

Die Bilanzgleichungen für Energie, Impuls und Entropie

Wie sie entstanden sind und wie man im Unterricht mit ihnen umgeht

FRIEDRICH HERRMANN

Der historische Prozess der Konstruktion einer mengenartigen Größe ging in den meisten Fällen in zwei Schritten vor sich. Zuerst wurde eine globale Erhaltung entdeckt: Wenn der Wert der Größe X an einem System A abnimmt, so nimmt er an einem anderen System B zu. Erst später wurde es möglich, die Erhaltung lokal zu formulieren. Dieser Ablauf lässt sich deutlich erkennen bei der Energie, dem Impuls und der Entropie. Die heutige Sprache der Physik ist in allen drei Fällen im Wesentlichen noch dieselbe wie zu der Zeit, als man die lokale Bilanzierbarkeit noch nicht kannte.

1 Einleitung

Es gibt physikalische Größen mit der Eigenschaft, dass sie die Menge von etwas messen: Der Impuls misst die Menge an Bewegung, die Masse ist ein Mengenmaß der Trägheit, die Entropie ein Mengenmaß für die Wärme (in einem verbreiteten umgangssprachlichen Sinn) (JOB & RÜFFLER, 2011); einige andere, wie die Energie und die elektrische Ladung sind Mengenmaße für etwas, wofür wir keine unmittelbare Anschauung haben. Man nennt diese Größen mengenartige Größen, extensive Größen oder Quantitätsgrößen.

Wenn man mit einer mengenartigen Größe umgeht, tut man etwas, was man als »bilanzieren« bezeichnen kann. Man bringt die Änderung des Wertes der Größe an einem System in Verbindung mit den Zu- oder Abgängen, sowie mit der Erzeugung oder Vernichtung der gemessenen Menge.

Bilanzieren ist eine einfache Tätigkeit. Was man dazu an Mathematik braucht, ist nur Addieren und Subtrahieren. Jedes Kind kann bilanzieren und tut es auch beim Umgang mit Dingen des täglichen Lebens: mit Menschen, mit Wasser, mit Sand oder Gummibärchen, aber auch mit abstrakten Konzepten wie Geld. Im Physikunterricht der Schule (und auch in der Hochschulphysik) wird diese einfache Eigenschaft der extensiven Größen nicht in jedem Fall deutlich, und das heißt, man profitiert nicht immer davon. Nur Masse und elektrische Ladung behandelt man konsequent so, dass der Mengencharakter zum Ausdruck kommt und ausgenutzt wird.

Obwohl man mit der Energie im täglichen Leben längst wie mit einer Handelsware umgeht, ist es in der Physik immer noch üblich, eine Sprache zu verwenden, die einer Einsicht in den Mengencharakter der Größe im Weg steht; etwa wenn man bei einem mechanischen Energietransport sagt, es werde Arbeit verrichtet, oder wenn man von der Leistung eines Geräts spricht, statt vom Energiestrom, der zum Gerät hin (und auch wieder weg) fließt.

Was den Impuls betrifft, so behandelt man ihn im Zusammenhang mit Stoßversuchen durchaus wie eine Menge von etwas, das übertragen wird. Den Übertragungsvorgang selbst versteckt man aber im so genannten Wechselwirkungsgesetz, das so formuliert ist, dass sich die Frage, auf welchem Weg der Impuls von einem Körper zum anderen gelangt, gar nicht erst stellt.

Noch schlechter sieht es bei der Entropie aus. Wenn man sie einführt als Maß für den Wert der Energie, als Maß für die Irreversibilität eines Vorgangs oder als Maß für die mikroskopische Unordnung, so entsteht gewiss nicht die Vorstellung einer bilanzierbaren Größe.

Warum kommen die einfachen Eigenschaften dieser drei Größen – Energie, Impuls und Entropie – nicht zum Zuge? Die Antwort auf die Frage findet man in ihrer Genesis. Alle drei haben eine bewegte, von Missgeschicken geprägte Geschichte. Dabei ist eine Sache auffällig. Obwohl die Entstehungsgeschichte mehrere hundert Jahre zurückreicht und für die drei Größen sehr unterschiedlich war, wurde der Nachweis, dass sie mengenartig sind, innerhalb eines Zeitintervalls von weniger als 30 Jahren erbracht, nämlich etwa zwischen 1884 und 1911, also innerhalb einer einzigen Forschergeneration. Es fand damals ein regelrechter Durchbruch statt. Offenbar war die Zeit reif.

Im Folgenden wird zunächst erklärt, was man unter einer Bilanzgleichung versteht. Dann wird die Entstehungsgeschichte der drei Größen kurz nachgezeichnet. Schließlich wird der Umgang mit ihnen im heutigen Physikunterricht kritisch beleuchtet.

2 Bilanzgleichungen

Für jede mengenartige Größe X gilt eine Gleichung der Form (FALK, 1990)

$$\frac{dX}{dt} = I_X + \Sigma_X \quad (1)$$

Man interpretiert die Beziehung folgendermaßen: Die zeitliche Änderung von X , ausgedrückt durch dX/dt , kommt auf zwei Arten zustande:

- durch Zu- oder Wegstrom, ausgedrückt durch die Stromstärke I_X ;
- durch Erzeugung oder Vernichtung, ausgedrückt durch die Erzeugungsrate Σ_X (erzeugte Menge durch Zeit).

Falls X »vernichtet« wird, ist Σ_X negativ. Wir nennen Gleichung (1) die Bilanzgleichung von X .

Wenn der Sigma-Term für eine Größe X immer null ist, ist X eine Erhaltungsgröße. Die Bilanzgleichung lautet dann:

$$\frac{dX}{dt} = I_X \quad (2)$$

Die Menge X kann sich in diesem Fall nur durch Zu- oder Wegstrom ändern.

Die Gleichungen (1) und (2) machen eine Aussage über einen Raumbereich. Dabei beziehen sich dX/dt und Σ_x auf das Innere des Bereichs, I_x dagegen auf seine Oberfläche. Die Gleichungen sind daher »integrale« Formulierungen der Bilanz von X . Man kann eine Bilanz auch »lokal« ausdrücken, d. h. mit Größen, die sich auf einen Punkt beziehen:

$$\frac{d\rho_x}{dt} + \operatorname{div} \vec{j}_x = \sigma_x \quad (3)$$

Hier ist ρ_x die räumliche Dichte von X , \vec{j}_x ist die Stromdichte (Stromstärke durch Fläche) und σ_x ist die Erzeugungsrates durch Volumen. Gleichung (1) folgt aus Gleichung (3) durch Integration über das Volumen. Dass der Stromterm in den Gleichungen (1) und (3) einmal rechts und einmal links vom Gleichheitszeichen steht, hängt damit zusammen, dass es sich eingebürgert hat, im ersten Fall den Strom positiv zu zählen, wenn er in das System hineinfließt und im zweiten, wenn er herausfließt.

Eine Beziehung der Gestalt von Gleichung (3) nennt man auch Kontinuitätsgleichung. Wir sehen also: »Kontinuitätsgleichung« und »lokale Bilanzgleichung« sind zwei Namen für dieselbe Sache.

Für den Fall, dass X die elektrische Ladung ist, sieht die lokale Bilanzgleichung so aus:

$$\frac{d\rho_Q}{dt} + \operatorname{div} \vec{j}_Q = 0 \quad (3)$$

Hier ist ρ_Q die elektrische Ladungsdichte und \vec{j}_Q die elektrische Stromdichte. Der Erzeugungsterm ist null, denn die elektrische Ladung ist eine Erhaltungsgröße.

3 Die vorläufigen Bilanzgesetze

Eine physikalische Größe »entsteht« nach und nach. Wir neigen zwar dazu, bei einer Größe nach ihrem Erfinder oder Entdecker zu fragen, und glauben auch manchmal, einen solchen ausmachen zu können: Die Energie stammt von MAYER und JOULE, die Entropie von CLAUSIUS, der Impuls von HUYGENS, die elektrische Ladung von FRANKLIN. Es handelt sich dabei um Forscher, die einen wichtigen Beitrag zur »Konstruktion« der Größe geleistet haben, aber die Entstehungsgeschichte beginnt in allen diesen Fällen sehr viel früher, und sie war auch mit den Beiträgen der genannten Wissenschaftler nicht beendet.

Bei den mengenartigen Größen lief nun die historische Entwicklung in mehreren Fällen so, dass die Größe zunächst eingeführt wurde, ohne dass ihre lokale Bilanzierbarkeit zu erkennen war oder bestätigt werden konnte. Man führte eine Größe X ein, von der man zunächst nur wusste, dass die Summe ihrer Werte an zwei Systemen A und B entweder konstant ist, oder, wie im Fall der Entropie, konstant ist oder zunimmt:

$$X_A + X_B = \text{const},$$

bzw.

$$X_A + X_B = \text{const oder nimmt zu}$$

Es fällt auf, dass in einer solchen Formulierung kein Strom vorkommt. Man machte also keine Aussage darüber, was außerhalb der Systeme A und B geschieht, d. h. welche Rolle das Medium zwischen A und B bei dem betrachteten Vorgang spielt.

Im Prinzip ließ diese Darstellung eine Fernwirkungsdeutung zu. Nehmen wir an, X nehme in System A zu und in B um denselben Betrag ab. Man brachte nun zum Ausdruck, dass der bei A fehlende Betrag bei B anzutreffen sei, konnte aber nicht sagen, auf welche Art oder auf welchem Weg die Übertragung von A nach B erfolgt ist, ja ob überhaupt ein solcher Transport stattgefunden hat. Natürlich ließ sich diese Konstanz nicht mit einer Kontinuitätsgleichung ausdrücken.

Wir wollen ein solches Gesetz, das nur die Konstanz der Gesamtmenge ausdrückt, ein *schwaches Bilanzgesetz* nennen. Ein Bilanzgesetz, bei dem der Transportvorgang mit einbezogen wird, nennen wir ein *starkes Bilanzgesetz*.

Nur wenn ein starkes Bilanzgesetz gilt, kann man den entsprechenden Vorgang mit einer Kontinuitätsgleichung beschreiben.

3.1 Der Impuls

Betrachten wir als erstes Beispiel den Impuls. Die Größe hat eine lange Geschichte, und man kann mit gutem Recht sagen, dass schon GALILEO, DÉCARTES und HUYGENS einfache Versionen des Impulserhaltungssatzes kannten. Wir beschränken uns hier auf die NEWTONSche Fassung, denn NEWTON war es, der sich mit dem Impulsaustausch mit Hilfe der Gravitation beschäftigte, und dies stellte das größte Problem bei der mathematischen Formulierung der Impulsbilanz dar.

NEWTON beschrieb das, was wir heute als Impulserhaltungssatz bezeichnen, mit Hilfe seiner drei Gesetze. Für uns ist im Augenblick das zweite Gesetz interessant. Es lautet im Original (NEWTON, 1687, 12):

»Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae, et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.«

Ins deutsche übersetzt etwa:

Die Änderung der Bewegung ist proportional zur eingprägten Kraft, und sie geschieht in der Richtung der Geraden, in der die Kraft wirkt.

Was NEWTON Bewegungsmenge oder auch kurz Bewegung nannte, bezeichnen wir heute als Impuls. Wir können also etwas moderner formulieren (wobei wir ausnutzen, dass Impuls und Kraft Vektoren sind):

Die Änderung des Impulses eines Körpers ist proportional zur Kraft, die auf den Körper wirkt.

Ohne der Aussage Gewalt anzutun, können wir das Gesetz auch in eine Formel gießen, gleich mit den heute üblichen Symbolen:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} \quad (4)$$

Da sich der Wert des Impulses auf einen Raumbereich bezieht, und da die Gleichung die Gestalt von Gleichung (2) hat, kann sie als Bilanzgesetz gelesen werden. Heißt das, dass NEWTON das Impulsbilanzgesetz im modernen Sinn schon hatte? Nein, das heißt es nicht. Der Gleichung sieht man es nicht an, wohl aber der verbalen Formulierung. Wenn es ein modernes Bilanzgesetz wäre, so würde NEWTON nicht von der »Änderung der Bewegung« (*mutatio motus*) und von der »eingprägten Kraft« (*vis motrix impressa*) sprechen, sondern von einem Fluss oder Transport der Bewegung. Das konnte er aber nicht, oder, wie wir gleich sehen werden, wollte er nicht. Wenn man \vec{F} als Stromstärke des Impulsflusses zwischen zwei Körpern A und B interpretiert, so bezieht sich der Wert auf etwas, was sich zwi-

schen den beiden Körpern befindet, genauer: auf eine Schnittfläche zwischen den beiden Körpern. Worauf bezieht sich aber die NEWTONSche Kraft? Wir haben es alle in der Schule und an der Universität gelernt: auf die Körper selbst, nämlich erstens den, der die Kraft ausübt und zweitens den, auf den sie ausgeübt wird.

Diese Art, über Gleichung (4) zu sprechen, ist eine raffinierte Erfindung NEWTONS; man kann sagen, es ist eine seiner Meisterleistungen. Die NEWTONSche Sprache ist so beschaffen, dass sie nur auf die beiden Körper Bezug nimmt; das Medium zwischen ihnen kommt nicht vor. Die Frage danach, welche Rolle ein solches Medium spielen könnte, stellt sich damit gar nicht. »A übt auf B eine Kraft aus«; von dem was dazwischen ist, also dem, was wir heute *Feld* nennen, kein Wort. Obwohl das Bilanzgesetz schon in seiner noch heute gebräuchlichen Form vorlag, war es noch kein starkes Bilanzgesetz.

Man könnte fragen: War denn NEWTON so naiv, dass er an Fernwirkungen glaubte? Hier wie er sich dazu äußert, in einem Anhang (General Scholium) zur zweiten Auflage seiner Prinzipia:

»Ich war bisher nicht in der Lage, den Grund dieser Gravitationseigenschaften aus den Phänomenen abzuleiten, und Hypothesen stelle ich nicht auf. Denn alles, was nicht aus den Phänomenen folgt, muss man als Hypothese bezeichnen; und Hypothesen, metaphysische oder physikalische, ..., haben keinen Platz in der experimentellen Philosophie.« (NEWTON, 1713)

Das »Hypoteses non fingo« im Originaltext könnte man auch so ins moderne Deutsch übertragen: »Ich spekuliere nicht.« NEWTON wollte nicht, dass sein streng aufgebautes Werk spekulative Elemente enthält.

Es ist eine ganz andere Frage, wie seine persönliche Überzeugung im Zusammenhang mit den Fernwirkungen war. Man erfährt sie aus einem Brief an den Gelehrten RICHARD BENTLEY:

»Dass die Schwere über eine Entfernung durch ein Vakuum ohne die Vermittlung von irgend etwas anderem ... wirken sollte, ist für mich eine solche Absurdität, dass ich glaube, dass niemand, der in philosophischen Dingen eine hinreichende Denkfähigkeit hat, darauf hereinfliegen könnte.« (NEWTON, 1756, 25)

Deutlicher könnte man es kaum sagen.

NEWTONS vorläufige Version der Bilanzgleichung blieb für mehr als 150 Jahre Stand der Wissenschaft.

In der Folge gesellten sich zu den bestehenden noch weitere mengenartige Größen hinzu, und für einige dieser Größen konnten zunächst auch nur schwache Bilanzgesetze formuliert werden.

3.2 Die Energie

Vorläufer der Energie, etwa die lebendige Kraft, die bewegende Kraft und die Arbeit, existierten schon vor 1841, dem Jahr, in dem ROBERT MAYER die Behauptung aussprach, dass Energie weder erschaffen, noch vernichtet werden kann, und das oft als Geburtsjahr der Energie betrachtet wird. Wieder war es so, dass man zunächst nur bestätigen konnte, dass die Zunahme des Wertes der neu eingeführten Größe in einem System mit der Abnahme in einem anderen verknüpft ist.

MAYER sagt es so (Abb. 1):

»Bei allen physikalischen und chemischen Vorgängen bleibt die gegebene Kraft eine konstante Größe.« (MAYER, 1874, 49)

Mit Kraft bezeichnet er das, was wir heute Energie nennen. Man konnte also wieder nur ein schwaches Bilanzgesetz formulieren.

Aber auch in diesem Fall bestand schon früh die Erwartung, dass die Energie auch lokal erhalten sein müsste. Diese noch nicht bestätigte Erwartung beschreibt der junge MAX PLANCK 1887 sehr schön in dem Büchlein »Das Prinzip der Erhaltung der Energie«:

»Man wird sich nun nicht mehr damit begnügen, den Zahlenwert der Energie des Systems zu kennen, sondern man wird versuchen, die Existenz der verschiedenen Arten der Energie an den verschiedenen Elementen des Systems im einzelnen nachzuweisen, und den Übergang ... zu anderen Elementen ebenso verfolgen, wie die Bewegung eines Quantums Materie im Raum. ... Gegenwärtig ist es jedenfalls Sache der physikalischen Forschung, diese Auffassung als die anschaulichste und fruchtbarste überall bis ins einzelne durchzubilden und ihre Konsequenzen an Hand der Erfahrung zu prüfen; ...« (PLANCK, 1887, 117–118).

Die noch bestehende Ungewissheit in diesem Zusammenhang äußert 1892 auch HEINRICH HERTZ:

»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.« (HERTZ, 1892, 234)

3.3 Die Entropie

Ähnlich, aber noch komplizierter verlief die Entwicklung bei der Entropie. Auch für die 1850 von CLAUDIUS eingeführte Größe galt zunächst nur eine schwache Bilanzaussage: die Entropie eines abgeschlossenen Systems oder die gesamte Entropie mehrerer Systeme bleibt gleich oder nimmt zu. In einem 1862 erschienenen Aufsatz schreibt CLAUDIUS (Abb. 2):

»Die algebraische Summe aller bei irgend einer Zustandsänderung vorkommenden Verwandlungen kann nur positiv oder als Grenzfall Null sein.« (CLAUDIUS, 1862, 91)

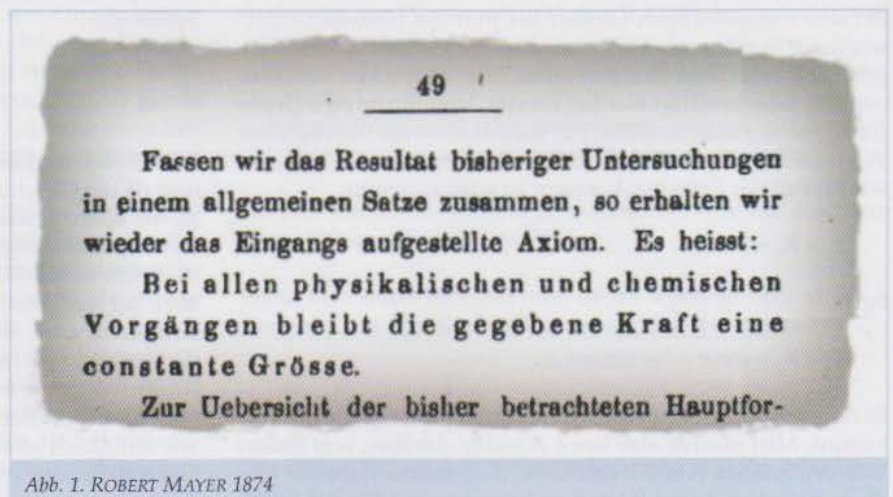


Abb. 1. ROBERT MAYER 1874

Der Satz, welcher im §. 1 nur für Kreisprocesse ausgesprochen und durch die Beziehung (1_a) dargestellt wurde, hat jetzt also eine allgemeinere Form gewonnen, und lässt sich folgendermaassen aussprechen:

Die algebraische Summe aller bei irgend einer Zustandsänderung vorkommenden Verwandlungen kann nur positiv oder als Grenzfall Null sein.

Abb. 2. RUDOLF CLAUDIUS 1862

Für das was CLAUDIUS hier »Verwandlung« nennt, führt er später den Namen Entropie ein. Von lokaler Bilanzierbarkeit ist hier noch nichts zu erkennen.

4 Der Durchbruch

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts existierten also drei schwache Bilanzgesetze. Schließlich ging es ihnen aber doch an den Kragen und sie wurden in recht rascher Folge zu lokalen Gesetzen.

Wir beginnen wieder mit dem Impuls. Das Problem war nicht die Impulsübertragung durch Materie. Wenn etwa Impuls von einem Körper A auf Körper B mit Hilfe einer Feder übertragen wird, so ist klar, dass der Transport über die Feder geschieht. Während der Impuls übertragen wird, ist die Feder gespannt. Man sieht ihr den Impulstransport an. Trotzdem sagte man aber nicht: »Durch die Feder fließt Impuls von A nach B«, sondern immer noch: »A übt auf B eine Kraft aus«.

Das Problem waren die Felder. Es hätte gelöst werden können mit der Entstehung der ersten Feldtheorie der Physik, der Elektrodynamik von FARADAY und MAXWELL.

1864 erschien MAXWELL's *Treatise on Electricity and Magnetism*, in dem er die mechanischen Spannungen im elektrischen und im magnetischen Feld angibt. Dort wo sich ein Feld befindet, ist das »Medium« gespannt, und diese Spannung konnte er für jeden Punkt aus den Feldstärken berechnen:

»Abstrahirt man aber von einer actio in distans und sucht die Einwirkung zweier electrischer Systeme [E₁ und E₂] aufeinander aus einem Zwange, der in gewisser Weise im Zwischenmedium verteilt ist, abzuleiten, so ist klar, dass man die ganze mechanische Wirkung von E₂ auf E₁ muss berechnen können, wenn man die Zwangskräfte in jedem Punkte einer Fläche s, welche E₁ von E₂ trennt, und E₁ ganz einschliesst, kennt.« (MAXWELL, deutsche Ausgabe 1883, 155).

Das wäre der Zeitpunkt gewesen, die alte, provisorische NEWTON'sche Sprechweise über Bord zu werfen: Die Kraft hätte man von nun an Impulsstromstärke, und die mechanische Spannung Impulsstromdichte nennen können. Aber daran hat offenbar zunächst niemand gedacht. Die alte, noch ganz auf Fernwirkungen zugeschnittene Sprache war fest etabliert, und diejenigen, die sie beherrschten, hatten sich an den Fernwirkungsmakel gewöhnt.

Die Wende kam, nachdem das Entsprechende bei der Energie geschafft war, der wir uns nun noch einmal zuwenden.

Bei der Energie bestand schon früh die Erwartung, dass sich Energiebilanzen lokal beschreiben lassen sollten. Das gelang schließlich auch, und zwar etwa zu der Zeit, als HERTZ noch seine Sorgen formuliert hatte: zunächst 1884 durch POYNTING, dann 1891 durch HEAVISIDE und schließlich 1898 in einer umfassenden Arbeit durch GUSTAV MIE, den wir hier zitieren wollen (Abb. 3):

»Satz von der Continuität der Energie. Alle Energieverschiebungen sind die Folgen wirklicher Energieströme.« (MIE, 1898, 1129).

Damit begann ein regelrechter Durchbruch der Auffassung, dass zu jeder mengenartigen Größe ein lokales Bilanzgesetz gehört. Nur zehn Jahre nach der Lokalisierung der Energie war der Impuls an der Reihe. 1908 formulierte MAX PLANCK, der 21 Jahre zuvor schon die lokale Formulierung der Energieerhaltung angemahnt hatte, auch die Impulserhaltung fernwirkungsfrei. In einem kurzen Aufsatz in der *Physikalischen Zeitschrift* heißt es (Abb. 4):

»Wie die Konstanz der Energie den Begriff der Energieströmung, so zieht notwendig auch die Konstanz der Bewegungsgröße den Begriff der »Strömung der Bewegungsgröße«, oder kürzer gesprochen: der »Impulsströmung« nach sich.« (PLANCK, 1908, 828).

Schließlich fehlte noch die Entropie. Mit der Entstehung der Thermodynamik der irreversiblen Prozesse in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde auch sie zu einer lokal bilanzierbaren Größe. 1911, also im selben Jahr, in dem CALENDAR zeigte, dass die von CLAUDIUS eingeführte Entropie identisch mit CARNOTS Caloricum ist, tritt auch der Entropiestrom auf die Bühne; zunächst noch etwas versteckt in einer umfangreichen, etwas schwer lesbaren Arbeit von G. JAUMANN (1911), und kurz darauf in einer Arbeit seines Schülers LOHR (1916), und zwar exakt in der Form von Gleichung (3).

Damit waren innerhalb von knapp 30 Jahren alle drei Größen zu lokal bilanzierbaren Größen geworden.

5 Wie die lokale Bilanzierung aufgenommen wurde

Die Genesis der Idee der lokalen Bilanzierbarkeit der drei betrachteten Größen war lang und mühsam, das Ergebnis dage-

Wie in 18. gezeigt, gilt dann der Satz.
Der wirkliche Energiestrom muss sich stets eindeutig bestimmen lassen.

Mit Hilfe dieses Begriffes lassen sich die in den vorhergehenden Paragraphen getrennt ausgesprochenen vier Energieprincipe zu dem folgenden Satze vereinigen:

Satz von der Continuität der Energie.

Alle Energieverschiebungen sind die Folgen wirklicher Energieströme.

Ich bemerke dabei ausdrücklich, dass die Ähnlichkeit

Abb. 3. GUSTAV MIE 1898

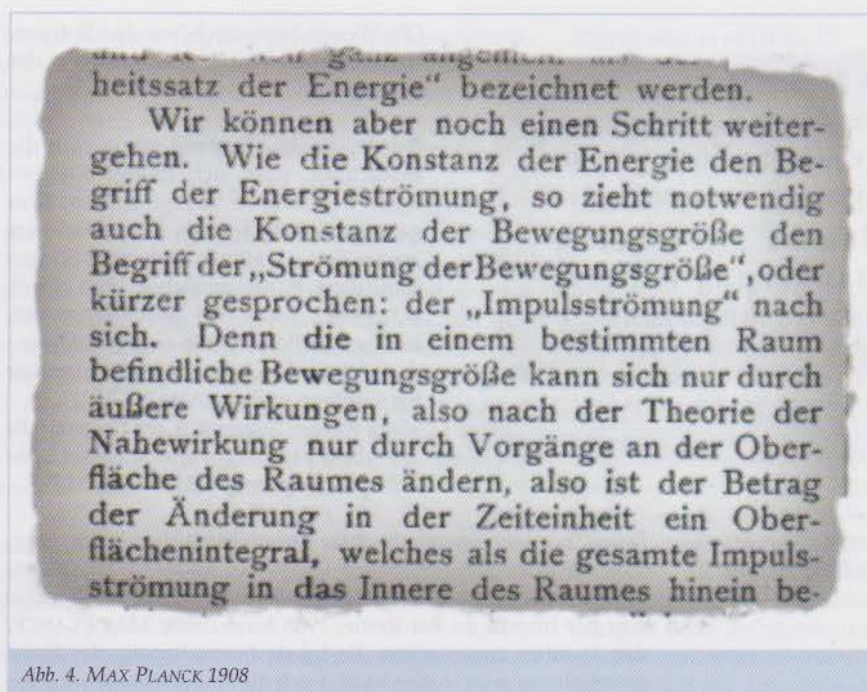


Abb. 4. MAX PLANCK 1908

gen sehr einfach. Alle drei Größen sind von ihrer Struktur her einfacher, als man zunächst vermutet hatte.

Wie gehen wir aber heute mit ihrer lokalen Bilanzierung um? Nützen wir die Vorteile der Bilanzierbarkeit? Ganz und gar nicht. Es ist als wäre der Zustand dieses Teils der Physik vom Jahr 1890 eingefroren.

Wieder gehen wir die drei Größen durch.

Der Impuls

Wir sagen immer noch nicht, der Impuls gehe von der Erde zum Mond, sondern noch wie zu NEWTONS Zeit: Die Erde übt auf den Mond eine Kraft aus.

Die nicht genutzten Vorteile der Einführung des Impulses als lokal bilanzierbare Größe sind:

1. Sie bringt die Mechanik in eine Form, die unseren heutigen Vorstellungen einer Theorie entsprechen: Die Sprache der Impulsstrommechanik enthält keine Formulierungen mehr, die auf Fernwirkungen hindeuten.
2. Sie bringt die Mechanik in eine Form, die dieselbe Struktur hat, wie andere Teilgebiete der Physik, nämlich die Elektrizitätslehre und die Thermodynamik. Sie hilft daher beim Erlernen, sowohl der Mechanik, also auch der anderen strukturverwandten Gebiete.

Durch die Umstellung vom Kraft- zum Impulsstrommodell entstehen aber auch neue Probleme. Weil in der Impulsstrommechanik die Sprache und das damit verbundene Denken auf eine lokale Betrachtung zugeschnitten ist, werden Fragen nahe gelegt, die sich im Kraftmodell nicht stellen. Wenn man sagt, der Impuls gehe oder ströme von A nach B, so liegt die Frage auf der Hand, auf welchem Weg er von A nach B gelangt, und das ist die Frage nach der Stromverteilung. Wer sich auf die Impulsstromdarstellung einlässt, muss also mit diesen Fragen rechnen. Die NEWTONSche Kraftformulierung lässt solche Fragen gar nicht aufkommen. Sie kehrt sie gewissermaßen unter den Teppich.

Nun haben sich die mit der NEWTONSchen Sprache verbundenen mentalen Bilder so fest etabliert, dass ein Paradigmenwechsel kaum mehr möglich ist. Tatsächlich wurde die neue PLANCKSche Sichtweise auch nur von einigen Hochschullehrbüchern für höhere Semester aufgenommen (siehe etwa LANDAU-LIFSHIZ, 1975, oder NEUGEBAUER, 1981). Dort, wo sie die größten Erleichterungen hätte bringen können, nämlich in Texten für Anfänger, findet man sie nicht.

Die Energie

Bei der Energie sieht es etwas besser aus: Jeder weiß, dass man Energiebilanzen aufstellen kann, dass Energie transportiert wird, dass man von einem Energiestrom sprechen kann. Und trotzdem: Alte Sprechweisen und die damit verbundenen Bilder haben sich erhalten.

Statt: In einer Fahrradkette fließt die Energie zusammen mit Impuls, sagt man das vordere Kettenrad verrichtet am

hinteren Arbeit. Diese Sprechweise ist entstanden lange bevor es die Energie als physikalische Größe gab.

Die Entropie

Der Zustand der Lehre dieser Größe ist am beklagenswertesten. Die Tatsache, dass man sie bilanzieren kann, ist selbst manchem erfahrenen Physiker nicht bewusst. Der Begriff Entropiestrom kommt in vielen Physiklehrbüchern nicht vor.

6 Was ist zu tun?

Die Antwort auf diese Frage ist einfach: Energie, Impuls und Entropie als lokal bilanzierbare Größen einführen und behandeln.

Wenn man es mit der Energie zu tun hat, so wird man Fragen wie die folgenden stellen:

Wo ist die Energie? Wie viel Energie befindet sich in dem betrachteten System? Woher kommt sie, wohin geht sie? Welchen Weg nimmt sie dabei?

Die entsprechenden Fragen stellt man beim Umgang mit Impuls und Entropie. Wegen der Gültigkeit der lokalen Bilanzgleichungen haben diese Fragen immer eindeutige Antworten.

Literatur

CALENDAR, H. L. (1911). The caloric theory of heat and Carnot's principle. *Proc. Phys. Soc., London*, 23, 153–189.

CLAUSIUS, R. (1862). Anwendungen des Satzes von der Äquivalenz der Verwandlungen auf die innere Arbeit. *Annalen der Physik*, 192(5), 91.

FALK, G. (1990). *Physik – Zahl und Realität*. Basel: Birkhäuser, 65–68.

SCHULPRAXIS

HEAVISIDE, O. (1891). *Electrician*, 27.

HERTZ, H. (1892). *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.

JAUMANN, G. (1911). *Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze*. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Nat.-Naturw. Klasse, Abt. II A 120, 385–528.

JOB, G. & RÜFFLER, R. (2010). *Physikalische Chemie*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 45–46.

LANDAU, L. D. & LIFSHITZ, E. M. (1975). *Fluid Mechanics*. Oxford: Pergamon Press, 12–14.

LOHR, E. (1916). *Entropieprinzip und geschlossenes Gleichungssystem*. Denkschr. Akad. Wiss. Wien, Nat.-Naturw. Klasse 93, 339–421.

MAXWELL, J. C. (1883). *Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus, Erster Band*. Berlin: Verlag von Julius Springer, Artikel 105, 155.

MAYER, R. (1874). *Die Mechanik der Wärme in gesammelten Schriften*. Stuttgart: Verlag der J. G. Cotta'schen Buchhandlung.

MIE, G. (1898). *Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung*. Sitzungsbericht der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, CVII. Band, Abtheilung II.a.

NEUGEBAUER, G. (1981). *Relativistische Thermodynamik*. Braunschweig: Vieweg, 20–21.

NEWTON, I. (1687). *Philosophiae naturalis principia*. <http://cudl.lib.cam.ac.uk/view/PR-ADV-B-00039-00001/46> [26.05.2014].

NEWTON, I. (1713). *Philosophiae naturalis principia*. Zweite Auflage, Anhang, General Scholium. http://en.wikipedia.org/wiki/General_Scholium [26.05.2014].

NEWTON, I. (1756). *Four Letters from Sir Isaac to Doctor Bentley*. London: Dodsley.

PLANCK, M. (1908). *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*. Leipzig und Berlin: Verlag von G. B. Teubner (erste Auflage 1887).

PLANCK, M. (1908). Bemerkungen zum Prinzip der Aktion und Traktion in der allgemeinen Dynamik. *Physikalische Zeitschrift*, 9(23).

POYNTING, J. H. (1884). On the transfer of energy in the electromagnetic field. *Phil. Trans. A*, 343–361.

Prof. Dr. FRIEDRICH HERRMANN, f.herrmann@icloud.com, ist jetzt im Ruhestand. Er hat am KIT Studentinnen und Studenten der Physik und des Lehramts Physik ausgebildet und war gleichzeitig Physiklehrer am Europäergymnasium in Wörth am Rhein. ■