta$  ist der sogenannte Nichtidealitätsfaktor. Sein Wert liegt zwischen 1 und 2. Er wäre gleich 1, wenn alle Elektron-Lochpaare strahlend rekombinierten. Sein Wert hat für die folgenden Betrachtungen keine Bedeutung, solange er nur für alle verwendeten Dioden gleich ist.  $I_S$  ist der Sättigungsstrom. Er hängt von der Temperatur und vom Bandabstand  $E_g$  ab. Es gilt die Proportionalität

$$I_S = A \cdot \exp\left(\frac{E_g}{\eta kT}\right)$$

Hier ist  $A$  der Flächeninhalt der p-n-Kontaktfläche. Außerdem

$$U_T = \frac{\eta kT}{e}$$

gibt es keine Spannung, die die Funktion von Gleichung (9.4) charakterisiert.  $U_T$  hat aber mit dem Bandabstand nichts zu tun [1,2]. Es gibt auch keine Spannung, bei der die Diode zu leuchten beginnt, denn sie emittiert immer – aber je nach Spannung unterschiedlich stark. Schon bei  $U = 0$  V emittiert sie, nämlich die Temperaturstrahlung. Wenn die Spannung größer wird, nimmt die Intensität exponentiell zu, die spektrale Verteilung des emittierten Lichts ändert sich aber nicht. Es mag überraschen, dass die Diode Photonen emittiert, deren Energie etwa gleich dem Bandabstand ist, obwohl die

den rekombinierenden Elektron-Loch-Paaren zugeführte Energie  $eU$  kleiner ist. Tatsächlich kühlt sich die Diode beim Betrieb mit kleinen Spannungen ab. Sie wirkt wie ein Peltier-Element. Dass man keine Abkühlung feststellt, liegt nur daran, dass der Effekt durch unvermeidliche Dissipationswärme überdeckt wird.

Das Verfahren, das man anwendet, um  $U_0$  zu erhalten, beruht auf einer Täuschung.

Abb. 9.5 zeigt dreimal dieselbe exponentielle Kennlinie. Der Unterschied besteht nur in der Wahl der Einheit der Ordinatenachse. Jedes Mal, wenn man die Einchung der Stromstärkeachse um einen Faktor 100 ändert, verschiebt sich der Graph um

$$\frac{kT}{e} \ln 10^2 = 0,119 \text{ V}$$

in Richtung der Abszissenachse (falls  $\eta = 1$  ist). Um denselben Betrag ändert sich auch die „Schwellspannung“  $U_0$ , die man ablesen würde.

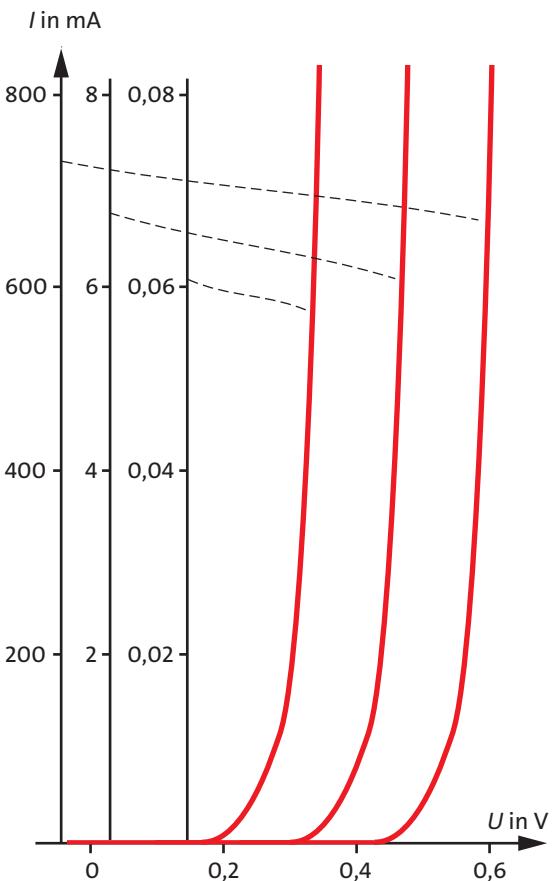


Abb. 9.5 Kennlinie einer Diode mit verschiedenen skalierter Stromachse. Die Kurven gehen durch Parallelverschiebung in Richtung der  $U$ -Achse auseinander hervor.

### Herkunft

Das Verfahren wurde eingeführt als einfaches Experiment für den Schulunterricht und das Hochschulpraktikum. Die falsche Deutung hat eine gewisse Plausibilität. Man hätte allerdings bemerken müssen, dass durch eine Exponentialfunktion prinzipiell keine Schwellspannung definiert werden kann.

### Entsorgung

Das Verfahren der Bestimmung der Planck-Konstante funktioniert, wenn man die Strom-Spannungs-Kennlinien mehrerer Dioden, die in verschiedenen Spektralbereichen emittieren, miteinander vergleicht, Abb. 9.6.

Voraussetzung ist allerdings, dass der Flächeninhalt  $A$  der p-n-Kontaktfläche für alle verwendeten Dioden derselbe ist. Die entsprechenden Kennlinien unterscheiden sich nämlich in dem Faktor [3]

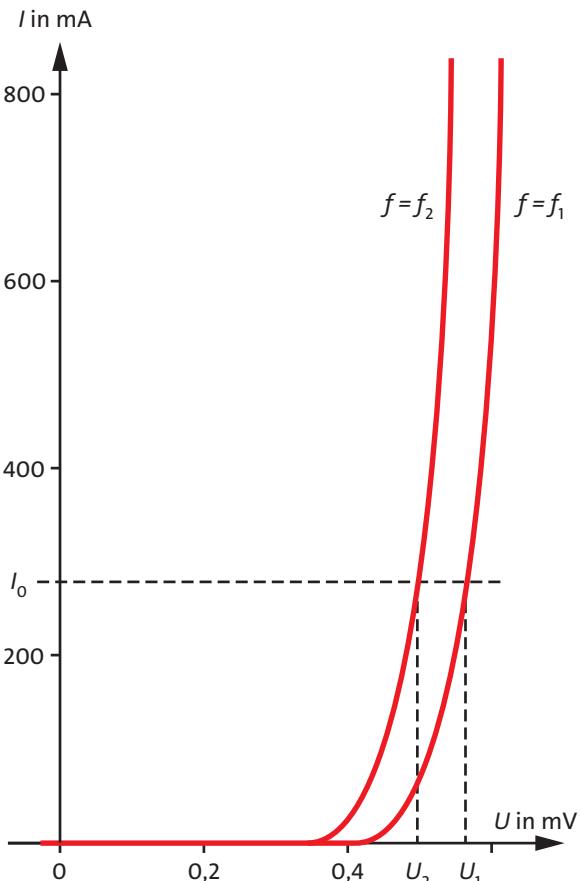


Abb. 9.6 Kennlinien von zwei Dioden, die Licht verschiedener Frequenzen emittieren. Die Kurven gehen durch Parallelverschiebung in Richtung der  $U$ -Achse auseinander hervor.

## Löcher rekombinieren

$$\exp\left(-\frac{E_g}{\eta kT}\right)$$

Der Bandabstand  $E_g$  hängt über die Planck-Konstante mit der (mittleren) Frequenz des emittierten Lichts zusammen:

$$E_g = h \cdot f.$$

Der horizontale Abstand von zwei Kurven 1 und 2 beträgt daher

$$(E_{g1} - E_{g2})/e.$$

Man wählt nun einen beliebigen Wert  $I_0$  der Stromstärke und liest die entsprechenden Spannungswerte  $U_i$  ab. Es gilt dann:

$$U_1 - U_2 = \frac{E_{g1} - E_{g2}}{e}$$

oder

$$e(U_1 - U_2) = E_{g1} - E_{g2} = h(f_1 - f_2).$$

Daraus folgt:

$$h = \frac{e(U_1 - U_2)}{f_1 - f_2}$$

Man beachte, dass nicht

$$eU_1 = hf_1$$

und

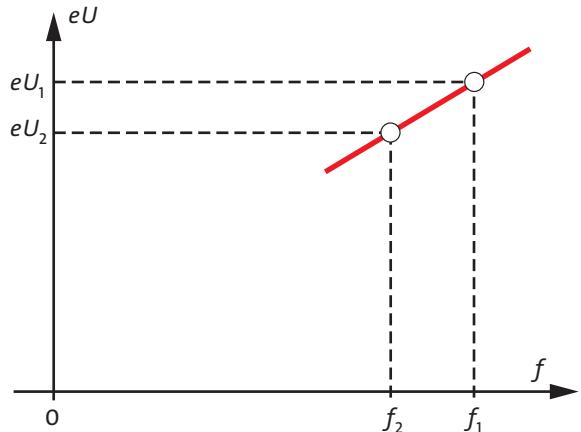
$$eU_2 = hf_2$$

einzelnen gelten.

Wenn man  $eU_i$  über der Frequenz  $f$  des emittierten Lichts aufträgt, erhält man also eine Gerade, deren Steigung gleich der Planck-Konstanten ist, Abb. 9.7.

(Oft legt man in den Punkten gleicher Stromstärke Tangenten an die Kennlinien und liest die Spannung an den Schnittpunkten mit der Spannungssachse ab. Das Verfahren liefert natürlich dasselbe Ergebnis, ist aber komplizierter. Es täuscht auch vor, bei dem Schnittpunkt handle es sich um etwas wie eine Schwellenspannung.)

Ob die Gerade durch den Ursprung des Koordinatensystems geht oder nicht, hat nur mit der zufälligen Wahl der Stromstärke  $I_0$  zu tun, für die man die Spannungswerte abliest (oder bei denen man die Tangenten anlegt).



**Abb. 9.7** Für zwei Dioden wird die Spannung bei der Stromstärke  $I_0$  mit  $e$  multipliziert und über der Frequenz des emittierten Lichts aufgetragen. Die Steigung der Verbindungsgeraden ist gleich der Planck-Konstante.

Statt die Spannungswerte für eine vorher gewählte Stromstärke abzulesen, benutzt man oft ein etwas anderes Verfahren: Man bestimmt die Spannung, bei der die Diode sichtbar zu leuchten beginnt. Da man die Helligkeit automatisch mit der der Umgebung vergleicht, lässt sich diese Spannung recht zuverlässig bestimmen, und sie definiert offenbar mit hinreichender Genauigkeit einen bestimmten, für alle Dioden gleichen Stromstärkewert. Dass die Gerade, die man erhält, durch den Ursprung geht, wie es oft gefunden wird, ist aber Zufall.

[1] F. Herrmann und D. Schätzle, *Question # 53. Measuring Planck's constant by means of an LED*, Am. J. Phys. 64, 1996, S. 1448

[2] R. Morehouse, *Answer to Question # 53. Measuring Planck's constant by means of an LED*, Am. J. Phys. 66, 1998, S. 12

[3] P. Würfel, *Physics of Solar Cells*, Wiley-VCH, Weinheim, 2009

## 9.6 Löcher rekombinieren

### Gegenstand

Für die Durchlassrichtung einer Halbleiterdiode aus einem Schulbuch: „im p-dotierten Halbleitermaterial der Diode sind Elektronenfehlstellen vorhanden, im n-dotierten Material Elektronen die beweglichen Ladungsträger ... sodass die Ladungsträger wieder ständig in den Grenzbereich eindringen und dort rekombinieren können.“

## Mängel

Ein Erlebnis aus meinem Unterricht: Nachdem die Halbleiterdiode behandelt wurde, fragte eine Schülerin, ob die Diode nicht nach längerer Zeit durchbrechen müsste? Auf Nachfrage erklärte sie, dass Elektronen und Löcher ständig zur Sperrsicht strömen und dort rekombinieren, sodass die Masse dort zunimmt, bis die Diode dort aufgrund ihres Gewichts auseinanderbricht.

Das Wort „Rekombinieren“ wird in den Physik-Lehrbüchern der Schule nur im Zusammenhang mit Elektronen und Löchern (Defektelektronen) im Halbleiter verwendet. Man spricht nicht von „reagieren“. Gibt es einen Unterschied zwischen reagieren und rekombinieren? Wer rekombiniert mit wem zu was?

Nun, ein Elektron  $e$  ist beteiligt. Dessen Eigenschaften sind bekannt: Es hat die Masse  $m_e$ , die Ladung  $-e$  und so weiter. Es reagiert oder rekombiniert mit einem Loch (Defektelektron)  $h$  entsprechend



zu einem Strahlungsquant  $\gamma$ . Dessen Eigenschaften sind, von der Energie abgesehen, ebenfalls bekannt.

Was folgt für die Eigenschaften des Teilchens  $h$ ? Da es ein Loch ist und kein Teilchen, sollte es auch keine elektrische Ladung haben. Im Lehrtext wird ihm jedoch eine positive Ladung zugeschrieben. Dann ist es wohl ein Nichtteilchen mit der Ladung  $e$ . Die Schüler lernen das besser ohne nachzudenken oder nachzufragen.

Wie steht es mit der Masse  $m_h$  des Loches? Zur Auswahl stehen die Masse des Elektrons  $m_e$  oder 0 oder vielleicht  $-m_e$ .

1. Masse  $m_h = m_e$ : Die Halbleiterdiode bricht durch (s.o.)

2. Masse  $m_h = 0$ : Das Loch mit seiner positiven Ladung lässt sich bei kleiner elektrischer Feldstärke enorm beschleunigen!

3. Masse  $m_h = -m_e$ : Die Halbleiterdiode bricht nicht durch. Allerdings haben nchteinmal die Antiteilchen der Elementarteilchen eine negative Masse.

In den Lehrbüchern wird die Masse nicht angesprochen. Wie soll die Lehrkraft antworten, wenn die Lernenden nach der Masse  $m_h$  fragen?

Vielleicht hilft der Vergleich mit der Kernphysik. Dort finden man eine ähnliche Reaktion, nämlich die eines Elektrons  $e$  und eines Positrons  $e^+$ :



Die sogenannte Paarvernichtung erzeugt ein  $\gamma$  mit einer Energie von 511 keV. Die Ladungsbilanz gleicht der von Reaktion (9.5). Bei dieser Reaktion stimmen auch die

anderen Bilanzen der leptonischen Ladung, der Energie .... Doch so kann die Reaktion (9.5) nicht ablaufen, die erzeugte Energie des Strahlungsquant  $\gamma$  liegt nur im Bereich von wenigen eV.

## Herkunft

Die Beschreibung der Ladungsträgerbewegung erfolgt in der Festkörperphysik. Das Elektronengas (aus beweglichen Ladungsträgern) bewegt sich im n-Leiter so, wie sich Elektronen bewegen. Die Wechselwirkung mit dem Gitter ist gering. Im p-Leiter ist sie hingegen für die Bewegung bestimmend. Die Elektronen bewegen sich durch die Wechselwirkung mit dem Kristallgitter so, wie sich positiv geladenen Teilchen ohne Gitterwechselwirkung bewegen würden. Vergisst man die Wechselwirkung mit dem Gitter, dann kann die Bewegung der Elektronen so beschrieben werden, *als wenn sie positiv geladen wären*. Daher kommt die positive Ladung des Loches  $h$ .

Doch warum die Bezeichnung „Loch“, wenn doch offensichtlich das Nichtteilchen Loch keine Ladung haben kann? Betrachtet man im p-Halbleiter das Impuls-Energie-Diagramm, dann sind die Zustände im Valenzband nahezu vollständig besetzt, für positive wie für negative Impulswerte. Es findet damit kein Netto-Ladungstransport statt. Erst wenn durch die Dotierung des p-Halbleiters ein neues Energieniveaus oberhalb des Valenzbandes geschaffen wird, kann ein Elektron 1 dieses besetzen. Es hinterlässt einen unbesetzten Zustand, ein Loch. Jetzt erfolgt ein Ladungstransport, nicht durch das Loch, sondern durch das Elektron 2 mit dem zu Elektron 1 entgegengesetzten Impuls. Das Elektron 2 trägt jetzt zur elektrischen Leitung bei.

Und letztendlich zum Rekombinieren: Wenn ein Elektron und ein Loch rekombinieren, dann wird ein unbesetzter Zustand im Valenzband (Loch genannt) durch ein Elektron aus dem Leitungsband besetzt. Damit wechselt das Elektron, welches vorher zur elektrischen Leitung beigetragen hat, in die Menge der Elektronen (im Valenzband), die nicht mehr zur Leitung beitragen. Diesen Vorgang beschreibt die Reaktion (9.5).

Wo ist dass Loch hin?, möchte man fragen. Das Loch (der unbesetzte Zustand) ist aus dem Valenzband in das Leitungsband aufgestiegen. Doch dort interessiert man sich nicht für den Ladungstransport mit Löchern.

Warum quält man Schülerinnen und Schüler mit Löchern im Halbleiter, wo sie doch nicht einmal im Ansatz verstehen, welche Bedeutung der Begriff, seine Teileneigenschaften und seine positive Ladung haben? Es ist die Technik der Handys und der Computer, die in der Lebenswelt eine maßgebliche Rolle spielt. Sie soll „erklärt“

## Löcher rekombinieren

werden, doch es fehlen die fachlichen Grundlagen.

### Entsorgung

Nicht erklären, was beim Wissensstand der Schülerinnen und Schüler nicht zu erklären ist. Fachbegriffe der Festkörperphysik nachzusprechen, deren Bedeutung verborgen bleibt, sollte nicht als allgemeinbildend verstanden werden. Also: weglassen. Oder: ohne Erklärung verwenden.

Für die Hochschullehre der Physik sind die Informationen aus Wikipedia hilfreich:

„Als Defektelektron, Elektronenfehlstelle, Elektronenloch oder Loch wird der (gedachte) positive bewegliche Ladungsträger in Halbleitern bezeichnet. Es stellt die äquivalente Beschreibung des Fehlens eines (realen) Valenzelektrons dar,[1] die der vereinfachten mathematischen Behandlung der Vorgänge im Halbleiter dient. Der reale Ladungstransport findet weiterhin durch Elektronen statt.“ [1]

„Ein bekanntes Beispiel sind die Defektelektronen („Löcher“) in einem Halbleiter, in dem sich die negativ geladenen Valenzelektronen kollektiv so in eine Richtung bewegen, als würde sich ein positiv geladenes Teilchen in die entgegengesetzte Richtung bewegen.“ [2]

[1] Wikipedia → Loch

[2] Wikipedia → Quasiteilchen

# 10 ASTROPHYSIK

## 10.1 Das Hertzsprung-Russell-Diagramm

### Gegenstand

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm fehlt in keinem Schulbuch für die Sekundarstufe II. Ein Punkt in diesem Diagramm steht für einen Stern. Auf der Abszissenachse ist die Spektralklasse oder die Oberflächentemperatur des Sterns aufgetragen, auf der Ordinatenachse die Leuchtkraft.

### Mängel

#### 1. Die Bezeichnung der Achsen

Die Variable der Ordinatenachse wird mit Leuchtkraft bezeichnet. Nun ist die Leuchtkraft nichts anderes als der Energiestrom. Warum also ein neues Wort? Außerdem: Auch ohne die Leuchtkraft gibt es genug „Kräfte“ in der Physik [1,2].

Die Abszissenvariable wird oft Spektralklasse genannt. Man hat den Eindruck, hier handele es sich gar nicht um eine Variable, und wenn doch, dann nicht um eine, die ein Kontinuum von Werten annehmen kann. Tatsächlich sind die Spektren von Sternen sehr komplex. Einerseits stimmen sie recht gut mit dem Spektrum eines Planck'schen Strahlers überein. Andererseits weisen sie sowohl Absorptions- als auch Emissionslinien auf. Aus einem Bedürfnis, Ordnung in die große Mannigfaltigkeit von Spektren zu bringen, sind die Spektralklassen entstanden, deren Anzahl und Komplexität mit der Zeit immer mehr zugenommen hat. Man kann jedes Spektrum aber auch durch einen einzigen Zahlenwert charakterisieren: der Temperatur derjenigen Schwarzkörperstrahlung, die dem Spektrum des Sterns am nächsten kommt.

Für die Lernenden wäre es gewiss klarer, die Achsen des HR-Diagramms mit „Energiestrom“ und „Temperatur“ zu bezeichnen.

### 2. Die Wahl der Variablen

Noch bedenklicher ist aber die Wahl der Variablen: Energiestrom und Temperatur. Selbstverständlich korrelieren die beiden Größen. Nur: Was soll eigentlich zum Ausdruck gebracht werden? Normalerweise haben wir es in der Physik mit funktionalen und nicht mit korrelativen Zusammenhängen zu tun. Oder grafisch gesprochen: mit Linien und nicht mit Punktwolken. Die korrelativen Zusammenhänge mit ihren sogenannten Streudiagrammen überlassen wir den Soziologen, Pädagogen und Wirtschaftswissenschaftlern.

Tatsächlich kann man in das Koordinatensystem des HR-Diagramms auch Linien einzeichnen, die einen funktionalen Zusammenhang beschreiben: wenn man für die Geschichte eines einzelnen Sterns von seiner Entstehung bis zu seinem Ende den Energiestrom, der von ihm wegläuft, als Funktion seiner Oberflächentemperatur darstellt. Wie diese aussieht, hängt im Wesentlichen von seiner Masse ab. Wir hätten also eine Funktionenschar mit der Masse als Parameter. Im HR-Diagramm dagegen tritt die Masse als Zufallsvariable auf.

Wenn man den Energiestrom für einen Stern als Funktion der Oberflächentemperatur darstellt, wird aber auch offenbar, was man eigentlich falsch macht. Die Botschaft, die wir unseren Schülerinnen und Schülern mitgeben wollen, ist ja eine ganz andere: Jeder einzelne Stern durchläuft eine Entwicklung. Wenn wir im Unterricht, oder auch in der Vorlesung, die Sternentwicklung diskutieren, so fragen wir nach Funktionen der Zeit, und wenn wir in den Stern hineinschauen wollen, auch vom Ort (in Form des Abstandes vom Mittelpunkt des Sterns). Also etwa: Wie hängt die Temperatur an der Oberfläche des Sterns (also an einem festen Ort  $r$ ) von der Zeit ab, oder auch: Wie hängt der Gesamtenergiestrom nach außen von der Zeit ab.

## Photonen in der Sonne

### Herkunft

Eine Klassifizierung der Sterne war schon in hellenistischer Zeit vorgenommen worden. Den Anfang einer Physik der Sterne, also der Astrophysik, wird man aber eher ins 18. Jahrhundert legen. Man entdeckte, dass die Sterne nicht ruhen, wie man früher angenommen hatte, man schaffte es um die Mitte des 19. Jahrhunderts, die Entfernung der uns am nächsten liegenden Sterne zu messen und konnte dadurch die absolute Helligkeit von Sternen bestimmen. Und schließlich entdeckte man auch die Korrelation zwischen absoluter Helligkeit und dem Spektrum der Sterne. Die Frage nach der Energiequelle war verbunden mit der Vorstellung, dass Sterne eine Entwicklung durchmachen, aber zunächst konnte man diese Frage noch nicht beantworten. Die Korrelation, die im Hertzsprung-Russell-Diagramm zum Ausdruck kommt, war eine der wenigen beobachtbaren Erscheinungen der damaligen Zeit. Aus heutiger Sicht würde man diesen Zusammenhang aber eher in die Kategorie „Rohdaten“ einordnen, denn was physikalisch eigentlich interessiert, ist die zeitliche Entwicklung eines einzelnen Sterns.

Ein Grund für die Persistenz des HR-Diagramms ist gewiss auch, dass es einen eigenen Namen trägt. Wenn es einen Namen hat, so muss es ja wohl wichtig sein, und Hertzsprung und Russel müssen bedeutende Forscher gewesen sein. Also kein Zweifel: Das HR-Diagramm ist Allgemeinbildungsgut. Oder? Was erfährt man denn aber von den zahlreichen anderen Forschern, die in dieser Anfangsphase der Astrophysik wichtige Beiträge geleistet haben? Wer hat die Bewegung der Sterne entdeckt? Wer hat die erste Entfernung eines Sterns gemessen? Und schließlich die wohl wichtigste Frage in diesem Zusammenhang: Wer hatte die Idee, dass die Energiequelle der Sterne eine Kernreaktion sein muss?

Also wieder ein typisches Beispiel für das allgemeine Thema unserer Kolumne. Aufgrund historischer Gegebenheiten entstand zunächst ein umständliches, un durchsichtiges Streudiagramm; nur ein Jahrzehnt später konnte es gedeutet werden und hätte eigentlich durch eine transparentere Darstellung ersetzt werden können, aber die ursprüngliche Darstellung hat überlebt.

### Entsorgung

Man diskutiert die Sternentwicklung für einen typischen sonnenartigen Stern, der als weißer Zwerg endet; außerdem einen, der als Neutronenstern und einen, der als schwarzes Loch endet. Das Hertzsprung-Russell-Diagramm braucht man dazu nicht.

[1] F. Herrmann, *Namen physikalischer Größen in Zusammensetzungen*, Altlasten der Physik

[2] F. Herrmann, *Kraftübertragung, Drehmomentübertragung und Leistungsübertragung*, Altlasten der Physik,

## 10.2 Photonen in der Sonne

### Gegenstand

„Ein Photon, also ein ‘Lichtteilchen’, das bei den Fusionsprozessen im Kern der Sonne entsteht, bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit, also mit 300 000 km/s – allerdings nur so lange, bis es auf ein Teilchen trifft und von diesem in eine andere Richtung gestreut wird. Im Inneren der Sonne ist die Materie außerordentlich dicht gepackt, ein Photon kann sich also nicht weit in eine Richtung bewegen, ohne wieder umgelenkt zu werden – oft sind es nur Bruchteile eines Millimeters. Nach außen hin wird diese Strecke dann allmählich etwas länger. Um nun zu berechnen, wie lange ein Photon benötigt, um durch zufällige Streuungen aus dem Inneren der Sonne an die Oberfläche zu gelangen, muss man einige Annahmen über den Aufbau der Sonne, beispielsweise über ihren exakten Dichteverlauf machen. Man kommt dann auf Werte, die zwischen 10 000 und 170 000 Jahren liegen.“

„You can calculate how long it would take one photon to ‘diffuse’ by scattering through the core to the bottom of the convection zone, and this has been done (it’s about 170 000 years).“

### Mängel

Man klammert sich an das Photon, das Lichtteilchen, das kleine Gebilde oder Wellenschwänzchen, das durch die Gegend saust oder wackelt. Schon beim Elektron verursacht die Vorstellung, es handele sich um ein kleines Individuum, manche Verständnisschwierigkeit. Man muss unverständliche Zusatzbehauptungen aufstellen („Elektronen sind ununterscheidbar“), um die Sprache, die man benutzt (und damit die Modellvorstellung), aufrechterhalten zu können. Beim Photon ist es noch schlimmer. Einsteins Satz ist zwar berühmt und bekannt, aber anscheinend wird er nicht Ernst genommen und eher als ein Bonmot des großen Meisters abgetan [1]. Man beachte, dass seine Äußerung nicht etwa aus der Anfangszeit der Photonen stammt. Die Quantenelektrodynamik war längst geboren.

Worin besteht denn aber das Problem bei unseren Zitaten (die sehr typisch sind)? Dass sie nicht nur nahelegen, sondern eindeutig sagen, dass ein Photon aus der Reaktionszone im Innern der Sonne zur Oberfläche gelangt. „Ein“ Photon bedeutet nach allgemeinem Konsens über die Bedeutung der Formulierung: Ein Photon

tritt seine Reise an und dasselbe Photon, dasselbe Individuum, kommt nach 100 000 Jahren in der Nähe der Oberfläche der Sonne an. Von der Vorsicht und den Vorbehalten der Quantenelektrodynamiker ist nichts beim Volk angekommen. Man hätte es gern, dass das Photon ein kleines Wesen ist, und so macht man es zum kleinen Wesen.

Die Sätze sollten einen schon deshalb zweifeln lassen, weil die Zahl der Photonen, die an der Sonnenoberfläche ankommen, ungefähr 3000-mal so groß ist wie die, die die Reise antreten.

Niemand scheint übrigens auf die Idee zu kommen, die Wärmeleitung in einem Kupferstab entsprechend zu beschreiben: Man würde dann sagen, dass ein Phonon, das sich mit Schallgeschwindigkeit bewegt, eine Minute braucht, um den 30 cm langen Wärmeleiter zu durchqueren.

### Herkunft

Der fotoelektrische Effekt scheint zu zeigen, dass Licht aus Teilchen besteht, und unter einem Teilchen versteht man ein Individuum. Diese Betrachtungsweise ist verführerisch eingängig. Alle Warnungen, weder die von Einstein noch die der Bücher zur Quantenelektrodynamik, scheinen auf taube Ohren zu stoßen.

Wir tragen immer noch die Fesseln des mechanistischen Weltbildes, das bis zum Ende des 19. Jahrhunderts so gute Dienste geleistet hat, mit uns herum. Totgeglaubte leben länger. In etwas allgemeinerer Form begegnet uns die Auffassung als eine Haltung, die Wissenschaftstheoretiker als Reduktionismus bezeichnen. Man glaubt, dass die Beschreibung der Welt einfacher wird, oder dass man besser versteht, wie der liebe Gott die Welt gemacht hat, wenn man die wahrnehmbaren Erscheinungen durch Atome beschreibt, die Atome durch Protonen, Neutronen und Elektronen, die Protonen und Neutronen durch Quarks, etc. ad infinitum.

Ab und zu beteuert man zwar, es handle sich hier nur um ein Modell, das Teilchen-Modell, aber das ist wohl eher nur ein Lippenbekenntnis. Denn wenn man davon überzeugt wäre, dass es nur ein Modell ist, so würde man anders von den Photonen sprechen. Ein Modell heißt immer: „Es ist so wie ...“, zum Beispiel wie ein Körperchen. Tatsächlich gibt es ja Situationen, Prozesse, Zustände, in denen sich die Strahlung wie aus Körperchen bestehend verhält, auch wenn diese nicht zu häufig sind.

Die Vorstellung, die Welt bestehe aus kleinen Individuen, scheint beruhigend zu sein: Es ist im Kleinen wie im Großen, d.h. wie in der Welt der alltäglichen menschlichen Erfahrung.

Manch einem Physiker scheint auch das Verständnis dafür abhandengekommen zu sein, was man einem

Neuling, einem, der die Physik lernen will, zumuten kann. Es scheint unterstellt zu werden, die herumflitzenden Individuen sind das Einzige, was für die Erklärung der physischen Welt akzeptabel ist. Tatsächlich hat aber der Unindoktrinierte gar nicht das Problem, das der Physiker unterstellt: Er hat kein Problem damit, von einer Wolke zu sprechen, die sich am Himmel bewegt, und er findet es natürlich, dass, wenn man die Wolkenbewegung lange genug verfolgt, die ursprüngliche Wolke nicht mehr existiert, und sich stattdessen eine andere gebildet hat. Er hat kein Problem mit dem Begriff Individuum und der Nichtunterscheidbarkeit. Das wird ihm durch eine gewisse Lehrtradition erst eingeredet.

### Entsorgung

Um den Energietransport in der Sonne zu beschreiben, muss man nicht unbedingt die Quantenelektrodynamik bemühen. Aber man sage zumindest, dass Absorptions- und Emissionsprozesse stattfinden, sodass nicht die Idee von sich hindurchdrängelnden Individuen entsteht. Man weise darauf hin, dass derselbe Prozess in der Troposphäre stattfindet und zur Abkühlung der Erde beiträgt, nur ins Infrarote übersetzt.

Man weise auch darauf hin, dass die gewöhnliche Wärmeleitung von ganz ähnlicher Art ist, nur mit Phononen statt Photonen. Dabei lernt man gleich zweierlei: etwas über die Photonen und etwas über die Phononen.

Für viele Zwecke würde es aber reichen zu sagen, dass eine Temperaturstörung im Innern der Sonne 100 000 Jahre braucht, um sich an der Oberfläche der Sonne auszuwirken. Oder man sagt es genauer: Der Energietransport geschieht mit elektromagnetischer Strahlung. Man erklärt, dass es sich um Strahlung handelt, die nahezu im thermodynamischen Gleichgewicht ist, also Schwarzkörperstrahlung; dass deren Temperatur von innen nach außen abnimmt; dass der Temperaturgradient sehr klein ist, dass er es aber ist, der den Strom verursacht; dass der Transport dissipativ ist; dass auf dem Weg die Entropie um einen Faktor 3 000 zunimmt (gleich dem Verhältnis der Temperaturen).

Wenn man es unbedingt in Photonen ausdrücken will: Die werden absorbiert und neue werden emittiert usw. Aber man mache sich keine Illusionen. Zu sagen, dass sie sich von einem Atom zum anderen bewegen, ist schon leichtsinnig.

Und wenn es einem gerade in den Kram passt, kann man auch eine kleine Bemerkung wissenschaftstheoretischer Art machen. Man erklärt, was eine Theorie ist: eine mathematische Beschreibung der Welt. Und dass eine Theorie nicht falsch oder richtig ist, sondern nur für einen gegebenen Zweck mehr oder weniger passend.

## Weisse Zwerge, Teil 1: Druck- oder Kräftegleichgewicht?

[1] Albert Einstein schrieb 1951 in einem Brief an seinen Freund Michele Besso: „Die ganzen 50 Jahre bewusster Grübelei haben mich der Antwort der Frage „Was sind Lichtquanten“ nicht näher gebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich ...“

### 10.3 Weisse Zwerge, Teil 1: Druck- oder Kräftegleichgewicht?

#### Gegenstand

- 1 „Die klassische Teilchenbewegung reicht nicht aus, um der Gravitation das Gleichgewicht zu halten.“
- 2 „In einem Hauptreihenstern erzeugt die thermische Energie  $E_{\text{kin}} = (3/2) kT$  der von allen Elektronen entblößten Kerne einen Druck, der dem Gravitationsdruck standhalten kann.“
- 3 „Der vom entarteten Elektronengas erzeugte Druck  $p$  – es gilt  $p = dE/dV$  – hält hier dem Gravitationsdruck das Gleichgewicht.“
- 4 „Die eingesperrten Elektronen üben eine Kraft nach außen aus, die der Gravitationskraft das Gleichgewicht hält.“

#### Mängel

Wahrscheinlich weiß jeder was gemeint ist. Schwierig wird es aber, wenn man versucht, die Aussagen in Einklang zu bringen mit dem, was einem aus dem Mechanikunterricht im Gedächtnis geblieben ist. Gehen wir ein Zitat nach dem anderen durch.

Die Bewegung hält der Gravitation das Gleichgewicht? Bei Gleichgewichten, egal ob thermisch, mechanisch oder chemisch, haben sich immer die Werte einer physikalischen Größe an zwei Teilsystemen angeglichen: zwei Temperaturen, zwei Kräfte, ...

Aber hier: Welche Größe hat hier zweimal denselben Wert?

Dann: Die Bewegung ist ein Vorgang, die Gravitation eher eine Erscheinung. Wie können die sich das Gleichgewicht halten? Oder ist mit Gravitation die Gravitationskraft gemeint? Welches ist dann der Körper, auf den sie wirkt?

Zum zweiten Zitat: Die thermische Energie erzeugt einen Druck? Eine physikalische Größe erzeugt also eine andere. Kann vielleicht eine Geschwindigkeit auch mal eine Temperatur, oder Energie Impuls erzeugen? Es geht noch weiter: Der so erzeugte Druck hält dem Gravitationsdruck stand. Wie das? Ist er gleich groß, oder vielleicht gerade das Negative des Gravitationsdrucks?

Aber wie auch immer, was ist denn mit dem Gravitationsdruck gemeint?

Im dritten Zitat hält der vom entarteten Elektronengas erzeugte Druck (Hoppla! Erzeugt das Gas einen eigenen Druck? Erzeugt die Luft auch den Luftdruck? Erzeugt sie vielleicht auch ihre eigene Temperatur? Na ja, es war wohl einfach gemeint: Der Druck des entarteten Elektronengases) hält dem Gravitationsdruck das Gleichgewicht. Ja, es scheint so gemeint zu sein, nicht Kräftegleichgewicht, sondern Druckgleichgewicht.

Im vierten Zitat lernen wir: Es sind tatsächlich Kräfte, die sich das Gleichgewicht halten. Aber ganz einfach ist es auch hier nicht: Die Elektronen üben eine Kraft nach außen aus, d.h. jedes Elektron übt ... eine Kraft nach außen aus? Wirklich? Nach außen heißt doch: nach rechts und links, nach oben und unten, nach vorn und hinten. Das ist doch nicht eine Kraft, sondern es sind mindestens sechs. Die Gravitationskraft scheint klarer zu sein, die kommt ja irgendwie aus dem Sterninnern, und zieht das Elektron nach unten. Es bleibt die Frage, wie die sechs Kräfte des Elektrons damit fertig werden.

Was machen nun die, für die diese Texte geschrieben sind? Ganz einfach: Man spricht im Bedarfsfall (in der Prüfung) das Unverstandene einfach nach. Man hat sich ohnehin damit abgefunden, dass man die Physik nicht versteht.

#### Herkunft

Die Mechanik ist schwierig. Offenbar nicht nur für die Schülerinnen und Schüler.

#### Entsorgung

Zum Druckgleichgewicht: Man hat einen geschlossenen Zylinder (Abb. 10.1), in dem sich ein Kolben hin- und herbewegen kann. Wenn man den Kolben nicht festhält, stellt er sich so ein, dass auf beiden Seiten derselbe

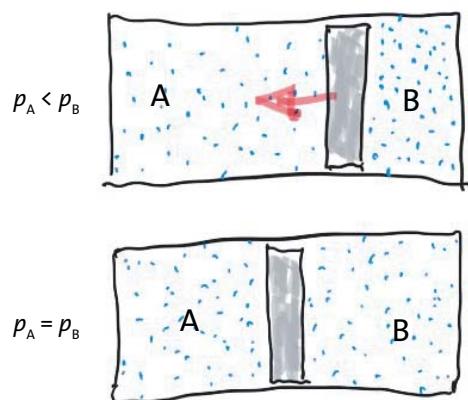


Abb. 10.1 Zwischen Teilsystem A und Teilsystem B stellt sich das Druckgleichgewicht ein.

Druck herrscht. Es stellt sich Druckgleichgewicht zwischen rechts und links ein.

Will man mit dem Druckgleichgewicht argumentieren, so muss mindestens das den Schülerinnen und Schülern bekannt sein. Dann kommt aber das Problem: Welches sind hier die beiden Behälter, deren Volumen sich ändern können? Also argumentiert man wohl lieber nicht mit dem Druckgleichgewicht.

Und zum Kräftegleichgewicht: Kräftegleichgewicht herrscht, wenn auf einen Körper zwei (oder mehr) Kräfte wirken, die sich zu null addieren. Im vorliegenden Fall könnte man die Kräfte auf eine Stoffportion in einem kleinen Raumbereich betrachten. Die eine davon ist die Gewichtskraft (Gravitationskraft), die andere berechnet sich aus der Druckdifferenz zwischen Ober- und Unterseite der Stoffportion, den Schülern längst bekannt als Auftriebskraft. Daran hätte man vielleicht erinnern können.

Wie wäre also die Entsorgung? Man kann es ordentlich machen, aber man überlege sich, ob es den Aufwand lohnt. Schließlich hätte man dieselbe Überlegung für das Innere der Erde anstellen können, aber das macht man natürlich nicht.

## 10.4 Weiße Zwerge, Teil 2: Erklärungsrituale

### Gegenstand

Wenn ein Schulbuch etwas, aber nicht viel, zum Thema „Weißen Zwerg“ sagen will, sieht das etwa so aus: „**Ist die Masse des Sterns nicht größer als zwei Sonnenmassen, so wird ein weißer Zwerg mit einem Radius mit etwa  $10^7$  m entstehen.** Der weiteren Verdichtung durch die Gravitation wirkt entgegen, dass das Pauliprinzip Protonen, Elektronen und Neutronen verbietet, gleichzeitig am selben Ort einen identischen Quantenzustand zu besitzen. Teilchen (in diesem Fall hauptsächlich Elektronen) wären gezwungen, höhere Energiezustände einzunehmen. Dieser Umstand wirkt einer weiteren Kompression entgegen. Man spricht von entarteter Materie.“

Manche Schulbücher machen es ausführlicher, etwa auf einer halben Seite, und verwenden dazu unter anderem die folgenden Begriffe:

- Potenzialtopf
- Quantisierung der Energie
- Boltzmann-Verteilung
- entartetes Elektronengas
- Fermionen
- Pauli-Prinzip
- Spineinstellung

### Mängel

- 1 Das Ziel scheint in jedem Fall zu sein, zu erklären, warum der Weiße Zwerg nicht kollabiert. Nun ist der Grund dafür, dass er das nicht tut, derselbe wie der, dass die Erde nicht kollabiert oder dass feste und flüssige, also kondensierte Materie hart ist. Über den quantenmechanischen Grund dafür, dass kondensierte Materie auf der Erde nur schwer komprimierbar ist, verliert man gewöhnlich kein Wort. So entsteht der Eindruck: Der Weiße Zwerg ist etwas Ungewöhnliches, Schwieriges; er ist ohne Quantenmechanik nicht zu verstehen; die Physik, die wirksam ist, ist nicht dieselbe wie die auf der Erde.
- 2 Dabei hat der Weiße Zwerg eine interessante Eigenschaft, in der er sich sehr deutlich von den Objekten unserer irdischen Erfahrung unterscheidet, die aber keiner Bemerkung oder Begründung Wert zu sein scheint: Wenn man ihm Materie zuführt, so wird er nicht größer, sondern kleiner. Das hat weniger mit Quantenphysik zu tun, als mit der gewöhnlichen klassischen Gravitation.

### Herkunft

Die Beschreibung wird aus der Fachliteratur bzw. dem Hochschulphysikbuch übernommen. Dort ist der Aufwand erforderlich, denn dort ist das Ziel, die Chandrasekar-Grenze zu berechnen. Dazu braucht man zwei Zutaten: Die Zustandsgleichung und das Gravitationsgesetz. Beides zusammen führt zu einer Differenzialgleichung, der Lane-Emden-Gleichung, die nicht ganz leicht zu lösen ist. Nun kann man die Zustandsgleichung, die eigentlich recht einfach ist, da sie die Temperatur nicht enthält, und daher nur noch den Zusammenhang zwischen Druck und Massendichte beschreibt, nicht direkt messen, denn dazu brauchte man Drücke, die man in keinem Labor herstellen kann. Man muss sie also berechnen, und das erfordert den zitierten Aufwand.

Nun werden aber im Schulunterricht die quantenmechanischen Parafernalien aufgefahren, obwohl die Zustandsgleichung dann weder berechnet noch angegeben wird. Das wäre wohl auch nicht gerade angebracht.

Es ist ein Beispiel dafür, wie die Schulphysik etwas aus der Fachphysik übernimmt, und dabei die Frage nach dem Lernziel aus den Augen verliert. Ohne die Frage zu stellen: Was von dem, was die Fachwissenschaft liefert, wollen wir zum Allgemeinbildungsgut erklären? So entsteht etwas, das man treffend als Lernritual bezeichnen könnte.

### Entsorgung

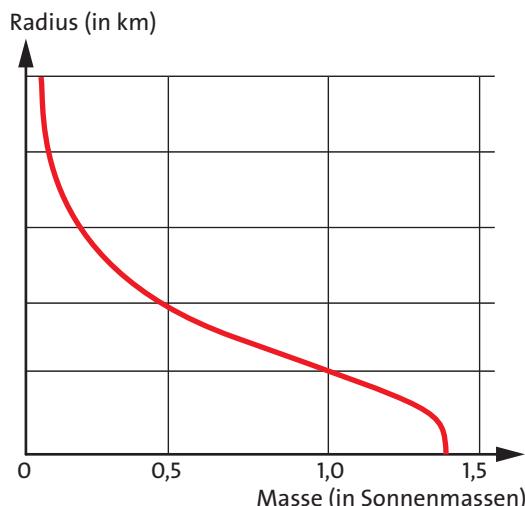
Man erklärt als Erstes, dass man feste Körper oder Flüssigkeiten beliebig komprimieren kann, wenn man nur

## Weisse Zwerge, Teil 2: Erklärungsrituale

den Druck genügend hoch macht – ein Sachverhalt, der nicht wirklich überraschend ist. Genügend hohe Dru-cke entstehen, wenn man einen kompakten Himmels-körper immer schwerer macht. Das geschieht bei man-chen Weißen Zwergen: Sie bekommen nach und nach Materie von einem Partnerstern, mit dem sie ein Dop-pelsternsystem bilden.

Unsere normale Erfahrung ist nun: Wenn man auf einen Haufen Sand weiteren Sand schüttet, so wird der Haufen höher. Der Weiße Zwerg verhält sich anders. Wenn Materie hinzukommt, sackt die Materie zusam-men. Sie nähert sich dem Zentrum, und dabei nimmt die Gravitationsfeldstärke und damit die Gravitations-kraft zu, und zwar so stark, dass der ganze Stern schrumpft. Beim Sandhaufen kann das nicht passieren, denn die Gravitationskraft kommt praktisch nur von der Erde. Der Sandhaufen und dessen Größe spielen für sie keine Rolle, da er klein ist gegen die Erde als Ganzes.

Abb. 10.2 zeigt, wie der Radius eines Weißen Zwer-ges mit zunehmender Masse abnimmt, und wie der Stern schließlich sogar zusammenstürzt. Das Zusam-menstürzen endet, wenn die Atomkerne sich berühren.



**Abb. 10.2** Radius eines Weißen Zwerges als Funktion seiner Masse

Man kann es auch so sagen: Wenn der sonnenartige Stern zum Weißen Zwerg wird, kondensieren die Ato-me. Wenn der Weiße Zwerg zum Neutronenstern wird, kondensiert die Kernmaterie. Die Kernmaterie ist sehr viel härter als die des Weißen Zwerges (und der Erde).

Man kann auch erwähnen, dass das Verhalten im Einzelnen durch die Zustandsgleichung  $\rho(p)$  bestimmt ist, d. h. einer Erweiterung des Hooke'schen Gesetzes. Aber all das bitte ohne Pauli, Fermi & Co.

# 11 ATOM-, KERN- UND QUANTENPHYSIK

## 11.1 Bilder des Atoms

### Gegenstand

Unser Gegenstand ist ein nicht nur jedem Physiker vertrautes Bild, das wir aber hier aus Gründen, die gleich klar werden, nicht zeigen wollen. Es ist das Bild eines Atoms: Der Kern als kleines rundes Gebilde ist umgeben von mehreren Ellipsen — den Elektronenbahnen —, auf denen manchmal weitere kleine runde Gebilde, die Elektronen selbst, zu erkennen sind.

### Mängel

Ein Bild sagt mehr als tausend Worte. Es prägt sich leichter ein als eine verbale oder mathematische Beschreibung eines Gegenstandes. Bilder sind außerordentlich wichtige Werkzeuge für uns Lehrer. Weil sie sich so leicht einprägen, können Bilder aber manchmal auch einen beabsichtigten Lernprozess behindern. Sie tun das, wenn sie etwas falsch wiedergeben, oder anders, als es unserer Absicht entspricht. Es sind Bilder, die nicht wir ausgesucht haben, sondern die in der Welt herumspuken und sich selbst vermehren. Sie können so aufdringlich sein, dass sich ihnen niemand entziehen kann, dass sogar derjenige, der ihre unerwünschte Wirkung kennt, ihrer Suggestivkraft erliegt. Ein Beispiel ist das angesprochene Bild des Atoms, das bekanntlich dem Bohr'schen Atommodell entspricht. Es kann einem begegnen in populärwissenschaftlichen Büchern und Zeitschriften, oder in Bronze gegossen als Logo am Hauptportal einer Firma, es wird reproduziert in Millionenauflagen von Briefmarken und Geldscheinen, und man findet es auch erstaunlich oft in physikalischen Fachzeitschriften.

Vorzuwerfen ist dieser Darstellung des Atoms, dass es, seit es die Quantenphysik gibt, nicht mehr unserer Vorstellung vom Atom entspricht. Man verbringt schließlich einen nicht unerheblichen Teil des Unterrichts oder der Vorlesung damit, zu zeigen, welches die Schwächen dieses Bildes sind, und warum es durch ein anderes ersetzt werden muss. Es hat sich zu diesem Zeitpunkt aber schon so in den Köpfen der Lernenden festgesetzt, dass unseren

Bemühungen nur ein begrenzter Erfolg beschieden ist. Ja, bei vielen Studenten und Schülern ist das, was nach langerer Zeit noch hängen bleibt, nur noch das Bohr'sche Planetenmodell des Atoms.

### Herkunft

Das Bild ist entstanden mit der Einführung des Atommodells von Rutherford und Bohr. Aber nach weniger als 20 Jahren, nämlich als Schrödinger (und Heisenberg, Born und Jordan) die Quantenphysik erfunden hatten, war es bereits obsolet.

Nun ist das erste erfolgreiche Modell gegenüber späteren Modellen immer im Vorteil. Was später kommt, hat es immer damit zu tun, den Vorgänger zu verdrängen. Das hat aber in der Physik nur selten funktioniert.

### Entsorgung

Das Bohr'sche Atommodell und die dazu passenden Bilder sind ein hochinteressantes Thema der Geschichte der Physik. Im Physikunterricht aber sind sie kontraproduktiv. Gegen das Bild der auf Ellipsenbahnen herumfliegenden Körperchen kann man nur versuchen, mit Gegenbildern anzukommen, die noch schöner und suggestiver sind, etwa bunte, vielleicht auch animierte Darstellungen der Psi-Quadrat-Verteilungen.

## 11.2 Das Schalenmodell

### Gegenstand

Zur Erklärung bestimmter Eigenschaften der Atome, wie etwa der Periodizität von Atomradien und Ionisierungsenergien mit zunehmender Ordnungszahl, zieht man gern das Schalenmodell des Atoms heran. Um die Existenz der Schalen zu untermauern, wird oft  $r^2 \cdot \rho(r)$ , d.h. die mit  $r^2$  multiplizierte Elektronendichte  $\rho$  eines Vielelektronenatoms als Funktion des Abstands  $r$  vom Kern dargestellt. Diese Darstellung zeigt auch, „dass die Wahrscheinlichkeit, ein Elektron im Atomkernbereich anzutreffen, ... äußerst gering ...“ ist.

## Das Schalenmodell

### Mängel

Während die Elektronendichte selbst vom Kern ausgehend nach außen hin monoton abnimmt, Abb. 11.1a, ist die in vielen Lehrbüchern dargestellte Funktion  $r^2 \cdot \rho(r)$  am Ort des Kerns Null, wächst dann mit zunehmendem  $r$  und geht über mehrere Maxima schließlich wieder gegen Null, Abb. 11.1b.

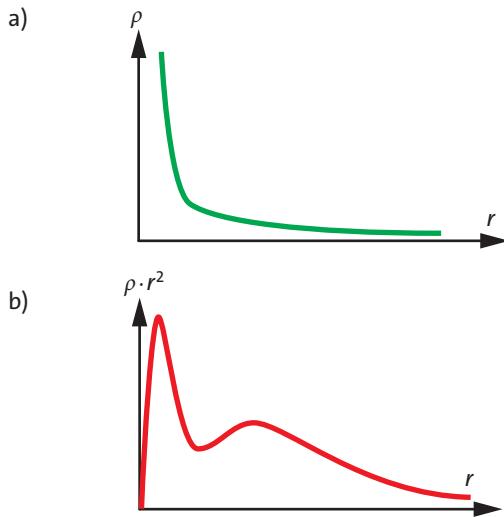


Abb. 11.1 (a) Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichter als Funktion des Abstands vom Atomkern; (b) Aufenthaltswahrscheinlichkeit pro Radius-Intervall

Was in Abb. 11.1b dargestellt ist, ist nicht die gewöhnliche räumliche Dichte, also Aufenthaltswahrscheinlichkeit durch Volumen, sondern die Aufenthaltswahrscheinlichkeit durch  $r$ -Intervall. In manchen Büchern wird darauf hingewiesen, dass dieser Trick verwendet wird, in anderen nicht. Es ist aber in jedem Fall kaum zu vermeiden, dass diese Funktion für die Dichte selbst gehalten wird. Unsere Erfahrung mit Physikstudenten an der Universität hat gezeigt, dass sich dieses Bild stark einprägt, und dass man den Funktionsverlauf von Abb. 11.1b für die Elektronendichte selbst hält. Insbesondere bleibt wohl im Gedächtnis, dass die Elektronendichte am Ort des Kerns Null ist, und dass es schalenförmige Bereiche gibt, an denen die Elektronendichte besonders hoch ist.

Dass man den Lernenden durch eine solche Darstellung fehleiten kann, sieht man am folgenden Beispiel. Es soll die Dichteverteilung des Glases einer massiven Glaskugel dargestellt werden. Abb. 11.2a zeigt die Massendichte  $\rho(r)$  und Abb. 11.2b die Funktion  $r^2 \cdot \rho(r)$ . Man sieht Abb. 11.2a sicher besser als Abb. 11.2b an, dass die Kugel eine homogene Dichteverteilung hat.

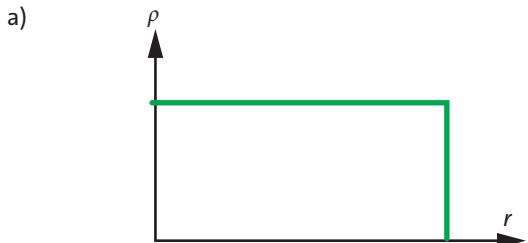


Abb. 11.2 (a) Dichte einer homogenen Glaskugel als Funktion des Abstands vom Mittelpunkt; (b) Masse pro Radius-Intervall

Die schlimmste Version der Irreführung haben wir in einem Oberstufenlehrbuch gefunden, in dem die Funktion  $r^2 \cdot \rho(r)$ , die ja aus einer dreidimensionalen Verteilung durch Integration über zwei Dimensionen entstanden ist, wieder dreidimensional aufgetragen wurde: In einer perspektivischen Darstellung wurden die bei der Integration entstandenen Maxima als dreidimensionale Schalen dargestellt.

Die Aussage, derzu folge es sehr viel unwahrscheinlicher ist, ein Elektron im Bereich des Kerns anzutreffen als weiter außen, ist von derselben Art wie etwa die folgende: Es ist viel wahrscheinlicher, einen Lottogewinner in den neuen Bundesländern anzutreffen als in Frankfurt am Main. In der Statistik spricht man in diesem Zusammenhang von einer verzerrten Stichprobe [1].

### Herkunft

Offenbar waren manche Physiker nicht damit zufrieden, dass sie ein Modell gefunden hatten, das vieles gut erklärt. Sie wollten die Schalen in der räumlichen Dichteverteilung sehen. Außerdem schien es sie zu stören, dass die Elektronendichte am Ort des Kerns ihr Maximum hat.

### Entsorgung

Die Darstellung von  $r^2 \cdot \rho(r)$  liefert keine wichtige Ein- sicht, aber sie erzeugt falsche Vorstellungen. Man ersetze sie durch die Darstellung von  $\rho(r)$ .

[1] W. Krämer, *So lügt man mit Statistik*, Piper, 2001, S. 97

## 11.3 Das leere Atom

### Gegenstand

Aus der Tatsache, dass der Atomkern im Vergleich zur Atomhülle klein und schwer ist wird der Schluss gezogen, dass der größte Teil des Atoms leer sei. Die Elektronen werden als punktförmig angenommen (was nicht immer explizit ausgesprochen, aber gewöhnlich unterstellt wird). Von dem Platz, den das Atom besetzt, wird nur der winzige Anteil, der dem Kernvolumen entspricht, von Materie eingenommen: „Ein Atom besteht somit zum größten Teil aus leerem Raum, der von einem winzigen Kern und von Elektronen bevölkert ist.“

### Mängel

- Man kann eine solche Aussage zwar vertreten, sollte sich aber klar darüber sein, dass es vom verwendeten Modell abhängt, ob sie falsch oder richtig ist. Sie ist richtig, wenn man sich das Elektron als kleines Individuum vorstellt, mit der merkwürdigen Eigenschaft, dass es sich bewegt, ohne eine Bahn zu durchlaufen. Um dieses Verhalten zu beschreiben, wurde der Begriff der Aufenthaltswahrscheinlichkeit eingeführt. Man kann sich aber vom Elektron auch ein ganz anderes Bild machen: Es nimmt den Raum ein, den seine Zustandsfunktion einnimmt. Im Fall etwa des Wasserstoffatoms ist das Elektron nach diesem Modell so groß wie das ganze Atom; das Atom verdankt seine Größe dem Elektron. Das Atom ist dann durchaus nicht leer, sondern von einem Stoff sehr geringer Massendichte erfüllt.
- Wenn man sich für das Modell des punktförmigen Elektrons entschieden hat, so wäre es konsequent, dasselbe Modell auch auf den Kern anzuwenden. Dieser besteht bekanntlich aus Protonen und Neutronen, und diese wiederum bestehen aus Quarks. Die Quarks können nun mit demselben Recht als punktförmig angenommen werden, wie die Elektronen (und die anderen Leptonen). In diesem Fall bestünde das Atom nicht nur zum größten Teil aus leerem Raum, sondern ganz und gar, ja die ganze Welt bestünde nur aus leerem Raum. Die Nützlichkeit dieser Aussage ist sicher fragwürdig. Außerdem ist von dem, was man ursprünglich sagen wollte, nichts mehr übrig geblieben.

### Herkunft

Das Bild, das hinter der Aussage steht, ist: Die Hülle besteht aus punktförmigen Körperchen, der Kern ist eine Art kompaktes Fluidum. Dies war, bevor man die Quarks kannte, die etablierte Auffassung.

### Entsorgung

Was man wollte, war doch nur, einer recht schlichten Tatsache Ausdruck verleihen: Dass die Masse des kleinen Kerns viel größer ist als die der großen Hülle. Das kann man aber auch sagen, ohne den problematischen leeren Raum heranzuziehen. Man sollte aber nicht aus den Augen verlieren, dass der Kern im Vergleich zur Hülle vor allem dann so schlecht weggkommt, wenn man die Massen vergleicht. Die Masse ist aber nur eine von mehreren extensiven Größen. So ist die elektrische Ladung der Hülle nicht mehr klein gegen die des Kerns. (Die mittlere Ladungsdichte ist es aber noch.) Auch die Drehimpulse von Kern und Hülle sind von derselben Größenordnung. Vergleicht man schließlich die magnetischen Momente, so kommt die Hülle sogar besser weg als der Kern.

## 11.4 Ununterscheidbarkeit von Teilchen

### Gegenstand

Wenn die Gesetze der Quantenstatistik hergeleitet werden, betont man, dass Teilchen identisch und ununterscheidbar sind:

- 1 „Zwei Teilchen nennt man identisch, wenn das Ergebnis der Messung einer beliebigen Größe oder Observable des Systems invariant gegenüber einer Teilchenvertauschung ist. Man sagt dann auch, die Teilchen seien ununterscheidbar.“
- 2 „Zwei Teilchen heißen identisch, wenn alle inneren Eigenschaften (Masse, Spin, Ladung, usw.) exakt übereinstimmen: Es gibt kein Experiment, mit dem man die Teilchen voneinander unterscheiden könnte. Alle Elektronen des Universums sind also identisch, ebenso alle Protonen oder alle Wasserstoffatome.“

### Mängel

Ich hatte bei der Aussage, zwei Teilchen seien identisch oder ununterscheidbar immer ein merkwürdiges Gefühl: Handelt es sich um eine Trivialität oder um eine nur den Objekten der Quantenwelt eigenen, schwer verständlichen Besonderheit? Dass diese Aussagen nicht leicht in den Kopf hineingehen, hat wohl zwei Ursachen.

- Die beiden Teilchen, die angeblich ununterscheidbar sind, kann man sehr wohl unterscheiden. Stellen wir uns zwei Elektronen vor, eins befindet sich an einem Ort  $r_l$  (links), eins am Ort  $r_r$  (rechts). Gewiss, sie sind in fast jeder Hinsicht gleich: gleiche Masse, gleiche

## Ununterscheidbarkeit von Teilchen

Ladung, gleicher Spin, gleicher Anregungszustand, und was sie noch für Eigenschaften haben mögen. (Man sagt auch, sie stimmen in ihren „inneren“ Eigenschaften überein.) Aber in einem Merkmal unterscheiden sie sich eben doch: im Ort. Das eine befindet sich am Ort  $r_1$ , das andere am Ort  $r_2$ . Man kann sie also unterscheiden.

Tatsächlich geht es in der statistischen Physik gar nicht um die Ununterscheidbarkeit von Teilchen, sondern um die von Zuständen. Wir betrachten wieder unsere beiden Elektronen. Wir betrachten also einen Zustand, in dem sich ein Elektron am Ort  $r_1$  befindet, und eins am Ort  $r_2$ . Wir bringen nun das linke Teilchen an den Ort  $r_2$  und das rechte an den Ort  $r_1$ . Der Zustand, den wir damit erhalten haben, ist von dem alten Zustand nicht zu unterscheiden, er ist mit dem alten Zustand identisch, und zwar auch im Sinne der Umgangssprache [1]. In jedem der bei-

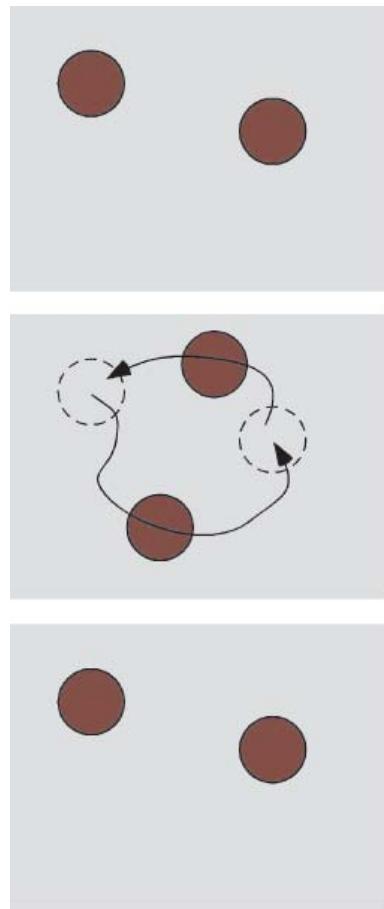
den Zustände können wir aber die jeweiligen Teilchen voneinander unterscheiden: das eine befindet sich links, das andere rechts.

Es ist ganz ähnlich wie im folgenden „Experiment“: Wir erzeugen mit einem Zeichenprogramm auf dem Bildschirm zwei ausgefüllte Kreise desselben Radius und derselben Farbe, Abb. 11.3a. Wir bewegen nun die Kreise mit Hilfe der Maus auf dem Bildschirm herum, Abb. 11.3b, und stellen schließlich das alte Bild wieder her, Abb. 11.3c. Bei der Operation haben wir aber die beiden Kreise gegeneinander vertauscht. Das Bild, das wir erhalten, Abb. 11.3c, ist ununterscheidbar von dem Ausgangsbild, Abb. 11.3a. Die beiden Kreise dagegen sind unterscheidbar. Sie unterscheiden sich in ihrer Positionen.

- Kann es denn aber wirklich sein, dass durch Vertauschung von zwei Teilchen derselbe Zustand entsteht? Sieht man es dem neuen Zustand nicht doch irgendwie an, dass er aus dem alten durch eine Vertauschung hervorgegangen ist? Man hätte das Problem nicht, wenn man nicht durch lange Übung in der klassischen Mechanik die Gewohnheit angenommen hätte, ein Teilchen als kleines Wesen zu betrachten, das außer durch die Werte von physikalischen Größen noch durch irgendetwas anderes charakterisiert ist, etwas das man vielleicht als seine Seele bezeichnen könnte. Diese Gewohnheit wird nun in der Quantenphysik nicht möglichst schnell abgelegt, sondern sie wird durch die Sprache, der sich die Quantenphysik bedient, weiterhin gehegt und gepflegt. Interessanterweise hat man das Problem zwar, wenn es um die Vertauschung von zwei Elektronen geht. Man hat es aber ganz und gar nicht, wenn man zwei Defektelektronen (Löcher) in einem Halbleiter gegeneinander vertauscht. Die Löcher wird man sich intuitiv nicht in demselben Sinne wie die Elektronen als Individuen vorstellen. Sie scheinen den Kreisen auf dem Computerbildschirm viel ähnlicher zu sein als die Elektronen.

## Herkunft

Die klassische Mechanik hat es mit individuellen Körpern zu tun. Das Konzept des Individuums passt auf ein physikalisches System, wenn dieses Eigenschaften hat, die es beibehält, und an denen man es zu anderen Zeitpunkten oder in anderen Umgebungen wiedererkennt. Bei den Eigenschaften, die das Individuum charakterisieren, denkt man bei Körpern aus unserer normalen Erfahrungswelt vor allem an die Form, und die Verteilung der Stoffe, aus denen sie bestehen. Wenn die Zahl der Freiheitsgrade des Systems aber immer kleiner wird, und schließlich nur noch eine Masse, ein Impuls, ein



**Abb. 11.3** Die dunklen Kreise auf einem Bildschirm werden mit der Maus so bewegt, dass der Kreis, der sich zunächst links befindet nach rechts kommt, und der rechte nach links.

Drehimpuls und ein Ort übrig bleiben, so zerrinnt uns der Begriff des Individuums gewissermaßen zwischen den Fingern. Man kann es auch so sagen: Der Begriff Individuum erlangt seine Berechtigung und seine Eindeutigkeit asymptotisch für eine große Zahl von Freiheitsgraden. Der aus der klassischen Mechanik stammende Begriff des individuellen Teilchens taugt also nicht als Grundbegriff der Quantenphysik.

### Entsorgung

Unsere Alltagssprache hat kein Problem damit, Dinge zu beschreiben, die keine Individuen im Sinne der klassischen Mechanik sind. Man denke etwa an eine Wolke am Himmel oder an eine Kerzenflamme. Ist die Wolke nach fünf Minuten noch dieselbe wie vorher, ist die Flamme nach fünf Sekunden noch dieselbe? Auf diese Fragen wird man vielleicht mit einem Achselzucken antworten. Man hat mit diesen Gegenständen einfach kein Problem.

In der Quantenphysik wäre schon viel getan, wenn man die Sprache, und damit natürlich das zu Grunde liegende Modell etwas ändert. So kann man etwa ein Elektron einführen als eine unteilbare Portion eines Stoffes, mit einer bestimmten Masse, einer bestimmten elektrischen Ladung und einem bestimmten Eigendrehimpuls. Wenn sich nun rechts eine solche Portion befindet und eine links, und man vertauscht sie, so fällt es sicher nicht mehr schwer einzusehen, dass der Zustand des Gesamtsystems derselbe ist wie vorher. Die Erwartung von etwas wie einer Seele stellt sich hier gar nicht erst ein.

[1] Duden, *Deutsches Universalwörterbuch*, Dudenverlag, Mannheim, 1989: identisch [...] völlig übereinstimmend; vollkommen gleich

## 11.5 Das eine und das andere Elektron

### Gegenstand

Der Hamiltonoperator eines Mehrelektronenatoms enthält die Koordinaten der einzelnen Elektronen:  $r_1$  gehört zu Elektron 1,  $r_2$  gehört zu Elektron 2, usw. Das Pauliprinzip verlangt, dass die Wellenfunktion solcher Mehrelektronensysteme antisymmetrisch ist: Bei Vertauschung von zwei Teilchenkoordinaten wechselt sie das Vorzeichen. Im Fall eines Zweielektronensystems, unter der Annahme, dass die Zweiteilchenwellenfunktion als Produkt von zwei Einteilchenwellenfunktionen geschrieben werden kann, hat man

$$\psi(1,2) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\psi_a(1)\psi_b(2) - \psi_a(2)\psi_b(1)]$$

Die 1 und die 2 stehen für die Koordinaten der beiden Elektronen, a und b stehen für die Zustände der beiden Elektronen.

### Mängel

Man sagt in diesem Zusammenhang, man habe es zu tun mit einem Elektron im Zustand a und einem im Zustand b (also etwa mit einem s- und einem p-Elektron).

Das klingt vertraut; so oder ähnlich liest es sich in dem Kapitel über Mehrelektronenatome in einem Physik- oder Chemiebuch. Es gibt hier aber eine Unstimmigkeit, und über die geht der Text elegant hinweg.

Das Problem taucht immer auf, wenn bei einem Mehrelektronensystem von einem Elektron gesprochen wird, also von Elektron 1, von Elektron 2, von einem 2s-Elektron, einem 3p-Elektron oder eine 4f-Elektron.

Die Sprache, die man benutzt, ist die, die man sonst gebraucht, wenn man von einem wohl definierten individuellen Gebilde spricht. Und jeder, der entsprechende Aussagen über das Elektron liest, interpretiert sie so: Elektron 1 ist das eine Teilchen, und Elektron 2 das andere — auch wenn man nicht sagen kann, wo sich die Teilchen genau befinden. Man lernt dann zwar, dass sie ununterscheidbar sind, was, wenn überhaupt, sicher nicht leicht zu verstehen ist. Aber wenn man es dann mal akzeptiert hat, so hat man eben zwei Elektronen 1 und 2 — zwar nicht unterscheidbar, aber trotzdem ist das eine Elektron 1 und das andere Elektron 2.

Nun das Problem: Kurz darauf ist wieder die Rede von mehreren Elektronen. Diesmal heißen sie a und b, oder 3d, 4f, usw. Man hat aber möglicherweise nicht bemerkt, dass die Elektronen 1 und 2 nicht identisch sind mit den Elektronen 3d und 4f. Dabei sprechen wir in beiden Fällen von demselben Atom im selben Zustand. Der Mathematik, die dazwischen liegt, sieht man durchaus an, was passiert ist, wie die Beziehung zwischen 1 und 2, und a und b ist. In der verwendeten Sprache schlägt sich diese Beziehung allerdings nicht nieder.

Tatsächlich ist man in einer ähnlichen Situation wie bei zwei gekoppelten Pendeln. Nennen wir sie mal Schwinger 1 und Schwinger 2. Man beschreibt die Lösung dann mit zwei Normalschwingungen a und b. Hier käme aber niemand auf die Idee, die beiden Normalschwingungen Schwinger a und Schwinger b zu nennen.

### Herkunft

Die Sprache ist die des Bohr'schen Atommodells: Da ist ein Elektron ein kleines Körperchen, das um den

## Auswahlregeln, verbotene Übergänge

Kern herum „kreist“. Zu dieser Vorstellung passt weder die so genannte Ununterscheidbarkeit der Teilchen, noch das Pauliprinzip. Nun war die Sprache aber da, die Idee vom Elektron als einem kleinen individuellen Körperchen hat sich in unseren Köpfen festgesetzt. Da musste man Unstimmigkeiten, die nur aus den durch die Sprache transportierten Modellen resultieren, in Kauf nehmen.

Die Vorstellung vom Elektron als Individuum ist übrigens nicht in jedem Fall schlecht: Je nach Zustand, in dem es sich befindet, kann sie asymptotisch beliebig gut werden.

### Entsorgung

Sie ist schwierig. Entweder müsste man eine Sprache verwenden, die nur die Mathematik abbildet, der also kein anderes Modell zu Grunde liegt und die daher unanschaulich ist. Oder eine Sprache, die auf einem Modell beruht, das etwas besser passt als das Bohr'sche Modell. Es wäre etwa die Sprache der Elektronenflüssigkeit, der Elektronenmaterie oder des Elektroniums. Danach ist ein Elektron nicht ein Individuum, sondern eine bestimmte Portion eines „Stoffes“: Eine Portion der Masse  $m_e$  und der Ladung  $e$ .

Natürlich ist auch dieses Modell nicht immer brauchbar: Es enthält nicht die Interferenz. Aber der Vorteil ist: Es enthält die Tatsache, dass ein Elektron eine bestimmte Ladung und eine bestimmte Masse hat und es erfordert keine unverständliche, ja eigentlich unzumutbare Erklärung, die Elektronen seien ununterscheidbar.

## 11.6 Auswahlregeln, verbotene Übergänge

### Gegenstand

Für das Verständnis des Atoms scheint der Begriff Auswahlregel wichtig zu sein. Was man darunter versteht, geht aus der folgenden, typischen Formulierung hervor: „Die Frequenzen aller Linien eines Spektrums lassen sich als Differenzen von wenigen Spektraltermen darstellen, die miteinander kombiniert werden. Allerdings treten nicht alle Kombinationen von Termen als Spektrallinien auf: Es gibt gewisse Übergangsverbote oder Auswahlregeln, deren wahre Bedeutung erst die Quantenphysik enthüllt.“

Wer bis zur Quantenphysik vordringt, erfährt dann die „wahre Bedeutung“: Es kann passieren, dass das Matrixelement für einen elektrischen Dipolübergang null wird, weil die beteiligten Wellenfunktionen eine bestimmte Symmetrie haben.

### Mängel

Die Auswahlregel  $\Delta l = \pm 1$  besagt, dass sich der Drehimpuls des Atoms bei einem Übergang, an dem ein Photon beteiligt ist, um  $\hbar$  ändern muss. Die Erklärung ist einfach: Photonen haben einen Drehimpuls vom Betrag  $\hbar$ . Die Auswahlregel  $\Delta l = \pm 1$  ist also Ausdruck der Drehimpulserhaltung.

Statt die Drehimpulserhaltung von vornherein zu berücksichtigen, erzeugt man nun die Erwartung, bestimmte Übergänge könnten schon deshalb stattfinden, weil der Energieerhaltungssatz befolgt wird. Dass sie tatsächlich nicht stattfinden, wird in eine zusätzliche, zunächst unverständliche Regel gepackt. Die Richtigkeit der Regel wird dann über die Berechnung von quantenmechanischen Matrixelementen, d.h. mit einem wohl unangemessen starken Werkzeug, bewiesen. Dass sie nichts weiter ist als Ausdruck eines weiteren Erhaltungssatzes, bekommt man, wenn überhaupt, nur am Rande mit.

Im Grunde ist aber gar nicht zu erwarten, dass ein gedachter Prozess schon deshalb ablaufen kann, weil der Energiesatz befolgt wird. Wäre das der Fall, so könnten – auch ohne Quantenphysik – die größten Wunder geschehen.

### Herkunft

Der mühevolle Entstehungsprozess der Quantenphysik hat überall seine Spuren hinterlassen. Die wichtigste Quelle für die Erkenntnisse der Atom- und Quantenphysik war die Spektroskopie. Regeln, die es gestatteten, Ordnung in das Wirrwarr der Spektrallinien zu bringen, waren bekannt, längst bevor es die Quantenphysik gab. Als Folge davon haben viele Begriffe und Methoden aus der vorquantenmechanischen Spektroskopie Eingang in Atomphysik und Quantenphysik gefunden. So erklärt sich auch die sonst in der Physik nicht übliche Sprechweise, ein Vorgang sei verboten, ein anderer erlaubt. Aufgrund der Regeln der Spektroskopie hatte man erwartet, dass man alle Terme miteinander kombinieren kann. Hätte man gleich gewusst, dass die Drehimpulserhaltung die Ursache ist, hätte man sicher nicht von einem Verbot gesprochen. In der klassischen Physik kommt es einem schließlich auch nicht in den Sinn, einen unmöglichen Vorgang zunächst in Betracht zu ziehen, und dann zu erklären, er sei verboten. Ein Vorgang läuft ab, weil er die Naturgesetze befolgt, und nicht, weil er irgendwelchen Verboten aus dem Weg geht.

### Entsorgung

Man sage von Anfang an, dass die Quantenzahl  $l$  ein Maß für den Drehimpuls des Atoms in Einheiten von  $\hbar$  ist. Da das Photon einen Drehimpuls von  $\hbar$  hat, muss

sich der Drehimpuls des Atoms bei der Absorption oder Emission eines Photons um  $\hbar$  ändern. Der Begriff Auswahlregel, der Bezug auf „Verbote“ und die damit zusammenhängende Geheimnistuerei wird überflüssig.

## 11.7 Der Bahnbegriff in der Quantenphysik

### Gegenstand

„Der Bahnbegriff verliert in der Quantenphysik seinen Sinn.“ Sehr oft in meinem Leben habe ich diesen Satz gelesen, und zwar in genau dieser Formulierung, kürzlich wieder in den Physikalischen Blättern.

### Mängel

Es ist nicht ganz klar, worin die Aussage dieses Satzes besteht. Meint er, dass der Bahnbegriff in dem Teil der Physik, der nicht Quantenphysik ist, einen Sinn hat? Welchen Sinn hat denn der Bahnbegriff in der Thermodynamik? Oder in der geometrischen Optik? Welchen Sinn hat er in der Wellenoptik? Ja, welchen Sinn hat er im täglichen Leben? Wer oder was sollte überhaupt eine Bahn haben? Welche Bahn hat eine Wolke, oder ein Geldbetrag, der überwiesen wird, oder die Daten, die im Internet übertragen werden? Dass der Bahnbegriff nicht nur manchmal, sondern meistens keinen Sinn hat, ist eine Selbstverständlichkeit.

Warum ist es also bemerkenswert, in der Quantenphysik verliere der Bahnbegriff seine Bedeutung? Weil man erst ein unpassendes Modell benutzt – das von den punktförmigen, individuell verfolgbaren Körpchen – und dann seine liebe Not damit hat, den Schaden wieder gutzumachen. Das Problem ist also hausgemacht. Betrachten wir einen Eigenzustand der Energie, etwa den Grundzustand des Wasserstoffatoms. Weder die Theorie noch das Experiment sagt etwas von Punktformigkeit. Weder die Theorie noch das Experiment sagt etwas von Bewegung. Wenn wir den Studenten die herumflitzenden Pünktchen nicht erst aufgeschwatzt hätten, so wäre auch das Dementi bezüglich der Bahn nicht nötig.

### Herkunft

Das Teilchenmodell, demzufolge das physikalische Geschehen zurückgeführt werden kann auf die Bewegung kleinster, individuell verfolgbarer Teilchen und deren Wechselwirkung untereinander, war bis zur vorletzten Jahrhundertwende außerordentlich erfolgreich. Dass man ein gut funktionierendes Werkzeug nicht einfach wegwirft, ist selbstverständlich. Nun ver-

suchte man aber, das Werkzeug auch dort noch zu benutzen, wo es untauglich war. Man bog es zurecht, bis es seine ursprüngliche Kraft und Schärfe verloren hatte. So entstand die unselige, für den gesunden Menschenverstand unannehbare Wahrscheinlichkeitsinterpretation.

Auch wenn wir Physiker es längst besser wissen, tragen wir doch unentwegt dazu bei, das nicht funktionierende Modell am Leben zu halten. So findet kaum eine Staatsexamensprüfung zur Atomphysik oder Quantenphysik statt, in der nicht nach dem Bohr'schen Atommodell gefragt wird. Und wenn der Student auch sonst nicht viel weiß – das Bohr'sche Atommodell kennt er, also gerade dasjenige Modell, von dem man später nachweist, es sei nicht ausreichend oder nicht tragfähig genug. Aber auch bei unzähligen anderen Gelegenheiten wird den Schülern und Studenten genau das suggeriert, was wir ihnen eigentlich austreiben wollten. Wie oft hört man die Behauptung, in der Umgebung des Atomkerns „bewegen sich“ oder „kreisen“ die Elektronen. Obwohl es in den meisten Lehrbüchern gar nicht so steht: Die falsche Aussage hört ein Student viel öfter als die richtige.

### Entsorgung

Zum einen halte man sich an das, was uns die Quantenphysik sagt, denn deren Zuverlässigkeit steht außer Frage. Zum anderen benutze man Modelle, die nicht selbst zur Ursache von Verständnisschwierigkeiten werden.

## 11.8 Aufenthaltswahrscheinlichkeit, Antreffwahrscheinlichkeit, Übergangs-wahrscheinlichkeit

### Gegenstand

Für den Ausdruck  $|\psi(x, y, z, t)|^2 dV$ , d. h. das Quadrat der Wellenfunktion  $\psi(x, y, z, t)$  eines Teilchens multipliziert mit dem Raumelement der Größe  $dV$ , werden unterschiedliche Bezeichnungen benutzt:

- 1 Aufenthaltswahrscheinlichkeit, d. h. die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich das Teilchen zum Zeitpunkt  $t$  im Raumelement  $dV$  an der Stelle  $(x, y, z)$  aufhält.
- 2 Antreffwahrscheinlichkeit, d. h. die Wahrscheinlichkeit dafür, bei einer Ortsmessung zum Zeitpunkt  $t$  das Teilchen im Raumelement  $dV$  an der Stelle  $(x, y, z)$  anzutreffen.

## Aufenthaltswahrscheinlichkeit, Antreffwahrscheinlichkeit, Übergangswahrscheinlichkeit

- 3 Übergangswahrscheinlichkeit, d. h. die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Teilchen bei einer Ortsmessung aus dem Zustand  $\psi(x, y, z, t)$  (mit unscharfem Ort) in einen Zustand mit dem (scharfen) Ort  $(x, y, z)$  übergeht.

Jede der drei Bezeichnungen entspricht einer etwas anderen Interpretation der Wellenfunktion.

### Mängel

#### 1. Aufenthaltswahrscheinlichkeit

Die Bezeichnung unterstellt, dass ein Teilchen, z. B. ein Elektron, punktförmig, oder mindestens sehr klein im Vergleich zu seinem „Aufenthaltsbereich“ ist, denn nur dann kann man seinen Ort durch drei Koordinaten beschreiben.

Wenn jemand sagt, eine Person P halte sich um 10 Uhr mit 50 % Wahrscheinlichkeit in ihrem Büro auf, so bringt er damit seine begrenzte Kenntnis über den Aufenthaltsort von P zum Ausdruck. Es besteht dabei kein Zweifel darüber, dass P tatsächlich irgendwo ist – entweder im Büro oder anderswo. Eine andere Interpretation lässt die Bezeichnung Aufenthaltswahrscheinlichkeit nicht zu, wenn man sich an die übliche Wortbedeutung hält. Wenn man das auch für ein Teilchen gelten lässt, so folgt, dass sich auch das Teilchen zu jedem Zeitpunkt an einem bestimmten Ort befindet. Die Orte müssen, bei einem im Wasserstoffatom gebundenen Elektron, so verteilt sein, dass sich im Mittel die kugelsymmetrische Gestalt des Atoms ergibt. Wenn das der Fall wäre, so wären aber verschiedene fundamentale physikalische Gesetze verletzt. Nicht nur, dass das Elektron elektromagnetische Strahlung emittieren müsste (was man bekanntlich durch das erste Bohr'sche Postulat kurzerhand für unzutreffend erklärt) – es wären auch Impuls- und Drehimpulserhaltungssatz verletzt. Denn wenn diese Erhaltungssätze gelten, kann ein punktförmiges Elektron nur eine Kepler-Bahn beschreiben und das Atom würde im Mittel flach erscheinen.

Die Bezeichnung Aufenthaltswahrscheinlichkeit und das damit verbundene Modell ist also nicht sehr passend. Eigentlich verdient die Idee gar nicht den Namen Modell, denn von einem Modell kann man erwarten, dass es Schlüsse zulässt, die sich, in die Welt des realen, modellierten Systems zurückübersetzt, als korrekt erweisen.

#### 2. Antreffwahrscheinlichkeit

Die Bezeichnung „Antreffwahrscheinlichkeit“ versucht zu vermeiden, eine Aussage über den Ort des Teilchens zu machen, bevor eine Ortsmessung stattgefunden hat. Es ist so als würde man sagen, die Antreffwahrscheinlichkeit

von Person P in ihrem Büro sei 50 %. Wenn wir wieder dem allgemeinen Sprachgebrauch folgen, so bedeutet das aber, dass sich P, auch wenn man nicht nachsieht, entweder im Büro oder nicht im Büro aufhält. Es ist also eine Vorsichtsmaßnahme, die keine Wirkung zeigt.

Wenn man aber, wie es die Absicht war, akzeptieren würde, dass nichts über den Ort des Elektrons vor der Messung gesagt worden ist, so entsteht ein anderes Problem: Die Psi-Funktion würde nichts mehr über das Elektron im ursprünglichen Zustand sagen.  $\psi(x, y, z, t)$  ist die Lösung der Schrödinger-Gleichung des ungestörten Wasserstoffatoms, und sie macht eine Aussage über das Atom in diesem ungestörten, stationären Zustand. Die Interpretation von  $|\psi(x, y, z, t)|^2 dt$  als Antreffwahrscheinlichkeit macht aber eine Aussage darüber, was passiert ist, nachdem man das Atom beim Versuch, den Ort seines Elektrons herauszubekommen, zerstört hat.

#### 3. Übergangswahrscheinlichkeit

Das ist die am wenigsten anfechtbare der drei Ausdrucksweisen, denn sie ist einfach eine der Aussagen, die die Theorie macht. Sie ist praktisch modellunabhängig. Vor allem hat sie einen der Mängel nicht: Sie unterstellt nicht, die Teilchen seien punktförmig. Mit „scharfer Ort“ ist hier nur gemeint, dass die Ortsunschärfe so klein ist, wie es durch das Messgerät vorgegeben wird, in unserem Fall  $d\tau$ . Die Interpretation hat aber nach wie vor den Mangel, dass sie nur eine Aussage darüber zu machen scheint, was passiert, wenn man eine Messung macht, nicht aber über das in Ruhe gelassene Wasserstoffatom.

Zusammenfassend kann man sagen: Wir wollen einen Sachverhalt, den die Theorie ohne Problem beschreibt, jemandem mitteilen. Dazu haben wir zwei Möglichkeiten: Entweder wir benutzen die Sprache der Theorie, d. h. der Mathematik. Das ist in der Schule, aber auch in der Hochschule sicher kein Weg, einen Anfänger mit der Materie vertraut zu machen. Oder wir benutzen ein Modell (das selbstverständlich nicht alles wiedergibt, und das Hinzugedichtete enthält). Das Modell selbst muss aber verständlich sein. Man muss mit dem Modell operieren können, auch wenn man die Theorie noch nicht beherrscht. Die Interpretation mit der Aufenthalts- oder der Antreffwahrscheinlichkeit stellen aber kein solches Modell dar.

### Herkunft

Die Quantentheorie ist so beschaffen, dass keines der möglichen Modelle sehr tragfähig ist. Von Anfang an waren zwei Modelle in der Diskussion: 1. Das Punktteil-

chenmodell, dessen Unzulänglichkeiten wir gerade angesprochen haben. 2. Ein Kontinuumsmodell, bei dem  $|\psi(x, y, z, t)|^2 d\tau$  als die Dichte eines Stoffes interpretiert wird [1,2]. Es mag sein, dass unsere Neigung, ein Modell für die Wirklichkeit zu nehmen, dazu führt, nur ein einziges Modell zu dulden. Jedenfalls hat das Kontinuumsmodell trotz seiner unbestreitbaren Stärken bei diesem Prozess verloren.

Angesichts der prekären Lage wäre es sicher gut gewesen, beide Modelle am Leben zu halten und je nach Bedarf das eine oder andere zur Erklärung einer Erscheinung heranzuziehen.

### Entsorgung

Man macht sich die Stärken des Kontinuumsmodell zu Nutze, wo es nur geht. Nach diesem Modell ist das Elektron eine Portion eines im Raum verteilten Stoffs.  $|\psi(x, y, z, t)|^2$  beschreibt die Dichte des Stoffs. Die Masse und die Ladung des Stoffs befolgen eine Kontinuitätsgleichung.

Das Modell erklärt die folgenden Erscheinungen auf natürliche Weise:

- die Gestalt der Atome;
- die Tatsache, dass ein Atom in einem stationären Zustand (Eigenzustand der Energie) nicht strahlt;
- den Bahndrehimpuls und das magnetische Moment der H̄llenelektronen;
- das Erlaubt- und Verbotensein der verschiedenen Übergänge;
- die Polarisation der bei einem Übergang emittierten Strahlung.

Man kommt diesem Modell schon recht nah, wenn man von der Elektronenwolke oder auch der Elektronendichteverteilung spricht.

[1] E. Madelung, *Quantentheorie in hydrodynamischer Form*, Zeitschrift für Physik 40, 1927, S. 322

[2] W. Döring, *Atomphysik und Quantenmechanik*, II. Die allgemeinen Gesetze, Walter de Gruyter, Berlin, 1976, S. 20

- 3 „Dass die ... Wellenfunktion nicht reell, sondern komplex ist, spiegelt u.a. wider, dass  $\psi(r, t)$  nicht die reale physikalische Bedeutung zukommt wie etwa der elektrischen Feldstärke  $\vec{E}(r, t)$  einer Lichtwelle in klassischer Optik bzw. Elektrodynamik (in der Quantenelektrodynamik kommt auch  $\vec{E}$  keine reale physikalische Bedeutung zu).“

### Mängel

Es gibt Sätze in der Physik, die ich als Student als besonders transzendent empfunden habe: Aussagen, die sehr weit in die Grundlagen der Wissenschaft hineinreichen schienen, die unerwartet waren, die aber auch nicht ganz verständlich waren, sodass man eigentlich nicht wusste, wozu man sie verwenden konnte. Hierzu gehört die Aussage, die Wellenfunktion sei keine direkt messbare Größe. Obwohl vielleicht in der Vorlesung nur nebenbei erwähnt, bleibt die Aussage im Gedächtnis. Und so hat sie auch ihren Weg in die Schulbücher gefunden.

Warum ist die  $\psi$ -Funktion nicht direkt messbar? Man findet zweierlei Begründungen:

1. Die Tatsache, dass sie komplex ist. Nun gibt es aber andere physikalische Größen, die auch komplex sind. Jeder weiß, wie man mit ihnen umgeht, und niemand kommt auf die Idee, die Warnung auszusprechen, es handele sich um Größen besonderer Art.

2. Die Behauptung, dass sich der Betrag von  $\psi$  zwar in der messbaren Elektronendichteverteilung äußert, dass aber die Phase beliebig und unmessbar sei. Das stimmt nicht. Die Phase äußert sich in der Stromdichte (oft Wahrscheinlichkeitsstromdichte genannt) und diese kann man messen. Durch Dichte und Stromdichte ist also (mindestens bei Einteilchen-Systemen) die Wellenfunktion eindeutig festgelegt.

Wenn man betont, eine Größe sei nicht unmittelbar messbar, so sollte man vorher erklären, was man unter unmittelbarer Messbarkeit versteht. Es wird in diesem Zusammenhang zwar immer auf die elektrische Feldstärke verwiesen, aber deren Messung mithilfe einer Probeladung ist ja nicht gerade etwas, was man als unmittelbar qualifizieren würde. Man benutzt das Mittel der Probeladung, die, das sollte man nicht vergessen, das Feld so stark verändert, dass es (am Ort der Probeladung) mit dem zu messenden Feld nicht mehr die geringste Ähnlichkeit hat.

### Herkunft

Die Born'sche Wahrscheinlichkeitsinterpretation, die einen daran hindert, mit der Wellenfunktion irgendeine tragfähige Anschauung zu verbinden.

## 11.9 Zur physikalischen Bedeutung der Psi-Funktion

### Gegenstand

- 1 „Die  $\psi$ -Funktion selbst hat keine unmittelbare physikalische Bedeutung.“
- 2 „... stellt  $\psi$  keine unmittelbar messbare Größe wie eine Länge oder eine Feldstärke dar.“

### Entsorgung

Die Bemerkung, die  $\psi$ -Funktion sei nicht unmittelbar messbar, ist ohne Sinn, solange man nicht erklärt, was man unter unmittelbarer Messbarkeit versteht. Tut man es, so sollte man vielleicht nicht gerade die  $\psi$ -Funktion als erstes Beispiel für eine nicht unmittelbar messbare Größe anführen. Das Bedürfnis, eine solche Bemerkung zu machen, verschwindet aber wahrscheinlich, wenn man eine andere als die Born'sche Interpretation benutzt, etwa die Schrödinger-Madelung'sche, nach der  $\psi$ -Quadrat ein Maß für die Massen- und die Ladungsdichte einer kontinuierlichen Elektronenwolke darstellt.

Ist das ein Mangel? Wenn wir uns an der Umgangssprache orientieren, hieße die Antwort „nein“. In der Umgangssprache ist es normal, dass Wörter nicht in einer einheitlichen Bedeutung benutzt werden. Ein Wort kann je nach Kontext und je nach Autor eine etwas andere Bedeutung haben.

In der Mathematik ist eine solche Unschärfe eher selten. Hier werden die Grundbegriffe einheitlich definiert und im Sinn der Definition gebraucht. Der Kontext ist die Mathematik oder wenigstens eine bestimmte Teildisziplin der Mathematik, und in diesem Kontext liegt die Bedeutung der benutzten Wörter fest, und sie ist für alle Autoren verbindlich.

Andere Wissenschaften liegen, was den Anspruch an die Eindeutigkeit ihrer Begriffe betrifft, zwischen Umgangssprache und Mathematik – so etwa die Physik und die Chemie. Normalerweise ist aber auch hier zu erkennen, ob ein Wort ein Fachausdruck ist, d. h. ob es eine einheitlich definierte und allgemein akzeptierte Bedeutung hat, oder ob das Wort mit einem niedrigeren Genauigkeitsanspruch auftritt. Das Wort Orbital gehört sicher zu den Fachausdrücken. Der Begriff und die Bezeichnung werden gewöhnlich durch eine Definition eingeführt. Man erwartet, dass der Autor das Wort ausschließlich im Sinn der Definition benutzt, und man hofft, dass es andere Autoren auf dieselbe Art definieren und verwenden. Wie unsere Zitate zeigen, ist das aber nicht der Fall. Besonders ärgerlich für den um Klarheit ringenden Leser ist es, wenn es in ein und demselben Text in verschiedenen Bedeutungen gebraucht wird.

### Herkunft

Der Begriff wurde kreiert als Ersatz für den Begriff der Umlaufbahn. Mit der Bezeichnung Orbital war also sicher nicht eine Funktion gemeint. Gerade das legen aber unsere Zitate 3 und 4 fest. Eine Funktion ist ein mathematischer Begriff, vom Menschen erfunden. Das Wort Orbital sollte sich aber (wie das Wort Umlaufbahn) auf etwas beziehen, das existiert, unabhängig davon, ob es mathematisch beschrieben wird oder nicht. Offenbar war es aber für die Theoretiker bequem, den Namen von der Erscheinung auf die Funktion, die die Erscheinung beschreibt, zu übertragen – ein Vorgang, der sich in ähnlicher Form in der Physik immer wieder abspielt (und immer wieder zu Verständnisproblemen führt). Hier einige andere Beispiele: Das Wort Feld, das ja zunächst ein real existierendes Gebilde bezeichnete, wurde von den Theoretikern usurpiert zur Bezeichnung einer Funktion, also eines mathematischen Objekts. Das Bit wurde von der Maßeinheit für eine Datenmenge zum Namen eines Zwei-

## 11.10 Orbitale

### Gegenstand

Für den Begriff Orbital findet man in der Literatur unterschiedliche Definitionen:

- 1 „Die zughörigen  $|\psi|^2$  bestimmen die möglichen Aufenthaltsbereiche von Elektronen, Orbitale genannt [1].“
- 2 „Den Bereich hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons im Atom bezeichnet man als Orbital. Im Grundzustand befindet sich das Elektron im kugelförmigen 1s-Orbital [2].“
- 3 „Stattdessen gilt die Bezeichnung Atomorbital (Orbital) für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons (ElektronendichteVerteilung) innerhalb eines Atoms [3].“
- 4 „Die Wellenfunktion eines Elektrons wird auch Orbital genannt [4].“

### Mängel

Wir stellen die Bedeutungen des Wortes, die in den zitierten Definitionen zum Ausdruck kommen, noch einmal zusammen:

- 1 durch  $|\psi(x, y, z)|^2$  definierter Aufenthaltsbereich eines Elektrons;
- 2 Bereich hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit;
- 3 die Funktion  $|\psi(x, y, z)|^2$ ;
- 4 die Funktion  $\psi(x, y, z)$ .

Beispiele für jede der verschiedenen Bedeutungen findet man in Schul- und Hochschulbüchern, in Physik- und Chemiebüchern, in naturwissenschaftlichen Enzyklopädien und im Internet. Manche Autoren weisen darauf hin, dass das Wort in verschiedenen Bedeutungen verwendet wird. Manche Aussagen eines Textes bleiben richtig, wenn man die zugrunde liegende Definition durch eine andere ersetzt.

zustandssystems. Der Widerstand wurde von der physikalischen Größe zur Bezeichnung eines elektrischen Bauelements.

### Entsorgung

Sie ist insofern schwierig, als sich jede der verschiedenen Interpretationen einer großen Verbreitung erfreut. Das Mindeste, worauf man achten sollte, ist, das Wort in einem Text nicht in verschiedenen Bedeutungen zu verwenden.

Es wäre aber auch nichts verloren, wenn man von den Interpretationen, die in den Zitaten 3 und 4 zum Ausdruck kommen, ganz absieht. Man spricht eben von der 2s-Wellenfunktion, bzw. von der Wahrscheinlichkeits- oder DichteVerteilung im Zustand 2s, statt vom 2s-Orbital.

Wirklich gebraucht wird das Wort in dem Sinne, in dem es erfunden worden war. Es ist dann sinnvoll zu sagen, ein Orbital sei besetzt oder nicht. So wie man beim klassischen Keplerproblem sagen kann, auf der Bahn bewege sich ein Körper, oder auch nicht.

Aber auch die Definition 2 ist nicht geschickt. (Manche Autoren geben sogar Prozentsätze an: Das Orbital ist der Bereich, in dem sich 90 % oder 95% der Gesamtwahrscheinlichkeit befindet.) Nach dieser Definition könnte die Aussage, ein Orbital sei besetzt oder nicht besetzt, niemals richtig sein.

Wir empfehlen daher, das Wort so zu benutzen, wie es unserem ersten Zitat entspricht.

[1] Dorn-Bader, *Physik*, Gymnasium Gesamtbund Sek II, Schroedel Verlag, Hannover, 2000, S. 445

[2] R. Sexl, I. Raab, E. Streeruwitz, *Eine Einführung in die Physik*, Band 3, S. 58

[3] dtv-Atlas zur Chemie, Deutscher Taschenbuchverlag, München, 1981, S. 23

[4] Bergmann-Schaefer, *Lehrbuch der Experimentalphysik* Band IV, Teil 1, Walter de Gruyter, Berlin, 1975, S. 47

zur Kondensation, Atome ihre Elektronenhülle atomaren und molekularen Anziehungskräften.

### Mängel

Wären nur Anziehungskräfte wirksam, dann würden die angezogenen Teile aufeinander zubeschleunigt werden. Dass dies in den obigen Beispielen nicht eintritt, dafür sind wir eine Begründung schuldig, wenn wir nicht mit den Grundgesetzen der Mechanik in Konflikt geraten wollen. Wenn die Teile in Ruhe bleiben, müssen wir schließen, dass entweder keine Kraft vorhanden ist oder, wenn wir eine Anziehung unterstellen, dass diese in jedem Augenblick oder im zeitlichen Mittel durch eine gleich starke Gegenwirkung ausgeglichen wird. Diese ist zum Verständnis nicht minder wichtig als die angenommene Anziehung. Im Falle eines Planeten kennen wir die Antwort. Der Einfluss der Sonnenanziehung mittelt sich bei einem vollen Umlauf wieder heraus, weil die Kraft nach einem halben Umlauf die entgegengesetzte Richtung hat. Die Frage, was die Atome in einem Kristall oder einem Molekül auf Abstand hält, stellt sich anscheinend gar nicht. Als materielle Teilchen schließen sie andere Materieteilchen aus dem Raum aus, in dem sie sich befinden. Von Kräften zu reden oder sie gar näher zu spezifizieren, scheint unnötig, weil das obige „Ausschließungsprinzip“ bereits alles erklärt. Erst wenn man den Atombau bespricht, wird die Frage dringlicher. Vorbild für die ersten Atommodelle war das Sonnensystem, so dass es nahe lag, die gleiche Ursache für die Kompensation der Anziehungskräfte wie dort anzunehmen. Allerdings hapert die Übertragung daran, dass die normalen Atomzustände stationär sind und nichts von einer Elektronenbewegung erkennen lassen, ganz zu schweigen von der Schwierigkeit, die Stabilität solcher Atome mit herumwirbelnden Elektronen etwa bei Zusammenstößen zu verstehen.

### Herkunft

Jeder kennt aus dem Alltag die Erfahrung, dass ein Gegenstand Raum beansprucht. Wo er ist, kann kein zweiter sein. Dieses Merkmal ist so ausgeprägt, dass wir in der Mechanik in guter Näherung Klötze, Stangen, Räder, Rollen, Platten usw. als starre Körper und Flüssigkeiten als inkompressibel behandeln können. Die Eigenschaft, einen bestimmten Raum zu erfüllen, erscheint uns geradezu als Grundeigenschaft der Materie. Wenn auch Gase davon abweichen, so gilt dies doch, wie wir uns vorstellen, für die Moleküle, aus denen das Gas besteht.

### Entsorgung

Was wir als Elastizität makroskopischer Körper beobachten, ist Ausfluss einer ähnlichen Eigenschaft der

## 11.11 Bindungskräfte

### Gegenstand

Der Zusammenhalt der Sonne mit ihren Planeten, der Ionen in einem Salzkristall, der Moleküle in Flüssigkeiten, der Atome im Molekülverband, der Nukleonen in Atomkernen usw. wird dem Wirken von Anziehungs-, Kohäsions- oder Bindungskräften verschiedener Art zugeschrieben. Festkörper danken ihre Formstabilität und Benetzbarkeit, Flüssigkeiten ihre Volumenkonstanz und Oberflächenspannung, Dämpfe ihre Neigung

## Der Massendefekt

Atomverbände, aus denen sie bestehen. Auch ein Atom ist kompressibel und reagiert mit Abstoßungskräften auf eine Verdichtung. Unvoreingenommen betrachtet, ähnelt die Elektronenwolke eher einem elastischen Gebilde, das mit wachsender Ladung des Kernes zwar enger um ihn zusammengezogen wird, sich aber gegen eine zu große Annäherung mit Nachdruck sperrt. Zwar könnten wir als Ursache hierfür auf Heisenbergs Unschärfebeziehung und Paulis Ausschließungsprinzip verweisen, doch scheint dies müßig, weil beide auf dieser Ebene den Tatbestand nicht besser erklären als die bloße Beschreibung. Es gibt keinen dringlichen Grund, diese Kräfte zu verschweigen.

## 11.12 Der Massendefekt

### Gegenstand

Die Masse eines Atomkerns ist kleiner als die Summe der Massen seiner Bestandteile. Die Differenz nennt man Massendefekt.

### Mängel

- 1 In den Texten, die ich konsultiert habe, wird für dieselbe Größe auch noch die Bezeichnung Bindungsenergie eingeführt, in einem Fall sogar noch ein dritter Name, nämlich Separationsenergie.
- 2 Die Bezeichnung Massendefekt wird im Rahmen der Kernphysik eingeführt. Es gibt aber die analoge Erscheinung auch bei der Physik der Hülle. Wenn man ein Atom aus seinem Kern und den Elektronen zusammensetzt, so ist die Masse des Atoms kleiner als die der Bausteine. Auch die Masse eines Moleküls ist kleiner als die Massen der Atome, aus denen es besteht. Die Masse von zwei Magneten, die aneinander hängen ist kleiner als die der getrennten Magneten.
- 3 Die Bezeichnung legt nahe, bei dem Effekt handele es sich um eine kleine Abweichung vom erwarteten Wert. Wenn wir aber zu den Nukleonen und ihrer Zusammensetzung aus Quarks übergehen, so ist der „Massendefekt“ viel größer als die Massen der Bausteine. Schließlich müssen wir damit rechnen, dass sich am Ende herausstellt, dass alle Masse nur Massendefekt ist.
- 4 Die Bezeichnung drückt klar ein Fehlen aus. Ein Defekt ist normalerweise ein Missstand. Der Massendefekt kann aber nur dann ein Missstand sein, wenn man nicht weiß, dass ein Feld existiert, das selbst eine Masse hat. Der Defekt ist also kein Defekt, sondern er bringt eine Bilanz in Ordnung, die ohne ihn nicht in Ordnung wäre.

### Herkunft

Es ist offensichtlich, dass der Name einmal vernünftig war. Seit Lavoisier 1772 das Gesetz von der Erhaltung der Masse entdeckt hatte, wusste man, dass die Masse eines Stoffes gleich der Summe der Massen seiner Bestandteile ist. Das Gesetz war im Rahmen der Messgenauigkeit bewiesen und konnte bis etwa 1900 als gültig betrachtet werden.

Die Energieerhaltung wurde etwa 100 Jahre nach der Massenerhaltung als unabhängiges Gesetz entdeckt. Erst seit 1905 wissen wir, dass keines der beiden Gesetze einzeln so gilt, wie man es sich zunächst vorgestellt hatte, sondern dass Energie und Masse dieselbe Größe sind, und dass nur für diese Energie-Masse ein Erhaltungssatz gilt. Die Abweichung der Gesamtmasse eines Kerns von der Summe der Massen der Nukleonen, aus denen er besteht, wäre in der vorrelativistischen Zeit ein Wunder gewesen. Sie konnte als Beweis für Einsteins Theorie gewertet werden. Diese Rolle mag den Namen Massendefekt nahegelegt haben. Aus moderner Sicht ist die Bezeichnung unpassend.

### Entsorgung

Man behandelt die Energie-Masse-Äquivalenz so wie es der heutigen Auffassung entspricht: als eine Selbstverständlichkeit. Tut man das, so gibt es keinen Defekt. Es fehlt keine Masse.

## 11.13 Kernreaktionen und Radioaktivität

### Gegenstand

Die Beschreibung von Kernumwandlungen, die Behandlung von Mess- und Nachweisverfahren für Kernstrahlungen.

Radioaktive Präparate können drei Arten von Strahlung abgeben:  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung. Bei Kernumwandlungen unterscheidet man zwischen Zerfall, Spaltung und Reaktion.

### Mängel

Die Kernphysik ist eine wahre Fundgrube für Al lasten. Man erkennt diese besonders leicht, wenn man die Beschreibung von Kernumwandlungen mit der chemischen Reaktionen vergleicht. Damit sind wir auch schon beim ersten Mangel. Die Verwandtschaft zwischen gewöhnlicher Chemie und Kernchemie, oder zwischen der Physik der Atomhülle und der Physik des Atomkerns, geht viel weiter, als es nach den Darstellungen der Lehrbücher den Anschein hat. Durch das Ausnutzen

dieser Analogie könnte man die Kernphysik begrifflich vereinfachen, und durch das Betonen der Analogie im Unterricht könnte man das Lernen erleichtern.

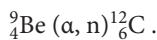
So werden in der Kernphysik Begriffe, die es in der Chemie bereits gibt, unter neuem Namen eingeführt: Was in der Chemie eine monomolekulare Reaktion ist, heißt in der Kernphysik Zerfall oder spontane Spaltung. Die autokatalytische Reaktion der Chemie ist für die Kernphysik eine Kettenreaktion. Die Umsatzrate misst man in der Chemie in mol/s. In der Kernphysik hat sie einen anderen Namen, nämlich Aktivität, und sie wird gemessen in Becquerel. Dabei gilt aber nicht, wie man es eigentlich erwarten sollte, dass

$$1 \text{ mol/s} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Bq}$$

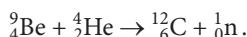
ist, sondern

$$1 \text{ mol/s} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Bq} \cdot \text{mol}.$$

Reaktionsgleichungen werden in Chemie und Kernphysik unterschiedlich geschrieben. So stellt man die Reaktion der Nuklide  $^9_4\text{Be}$  und  $^4_2\text{He}$  zu  $^{12}_6\text{C}$  und  $^1_0\text{n}$  in der Kernphysik oft dar durch



Die Schreibweise der Chemie würde lauten



Abgesehen davon, dass es sicher nicht geschickt ist, für verwandte Vorgänge, nämlich Reaktionen der Atomhülle und Reaktionen des Kerns, verschiedene Schreibweisen zu verwenden, hat die kernphysikalische Schreibweise gegenüber der chemischen noch Nachteile: Sie betont eine unwesentliche Unsymmetrie zwischen den beiden Edukten  $^9_4\text{Be}$  und  $^4_2\text{He}$ , sowie zwischen den beiden Produkten  $^{12}_6\text{C}$  und  $^1_0\text{n}$ : die Verschiedenheit der Massen von  $^9_4\text{Be}$  und  $^4_2\text{He}$  bzw. von  $^{12}_6\text{C}$  und  $^1_0\text{n}$ . Außerdem ist die Schreibweise nur anwendbar, wenn an der Reaktion genau zwei Edukte und zwei Produkte beteiligt sind.

Manchmal wird dasselbe Wort in Chemie und Kernphysik in verschiedener Bedeutung gebraucht. In der Kernphysik müssen an einer Reaktion mindestens zwei Edukte beteiligt sein, in der Chemie nicht.

Wer die Kernphysik lernen will, hat es mit besonders vielen Fachausdrücken zu tun. Es werden zahlreiche unwesentliche und unnötige Unterscheidungen getroffen. So legt man großen Wert auf die Unterscheidung zwischen natürlicher und künstlicher Radioaktivität,

d.h. zwischen Zerfallsprozessen von natürlich entstandenen Nukliden und künstlich hergestellten. Auch die Chemie könnte zwischen natürlichen und künstlichen Verbindungen und deren spontanem Zerfall unterscheiden. Sie tut es nicht, weil die Unterscheidung nichts wesentliches erfasst. Dass einige Zerfallsprodukte zusätzlich zu ihrem Namen, den sie schon haben, noch einen eigenen Namen als Strahlung bekommen, ist auch überflüssig. Die Bezeichnungen  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung legen außerdem ein besonderes Verwandtschaftsverhältnis zwischen den drei entsprechenden Teilchensorten nahe und führen damit eher in die Irre. Dass  $\gamma$ -Prozesse eine Verwandtschaft zu photochemischen Reaktionen haben, wird dagegen nicht deutlich.

### Herkunft

Wie es dazu kam, dass die Beschreibung der Strahlung die Kernphysik so stark dominiert, und dass es im Zusammenhang mit der Strahlung so viele Fachausdrücke zu lernen gibt, dass man im Unterricht so viel Zeit damit verbringt, Strahlungsmessverfahren zu diskutieren, ist leicht zu sehen: Die ersten und lange Zeit einzigen Kernumwandlungen, die man kannte, standen mit solchen Strahlungen im Zusammenhang. Dass Kernprozesse stattfinden, konnte man zunächst nur dank der „Strahlung“ erkennen, d.h. dadurch, dass eines der Reaktionsprodukte fast die ganze bei der Reaktion abgegebene Energie wegtransportiert. Man beobachtete eine Strahlung, wusste aber zunächst noch nicht, um was es sich handelt. Selbstverständlich gab man der neuen Strahlung gleich einen eigenen Namen. Die Anfänge der Kernphysik lagen außerdem in einer Zeit, als Strahlungen ein Modethema waren. Die Entdeckung einer neuen Strahlung hatte mehrere Male einen Nobelpreis zur Folge. Dass bei Kernumwandlungen vieles ganz ähnlich läuft wie bei Umwandlungen der Atomhülle, wurde erst allmählich klar. Kernreaktionen mit so großen Umsatzraten wie man sie aus der Chemie kennt, wurden erst Jahrzehnte nach den ersten Entdeckungen der Kernphysik bekannt bzw. möglich: Dass die Sonne mithilfe von Kernreaktionen funktioniert, wurde erst etwa 1920 klar. Der erste Kernreaktor begann 1942 zu laufen.

### Entsorgung

Die Entsorgung ist sicher nicht einfach. Sie erfordert eine recht umfassende Neuordnung der Inhalte der Kernphysik. Bei dieser Neustrukturierung orientiert man sich am besten an der Chemie.

# 12 CHEMIE

## 12.1 Physikalische und chemische Vorgänge

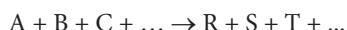
### Gegenstand

Die folgenden Zitate entstammen Lehrbüchern der Chemie:

- 1 „Vorgänge, bei denen sich Stoffe in andere Stoffe umwandeln, nennt man chemische Vorgänge. Bei physikalischen Vorgängen verändert sich im Allgemeinen nur der Zustand eines Stoffes, während seine wesentlichen Eigenschaften unverändert bleiben: Schwefel bleibt Schwefel, auch wenn man ihn schmilzt oder verdampft.“
- 2 „Die Chemie ist die Lehre von den Stoffen und deren Veränderungen. Die Physik dagegen untersucht die Zustände und die Zustandsänderungen der Stoffe.“

### Mängel

- 1 Die Grenze zwischen Physik und Chemie wird an einer unpassenden Stelle gezogen: zwischen „chemischer Reaktion“ und Phasenübergang. Gerade diese beiden Vorgänge sind so eng verwandt, dass es viel passender wäre, ihre Ähnlichkeit hervorzuheben. Beide Klassen von Vorgängen kann man mit denselben Methoden und demselben Begriffssystem behandeln. Eine chemische Reaktion kann man symbolisch schreiben als



Ein Phasenübergang ist derjenige Sonderfall, bei dem links und rechts vom Reaktionspfeil nur eine Substanz steht, in Symbolen:



Diese Besonderheit führt aber zu keinem wesentlichen Unterschied in der rechnerischen Behandlung des entsprechenden Problems. Den Antrieb für beide

Arten von Vorgängen bildet eine Differenz der chemischen Potenziale von Edukten und Produkten. Die Werte des chemischen Potenzials entnimmt man aus derselben Tabelle, egal, ob man sich für einen Phasenübergang, also einen „physikalischen Vorgang“, oder eine „chemische Reaktion“ interessiert. Auch die Behandlung der Wärmebilanz geschieht nach demselben Verfahren und mit denselben Tabellenwerten. Hier wie da gibt es exotherme und endotherme Vorgänge, beide kann man sowohl reversibel als auch irreversibel führen.

- 2 Wenn man die Definition so trifft, wie es hier geschieht, kommt man sowieso in die Bredouille. Das Kriterium dafür, dass ein Vorgang chemisch ist, ist ja die Entstehung eines anderer Stoffs. Was aber ist ein anderer Stoff? Ist ein Lösungsvorgang physikalisch oder chemisch? Vielleicht mit Hydratation chemisch und ohne physikalisch? Sind gasförmiges NaCl, gelöstes NaCl und kristallines NaCl verschiedene Stoffe? Und was soll man zu den Vorgängen sagen, die in einem Festkörper ablaufen: die Reaktion von Gitterfehlstellen mit Zwischengitteratomen, die Reaktion von Elektronen und Löchern zu Photonen?

### Herkunft

Es ist sicher kein unbilliges Vorgehen, wenn am Anfang der Behandlung eines Fachgebiets erklärt wird, um was es in dem Gebiet geht. Es ist aber auffällig, dass Chemiebücher oft besonders ausführlich sind, wenn es um die Abgrenzung zur Physik geht. In Physikbüchern findet man keine entsprechenden Abgrenzungsbemühungen zur Chemie. Zwischen Physik und Elektrotechnik gibt es übrigens weder von der einen noch von der anderen Seite her Abschottungstendenzen.

### Entsorgung

Statt die Verschiedenheit von Phasenübergängen und „richtigen“ chemischen Reaktionen herauszustellen, behandle man diese Vorgänge als spezielle Fälle ein und

derselben Klasse von Prozessen, zu denen noch viele andere gehören: die Reaktion von Elektronen und Löchern zu Licht, von materiellen Stoffen und Licht, von Fehlstellen und Zwischengitteratomen, von Atomkernen, ...

## 12.2 Chemische Energie

### Gegenstand

Unsere eigene Arbeitsfähigkeit schöpfen wir aus der chemischen Energie der Nahrung, unseren technischen Bedarf daran überwiegend aus der chemischen Energie fossiler Brennstoffe. Die Energie entstammt dem Sonnenlicht. Sie wird in den durch Fotosynthese gebildeten organischen Substanzen in chemischer Form gespeichert und kann in Wärme, Arbeit oder mittels Brennstoffzellen auch direkt in elektrische Energie verwandelt werden.

### Mängel

Aussagen dieser Art sind uns geläufig. Es stört uns nichts, wenn wir sie in dieser Weise hören oder lesen. Schwierigkeiten treten erst bei dem Versuch einer Quantifizierung auf. Wenn wir den Wirkungsgrad  $\eta$  einer Brennstoffzelle oder eines Dieselmotors angeben wollen, die diese Energie nutzen, benötigen wir Zahlen. Was die Motoren anbelangt, so erwarten wir von den Ingenieuren, die sie entwickeln, die fachkundigste Antwort. Uns interessiert hier insbesondere, was sie als die in den Motor hineingesteckte Energie  $W_Z$  betrachten, die ja die chemische Energie sein müsste. Wir finden  $W_Z = m_B H_u$ , wobei  $m_B$  die Masse des Brennstoffs und  $H_u$  sein spezifischer Heizwert sind, sodass  $W_Z$  einfach die bei der Verbrennung, oder allgemeiner die bei der genutzten chemischen Reaktion abgegebene Wärme ist. Bei Brennstoffzellen wird ebenso verfahren. Nun wissen wir, dass im Prinzip jede freiwillig ablaufende chemische Reaktion zum Betrieb einer solchen Zelle genutzt werden könnte, zum Beispiel auch eine endotherme. In diesem Falle wäre  $W_Z$  negativ, sodass die Zelle gleichzeitig chemische und elektrische Energie liefern würde. Die für diese zwiefache Leistung nötige Energie wird als Wärme der Umgebung entnommen. Trotzdem wäre der Wirkungsgrad der Zelle, obwohl sie freiwillig ein Übersoll erfüllt, wegen  $W_Z < 0$  negativ. Hinzu kommt, dass wir mit der vermeintlich gewonnenen chemischen Energie, die in den Reaktionsprodukten gespeichert ist, nichts anfangen können, weil die Reaktion ohne Zwang nicht zur Umkehr zu bewegen ist. Wenn wir Rat bei Chemikern, Physikochemikern oder Thermodynamikern suchen, geraten

wir vom Regen in die Traufe. Der Begriff chemische Energie gehört nicht zu deren Fachrepertoire. An ihre Stelle tritt diese oder jene energetische Zustandsfunktion, die je nach den einzuhaltenden Randbedingungen verschieden ist. Eine eindeutig angebbare chemische Energie, die in irgendwelchen Stoffen gespeichert ist, gibt es anscheinend nicht.

### Herkunft

Ingenieure fassen Verbrennungsmotoren nicht als chemische, sondern als Wärmekraftmaschinen auf. Daher suchen sie nicht die chemische Energie, sondern die zugeführte Wärme zu bewerten. Aus dieser Sicht scheint die Verbrennungswärme ein brauchbares Maß zu sein. Die Übertragung desselben Ansatzes auf Brennstoffzellen liegt daher nahe. Endotherme Reaktionen werden für diese Zwecke nicht diskutiert, weil die Energieumsätze vergleichsweise gering und daher technisch uninteressant sind, sodass man über die hier auftauchenden Schwierigkeiten bequem hinwegsehen kann.

### Entsorgung

Die chemische Energie fällt in dieselbe Kategorie wie die anderen Energieformen auch. Der Begriff ist nützlich, wenn es um eine grobe Orientierung geht, erweist sich aber als widerspenstig, wenn man ihn streng zu fassen sucht. Im physikalischen Jargon ist er brauchbar, im physikalischen Kalkül überflüssig, zum physikalischen Verständnis hinderlich. Überlegen wir, was wir den Schülern am liebsten antun.

## 12.3 Stoffmenge und Teilchenzahl

### Gegenstand

Um Substanzmengen zu kennzeichnen, bevorzugen Chemiker und Physiker verschiedene Größen, die Erstere die Stoffmenge  $n$ , die Letzteren die Teilchenzahl  $N$ .

### Mängel

Die Größe  $n$  nimmt in der Chemie eine zentrale Stellung ein. Der Begriff gilt dort als grundlegend, nicht nur für die Berechnung der Umsätze und die Bestimmung der Zusammensetzung von Stoffen, sondern für das Verständnis stofflichen Verhaltens überhaupt. Viele Gesetze und Regeln nehmen mithilfe dieses Begriffes und der davon abgeleiteten Größen eine besonders einfache Gestalt an (stöchiometrische Gesetze, Gasgesetze, Massenwirkungsgesetze, Dulong-Petit-Regel, Pictet-Trottin-Regel usw.).

## Stoffmenge und Teilchenzahl

Neben der Teilchenzahl  $N$  erscheint nun die Stoffmenge  $n$  als überflüssige Zutat, ja nicht einmal als richtige Größe, deren Werte – wie bei Länge oder Dauer – wenigstens im Prinzip durch ein „ordentliches“ Messverfahren festgelegt werden, sondern eher als bloßer Zählerwert, in der die Avogadrokonstante  $N_A$  wie Dutzend oder Schock als große Zähleinheit dient. Die Werte von  $n$  und  $N$  unterscheiden sich nur um den festen Faktor  $N_A$ , sodass sich allgemein alle von  $n$  abgeleiteten Größen auch als Abkömmlinge von  $N$  betrachten lassen. Die Größenwerte der letzteren Art sind allerdings um eine ganzzahlige Potenz von  $N_A$  kleiner oder größer als die Werte ihrer von  $n$  abgeleiteten Gegenstücke, was sie ziemlich unhandlich macht. Aber solch ein Argument überzeugt höchstens einen Praktiker, der mit den Werten umgehen muss, jedoch keinen grundsätzlich denkenden Physiker. Dass man mehr verliert als nur die Handlichkeit der Werte, wird erst erkennbar, wenn man  $n$  mit Größen aus anderen Bereichen vergleicht, etwa der Ladung  $Q$ . Auch sie ließe sich grundsätzlich in sämtlichen Gleichungen durch eine ganze Zahl, die Ladungszahl  $z = Q/e$ , ersetzen, ohne dass dadurch irgendein Ergebnis der Elektrodynamik verloren ginge. Das Coulomb'sche Gesetz lautete etwa

$$F = \frac{z_1 \cdot z_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

mit  $\epsilon_0 = 3,45 \cdot 10^{-26} \text{ J}^{-1}\text{m}^{-1}$  im Vakuum.

Alle elektrischen Einheiten wären in den neu zu bildenden Größen durch andere ersetzt (Ampere  $\rightarrow \text{s}^{-1}$ , Volt  $\rightarrow \text{J}$ , Ohm  $\rightarrow \text{J} \cdot \text{s}$ , Farad  $\rightarrow \text{J}^{-1}$ , Henry  $\rightarrow \text{J} \cdot \text{s}^2$  usw.), während sich die Zahlenwerte um eine ganzzahlige Potenz von  $1,602 \cdot 10^{-19}$  ändern würden. Die übliche Netzspannung beträge  $3,52 \cdot 10^{-17} \text{ J}$  und eine  $100\text{-W-Glühlampe}$  würde bei einer Stromstärke von  $2,84 \cdot 10^{18} \text{ s}^{-1}$  und einen Widerstand von  $1,24 \cdot 10^{-35} \text{ Js}$  normal leuchten. Übliche Werte von Stromstärke, Spannung, Widerstand usw. wären nicht nur unhandlich, sondern zusätzlich mit denen von Frequenz, Energie, Wirkung usf. verwechselbar. Bisher klar abgesetzte, durch verschiedene Einheiten betonte Konturen im Begriffssystem verschwimmen, was das Erkennen der zugrundeliegenden Strukturen sehr erschwert. Macht es bereits Mühe, Schülern den Unterschied zwischen Stromstärke und Spannung begreiflich zu machen, so käme jetzt z.B. noch die Schwierigkeit hinzu, Spannung, Energie und Leistung begrifflich voneinander zu trennen. Der natürliche Weg, einen Größenwert – etwa einen Widerstand – einzuschätzen, indem man versucht, sich eine Vorstellung vom Sinn der Einheit zu machen, wird ungängbar. Was soll man sich unter der Widerstandseinheit  $\text{Js}$  oder  $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  vorstellen? Auch solche Schwierigkeiten

sind überwindbar, nur mit welchem zusätzlichen Aufwand!

Schwierigkeiten derselben Art handelt man sich ein, wenn man die Größe Stoffmenge übergeht. Die ausgeprägten Analogien zu anderen Bereichen der Physik werden dadurch bis zur Unkenntlichkeit verwischt, was wiederum mancherlei Sonderbildungen fördert, die die Andersartigkeit noch übersteigert. Was ein Stück normaler, gewohnter Bahnen folgender Physik sein könnte, wird zu einem anspruchsvollen, neue Ansätze und Denkweisen erfordern Spezialgebiet, der „statistischen Physik“. Die Darstellungen haben sich inzwischen soweit auseinanderentwickelt, dass eine Zusammenfassung geradezu unmöglich erscheint. Dass man in der Physik Photonen in einem Hohlraum oder Phononen in einem Festkörper, Elektronen im Leitungsband oder Löcher im Valenzband, das Einfrieren einer Molekelschwingung oder die Maxwellverteilung der Geschwindigkeiten, Fermi-Energie, Einstein-Kondensation und Boltzmann'schen Satz mit demselben Begriffsrepertoire erfassen kann, mit denen der Chemiker das makroskopische Verhalten von Stoffen beschreibt, bleibt dadurch völlig im Dunkel.

## Herkunft

Solange man die Masse  $m$  einer Stoffportion als der Stoffmenge proportional ansehen konnte, lag es nahe, die durch Wägung leicht bestimmbare Größe  $m$  auch als Maß für Stoffmengen aller Art zu verwenden. Die in der Chemie wichtige Frage, wann man die Mengen zweier verschiedener Stoffe als gleich anzusehen hat, wurde in der Physik gar nicht erst gestellt. Als „Molzahl“ mit der stoffspezifischen Masseneinheit mol (soviel Gramm eines Stoffes, wie sein Molekulargewicht angibt), als die die Stoffmenge  $n$  in der Chemie ursprünglich eingeführt worden war, galt  $n$  in der Physik nur als illegitimer Abkömmling der Masse, der nicht in den Kreis ordentlicher physikalischer Größen passte. In der mechanischen Wärmetheorie, in der die Atome als kleine, den Gesetzen der Mechanik unterworfen Körperchen aufgefasst werden, oder in der Quantenstatistik, wo Verteilungen von Teilchen über verschiedene Quantenzustände gezählt werden, erscheint zudem die Teilchenzahl  $N$  als der gegenüber der Stoffmenge  $n$  natürlichere Begriff.

## Entsorgung

Wenn man in der Physik auch chemische Umsetzungen (als zur Chemie gehörig) ausklammert, so werden doch stoffliche Vorgänge wie Schmelzen, Sieden, Lösen, Verdunsten, Verteilen usw. durchaus angesprochen. Auch Gesamtheiten von Elektronen, Löchern, Fehlstellen, Photonen, Phononen,  $\alpha$ -Teilchen usf. lassen sich wie

Stoffe behandeln. Für die Erscheinungen in diesen Bereichen spielt die Stoffmenge  $n$  eine ähnliche Rolle wie die Ladung  $Q$  in der Elektrizitätslehre.  $n$  fungiert als Grundgröße, von der sich zahlreiche Größen ableiten und zu einem Begriffssystem zusammenfügen lassen, das viele Parallelen zu anderen Teilen der Physik aufweist, die das Verstehen und Behalten der Zusammenhänge sehr erleichtert. So untrüglich es ist, den Begriff der Ladung zu umgehen, so nachteilig wirkt sich der Verzicht auf die Größe  $n$  aus. Dabei empfiehlt es sich,  $n$  wie Länge, Dauer, Masse durch direkte Metrisierung des zugrunde liegenden Begriffes einzuführen und nicht über die Teilchenzahl  $N$ , so gewohnt und daher verführerisch dieser Weg auch sein mag.

## 12.4 Die Avogadro-Konstante

### Gegenstand

Die Anzahl der Stoffteilchen (der gedachten kleinsten Baueinheiten eines Stoffes), die in einer Stoffportion von 1 mol enthalten ist, heißt Avogadro-Konstante  $N_A$ . Anders ausgedrückt,  $N_A = N/n$ , wenn  $N$  die Teilchenzahl und  $n$  die Stoffmenge einer Stoffportion bedeutet.

### Mängel

Eine physikalische Größe ist eine Variable, die durch ihre Werte ein in der Natur vorhandenes Merkmal quantifiziert. Größen  $G$  mit reellen, aber diskret liegenden und daher abzählbaren scharfen Werten, nennt man gequantelt und eine ganze Zahl, die die Werte nummeriert, Quantenzahl  $g$ . Sind die  $G$ -Werte nicht nur diskret, sondern auch äquidistant, heißt die Größe ganzzahlig gequantelt. Im einfachsten Fall sind dann die Werte ganze Vielfache  $g$  eines universellen Quants  $\gamma$ :

$$G = \gamma g$$

Die Ladung  $Q$ , die Wirkung  $H$ , der Drehimpuls  $L$ , der magnetische Fluss  $\phi$  sind Beispiele für Größen, die unter Bedingungen, die scharfe Werte liefern, ein solches Wertespektrum zeigen, nicht jedoch die Energie, für die es kein universelles Quant gibt. Die ganzzahlige Quantelung der auf einem Stoffteilchen, einem Ion, sitzenden Ladung,  $Q = ze$  mit der Ladungszahl  $z$  in der Rolle der Quantenzahl und der Elementarladung  $e$  in der des Ladungsquants, wurde schon im 19. Jahrhundert bei der Untersuchung von Elektrolytlösungen erkannt. In den Anfängen des 20. Jahrhunderts kam die Einsicht hinzu, dass sich verschiedene Befunde der Atomphysik und Thermodynamik mittels der Annahme deuten lassen,

dass bei einer periodischen Bewegung die Werte der Wirkung  $H$  für jeden Freiheitsgrad ganzzahlig gestaffelt sind [1], wobei die Planck'sche Konstante  $h$  als universelles Wirkungsquant auftritt. Eine mittelbare Folge davon ist, dass der Drehimpuls  $L$  eines umlaufenden Teilchens, und zwar nicht dessen Betrag, sondern die Drehimpulskomponente  $L_z$  in irgendeiner Vorzugsrichtung  $z$ , scharfe Werte besitzt, die diskret und äquidistant sind,  $L_z = l \cdot \hbar$  mit  $\hbar = h/(2\pi)$  als universellem Drehimpulsquant und  $l$  als zugehöriger Quantenzahl. Der magnetische Fluss  $\phi$  durch eine Fläche, die durch eine supraleitende Schleife berandet ist und dadurch den Fluss gleichsam in der Fläche gefangen hält, erweist sich ebenfalls als ganzzahlig gequantelt, wobei das magnetische Flussquant den Wert  $\phi_0 = h/(2e)$  besitzt.

Hinsichtlich der Struktur ihres Wertebereiches fällt die Stoffmenge  $n$  in dieselbe Kategorie wie die besprochenen Größen  $Q, H, L$  und  $\phi$ . Für eine Stoffportion in einem geschlossenen Gefäß, das keinen Stoffaustausch zulässt, kann die Größe  $n$  nur diskrete Werte annehmen, und zwar genauer nur solche Werte, die ein ganzzahliges Vielfaches  $N$  einer kleinsten Einheit  $\tau$  sind [2]. Kurz gesagt,  $n$  ist hier ganzzahlig gequantelt mit  $N$  als Quantenzahl und  $\tau = N_A^{-1}$  als zugehörigem universellen Quant:  $n = N \cdot N_A^{-1} = N \cdot \tau$ . Es ist jedoch üblich, statt des Stoffmengenquants  $\tau$  selbst stets den Kehrwert, die Avogadro-Konstante  $N_A = \tau^{-1}$ , zu benutzen. Dadurch verschleiert man eine formale und begriffliche Symmetrie, die das Erlernen und die Handhabung des physikalischen Kalküls erleichtern würde. Wenn wir in den Begriff Quantelung über die genannten mathematischen Eigenschaften hinaus nichts hineinbekommen, sind keine sachlichen Gründe erkennbar, die eine derartige Sonderstellung der Größe  $n$  rechtfertigen. Im Gegenteil, hierdurch entsteht erst im physikalischen Kalkül eine Kuriosität, zu der es sonst keine Entsprechung gibt. Wie absonderlich diese Vorgehensweise ist, fällt erst auf, wenn man umgekehrt, etwa statt der Elementarladung  $e$ , ihren Kehrwert  $Z_M = e^{-1}$  verwenden würde. Die Naturkonstante  $Z_M$ , nennen wir sie „Millikan-Konstante“, wäre dann zu definieren als die Anzahl kleinsten Teile oder Quanten, in die sich eine Ladungsmenge von 1 As aufteilen lässt. Anders ausgedrückt, es ist  $Z_M = z/Q$ , wenn  $z$  die Ladungszahl und  $Q$  die Ladungsmenge eines geladenen Probekörpers bedeutet.

### Herkunft

Solange Masse und Materiemenge noch identifiziert wurden, fehlte der Grund, beide Begriffe zu trennen und gesonderte Maße dafür einzuführen. Der aus der Chemie stammende Begriff Stoffmenge galt vielen Physikern lange Zeit nicht nur als überflüssig, sondern als ziemlich suspekt. Dazu hat der lässige Umgang der Chemiker mit

## Das chemische Potenzial

diesem Begriff, der in vielen Spielarten mit eigenen Einheiten wie  $g$ -Atom,  $g$ -Molekül  $g$ -Äquivalent, Tom, Mol, Val usw. benutzt wurde, das Seinige beigetragen.

Die Einheit, die heute einheitlich mol heißt, betrachtete man zunächst als stoffspezifische Masseneinheit und empfand sie daher als ähnlich grotesk wie eine ortspezifische Längeneinheit. In der mechanischen Wärmetheorie und der statistischen Physik tritt die Teilchenzahl  $N$  als der primäre Begriff auf, neben dem die Stoffmenge  $n$  nur als bequemes, aber entbehrliches Maß für eine große Stückzahl erscheint. Alle diese Umstände trugen dazu bei, eine ähnliche Entwicklung wie bei der Ladung zu unterdrücken, mit der Konsequenz, dass die Größe  $n$  in der Physik, wenn überhaupt, dann höchstens in Nebenrollen auftaucht und ihr kleinstes Quant  $\tau$  – anders als das Ladungsquant  $e$  – als Kehrwert zu einer Art Zähleinheit verkümmert.

### Entsorgung

Dass es zweckmäßig ist, analoge Sachverhalte durch analoge Formeln darzustellen, scheint unmittelbar einleuchtend. Der Gewinn wird allerdings oft erst im größeren Zusammenhang deutlich und kaum an einem solch kleinen Detail wie dem oben besprochenen. Der Verzicht auf die Größe  $N_A$  zugunsten von  $\tau$  wäre aber ein erster Schritt in die richtige Richtung.

[1] Im Falle einer eindimensionalen Bewegung – z. B. ein schwingendes oder zwischen elastischen Wänden pendelndes Teilchen – ist  $H$  einfach der Flächeninhalt des von der geschlossenen Bahnkurve berandeten Gebietes in dem durch Ort und Impuls des Teilchens aufgespannten Phasenraum.

[2] Formelzeichen  $\tau$  vorgeschlagen von G. Falk in „*Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts*“, Heft 2, Schroedel, 1978, S. 9ff

## 12.5 Das chemische Potenzial

### Gegenstand

In der Physik klafft an dieser Stelle eine Lücke. Der Begriff, der unsere Überschrift bildet, kommt in einem normalen Schul- oder Hochschulphysikbuch nicht vor. Nur der Theoretiker kennt ihn und nur in der Thermodynamik oder der statistischen Physik taucht er als Bestandteil eines komplizierten, abstrakten Kalküls auf.

### Mängel

Im Gegensatz zu dem Ruf, der der Größe anhängt, ist das chemische Potenzial  $\mu$  geradezu harmlos, harmloser

etwa als die Vektorgrößen Kraft oder Beschleunigung aus der Mechanik. Es genügen schon wenige, unschwer begreifbare, an Alltagsbeispielen leicht zu erläuternde Angaben, um die Größe nicht nur qualitativ zu beschreiben, sondern sie vollständig zu definieren. Nur die Wahl der Einheit und einiger Skalennullpunkte sind noch frei, wenn man etwa auf die folgende Begriffsbestimmung zurückgreift:

- a) Jedem Stoff B lässt sich eine Größe  $\mu_B$  zuordnen, genannt sein chemisches Potenzial, die seine Neigung ausdrückt, sich umzubilden, das heißt etwa
  - sich mit irgendwelchen anderen Stoffen umzusetzen,
  - sich in irgendeine andere Zustandsart umzuwandeln,
  - sich im Raum irgendwie umzuverteilen.
- b)  $\mu_B$  hängt vom Umfeld ab, in dem B sich befindet, (das heißt von den Mischungspartnern, dem Mischungsverhältnis, dem Aggregatzustand, der Temperatur, dem Druck, den Feldstärken usw.), aber nicht davon, mit wem und zu was der Stoff B reagiert.
- c) Eine Stoffumbildung kann freiwillig eintreten, wenn die Neigung hierzu im Ausgangszustand stärker ausgeprägt ist als im Endzustand, das heißt etwa bei einer
  - Umsetzung  $B' + B'' + \dots \rightarrow D' + D'' + \dots$ , falls  $\mu_{B'} + \mu_{B''} + \dots > \mu_{D'} + \mu_{D''} + \dots$ ,
  - Umwandlung  $B(\alpha) \rightarrow B(\beta)$ , falls  $\mu_\alpha > \mu_\beta$ ,
  - Umverteilung  $B(\text{Ort 1}) \rightarrow B(\text{Ort 2})$ , falls  $\mu_1 > \mu_2$  gilt.

Noch bildhafter ausgedrückt können wir sagen: Jeder Stoff, ganz gleich welcher Art, hat ein Bestreben zur Umsetzung, Umwandlung, Umverteilung usw., kurz gesagt, eine Art „Umtrieb“.  $\mu$  ist ein Maß für die Stärke dieses Umtriebs, je größer  $\mu$ , desto „umtriebiger, aktiver, forschere“, je kleiner, desto „schlaffer, passiver, lascher“ ein Stoff. Bei einer Umsetzung, Umwandlung, Umverteilung setzt sich stets die Seite mit dem größeren Umtrieb durch:

- „umtriebigere“ Stoffe gehen in „phlegmatischere“ über,
- „forschere“ Zustandsarten wandeln sich in „laschere“ um,
- von „betriebsamen“ Stellen weichen Stoffe nach „geruhsameren“ Orten aus.

Kurz, die Materie strebt einem Zustand größter Schlaffheit zu. In gröbster Näherung kann man  $\mu_B$  als konstant betrachten, insbesondere unabhängig von Temperatur oder Druck, ähnlich wie man es in der Mechanik mit der Länge einer Stange, eines Hebels, eines Seiles tut. Dem starren Körper entspricht der Stoff mit „starrem“  $\mu$ . Man kann ferner, etwa um den Chemikern nicht vor-

zugreifen, Umsetzungen vorerst ausklammern. Klug ist dies jedoch nicht, da sich viele physikalische Vorgänge wie chemische Reaktionen schreiben und behandeln lassen:

- Ionisierung eines Atoms:  $B \rightarrow B^+ + e^-$ ,
- $\alpha$ -Zerfall:  ${}_{Z}^A B \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4} B + \alpha$ ,
- Emission eines Photons:  $B^* \rightarrow B + \gamma$ ,
- induzierte Emission:  $B^* + \gamma \rightarrow B + 2\gamma$ ,
- Adsorption an einer Oberfläche:  $\square + B \rightarrow \boxed{B}$ ,
- Bildung von Gitterfehlstellen:  $\boxed{B} \rightarrow \square + B$  usw.

Erheblich ergiebiger wird die Diskussion, wenn man Druck-, Temperatur- und Konzentrationsabhängigkeit qualitativ oder quantitativ berücksichtigt. Dabei führen vielfach schon lineare Ansätze, wie man sie Mittelstufenschülern z.B. bei der Erörterung des Hooke'schen Gesetzes oder der thermischen Ausdehnung bedenkenlos zumutet, zu nützlichen Ergebnissen. Aber auch so verschiedenartige Erscheinungen wie Osmose, Diffusion, Randschichten in Halbleitern, Löcherbildung im Valenzband, Sedimentation in Zentrifugen, Flüssigkeitsströmung durch Rohre, Dichteschichtung in der Atmosphäre, Glühemission von Elektronen, Geschwindigkeitsverteilung in Gasen, Laseremission, Einfrieren einer Molekelschwingung, Fotosynthese, Energiegewinnung in Brennstoffzellen und natürlich chemische Reaktionen aller Art lassen sich auf diese Weise nach einheitlichem Muster behandeln. Hier lässt die herkömmliche Physik ein begriffliches Loch, das, mit den üblichen Mitteln gestopft, nur lückiges Flickwerk liefert.

### Herkunft

Wer die Gutartigkeit der Größe  $\mu$  kennt, fragt sich unwillkürlich, wie die Größe zu einem derart verhängnisvollen Ruf gelangt sein kann, der sie so völlig ins Abseits des physikalischen Interesses gebracht hat. Dafür gibt es mehrere Gründe. Schon der Schöpfer dieses Begriffes, J. W. Gibbs, beging 1876 den Fehler, seine Gedanken in einer kaum zugänglichen Zeitschrift und für die damaligen Hauptadressaten, die Chemiker, unverständlichen Sprache zu veröffentlichen. Atom-, Kern-, Molekül-, Festkörperphysik, in die ja viele der oben genannten Anwendungen fallen, waren damals so gut wie nicht vorhanden, sodass sich die Physiker nicht besonders angesprochen fühlten, ein Missverständnis, das das Beiwort chemisch im heutigen Namen der Größe  $\mu$  noch fördert. Zudem hat Gibbs 1876 seine Definition der Größe ganz auf die klassische Thermodynamik gegründet, die Physiker zwar hoch schätzen, der sie aber wegen ihrer begrifflichen Schwierigkeit am liebsten aus dem Wege gehen. Die

Gibbs'sche Abhandlung wurde dadurch erst viel zu spät bekannt, zu einer Zeit, als bereits vielerlei Ersatz-erklärungen im Schwange waren.

### Entsorgung

Eine Lücke lässt sich nicht einfach entsorgen, schon gar nicht nach üblichem Muster mit ein paar guten Worten. Zudem ist die Lücke nicht wirklich leer, sondern besonders in der Chemie, aber auch in Physik, Biologie, Medizin, Meteorologie usw. mit vielerlei Ersatzstücken angefüllt. Dass sich die Lücke tatsächlich schließen lässt und das grundsätzlich schon von der Mittelstufe an, ist durch langjährige Schulversuche nachgewiesen. Wie das zu machen ist, kann wegen der Vielfalt der Anwendungen und Behelfslösungen nicht mit wenigen Worten gesagt werden, aber einiges lässt sich sofort tun: sich von dem Vorurteil zu lösen, das chemische Potenzial sei ein höchst schwieriger und allenfalls für Chemiker relevanter Begriff.

## 12.6 Der Antrieb von Stoffströmen – Teilchenzahldichte oder chemisches Potenzial?

### Gegenstand

In Physik und Chemie begegnen uns „Ströme“ physikalischer Größen aller Art: elektrische Ströme (= Ströme der elektrischen Ladung), Massen- und Volumenströme – und auch Stoffströme, oder besser: Stoffmengenströme, denn die strömende Größe ist hier die Stoffmenge. Jeder Strom kann durch einen „Widerstand“ behindert sein. Man sagt dann, er sei dissipativ. In diesem Fall braucht er einen „Antrieb“. Im elektrischen Fall einen elektrischen Potenzialgradienten, im Fall des Massenstroms einen Gravitationspotenzialgradienten, ein Wärmestrom braucht einen Temperaturgradienten. Bei der Größe Stoffmenge führt man als Antriebsgröße den Gradienten der Teilchenzahldichte ein. Der Transport selbst wird dann als Diffusion bezeichnet. Ein Stoff diffundiert, so heißt es, von Orten höherer zu Orten niedrigerer Teilchenzahldichte.

### Mängel

Zunächst eine Kleinigkeit: Die physikalische Größe, um deren Dichte es hier geht, ist die Stoffmenge. Sie ist eine Basisgröße des SI-Einheitensystems. Wenn man stattdessen die Teilchenzahldichte benutzt, so ist das, als würde man statt der elektrischen Ladungsdichte die Elementar-

## Der Antrieb von Stoffströmen – Teilchenzahldichte oder chemisches Potenzial?

ladungszahldichte benutzen. So wie es manchmal interessant sein kann, die herumwimmelnden Elektronen zu betrachten, so mag es im Fall der Diffusion manchmal interessant sein, auf die Wimmelei der Teilchen zu schauen. Bei den meisten praktischen Fragestellungen tut man aber gut daran, mit der Größe Ladungsdichte bzw. Stoffmengendichte zu operieren. Der Satz, den man im Zusammenhang mit der Diffusion aussprechen möchte, würde dann eher lauten: Der Stoff diffundiert von der hohen zur niedrigen Stoffmengendichte.

Nun zum eigentlichen Thema.

Die quantitative Formulierung der Aussage ist das 1. Fick'sche Gesetz; in moderner Schreibweise:

$$\vec{j}_n = -D \cdot \text{grad } \rho_n \quad (12.1)$$

$\rho_n$  ist die Stoffmengendichte und  $\vec{j}_n$  die Stoffmengenstromdichte. Der Faktor  $D$  vor dem Gradienten ist die Diffusionskonstante. Für ideale Gase ist er unabhängig von der Stoffmengendichte.

Bei dieser Beschreibung der Diffusion erscheint der Gradient der Stoffmengendichte als Ursache oder Antrieb des Stoffmengenstroms.

Man sieht der Gleichung an, dass sie irgendwie in eine Reihe gehört mit etlichen anderen Gleichungen, die alle eine wichtige Rolle in der Thermodynamik der irreversiblen Prozesse spielen. Sie beschreiben Ströme physikalischer Größen, bei denen ein Widerstand überwunden werden muss, sogenannte dissipative Ströme, d. h. Ströme mit Entropieerzeugung.

Ein bekanntes Beispiel ist der Ausdruck für die elektrische Stromdichte  $\vec{j}_Q$ :

$$\vec{j}_Q = -\sigma \cdot \text{grad } \varphi \quad (12.2)$$

Hier ist  $\varphi$  das elektrische Potenzial und  $\sigma$  die elektrische Leitfähigkeit.

Gleichung (12.1) sagt uns, dass der Stoffmengenstrom von der hohen zur niedrigen Stoffmengendichte fließt, Gleichung (12.2) sagt aber nicht, dass der elektrische Strom von der hohen zur niedrigen Ladungsdichte fließt. Das mag zwar manchmal der Fall sein, aber eben nur manchmal.

Was den Stoffmengenstrom betrifft, so ist zwar in bestimmten Fällen die Stoffmenge als Antriebsmaß brauchbar, nämlich immer, wenn das System, in dem der Strom fließt, homogen ist (abgesehen von der Inhomogenität der Stoffmengendichte) und wenn der diffundierende Stoff die allgemeine Gasgleichung befolgt. Allgemein aber ist das passende und zu den anderen Fällen auch formal analoge Antriebsmaß das chemische Potenzial  $\mu$ .

Statt Gleichung (12.1) hat man dann:

$$\vec{j}_n = -K \cdot \text{grad } \mu \quad (12.3)$$

In dieser Form gilt die Gleichung immer, d. h. nicht nur für ideale Gase und homogene Systeme (vorausgesetzt natürlich, dass kein weiterer Antrieb vorhanden ist, dass wir es also nicht mit gekoppelten Strömen zu tun haben).

Im Fall des idealen Gases ist

$$\mu = \mu_0 + RT \ln \frac{\rho_n}{\rho_{n0}}$$

und der Vorfaktor  $K$  in Gleichung (12.3) ist proportional zur Stoffmengendichte:

$$K = \frac{D \rho_n}{RT}$$

Aber wenn  $D$  unabhängig von der Stoffmengendichte ist, ist dann nicht Gleichung (12.1), wenigstens für ideale Gase, doch die einfachere, die schönere Gleichung? Die einfachere ja, die schönere nicht.

Denn wenn man die Gleichung so interpretiert, wie es vernünftig ist, nämlich, dass der Gradient den Antrieb für den Strom darstellt, so macht Gleichung (12.1) eine Aussage, die nicht ins Bild passt: Bei gegebenem Antrieb würde man nämlich erwarten, dass der Strom proportional zur Dichte der „strömenden Größe“ ist. Im elektrischen Fall (und auch im thermischen) ist das so. Die elektrische Leitfähigkeit in Gleichung (12.2) ist bekanntlich proportional zur Ladungsdichte der beweglichen Ladungsträger.

### Herkunft

Das 1. Fick'sche Gesetz, Gleichung (12.1), wurde 1855 veröffentlicht, also bevor Gibbs (1873) das chemische Potenzial einführte. Man sieht hier, ebenso wie an vielen anderen Stellen des physikalischen Lehrgebäudes: Einmal eingeführt, kann an einem Lehrinhalt nichts mehr verändert werden, er gehört zum Kanon.

### Entsorgung

Man führt das chemische Potenzial ein, eine anschauliche, gutmütige und universell brauchbare Größe. Dann lässt sich das Fick'sche Gesetz in der Form von Gleichung (12.3) schreiben und es hat damit eine hohe Übereinstimmung mit dem entsprechenden elektrischen Gesetz. Es steht übrigens sehr schön in Wikipedia: „Bei festgelegtem Druck  $p$  und festgelegter Temperatur  $T$  ist aus dem Blickwinkel der Thermodynamik der Gradient des chemischen Potenzials  $\mu$  die treibende Ursache des Stoffstroms.“

## 12.7 Der Antrieb von Stoffströmen – Stoffströme über Phasengrenzen hinweg

### Gegenstand

Stoffströme oder -transporte sind allgegenwärtige Vorgänge. Eine bestimmte Klasse solcher Transporte bildet die Diffusion. In Physikschulbüchern wird sie selten angesprochen – manchmal nur im Zusammenhang mit der Halbleiterdiode. In Chemiebüchern wird sie durchweg behandelt.

- 1 Man lernt etwa: „Diffusion ist das selbstständige Durchmischen zweier Stoffe. Diese Durchmischung erfolgt durch die ständige regellose Bewegung der Teilchen der Stoffe.“
- 2 Oder auch: „Ein Stoff diffundiert von Orten hoher zu Orten niedrigerer Teilchenzahldichte.“

### Mängel

Es ist schade, dass Stofftransporte, vor allem im Physikunterricht, so beiläufig abgetan werden. Dass ein Stoff (oder seine Teilchen) von selbst von der hohen zur niedrigen Konzentration gehen, gilt nur für den Sonderfall homogener Systeme. Tatsächlich kann es auch andersherum gehen.

Ein einfaches Experiment, das einen Stofftransport von der niedrigen zur hohen Konzentration („Teilchen-

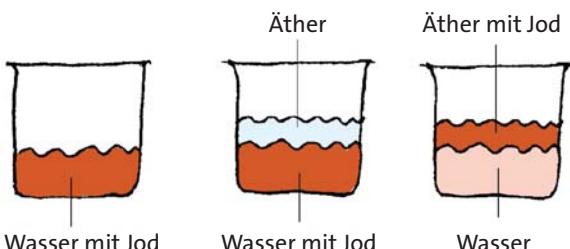


Abb. 12.1 Das Jod geht vom Wasser in den Äther, dem chemischen Potenzialgefälle folgend, aber gegen das Konzentrationsgefälle.

zahldichte“) zeigt, geht so (Abb. 12.1):

Man löst etwas Jod in Wasser; die Lösung ist braun. Man überschichtet nun mit etwas Äther; der Äther ist farblos. Röhrt man die beiden Flüssigkeiten kräftig durcheinander und wartet eine Weile, so trennen sie sich wieder und bilden dieselbe Schichtung wie vorher: oben der Äther, unten das Wasser – allerdings mit einem Unterschied: Jetzt ist der Äther dunkelbraun und das Wasser nur noch hellbraun. Das Jod ist jetzt zum

größten Teil im Äther gelöst. Es ist zunächst mit, dann aber gegen das Konzentrationsgefälle vom Wasser in den Äther gegangen. In diesem Endzustand ist sein chemisches Potenzial im Äther und im Wasser gleich, obwohl die Konzentration im Äther höher ist.

Man sieht: Nicht ein Konzentrationsgefälle ist das für einen Stofftransport entscheidende Antriebsmaß, sondern das chemische Potenzialgefälle. Konzentrationsgefälle und chemisches Potenzialgefälle können in Sonderfällen durchaus korrelieren – aber eben nur in Sonderfällen.

Wenn man diese Regel, die weiß Gott nicht kompliziert ist, kennt, so eröffnet sich die Möglichkeit, viele Erscheinungen zu erklären, die man sonst eher nur beschreibt.

- Wie können die Fische über ihre Kiemen atmen? Wie kommt es, dass Sauerstoff im Wasser ist? Was hat er dort überhaupt zu suchen? Wird er durch die Fische nicht nach und nach verbraucht? Zwischen dem Sauerstoff im Wasser und dem in der Luft besteht in guter Näherung chemisches Gleichgewicht: Das chemische Potenzial des Sauerstoffs im Wasser ist gleich dem in der Luft. Wenn die Fische welchen verbrauchen, kommt aus der Luft neuer Sauerstoff nach. Es ist also immer Sauerstoff im Wasser, die Fische brauchen sich keine Sorgen zu machen.
- Warum geht der Sauerstoff in der Lunge aus der Luft ins Blut? Weil sein chemisches Potenzial in der Luft ( $-3,88 \text{ kJ/mol}$ ) höher ist als im Blut, das durch die Lungenarterien in die Lunge eintritt ( $-7,30 \text{ kJ/mol}$ ). Dadurch steigt das Potenzial im Blut, sodass es beim Austritt in die Lungenvenen  $-5,03 \text{ kJ/mol}$  beträgt.
- Man öffnet eine Flasche, die Mineralwasser mit Kohlensäure enthält, aber nur etwa halb voll ist, bläst das  $\text{CO}_2$ , das sich oberhalb des Wassers befindet weg, verschließt die Flasche wieder und schüttelt. Wenn man sie wieder öffnet, zischt es, denn es hat sich ein Überdruck aufgebaut, weil  $\text{CO}_2$  aus dem Wasser in den Gasraum ausgetreten ist. Die Konzentration in der Gasphase ist höher als in der flüssigen. Welches war der Antrieb für diesen Stofftransport? Wieder die chemische Potenzialdifferenz.

Es ist die Stärke des chemischen Potenzials, dass es nicht nur die Diffusion innerhalb homogener Phasen, sondern auch den Stofftransport unter beliebig komplizierten Randbedingungen beschreibt. Und nicht nur das: Auch die Richtung, in die eine chemische Reaktion läuft, wird durch das chemische Potenzial bestimmt, dieselbe Größe, die auch für die Diffusion, für jeden Phasenübergang und für jeden Stofftransport über eine Phasengrenze hinweg zuständig ist.

### Herkunft

- Das chemische Potenzial ist eine der einfachsten, anschaulichsten Größen überhaupt. Trotzdem hatte es ein schweres Schicksal. In der Chemie, weil man sich dort nun mal in die unanschaulichen thermodynamischen Potenziale verliebt hat, d.h. die Legendre-Transformierten der Funktion  $U(n, V, S)$ . Während die Energie als Funktion der extensiven Größen noch eine recht anschauliche Funktion darstellt, sind die anderen, nämlich  $H, F, G$  und etliche weitere, so unanschaulich, dass man sich ihnen nur im Blindflug anvertrauen kann: d.h., man überlässt die Lösung des Problems der Mathematik und hofft, dass das Ergebnis stimmt.
- Dass das chemische Potenzial von den Physikern nicht gemocht wird, hat vielleicht noch einen anderen Grund: Es hat den falschen Namen. Warum soll ein Physiker eine Größe mit einem solchen Namen verwenden?

### Entsorgung

Etwas salopp gesagt: So wie man das elektrische Potenzial einführt als Energie pro Ladung oder die absolute Temperatur als Energie durch Entropie, so kann man auch das chemische Potenzial einführen als Energie pro Stoffmenge. Es passt völlig in das Bild, das man auch anderswo verwendet.

Austauschs von  $X$  im Gleichgewicht. Es gibt also kein Gleichgewicht schlechthin, sondern nur Gleichgewichte bezüglich des Austauschs der einen oder anderen extensiven Größe. Entsprechend benennt man auch die Gleichgewichte. Zwei Systeme, die Entropie austauschen können, befinden sich im „thermischen Gleichgewicht“, wenn die Temperaturen der Teilsysteme gleich sind, wenn also  $T_A = T_B$  ist. Zwei Systeme, die elektrische Ladung austauschen können, befinden sich im „elektrischen Gleichgewicht“, wenn ihr elektrisches Potenzial gleich ist, d.h., wenn  $\varphi_A = \varphi_B$  ist. Zwei Körper, die bei einem Reibungsvorgang Impuls austauschen, tun das solange, bis ihre Geschwindigkeiten gleich geworden sind, d.h.  $v_A = v_B$ , bis also „Geschwindigkeitsgleichgewicht“ herrscht. Wenn sich bei einer chemischen Reaktion die Mengen der Stoffe  $A(1), A(2), A(3), \dots$  auf Kosten der Stoffmengen von  $B(1), B(2), B(3), \dots$  ändern können, so sind die Stoffe der einen Seite der Reaktionsgleichung mit denen der anderen Seite im „chemischen Gleichgewicht“, wenn die Summe der chemischen Potenziale der Stoffe  $A(i)$  gleich der Summe der chemischen Potenziale der Stoffe  $B(k)$  ist, wenn also  $\sum \mu_{A(i)} = \sum \mu_{B(k)}$  ist.

Stellt man das chemische Gleichgewicht in einen größeren Rahmen, so wie wir es hier getan haben, so sieht man, dass der Nachdruck, mit der man sagt, dass es sich um ein „dynamisches Gleichgewicht“ handele, nicht angebracht ist.

Betrachten wir zum Vergleich noch einmal das elektrische Gleichgewicht, um konkret zu sein, ein Stück Kupferdraht. Wir zerlegen den Draht in Gedanken in zwei Hälften A und B. Diese befinden sich gewiss im elektrischen Gleichgewicht. Es ist nun üblich und sinnvoll zu sagen, dass zwischen den Teilen kein elektrischer Strom fließt. Wenn man aber den Zustand so beschreibt, wie die Chemie das chemische Gleichgewicht, so dürfte man nicht sagen, dass hier kein elektrischer Strom fließt, denn es gibt eine ständige Bewegung der Elektronen in beide Richtungen, von A nach B und von B nach A, was bei einem Kupferdraht von  $1 \text{ mm}^2$  Querschnittsfläche bei Normaltemperatur einem Strom von etwa  $10^8 \text{ A}$  nach links und einem gleich großen Strom nach rechts entspricht. Entsprechend würde man auch nicht sagen, dass bei Windstille die Luft ruht, sondern dass man einen Massenstrom von etwa  $100 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  nach rechts und einen ebenso großen nach links hat, und auch nach oben, unten, vorn und hinten. Das Entsprechende gilt für thermische Gleichgewichte, bei denen ein Strom von Phononen in beiden Richtungen fließt oder beim Geschwindigkeitsgleichgewicht, bei dem ein anhaltender mikroskopischer Impulstransport in beide Richtungen stattfindet.

## 12.8 Chemisches Gleichgewicht

### Gegenstand

„Das dynamische Gleichgewicht liegt ... stets dann vor, wenn in einem System zwei entgegengesetzt verlaufende Prozesse sich in ihrer Wirkung gerade aufheben. Der Gleichgewichtsbegriff in der Chemie ist somit typischerweise dynamisch zu verstehen.“

### Mängel

Wir betrachten zwei Teilsysteme A und B. Es gibt verschiedene Arten von Gleichgewichten, nämlich so viele, wie es extensive Größen  $X$  gibt, die A und B untereinander austauschen können. (Dabei ist die Energie, die bei jedem Austausch sowieso mit ausgetauscht wird, nicht mitzuzählen). Zu jeder dieser extensiven Größen  $X$  gehört eine „energiekonjugierte“ intensive Größe  $\xi$ . Wenn nun die Systeme A und B die extensive Größe  $X$  austauschen können, so kommt dieser Austausch zum Stillstand, wenn die zugehörige intensive Größe an A und B denselben Wert erreicht hat, wenn also  $\xi_A = \xi_B$  ist. Die beiden Systeme sind bezüglich des

Gewiss, es ist nichts verkehrt daran, das Geschehen auf der mikroskopischen Ebene zu betrachten. Aber erstens zeichnet sich das chemische Gleichgewicht in dieser Hinsicht nicht von anderen Gleichgewichten aus, bei denen niemand betont, dass das entsprechende Gleichgewicht ein „dynamisches“ sei, und zweitens hebt man etwas hervor, was leicht zu Fehlschlüssen führt. Wenn man den stromlosen Zustand eines Kupferdrahtes durch zwei gegenläufige Ströme beschreibt, müsste sich dann der Draht nicht erwärmen? Entsprechend könnte man fragen, warum denn die beiden gegenläufigen chemischen Reaktionen nicht dissipativ sind. Natürlich ist dieses Problem hausgemacht. Man mischt die Argumente von zwei Erklärungsebenen, der mikroskopischen und der makroskopischen.

### Herkunft

Die Beschreibung chemischer Reaktionen auf der einfachen, phänomenologischen Ebene mithilfe des chemischen Potenzials hat sich nie richtig durchgesetzt. Das ist anders in der Physik, wo es selbstverständlich ist, einen Wärmetransport zunächst als durch ein Temperaturgefälle verursacht zu beschreiben oder einen elektrischen Strom durch ein elektrisches Potenzialgefälle. Die mikroskopische Deutung dieser Vorgänge geschieht erst im Anschluss im Rahmen der Atom- und Festkörperphysik. In der Chemie beginnt man gleich auf der verwickelteren molekularkinetischen Ebene, auf der die einfachen und eleganten Größen der Thermodynamik eine komplizierte Interpretation erfahren.

### Entsorgung

Man sagt, dass im chemischen Gleichgewicht die Reaktion zum Stillstand gekommen ist. Das hindert einen nicht daran, dass man bei einer fortgeschrittenen Beschreibung auf der molekularkinetischen Ebene das ständige Hin und Her der Reaktion anspricht. Genauso, wie man beim elektrischen Gleichgewicht sagt, der elektrische Strom habe aufgehört zu fließen, was einen auch nicht daran hindert, in der Festkörperphysikvorlesung die Stromlosigkeit mithilfe der Symmetrie der Fermifläche mikroskopisch zu erklären.

## 12.9 Elektrochemische Zellen

### Gegenstand

Elektrochemische Zellen sind neben Generatoren die wichtigsten elektrischen Energiequellen. Historisch waren sie bekanntlich die ersten technischen elektrischen Energiequellen. Es besteht sicher kein Zweifel darüber,

dass ihre Funktionsweise im Schulunterricht behandelt werden sollte.

### Mängel

Im Physikunterricht kommen sie nicht vor. Warum nicht? Die Meinung der Physiklehrer mag sein: „Es gibt nicht viel zu verstehen. Es geht nur darum, den Ablauf der Reaktionen an den Elektroden auswendig zu lernen, und das für die verschiedensten Realisierungen solcher Zellen. Also typisch Chemieunterricht.“

Der Eindruck, den man bekommt, wenn man ein Chemiebuch konsultiert, scheint dieser Einschätzung Recht zu geben. Man wird mit so vielen Einzelheiten und Fachausdrücken versorgt, dass man am Ende außerstande ist zu erkennen, dass die eigentliche Frage, nämlich die Frage nach der Funktionsweise, gar nicht beantwortet wurde – ein Vorgehen, dass wir Naturwissenschaftler sonst doch so gern den Geisteswissenschaftlern vorwerfen. Diejenige Größe, mit deren Hilfe man alle Zellen gemeinsam erklären könnte, ohne auf die Einzelheiten eingehen zu müssen, nämlich das chemische Potenzial, wird weder im Physik- noch im Chemieunterricht eingeführt.

Und das Thema gehört nicht nur in den Chemieunterricht. Es gehört in den Physikunterricht erstens, weil die elektrochemische Zelle mit Methoden erklärt werden kann, die typisch für den Physikunterricht sind, und zweitens, weil es für das Verständnis auf die Einzelheiten der ablaufenden Reaktionen nicht ankommt.

Ein Vergleich mit der Behandlung der anderen großen Klasse von elektrischen Energiequellen ist angebracht. Wir behandeln den Generator, indem wir das Grundprinzip anhand eines einfachen Modellexperiments zeigen. Man sieht und versteht den Effekt, der in allen Generatoren ausgenutzt wird. Wie ein technischer Generator gebaut sein kann – es gibt auch hier unzählige Varianten – wird höchstens angedeutet. Ähnlich sollte man bei der Behandlung der elektrochemischen Zellen verfahren. Das Funktionsprinzip sollte im Vordergrund stehen.

### Herkunft

Die Nichtbenutzung des chemischen Potenzials.

Die Gibbs'sche Fundamentalgleichung

$$dE = T dS - p dV + v dp + \mu dn + \varphi dQ + \dots$$

sagt uns, welche physikalischen Größen man braucht, um Energieumsetzungen – auch auf einem elementaren Niveau – quantitativ zu beschreiben: die thermodynamischen Größen Temperatur  $T$ , Entropie  $S$ , Druck  $p$  und Volumen  $V$ , die mechanischen Größen Geschwin-

## Elektrochemische Zellen

digkeit  $v$  und Impuls  $p$ , die stoffphysikalischen Größen Stoffpotenzial (chemisches Potenzial)  $\mu$  und Stoffmenge  $n$ , die elektrischen Größen elektrisches Potenzial  $\varphi$  und elektrische Ladung  $Q$ , usw. Nun hat es sich ergeben, dass man zwei dieser Größen nicht benutzt, gerade so als seien sie mit einem Tabu belegt: die Entropie und das chemische Potenzial. Der Preis, den man dafür zahlt, ist allerdings hoch: Entweder man behilft sich mit umständlichen Ersatzkonstruktionen, — siehe etwa die Enthalpie (statt der Entropie) als Wärmemaß, das nicht so ganz passen will, oder die Energieentwertung als Ersatz für die Entropieproduktion — oder man klammert das Thema, zu dessen Behandlung man die Größen brauchte, einfach aus — siehe die Funktionsweise der elektrochemischen Zelle.

### Entsorgung

Wer keine Angst vor dem chemischen Potenzial  $\mu$  hat, erklärt die Zelle etwa so:

Die Stoffe A und B können miteinander reagieren zu C:



Die Reaktion hat einen Reaktionsantrieb

$$\Delta\mu = (\mu_A + \mu_B) - \mu_C.$$

Die chemischen Potenziale der Einzelstoffe sind tabelliert. Wenn die Stoffmenge  $n$  umgesetzt wird, so wird dabei die Energie

$$\Delta E = \Delta\mu \cdot n$$

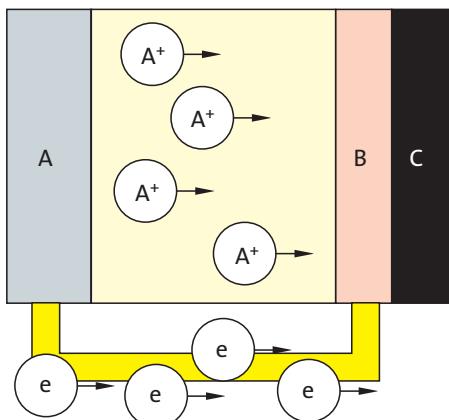


Abb. 12.2  $A^+$  fließt den chemischen Potenzialberg hinunter und den elektrischen Potenzialberg hinauf.

umgesetzt. In der elektrochemischen Zelle wird diese Energie elektrisch abgegeben. Wie funktioniert die Zelle?

Sind die Edukte A und B, Abb. 12.2, räumlich voneinander getrennt, so können sie nicht reagieren. Die Reaktion hat einen unendlich hohen Reaktionswiderstand, ähnlich wie zwischen zwei Körpern auf unterschiedlichem elektrischem Potenzial kein Strom fließt, solange keine leitende Verbindung vorhanden ist. Wenn A ein Gas ist, und wir die Behälter von A und B durch ein Rohr verbinden, so fließt A nach B, und die Reaktion kann laufen. Die ganze Energie, die aufgrund der Reaktion zur Verfügung steht, wird allerdings zur Wärmeerzeugung verwendet oder verschwendet. Wir stellen nun eine Verbindung besonderer Art her, siehe Abb. 12.2. A und B werden nicht durch einen, sondern durch zwei Leitungen miteinander verbunden. Die eine, zum Beispiel eine Salzlösung (der sogenannte Elektrolyt), ist nur durchlässig oder „leitfähig“ für  $A^+$ -Ionen, und nicht für Elektronen, die andere, etwa ein Kupferdraht, ist durchlässig für Elektronen und nicht für  $A^+$ -Ionen. A kann nun zu B gelangen, indem es sich trennt in  $A^+$  und e.  $A^+$  geht durch die eine Leitung, e durch die andere. Bei B angekommen, vereinigen sich  $A^+$  und e wieder und reagieren mit B zu C. Wieder dient die ganze zur Verfügung stehende Energie zunächst nur der Wärmeerzeugung. Wir können nun aber den einen der beiden Ströme, nämlich den e-Strom, etwas antreiben lassen. Wir zapfen damit die verfügbare Energie ab. (Wenn es technisch geschickt wäre, könnte man die Energie auch aus dem  $A^+$ -Strom herausziehen.)

Diese herausgezogene Energie lässt sich auch durch Spannung  $\Delta\varphi$  und Ladung  $Q$  ausdrücken. Es ist also:

$$\Delta\varphi \cdot Q = \Delta\mu \cdot n.$$

Da  $Q = z \cdot F \cdot n$  ist ( $z$  ist eine von der Natur der Reaktion abhängige kleine ganze Zahl,  $F$  die Faradaykonstante), erhält man die Spannung der Zelle zu

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\mu}{z \cdot F}.$$

Zusammenfassend können wir die Funktionsweise der elektrochemischen Zelle so beschreiben: Die elektrische Ladung muss in einer elektrischen Stromquelle den elektrischen Potenzialberg hinauffließen, also ihrem eigenen, natürlichen Antrieb entgegen. Damit sie das tut, brauchen die Ladungsträger einen anderen Antrieb. Das ist beim elektrochemischen Element eine chemische Potenzialdifferenz. Für den Ladungsträgerfluss in der Zelle geht es den „elektrischen Potenzialberg“ hinauf, den „chemischen Potenzialberg“ aber hinunter.

## 12.10 Elektrolyten und dotierte Halbleiter

### Gegenstand

Ein Elektrolyt, so lernt man, ist ein Stoff, der zersetzt wird, wenn ein elektrischer Strom durch ihn hindurchfließt.

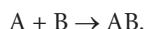
- 1 „Ein Elektrolyt ist ein Stoff, der mindestens teilweise ionisiert ist, dadurch den elektrischen Strom leitet, und sich dabei zersetzt.“
- 2 „Lösungen, die wie die Salzsäure den Strom leiten und dabei zerlegt werden, heißen Elektrolyte.“
- 3 „Es gibt leitende und nichtleitende, also dissoziierende und nicht dissoziierende Flüssigkeiten. Die Leiter heißen Elektrolyte. Sie werden von dem sie durchfließenden Strom zersetzt.“

### Mängel

Bei der elektrolytischen Zersetzung eines Stoffes, der Elektrolyse, fließt durch den zu zerlegenden Stoff, der als Lösung oder als Schmelze vorliegt, ein elektrischer Strom. Man nennt den Stoff einen Elektrolyten und die Bezeichnung ist in diesem Fall sinnvoll (λύσις „Lösung, Auflösung, Beendigung“).

Unpassend ist sie dagegen, wenn man das Medium zwischen den Elektroden einer galvanischen Zelle als Elektrolyten bezeichnet und dabei daran appelliert, dass der Stoff zersetzt wird, denn hier geht es nicht um die Zersetzung eines Stoffes. Seine Rolle ist vielmehr die eines „selektiven Leiters“. Er muss leitfähig sein für bestimmte Ionen, und er darf nicht leitfähig sein für Elektronen. Die unglückliche Bezeichnung ist wohl einer der Gründe dafür, dass kaum ein Student der Physik die Funktionsweise der galvanischen Zelle verstanden hat.

Hier in wenigen Worten, wie die galvanische Zelle funktioniert: Man nutzt das chemische „Potenzialgefälle“ einer Reaktion mit zwei Edukten A und B, um eine elektrische Potenzialdifferenz zu erzeugen. Wir schreiben die Reaktion



Die Zelle ist so gebaut, dass die Reaktion zunächst nicht ablaufen kann, weil die Stoffe A und B räumlich voneinander getrennt sind. A kann zwar zu B gelangen, aber nur dadurch, dass es sich aufspaltet in positive A-Ionen und in Elektronen



und dass  $A^+$  und  $e^-$  auf getrennten Wegen zu B gelangen. Die  $A^+$ -Ionen gehen über den Ionenleiter (den

„Elektrolyten“) zu B. Die Elektronen gehen über den äußeren Teil des Stromkreises, d.h. meist durch einen Kupferdraht zu B. In diese äußere Leitung ist der elektrische Energieverbraucher eingebaut.

Worauf es ankommt, ist also, dass der als Elektrolyt bezeichnete Stoff leitfähig ist für die Ionen  $A^+$  und nicht leitfähig für Elektronen.

Derselbe Mechanismus wird in Solarzellen ausgenutzt: Die eine Seite des Halbleiters ist nur für Elektronen, nicht aber für Löcher (Defektelektronen), die andere nur für Löcher, nicht aber für Elektronen leitfähig. Die durch das Licht in hoher Konzentration (mit hohem chemischem Potenzial) erzeugten Elektronen und Löcher haben die Tendenz, den Ort ihrer Erzeugung zu verlassen. Die Elektronen können wegen der selektiven Leitfähigkeit nur über den n-Leiter, die Defektelektronen nur über den p-Leiter entkommen. Auch hier macht man sich die selektive Leitfähigkeit von zwei Stoffen zunutze. Obwohl die Rolle, die das n- und das p-Material spielen, dieselbe ist wie der Elektrolyt der galvanischen Zelle, spricht man hier nicht von Elektrolyten.

### Herkunft

Wie andere Spezialgebiete, so hat sich auch in der Elektrochemie ein Jargon entwickelt, der für die Fachleute durchaus nützlich ist, der aber beim Erlernen der Materie durch Anfänger zu Schwierigkeiten führen kann.

### Entsorgung

Den Stoff zwischen den Elektroden vorstellen als Leiter für Ionen und Nichtleiter für Elektronen, ebenso wie der Kupferdraht des äußeren Teils des Stromkreises für Elektronen leitfähig ist und für Ionen nichtleitfähig sein muss. Entsprechend charakterisiert man einen n-Halbleiter als einen Stoff, der für Elektronen leitfähig und für Defektelektronen isolierend ist, und entsprechend den p-Leiter. Von Elektrolyse erzählt man in diesem Zusammenhang nichts, und man vermeidet auch besser die Bezeichnung Elektrolyt.