

Forschungsberichte



INSTITUT FÜR MASCHINEN-
KONSTRUKTIONSLEHRE
UND KRAFTFAHRZEUGBAU
UNIVERSITÄT KARLSRUHE(TH)
o. PROF. DR.-ING. A. ALBERS

Sven Matthiesen

**Ein Beitrag zur Basisdefinition des Element-
modells “Wirkflächenpaare & Leitstützstruk-
turen” zum Zusammenhang von Funktion und
Gestalt technischer Systeme**

a contribution to the basis definition of the
element model “Working Surface Pairs &
Channel and Support Structures” about the
correlation between layout and function of
technical systems

Band 6

Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau
Universität Karlsruhe (TH), 2002

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Schnelldruck Ernst Grässer, Karlsruhe
Tel.: (0721) 61 50 50

ISSN 1615-8113

Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells “Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen” zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Sven Matthiesen
aus Gronau/Westfalen

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Oktober 2002

Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. H. Birkhofer

Vorwort des Herausgebers

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von hochbelasteten Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrangengineering und Tribologie von Lager- und Funktionsreibsystemen, die Mechatronik und der Kraftfahrzeugbau mit dem Schwerpunkt Fahrwerk und Reifen. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

Vorwort zu Band 6

Die Produktentwicklung ist einer der wichtigsten Kernprozesse in einer Unternehmung. Der Entwicklungsprozess umfasst den gesamten Bereich von der Produktideenfindung über die Konzeption, die Gestaltung und Erzeugung von Produktmodellen bis hin zur Validation und Serieneinführung. Dieser Kernprozess ist Gegenstand vieler Forschungsarbeiten im nationalen und internationalen Umfeld. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Frage nach dem Zusammenhang von technischer Funktion und der zur ihrer Realisation erforderlichen Gestalt technischer Systeme. Viele wissenschaftliche Arbeiten haben auf diesem Gebiet wichtige Beiträge geleistet. Dabei ist die Frage von Reuleaux (1874) nach dem kleinsten Element in einer technischen Maschine nach wie vor aktuell und nicht vollständig beantwortet. Am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe wird in einer Forschungsgruppe an der Produktentwicklungsmethodik genau unter dieser Fragestellung gearbeitet. Es wurden in den letzten 5 Jahren die wissenschaftlichen Grundlagen zu dieser Frage erforscht und ein neuer Ansatz zur Beschreibung des Zusammenhanges von Funktion und Gestalt technischer Systeme entwickelt. Wesentlicher Kern dieses Ansatzes ist die Rückführung der Funktion auf das Vorhandensein von Wirkflächenpaaren als wesentliches und grundlegendes Element zur Betrachtung des Zusammenhanges von technischer Funktion und Gestalt. Ein wichtiger Gedanke ist dabei die Multi-Skaligkeit. Der Ansatz ist auf verschiedenen Längenskalen bzw. systemorientierten Betrachtungsebenen anwendbar, z.B. kann sowohl die Beschreibung von Anlagen als auch die Untersuchung der Zusammenhänge in den Werkstoffstrukturen von Mikrosystemen aus Sicht des Konstrukteurs mit dem Modell erfolgen. Herr Dr.-Ing. Sven Matthiesen war von Anfang an ein wesentlicher Mitarbeiter in dieser Forschergruppe. In seiner Arbeit „Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme“ stellt er seine grundlegenden Arbeiten an den Basisdefinitionen des Modells vor.

Als Ergebnis einer umfangreichen Analyse des Standes der Technik stellt Sven Matthiesen fest, dass es eine Vielzahl von Methoden gibt, die ein technisches Produkt abstrakt als System über Funktionen beschreiben. Diese Modelle zur Funktionssynthese unterstützen insbesondere die erste frühe Phase der Lösungsfindung, wobei die Umsetzung in Bauteilgestalt bisher nicht im Schwerpunkt der Arbeiten war. Hier setzen unsere Forschungsarbeiten an.

Die Arbeit gliedert sich in zwei Schwerpunkte, die Definition und Beschreibung des Elementmodells und die erstmalige Vorstellung eines von Sven Matthiesen entwickelten neuen Ansatzes zur Systemsynthese auf Basis des Elementmodells.

Die Grundelemente des Elementmodells technischer Systeme sind die Wirkfläche, das Wirkflächenpaar, der Funktionskontakt, die Leitstützstruktur, die Tragstruktur, die Reststruktur und die Wirkstrukturen. Diese erlauben eine Maschine vollständig zu beschreiben. Sven Matthiesen stellt die Grundhypothesen zum Elementmodell vor und diskutiert sie an Beispielen. Die erste Grundhypothese des Elementmodells besagt, dass ein Grundelement eines technischen Systems seine Funktion durch eine Wechselwirkung mit mindestens einem anderen Grundelement erfüllt und die eigentliche Funktion, und damit die gewünschte Wirkung, erst durch den Kontakt einer Fläche mit einer anderen Fläche möglich ist. Diese Flächen sind Wirkflächen und bilden gemeinsam ein Wirkflächenpaar. Das Wirkflächenpaar ist funktionsbestimmend und damit Basis der Beschreibung technischer Systeme. In der zweiten Grundhypothese wird postuliert, dass die Wirkflächenpaare im Zusammenhang mit der sie verbindenden Leitstützstruktur die Funktion verwirklichen, wobei mind. zwei Wirkflächenpaare und eine verbindende Leitstützstruktur zur Erfüllung einer technischen Funktion notwendig sind. Die dritte Grundhypothese erläutert, dass die Wirkflächenpaare in beliebiger Anzahl, Anordnung und Form auftreten können. Auf der Basis der Grundhypothesen kann dann eine Systembetrachtung durchgeführt werden, wobei unterschiedliche Hierarchiestufen zu betrachten sind. In höheren Hierarchiestufen werden Teilsysteme durch Schnittstellengrößen an ihren Wirkflächen zum umgebenden System beschrieben. Durch eine stetige weitere Detaillierung kann diese Betrachtungsweise bis in den einzelnen Bauelementbereich weitergeführt werden. Auch dies ist dann noch nicht die kleinstmögliche Betrachtungsebene. Sollen z. B. Materialwechselwirkungen diskutiert werden, ist auch eine Betrachtung innerhalb des Werkstoffes möglich. Dies bezeichnen wir als den fraktalen Charakter des Elementmodells. Mit mengentheoretischen Betrachtungen und Erläuterungen wird die mathematische Formulierungen der Hypothesen und auch der Zusammenhänge durchgeführt. Durch die Betrachtung der Wirkfläche als generalisierte Fläche werden sowohl die Wirkungen von Flüssigkeiten, wie sie z. B. in der Hydraulik eingesetzt werden, als auch von Feldern im Elementmodell berücksichtigt.

Im zweiten Schwerpunkt der Arbeit beschreibt Sven Matthiesen die von ihm erarbeitete Methode zur Synthese im Konstruktionsprozess mit dem Elementmodell. Aus der Wirkflächenbetrachtung kann formalisiert ein Lösungsvorschlag für ein technisches System oder Teilsystem entwickelt werden. Dazu werden Parallelprojektionen von Wirkflächen eingeführt und aus dieser Betrachtung Grundregeln abgeleitet, die den Syntheseprozess systematisieren und unterstützen. Dieser neue Ansatz der Synthese wird anschließend an dem Beispiel einer Getriebewelle erläutert.

Die Komplexität und die Schwierigkeit der Erforschung von methodischen Grundlagen des Konstruktions- und Gestaltungsprozesses habe ich aus eigener Erfahrung und aus Gesprächen mit vielen Kollegen erlebt. Sven Matthiesen hat mich von Anfang an bei diesen grundlegenden neuen Ansätzen zur Betrachtung des Zusammenhanges von Funktion und Gestalt begleitet. Er hat wesentliche Ideen in das Elementmodell eingebracht und ist mein wichtigster Mitarbeiter auf diesem Forschungsgebiet gewesen.

Sven Matthiesen hat einen wesentlichen Beitrag für die Entwicklung der Methodik auf dem Gebiet der Produktentwicklung geleistet. Seine Arbeit wird nachhaltig wirken und die wissenschaftliche Forschergemeinschaft auf diesem so wichtigen Gebiet anregen und Impulse für weitere Forschungsarbeiten geben.

Albert Albers

gewidmet meinem Großvater „Babi“,
ein großartiger Mensch und Ingenieur

Kurzfassung

Die Entwicklungsmethodik liefert Methoden zur Unterstützung des Produktentwicklers im Produktentwicklungsprozess. Existenzberechtigung eines jeden technischen Systems ist dessen Funktion. Eine große Herausforderung bei der Entwicklung neuer technischer Systeme ist die Umsetzung einer zu erfüllenden Funktion in eine Gestalt. Dieser Prozessschritt wird bisher methodisch nur unzureichend unterstützt.

Grundlage einer methodischen Unterstützung bei der Umsetzung einer Funktion in eine Gestalt muss ein allgemeingültiges Beschreibungsmodell für technische Systeme sein, welches Funktion und Gestalt verknüpft.

Umfangreiche Untersuchungen realer konstruktiver Gestaltungsprozesse und systematische Abstraktion führten zu einem Modell – Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ –, welches eine allgemeingültige Verbindung zwischen Gestalt und Funktion technischer Systeme schafft.

Der vorliegende Forschungsbericht beschreibt das theoretische Fundament des Modells und zeigt, dass das Wirkflächenpaar und die mit ihm auftretende Leitstützstruktur gemeinsame Elemente aller technischen Systeme sind. Mit Hilfe des Elementmodells werden systematisch technische Systeme, die auf mechanischen, fluidmechanischen und auf Feldern basierenden Wirkprinzipien beruhen, analysiert. Dabei wird jegliche Funktion in technischen Systemen auf die Interaktionen im Wirkflächenpaar und der sich an das Wirkflächenpaar anschließenden Leitstützstruktur zurückgeführt.

Auf Basis des Modells werden Ansätze zur Entwicklung einer durchgängigen Methodik zum Denken und Handeln in der Gestaltungsphase der Produktentwicklung aufgebaut. Es wird gezeigt, dass das Elementmodell sowohl bei der systematischen Analyse bereits bestehender technischer Systeme als auch bei der kreativen Synthese neuer technischer Systeme zielführend eingesetzt werden kann.

abstract

Methodology in product development supports the complete product development process.

One major challenge of product development is the step from the searched product function to the product shape. This step is decisive for a successful product development and up to now it is methodological insufficient supported.

Methods to support this step have to be based on abstract models, which link the function of technical systems to shape.

The analyses of real constructive product design processes and their systematic abstraction led to a model - the element model "Working Surface Pairs & Channel Support Structures". This model describes the correlation of layout and function of technical systems.

The presented research report describes the theoretic basis of the model. Common elements of each technical system are the "working surface pair" and its accompanying "channel and support structure". Technical Systems with mechanical, fluid mechanical and field based working principles were exemplary analysed with the aid of the element model. Every function in technical systems can be ascribed to an interaction within the working surface pair and the connected channel and support structure. The element model can be helpful during the analysis of already existing technical systems as well as during the synthesis of new technical systems. In several real product development projects with industrial partners the new method has shown its efficiency.

On basis of the model first methods are developed to support the analyses of existing technical systems as well as the synthesis of new technical systems.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers, der mich während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Krafffahrzeugbau in einzigartiger Weise förderte. Prof. Albers nahm in unzähligen, sehr spannenden und zielführenden Diskussionen großen Einfluss auf die vorliegende Forschungsarbeit. Sein strategischer Weitblick und seine enorme Stärke Dinge voranzutreiben trugen maßgeblich zu meiner beruflichen und persönlichen Weiterentwicklung bei.

Für die Übernahme des Korreferates und die fruchtbaren Diskussionen zu meinem Forschungsthema bin ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer vom Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente der Universität Darmstadt sehr dankbar.

Die freundliche und angenehme Arbeitsatmosphäre, die ich an unserem Institut vorfand, hat wesentlich zu meiner Arbeit beigetragen. In einer Vielzahl ausgiebiger und zum Teil sehr lebhaft geführter Gespräche nahmen viele Mitarbeiter des Institutes, insbesondere meine Kollegen aus der Arbeitsgruppe „Entwicklungsmethodik und Entwicklungsmanagement“ Einfluss auf das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“. Ich danke meinen Kollegen für ihre Unterstützung und ihre freundschaftliche Kollegialität!

Meinem Gruppenleiter Herrn Dipl.-Ing. Norbert Burkardt danke ich zusätzlich dafür, dass er mich aus meiner Industrietätigkeit an die Universität zurückholte und mir dadurch eine große Chance zur persönlichen und fachlichen Weiterentwicklung ermöglicht hat.

Meinem Großvater danke ich für die „Ingenieurssaat“, die er in mich legte. Meine Begeisterung für den Maschinenbau wurzelt in ihm. Er ist mir bis heute stets ein Vorbild als Ingenieur und Mensch.

Meiner Partnerin Riki danke ich für Ihre Anregungen im physikalischen Teil der Forschungsarbeit und vor allem für Ihre umfangreiche und großartige Unterstützung in allen Lebensbereichen während der Endphase meiner wissenschaftlichen Arbeit.

Mein größter Dank gilt meiner Mutter, die mir im Studium nicht nur finanziell sondern auch jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand. Ich verdanke ihr sehr viel!

Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Fokus und Ziel der Arbeit.....	2
1.2	Aufbau der Arbeit.....	3
2	Grundlagen und Stand der Technik.....	5
2.1	Geschichtliche Entwicklung des methodischen Konstruierens.....	5
2.2	Einordnung des Elementmodells in den Produktentstehungszyklus.....	26
2.3	Abgrenzung zum Stand der Technik.....	31
2.4	Modellbildung.....	34
2.4.1	Fazit zur Modellbildung.....	35
2.5	Abstraktion.....	35
2.6	Synthese.....	36
2.7	Funktionen.....	36
2.7.1	Der Funktionsbegriff.....	36
2.7.2	Formulierung von Funktionen.....	40
2.7.3	Funktionsbetrachtung im Produktentstehungsprozess.....	42
2.7.4	Fazit zur Funktion – Definition des Funktionsverständnis in dieser Arbeit.....	46
2.8	Fazit zu „Grundlagen und Stand der Technik“.....	47
3	Das Elementmodell technischer Systeme.....	48
3.1	Definitionen.....	48
3.1.1	Wirkflächen WF.....	49
3.1.2	Begrenzungsflächen BF.....	50
3.1.3	Wirkflächenpaar WFP.....	50
3.1.4	Funktionskontakt FK.....	50
3.1.5	Leitstützstruktur LSS.....	51
3.1.6	Tragstrukturen TS.....	51
3.1.7	Reststrukturen RS.....	51
3.1.8	Wirkstrukturen.....	51
3.1.9	Einordnung der Elemente des Elementmodells „WFP & LSS“.....	52
3.2	Wirkung und Funktion.....	52
3.3	Grundhypothesen.....	53
3.3.1	Einleitung.....	53
3.3.2	Grundhypothese I.....	53
3.3.3	Grundhypothese II.....	54
3.3.4	Grundhypothese III.....	54
3.4	Systembetrachtung mit dem Elementmodell.....	55
	Der fraktale Charakter des Elementmodells.....	56
3.5	Mengentheoretische Betrachtung und Erläuterungen zu den Grundhypothesen.....	57
3.6	Eigenschaften und Wechselwirkungen.....	59

3.6.1	Einleitung	59
3.6.2	Eigenschaften und Wechselwirkungen von Wirkflächen.....	62
3.6.3	Eigenschaften und Wechselwirkungen von Leitstützstrukturen	63
3.7	Erklärungen des Elementmodells anhand von Beispielen	66
3.7.1	Einleitung	66
3.7.2	Beispiel 1 stationäre Betrachtung: Portal	67
3.7.3	Beispiel 2 quasi stationäre Betrachtung: Getriebemotor	75
3.7.4	Beispiel 3 dynamische Betrachtung: Schwungrad eines Verbrennungsmotors	80
3.8	Fluide im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“	83
3.8.1	Einleitung	83
3.8.2	Beispiel eines Fluids im technischen System	83
3.8.3	Eigenschaften der Wirkflächen und der Leitstützstruktur	85
3.8.4	Fazit zu Fluide im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“	86
3.9	Felder im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“	86
3.9.1	Das Gravitationsfeld	87
3.9.2	Das elektrostatische Feld	96
3.9.3	Das magnetische Feld.....	98
3.9.4	Fazit zu Felder im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“	103
4	Funktionsanalyse technischer Systeme mit dem Elementmodell	104
4.1	Analyse eines Zahnradpaares mit Profilüberdeckung gleich 1,0	105
4.1.1	Betrachtung des quasi stationären Zustandes	106
4.1.2	Dynamische Betrachtung.....	107
4.1.3	Fazit zur Analyse eines Zahnradpaares mit Profilüberdeckung gleich 1,0	113
4.2	Analyse eines Zahnradpaares mit Profilüberdeckung größer 1,0	113
4.2.1	Quasi stationäre Betrachtung.....	114
4.2.2	Dynamische Betrachtung.....	116
4.2.3	Fazit zur Analyse eines Zahnradpaares mit Profilüberdeckung größer 1,0	119
5	Synthese im Konstruktionsprozess mit dem Elementmodell	120
5.1	Einleitung	120
5.2	Grundsätze.....	121
5.2.1	Orthogonale Parallelprojektionen	121
5.2.2	Kraftflussregel.....	122
5.3	Konstruieren mit Hilfe des Elementmodells	122
5.3.1	Vorgehen	123
5.4	Fazit zu „Synthese im Konstruktionsprozess mit dem Elementmodell“	141
6	Zusammenfassung und Ausblick	142
7	Literaturverzeichnis.....	145
8	Anhang	151
8.1	Definitionen einiger wichtiger Begriffe	151

1 Einleitung

Die Produktentwicklung ist die Gesamtheit aller Tätigkeiten, mit denen die für den Lebenslauf eines Produktes notwendigen Informationen erarbeitet und dokumentiert werden.¹ Der Produktentwickler muss den gesamten Produktentstehungszyklus vordenken um alle vom Kunden des zu entwickelnden Produktes gewünschte Produkteigenschaften in das Produkt „hineinzukonstruieren“. Das zu entwickelnde Produkt muss später „seine Funktion“ erfüllen. Erfüllt es seine Funktion nicht, wird es wertlos, verliert seine Existenzberechtigung und kann unter Umständen erheblichen Schaden verursachen. Die Funktion eines technischen Produktes spielt also die zentrale Rolle in der Produktentwicklung.

Die Suche nach Lösungsprinzipien zur Erfüllung einer Produktfunktion wird konstruktionsmethodisch durch eine Vielzahl von Methoden unterstützt. Damit die Funktion letztendlich vom Produkt erfüllt werden kann, muss das Produkt funktionsgerecht gestaltet werden. Der Schritt vom Lösungsprinzip zur konstruktiven Gestalt des zu entwickelnden Produktes stellt häufig die größten Forderungen an den Produktentwickler. Dieser Schritt wird bisher nur unzureichend unterstützt.

Die Gestaltung ist ein Synthesevorgang, bei dem ein neues Ganzes zusammengeführt wird. Um diesen Syntheseprozess zu unterstützen muss die Analyse technischer Systeme zwingend mitbeachtet werden, da technische Lösungen im Diskurs der Gestaltfindung² entwickelt werden. Der Entwickler wechselt im Gestaltungsprozess mehrfach zwischen Synthesegedanken zur Entwicklung der Gestalt und Analysebetrachtungen zur Überprüfung der soeben entwickelten Gestalt hin und her. Bedenkt man diesen Umstand, wird deutlich, dass ein die Gestaltungsphase der Produktentwicklung durchgängig unterstützendes Denkmodell sowohl bei der Analyse, als auch bei der Synthese anwendbar sein muss.

Nur auf Basis eines derartigen Modells wird es möglich sein eine durchgängige Methodik zum Denken und Handeln in der Gestaltungsphase der Produktentwicklung aufzubauen.

Um beim Produktentwickler akzeptiert zu werden muss das Modell auf möglichst viele, bestenfalls auf alle technischen Systeme übertragbar und dem Denken des Ingenieurs nahe sein. Außerdem muss es pragmatisch, umsetzungsorientiert und

¹ nach VDI 2221

² siehe Lin01

fraktal, d.h. bei verschiedensten Problemen nach gleicher Art und Weise anwendbar sein.

Die vorliegende Arbeit definiert ein derartiges Modell. Aus dem Modell wird eine Methode abgeleitet, deren Anwendung bei der Analyse und Synthese technischer Produkte in Beispielen gezeigt wird.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik hat sich in praktischen Entwicklungsprojekten mit Industriepartnern als sehr leistungsfähig erwiesen und führte in diesen Projekten u.a. zu einer Anzahl von Patentanmeldungen und konkreten Neuprodukten. Es wird außerdem an der Universität Karlsruhe (TH) in den Lehrveranstaltungen zur Produktentwicklung und der Maschinenkonstruktionslehre umgesetzt.³

1.1 Fokus und Ziel der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird auf Grundlage der Forschungsarbeiten von Prof. Albers⁴ ein geschlossenes Modell formuliert, das ein grundsätzliches Verständnis von Funktionszusammenhängen in technischen Systemen und technischen Produkten⁵ ermöglicht. Das entwickelte Modell mit der Bezeichnung - Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ – hat das Ziel als „Leitfaden“ beim Denken zu dienen. Es beschreibt technische Systeme abstrakt und verdeutlicht die Verbindung zwischen technischen Funktionen und der Gestalt technischer Produkte.

Entwickelt wird das Modell auf Basis der Kausalität, das heißt auf Basis des Zusammenhangs von Ursache und Wirkung. Das darauf beruhende Kausalitätsprinzip⁶ ist in elementarer Form bereits von Aristoteles formuliert worden. Newton hat 1887 im dritten newtonschen Axiom⁷, welches Wirkung (actio) und Gegenwirkung (reactio) verknüpft, die Kausalität in der Mechanik beschrieben. Das physikalische Grundgesetz von actio gleich reactio wird in dieser Arbeit auf Zusammenhänge im technischen System projiziert. Außerdem gründet das Modell auf der von Reuleaux formulierten Frage „Aus welchen kleinsten Elementen besteht jedes technische

³ siehe Alb99/2; Alb00/1; Alb00/2

⁴ z.B. Alb99/2; Alb02/1

⁵ **Technische Systeme** sind künstlich erzeugte geometrisch-stoffliche Gebilde, die einen bestimmten Zweck (Funktion) erfüllen, also Operationen (physikalische, chemische, biologische Prozesse) bewirken. Sieht man vornehmlich das geometrisch-stoffliche Gebilde und weniger den Prozess oder das Verfahren, welches das Gebilde durchführt, so spricht man von einem **Technischen Produkt**. Aus Ehr95, S21

⁶ Bro00

⁷ siehe New14, S. 15

System?“⁸. Diese Frage steht bereits seit 1874 nicht ausreichend beantwortet im Raum.

Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ hat das Ziel sowohl die Analyse der Funktion technischer Systeme, als auch die Synthese neuer technischer Systeme bei vorgegebener Funktion zu unterstützen und damit das methodische Dogma der strikten Trennung von Synthese und Analyse zu überwinden.

Auf Basis des Modells werden methodische Vorgehensweisen gezeigt mit denen bestehende technische Systeme analysiert und neue technische Systeme synthetisiert werden können.

1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden wesentliche Gedanken zum Verständnis von Modellen (Kap. 2.4), Funktionen (Kap. 2.7), Vorgängen der Abstraktion (Kap. 2.5) und der Synthese (Kap. 2.6) formuliert. Außerdem wird in Kapitel 2 auf den Stand der Forschung eingegangen. Auf dieser Grundlage wird die vorliegende Arbeit in den Entwicklungsprozess eingeordnet und zum Stand der Forschung abgegrenzt (Kap. 2.2 und Kap. 2.3).

Den wissenschaftlichen Kern der Arbeit stellt das Kapitel 3 dar. In diesem Kapitel werden 3 Grundhypothesen aufgestellt, die das Fundament des entwickelten Modells bilden. Im Kapitel 3.1 werden die in den Grundhypothesen verwendeten Begriffe exakt definiert. Diesem Kapitel kommt besondere Bedeutung zu, da mehrere verwendete Begriffe in anderen Werken der Konstruktionsmethodik unterschiedlich definiert werden.

Die aufgestellten Grundhypothesen werden in Kap. 3.5 aufgegriffen und mengentheoretisch betrachtet. Die in diesem Kapitel durchgeführte mathematische Formulierung der Hypothesen hilft diese streng und gleichzeitig kompakt zu beschreiben. Sprache allein kann dies schwer leisten.

Auch im Kapitel 3.6, in dem Eigenschaften und Wechselwirkungen der verschiedenen Elemente eines technischen Systems beschrieben werden, wird auf diese strenge und kompakte Art der Formulierung Wert gelegt.

In den Kapiteln 3.7 bis 3.9 werden die Hypothesen auf Beispiele mit stetig steigendem Komplexitätsgrad angewandt. Gleichzeitig wird das Modell jeweils im „Fazit“ der einzelnen Unterkapitel erweitert. Die Definitionen und Grundhypothesen

⁸ gemeint ist hier das kleinste Element auf funktionaler Ebene, nicht auf materieller Ebene! Besser wäre folgende Formulierung der Frage: „Was ist das grösste gemeinsame Vielfache eines jeden technischen Systems auf funktionaler Ebene“

bleiben unverändert gültig. Diese stetige Erweiterung dient dazu den problem-spezifischen Einsatz des Modells zu zeigen.

Ehrlenspiel formulierte hierzu folgende Aussage: „Methoden sind notwendigerweise bis zu einem gewissen Grad abstrakt, damit sie möglichst durchgängig angewendet werden können. Sie müssen aber an das jeweilige Problem angepasst werden.“⁹ Diese Aussage lässt sich auch auf Modelle, die die Grundlage für Methoden bilden, übertragen.

In den beiden nachfolgenden Kapiteln wird die Anwendung des Modells bei der Analyse technischer Produkte und bei der Gestaltung neuer Produkte gezeigt. Als Beispiel dienen hier konkrete technische Produkte wie z.B. der Getriebemotor (siehe Kap. 4.1 und 4.2) oder eine schaltbare Kupplung (siehe Kap. 5.3).

In Kapitel 5.3 „Konstruieren mit Hilfe des Elementmodells“ wird der Übergang vom Modell zur Methode vollzogen. Die vorgeschlagene Methode soll grundsätzlich nicht als striktes durchzuführendes Kochrezept sondern als „Leitfaden beim Denken“ verstanden werden.

Im Anhang Kapitel 8 dieser Arbeit wird eine Tabelle mit Definitionen verschiedener Begriffe der Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik wiedergegeben. Die Tabelle soll dem Leser als kleines Nachschlagewerk dienen.

⁹ Aus Ehr95 S.2

2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden zunächst einige Grundlagen zur vorliegenden Arbeit geschaffen. Einige Begriffe, die sich in der Konstruktions- und Entwicklungsmethodik bereits etabliert haben, werden hier nochmals aufgegriffen, weiterentwickelt und erläutert, außerdem für diese Arbeit ganz wesentliche Gedanken zum Verständnis von Modellen (Kap. 2.4), Funktionen (Kap. 2.7), Vorgängen der Abstraktion (Kap. 2.5) und der Synthese (Kap. 2.6) formuliert.

Einen Schwerpunkt dieses Kapitels bildet die Betrachtung der geschichtlichen Entwicklung des methodischen Entwickelns und Konstruierens. Auf Grundlage der geschichtlichen Entwicklung wird die vorliegende Arbeit in den Entwicklungsprozess eingeordnet und zum Stand der Technik abgegrenzt (Kap. 2.2 und Kap. 2.3).

2.1 Geschichtliche Entwicklung des methodischen Konstruierens

Das Methodische Konstruieren ist in den letzten Jahren in der Produktentwicklung immer stärker in den Vordergrund gerückt. Den eigentlichen Ursprung des Methodischen Konstruierens festzulegen fällt schwer. Erste Ansätze einer systematischen Variation von Lösungsmöglichkeiten finden sich schon in den Skizzen Leonardo da Vincis (1452-1519). Er erkannte bereits die Mechanismen und Maschinenelemente als sich ständig wiederholende Bestandteile jeder Maschine.¹⁰ Vor dem industriellen Zeitalter wurde die Konstruktion als Tätigkeit nicht von der Fertigung getrennt. Der Handwerker war sowohl „Konstrukteur“ als auch „Hersteller“. Viele heute relevante Problemstellungen existierten aufgrund dieser Integration mehrerer Entwicklungstätigkeiten in einer Person nicht.

Mit Beginn der Technisierung wies Redtenbacher in seinen „Prinzipien der Mechanik und des Maschinenbaus“ auf Merkmale und Grundsätze des Konstruierens hin, die nach wie vor von Bedeutung sind.¹¹ So legte er bereits 1852 Grundsätze des Konstruierens wie hinreichende Stärke, kleine Verformung, geringe Abnutzung, geringer Reibungswiderstand, geringer Materialaufwand, leichte Ausführung fest.¹²

Reuleaux setzte Redtenbachers Arbeiten fort, kam aber angesichts der sich teilweise widersprechenden Anforderungen zu der Aussage „Allein die in Betrachtziehung aller dieser Umstände und ihrer richtigen Würdigungen können nicht in einer absoluten

¹⁰ nach Hub73(2)

¹¹ nach Pah77(3) S. 13

Form gesehen und daher weder allgemein behandelt noch eigentlich gelehrt werden. Sie sind vielmehr einzig Sache der Intelligenz und des Scharfblicks des entwerfen Ingenieurs.“ Er kam damit zu dem Entschluss, dass es eine allgemeingültige Methodik nicht geben könne.

Dennoch versuchte Reuleaux 1874 erstmalig eine allgemeine Theorie des Maschinenwesens zu entwickeln. Er stellte sich damals bereits die Frage aus welchen kleinsten Teilen oder Elementen jede Maschine zusammengesetzt sei.¹³ Reuleaux versucht Maschinen wie durch eine chemische Formel in ihrer Zusammensetzung zu kennzeichnen.¹⁴ Dazu beschreibt er den Aufbau von Maschinen durch 3 verschiedenen Arten von Elementen oder Gliedern, aus denen sich Maschinen zusammensetzen: Starre Elemente, z.B. Schrauben oder Stahlprofile, die Zug und Druck übertragen können; Zugelemente, z.B. Drahtseile oder Ketten, die nur Zug übertragen können und Druckelemente, z.B. Öle oder Luft, die nur Druck übertragen können. Er erkennt, dass diese Elemente in einer ganz bestimmten Art und Weise aufeinander einwirken müssen, um den Zweck der Maschine zu erfüllen. Die Elemente setzt er zu einer „Paarung“ oder einem „Gelenk“ zusammen (siehe Abbildung 1). Aus den drei verschiedenen Elementarten bildet er durch Kombinationen sechs verschiedene Paarungen. Aus diesen drei Elementen und sechs Elementpaarungen besteht nach Reuleaux jede Maschine. Mit Hilfe dieser Erkenntnis stellte er eine „Gelenksystematik“ auf, die für eine gewisse Art von Konstruktionsaufgaben das Auffinden möglichst vieler Prinziplösungen unterstützt. Bei seiner Abstraktion von Maschinen bleibt Reuleaux auf der Ebene elementarer Bauelemente.¹⁵ Die Abbildung 2 zeigt 4 Paarungen von festen Gliedern, die eine ebene Bewegung ausführen können, nämlich das Drehgelenk, das Schubgelenk, das Wälzgelenk und das Gleitgelenk.

¹² siehe Red52

¹³ nach Reu75

¹⁴ vgl. auch Cla 98 S.51

¹⁵ siehe Reu75, Reu00; vergleiche auch Cla98

Erstes Element \ Zweites Element	Starres Element	Zug-Element	Druck-Element
Druck-Element			
Zug-Element			
Starres Element			

Abbildung 1 "Gelenke (Element-Paare)" nach Reuleaux¹⁶

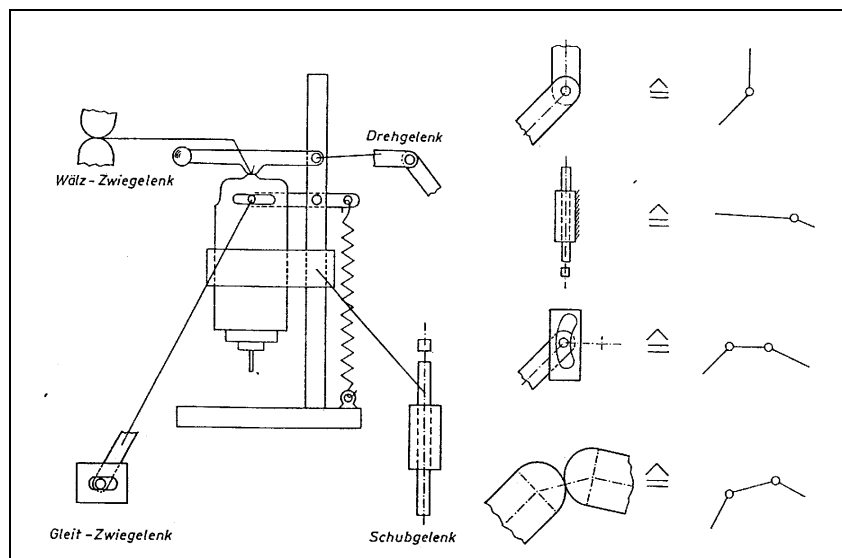


Abbildung 2 "Ebene Gelenke und ihre Ersatzgelenke"¹⁷

In diesem Geiste sind auch Werke z. B. von Artobolevskii oder Shigley in den USA verfasst worden.¹⁸

¹⁶ Quelle: Cla98; S.10; Bild 5

¹⁷ Quelle: Cla98 S. 11 Bild 6 und Bild 7

¹⁸ siehe Art75; Art76; Shi65 nach Hub73(2)

Bach und Riedler entwickelten die Konstruktionswissenschaften in Richtung Werkstoff und Fertigung weiter und erkannten die Werkstoff- und Fertigungsprobleme zu den Festigkeitsproblemen als gleichrangig und sich gegenseitig beeinflussend an.¹⁹

Ein frühes Beispiel für die Methodenentwicklung vom beispielhaft Konkreten zum allgemein Abstrakten stellte auch die Formalisierung des Technischen Zeichnens durch Alois Rieder dar. Er befreite um 1913 das Technische Zeichnen von illustrativen Zusätzen und beschränkte es auf wesentliche, funktionsbeschreibende Elemente.²⁰

Um 1920 beschäftigte sich Rötscher mit den Grundlagen der beanspruchungsgerechten Gestaltung.²¹ Aspekte des direkten Kraftflusses in Maschinenteilen wurden weiterführend von Laudien diskutiert.²²

Methodische Gesichtspunkte im heutigen Sinne tauchen erst bei Erkens in den 1920er Jahren auf.²³ Er postuliert, dass ein schrittweises Vorgehen zum Erreichen einer Konstruktion angestrebt werden müsse. Das schrittweise Vorgehen ist gekennzeichnet durch ein stetiges Prüfen und Abwägen, sowie durch einen Ausgleich gegensätzlicher Forderungen, und zwar so lange, bis dann, als Ergebnis zahlreicher Gedanken, die Konstruktion entsteht.²⁴

Wögerbauer teilte die Konstruktionsarbeit in ihre eigentlichen Phasen ein.²⁵ Seine Arbeiten können als Ausgangspunkt methodischen Konstruierens betrachtet werden.²⁶

Franke führte die Reuleauxsche Getriebe- und Konstruktionslehre mit dem Ziel fort aus dieser eine allgemeingültige Konstruktionslehre zu schaffen. Er verwendete die Begriffe Reuleauxs wie „Gelenk“, „Kette“ oder „Getriebe“ und versuchte diesen Begriffen eine hydraulische und elektrische Bedeutung zuzuordnen.²⁷ Um dies zu realisieren führte er eine zusätzliche Unterscheidung zwischen „festen“ und „lockeren“ Baustoffen ein. Er fand mit einer logisch-funktionalen Analogie von

¹⁹ siehe Bac20 und Rie13

²⁰ aus Hey01

²¹ siehe Röt27

²² siehe Lau31

²³ Erk28

²⁴ nach Pah77(3) S. 14

²⁵ vergleiche auch Cla98 S. 51

²⁶ Pah77(3) S. 14

²⁷ siehe Fr51; Fra58

Elementen unterschiedlicher physikalischer Effekte²⁸ einen umfassenden Aufbau der Getriebe und gilt deshalb auch als wesentlicher Vertreter eines funktionalen Vergleichs physikalisch unterschiedlicher Lösungselemente.

Später setzte vor allem Rodenacker auf diesem Analogieansatz auf.²⁹

„Erste umfassende Versuche einer Systematisierung und Verwissenschaftlichung des Konstruktionsprozesses selbst stammen von Kesselring und Hansen, die das Konstruieren als eine Abfolge systematischer Phasen und Handlungen beschreiben. Solche Phasenmodelle werden in der Folge unter anderem von Müller (1970), Rodenacker (1970), Roth (1974 und 1982) und Koller (1973 und 1976) weiterentwickelt, verfeinert und differenziert.“³⁰

1942 veröffentlichte Kesselring die Grundzüge seines konvergierenden Näherungsverfahrens.³¹ Das Vorgehen wurde später in wesentlichen Punkten in der VDI-Richtlinie 2225 zusammengefasst. Kern des Vorgehens ist die Bewertung von erarbeiteten Gestaltungsvarianten mit technischen und wirtschaftlichen Beurteilungskriterien.

In der „Technische Kompositionslehre“³² weist Kesselring neben einer Reihe grundlegender Gedanken zum technischen Schaffen des Konstrukteurs, zu seinem Verhalten, seiner Lebensgestaltung und seiner Verantwortung vor allem auf die wirtschaftlichen Voraussetzungen und Abhängigkeiten hin. Er leitet hieraus 5 übergeordnete Gestaltungsprinzipien wie „das Prinzip der minimalen Herstellkosten“ oder „das Prinzip vom minimalen Raumbedarf“³³ her, die heute noch von großer Bedeutung sind.

Um 1954 benannte Tschochner vier konstruktive Grundrealitäten, das Funktionsprinzip, den Werkstoff, die Form und die Abmessung. Er beschrieb den zeitlichen Ablauf der Konstruktion anhand dieser Grundrealitäten. Der Konstrukteur geht vom Funktionsprinzip aus und schafft dann die Grundrealitäten Werkstoff und Form, die dann durch die Grundrealität Abmessung aufeinander abgestimmt werden.³⁴

Matousek baute auf Wögerbauers Modellen auf. Er beschrieb eine Reihenfolge in der Bearbeitung des Entwurfsprozesses, die sich an vier wesentlichen Einfluss-

²⁸ z.B. elektrische, mechanische, hydraulische Effekte für gleiche logische Funktionen wie Leiten, Koppeln, Trennen

²⁹ Pah77(3)

³⁰ aus Hey01 S. 8

³¹ Kes42; nach Pah77(3)

³² Kes54

³³ Pah77(3) S. 15

³⁴ siehe Tsc54

größen, der Wirkungsweise, dem Baustoff, der Herstellung und der Gestaltung orientiert.³⁵

Betrachtungen der Funktion und der Wirkungen nach Tschochner und Matousek werden an den Beginn jedes Konstruktionsprozesses gesetzt.

Die Maschinenkonstruktionslehre von Leyer aus den frühen 1960er Jahren befasst sich schwerpunktmäßig mit der Gestaltung.³⁶ In einer allgemeinen Gestaltungslehre werden grundlegende Gestaltungsrichtlinien und Gestaltungsprinzipien entwickelt. Auch er unterteilt das Konstruieren in drei wesentliche Phasen. Die erste Phase dient der Festlegung des Prinzips durch eine Idee, eine Erfindung oder auch durch Übernahme von Bekanntem, die zweite Phase ist im Wesentlichen das Entwerfen, bei dem die Gestaltung durch Berechnung unterstützt wird. Die dritte Phase bezeichnet er als die Ausführung des Entwurfes.

Einige Zeit später definierte Hansen ein sogenanntes Grundsystem, dessen Arbeitsschritte gleichermaßen für das Konzipieren, Entwerfen und Gestalten eingesetzt werden können. Hansen beginnt mit einer Analyse, Kritik und Präzisierung der Aufgabenstellung, die zum Grundprinzip der Entwicklung, zum Wesenskern der Aufgabe, führt. Das Grundprinzip umfasst die aus der Aufgabe abgeleitete Gesamtfunktion, die Gegebenheiten und ihre Eigenschaften sowie die erforderlichen Maßnahmen. Gesamtfunktion (Funktionsziel und eingrenzende Bedingungen) und Gegebenheiten (Element und Eigenschaften) stellen den Kern der Aufgabenstellung mit den vorgegebenen Randbedingungen dar.

Das zeitgeschichtliche Umfeld ist in den 1960er Jahren durch eine „Krise der Konstruktion“ geprägt.³⁷ Diese Krise bestand in einem Mangel an qualifizierten Konstrukteuren und steigendem Konstruktionsbedarf bei gleichzeitig rückläufigen Absolventenzahlen der Technischen Hochschulen. Hintergrund dieser Entwicklung war die starke Ausweitung des Maschinenbaus und des technischen Wissens, die deutliche Verkürzung von Produkt- und die Beschleunigung von Innovationszyklen sowie das geringe Sozialprestige des Konstrukteurs.³⁸ „Rodenacker betonte 1970, dass eine Bewältigung des rapide gewachsenen Stoffumfanges für den Maschinenbauer nur dann möglich sei, wenn die Beschreibung von Maschinen, Apparaten und Geräten ersetzt wird durch die Darstellung einer Methode, die für die Konstruktion aller dieser Maschinen gleichermaßen geeignet ist. Daraus folgerte er, dass eine wissenschaftliche Behandlung des Themas Konstruktion einsetzen muss und dass

³⁵ siehe Mat57

³⁶ Ley63

³⁷ z.B. Hub73, S. 30 ff

der Anschluss an die Grundwissenschaften zu suchen ist, um eine zusammenhängende und geschlossene Methode des Konstruierens aufzubauen.“³⁹

Rodenacker entwickelte in diesem Zusammenhang um 1970 eine Konstruktionslehre auf Basis der Arbeiten von Reuleaux und Franke.⁴⁰ Seine Konstruktionslehre gliedert sich in drei wichtige Arbeitsschritte, die er mit den Begriffen „Funktion“, „Physik“ und „Konstruktion“ bezeichnet.⁴¹ Seine Vorgehensweise besteht in der schrittweisen Erfüllung der durch die Aufgabenstellung geforderten Wirkzusammenhänge durch logische, physikalische und konstruktive Wirkzusammenhänge. Die einzelnen Arbeitsschritte oder Konkretisierungsebenen leitete Rodenacker durch einen Vergleich zwischen der Arbeit des Ingenieurs mit der Arbeit des Naturwissenschaftlers ab. Nach Rodenacker treibt der Naturwissenschaftler Analyse und der Ingenieur Synthese. Der Physiker geht von der Betrachtung der Wirklichkeit aus und sucht abstrakte Gesetze, der Konstrukteur geht von der abstrakten Forderung in Form der Funktion aus und sucht konkrete Maschinen (siehe Abbildung 3). Er behauptet, dass die Arbeit des Ingenieurs die Umkehrung der Arbeit des Naturwissenschaftlers sei.

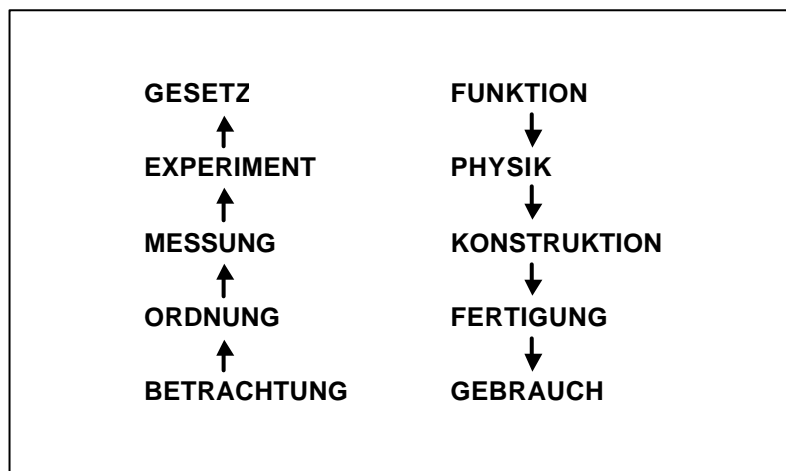


Abbildung 3 "Physik und Konstruktion" nach Rodenacker⁴²

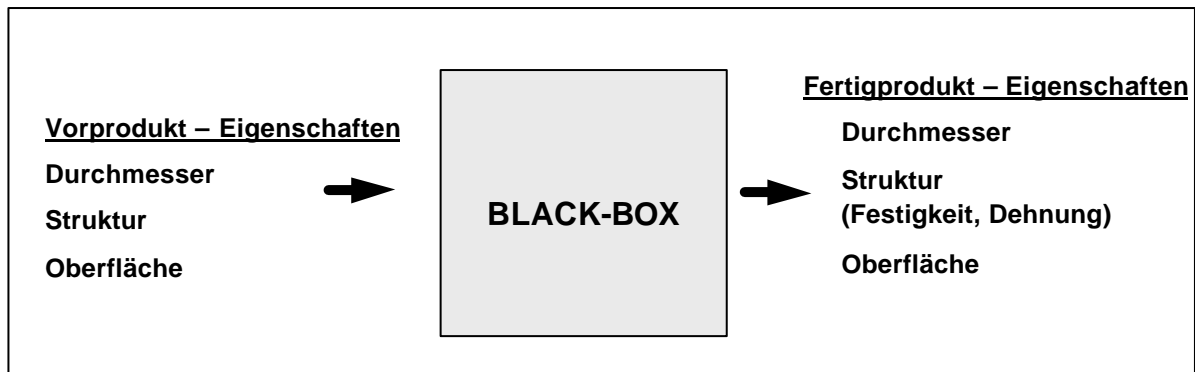
Im Arbeitsschritt „Funktion“ stellt er die Maschine als „Black-Box“ dar. Meist ist nur der Input und der Output der Maschine bekannt. Der Inhalt der „Black-Box“, die Maschine selbst, ist unbekannt. Die Abbildung 4 zeigt ein Beispiel einer Black Box für eine bestimmte Aufgabe. Input und Output sind bekannt, der Inhalt der Black Box ist unbekannt.

³⁸ nach Hor70, aus Hey01 S. 12

³⁹ Zitat aus Hey01

⁴⁰ siehe Rod70(4)

⁴¹ Cla98 S. 37

Abbildung 4 „Black-Box-Darstellung einer Drahtziehmaschine“ nach Rodenacker ⁴³

Der Ingenieur formuliert daraufhin die Hauptfrage: „Wie muss die Black Box aussehen um die geforderten Eigenschaftsänderungen von In- und Output zu garantieren?“.

Rodenacker zerlegt die Black-Box iterativ in einzelne Funktionsgruppen bis er zu Einheiten kommt, die sich praktisch ausführen lassen. Auf diese Art und Weise bildet er eine Funktionsstruktur. Die kleinsten Einheiten nennt Rodenacker „Funktionselemente“. Das Funktionselement stellt er wieder, wie in Abbildung 5 gezeigt, als Black-Box mit Eingängen und Ausgängen dar.

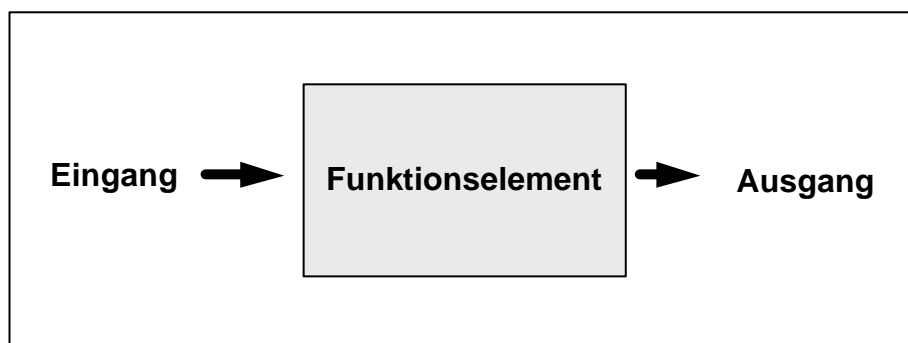


Abbildung 5 „Black-Box Darstellung eines Funktionselementes“ nach Rodenacker

Als Funktionselemente sind für Rodenacker nur drei verschiedene Arten denkbar. Diese Funktionselemente sind das Funktionselement Kopplung (Vereinigung, Veränderung), das Funktionselement Sperrung (Trennung, Behinderung) und das Funktionselement Leitung (Führung, Kanäle).

Als nächstes ist eine mögliche Verknüpfung zwischen den Eingangsgrößen und den Ausgangsgrößen zu finden. Diese Eigenschaftsänderung erzielt man durch

⁴² aus Cla98 S.37

⁴³ Quelle: Cla98; S.39; Abb. 23

geschicktes Ausnutzen der Naturgesetze, speziell der physikalischen Gesetze. Dies bezeichnet Rodenacker als die Aufgabe des Arbeitsschrittes „Physik“.

Rodenacker führt an dieser Stelle den Begriff Wirkprinzip ein und versteht darunter den entsprechend der zu erfüllenden Funktion gestalteten physikalischen Effekt, d.h. den physikalischen Wirkzusammenhang.

Erstmalig wird in diesem Zusammenhang der Begriff der Wirkfläche genannt. Rodenacker definiert die Wirkflächen "als Grenzflächen, die zwei Medien voneinander trennen". Die Berührfläche zwischen Lager und Welle, die in ein Elektrolyt eingetauchte Fläche einer Elektrode oder die Phasengrenze zwischen Wasser und Wasserdampf in einem Dampfkessel sind alle Wirkflächen, solange die auf ihnen hervorgerufene Wirkung zum Erfüllen **gewünschter** Funktionen dient." Flächen sind nach dem Verständnis von Rodenacker also „nur Wirkflächen, solange die auf ihnen hervorgerufenen Wirkungen zum Erfüllen einer gewünschten Funktion dient“. ⁴⁴

Er erkennt, dass die Mittel zur Erfüllung der Funktionen verschiedene Arten von Wirkflächen und deren verschiedene Wirkbewegungen sind. Die Wirkflächen können zum Erzwingen eines physikalischen Wirkzusammenhanges benutzt werden. Die Festlegung der Wirkfläche erfolgt über Merkmale wie Art, Zuordnung zu einer anderen Wirkfläche, die Form und die Halterung bzw. Befestigung. ⁴⁵ „Physikalische Wirkungen können erzwungen werden durch offene Wirkfläche, wie sie beispielsweise einer Tragfläche eines Flugzeuges darstellt, durch einen Körper einschließende Wirkfläche, also Wirkkörper oder Wirkräume, wie sie eine Druckkammer darstellt. Nach Rodenacker kann man auch noch „teilweise einschließende Wirkflächen“ in Form von Wannen oder Behältern für Flüssigkeiten unterscheiden. Physikalische Wirkungen können sich weiterhin durch Wirkflächen ergeben, die eine physikalische Wirkung weiterleiten oder isolieren. Sie sind für die Wirkung „durchlässig“ oder „undurchlässig“. ⁴⁶ Außerdem definiert Rodenacker: „Physikalische Wirkungen des Energieumsatzes lassen sich zwischen festen Wirkflächenpaaren durch ruhende und bewegte Flächen ausüben.“ ⁴⁷

Rodenacker unterscheidet Führungsflächen, Kopplungsflächen und Trennflächen, die er noch weiter unterteilt. Aus diesen Wirkflächen bildet er Wirkflächenpaare wie z.B. den Keilspalt in einer Zerkleinerungsmaschine (siehe Abbildung 6 rechte Spalte

⁴⁴ Rod73; vgl. auch Ers75 S. 11

⁴⁵ Rod70 S. 150f.

⁴⁶ Rod70(4) S.151

⁴⁷ Rod70(4) S. 152

2. Bsp von oben). Hier bilden 2 Begrenzungswände **ohne sich zu berühren** ein Wirkflächenpaar, zwischen dem das Schüttgut eingekeilt wird.

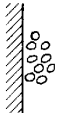
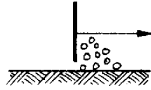
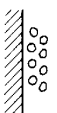
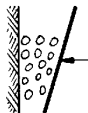


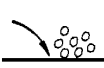

	Wirkfläche	Stoff	Beispiele		Wirkfläche 1	Wirkfläche 2	Stoff	Beispiele
	ruh.	ruh.	Silo		ruh.	bew.	bew.	Krälwerk Stoker
	ruh.	bew.	Hochofen		ruh.	bew.	bew.	Keitspalt Zerkleinerungs- maschine
	bew.	ruh.	Band Trommel		ruh.	bew.	ruh.	Presse Kollergang
	bew.	bew.	Drehrohr Schwingtisch		bew.	bew.	bew.	Walzen Kugelmühlen

Abbildung 6 „Wirkflächen und feste Stoffe“ nach Rodenacker⁴⁸

Physikalische Wirkungen bezogen auf den Energieumsatz werden bei Rodenacker durch Felder wie das Gravitationsfeld, das Strömungsfeld, das elektrische oder das magnetische Felder, im Wirkraum erzeugt.⁴⁹

Als nächstes folgt nach Rodenacker der Arbeitsschritt Konstruktion, dessen Hauptaufgabe er wie folgt beschreibt: „...Hauptaufgabe des Arbeitsschrittes Konstruktion im engeren Sinne ist aus dem Angebot von Bauelementen und möglichen Eigenschaften einer Konstruktion einzelne auszuwählen, entsprechend dem Funktionsplan zu kombinieren und alle wesentlichen Eigenschaften einer Maschine festzulegen.“⁵⁰ Konstruktion ist für Rodenacker also die **anforderungsgerechte Kombination bekannter Bauelemente**.

Rodenacker sucht zunächst für jede Funktionsgruppe oder jedes Funktionselement ein oder mehrere Bauteile aus, die den gestellten Anforderungen etwa entsprechen.

⁴⁸ Quelle: Rod70(4); S.152; Abb. 2.1.3/19

⁴⁹ Rod70(4) S.155: „Physikalische Wirkungen werden in einem Wirkraum bezogen auf den Energieumsatz durch Felder, d.h. das Gravitationsfeld, Strömungsfelder, elektrische und magnetische Felder, erzeugt.“

⁵⁰ Cla98 S. 45

Danach stellt er fest, welche wesentlichen Merkmale die Teile der Maschine haben müssen, die eine bestimmte Wirkung auf ein durchgesetztes Produkt ausüben sollen. Aus den Wirkungen, die die Teile der Maschine haben sollen, leitet er Eigenschaften von Wirkflächen ab. Neben den Eigenschaften dieser Wirkflächen untersucht er meist noch die kinematischen Eigenschaften der bewegten Maschinenteile. Durch Kombination der einzelnen Bauelemente und Festlegung der einzelnen Wirkflächen und der kinematischen Eigenschaften erhält er dann einzelne Lösungen der vorliegenden Konstruktionsaufgabe. Rodenacker sucht also zuerst Bauelemente aus, die die geforderten Eigenschaften erfüllen könnten und untersucht sie danach auf ihre Eignung anhand ihrer Wirkflächen und gegebenenfalls ihrer kinematischen Eigenschaften.⁵¹

Zusammen mit Claussen gibt Rodenacker in den „Regeln des Methodischen Konstruierens“ eine Übersicht über die Methoden, die zur Auslegung der Merkmale einer Maschine angewendet werden können an.⁵² Er unterscheidet Methoden, die zur Auslegung des logischen Wirkzusammenhangs, des physikalischen Wirkzusammenhangs, des konstruktiven Wirkzusammenhangs und der Gesamtkonstruktion angewandt werden können. Wirkflächen werden nur bei der Auslegung des konstruktiven Wirkzusammenhangs berücksichtigt. Merkmale der Wirkfläche sind bei Rodenacker die Beanspruchung mit ihren Auswirkungen auf die Lebensdauer und das Merkmal Begrenzung in seiner Anwendung auf Felder wie z.B. Strömungsfelder und auf die Kinematik wie z.B. in Getrieben. Im Zusammenhang mit der Betrachtung des Konstruktiven Wirkzusammenhangs erwähnt er außerdem die Wirkbewegung z.B. bei der Getriebebetrachtung.

Roth hat seit 1965 eine Konstruktionsmethodik entwickelt, die zunächst durch eine starke Einbeziehung von systematisch strukturierten Konstruktionskatalogen gekennzeichnet ist.⁵³

Ein weiteres Kennzeichen seiner Konstruktionsmethodik ist die Aufteilung des Konstruktionsprozesses in kleine, algorithmierbare Einzelschritte, die eine Bearbeitung mit dem Rechner ermöglichen soll. Er unterscheidet im Ablaufplan des Algorithmischen Auswahlverfahrens zur Konstruktion mit Katalogen Konstruktionsphasen und Phasenabschnitte wie Aufgabenformulierungsphase, Funktionelle Phase, Gestaltende Phase, usw.⁵⁴

⁵¹ nach Cla98 S. 45

⁵² Rod73

⁵³ Rot82

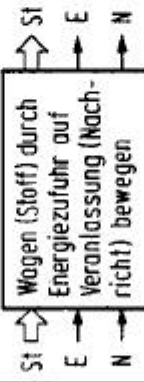
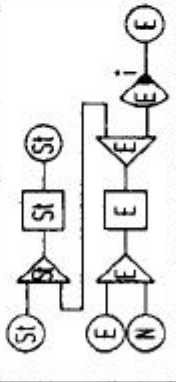
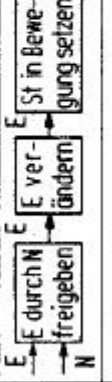
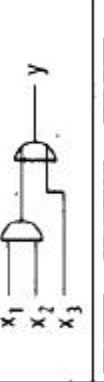
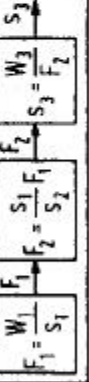
⁵⁴ Rot 79

Roth entwickelte verschiedene Modelle, deren Einsatzmöglichkeiten er vor allem der funktionellen und der gestaltenden Phase des Entwicklungsprozesses zuordnet (siehe Abbildung 7). Mit den produktdarstellenden Modellen der gestaltenden Phase ist es möglich, aufgrund vorgegebener Funktionen die günstigsten geometrischen Strukturen auszuwählen. Die Modelle werden unter den Bezeichnungen „Geometrische Funktionsstruktur“, „Geometrische Kettenstruktur“, „Geometrische Linienstruktur“ und „logische Schlussmatrix“ vorgestellt und besprochen (Modell 9 bis 12 in Abbildung 7.⁵⁵ Das Modell der „logische Schlussmatrix“ beschreibt mit Hilfe von 12 Freiheitsgraden binäre Relativlagen und logische Verknüpfungen zwischen Elementen und entspricht damit einer geometrisch kinematische Betrachtung von Einzelteilen, die miteinander in bestimmter Art und Weise verbunden sind.

Am Übergang von Funktionaler Phase zu Gestaltender Phase ordnet er das Modell der „Geometrischen Funktionsstruktur“ ein. Mit Hilfe des Modells werden Inhalte der „Black Box“ mit wesentlichen Eigenschaften gekennzeichnet. Dies wird unter anderem mit Hilfe von Wirkflächenpaaren getan.

Die „Black Box“ wurde zuvor z.B. mit Hilfe der „Vektoriellen Funktionsstruktur“ erstellt.

⁵⁵ Rot 79 S1.

Konstruktionsphase	Modelle und ihre Eigenschaften	Produktdarstellendes Modell		Stand der Normierung	Vorwiegende Darstellungsart		Im Modell dargestellte Aspekte											
		Beispielhafte Darstellung (Ausschnitt)	Elemente: Verknüpfung		Verbal	Durch Formel	Graphisch	Wirkung	Topologie	Physikalisch	Logisch	Geometr. Anordnung	Material	Herstellhinweis				
Aufgabenformulierungsphase	Modellbenennung	Nr. 1		2														
	Aufgabenstellung 1		Sätze: z. B. technische Gebäude zum Heben eines Wagens konstruieren	Wörter; Syntax	o													
	Funktionssatz	2	Objekt - Prädikat - Beziehungen z.B. Wagen heben Wagen oben halten Wagen absenken	Begriffe für Objekt und Prädikat; Syntax	o													
	Gesamtfunktionsmodell	3		Stoff, Energie, Nachricht; Schwarzer Kasten	o													
	Allgemeine Funktionsstruktur (AFS)	4		Allgemeine Funktionen; Flußrichtung, gleiche Größen														
	Allgemeines Flußbild	5		Normierte Größen u. nicht normierte Operationen														
	Logische Funktionsstruktur (LFS)	6		Binäre Zustände; logische Verknüpfungen														
Funktionelle Phase	Spezielle Funktionsstruktur (SFS)	7		Intensitäts - Quantitätsgrößen; physikalische Beziehungen	o													

Teil 1 von Abbildung 7 „Produktdarstellende Modelle für das Vorgehen nach dem Algorithmischen Auswahlverfahren zur Konstruktion mit Konstruktionskatalogen“

Roth versteht im Gegensatz zu Rodenacker unter einem Wirkflächenpaar zwei sich berührende Wirkflächen.⁵⁷ Er vergleicht die Wirkflächenpaare mit den bereits aus der Getriebelehre bekannten Elementenpaaren: „In der Getriebelehre nennt man die Wirkflächenpaare, die relativ beweglich sind, also einen Freiheitsgrad größer gleich 1 haben Elementenpaare. Die Teile der Körper, in denen sie sich berühren, heißen die Elemente der Maschine (Wirkflächen); je zwei sich berührende Elemente bilden ein sogenannten Elementenpaar (Wirkflächenpaar).“⁵⁸ Die Elementenpaare müssen nach Dizioglu immer in Berührung bleiben.⁵⁹

Neben dem Wirkflächenpaar definiert Roth noch eine „Kraftleitungsstruktur“ als die von den Kraftleitungslinien gebildete Struktur.⁶⁰ Er berücksichtigt bei dieser Benennung nur die Kraftleitung als „Funktion“ des Körpervolumens.

Ersoy übernimmt 1975 in seiner Dissertation die Definitionen seines Lehrers Roth. Er geht in seinem Werk auf das Erzwingen von Wirkungen und den Ort der Wirkung ein:

„Das Erzwingen der Wirkungen kann sich in einem bestimmten Raum ausdehnen, kann aber auf einer Fläche, einer Linie oder einem einzigen Punkt stattfinden. Will man die Gestalt und Beschaffenheit eines Wirkortes herausgreifen, dann ist es notwendig, zwei neue Begriffe, und zwar Wirkraum und Wirkfläche, einzuführen.“⁶¹

Er definiert den Wirkraum im mechanischen System daraufhin als „den stofflichen Inhalt des Einzelteils“. Hier ist der Wirkraum mit einem festen Werkstoff erfüllt und von Wirk- und Restkonturflächen umschlossen.⁶²

Rodenacker bezeichnet diesen mit festem Stoff erfüllten und von den Begrenzungsflächen umschlossenen Raum einige Jahre zuvor als Wirkkörper.

Ersoy behauptet darüber hinaus, dass „in den Maschinen und Geräten die mechanischen Wirkungen durch die Einzelteile realisiert werden d.h. dass jede Wirkung von einem Einzelteil ausgeht“.⁶³ Jedes Einzelteil wird also als Träger einer, aber im Allgemeinen mehrerer Wirkungen konstruiert“.⁶⁴

⁵⁷ Rot82(2) S. 448

⁵⁸ Ers75 S. 13; Diz65

⁵⁹ nach Diz65 S. 14: „In Elementenpaaren müssen die Elemente wegen der erwünschten Bewegungsübertragung immer miteinander in Berührung bleiben.“

⁶⁰ vgl. Ers75 S.101 ff.

⁶¹ Ers75 S.11

⁶² Ers75 S.13

⁶³ Ers75 S. 12f und Rod 70

⁶⁴ nach Rod70(4), vgl. auch Ers75

Gleichzeitig zitiert Ersoy Reuleaux und widerspricht damit der oben wiedergegebenen Aussage: „Jede Wirkung setzt eine Gegenwirkung voraus“.⁶⁵ Eine Maschine besteht also nicht aus Elementen, sondern aus Elementepaaren. Deswegen erscheinen in den Maschinen und Geräten die Wirkflächen immer paarweise. Eine Wirkfläche wirkt auf eine Gegenfläche ein und beide bilden zusammen ein Wirkflächenpaar. Damit im mechanischen System eine Wirkfläche auf eine zweite einwirken kann, muss sie die andere Wirkfläche berühren.“⁶⁶

Franke setzt im Wesentlichen die Schule Roths fort, betont aber stärker den iterativen Charakter von Vorgehensplänen und die Bedeutung der persönlichen Kreativität des Konstrukteurs, rückt also von einer stärkeren Algorithmierbarkeit des Konstruierens wieder ab.⁶⁷

Koller hat seit 1970 an der RWTH Aachen eine Konstruktionslehre entwickelt, die den Algorithmierungsgedanken weiter verfolgt.⁶⁸

Nach Koller werden drei Phasen, die Funktionssynthese, die qualitative Maschinensynthese und die quantitative Maschinensynthese bei der Entwicklung eines technischen Gebildes mehr oder weniger bewusst immer durchlaufen. Je nach Kenntnisstand des Bearbeiters über bereits Bekanntes kann die Ausführung einzelner Arbeitsschritte oder ganzer Entwicklungsphasen überflüssig sein oder übersprungen werden.

Koller sieht die in der Produktplanung erstellte Aufgabenstellung als Ausgangspunkt des Konstruktionsprozesses. Der erste Schritt auf dem Weg von einer Aufgabenstellung zu einer konkreten Lösung ist nach Koller die Formulierung einer Gesamtfunktion des zu entwickelnden Systems. Die Formulierung der Gesamtfunktion orientiert sich an der vorgegebenen Zweckbeschreibung. In anschließenden Arbeitsschritten gliedert er diese Gesamtfunktion, wie dies zuvor Rodenacker vorschlug, in Teil- bzw. Elementarfunktions- und Grundoperationsstrukturen.

Unter einer Elementarfunktion versteht Koller eine kleinste sinnvoll nicht mehr teilbare oder gliederbare Funktion.⁶⁹ Eine Teilfunktion setzt sich im Allgemeinen aus zwei oder mehreren Elementarfunktionen zusammen. Mehrere Teilfunktionen können ihrerseits eine Gesamtfunktion bilden. Koller bemerkt, dass es möglich ist,

⁶⁵ nach Reu63

⁶⁶ nach Ers75 S.13

⁶⁷ vgl. Fra85; nach Pah77(3) S. 20

⁶⁸ vgl. Kol89 u. Kol76(4)

⁶⁹ vergl. auch Pahl, der die Elementarfunktion bereits 1970 in Pah70 im Wesentlichen gleichdefiniert.

alle Vorgänge in technische Maschinen, Geräten und Apparaten auf eine endliche Zahl von Elementarfunktionen zurückzuführen.

Diese Vorgehensweise war bei der Entwicklung elektrischer und hydraulischer Systeme schon lange zuvor bekannt. Der Konstrukteur geht von der vorgegebenen Gesamtfunktion des zu entwickelnden Systems aus und versucht diese globalen Ursache-Wirkung-Zusammenhänge durch eine Struktur bekannter Teil- oder Elementarfunktionen zu ersetzen. Während für die Elementarfunktion elektrischer Systeme die entsprechenden Bauelemente üblicherweise bereits vorhanden sind, müssen nach Koller im Maschinenbau – von Ausnahmen den sogenannten Maschinenelementen, abgesehen – die Elemente für jedes System neu entwickelt werden. Deshalb ist es nach Koller für den Maschinenbau wichtig, neben den Hilfsmitteln zur Entwicklung komplexer Systeme auch Regeln zur Verwirklichung von Funktionselementen zu haben.

Koller vergleicht die Entwicklung von Maschinen außerdem mit der Vorgehensweise eines Architekten, „der weiß, wie ein Haus aussehen soll und welche Bausteine (Stein, Fenster, Türen usw.) zur Verfügung stehen. Auch an dieser Stelle sucht Koller nach vergleichbaren Bausteinen im Maschinenbau und denkt dabei an die verschiedenen Maschinenelemente.

Im Allgemeinen gibt es für eine Aufgabenstellung mehrere verschiedene Funktionsstrukturen, welche zwar alle die vorgegebene Gesamtfunktion erfüllen, aber nicht gleich günstig für den betreffenden Anwendungsfall sind. Die Funktionssynthese ist nach Koller die „Zusammenfassung aller Arbeitsschritte, deren Ziel und Aufgabe es ist die möglichen Funktionsstrukturen aufzuzeigen und die günstigste anzugeben“.⁷⁰

Die Tätigkeit des Überführens von Prinziplösungen in ein technisches Gebilde bezeichnet Koller als Gestaltungsprozess.⁷¹ Zur Gestaltung technischer Gebilde müssen Wirk- und sonstige Teiloberflächen festgelegt werden. Diese sind zu Bauteil zusammenzuführen, die Bauteile sind des weiteren zu Baugruppen zu fügen und diese wiederum zu Maschinen, Geräten oder noch komplexeren Systemen. Primäres Ergebnis der Gestaltungs- oder Entwurfsphase ist eine erste und maßstäbliche Skizze oder ein erster maßstäblicher Entwurf, welcher in mehreren Iterationsschritten optimiert wird.

Koller erkennt 3 wesentliche Grundgesetze technischer Systeme:

⁷⁰ nach Kol 76 S6

⁷¹ Kol 76/4 S 145

- In technischen Systemen können nur Eigenschaften und Zustände von Energien bzw. Signalen und Stoffen sowie deren Flüsse verändert werden
- Komplizierte Vorgänge in technischen Gebilden können auf eine endliche Zahl von physikalischen, mathematischen und logischen Grundoperationen zurückgeführt werden.
- Diese Grundoperationen können im Allgemeinen nur durch physikalische, chemische oder biologische Effekte in Verbindung mit geometrischen Beziehungen realisiert werden.

Jung betonte 1989 eine „Funktionale Gestaltbildung“.⁷² Er führte den Begriff „Geometrie- Funktionsprinzip“ ein, um bei der funktionalen Gestaltbildung den zu erfüllenden Ursache-Wirkung-Zusammenhang zu beleuchten. Den Ursache-Wirkung-Zusammenhang beschreibt er formal als Funktion zwischen Ursachenparametern, und deren Wirkung. Ursachenparameter unterteilt er in Geometrie-, Stoff- und weitere Ursachenparameter.⁷³ Unter dem Geometrie-Funktionsprinzip einer Anordnung versteht er „jenen Anteil der Geometrieeigenschaften, der neben den Stoffeigenschaften und weiteren Ursachen für die Funktion wesentlich ist.“⁷⁴ Mit dem neu eingeführten Begriff versucht er den Einfluss der geometrischen Parameter auf die Funktion von dem der Stoffparameter und der weiteren Ursachen im gesamten Ursache-Wirk-Zusammenhang getrennt darzustellen.⁷⁵

Jung führte nach eigenen Angaben das Geometrie-Funktionsprinzip ein, da „das Denken in Geometrie-Funktionsprinzipien große Teile des Entwurfsvorganges charakterisiert“⁷⁶. In seinen Beispielen zum Geometrie-Funktionsprinzip beschreibt er dann Effekte, die Wirkung auf ein technischen Systems verursachen.⁷⁷ Auf das Zusammenwirken von Elementen eines technischen Gebildes geht Jung nicht explizit ein.

Aufbauend auf der „Funktionale Gestaltbildung“ entwickelt Jung eine „Technologische Gestaltbildung“. Dabei geht er vor allem auf die Berücksichtigung der Herstellprozesse und Herstellverfahren beim Konstruieren ein.⁷⁸

Hubka will in seiner „Theorie technischer Systeme“⁷⁹ eine vollständige und eindeutige Systemstruktur und Ordnung technischer Systeme aufstellen.

⁷² Jun89

⁷³ nach Jun89 S.32

⁷⁴ Jun89 S.27

⁷⁵ ebenda

⁷⁶ Jung89; S.185

⁷⁷ siehe Jun89; S. 32

Hauptanliegen ist dabei das Schaffen von Grundlagen für eine umfassende Konstruktionswissenschaft. Diese Grundlagen werden 1984 in „Theorie technischer Systeme“ erörtert. Die erörterten Grundlagen bauen wiederum auf der 1973 erschienenen „Theorie der Maschinensysteme“ auf.

Er formuliert grundsätzliche Aussagen zu technischen Prozessen und geht anschließend auf das technische System als Element des technischen Prozesses ein. Hierzu gehören auch eindeutige Symbole und Begriffsformulierungen für die einzelnen Abstraktionsstufen des Konstruktionsprozesses sowie das Erkennen gegenseitiger Abhängigkeiten zwischen Konstruktionsschritten oder auch zwischen Lösungselementen und externen Einflussgrößen.

Unter anderem geht Hubka auf Wechselwirkungen, Relationen zwischen Operatoren eines technischen Systems ein. In diesem Zusammenhang erwähnt er auch den Begriff der „Kopplung“, den er folgendermaßen definiert: „Eine Kopplung ergibt sich, wenn bestimmte Outputs des Elements (Systems) zugleich als Input eines Elementes (Systems) figurieren. Die Kopplung kann entweder in Serie, parallel, als Rückkopplung oder als Kombination angeordnet werden. Kopplungen können stofflicher energetischer oder informeller Art sein.“⁸⁰

Der Begriff Wirkung wird folgendermaßen beschrieben: „Um die gewünschte Änderung der Eigenschaften zu erreichen, muss man in geeigneter Weise auf den Operanden einwirken. Man muss etwas erwärmen, mischen, Material abnehmen, befördern, heilen usw. Die erforderliche Einwirkung auf den Operanden im Prozess werden wir als Arbeitswirkung bezeichnen oder Transformationswirkung.“⁸¹ Die Gesamte Wirkung zum Erzielen einer Transformation teilt Hubka in Teilwirkungen auf. Die Summe der Teilwirkungen ergibt nach Hubka die Gesamtwirkung. In diesem Zusammenhang fällt auch der Begriff der „Wirkstelle“, die nach Hubka als Raum, Fläche, Linie oder Punkt ausgeprägt sein kann.

Die Beschreibung der Wirkungen und Kopplungen im System wird auf einem abstrakten Level vollzogen. Auf eine Wechselwirkung der einzelnen Bauteile im technischen Systemen wird nicht eingegangen.

Die Entwicklung der Konstruktionsmethodik in den 70 Jahren und deren Fortführung wird von Heymann und Wengenroth sehr treffend zusammengefasst: „Die optimistischen Erwartungen, die in den 70er Jahren mit einer systematischen

⁷⁸ siehe Jun91

⁷⁹ siehe Hub73(2)

⁸⁰ aus Hub73(2)S.20

⁸¹ aus Hub73(2) S.39

Verwissenschaftlichung der Konstruktion verknüpft werden, verlieren bereits in den 80er Jahren an Überzeugungskraft. Erste Zweifel an dem Anspruch und an der pragmatischen Relevanz einer verwissenschaftlichten Konstruktionsmethodik werden laut (Jordan 1983, Rohpol 1983). Nach jahrzehntelangen Bemühungen um die Verwissenschaftlichung der Konstruktionstätigkeit, die als Lösung einer „Krise der Konstruktion“ betrachtet wurde, beobachtet Beitz (1983) nach wie vor einen „Engpass Konstruieren“ und Rutz (1985) konstatiert eine „Stagnation der Konstruktion“.⁸² „Die geringe Verbreitung der Konstruktionsmethodik [...] in der Industrie zeigt, dass sie derzeit nicht die Form besitzt, die sie zu einer praxisnahen und erfolgreichen Anwendung auch außerhalb der Hochschule haben müsste. Vor allem die Übertragung der Methodik auf konkrete Probleme bereitet große Schwierigkeiten.“⁸³ Ehrlenspiel beklagt, dass die Konstruktionslehre „gerade für den Konstrukteur zu wenig bildhaft anschaulich sei“.⁸⁴

Weitere Entwicklungen der Konstruktionsmethodik sind geprägt von der Analyse „realer Konstruktionsprozesse“.⁸⁵ Es mehren sich die Bemühungen sich der empirischen Analyse „realer“ Konstruktionsprozesse zuzuwenden und die Vorgänge und Denkprozesse während des Konstruierens zu analysieren. Ehrlenspiel stellt fest, dass die „Konstruktionsmethodik bisher im Wesentlichen eine Sachmethodik, d.h. eine personen- oder organisationsneutrale Methodik“ ist, die somit individuelle und soziale Probleme des oft arbeitsteiligen Konstruierens im Betrieb weitgehend ignoriert.⁸⁶ Basis der Konstruktion sind aber sowohl Technologie und Physik als auch der Mensch (siehe Abbildung 8).

Pahl und Beitz haben aus verschiedenen Erkenntnissen der Konstruktionsmethodik eine umfassende Konstruktionslehre entwickelt und unter anderem in „Konstruktionslehre“ (Auflage 1 im Jahre 1977 bis Auflage 4 im Jahre 1993) veröffentlicht. Ihnen ist es gelungen die Anwendbarkeit der Konstruktionsmethodik zu verbessern.

⁸² Hey01 S.13 ff

⁸³ nach Hey97 S.42

⁸⁴ Erl95

⁸⁵ Hey01 S.15

⁸⁶ aus Ehr95; vergl. Auch Hey01 S.14

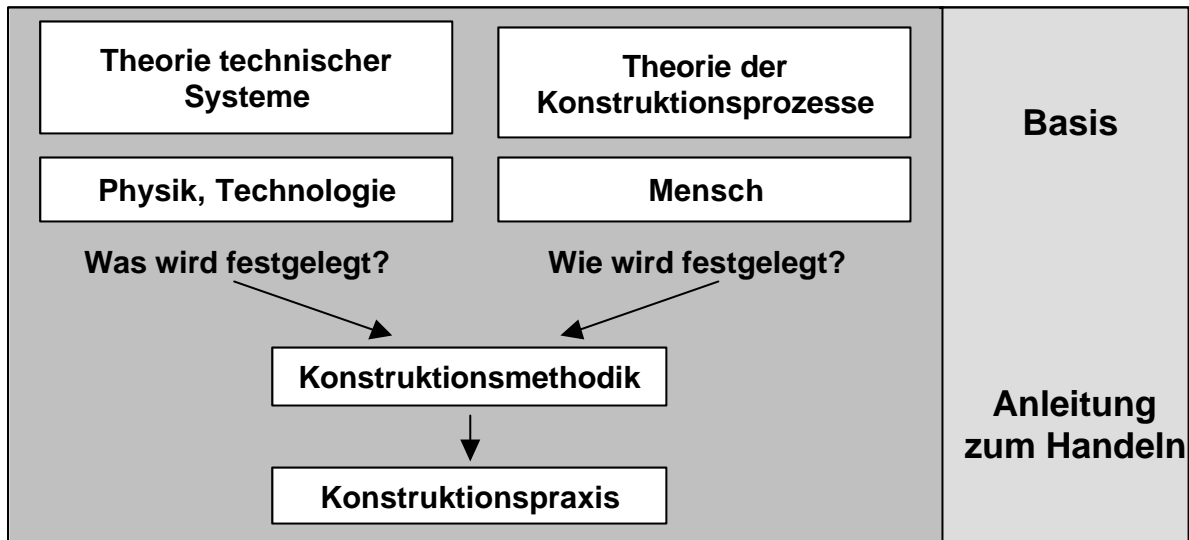


Abbildung 8 „Der Zusammenhang zwischen der Theorie technischer Systeme und der Theorie der Konstruktionsprozesse“ nach Ehrlenspiel⁸⁷

Pahl und Beiz greifen bei der Beschreibung des Wirkzusammenhangs die Gedanken von Rodenacker⁸⁸ auf, um geometrische und stoffliche Merkmale eines technischen Gebildes zu beschreiben. Sie definieren wie Rodenacker den Wirkort, als die Stelle an der das physikalische Geschehen zur Wirkung kommt. Die Erfüllung der Funktion bei Anwendung des betreffenden physikalischen Effektes wird durch die Wirkgeometrie, d.h. durch die Anordnung der Wirkflächen (bzw. -linien, -räume) und durch die Wahl von Wirkbewegungen erzwungen.⁸⁹ Der Begriff des Wirkflächenpaares wird in der Konstruktionslehre von Pahl/Beiz nicht wieder aufgegriffen oder weiterentwickelt.

In den 90er Jahren ist in der Konstruktionswissenschaft der deutliche Trend weg von einer strengen Methodik in Richtung einer pragmatischen Methodik zu erkennen. Es wird erkannt, dass das „Technische Konstruieren nicht vollständig algorithmierbar, ist, sondern ein „individuell – konkreter“ Prozess ist, von dem allenfalls partiell abstrahiert werden kann. Personengebundene, individuelle Bestimmungen des Konstruktionsprozesses treten in ihrer Bedeutung nicht mehr hinter objektivierbare, äußere Einflüsse zurück.⁹⁰ Auch Ehrlenspiel betont: „Denken und Handeln im routinierten, unbewusst gesteuerten Normalbetrieb, d.h. bei intuitiven Arbeiten, sind wegen ihrer Effektivität zu bevorzugen. Methodenbewusstes, laufend reflektiertes

⁸⁷ Ehr95 S.12

⁸⁸ vergleiche Rod73

⁸⁹ Pah77/(3) S. 50

⁹⁰ aus Dyl91, vergl. auch Hey01 S.17

und kontrolliertes Denken und Handeln sind nur in Problemsituationen anzuwenden, wo es nötig ist.“⁹¹

2.2 Einordnung des Elementmodells in den Produktentstehungszyklus

Die Produktentwicklung ist die Gesamtheit aller Tätigkeiten, mit denen die für den Lebenslauf eines Produktes notwendigen Informationen erarbeitet und dokumentiert werden.⁹²

Der Produktentwickler, der die Produktentwicklung durchführt, muss den Produktentstehungszyklus (PEZ) vordenken um alle vom Kunden gewünschten Produkteigenschaften in das Produkt „hineinzukonstruieren“. Die einzelnen Phasen sind stark miteinander verknüpft und wechselwirken miteinander (siehe Abbildung 9).⁹³

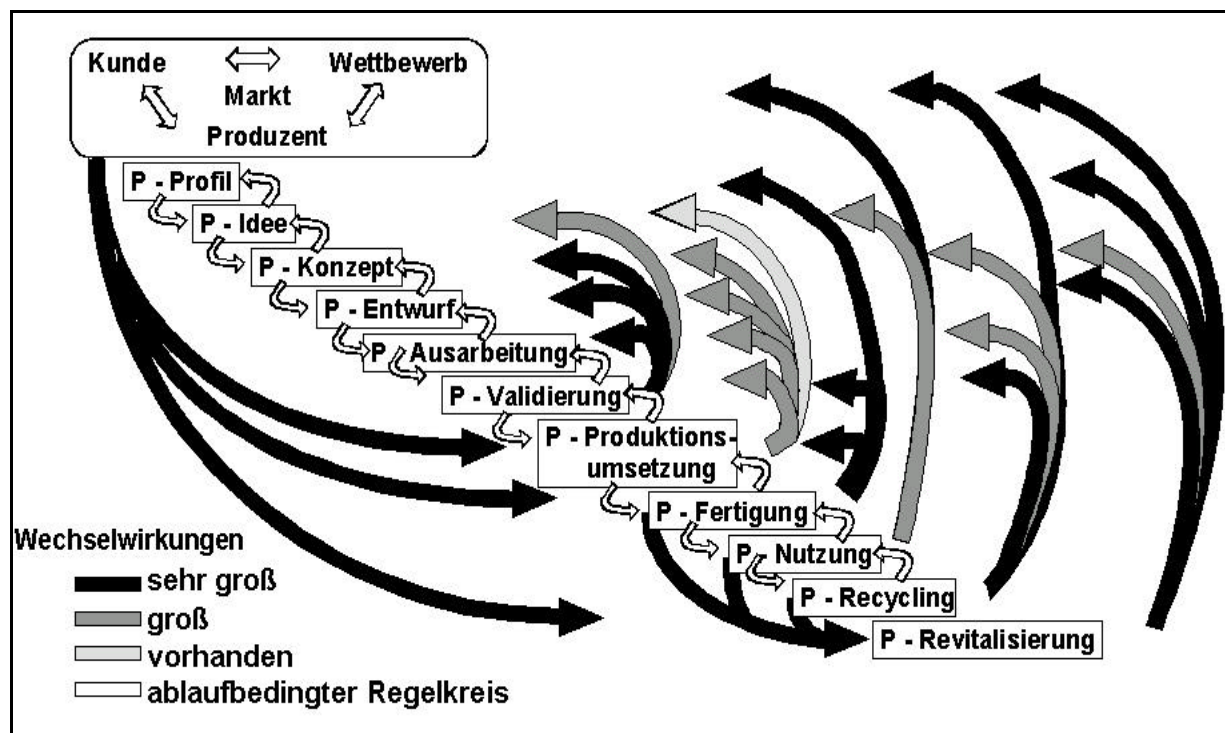


Abbildung 9 „Prozess der Produktentwicklung, -umsetzung und -nutzung“ Quelle⁹⁴ Ein Teil des PEZ stellen die Produktkonzeption, der Produktentwurf und die Produktausarbeitung dar. Dabei beschreibt die Produktkonzeption die Gesamtheit aller Tätigkeiten, die die Funktionsstruktur des Produktes festlegen und der Produktentwurf alle Tätigkeiten zum Festlegen der Baustruktur. Die Baustruktur stellt dabei die Gesamtheit aller

⁹¹ aus Ehr95 S65, vergl. auch Hey01 S.17

⁹² nach VDI 2221

⁹³ Alb00/2

⁹⁴ Prof. A. Albers; Lehrveranstaltung Integrierte Produktentwicklung, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau; Universität Karlsruhe; 1998; Alb00/2

Bauelemente und Verbindungen dar. Sie kann bereits Festlegungen bezüglich Massen, Werkstoffen und Fertigungsverfahren enthalten. Die Produktausarbeitungsphase liefert eine vollständige Produktbeschreibung mit sämtlichen für die Produktion erforderlichen Informationen.

Die Bearbeitung dieser einzelnen Phasen wird nicht streng linear nacheinander vollzogen, sondern ist durch Vor- und Rücksprünge gekennzeichnet.

Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ kann bei der Arbeit des Ingenieurs immer dann von Nutzen sein, wenn die Gestalt eines Produktes beachtet werden muss.⁹⁵ Im Produktentstehungszyklus ist dies immer dann der Fall, wenn eine Analyse des bereits bestehenden oder des zu entwickelnden Produktes notwendig ist, oder wenn neue Gestaltelemente geschaffen werden. Ein besonderer Schwerpunkt der Anwendbarkeit des Modells liegt daher auch in der Entwurfsphase, in der ausgehend von der Funktionsstruktur die stoffliche und geometrische Realisierung des technischen Produktes geschaffen wird.

Diese Phase wird im Folgenden näher betrachtet.

Die Phasen „Konzeption“, „Entwurf“ und „Ausarbeitung“ kann nach VDI 2221 (siehe Abbildung 10) in 7 Arbeitsschritte unterteilt werden. Die Arbeitsschritte 4, 5 und 6 werden dem Gestaltungsprozess zugeordnet.

Der Gestaltungsprozess mit seinen 3 Phasen wird in der VDI 2223 abgebildet (siehe Abbildung 11). Er wird dort um die Allgemeingültigkeit der Darstellung zu wahren als übergeordnete Strategie bezeichnet. Es wird betont, dass das Vorgehen beim Gestalten im Detail, d.h. in der operativen Durchführung, stark unterschiedlich abläuft, da die Randbedingungen und Einflussfaktoren, die von außen auf den Gestaltungsprozess einwirken, stark variieren.⁹⁶

Abbildung 11 stellt dieses generelle Vorgehen beim Gestalten als zweckmäßige Folge von Arbeitsabschnitten dar. Es geht von der prinzipiellen Lösung aus und endet beim maßstäblichen Entwurf.

Nachdem der Schritt 4 „Gliedern in realisierbare Module“ bearbeitet wurde, wird die gestaltgebende Phase eingeleitet. Die VDI-Richtlinie unterteilt diese Phase in die 3 Arbeitsschritte 5.1 bis 5.3. In Arbeitsschritt 5.1 werden zu Beginn Gestaltstudien für die vorher definierten Module erstellt, in denen grobmaßstäblich oder unmaßstäblich skizzenhaft Gestaltungsideen dokumentiert, analysiert und optimiert werden.⁹⁷

⁹⁵ Alb02/1

⁹⁶ nach VDI 2223 S.8

⁹⁷ nach VDI 2223 S. 11f

Im anschließend durchgeführten Arbeitsschritt 5.2 werden die Vorentwürfe beurteilt. Diese Beurteilung erfolgt auch schon laufend und zum Teil unterschwellig während der Erstellung der Gestaltstudien in 5.1 im Gehirn des Entwicklers.

In Arbeitsschritt 5.3 werden ein oder mehrere Vorentwürfe für weiterführende Arbeitsschritte, die z.B. grobmaßstäbliche oder maßstäbliche Gesamtentwürfe schaffen, freigegeben.

Beim Gestalten des gesamten Produktes (Schritt 6 in Abbildung 11) werden die freigegebenen Vorentwürfe zu einem Gesamtprodukt zusammengesetzt. Auch diese Phase ist von Analyse (der Vorentwürfe) und von Synthese (der Gestaltungselemente) geprägt.

Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ eignet sich vor allem zur Unterstützung der Arbeitsabschnitte 5.1, 5.2 und 6.1 bis 6.5.

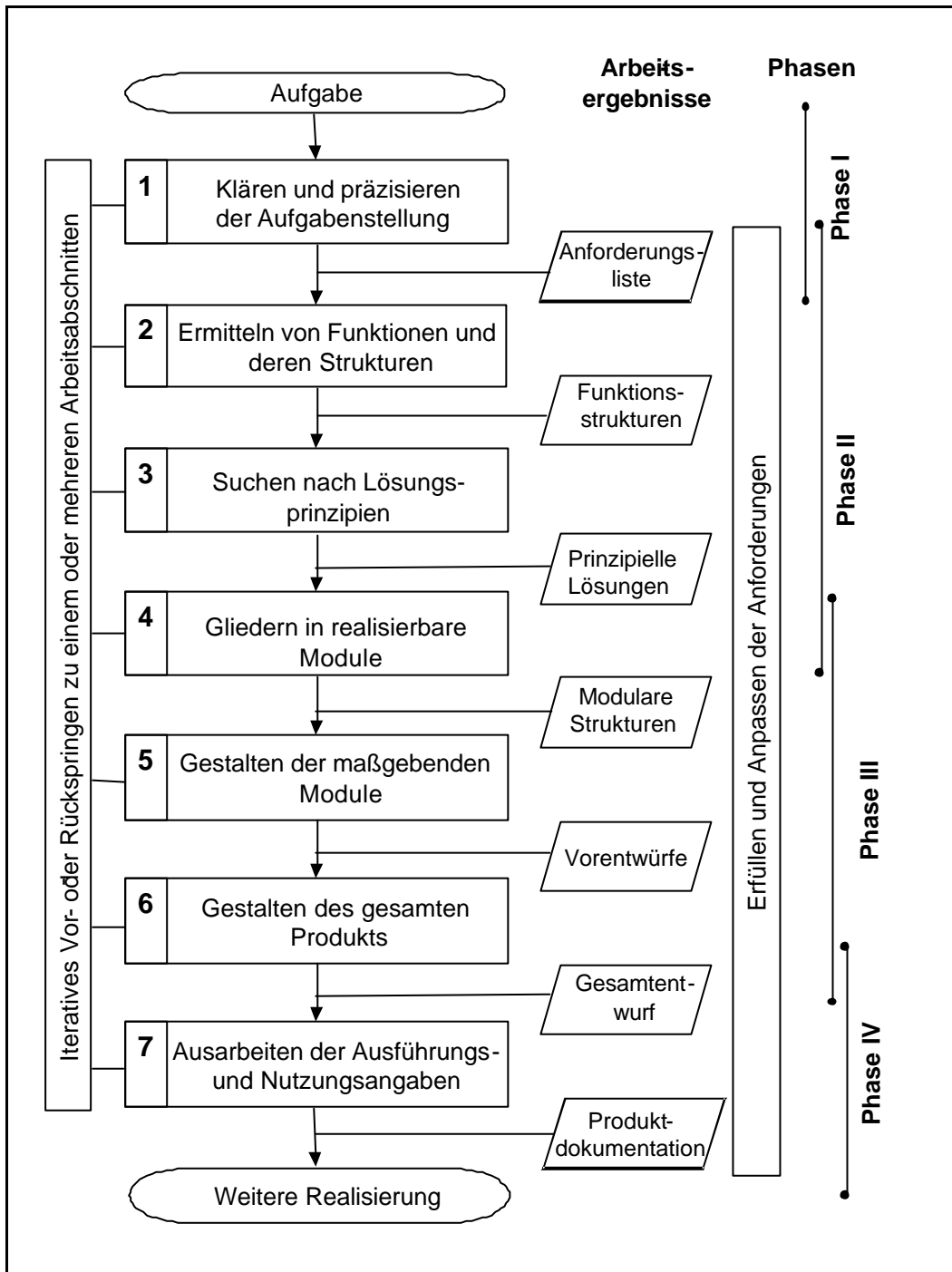


Abbildung 10 "Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren"⁹⁸

⁹⁸ VDI 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ S.9

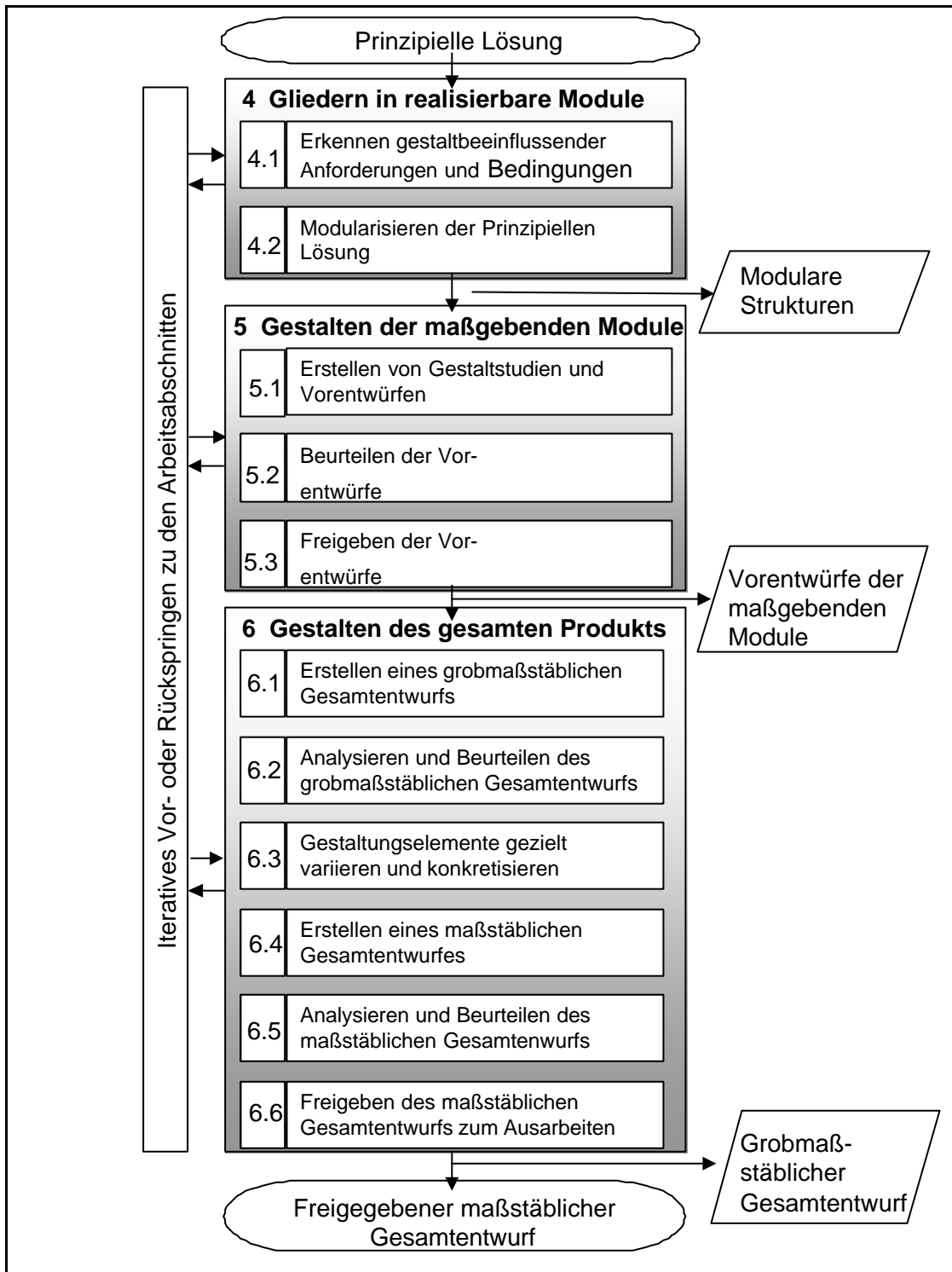


Abbildung 11 "Generelles Vorgehen beim Gestalten"⁹⁹

⁹⁹ nach VDI 2223 „Methodisches Entwerfen Technischer Produkte“ S. 10

2.3 Abgrenzung zum Stand der Technik

Durch die Konstruktionsmethodik werden vor allem die frühen Phasen des Entwicklungsprozesses methodisch unterstützt. So beklagt z.B. auch Ehrlenspiel, dass die bisherige Methodik im Wesentlichen auf die Funktion von Produkten und damit auf die Suche nach prinzipiellen Lösungen ausgerichtet ist.¹⁰⁰

Die Generierung einer Idee und die funktionale Umsetzung dieser Idee ist meist nicht das bedeutendste Problem im Entwicklungsprozess. So mangelt es oft nicht an guten Ideen für ein Produkt, sondern an der Umsetzung dieser Ideen.

Zu Beginn der Produktentwicklung steht meist ein zu lösendes Problem. Nachdem das Produktprofil gefunden wurde, wird die Produktidee geboren. Ausgehend von den Funktionen, die das zu entwickelnde Produkt erfüllen soll, werden Lösungsprinzipien gesucht, welche geeignet sind diese Funktionen zu erfüllen. Funktionen sind dabei lösungsneutral beschriebene Beziehungen zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen des zu entwickelnden Systems.¹⁰¹ Mit Hilfe der methodisch sehr gut unterstützten Funktionensynthese, der zusammenfassenden Bezeichnung aller Arbeitsschritte, deren Ziel und Aufgabe es ist, die möglichen Funktionsstrukturen aufzuzeigen und die günstigste anzugeben¹⁰², wird das zu entwickelnde Produkt funktional voll definiert. Hier ist bewusstes Loslösen von einer möglichen Gestalt zur Vermeidung von Einschränkungen nötig. Die einzelnen Funktionen müssen anschließend in eine konstruktive Lösung umgesetzt werden. Hier findet der Übergang von der Funktion zur Gestalt statt.

Der Schritt von der Funktionsstruktur zur Umsetzung der Funktion in Gestalt wird methodisch nur unzureichend unterstützt. Zwar schlagen einige Autoren wie z.B. Jung mit seinen „Geometrie-Funktionsprinzipien“ mögliche Vorgehensweisen vor, bleiben bei der Beschreibung aber sehr abstrakt, ohne die Umsetzung an technischen Systemen zu zeigen. Die Erläuterungen zu den verschiedenen Vorgehensweisen sind durchaus einleuchtend, helfen aber bei der Bearbeitung eines konkreten konstruktiven Problems nicht ausreichend weiter.

Jung führt in „Funktionale Gestaltbildung“¹⁰³ das „Geometrie-Funktionsprinzip“¹⁰⁴ ein. Durch das Geometrie-Funktionsprinzip bezweckt er die Darstellung einer funktionsorientierten Übergangsstufe von der Physik zur konstruktiven Ausführung.

¹⁰⁰ Ehr95 S. 8

¹⁰¹ nach VDI 2221

¹⁰² nach Kol76(4)

¹⁰³ Jun89

¹⁰⁴ Erklärungen siehe Kap. 2.1

In seinen Beispielen zum Geometrie-Funktionsprinzip, die die Anwendung des Prinzips verdeutlichen sollen, beschreibt er aber dann Effekte, die Wirkungen auf ein technisches System verursachen.¹⁰⁵ Die brennende Frage wie man zur Gestalt kommt, die die Effekte nutzt bleibt unbeantwortet. Ein durchgängiges Modell zur abstrakten Beschreibung der Gestalt wird nicht entwickelt.

Die oben beschriebenen rothschen produktdarstellenden Modelle („Geometrische Funktionsstruktur“, „Geometrische Kettenstruktur“, „logische Schlussmatrix“,“) wurden entwickelt, um im Rahmen des **Algorithmischen Auswahlverfahrens zur Konstruktion mit Katalogen (AAK)** bei der Auswahl der günstigsten geometrischen Strukturen zu unterstützen.¹⁰⁶

Roth beschreibt vor allem im Modell der „Geometrischen Funktionsstruktur“ und der „Geometrischen Kettenstruktur“ Interaktionen zwischen Elementen mit Hilfe von Wirkflächenpaaren. Beide Modelle sind „eigens für die Arbeit des Konstrukteurs mit dem aktiven Bildschirm gedacht“¹⁰⁷ Die Nutzung der Modelle ohne EDV Unterstützung ist schwer möglich, da sie sehr umfassend und in ihrer Anwendung komplex sind. Außerdem sind die Modelle, die den Übergang von der Funktion zur Gestalt beschreiben „ausschließlich für mechanische Energie-Funktionen, insbesondere für Festkörper entwickelt worden, wobei die „Geometrische Funktionsstruktur“ bevorzugt statische, die „Geometrische Kettenstruktur“ allein kinematische Probleme berücksichtigt.“¹⁰⁸

Das katalogorientierte Gestalten, wie es unter anderem von Roth vorgestellt und in umfangreichen Nachschlagewerken ausgearbeitet wurde, hat sich trotz seinem unbestrittenen Nutzen in der Konstruktionspraxis schwer durchsetzen können. Eine Anforderung an die in dieser Arbeit vorgestellte Methode ist die Möglichkeit losgelöst von Katalogen, Listen, Tabellen, usw. arbeiten zu können. Die Methode soll vielmehr ein „Leitfaden“ an dem sich das Denken orientieren kann sein.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ basiert, geschichtlich gesehen, auf einer logischen Weiterentwicklung des Grundgedankens, aus welchen kleinsten Elementen jede Maschine zusammengesetzt ist. Die bisherige Suche nach diesen Elementen beschränkte sich allerdings auf die Suche nach kleinsten Bauteilen von technischen Systemen (z.B. Reuleaux, siehe z.B. Abbildung 1, darauf aufbauend Franke und später Koller (siehe Kap. 2.1)).

¹⁰⁵ siehe Jun89S. 32

¹⁰⁶ siehe Rot82/2

¹⁰⁷ Rot82/2 S.329

¹⁰⁸ Rot82/2 S.329

Wie in Kapitel 2.1 bereits ausführlich beschrieben, gibt es mehrere Werke der Konstruktionsmethodik, die den Ort der Wirkung in technischen Systemen beschreiben. Dieser Ort ist natürlich mit der Gestalt der technischen Produkte eng verknüpft.

Begriffe wie „Wirkort“, „Wirkstelle“, „Wirkfläche“, „Wirkflächenpaar“ und „Kraftleitungsstruktur“ werden von mehreren Autoren verwendet und konstruktionsmethodisch zur Beschreibung technischer Produkte verwendet. (Roth, Birkhofer, Koller, Ersoy). Ausgehend von den Ansätzen dieser Autoren werden diese Begriffe exakt definiert, erweitert, auf Fluide und Felder übertragen und durch weitere abstrakte Begriffe (Leitstützstruktur, Reststruktur, Begrenzungsfläche...) ergänzt. Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen stellen die kleinsten gemeinsamen Grundelemente aller technischen Systeme dar. Mit Hilfe dieser Grundelemente ist es möglich alle technischen Systeme zu beschreiben. Durch die Zurückführung jeglicher technischer Funktion auf die Interaktionen im Wirkflächenpaar und der daran sich anschließenden Leitstützstruktur entsteht ein eindeutiges und leistungsfähiges Vorgehenskonzept für die Gestaltdefinition unter allen Randbedingungen und unter Einbeziehung der Systemumgebung.¹⁰⁹

Ein durchgängiges Modell zur Beschreibung der Gestalt technischer Systeme oder technischer Produkte, welches auf die genannten Begriffe aufbaut, gibt es bisher nicht. Ersoy macht z.B. Aussagen bezüglich Wirkungen und den Ort dieser Wirkungen. Wie die von Ersoy gemachten Aussagen auf reale Bauteile übertragen werden können und wo im Entwicklungsprozess die Aussagen angewandt werden können, wird nicht erläutert.¹¹⁰

Wie oben bereits aufgeführt (siehe Seite 91) betont Ehrlenspiel: „Denken und Handeln im routinierten, unbewusst gesteuerten Normalbetrieb, d.h. bei intuitiven Arbeiten, sind wegen ihrer Effektivität zu bevorzugen. Methodenbewusstes, laufend reflektiertes und kontrolliertes Denken und Handeln sind nur in Problemsituationen anzuwenden, wo es nötig ist.“¹¹¹ Dieser Aussage schließt sich der Verfasser vollkommen an. Allerdings orientiert sich das „Denken und Handeln im unbewusst gesteuerten Normalbetrieb“ auch an Systematiken, die sich z.B. aus gesammelten Erfahrungen ergeben. Jeder „gute“ Ingenieur wird sich im Laufe der Zeit bewusst oder meist unbewusst eine Systematik entwickeln, an der sich sein Denken orientiert. Sinnvoll ist die bewusste Bereitstellung einer solchen Systematik, so dass das Denken bereits unterstützt werden kann, bevor Erfahrungen gemacht wurden. Das in

¹⁰⁹ Alb02/1

¹¹⁰ Ers75

dieser Arbeit entwickelte Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ ist die Grundlage einer solchen Systematik, die am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe (TH) bereits zu Beginn des Maschinenbaustudiums gelehrt wird.¹¹²

2.4 Modellbildung

Die Wirklichkeit ist nicht so **oder** so,
sondern so **und** so.

(Harry Mulisch)

In allen Bereichen der Naturwissenschaften werden zur Beschreibung der Realität Modelle herangezogen. Der Begriff Modell kommt aus dem Griechischen und bedeutet „wissenschaftlich planmäßiges und folgerichtiges Verfahren“. Das Modell ist eine vereinfachte Darstellung der Funktion oder des Ablaufs eines Sachverhalts, die eine Untersuchung oder Erforschung erleichtert oder erst möglich macht.¹¹³ Mit Hilfe der Modelle wird z.B. das Verhalten eines Systems vereinfacht beschrieben. Die Bildung der Modelle und die Genauigkeit, mit der ein Modell die Realität nachbilden muss, hängt stark von der Aufgabenstellung ab, die mit Hilfe eines herangezogenen Modells gelöst werden soll. Damit steht der Zweck des Modells schon bei seiner Bildung im Vordergrund.¹¹⁴ Viele Rechenverfahren, mit denen Ingenieure Bauteile und Bauteilsysteme dimensionieren, beruhen auf Modellen, die das tatsächliche Verhalten der zu dimensionierenden Systeme und Bauteile mehr oder weniger genau beschreiben. Ein Beispiel hierfür ist die DIN 3990 „Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern“, welche mehrere Verfahren zur Dimensionierung von Zahnrädern enthält.¹¹⁵ Jedes einzelne Rechenverfahren hat das selbe Ziel und bildet die Realität modellhaft mit verschiedenen Genauigkeitsgraden ab. Der Anwender muss die Kompetenz besitzen, das für seine Problemstellung richtige Rechenverfahren und damit das richtige Modell der Realität zu wählen.

Ein Modell muss also nicht möglichst genau die Realität abbilden, sonst gäbe es in der oben genannten DIN tatsächlich nur ein Rechenverfahren, sondern ein Modell muss für die Lösung der Problemstellung geeignet sein.

¹¹¹ aus Ehr95 S65, vergl. auch Hey01 S.17

¹¹² vergleiche auch Alb99/2, Alb00/2; Alb00/4; Alb01/1 und vor allem , Alb00/3

¹¹³ nach Duden (Dud96)

¹¹⁴ vergleiche hierzu auch die Definition des Modells nach Pahl u. Beitz (Pah77(3)): „Ein dem Zweck entsprechender Repräsentant (Vertreter) eines Originals“

¹¹⁵ siehe DIN 3990 „Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern“ Teil „Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit“ S.6; 2.3. Rechnerische Sicherheitsfaktoren für Zahnfußbeanspruchung (Zahnbruchsicherheit) S_F

Ein gutes Beispiel hierfür findet sich in der Physik, in der je nach Problemstellung verschiedene Modelle verwendet werden, die das Verhalten von Licht einmal als Welle (Wellenmodell) und ein andermal als Teilchen (Quantenmodell) beschreiben. Beide Modelle sind grundverschieden, stehen gleichberechtigt nebeneinander und werden zur Deutung verschiedener beobachteter Effekte, gemäss ihrer Eignung herangezogen.¹¹⁶

2.4.1 Fazit zur Modellbildung

- Ein Modell beschreibt ein System nie vollständig.
- Es können mehrere verschiedene Modelle gleichberechtigt nebeneinander existieren.
- Modelle werden gemäß ihrer Eignung je nach Aufgabenstellung eingesetzt.
- Das Modell, mit dem sich ein Problem mit geringstem Aufwand lösen lässt, ist jedem anderen Modell vorzuziehen.
- In jedem Modell sollten Vereinbarungen für dessen Anwendung und dessen Geltungsbereich getroffen werden.

Ein Modell ist also weder richtig noch falsch, sondern nur brauchbar oder unbrauchbar!

2.5 Abstraktion

Ausgehend von einer Analyse ist es in der Regel möglich, aufgrund erkannter Merkmale einen übergeordneten Zusammenhang zu finden, der allgemeiner und damit weitreichender ist. Ein solches Vorgehen wirkt zum einen komplexitäts-reduzierend und lässt zum anderen wesentliche Merkmale hervortreten. Beim Betrachter entsteht eine gedankliche Struktur, in die er unterschiedliche Erscheinungsformen leichter abrufbar einordnen kann. Die Abstraktion unterstützt also gleichermaßen kreative, analytische und systematisierende Denkvorgänge. Mit Hilfe der Abstraktion ist es auch eher möglich, ein Problem so zu definieren, dass es von Zufälligkeiten der Entstehung oder Anwendung befreit wird und damit in eine allgemeingültige Lösung überführt werden kann.¹¹⁷

¹¹⁶ Das Verhalten von Licht einmal als Welle und andermal als Teilchen wird auch als Welle-Teilchen-Dualismus des Lichtes bezeichnet.

¹¹⁷ nach Pah77/(3)S.69

2.6 Synthese

„Synthese ist in Ihrem Wesenskern Informationsverarbeitung durch Bilden von Verbindungen, durch Verknüpfen von Elementen mit insgesamt neuen Wirkungen und das Aufzeigen einer zusammenfassenden Ordnung. Es ist der Vorgang des Suchens und Findens sowie des Zusammensetzens und des Kombinierens. Wesentliches Merkmal konstruktiver Tätigkeiten ist das Zusammenfügen einzelner Erkenntnisse oder Teillösungen zu einem funktionierenden Gesamtsystem, d.h. das Verknüpfen von Einzelheiten zu einer Einheit.“¹¹⁸ Die kleinsten Einzelheiten, die beim Konstruieren zu einer Einheit zusammengesetzt werden, sind das Wirkflächenpaar und die damit verbundene Leitstützstruktur.

Beim Syntheseprozess werden auch die durch Analysen gefundenen Informationen verarbeitet.¹¹⁹ Hier wird nochmals deutlich, dass Synthese ohne Analyse kaum möglich ist. (vergleiche auch Ausführungen in Kap. 1.1)

2.7 Funktionen

Die Funktion spielt in der Technik eine zentrale Rolle. Sie ist die Existenzberechtigung eines jeden technischen Systems. Funktionslose technische Systeme sind sinnlos.

In der konstruktionsmethodischen Literatur nimmt der Begriff der Funktion dementsprechend einen besonderen Stellenwert ein und wird in fast allen einschlägigen Werken der Konstruktionsmethodik umfassend behandelt. Die Definition und das damit verbundene Verständnis des Begriffes „Funktion“ unterscheidet sich bei den verschiedenen Autoren zum Teil erheblich.¹²⁰

2.7.1 Der Funktionsbegriff

Nach Duden ist der Begriff „Funktion“ folgendermaßen definiert:

Die Funktion ist eine „(klar umrissene) Aufgabe innerhalb eines größeren Zusammenhangs, Rolle“.¹²¹

In den verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen wird diese sehr allgemein gehaltene Definition mit spezifischen Bedeutungen belegt und beschreibt beispielsweise in der

¹¹⁸ Pahl77/(3)S.70

¹¹⁹ nach VDI 2221

¹²⁰ z.B. Rod70; Kol76 (4); Pahl77 (3); VDI 2221

¹²¹ nach: Dud97

Sprachwissenschaft die Leistung der Sprache als Kommunikationsmittel oder in der Mathematik den Zusammenhang zwischen Größen oder Größengruppen.¹²²

In der Konstruktionswissenschaft wird die Funktion von verschiedenen Autoren unterschiedlich beschrieben. Die folgende Abbildung gibt einen exemplarischen Überblick über das unterschiedliche Verständnis des Funktionsbegriffs. Die Tabelle könnte leicht um weitere Definitionen ergänzt werden, reicht aber aus um das hier nötige Problembewusstsein zu schaffen.

Nr.	Quelle	Begriffsbeschreibung
1	Rod70(4)	Allgemeiner Wirkzusammenhang (WZH) oder die Abhängigkeiten zwischen den Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen eines Systems.
2	Kol76(4)	Tätigkeit oder Fähigkeit technischer Gebilde. Qualitative und/oder quantitative (gesetzmäßige) Beschreibung oder Tätigkeit eines technischen Gebildes; beispielsweise „Kraft (500 N) leiten“.
3	Pah77(3)	Allgemeiner und <i>gewollter</i> Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen.
4	Ehr95	Eine Funktion im Sinne der Konstruktionsmethodik ist die lösungsneutrale Formulierung des <i>gewollten</i> (geplanten, bestimmungsgemäßen) Zwecks eines Produktes. Sie drückt die Zustandsänderung (Eigenschaftsänderung) eines Objektes (Umsatzprodukt) aus, die durch den Funktionsträger bewirkt wird.
5	Bir00	Eine Funktion ist eine lösungsneutrale Beschreibung als Operation des <i>gewollten</i> Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgangsgröße.
6	VDI 2221	Lösungsneutral beschriebene Beziehung zwischen Eingangs-, Ausgangs und Zustandsgrößen eines Systems.
7	DIN 69910	Eine Funktion im Sinn der Wertanalyse ist nach DIN 69910 jede einzelne Wirkung ¹²³ des Wertanalyse-Objekts.

Abbildung 12 „Der Begriff der „Funktion“ in der Konstruktionswissenschaft“

Ergänzend sei hier erwähnt, dass in den Natur- und Ingenieurwissenschaften der Funktionsbegriff auch zur Darstellung eines physikalischen oder mathematischen Zusammenhangs, z.B. in Form einer Gleichung, verwendet wird.

¹²² siehe Heid01; vgl.: Dud74

¹²³ Unter Wirkung wird hier sowohl das Wirken (als Vorgang) wie auch das Ergebnis dieses Wirkens verstanden; nach VDI 2803 Bl. 1, S. 2

Pahl definiert eine technische Funktionen als einen "allgemeinen und gewollten Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen" (siehe Abbildung 12).¹²⁴

Ehrlenspiel und Birkhofer lehnen sich an die Definition von Pahl an, wobei Ehrlenspiel noch den gewollten Zweck als Formulierungsgrundlage der Funktion sieht. Von allen drei Autoren wird bei der Definitionen des Funktionsbegriffes Wert auf einen "gewollten Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgröße" gelegt.

Ungewollte Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen, wie z.B. Abgabe von Wärme durch Reibungsverluste, in der VDI Richtlinie 2803 als ungewollte Funktion¹²⁵ bezeichnet, werden von Birkhofer mit dem Begriff „Verhalten“ beschrieben.¹²⁶ Mit Funktion ist bei Birkhofer die gewünschte, ideale Funktion eines technischen Systems oder Bauteils und mit Verhalten die reale Funktion des technischen Systems oder Bauteils gemeint, die sich aufgrund von Nebeneffekten (z.B. Reibung, Erwärmung, Schwingungen) sowie Bauteil- und Materialeigenschaften (Masse, Elastizität, Dämpfung) von der idealen Funktion unterscheidet. Damit ist die Funktion eine Untermenge des Verhaltens.

Ein Beispiel hierzu:

Die Funktion eines Elektromotors ist nach Birkhofer "Elektrische Energie in mechanische Energie wandeln". Als Eingangsgröße in das technische System „Elektromotor“ steht elektrische Energie zur Verfügung, als Ausgangsgröße wird mechanische Energie abgegeben (siehe Abbildung 13 linke Darstellung).

Im realen System „Getriebemotor“ wird neben der mechanischen Energie auch noch thermische Energie abgegeben. Das Verhalten des Systems Elektromotor hat also neben der Ausgangsgröße "Mechanische Energie" noch eine weitere Ausgangsgröße "Thermische Energie". Die Umwandlung von elektrischer Energie in thermische Energie durch das System „Getriebemotor“ ist nach Birkhofer keine Funktion sondern das Verhalten des Systems (siehe Abbildung 13).¹²⁷

Rodenacker definiert eine technische Funktion als "allgemeiner Wirkzusammenhang (WHZ) oder die Abhängigkeit zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen eines Systems."¹²⁸ Er unterscheidet also nicht zwischen Funktion und Verhalten.

¹²⁴ nach Pah77(3)

¹²⁵ nach VDI 2803 S. 3 ist eine unerwünschte Funktion eine „vermeidbare oder unvermeidbare, nicht gewünschte Wirkung eines WA- Objektes“.

¹²⁶ vgl.: Bir00 im Kap. "Produktfunktionen festlegen"

¹²⁷ vgl.: Bir00 im Kap. "Produktfunktionen festlegen"

¹²⁸ aus Rod91

Thermische Energie wäre bei ihm die Ausgangsgröße der ungewollten Funktion¹²⁹ "elektrische Energie in thermische Energie wandeln".

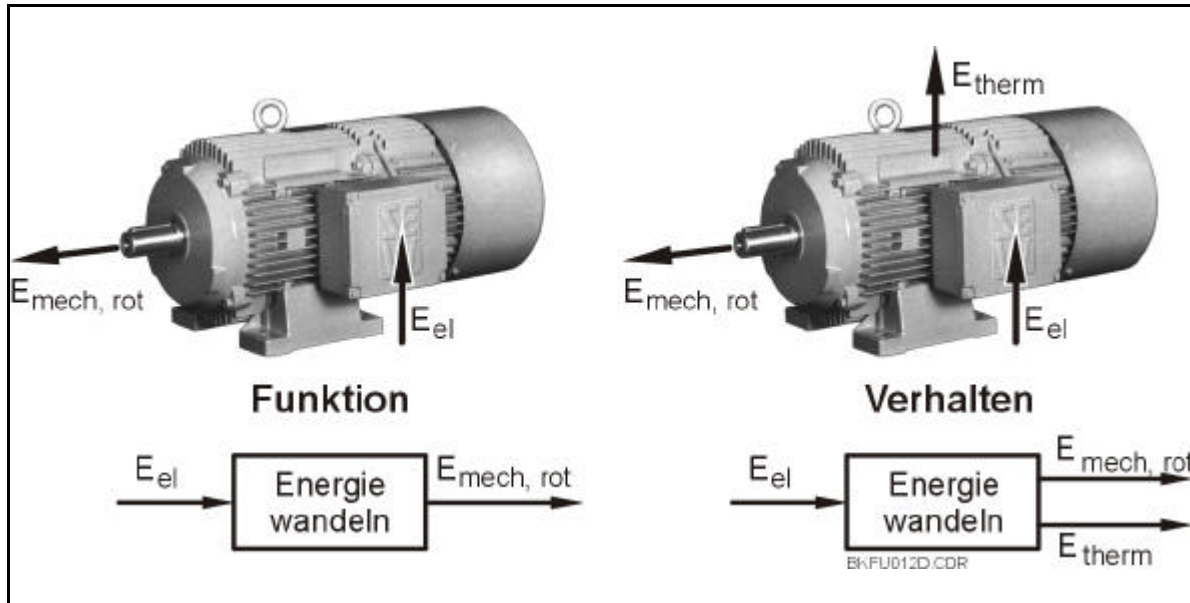


Abbildung 13 „Funktion und Verhalten eines Getriebemotors“ (Quelle Bir00)

Auch die VDI Richtlinie 2221 definiert die Funktion unabhängig vom zu erreichenden Ziel:

Die Funktion ist eine „lösungsneutral beschriebene Beziehung zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen eines Systems“.¹³⁰

In der DIN 69910 „Wertanalyse“ wird die Funktion über die „Wirkung“ definiert. Unter Funktion wird hier sowohl das Wirken (als Vorgang) wie auch das Ergebnis dieses Wirkens verstanden.¹³¹ Funktion wird also auch hier unabhängig vom zu erreichenden Ergebnis definiert.

Selbstverständlich ist die Berücksichtigung ungewollter Funktionen einer Maschine oder eines Maschinensystems für den Entwickler und Konstrukteur unumgänglich. Der Konstrukteur wird z.B. am Getriebemotorgehäuse eine konstruktive Vergrößerung der Oberfläche z.B. durch Kühlrippen vorsehen um die Auswirkungen der ungewollten Funktion „Umwandlung von elektrischer Energie in thermische Energie“ möglichst gering zu halten.

¹²⁹ vgl.: VDI 2803: eine unerwünschte Funktion wird als „eine vermeidbare oder eine unvermeidbare, nicht gewünschte Wirkung des Wertanalyse Objektes“ beschrieben.

¹³⁰ vgl.: VDI 2221 S. 40

¹³¹ nach VDI 2803 Bl. 1 S 2

2.7.2 Formulierung von Funktionen

In der konstruktionsmethodischen Literatur wird vielfältig beschrieben, wie eine Funktion optimal formuliert werden kann. Auch die Anleitung zur Funktionsbeschreibung differiert von Autor zu Autor.

Heidemann¹³² gibt einen guten Überblick über die verschiedenen Formulierungsmöglichkeiten, von denen einige im Folgenden aufgegriffen werden.

Funktionen können danach beispielsweise durch:

- Angabe des Objektes und des objektabhängigen Handlungsverbs: „Wäsche waschen“¹³³
- Verwendung substantivierter Verben: „Waschen“¹³⁴
- Formulierung unter Verwendung des das Umsatzprodukt beschreibenden Substantiv und dem die Eigenschaftsänderung beschreibenden Verbs: „Wäsche waschen“¹³⁵
- ein Substantiv und ein Verb im Infinitiv „Wäsche waschen“¹³⁶

formuliert werden.¹³⁷

Auch heute wird die Formulierung von Funktionen weiterentwickelt. So forscht Grabowski aktuell auf dem Thema der kanonischen Funktionsformulierung, die vor allem bei der Funktionsformulierung mechatronischer Systeme helfen soll.¹³⁸

Besonderes Augenmerk wird in der VDI 2803 auf den **Abstraktionsgrad** der Formulierung der Funktionsbeschreibung gelegt.¹³⁹

Hier werden die Abstraktionsgrade in drei Bereiche gegliedert:

- Realität (völlig konkret → keine Abstraktion),
- ikonische (bildlich-anschauliche) Darstellung
- symbolische (mathematische, verbal-abstrakte,...) Darstellung.

Das Bestimmen des optimalen Abstraktionsgrades geschieht iterativ. Die VDI Richtlinie besagt, dass zur „Ideenproduktion“, der Abstraktionsgrad „richtig ist – also

¹³² in Hei01

¹³³ nach Bir80, aus Hei01

¹³⁴ nach Bre93, aus Hei01

¹³⁵ nach Ehr95, aus Hei01

¹³⁶ nach VDI 2803 Blatt1 S. 2

¹³⁷ aus Hei01

¹³⁸ z.B. in Hua02

¹³⁹ vgl.: VDI 2803 Bl. 1 S 5 „Funktionen sammeln“ und S 8 „Soll-Zustands-Beschreibung“

weder zu hoch noch zu niedrig -, wenn die Grenze zwischen ikonischer und symbolischer Darstellung soeben überschritten wurde, d.h. jeweils eine bildliche Darstellung der gesamten verbal formulierten Funktionenaussage nicht mehr möglich ist...“¹⁴⁰ In Abbildung 14 sind 3 Beispiele für das Formulieren von Funktionen materieller Objekte mit dem richtigen Abstraktionsgrad dargestellt.




Nr.	Schritte – Ausführung			
	Objekt benennen	Lichtschalter für Elektroleuchte	Schmierölpumpe	Heizlüfter
1	Objekt benennen	Lichtschalter für Elektroleuchte	Schmierölpumpe	Heizlüfter
2	Formulierungsvorschlag für die Hauptfunktion	„Stromfluss schalten“	„Öl zuführen“, alternativ „Öl pumpen“	Umgebungsluft erhitzen
3	Abstraktionsgrad richtig?	Nein	Nein	Nein
4	Begründung für die unter 3 gemachte Aussage	<ul style="list-style-type: none"> Durch  ikonisch darstellbar 2 verschiedene Funktionen dargestellt (aus- und einschalten) 	<ul style="list-style-type: none"> Durch  ikonisch darstellbar Eingrenzung auf „Öl“ schränkt Suchfeld zu stark ein 	<ul style="list-style-type: none"> Durch  ikonisch darstellbar Zu eng (auf Luft) begrenzt: Übergeordneter Begriff fehlt
5	Korrigierte Formulierung	Energieübertragung beeinflussen	Flüssigkeit fördern	Umfeld erwärmen
6	Beweis für richtigen Abstraktionsgrad	<ul style="list-style-type: none"> Nicht ikonisch darstellbar Übergeordnete Begriffe weiten das Suchfeld aus 	<ul style="list-style-type: none"> Gattungsbezeichnung für Öl verwendet HF in dieser Breite ikonisch nicht darstellbar 	<ul style="list-style-type: none"> Ikonisch nicht in voller Breite darstellbar Übergeordneter Begriff „Umfeld“ eröffnet großes Suchfeld

Abbildung 14 „Beispiele für das Formulieren von Funktionen materieller Objekte mit dem richtigen Abstraktionsgrad“ Quelle VDI2803¹⁴¹

¹⁴⁰ aus VDI 2803 Bl.1 S. 10

¹⁴¹ VDI 2803 S.13; Bild 12.1

2.7.3 Funktionsbetrachtung im Produktentstehungsprozess

Im Produktentstehungsprozess (siehe Abbildung 9) wird vor allem in der konzeptionellen Phase Wert auf die Funktionsbetrachtung gelegt. Es wird vorgeschlagen das zu entwickelnde Produkt abstrakt durch seine Funktionen zu beschreiben, um eine frühe Fixierung auf konkrete Bauteile und damit das Einengen des Lösungsfeldes zu vermeiden. Die übergeordnete Funktion eines technischen Systems wird mit dem Begriff „Gesamtfunktion“ beschrieben. Die Gesamtfunktion kann in weitere Funktionen, die hierarchisch geordnet und in Klassen zusammengefasst werden können, zerlegt werden.

Zum Beispiel beschreibt Koller dieses Vorgehen im Konstruktionsprozess folgendermaßen:

„Der Ausgangspunkt für den Konstruktionsprozess ist die in der Produktplanung erstellte Aufgabenstellung. Der erste Schritt auf dem Weg von einer Aufgabenstellung zu einer konkreten Lösung ist die Formulierung der Gesamtfunktion des zu entwickelnden Systems entsprechend der vorgegebenen Zweckbeschreibung. In anschließenden Arbeitsschritten wird diese Gesamtfunktion weiter in Teil- bzw. Elementarfunktions- und Grundoperationsstrukturen gegliedert.“¹⁴²

Als Methoden zur Unterstützung des Produktentstehungsprozesses werden die „Funktionsanalyse“ und „Funktionssynthese“ bereitgestellt. Eine Funktionsbeschreibung kann dabei als Funktionsanalyse von einem vorliegenden realen Produkt ausgehen, oder als Funktionssynthese für eine neue Produktidee erarbeitet werden.

2.7.3.1 Funktionsanalyse

Die Funktionsanalyse wird zu den wichtigsten, in ihrer Bedeutung jedoch oft unterschätzten Modulen der Wertanalyse (WA), aber auch verwandter Methodiksysteme wie Konstruktionsmethodik, Total Quality Management (TQM), Industrial Design etc. gezählt.¹⁴³

Unter Funktionsanalyse (FA) im Sinne der Wertanalyse wird das Analysieren der Funktionen von WA-Objekten verstanden. Nach Gierse und Akiyama sollen demnach die Objekte auf ihre Wirkungen, Zwecke und Konzepte hin analysiert, das heißt in ihre verschiedenen Komponenten, Elemente, Aspekte etc. aufgegliedert und diese bezüglich ihrer verschiedenen Kennzeichen, Merkmalattribute und dergleichen

¹⁴² nach Kol76 S6

¹⁴³ nach VDI 2803 Bl. 1 S.2

abstrahiert, aufgeteilt, eingeordnet und bestimmt werden.¹⁴⁴

2.7.3.2 Funktionssynthese

Die Funktionssynthese abstrahiert eine Aufgabe auf die für das zu entwickelnde Produkt erforderlichen Funktionen.

Zunächst wird bei der Funktionssynthese die Gesamtfunktion mit Eingangs- und Ausgangsgrößen formuliert. Hierbei hilft eine Prozessbetrachtung, die vorhandene Eingangsgrößen und erforderliche Wirkgrößen als Ausgangsgrößen liefert.

Die Gesamtfunktion wird anschließend in Teilfunktionen aufgespalten. Die Eingangsgrößen müssen im technischen System in der Regel in mehreren Teilschritten verändert werden, um die Ausgangsgröße zu erzeugen. Die Teilschritte entsprechen den zu erfüllenden Teilfunktionen.

Die gefundenen Teilfunktionen müssen nun in einem logischen Zusammenhang verknüpft werden, um die schrittweisen Veränderungen und Verknüpfungen der Flüsse zu erreichen. Dieses Vorgehen wird als „Funktionsstruktur aufstellen“ bezeichnet.

Die möglichen Funktionsstrukturen aufzeigen und die günstigste anzugeben ist Aufgabe und Ziel von Arbeitsschritten, die zusammenfassend als **Funktions-synthese** bezeichnet werden sollen.¹⁴⁵

Wichtig ist bei der Funktionssynthese das Festlegen der Systemgrenze. Dadurch wird eine deutliche Abgrenzung der zu betrachtenden Bestandteile gegenüber dem Ober-, Nachbar- und Untersystem symbolisiert. Dabei muss beachtet werden, dass auch Wirkungen über die Systemgrenze hinaus mit den Nachbarsystemen ausgetauscht werden. Diese Wirkungen müssen bei der Funktionsbetrachtung unbedingt berücksichtigt werden. Wie in der Technischen Mechanik üblich könnte man diese Wirkungen als Schnittgrößen an der Systemgrenze antragen. (Weitere Ausführungen und Beispiele hierzu siehe Kap 3.7.3 Beispiel 2 quasi stationäre Betrachtung: Getriebemotor)

Bei der Funktionssynthese wird zuerst ein Minimalansatz (Minimalstruktur) formuliert und dieser schrittweise erweitert, wenn zugeordnete Lösungen die Aufgabe nicht oder nicht genügend erfüllen. Die Funktionssynthese findet Anwendung:

- bei Neukonstruktionen, um einen Überblick über das Lösungsfeld zu erhalten
- bei innovativen Lösungen mit bewusstem Loslösen von Bekanntem.¹⁴⁶¹⁴⁷

¹⁴⁴ aus VDI 2803 Bl. 1 S.2

¹⁴⁵ nach Kol76 S6

2.7.3.3 Funktionenstruktur

Wie oben bereits erwähnt, können Funktionen hierarchisch in Klassen von Funktionen geordnet werden. Aus der hierarchischen Ordnung von Funktionen kann eine sogenannte Funktionenstruktur gebildet werden. Die Funktionenstruktur ist eine Möglichkeit ein System funktional zu beschreiben.

Abbildung 14 zeigt die Einteilung von Funktionsarten und Funktionsklassen nach VDI 2803. Die Funktionenstruktur FAST (Funktions-Analyse-System-Technik), die in

Abbildung 14 nur der Vollständigkeit halber aufgeführt ist, dient dazu die von der übergeordneten Funktion über Basis- und Folgefunktionen bis zur akzeptierten Funktion laufende Verkettung auf dem logischen Pfad – einschließlich eventueller logischer Verknüpfungen – zu erkennen.

Klassen von Funktionen dienen dem Aufstellen einer Rangordnung bzw. einer Funktionenhierarchie. Das Aufstellen dieser Rangordnung kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen. Die Unterscheidung in Haupt- und Nebenfunktionen knüpft an die Wichtigkeit von Funktionen für den Einsatz beziehungsweise für den Nutzer des Wertanalyseobjektes an.¹⁴⁸

Im Allgemeinen gibt es für eine Aufgabenstellung mehrere verschiedene Funktionenstrukturen, welche zwar alle die vorgegebene Gesamtfunktion erfüllen, aber nicht gleich günstig für den betreffenden Anwendungsfall sind.

Die Zuordnung von Funktionen zu diesen Funktionenklassen ist damit sowohl vom Bearbeiter als auch vom Ziel der Untersuchung abhängig.

Ein Wertanalyse Objekt hat mindestens eine Hauptfunktion, kann jedoch auch mehrere Haupt- sowie Nebenfunktionen haben. Nach der VDI Richtlinie bedingen Haupt- und Nebenfunktionen einander nicht, sind also jede für sich frei wählbar beziehungsweise vorzugeben.

Die **Gesamtfunktion** ist die gesamte Wirkung aller ihrer in einer Funktionenstruktur untergeordneten Funktionen.

Als **Teilfunktionen** werden diejenigen Funktionen bezeichnet, deren zusammenwirken die jeweilige Gesamtfunktion ergibt. Auf unterster Hierarchiestufe liegen ggf.

¹⁴⁶ nach Lehrveranstaltung „Produktentwicklung I (PE I)“ Birkhofer; Technische Universität Darmstadt

¹⁴⁷ nach unserer Vorstellung findet die Funktionssynthese bei innovativen Lösungen Anwendung. Innovative Lösungen liegen erst dann vor, wenn die erfolgreiche Umsetzung am Markt erfolgt ist (siehe auch Sch64)

¹⁴⁸ nach VDI 2803 Bl. 1 S. 3; vgl. auch: DIN 69910

Elementarfunktionen, die nicht mehr weiter unterteilbar sind.¹⁴⁹

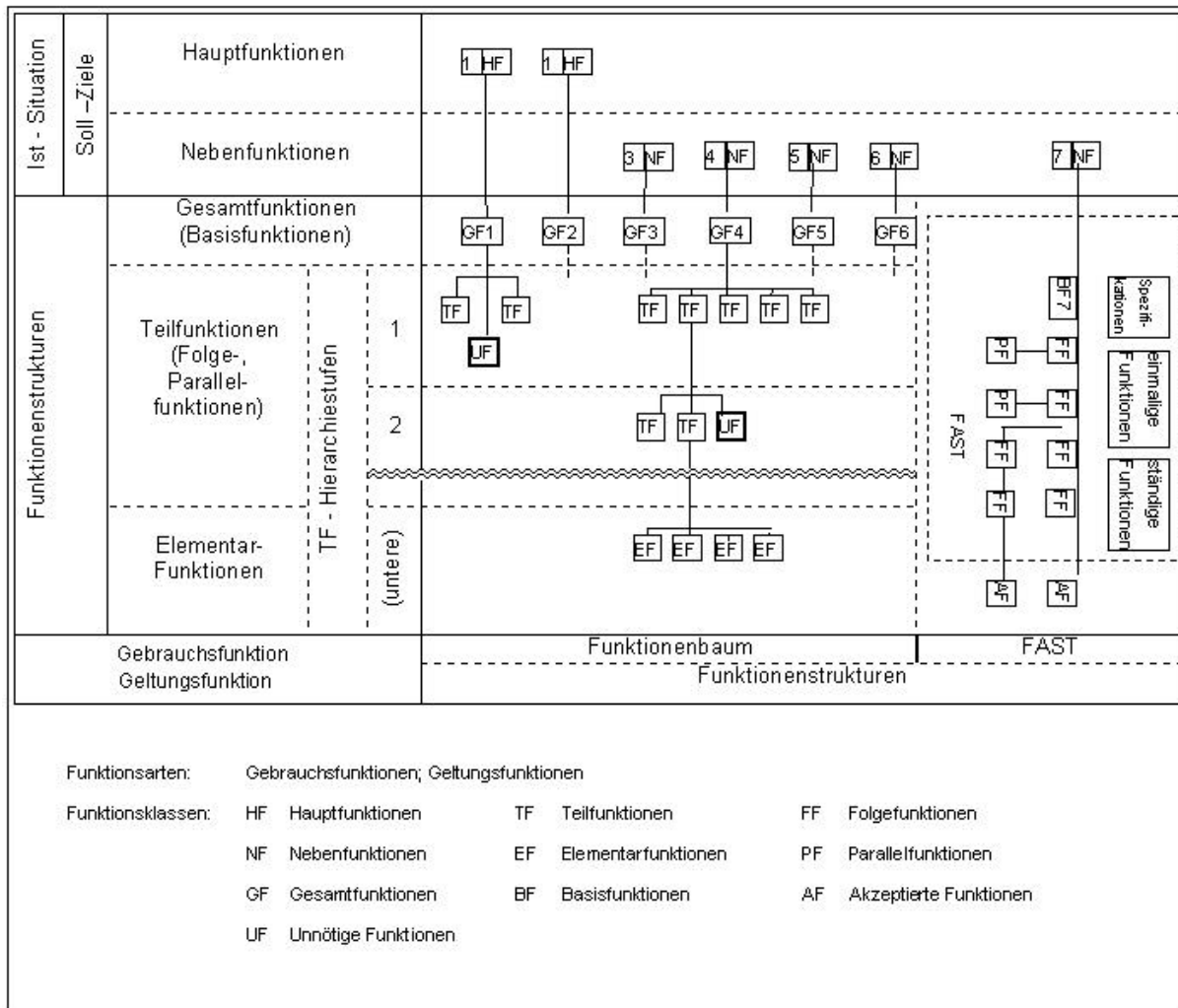


Abbildung 15 „Übersicht und Einteilung von Funktionsarten und Funktionsklassen“¹⁵⁰

Gesamt- und **Teilfunktionen** bedingen einander gemäß ihrer Hierarchie in der Funktionenstruktur und können daher nach der VDI Richtlinie 2803 Blatt 1 nicht frei gewählt beziehungsweise frei vorgegeben werden. Zwischen ihnen bestehen Zusammenhänge logischer, physikalischer, technologischer oder ablauforganisatorischer Art, die summarisch in den zugehörigen Funktionenstrukturen zum Ausdruck kommen müssen.¹⁵¹

Neben den Gesamt-, Haupt-, Teil- und Nebenfunktionen werden in der Abbildung 15 noch weitere Funktionsklassen aufgeführt, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Funktionenstrukturen sollen bestimmte Aspekte der gegenseitigen Zuordnung von

¹⁴⁹ nach VDI 2221

¹⁵⁰ aus VDI2803 Bl. 1 S.3 in Anlehnung an Gierse

¹⁵¹ nach VDI 2803 Bl. 1 S.3, vgl: VDI 2803 Bl. 2 und Aki 91

Funktionen darstellen. Es gibt verschiedenste Arten Funktionen zu strukturieren. In der VDI Richtlinie 2803 werden

- verknüpfende Funktionsstrukturen
- Funktionenbäume
- Funktionsstruktur FAST (Funktionen-Analyse-System-Technik siehe Abbildung 15 rechte Spalte)

vorgestellt und erläutert.¹⁵²

2.7.4 Fazit zur Funktion – Definition des Funktionsverständnis in dieser Arbeit

In der vorliegenden Arbeit soll die Funktion wie in der VDI 2221 folgendermaßen definiert werden.

Eine Funktion ist eine lösungsneutral beschriebene Beziehung zwischen Eingangs-, Ausgangsgröße eines Systems.

Weiterhin gelten für diese Arbeit im Zusammenhang mit dem Funktionsbegriff folgende Vereinbarungen:

1. Das Verhalten des Systems ist im Funktionsbegriff bereits integriert
2. Der Abstraktionsgrad der Funktionsformulierung ist abhängig von dem verfolgten Ziel, das mit Hilfe der Funktionenbetrachtung erreicht werden soll.

Erklärungen zu den Vereinbarungen:

Zu 1.: siehe Erklärungen hierzu im Kap. 2.7.1 Der Funktionsbegriff.

Zu 2.: Mit der Formulierung von Funktionen haben sich wie in Kap. 2.7.2 Formulierung von Funktionen gezeigt verschiedene Autoren intensiv auseinandergesetzt. Die nach VDI-Richtlinie 2803 „korrekte“ Funktionsformulierung ist für einige Methoden der Produktentwicklung wichtig und sinnvoll aber gleichzeitig für den Entwickler in der Praxis schwer zugänglich. Bei der Entwicklung des Elementmodells wurde auf die Möglichkeit einer „weicheren“ Funktionsformulierung Wert gelegt. Für die Wirksamkeit des Elementmodells spielt die Art der Formulierung keine Rolle und kann pragmatisch angegangen werden da jede Funktion, unabhängig von der Art ihrer

¹⁵² siehe VDI 2803 Bl.1 „Funktionenstrukturen erstellen“ S. 5

Formulierung auf Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen zurückgeführt werden kann.

2.8 Fazit zu „Grundlagen und Stand der Technik“

Es gibt eine Vielzahl von Methoden, die helfen ein technisches Produkt abstrakt als System über Funktionen zu beschreiben. All diese Methoden dienen dazu das Produkt bauelementeneutral zu beschreiben. Der übergeordnete Zweck dieser Beschreibungsart ist:

- eine Vorfixierung und damit eine Einengung des Lösungsraumes vermeiden (Funktionensynthese)
- die Übersichtlichkeit bei der Beschreibung eines technischen Systems zu erreichen (Funktionsanalyse)

Nachdem im Entwicklungsprozess mit Hilfe der Funktionensynthese die günstigste Funktion zum Erreichen eines Entwicklungsziels gefunden wurde, muss diese prinzipiell gelöst werden. Die gefundenen Lösungsprinzipien müssen im Prozessschritt „Gestaltung“ konstruktiv umgesetzt werden (siehe auch Abbildung 10, S. 29 und Abbildung 11, S. 30). Dieser Schritt wird wie oben beschrieben methodisch kaum unterstützt.

3 Das Elementmodell technischer Systeme

3.1 Definitionen

In den meisten Werken der Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik werden, wie bereits geschildert, gleiche Begriffe mit unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Im Anhang sind einige grundlegende Begriffe und deren Bedeutung in Abhängigkeit vom Verfasser aufgeführt.

Zum Beispiel wird der Begriff „Wirkfläche“, der in der hier vorliegenden Arbeit eine zentrale Rolle spielt, von Ersoy, Rodenacker, Koller und Pahl/Beiz unterschiedlich definiert.

Ersoy bezeichnet mit Wirkfläche einerseits „diejenigen Begrenzungsflächen, die mit einer zweiten Begrenzungsfläche eines anderen Einzelteils, mit einem zu bearbeitenden Produkt oder mit einer bedienenden Person in Berührung sind“.¹⁵³ Damit ist die Wirkfläche nach Ersoy nicht zwingend mit der Funktion verknüpft.

An einer anderen Stelle derselben Arbeit definiert Ersoy die Wirkfläche als eine „von außen beanspruchte Fläche“. Womit er die Wirkfläche an einer Funktion festmacht. Flächen, die am Energieaustausch (z.B. Elektronenleitung) zweier Teilsysteme beteiligt sind, fallen nach der Definition der Wirkfläche nach Ersoy nicht unter den Begriff Wirkfläche.

Rodenacker beschreibt die Wirkflächen als „Grenzflächen, die zwei Medien voneinander trennen und ein physikalisches Geschehen erzwingen“.¹⁵⁴ Er gibt Beispiele für Wirkflächen folgendermaßen an: „Die Berührfläche zwischen Lager und Welle, die in ein Elektrolyt eingetauchte Fläche einer Elektrode oder die Phasengrenze zwischen Wasser und Wasserdampf in einem Dampfkessel sind alle Wirkflächen, solange die auf ihnen hervorgerufene Wirkung zum Erfüllen **gewünschter** Funktionen dient“.¹⁰⁵

Nach Rodenacker können also auch Gase und Flüssigkeiten Wirkflächen bilden!

Nach seiner Definition ist eine Fläche, über die eine unerwünschte Wirkung auf ein System ausgeübt wird, keine Wirkfläche. Die rostende Oberfläche eines Bauteilträgers im Salzwasser wird nach dieser Definition nicht als Wirkfläche bezeichnet, da

¹⁵³ aus Ers75; S.13

¹⁵⁴ aus Rod73

sie nicht zur Erfüllung einer gewünschten Funktion dient, obwohl die Wirkung auf das technische System über diese Fläche geschieht.

Koller bezeichnet mit dem Begriff Wirkfläche „eine Teiloberfläche technischer Gebilde, welche für die Funktion (das Wirken) des betreffenden technischen Gebildes von wesentlicher Bedeutung ist, z.B. die Reibfläche einer Bremsscheibe“¹⁵⁵ und führt damit den Begriff der „wesentlichen Bedeutung“ ein.

Die generellste Definition liefern Pahl und Beitz: „Fläche, an der oder über die eine Wirkung ermöglicht oder erzwungen wird“. Der Begriff „Wirkung“ wird von Pahl/Beitz nicht explizit definiert.

Anhand dieser sehr unterschiedlichen Definitionen des Begriffes „Wirkfläche“ wird deutlich, wie wichtig eine eindeutige Definition der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Begriffe ist. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel die einzelnen Elemente des Elementarmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ und einige weitere Begriffe definiert. Außerdem befindet sich im Anhang eine Tabelle mit weiteren Begriffsdefinitionen.

3.1.1 Wirkflächen WF

Definition

Wirkflächen sind feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte¹⁵⁶ Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise im Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen und am Energie-, Stoff- und Informationsaustausch¹⁵⁷ des technischen Systems beteiligt sind.

Die Analyse (und damit das Verständnis des Begriffs) der Wirkfläche muss problemspezifisch erfolgen. So kann jede Wirkfläche bei einer Betrachtung mit vergrößerter Auflösung in kleinere Wirkflächen zerlegt werden (siehe „Veränderung der Auflösung der Betrachtung“ auf Seite 71).

Jeder Austausch von Energie, Stoff und Information geschieht über Wirkflächen.

¹⁵⁵ aus Kol76(4)

¹⁵⁶ „Generalisiert“ wird hier in der Bedeutung „verallgemeinert“ in Anlehnung an die Physik verwendet, in der eine „generalisierte Kraft“ auch ein Moment oder ein Impuls sein kann.

¹⁵⁷ „Energie, Materie und Information werden in der konstruktionsmethodischen Literatur grundlegend nebeneinander gestellt. Unter Energie wird in diesem Zusammenhang mechanische Energie, thermische Energie, elektrische Energie, Kernenergie, usw. verstanden. Gleichzeitig wird aber auch Kraft, Strom, Wärme usw. dem Begriff Energie zugeordnet. Dies ist physikalisch zwar nicht richtig, zeigt aber erneut, wie Ingenieure zu Vereinfachungen und Modellen neigen, solange sie zielführend sind. Im weiteren Verlauf der Arbeit soll der Begriff der Energie in diesem Sinne verstanden werden.“ Alb02/1

3.1.2 Begrenzungsflächen BF

Definition:

Begrenzungsflächen BF sind feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die nie¹⁵⁸ Wirkflächen sind.

Die Begrenzungsflächen werden daher nie am Energie-, Stoff- oder Informationsaustausch teilnehmen und sind damit funktionslos. Eine wesentliche Aufgabe des Produktentwicklers in der Gestaltungsphase besteht im Vordenken, welche Flächen Wirkflächen und welche Begrenzungsflächen sein werden. Wird eine vom Produktentwickler als Begrenzungsfläche gestaltete Fläche zur Wirkfläche, wird sie die vom Produktentwickler nicht im voraus bedachte Funktion meist nicht erfüllen können und das technische System kann versagen. Auf diesen Umstand wird noch ausführlich im Kapitel „Veränderung von Randbedingungen“ auf Seite 68 eingegangen.

3.1.3 Wirkflächenpaar WFP

Definition:

Wirkflächenpaare werden aus genau zwei Wirkflächen gebildet, die zeitweise, ganz oder teilweise, in Kontakt stehen und zwischen denen Energie, Stoff und Information übertragen wird.

Das Wirkflächenpaar kann nur zeitweise, also temporär existieren. Werden die beiden, das Wirkflächenpaar bildenden Wirkflächen wieder voneinander getrennt, existiert das Wirkflächenpaar solange nicht mehr, bis die beiden Wirkflächen wieder in Kontakt treten.

3.1.4 Funktionskontakt FK

Definition:

Der Funktionskontakt ist der Teil des Wirkflächenpaares, in dem aktuell die Wechselwirkung stattfindet.

Ein Funktionskontakt kann auch das gesamte Wirkflächenpaar sein. Wird der Kontakt zwischen zwei Wirkflächen im Wirkflächenpaar aufgehoben, existiert der Funktionskontakt selbstverständlich auch nicht mehr.

¹⁵⁸ Die Begrenzungsfläche kann nicht per se definiert werden, sondern nur aus einer Willensbildung heraus. Der Produktentwickler muss entscheiden was für ihn wichtig ist.

3.1.5 Leitstützstruktur LSS

Definition:

Leitstützstrukturen sind Volumina¹⁵⁹ von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzte Räume, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und dauernd oder zeitweise eine Leitung von Energie, Stoff oder Information zwischen den Wirkflächen eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines Feldes ermöglichen.

Wird innerhalb eines technischen Bauteils weder Energie, Stoff noch Information weitergeleitet, existiert auch keine Leitstützstruktur. Die Leitstützstruktur tritt nur zusammen mit Wirkflächenpaaren auf.

3.1.6 Tragstrukturen TS

Definition:

Die Tragstruktur ist die Menge aller möglichen Leitstützstrukturen.

Die Tragstruktur definiert das funktionsrelevante Volumen eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines Feldes.

3.1.7 Reststrukturen RS

Definition:

Reststrukturen sind Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felderfüllte Räume, die nie Tragstruktur werden.

Reststrukturen sind ähnlich wie die Begrenzungsflächen funktionslos. An technischen Bauteilen finden sich eine Vielzahl solcher Reststrukturen, die zum Beispiel aus fertigungstechnischen Gründen oder Kostengründen nicht entfernt werden.¹⁶⁰

3.1.8 Wirkstrukturen

Definition:

Die Wirkstruktur ist die Menge aller Wirkflächen und Leitstützstrukturen eines technischen Systems, eines technischen Teilsystems oder eines Bauteils.

Die Wirkstruktur definiert alle Elemente, die das funktionale Verhalten beeinflussen.

¹⁵⁹ Der Bereich, den die Leitstützstruktur einnimmt, kann nicht per se definiert werden, sondern nur aus einer Willensbildung heraus. Der Produktentwickler muss entscheiden was für ihn wichtig ist.

¹⁶⁰ Die rechnerunterstützte Topologieoptimierung (z.B. mit FEM) hat das Ziel diese Reststrukturen zu identifizieren und zu entfernen um Leichtbaukonstruktionen zu realisieren [Alb01/2].

3.1.9 Einordnung der Elemente des Elementmodells „WFP & LSS“

Abbildung 16 verdeutlicht die Zusammenhänge der oben definierten Begriffe bezüglich der Bauteil- und der Systemebene.

Elemente der Bauteilebene definieren die Gestalt des Bauteils,

Elemente der Systemebene legen die Funktion (die Wirkung) des Bauteilsystems fest.¹⁶¹

Die Flächenelemente Wirkfläche, Begrenzungsfläche und die Körperelemente Tragstruktur, und Reststruktur können am Bauteil identifiziert werden. Diese Elemente der Bauteilebene müssen in der Gestaltungsphase der Produktentwicklung in ihrer Gestalt festgelegt werden. Dies ist nur möglich, wenn das wechselwirkende, paarbildende Flächenelement und das wechselwirkende, damit verbundene Körperelement beachtet wird. Elemente der Bauteilebene sind mindestens über die gesamte Lebensdauer des Bauteils existent.

Das Flächenelement Wirkflächenpaar und das Körperelement Leitstützstruktur kann nur im Zusammenspiel des betrachteten Bauteils mit einem Obersystem identifiziert werden. Diese Elemente der Systemebene können auch zeitlich begrenzt existieren.

	Flächenelemente		Körperelemente		Auftreten
Bauteil- ebene	Wirkfläche	WF	TS	Tragstruktur	zu jeder Zeit
	Begrenzungsfläche	BF	RS	Reststruktur	
System- ebene	Wirkflächenpaar	WFP	LSS	Leitstützstruktur	temporäres Auftreten möglich
	(Funktionskontakt)	FK			

Abbildung 16 „Einordnung der Elemente des Elementmodells“

3.2 Wirkung und Funktion

1687 veröffentlichte Isaac Newton in seinem Werk „Philosophia naturalis principia mathematica“ drei Grundregeln der Bewegung, die unter der Bezeichnung newtonsche Axiome bekannt wurden. Das dritte Axiom, das auch als Wechselwirkungsgesetz, Reaktionsgesetz oder Gegenwirkungsprinzip bezeichnet wird, lautet wie folgt:

¹⁶¹ Vergleiche hierzu auch das Kapitel 3.3 Grundhypothesen

Die von zwei Körpern aufeinander ausgeübten Kräfte sind gleich groß und entgegengesetzt (actio = reactio).¹⁶²

Mit anderen Worten bedeutet dies, dass einer Wirkung immer eine Gegenwirkung gleich ist und dass diese Gegenwirkung in entgegengesetzter Richtung wirkt. Wirkungen können nur zusammen mit Gegenwirkungen auftreten.

Dieses Grundgesetz gilt natürlich auch für alle technischen Systeme.

Die Funktion eines technischen Systems tritt nur in Erscheinung, wenn sie eine Wirkung auslöst. Das heißt die Funktion ist wirkungsauslösend. Die Wirkung löst nun selbst eine Reaktion aus, die die Wirkung sichtbar macht. Die **Reaktion** ist eine **Rückaktion** (actio = reactio).

Eine Wirkung kann nur zwischen Partnern stattfinden, die miteinander wechselwirken und dadurch in einer Beziehung zueinander stehen. Beziehungen sind damit immer wechselseitig.

Zwischen den Partnern existiert eine Schnittstelle über die die Wechselwirkungen ausgetauscht werden. Diese Schnittstelle ist das Wirkflächenpaar!

3.3 Grundhypothesen

3.3.1 Einleitung

Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ basiert auf den folgenden 3 Grundhypothesen. Die Anwendung der Hypothesen bei der Analyse und bei der Synthese im Entwicklungsprozess wird in Kapitel 3.7, Kapitel 4 und Kapitel 5 gezeigt.

3.3.2 Grundhypothese I

Jedes Grundelement¹⁶³ eines technischen Systems erfüllt seine Funktion durch eine Wechselwirkung mit mindestens einem anderen Grundelement.

Die eigentliche Funktion – und damit die gewünschte Wirkung – wird erst durch den Kontakt einer Fläche mit einer anderen Fläche möglich. Diese Flächen sind Wirkflächen und bilden zusammen ein Wirkflächenpaar.

¹⁶² siehe New14, S. 15

¹⁶³ Mehrere Grundelemente können gemeinsam ein Bauteil bilden. z.B. zwei zusammengeschweißte Blechteile (Grundelemente) ergeben zusammen ein Bauteil.

3.3.3 Grundhypothese II

Die Funktion eines technischen Systems oder eines technischen Teilsystems wird grundsätzlich über mindestens zwei Wirkflächenpaare und eine sie verbindende Leitstützstruktur verwirklicht.

Funktionsbestimmend sind dabei allein die Eigenschaften und Wechselwirkungen der beiden Wirkflächenpaare und der sie verbindenden Leitstützstruktur.

Spielen Felder für die Funktionserfüllung eine Rolle, so ist die Wechselwirkung der Leitstützstruktur des Feldes mit mindestens zwei weiteren Leitstützstrukturen zusätzlich funktionserfüllend.¹⁶⁴

Dabei sind die Wirkungen, die die beteiligten Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen auf das System ausüben, die einzige Ursache für die Wirkung des technischen Systems auf seine Umgebung.

3.3.4 Grundhypothese III

Jedes System, das Funktionen erfüllt, besteht aus den Grundelementen Wirkflächenpaar und Leitstützstruktur, die in beliebiger Anzahl, Anordnung und Form auftreten können.

Ein Wirkflächenpaar setzt sich aus genau zwei Wirkflächen zusammen.

Das kleinste in jedem funktionserfüllenden System, wie z.B. einer Maschine, einem technischen Teilsystem oder einem Maschinenelement, auftretende funktionsbeeinflussende Element ist das Wirkflächenpaar und die generell in Kombination mit diesem auftretende Leitstützstruktur. Das Wirkflächenpaar befindet sich immer an der Schnittstelle zum Nachbarteil im Neben-, Unter- oder Obersystem (siehe auch Kap. 3.4 Systembetrachtung mit dem Elementmodell).¹⁶⁵

Die Frage Reuleaux von 1874, aus welchen kleinsten Teilen oder Elementen jede Maschine zusammengesetzt sei¹⁶⁶, lässt sich durch Grundhypothese III beantworten. Das kleinste in jeder Maschine vorkommende Element ist nach dem Elementmodell das Wirkflächenpaar und die generell in Kombination mit diesem auftretende Leitstützstruktur.

¹⁶⁴ ausführliche Erklärungen hierzu siehe Kap. 3.9 Felder im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“

¹⁶⁵ Alb02

¹⁶⁶ Reu75; vergleiche auch Kap. 2.1 Geschichtliche Entwicklung des methodischen Konstruierens der vorliegenden Arbeit.

Bei näherer Betrachtung stellt die Grundhypothese III eine logische Weiterentwicklung der Reuleauxschen „Gelenksystematik“ dar. Reuleaux versuchte die Frage nach dem kleinsten Element durch Auffinden eines kleinsten Körpers zu beantworten. Das kleinste auftretende Element¹⁶⁷ liegt aber generell zwischen den Körpern, die durch Wechselwirkungen an der Funktion des technischen Systems beteiligt sind. Gleichzeitig mit dem Auftreten dieser kleinsten Elemente, den Wirkflächenpaaren, entstehen die Leitstützstrukturen.¹⁶⁸

3.4 Systembetrachtung mit dem Elementmodell

Jedes technische System besteht aus Teilsystemen. Die einzelnen Teilsysteme lassen sich hierarchisch ordnen. Ein Teilsystem mit niedriger Hierarchiestufe ist das Bauteil¹⁶⁹, welches wieder ein System aus verschiedenen Elementen darstellt. Diese Elemente sind:

- die Wirkstruktur,
- die Reststruktur und
- die Begrenzungsfläche (siehe Abbildung 17).

Die Wirkstruktur enthält die Wirkflächen des Bauteils und die Tragstruktur, die sich wiederum aus der Menge der möglichen Leitstützstrukturen zusammensetzt.

Zwei Systeme, Teilsysteme oder Bauteile gleicher und verschiedener Hierarchiestufe, die an der Funktionserfüllung beteiligt sind, werden grundsätzlich über mindestens zwei Wirkflächenpaare, die wiederum jeweils zwei Wirkflächen enthalten, gekoppelt.

Eine Kopplung ergibt sich, wenn bestimmte Outputs eines Elements (Systems) zugleich Input eines anderen Elementes (Systems) sind. Die Kopplung kann entweder in Serie, parallel, als Rückkopplung oder als Kombination angeordnet werden. Kopplungen können stofflicher, energetischer oder informeller Art sein¹⁷⁰.

Gekoppelte Systeme, Teilsysteme oder Bauteile gleicher Hierarchieebene n bilden zusammen ein System der Hierarchiestufe $n+1$.

¹⁶⁷ gemeint ist hier das kleinste Element auf funktionaler Ebene, nicht auf materieller Ebene!

¹⁶⁸ Alb02/1

¹⁶⁹ Setzt sich das Bauteil aus mehreren Grundelementen zusammen, z.B. zwei zusammengeschweißte Bleche bilden zusammen ein Bauteil, kann die Systembetrachtung mit dem Elementmodell um eine Hierarchiestufe erweitert werden.

¹⁷⁰ z.B. nach Hub73 (2)

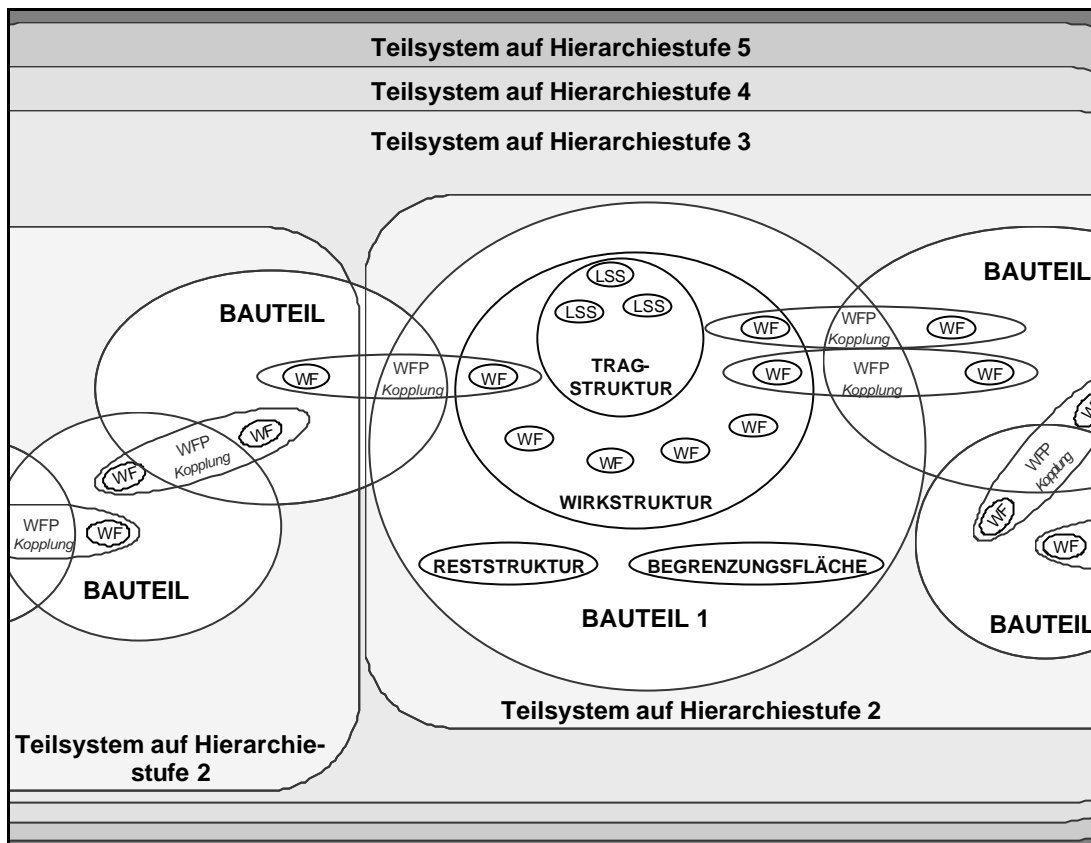


Abbildung 17 „Kopplung einzelner Teilsysteme / Mengendarstellung der verschiedenen Elemente bis auf Bauteilebene¹⁷¹“

Der fraktale Charakter des Elementmodells

Die Betrachtung der Wirkflächen kann fraktal¹⁷², d.h. auf unterschiedlichen Hierarchieebenen immer wieder gleich erfolgen. Bei der Betrachtung eines kompletten Getriebes finden sich z.B. Wirkflächen an der Eingangs- und Ausgangswelle, den Flanschen und den Füßen. Der „Rest“ des Getriebes kann als Leitstützstruktur betrachtet werden, die die einzelnen Wirkflächenpaare verbindet.

Weitere Wirkflächen werden erst „sichtbar“, wenn die „Black-Box“ (siehe auch Abbildung 5 und Erklärungen Seite 12) geöffnet wird. Das heißt zu verschiedenen Betrachtungsebenen gehören auch verschiedene relevante Wirkflächen. Eine vollständige Betrachtung aller Wirkflächen im technischen Produkt ist meist überflüssig. Die Anwendung des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ erfolgt auf jeder der verschiedenen Hierarchieebenen nach derselben Art und Weise.¹⁷³

¹⁷¹ die gleiche Darstellung ist z.B. auch bis auf Grundelementebene möglich (vergleiche auch „der fraktale Charakter des Elementmodells“)

¹⁷² im Sinne von „vielfältig gebrochen, stark gegliedert“ nach Dud97; selbstabbildend

¹⁷³ siehe auch Kap. 3.7.2.3 „Veränderung der Auflösung der Betrachtung“

3.5 Mengentheoretische Betrachtung und Erläuterungen zu den Grundhypothesen

Nach Grundhypothese II ist die technische Funktion eines technischen Systems allein Funktion der an der Funktionserfüllung beteiligten Wirkflächenpaare und der sie verbindenden Leitstützstrukturen. Funktionsbestimmend sind dabei die Eigenschaften und Wechselwirkungen der beiden Wirkflächenpaare und der sie verbindenden Leitstützstruktur.

Randbedingungen, unter denen das technische System eingesetzt wird, wirken sich direkt auf die Eigenschaften und Wechselwirkungen der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen aus und werden dadurch in das Modell eingebracht. Die Eigenschaften und Wechselwirkungen der Wirkflächenpaare und der Leitstützstrukturen können auch zeitlich veränderlich sein. Dies wird in Kap. 3.6 Eigenschaften und Wechselwirkungen noch ausführlich erläutert.

Notwendige Bedingung für eine technische Funktion ist die Existenz mindestens zweier Wirkflächenpaare, die durch eine Leitstützstruktur verbunden sind (nach Grundhypothese II)

$$TF = f\{ WFP_i; LSS_j \} \quad (1)$$

mit: $i = 1 \text{ bis } n \text{ und } n \geq 2$

$$j = 1 \text{ bis } m \text{ und } m \geq 1$$

und $i, j, n, m \in \mathbb{N}$

Ein Wirkflächenpaar enthält stets genau zwei Wirkflächen (nach Grundhypothese III):

$$\{ WF_{k1}; WF_{l2} \} \hat{=} WFP_i \quad (2)$$

mit: $i = \{ 1, 2, 3, \dots \}$

$$k = 1 \text{ bis } s$$

$$l = 1 \text{ bis } t$$

$$k, l \in \mathbb{N}$$

und:

\simeq *Anzahl der Wirkflächen, die mit der WF_{l2} ein Wirkflächenpaar bilden können*

$\hat{=}$ *Anzahl der Wirkflächen, die mit der WF_{k2} ein Wirkflächenpaar bilden können*

Eine Wirkfläche kann Element mehrerer verschiedener Wirkflächenpaare sein:

Es sei:

$$\{WF_{k1}; WF_{l2}\} \hat{=} WFP_1 \quad (3)$$

und

$$\{WF_{o1}; WF_{p2}\} \hat{=} WFP_2 \quad (4)$$

mit: $k, l, o, p = \{1, 2, 3, \dots\}$

$o, p \in \mathbb{N}$

dann kann $WF_{o1} = WF_{k1} \quad (5)$

oder $WF_{p2} = WF_{l2} \quad (6)$ gelten.

Gilt eine der 2 Gleichungen 5 oder 6 wird hierdurch die Gültigkeit der anderen Gleichung ausgeschlossen, da sonst die Wirkflächenpaare 1 und 2 trivialer Weise identisch sind.

Die Wirkung des Wirkflächenpaares (W_{WFP}) auf das technische System ist allein Funktion der Wirkungen der in Kontakt stehenden Wirkflächen aufeinander.

$$W_{WFP_i} = f \{ W_{WF_{1i}}, W_{WF_{2i}} \} \quad (7)$$

mit: $i = \{1, 2, \dots\}$

W_{WFP_i} ... Wirkung des Wirkflächenpaares i auf das technische System

$W_{WF_{1i}}$... Wirkung der 1. Wirkfläche auf das Wirkflächenpaar i

$W_{WF_{2i}}$... Wirkung der 2. Wirkfläche auf das Wirkflächenpaar i

3.6 Eigenschaften und Wechselwirkungen

3.6.1 Einleitung

Alle Wirkungen treten nach dem dritten Newtonschen Axiom (siehe Kap. 3.2) als **Wechselwirkung** auf.

Erweitert man die Systemgrenze bei der analytischen Betrachtung eines technischen Systems in ausreichendem Maße, wird sich generell ein geschlossener Wirkungskreis aus Wechselwirkungen oder „Wirkungen und Ursachen“ einstellen (Abbildung 18). Ein einfaches Beispiel hierfür ist die Kraftflussanalyse¹⁷⁴ in technischen Bauteilen. Auch dieser Wirkungskreis ist bei stationären Systemen generell geschlossen.

In der Physik wird der **Zustand** als Inbegriff sämtlicher physikalischer Größen eines physikalischen Systems definiert.¹⁷⁵ Der Zustand beschreibt das System in jedem Zeitpunkt in seinen Eigenschaften und seinem (dynamischen) Verhalten eindeutig. Dazu werden Zustandsgrößen herangezogen. Zustandsgrößen sind in der Thermodynamik „Parameter, die kennzeichnend für den Zustand eines thermodynamischen Systems sind. Die direkt messbaren einfachen Zustandsgrößen sind Druck, Temperatur und Volumen. Die damit verknüpften abgeleiteten Zustandsgrößen heißen thermodynamische Funktionen¹⁷⁶“ nach denen auch die Entropie¹⁷⁷ Zustandsgröße ist.

Der in der Physik definierte Begriff des Zustandes soll im Elementmodell aufgenommen werden. Der mit der Zustandsgröße beschriebene Zustand ist selbst wieder Ursache für eine bestimmte **Eigenschaft** des technischen Systems. So kann z.B. die Temperatur einer Wirkfläche die Ursache für die momentane Härte der WF sein. Die Berücksichtigung der momentanen Härte als Eigenschaft der Wirkfläche ist

¹⁷⁴ Der Begriff des **Kraftflusses** ist an dieser Stelle leicht missverständlich. Von Fluss wird gesprochen, wenn dabei zeitliche Änderungen eine Rolle spielen. Das heißt, wenn etwas im Fluß ist, muss auf die Grundgröße Zeit bezogen werden. Der vielfach verwendete Begriff „Kraftfuß“ (z.B. Pah77/(3), Ley63) (durch z.B. eine Welle) ist damit in sich schon missverständlich, da sich die Kraft zeitlich nicht verändert. Es ist hier aber nichts „im Fluss“. Statt Kraftfluss würde sich der Begriff des „**Kraftverlaufes**“ eher eignen. Im Folgenden ist der Begriff „Kraftfluss“ im Sinne eines Kraftverlaufes zu verstehen.

¹⁷⁵ z.B. nach Mey79

¹⁷⁶ nach Bro00 ist die Thermodynamische Funktion eine „für die mathematische Behandlung thermodynamischer Problemstellungen bedeutsame Funktion, die jeweils von zwei einfachen Zustandsgrößen (Druck, Volumen, Temperatur, Entropie) eines im Gleichgewicht befindlichen thermodynamischen Systems abhängen.“

¹⁷⁷ nach Bro00 ist die Entropie eine „makrophysikalische Zustandsgröße thermodynamischer Systeme; der Teil der Wärmeenergie, der wegen seiner gleichmäßigen Verteilung auf alle Moleküle des Systems nicht in mechanische Arbeit umgesetzt werden kann.“

für die Funktionsbetrachtung wesentlich zielführender als die Betrachtung der Zustandsgrößen selbst. Dies sollte bei der Arbeit mit dem Elementmodell generell beachtet werden.

Treten im System **Relativgeschwindigkeiten** auf, kann sich dies auf die Eigenschaften der Wirkflächenpaare oder Leitstützstrukturen auswirken. Zum Beispiel kann kinetische Energie in der Leitstützstruktur gespeichert werden. Dies muss bei der Eigenschaftsbeschreibung der Leitstützstruktur berücksichtigt werden. Eine Relativgeschwindigkeit zwischen Teilsystemen kann z.B. auch zu einem Kraftaustausch im Wirkflächenpaar führen. Dabei werden Kräfte generell senkrecht zur Wirkfläche ausgetauscht und/oder über Reibkräfte parallel zur Wirkfläche. Auch diese Wirkung von Relativgeschwindigkeiten auf Wirkflächen soll in der Eigenschaftsbeschreibung berücksichtigt werden.

Tritt **Beschleunigung** auf, ist die Wirkung die Beschleunigung selbst, die ihre Ursache in der vom Körper aufgenommenen Kraft hat. Während der Beschleunigung wird die Geschwindigkeit des Körpers vergrößert. In der Leitstützstruktur wird kinetische Energie gespeichert. (weiterführende Erläuterungen zur Energiespeicherung in Leitstützstruktur siehe Kap. 3.6.3 „Eigenschaften und Wechselwirkungen von Leitstützstrukturen“ und Kap. 3.7.4 Beispiel 3 dynamische Betrachtung: Schwungrad eines Verbrennungsmotors“).

Diese gespeicherte Energie wird irgendwann wieder frei und wirkt damit wieder auf einen weiteren Partner ein. Wird die Systemgrenze ausreichend groß gezogen und die Betrachtung zeitlich nicht begrenzt, stellt sich auch hier ein geschlossener Wirkungskreis ein.

Der Zustand beeinflusst sowohl die Eigenschaften der Wirkflächen als auch die Eigenschaften der Leitstützstruktur!

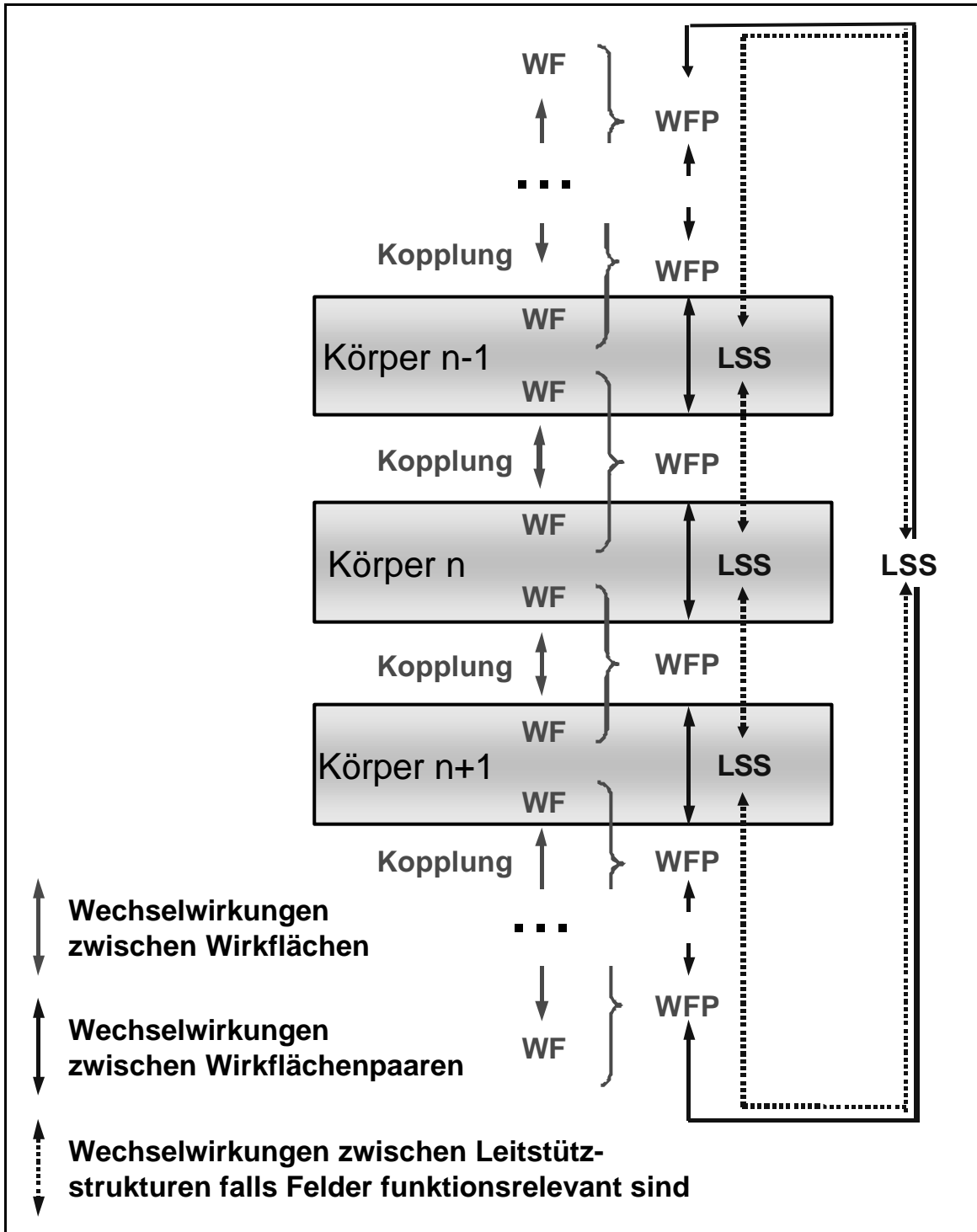


Abbildung 18 „Der geschlossene Wirkungskreis von Ursache und Wirkung“

3.6.2 Eigenschaften und Wechselwirkungen von Wirkflächen

Eine Wirkfläche kann theoretisch zu einem Punkt oder einer Linie entarten. Praktisch wird sich bei einem Kontakt zwischen einer punktförmigen bzw. linienförmigen Wirkfläche mit einer anderen Wirkfläche durch elastische oder sogar plastische Deformation ein flächiger Funktionskontakt einstellen. Genau betrachtet ist die Vorstellung eines Punkt- oder Linienkontaktes nur eine Modellvorstellung. In der „realen“ Welt gibt es im mathematischen Sinne keinen Punkt und auch keine Linie,¹⁷⁸ sondern nur Flächen. Damit lässt sich die Aussage aus Grundhypothese III „Ein Wirkflächenpaar setzt sich aus genau zwei Wirkflächen zusammen“ leicht belegen:

Wirkflächenpaare entstehen durch den Kontakt von Flächen. Drei oder mehr Flächen können sich im dreidimensionalen Raum nicht am geometrisch gleichen Ort befinden ohne sich gegenseitig zu durchdringen. Eine Durchdringung von Flächen kommt in der „realen“ Welt nicht vor, da die Flächen dann zu einer Fläche verschmelzen oder eine der Flächen in zwei Einzelflächen geteilt wird.

Die Wirkflächen, die in einem Wirkflächenpaar in Kontakt kommen, wirken aufeinander ein. Diese Wechselwirkung hängt von den Eigenschaften der Wirkflächen und von der Wechselwirkung der Leitstützstruktur mit der betreffenden Wirkfläche ab.

$$\mathbf{W}_{WF_i} = \mathbf{f} \{ \mathbf{E}_{WF_i}; \mathbf{W}_{LSS_j} \} \quad (8)$$

$$\text{mit: } \mathbf{i} = \{ 1, 2, \dots \}; \mathbf{j} = \{ 1, 2, \dots \}$$

\mathbf{W}_{WF_i} ... *Wirkung der Wirkfläche i auf das Wirkflächenpaar*

\mathbf{E}_{WF_i} ... *Eigenschaften der Wirkfläche i*

\mathbf{W}_{LSS_j} ... *Wirkung der, die Wirkfläche stützenden Leitstützstruktur j auf die Wirkfläche j*

Für die Wirkung der Wirkfläche relevante Eigenschaften sind:

- mit der Geometrie der Wirkfläche verknüpfte Eigenschaften
- mit dem Stoff der Wirkfläche verknüpfte Eigenschaften

Eigenschaften des Materials, wie z.B. gehärtet, magnetisiert, usw. sind, wie oben beschrieben, bereits durch die mit dem Stoff verknüpfte Eigenschaften abgedeckt. Die mit dem Stoff und/oder der Geometrie verknüpfte Eigenschaften der Wirkfläche können z.B. durch Erwärmung, chemische Vorgänge usw. variieren. Mit diesen

¹⁷⁸ im mathematischen Sinne ist ein Punkt „ein geometrisches Gebilde ohne Ausdehnung“ und eine Linie „ein eindimensionales geometrisches Gebilde ohne Querausdehnung“.

Eigenschaftsänderungen kann sich die Wechselwirkung der Wirkfläche auf das Wirkflächenpaar verändern.

Die Gleichung 8 lässt sich dann folgendermaßen formulieren:

$$W_{WF_i} = f \{ GEO_{WF_i}, STO_{WF_i}, W_{LSS_j} \} \quad (9)$$

$$\text{mit: } i = \{ 1, 2, \dots \}; j = \{ 1, 2, \dots \}$$

W_{WF_i} ... Wirkung der Wirkfläche i auf das

Wirkflächenpaar

GEO_{WF_i} ... mit der Geometrie der Wirkfläche i verknüpfte Eigenschaften

STO_{WF_i} ... mit dem Stoff der Wirkfläche i verknüpfte Eigenschaften

W_{LSS_j} ... Wirkung der die Wirkfläche stützenden Leitstützstruktur j auf die Wirkfläche i

3.6.3 Eigenschaften und Wechselwirkungen von Leitstützstrukturen

Eine Leitstützstruktur verbindet zwei Wirkflächenpaare. Sie leitet Energie,¹⁷⁹ Stoff und/oder Information von einem Wirkflächenpaar zum anderen weiter. Dadurch kann sie z.B. die geometrische Lage der beiden Wirkflächenpaare zueinander definieren. Außerdem kann die Leitstützstruktur Information, Stoff und/oder Energie, wie z.B. kinetische Energie, potenzielle kinetische Energie aus elastischer Verformung und chemische Energie speichern. Die Leitstützstruktur wird damit zum Effekträger¹⁸⁰.

Eine Reststruktur kann nie Effekträger werden. Wird Information, Stoff oder Energie in der Leitstützstruktur gespeichert, wirkt sich dies auf die im Elementmodell zu berücksichtigenden Eigenschaften der Leitstützstruktur aus (z.B. Wärmespeicherung oder kinetische Energiespeicherung in der Leitstützstruktur, siehe hierzu auch Kapitel 3.7.4 Beispiel 3 dynamische Betrachtung: Schwungrad eines Verbrennungsmotors).

Die Wirkung einer Leitstützstruktur auf das technische System hängt also analog zu der der Wirkflächenpaare ab von:

¹⁷⁹ Energie, Materie und Information werden in der konstruktionsmethodischen Literatur grundlegend nebeneinander gestellt. Unter Energie wird in diesem Zusammenhang mechanische Energie, thermische Energie, elektrische Energie, Kernenergie, usw. verstanden. Gleichzeitig werden aber auch Kraft, Strom und Wärme dem Begriff Energie zugeordnet. Dies ist physikalisch zwar nicht richtig, zeigt aber erneut, wie Ingenieure zu Vereinfachungen und Modellen neigen, solange sie zielführend sind. Im weiteren Verlauf der Arbeit soll der Begriff der Energie in diesem Sinne verstanden werden.

¹⁸⁰ der Begriff des Effekträgers wird insbesondere von Koller in Kol76(4) beschrieben. Nach Koller kann ein Effekträger „jeder Stoff, insbesondere alle Arten fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe und der Raum (Vakuum) als Träger magnetischer und elektrischer Felder, sowie von Gravitationsfeldern“ sein.

- den Eigenschaften der Leitstützstruktur
- den Wirkungen, die ihre Ursache in der Wirkung der verbundenen Wirkfläche auf die Leitstützstruktur haben.
- den Wirkungen einer oder mehrerer weiteren Leitstützstruktur LSS_{ki} falls:
 - Felder funktionsrelevant sind (siehe Abbildung 18 und Erklärungen in Kap.3.9 Felder im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“)
 - die Leitstützstruktur LSS_j und die benachbarte Leitstützstruktur LSS_{ki} im selben Körper gleichzeitig an der Funktionserfüllung beteiligt sind (siehe Abbildung 19 und Erklärungen in Kap.4.2).

$$\mathbf{W}_{LSS_j} = f \{ \mathbf{E}_{LSS_j}; \mathbf{W}_{WF_i}; \mathbf{W}_{LSS_{ki}} \} \quad (10)$$

$$\text{mit: } i = \{ 1, 2, \dots \}; j = \{ 1, 2, \dots \}$$

\mathbf{W}_{LSS_j} ... *Wirkung der Leitstützstruktur j auf das technische System*

\mathbf{E}_{LSS_j} ... *Eigenschaften der Leitstützstruktur j*

\mathbf{W}_{WF_i} ... *Wirkung der durch die Leitstützstruktur j verbundenen Wirkflächen auf diese*

$\mathbf{W}_{LSS_{ki}}$... *Wirkung der Leitstützstrukturen LSS_{ki} auf die Leitstützstruktur LSS_j falls:*

- *Felder funktionsrelevant sind*
- *die Leitstützstruktur LSS_j und die benachbarte Leitstützstruktur LSS_{ki} im selben Körper gleichzeitig an der Funktionserfüllung beteiligt sind*

Die Erkenntnis, dass sich benachbarte Leitstützstrukturen im selben Körper bei gleichzeitiger Beteiligung an der Funktionserfüllung gegenseitig beeinflussen, macht die folgende Ergänzung der Abbildung 18 „Der geschlossene Wirkungskreis von Ursache und Wirkung“ auf Seite 61 notwendig:

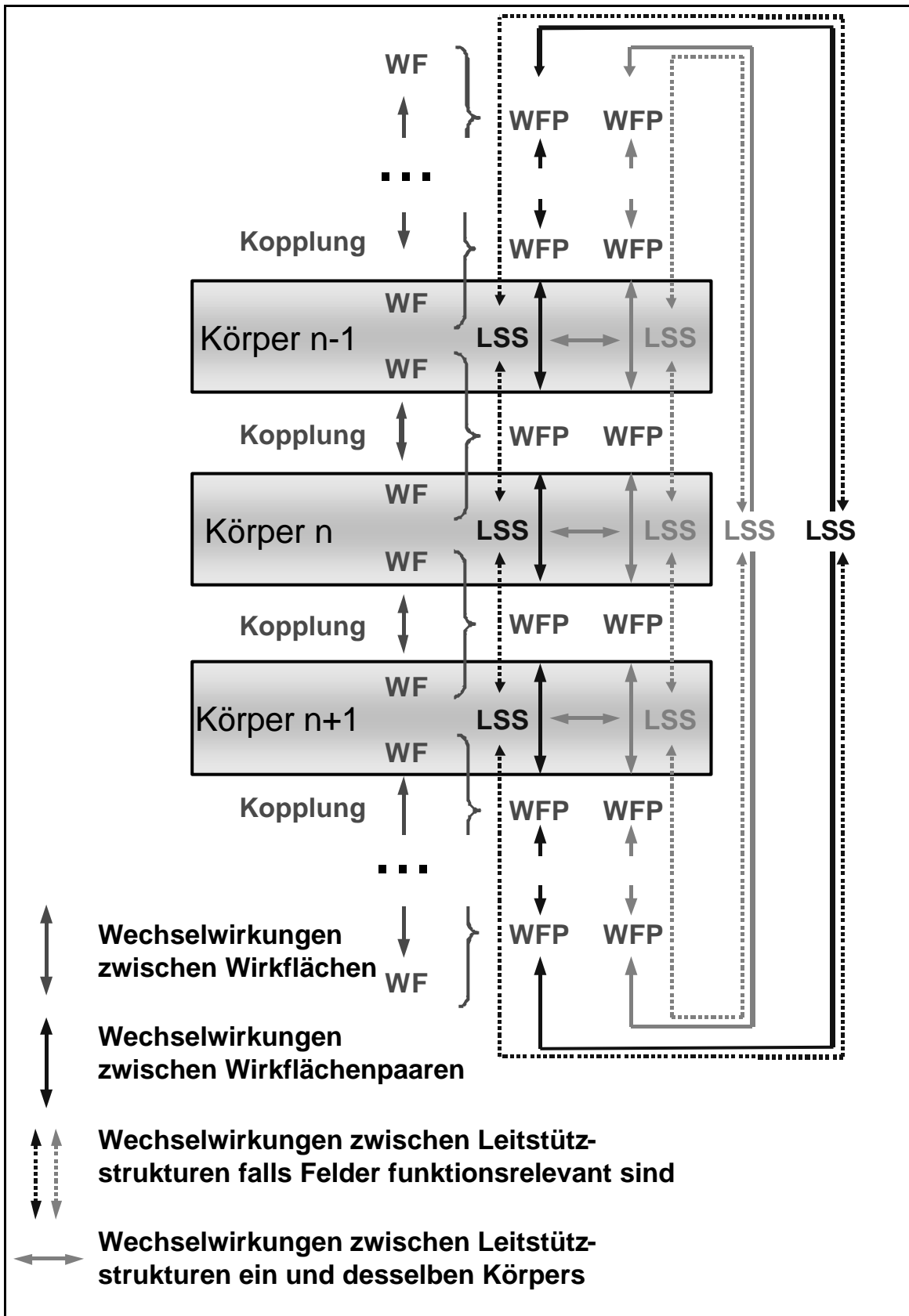


Abbildung 19 "Der geschlossene Wirkungskreis von Ursache und Wirkung erweitert um Wechselwirkungen zwischen Leitstützstrukturen ein und desselben Körpers"

Für die Wirkung der Leitstützstruktur relevante Eigenschaften sind:

- mit der Geometrie der Leitstützstruktur verknüpfte Eigenschaften

- mit dem Stoff der Leitstützstruktur verknüpfte Eigenschaften

Eigenschaften Leitstützstruktur wie gehärtetes Material, magnetisiertes Material werden analog zur Stoffbeschreibung der Wirkfläche durch die mit dem Stoff verknüpften Eigenschaften abgedeckt.

Außerdem sei in der Eigenschaftsbeschreibung gespeicherte Energie, gespeicherter Stoff und gespeicherte Information (wie oben beschrieben) enthalten.

Die Stoff- und Geometrieigenschaften der Leitstützstruktur können wie die der Wirkflächen auch veränderlich sein. Mit diesen Eigenschaftsänderungen kann sich die Wechselwirkung der Leitstützstruktur auf das Wirkflächenpaar verändern.

$$W_{LSS_j} = f \{ GEO_{LSS_j}; STO_{LSS_j}; W_{WF_i}; W_{LSS_{ki}} \} \quad (11)$$

$$\text{mit: } i = \{ 1, 2, \dots \}; j = \{ 1, 2, \dots \}$$

W_{LSS_j} ... Wirkung der Leitstützstruktur j auf das technische System

W_{WF_i} ... Wirkung der verbundenen Wirkfläche i auf die Leitstützstruktur j

GEO_{LSS_j} ... mit der Geometrie der Leitstützstruktur j verknüpfte Eigenschaft

STO_{LSS_j} ... Mit dem Stoff der Leitstützstruktur j verknüpfte Eigenschaft

$W_{LSS_{ki}}$... Wirkung der Leitstützstrukturen LSS_{ki} auf die Leitstützstruktur LSS_j falls:

- *Felder funktionsrelevant sind*
- *die Leitstützstruktur LSS_j und die benachbarte Leitstützstruktur LSS_{ki} im selben Körper gleichzeitig an der Funktionserfüllung beteiligt sind*

Die Wirkflächenpaare wechselwirken also mit den Leitstützstrukturen und umgekehrt. Das heißt über ihre Wirkung auf die Wirkfläche kann die Leitstützstruktur die Funktion beeinflussen. Sie kann selbst auf ein benachbartes System wirken. Notwendige Bedingung hierfür ist die Existenz zweier Wirkflächenpaare (siehe auch Abbildung 18).

3.7 Erklärungen des Elementmodells anhand von Beispielen

3.7.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ anhand von Beispielen verdeutlicht. Gleichzeitig wird das Modell jeweils im „Fazit“ der einzelnen Unterkapitel erweitert. Die Definitionen und Grundhypothesen bleiben natürlich unverändert gültig. Diese stetige Erweiterung dient dazu den problem-spezifischen Einsatz des Modells zu zeigen.

3.7.2 Beispiel 1 stationäre¹⁸¹ Betrachtung: Portal

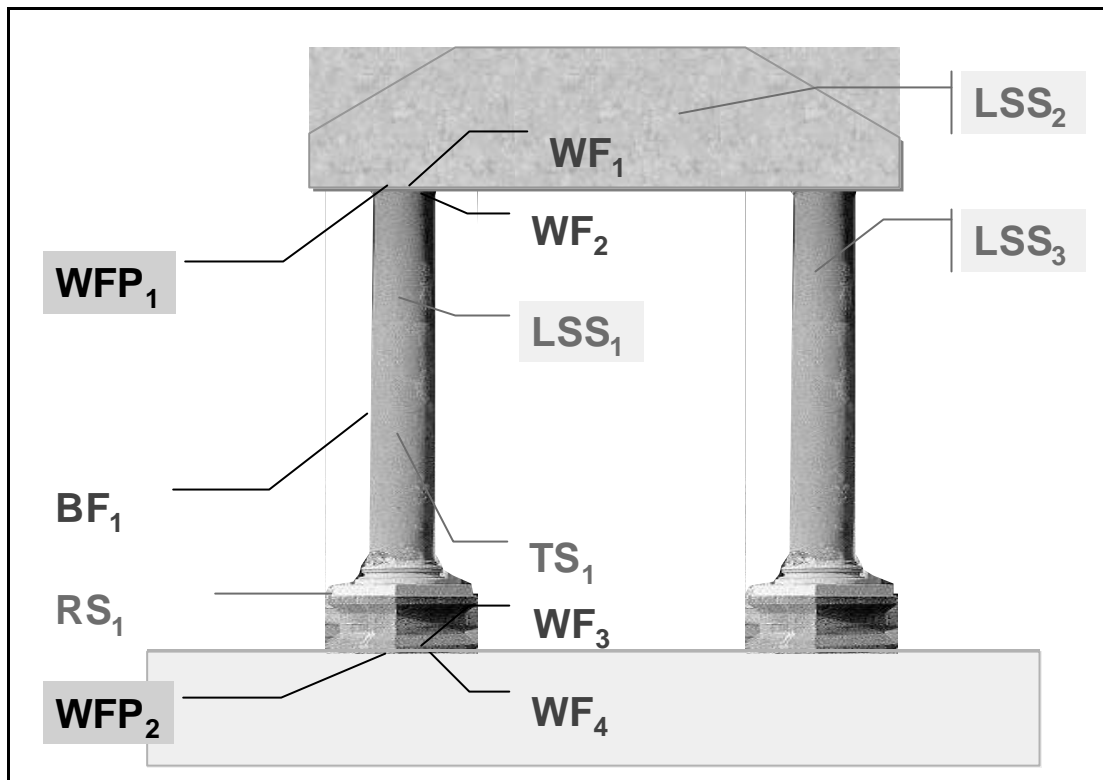


Abbildung 20 „Portal“ Quelle: [Alb02/1u. Alb00]

Abbildung 20 zeigt ein Portal, welches sich aus den Bauteilen linke Säule, rechte Säule und einer querliegenden Traverse zusammensetzt. Auch dieses einfache System stellt ein technisches System dar. Die linke Säule erfüllt als Bauteil des Systems „Portal“ durch Wechselwirkungen mit anderen Bauteilen die Funktion „halten der Traverse“. (vgl. Grundhypothese I S. 53).

Die Elemente der linken Säule sind in der folgenden Abbildung (in Anlehnung an Abbildung 16) aufgelistet:

Die Funktionserfüllung der linken Säule im technischen System „Portal“ geschieht über die Wirkflächenpaare 1 und 2, die jeweils für die Kraftleitung in und aus der Säule relevant sind.

Wirkflächenpaar 1 setzt sich aus WF₁ „obere Säulenauflagefläche“ und der WF₂ „Auflagefläche der Traverse“ und Wirkflächenpaar 2 aus den Elementen WF₃ „Säulenunterfläche“ und WF₄ „Fundamentoberfläche“ zusammen. (vgl: Grundhypothese III S. 54) Gleichzeitig muss zwingend eine Verbindung dieser

¹⁸¹ Stationär im Sinne von örtlich und zeitlich nicht veränderlich

Wirkflächenpaare über die Leitstützstruktur 1, dem Bereich des Säulenkörpers, über den der Kraftfluss stattfindet, vorliegen.

	Flächenelemente		Körperelemente		Auftreten
	Bauteil- ebene	Wirkfläche	WF2 WF3	TS1	
Begrenzungsfläche		BF1	RS1	Reststruktur	
System- ebene	Wirkflächenpaar	WFP1 WFP2	LSS1	Leitstützstruktur	hier bleibt der Kontakt nach der „Montage“ zu jeder Zeit bestehen
	(Funktionskontakt) ¹⁸²	FK1 FK2			

Abbildung 21 „Elemente der linken Säule des Portals auf Bauteil und Systemebene“

Versagt die Leitstützstruktur des Säulenkörpers, versagt das System „Portal“. Wird ein Wirkflächenpaar, z.B. Wirkflächenpaar 2, durch Entfernen der Wirkfläche 4 aufgehoben, z.B. durch Absacken des Fundamentes, kann das System ebenfalls versagen (vgl. Grundhypothese II S. 54).

Die Begrenzungsfläche BF_1 und die Teile des Säulenkörpers, die nicht am Kraftfluss teilnehmen (in der Abbildung mit RS_1 bezeichnet), partizipieren an der Funktion „halten der Traverse“ nicht und sind damit für die Funktionserfüllung bedeutungslos.¹⁸³

Spielt die äußere Erscheinung der Säule eine Rolle und wird damit zur Funktion des Portals, ist die Oberfläche der Säule am Informationsaustausch mit dem Betrachter beteiligt. Sie ist damit Wirkfläche und es gibt in diesem Fall keine Begrenzungsfläche.¹⁸⁴

3.7.2.1 Veränderung von Randbedingungen

Verändern sich die Randbedingungen, unter denen die linke Säule ihre Funktion erfüllt, kann sich das auf alle Flächen- und Körperelemente auswirken.

¹⁸² In diesem Beispiel fallen Funktionskontakte und Wirkflächen zusammen, da die gesamte Wirkflächen zu jeder Zeit in Kontakt stehen.

¹⁸³ In Anlehnung an die Lehrveranstaltung „Maschinenkonstruktionslehre I“; Albert Albers; Technische Universität Karlsruhe (TH); 2000; Alb00.

¹⁸⁴ Vergleiche hierzu auch Alb02/1

Auf das Portal wirke nun eine Windlast. Die linke Säule soll nach wie vor die Funktion „halten der Traverse“ erfüllen. Die bisher funktionslose Begrenzungsfläche (Zylindermantelfläche) der linken Säule wird zur Wirkfläche und bildet mit der anströmenden Luft ein Wirkflächenpaar, über das die Windkraft in die Säule eingeleitet wird. Durch die dadurch hervorgerufene Veränderung im Kraftfluss, dieser wird bei einseitig wirkender Last nicht mehr symmetrisch zur Säulenmittelachse sein, entsteht eine andere Leitstützstruktur 1, die die Wirkflächenpaare 1 und 2 verbindet. Vom Konstrukteur des Portals werden bei der Dimensionierung der linken Säule im Idealfall alle wesentlichen (möglicherweise auftretenden) Randbedingungen abgeschätzt. Er dimensioniert die Menge aller möglichen Leitstützstrukturen, die laut Definition (siehe S. 51) der Tragstruktur entspricht.

Wie wichtig das „Vordenken“ möglicher Umgebungseinflüsse auf die Elemente eines technischen Produktes ist, verdeutlicht das folgende Beispiel, in dem die Begrenzungsfläche (Zylindermantelfläche) der Säule zur Wirkfläche wird, die für das Systemversagen ausschlaggebend sein kann.

Das Portal sei nun aus Stahl und werde im Meerwasser, beispielsweise als Trägerteil einer Ölbohrinsel, eingesetzt. Die Mantelfläche der Säule tritt mit dem Meerwasser in Interaktion. Es entsteht ein Wirkflächenpaar zwischen der Oberfläche der Säule und der „Oberfläche“ des Salzwassers an der Säule. Im Wirkflächenpaar wird die (unerwünschte) Funktion „Korrosion“ erfüllt.¹⁸⁵

Die Sauerstoffionen dringen über die Wirkfläche in den Körper ein, werden von einer Leitstützstruktur zu einem reaktionsfähigen Molekül geleitet und reagieren mit dem Eisen. Dabei verändern sich die Wirkflächen. Es entsteht eine porige Korrosionsschicht.

Auch hier erfolgt die Funktionserfüllung nur bei Existenz zweier Wirkflächenpaare und einer Leitstützstruktur (nach Grundhypothese II S. 54). Dem Ingenieur, der die unerwünschte Funktion „Korrosion“ vermeiden will, kann die im Folgenden geschilderte Modellbildung mit dem Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ hilfreich sein. In der folgenden Abbildung 22 sind die Elemente des technischen Systems unter den veränderten Randbedingungen aufgelistet.

¹⁸⁵ Dem chemischen Umsatz ist der Transport von Sauerstoff in die Salzwasserlösung vorgelagert. An der eigentlichen chemischen Reaktion nimmt dann der im Wasser gelöste Sauerstoff teil. Darauf folgt der Umsatz nach: $4(\text{Fe})_{\text{Me}} + 3(\text{O}_2)_L + 2(\text{H}_2\text{O})_L \rightarrow 4(\text{FeOOH})_F$ (nach Kae90: S.7)

	Flächenelemente		Körperelemente	
Bauteil- ebene	Salzwasseroberfläche	WF1	TS1	Metallische Struktur der Säule, die zu einem beliebigen Zeitpunkt an der Funktion „Korrosion“ beteiligt sein kann
	Mantelfläche der Säule	WF2		
	Begrenzungsfläche der im Moment nicht reagierenden Leitstützstruktur	WF3		
	Reaktive Moleküloberfläche	WF4		
	Keine vorhanden	BF1	RS1	Metallische Struktur der Säule, die nie an der Funktion „Korrosion“ beteiligt ist
System- ebene	Salzwasseroberfläche / metallische Mantelfläche der Säule	WFP1	LSS1	Eisenmetallischer Körper, der den Ionentransport von der Säulenoberfläche zum reaktiven Eisenmolekül ermöglicht
	Flächenpaar zwischen Oberfläche der ionenleitenden LSS und des reagierenden Moleküls	WFP2		
	Entspricht WFP1	FK1		
	Entspricht WFP2	FK2		

Abbildung 22 „Flächen- und Körperelemente im Bauteilsystem unter veränderten Randbedingungen“

Ist die Folge der Funktion „Korrosion“ unerwünscht, können vom Konstrukteur die Leitstützstruktur oder die Wirkflächenpaare verändert werden. Prinzipiell hat er folgende Möglichkeiten:

1. Aufheben des Wirkflächenpaares 1 Salzwasser, Säulenoberfläche (der Ionentransport über das Wirkflächenpaar wird unterbunden)
2. Aufheben des Wirkflächenpaar 2, so dass keine Reaktion mehr stattfinden kann.
3. Entfernen der Leitstützstruktur oder Verändern der Eigenschaften der Leitstützstruktur, so dass kein Ionentransport mehr stattfindet.

Die prinzipiellen Möglichkeiten zum Verhindern der Funktion „Korrosion“ können z.B. konstruktiv folgendermaßen umgesetzt werden:

Zu 1.: Einfügen eines weiteren Wirkflächenpaares zwischen Wirkfläche „Salzwasseroberfläche“ und Wirkfläche „Säulenzylindermantelfläche“ z.B. in Form einer Lackschicht, die keinen Ladungstransport zulässt. Es werden zwei neue Wirkflächenpaare (Salzwasseroberfläche, Lackoberfläche und Lackoberfläche, Oberfläche der Säule) und eine neue Leitstützstruktur (Körper der Lackschicht) gebildet.

Zu 2. u. 3. : Werkstoff aus rostfreiem Material wählen.

Zu 3.: Durch Anlegen einer Gleichspannung an den zu schützenden Metallkörper die Leitstützstruktur negativ aufladen, so dass keine positiv geladenen Ionen mehr vom Wirkflächenpaar abgegeben werden können.

Der gleiche Effekt wird beim anodischen Korrosionsschutz (auch als „Opferanode“ bezeichnet) genutzt, bei dem ein weiterer Körper aus, im Vergleich zum zu schützenden Körper, unedlerem Metall angebracht wird. Dieser liefert Elektronen an das edlere Metall, verändert damit die Eigenschaften der Leitstützstruktur und verhindert dadurch die Korrosion des zu schützenden Metalls.

3.7.2.2 Fazit zu Veränderung von Randbedingungen

Veränderte Randbedingungen, unter denen ein technisches System eingesetzt wird, können Leitstützstrukturen und Wirkflächenpaare verändern. Die Betrachtung von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen erfolgt grundsätzlich problemspezifisch.

3.7.2.3 Veränderung der Auflösung der Betrachtung

Im Folgenden wird auf die Geometriebetrachtung von Wirkflächenpaaren näher eingegangen. Das Wirkflächenpaar 1 mit den Komponenten WF1 „obere Säulenauflagefläche“ und der WF2 „Auflagefläche der Traverse“ sei im folgenden Beispiel Element eines metallenen Maschinentisches.

Bei der Dimensionierung der Elemente des Maschinentisches vergleicht der Konstrukteur die möglichen Beanspruchungen mit der Beanspruchbarkeit. Im Wirkflächenpaar 1 tritt aufgrund der Gewichtskraft der Traverse eine Flächenpressung (σ) auf, die mit:

$$s = \frac{F}{A} \quad (12)$$

s ... Flächenpressung [N/mm²]

F ... Kraft

A ... Fläche, die durch die Kraft F belastet wird

errechnet wird. Die Kraft ist dabei ein Teil der Gewichtskraft der Traverse und die Fläche A die gesamte Fläche des Wirkflächenpaares 1.

Wählt der Konstrukteur die Streckgrenze R_e als Grenze der Beanspruchbarkeit und dimensioniert damit rein elastisch, muss mit einem Sicherheitsfaktor $S=1$

$$s = \frac{F}{A} < R_e \quad (13)$$

R_e ... Streckgrenze des eingesetzten Materials

gelten, damit gerade keine plastische Verformung im WFP1 auftritt.

Diese Vorgehensweise orientiert sich an einer Modellvorstellung, deren Genauigkeit für die Auslegung z.B. eines Maschinentisches vollkommen ausreicht. Lokal kommt es im Wirkflächenpaar in Abhängigkeit von der Oberflächenrauheit zu mehr oder weniger ausgeprägten plastischen Verformungen, die bei der oben genannten Aufgabenstellung nicht berücksichtigt werden müssen.

Bei der Auslegung einer Schraubenverbindung reicht der Genauigkeitsgrad der oben beschriebenen Wirkflächenbetrachtung nicht aus. Verfahren zur Auslegung einer Schraubenverbindung, wie sie z.B. in der VDI 2230 beschrieben werden, berücksichtigen lokale plastische Verformungen durch das „Setzen in der Schraubenverbindung“.¹⁸⁶ Hier wird auch bei rein elastischer Dimensionierung die plastische Deformation berücksichtigt.

Betrachtet man das Wirkflächenpaar 1 mit höherer Auflösung, erkennt man das die Annahme, die gesamte Fläche von WFP1 übertrage die Kraft F, von der Realität abweicht. Für die oben geschilderte Problemstellung „Dimensionierung der Elemente eines Maschinentisches“ war die Betrachtungsauflösung ausreichend. Bei der Dimensionierung von Schraubenverbindungen durch die hier notwendige Berücksichtigung des Setzens nicht. Es ist klar, dass aufgrund der Rauheit jeder technischen Fläche nur einzelne Bereiche der Wirkflächen WF1 und WF2 (siehe Abbildung 23) Kontakt zueinander haben. Das in Abbildung 20 dargestellte WFP1 kann in eine endliche Zahl einzelner Wirkflächenpaare (in Abbildung 23 WFP1, WFP2 und WFP3) zerlegt werden.

¹⁸⁶ VDI 2230 Bl.1 “Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen; Zylindrische Einschraubenverbindungen“

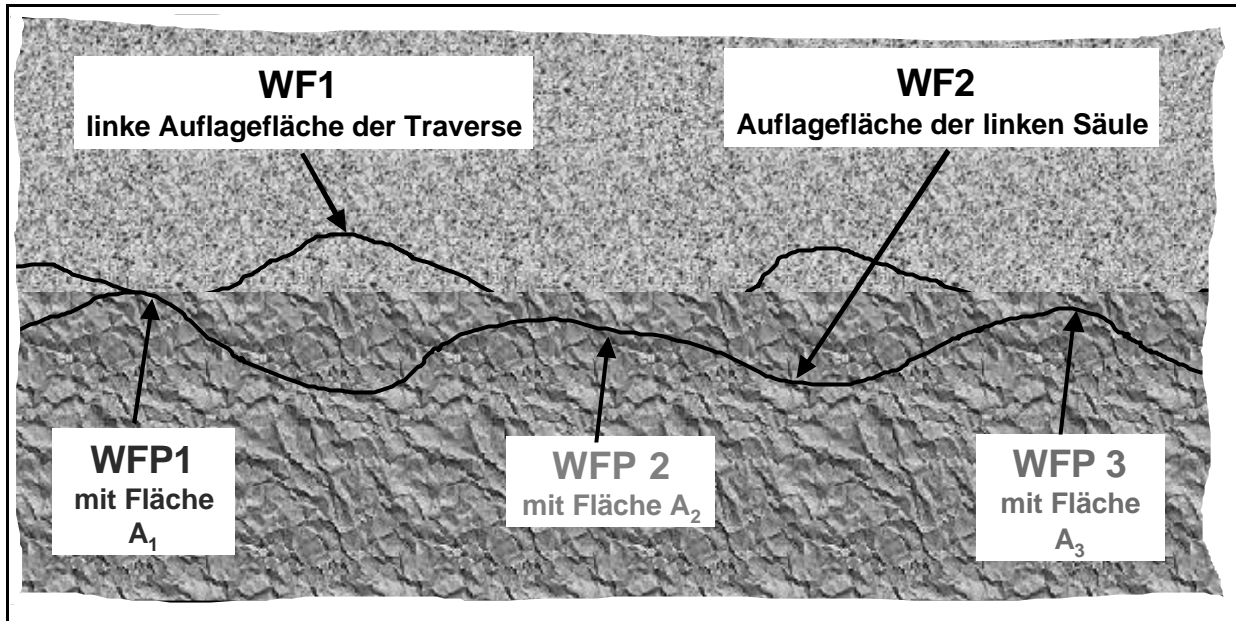


Abbildung 23 „Betrachtung des Wirkflächenpaares 1 mit höherer Auflösung“

Nach wie vor gilt für die Flächenpressung:

$$s = \frac{F}{A^*} \quad (14)$$

mit: $A^* = A_1; A_2; A_3; \dots; A_n$

und: $n = \text{Anzahl der Wirkflächenpaare, die bei der Betrachtung von } A \text{ mit vergrößerter Auflösung sichtbar werden}$

Die an der Kraftübertragung beteiligte Fläche A^* stellt die Summe der einzelnen Wirkflächenpaare dar, wobei A^* kleiner als A ist. Bei gleicher zu übertragener Kraft auf einer kleineren Fläche kann lokal die Streckgrenze überschritten werden, womit plastische Verformung stattfindet.

Eine veränderte Auflösung bei der Betrachtung von Wirkflächenpaaren kann die Anzahl und die Gestalt der Wirkflächenpaare verändern. Damit kann auch die Beanspruchung auflösungsabhängig sein.

Bei der genaueren Betrachtung des Wirkflächenpaares 1 aus Abbildung 20 entstehen natürlich nicht nur mehrere einzelne Wirkflächenpaare, sondern auch mehrere einzelne Leitstützstrukturen.

Die Materialkennwerte, die die Beanspruchbarkeit beschreiben, sind ebenfalls auflösungsabhängig. Wird die Auflösung, mit der eine Leitstützstruktur betrachtet wird, vergrößert, werden Fehlstellen und Anisotropien sichtbar, die bei einer Betrachtung mit niedrigerer Auflösung nicht sichtbar waren. Der Verlauf der Leitstützstruktur ändert sich aufgrund dieser lokalen Materialeigenschaften.

Abbildung 24 zeigt zwei Zähne, auf die jeweils die Kraft F wirkt. Die Wirkstelle ist der Funktionskontakt. Der Spannungsverlauf durch den Zahn wird durch die unterschiedlich eingefärbten Bereiche visualisiert. Der Zahn auf der rechten Seite der Abbildung stellt einen sehr kleinen Zahn aus ZrO_2 dar, der sich aus etwa 11 Körnern zusammensetzt. Das Material ist anisotrop. Beim Zahn auf der linken Seite der Abbildung werden isotrope Materialeigenschaften angenommen, wie dies bei einer Zahndimension, die sehr viel größer als die Korngröße des Werkstoffes ist, legitim ist.¹⁸⁷

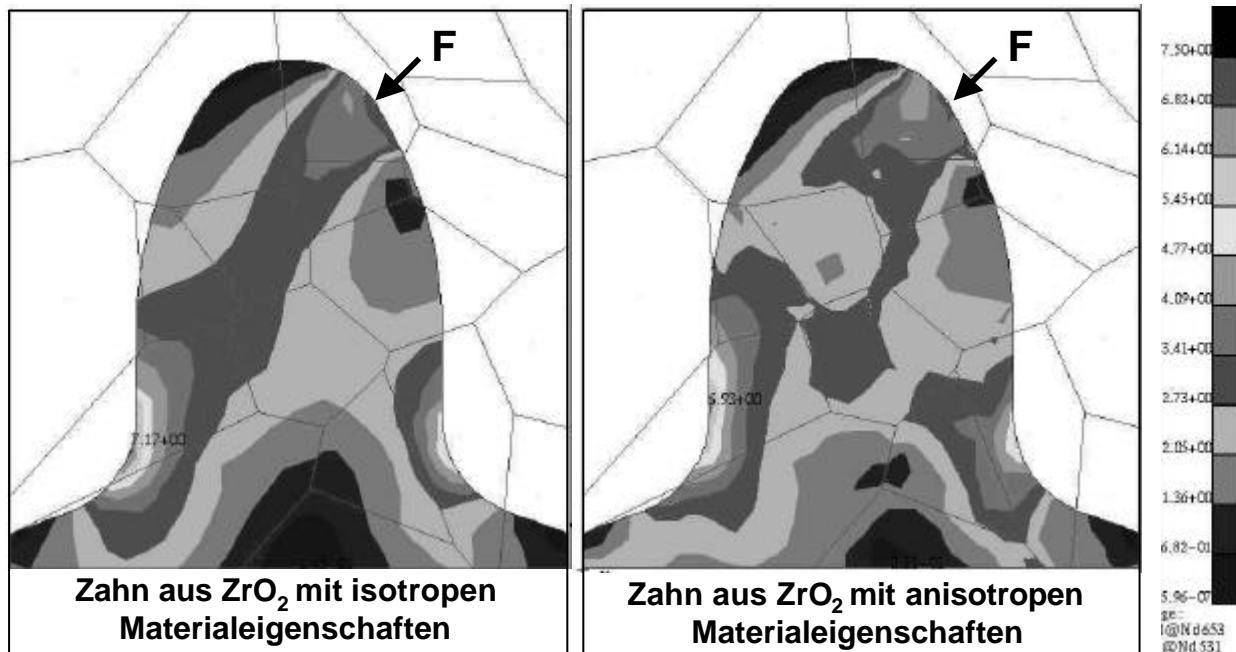


Abbildung 24 "Veränderungen der Leitstützstruktur durch anisotrope Materialeigenschaften"¹⁸⁸

Die Abbildung zeigt deutlich, wie sich der Spannungsverlauf und damit der Verlauf der Leitstützstruktur des Zahns durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften verändert.

Eine veränderte Auflösung bei der Betrachtung von Leitstützstrukturen kann die Anzahl und die Gestalt der Leitstützstruktur verändern. Damit kann die Beanspruchbarkeit und die Beanspruchung auflösungsabhängig sein! Die Auflösung muss also problemspezifisch gewählt werden!

¹⁸⁷ Ist der Zahn sehr viel größer als ein Korn, sind die Korngrenzen nicht mehr darstellbar. Auf der linken Seite der Abbildung 24 können die eingezeichneten Korngrenzen dann entfallen, ohne dass sich am Spannungsverlauf etwas ändert.

¹⁸⁸ aus Alb02/2, Alb01/3

3.7.2.4 Fazit zu Veränderung der Auflösung der Betrachtung

Eine veränderte Auflösung bei der Betrachtung von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen kann die Anzahl und die Gestalt der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen verändern. Die Auflösung der Betrachtung muss grundsätzlich problemspezifisch erfolgen.

Stehen bei der Dimensionierung von Bauteilen nicht genügend Erfahrungen, die in Modellen beschrieben werden, zur Verfügung, ist es besonders wichtig die „Auflösung der Betrachtung des Wirkflächenpaares“ angemessen zu wählen.

3.7.3 Beispiel 2 quasi stationäre¹⁸⁹ Betrachtung: Getriebemotor

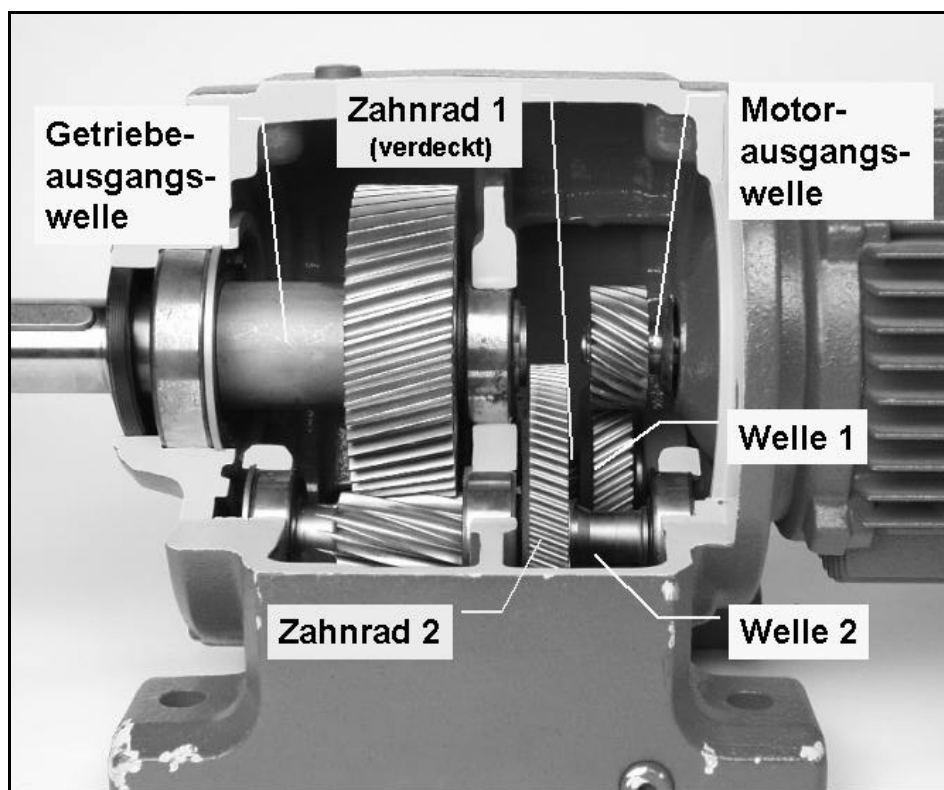


Abbildung 25 „Getriebemotor mit 3-stufigem schrägverzahnten mechanischem Getriebe“

Für den in Abbildung 25 dargestellten Getriebemotor werden im Folgenden beispielhaft Funktionen beschrieben.

Hauptfunktion des Getriebemotors:

„Wandeln von elektrischer Energie in mechanische Energie“

¹⁸⁹ quasi im Sinne von gewissermaßen, gleichsam, sozusagen und stationär im Sinne von örtlich und zeitlich nicht veränderlich

Abbildung 26 stellt das „Untersystem“ Getriebe (vergleiche auch Abbildung 17) des in Abbildung 25 abgebildeten Getriebemotors prinzipiell dar.

Betrachtet man dieses Untersystem könnte dessen Gesamtfunktion folgendermaßen beschrieben werden:

Gesamtfunktion des Getriebes :

„Drehmoment und Drehzahl wandeln“

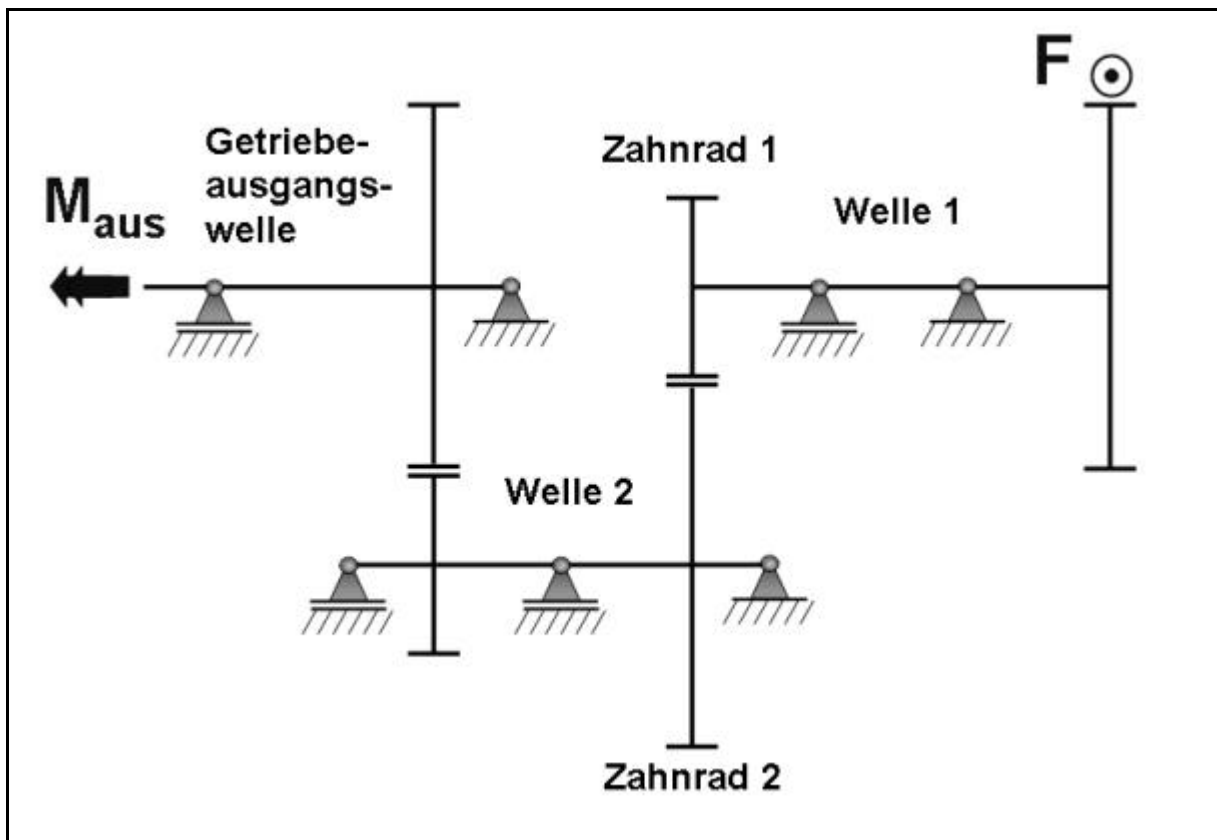


Abbildung 26 „prinzipielle Darstellung des mechanischen Getriebes aus Abbildung 25“¹⁹⁰

Untergeordnete Teilfunktionen zur Realisierung der Gesamtfunktion sind z.B. auf erster Stufe (siehe Abbildung 15):

¹⁹⁰ der Einfachheit halber werden die Lagerungen hier als Fest-Loslagerungen bzw. als Fest-Los-Loslagerung dargestellt. Dies entspricht nicht der Lagerungsart in Abbildung 25.

Nr.	Teilfunktionen auf 1. Stufe
TF1	„Eingangsdrehmoment und Drehzahl vom Elektromotor wandeln“
TF2	„Drehmoment von Welle 1 unter Änderung der Drehzahl auf Welle 2 übertragen“
TF3	„Drehmoment von Welle 2 unter Änderung der Drehzahl auf Welle 3 übertragen“
TF4	„Drehmoment von Welle 3 am Getriebeausgang abgeben“
...

All diese Teilfunktionen werden nach Grundhypothese II über mindestens zwei Wirkflächenpaare und eine sie verbindende Leitstützstruktur verwirklicht. Beispielfhaft wird im folgenden die TF2 im Hinblick auf die Grundhypothese II analysiert.

Abbildung 27 stellt das technische System zur Erfüllung der TF2 prinzipiell dar. An der Systemgrenze sind die Wechselwirkungen zum Nachbarsystem als Drehmomente und Drehzahlen angetragen. Im Wirkflächenpaar 4, dem Zahnflankenkontakt, wird eine Kraft zwischen den Zahnflanken übertragen, die zusammen mit dem Wirkflächenpaar 5 und dem Wirkflächenpaar 6 Drehmoment erzeugt. Ohne die Existenz mindestens eines Wirkflächenpaares neben WFP4 könnte kein Drehmoment, sondern nur eine Kraft auf die Welle 2 übertragen werden.

Drehmomentenübertragung ist immer nur dann möglich, wenn neben dem Wirkflächenpaar, in dem die Kraft übertragen wird, mindestens ein weiteres Wirkflächenpaar existiert, in dem eine Kraft mit entgegengesetzter Wirkrichtung übertragen wird. Notwendigerweise müssen zur Drehmomentenübertragung die Wirkrichtungen der übertragenden Kräfte parallelversetzt sein.

Die Welle 2 kann das Drehmoment im Zahnradpaar nur dann aufnehmen, wenn auf der linken Seite ein betragsgleiches Drehmoment in entgegengesetzter Richtung wirkt. Dieses Gegendrehmoment, das in Abbildung 27 an der Systemgrenze durch die Schnittgröße M_{aus} angetragen ist, kann wiederum nur über ein Wirkflächenpaar (WFP7) auf die Welle 3 übertragen werden.

Für die Welle 1 gelten diese Aussagen ebenfalls. Das eingeleitete Drehmoment M_{in} bedingt ebenfalls ein Wirkflächenpaar (WFP1). Die Verbindung zwischen WFP1 und WFP7 aus den einzelnen Bauteilen Welle, Lager, Zahnräder stellt die Leitstützstruktur des Systems dar.

Die Grundhypothesen I bis III, insbesondere die Grundhypothese II gelten damit für die Teilfunktion 2.

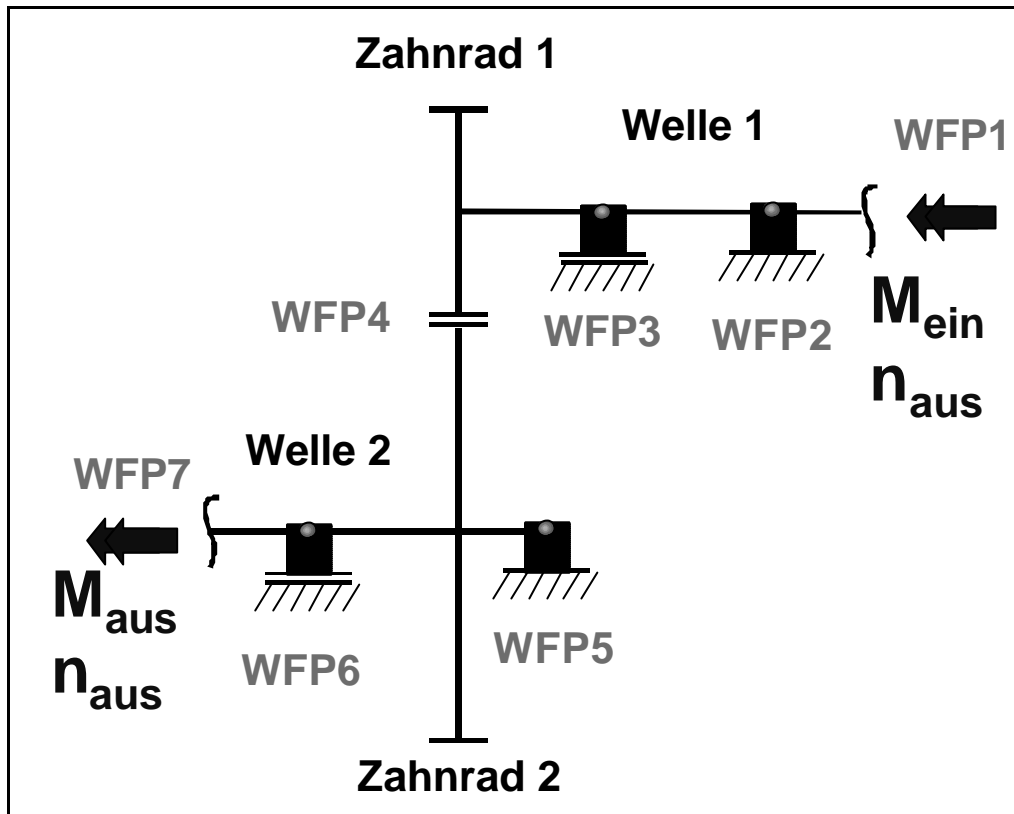


Abbildung 27 „prinzipielle Darstellung des technischen Systems zur Erfüllung der Teilfunktion 2“

Um die Teilfunktion 2 (TF2) zu realisieren bedarf es weiterer untergeordneter Funktionen:

Nr.	Teilfunktionen auf 2. Stufe hierarchisch der TF2 untergeordnet
TF2 1	„Rotation der Welle 1 zulassen“
TF2 2	„Axialbewegung der Welle 1 sperren“
TF2 3	„Radialbewegung der Welle 1 sperren“
TF2 4	„Kraft über Zahnrad 1 in das Zahnrad 2 leiten“
TF2 5	„Kraft vom Zahnrad 2 in Welle 2 leiten“
...	...

Die Teilfunktion 2 4 wird über 3 Wirkflächenpaare (Zahnflankenkontakt, Welle-Nabe-Verbindung Zahnrad1/Welle1 und Welle-Nabe-Verbindung Zahnrad 2/Welle2) realisiert. Auch hier gelten die Grundhypothesen I bis III.

Um die Teilfunktion 2 4 wiederum zu realisieren bedarf es weiterer untergeordneter Teilfunktionen. Nach mehreren Stufen werden Funktionen erreicht, die sich nicht mehr teilen lassen. Diese Funktionen heißen Elementarfunktionen. Elementarfunktionen der Teilfunktion TF2 4 sind z.B.:

Nr.	„Elementarfunktion auf unterster. Stufe hierarchisch der TF2 4 untergeordnet“
EF2 4 1	„Kraft durch Zahn Nr. 1 des Zahnrades 1 leiten“
EF2 4 2	„Kraft auf Zahnflanke Nr. 1 des Zahnrades 1 aufnehmen“
...	...

Auch diese Elementarfunktionen werden über mind. 2 Wirkflächenpaare und eine sie verbindende Leitstützstruktur realisiert. Abbildung 28 stellt das technische System zur Erfüllung der Elementarfunktion 2 4 2 prinzipiell dar.

Die Kraft wird über die Wirkfläche 1 in den Zahn eingeleitet. Damit dies möglich wird, muss die WF1 mit einer anderen Wirkfläche in Kontakt treten und ein Wirkflächenpaar bilden. Diese zweite Wirkfläche ist in Abbildung 28 durch die Systemgrenze weggeschnitten und durch die Schnittgröße „ F_1 “ ersetzt worden. Der Zahn kann die Kraft nur dann aufnehmen wenn an der LSS1 die Gegenkraft F_2 aufgenommen werden kann. Auch dazu ist ein Wirkflächenpaar nötig. Dieses Wirkflächenpaar wurde bei der unten dargestellten Wahl der Systemgrenze weggeschnitten und durch die Schnittgröße „ F_2 “ ersetzt.

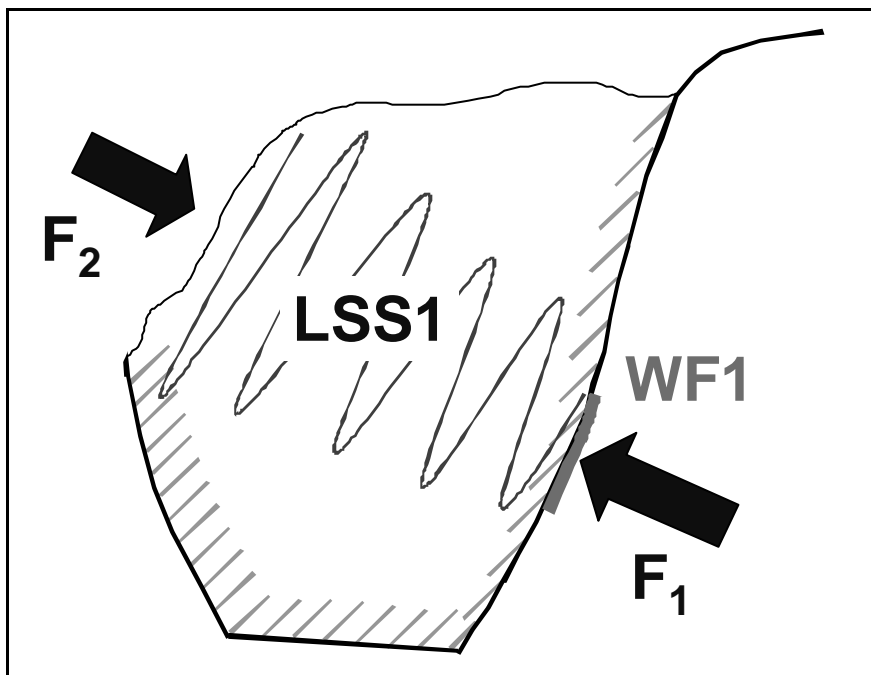


Abbildung 28 " „prinzipielle Darstellung des Zahnes zur Erfüllung der Teilfunktion EF 2 4 2“

3.7.4 Beispiel 3 dynamische Betrachtung: Schwungrad eines Verbrennungsmotors

Schwungscheiben werden z.B. im Kraftfahrzeugbau verwendet um die vom Verbrennungsmotor abgegebenen Energieschwankungen auszugleichen. Die Energieschwankungen ergeben sich aus dem Verbrennungsprozess und äußern sich in Drehmoment und Drehzahlschwankungen. Die Schwungscheibe befindet sich im Kraftfahrzeug zwischen Motorausgang (hinter der Kurbelwelle) und Getriebeeingang.

Die Hauptfunktion der Schwungscheibe kann wie folgt formuliert werden:

„Ausgleich von Energieschwankungen“

In diesem Zusammenhang spielt die Fähigkeit der Leitstützstruktur Energie zu speichern (siehe 3.6.3 Eigenschaften und Wechselwirkungen von Leitstützstrukturen“) eine entscheidende Rolle.

Die Abbildung 29 zeigt die prinzipielle Darstellung der Schwungscheibe.

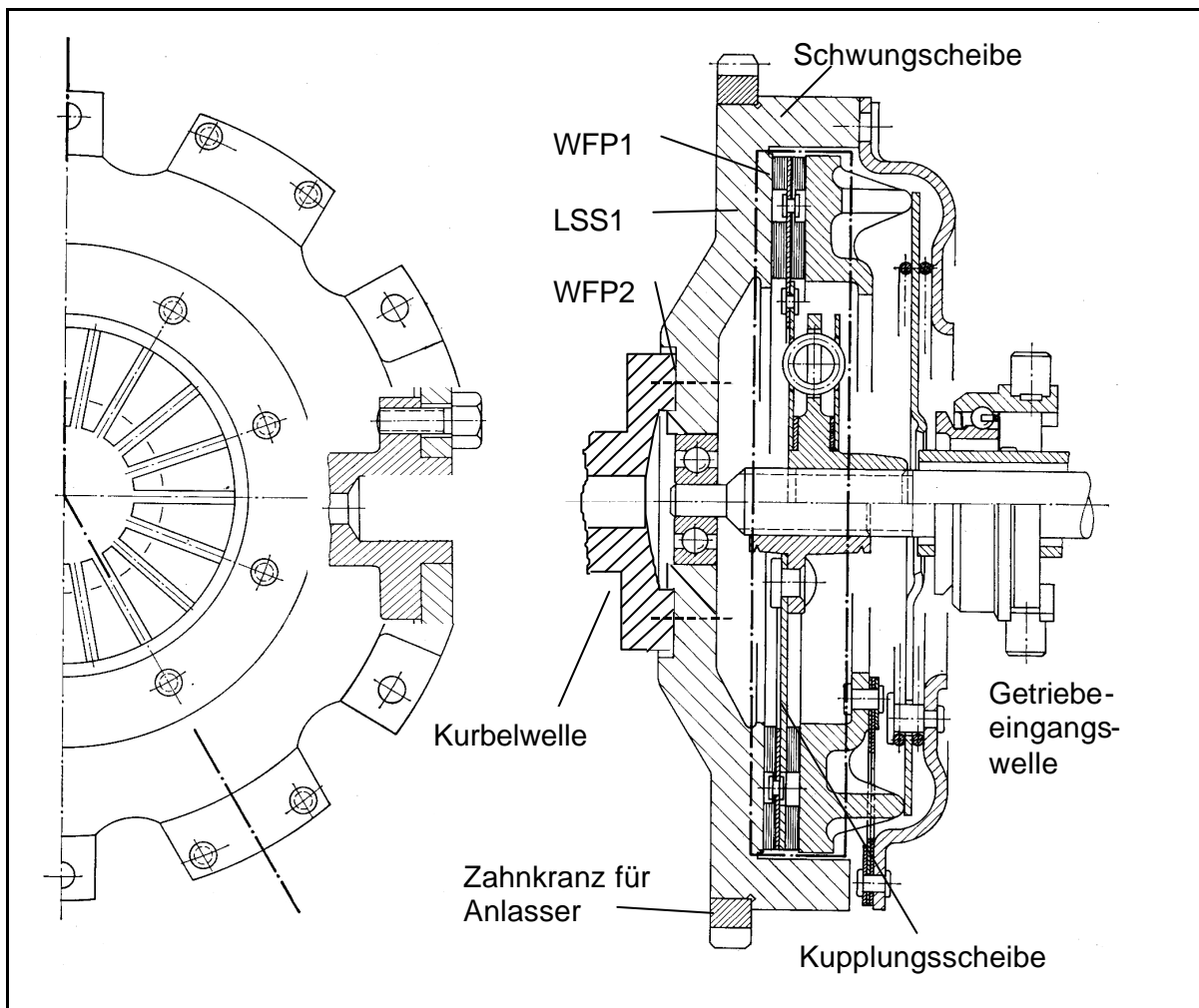


Abbildung 29 „Einscheibentrockenkupplung mit zentraler Tellerfeder und Schwungscheibe“
Quelle: Firma Sachs

Es gelten folgende Randbedingungen:

- Die Reibungsverluste seien vernachlässigbar klein.
- Die Kupplung sei dauernd geschlossen.
- Das Fahrzeug bewege sich mit konstanter Geschwindigkeit. Das heißt Drehmoment und Drehzahl sind bis auf die systemimmanenten Änderungen, die aus dem Verbrennungsprozess resultieren, konstant.¹⁹¹

Es lassen sich 3 Betriebszustände der Schwungscheibe im umgebenden System unterscheiden:

Zustand 1: Die Schwungscheibe wird motorseitig angetrieben, d.h. die Drehzahl der Schwungscheibe vergrößert sich, die Schwungscheibe nimmt Energie auf.

Zustand 2: Die Schwungscheibe wird weder angetrieben noch abgebremst, d.h. ihr energetisches Potenzial bleibt konstant.

Zustand 3: Die Schwungscheibe wird motorseitig abgebremst, d.h. die Drehzahl der Schwungscheibe verringert sich, die Schwungscheibe gibt Energie ab.

zu 1:

Über das Wirkflächenpaar 2 (Reibfläche der Flanschverbindung zwischen Schwungscheibe und Kurbelwelle) wird Energie in die Schwungscheibe eingeleitet. Diese Energie beschleunigt die Schwungscheibe. Dazu muss Energie von der Wirkfläche der Schwungscheibe über die Leitstützstruktur 1 in das Bauteil weitergeleitet werden. Ein Teil der über Wirkflächenpaar 2 eingeleiteten Energie bleibt in der Leitstützstruktur 1 als Rotationsenergie (kinetische Energie) gespeichert. Dies ist natürlich nur bei einem Anstieg der Drehzahl der Schwungscheibe möglich. Dazu muss ein Teil der Energie über Wirkflächenpaar 1 (Reibbelagsoberfläche / Schwungscheibenoberfläche) in Richtung des Getriebes weitergeleitet werden.

Die technische Funktion „Ausgleichen von Energieschwankungen wurde bisher noch nicht erfüllt!

zu 2:

Die Rotationsgeschwindigkeit der Schwungscheibe bleibt konstant. Damit bleibt der Energieinhalt der Leitstützstruktur ebenfalls konstant.

¹⁹¹ d.h. der Fahrerwunsch kann mit „Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit“ beschrieben werden.

Zu 3:

Über das Wirkflächenpaar 2 wird Rotationsenergie der Schwungscheibe in Richtung des Motors abgegeben. Die Leitstützstruktur 1, in der die Energie gespeichert wurde, leitet diese an das Wirkflächenpaar 2 weiter.

Die Drehzahl der Schwungscheibe muss hierbei natürlich sinken. Damit findet auch ein Kraftfluss über das Wirkflächenpaar 1 statt, der die Eingangsdrehzahl des Getriebes senkt. Diese Verringerung der Eingangsdrehzahl ist aber durch die Wirkung der energieabgebenden Leitstützstruktur nicht so groß wie ohne diese.

Die technische Funktion „Ausgleichen von Energieschwankungen“ wurde jetzt erfüllt.

Die Leitstützstruktur hat Energie zwischengespeichert. Die beiden Wirkflächenpaare, die zur Erfüllung der Funktion nötig sind, fallen in diesem Beispiel in Wirkflächenpaar 2 mit zeitlich veränderter Wirkrichtung zusammen.

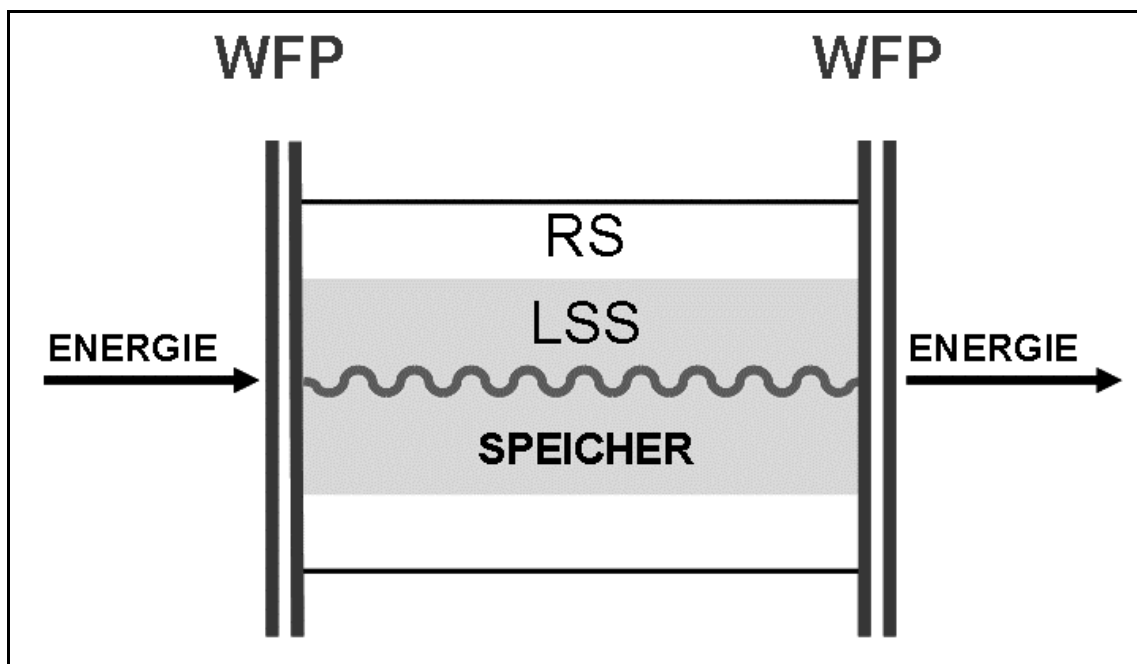


Abbildung 30 „Leitstützstruktur als Energiespeicher“¹⁹²

Es lassen sich folgende Grundsätze für die Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen des Elementmodells ableiten:

¹⁹² In diesem Beispiel fallen WFP1 und WFP2 in einem identischen Wirkflächenpaar (WFP2) zusammen.

1. Teile eines Körpers können Energie speichern. Diese Teile des Körpers sind grundsätzlich Leitstützstrukturen und sind immer an der Kraft- bzw. Energieleitung beteiligt.
Auf ähnliche Art und Weise können Leitstützstrukturen auch Stoff und Informationen speichern.
2. Wirkflächenpaare, die über eine Leitstützstruktur miteinander verbunden sind, müssen nicht gleichzeitig, sondern können auch zeitlich nacheinander auftreten.
3. Nach Grundhypothese II sind 2 Wirkflächenpaare und eine diese Wirkflächenpaare verbindende Leitstützstruktur nötig um die technische Funktion zu erfüllen. Treten diese Wirkflächenpaare zeitlich versetzt auf, können sie in einem Wirkflächenpaar zusammenfallen.

3.8 Fluide im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“

3.8.1 Einleitung

Unter Fluid wird in der Chemie ganz allgemein Flüssigkeit verstanden¹⁹³. In dieser Arbeit soll der Begriff des Fluids nach Dubbel alle Flüssigkeiten, Dämpfe und Gase umfassen, die den strömungsmechanischen Gesetzen nicht fester Kontinua folgen.¹⁹⁴

3.8.2 Beispiel eines Fluids im technischen System

Beim Gleitlager kann zwischen dem stehenden und dem rotierenden Teil des Lagers eine flüssige oder pastenartige Zwischensubstanz (z.B. Fett oder Öl) verwendet werden.

Abbildung 31 stellt ein hydrodynamisches Radialgleitlager prinzipiell dar. Die Fälle 1 bis 3 zeigen verschiedene Zustände des Lagers bei unterschiedlichen Drehzahlen n .

¹⁹³ nach Langenscheidts Fremdwörterbuch 2001

¹⁹⁴ nach Dub29(17) S. R1

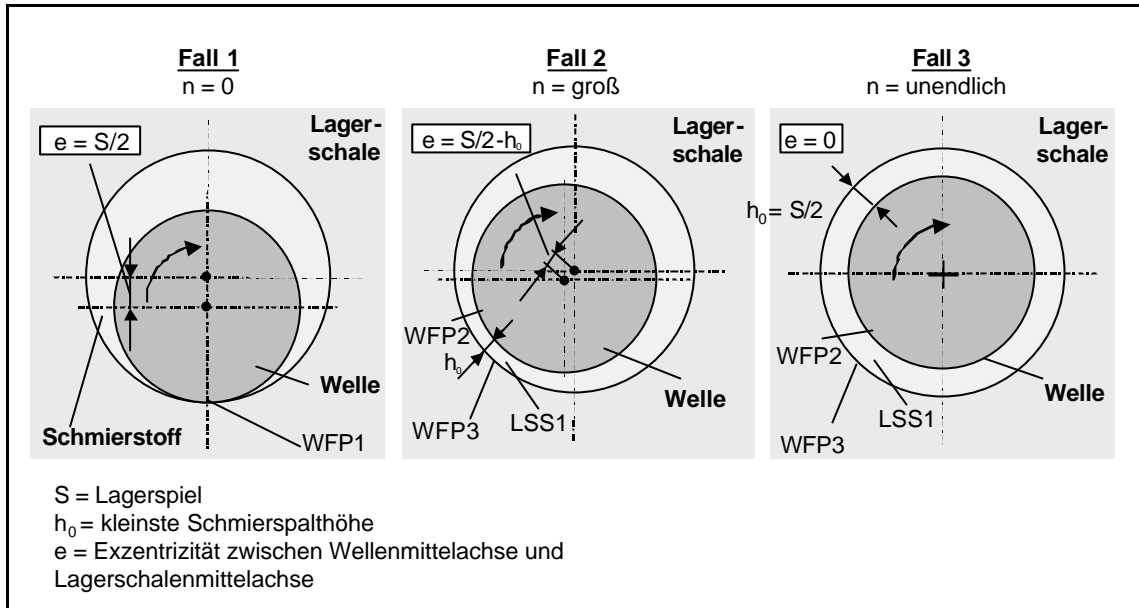


Abbildung 31 "Prinzipielle Darstellung eines hydrodynamischen Radialgleitlagers"

Bei Stillstand der Welle zur Lagerschale (Fall 1) kommt es zu Festkörperkontakt im Wirkflächenpaar 1, das aus der Oberfläche der Lagerschale (Wirkfläche 1) und der Oberfläche der Welle (Wirkfläche 2) gebildet wird. Das Wirkflächenpaar 1 überträgt Radialkraft zwischen Welle und Lagerschale und ist damit zur Erfüllung der Funktion „Übertragung von Radialkraft zwischen der Welle und Lagerschale“ notwendig. In der Kontaktzone zwischen Welle und Lagerschale befindet sich kein wesentlicher Teil des Schmierstoffes. Damit ist der Schmierstoff an der Funktionserfüllung nicht beteiligt.

Der Schmierstoff haftet an den Gleitflächen von Welle und Lagerschale. Wird die Welle mit einer Drehzahl n ungleich Null bewegt, wird der Schmierstoff in den Keilspalt hineingedrückt. Die Funktion „Transport des Schmierstoffes in den Keilspalt“ wird durch das Haftverhalten im Wirkflächenpaar WFP2 (siehe Abbildung 31 Fall 2) zwischen Schmierstoffoberfläche und Wellenoberfläche, durch die Relativgeschwindigkeiten zwischen den Wirkflächen im Wirkflächenpaar und durch die dynamische Zähigkeit oder Viskosität η des Schmierstoffes erfüllt. Die Viskosität ist eine Eigenschaft der Leitstützstruktur LSS1. Das Haftverhalten des Öls an der Welle ist Eigenschaft des Wirkflächenpaares WFP2.

Wird eine Grenzggeschwindigkeit erreicht, „schwimmt“ die Welle auf dem Schmierstoff im Keilspalt auf und der Festkörperkontakt und damit das WFP1 (siehe Fall 1) wird aufgelöst. Die Festkörperreibung geht in Mischreibung und bei ausreichend hoher Drehzahl in Flüssigkeitsreibung über.

Die Radialkraft wird dann über das sich im Keilspalt befindliche Fluid übertragen. Dazu sind WFP2, WFP3 und die diese beiden Wirkflächenpaare verbindende Leitstützstruktur LSS1 notwendig. Die Viskosität, als Eigenschaft der Leitstütz-

struktur, beeinflusst neben der Schmierstalthöhe h_0 die Wirkung der von ihr verbundenen Wirkflächenpaare und damit die Wirkung auf das technische System.

Damit gelten Grundhypothese I, Grundhypothese II und Grundhypothese III (siehe Kap. 3.3.2 bis 3.3.4)

3.8.3 Eigenschaften der Wirkflächen und der Leitstützstruktur

Im oben dargestellten Beispiel ist die Viskosität η Eigenschaft der Leitstützstruktur.

Nach Gleichung 10 (Seite 64) gilt für die Wirkung der Leitstützstruktur auf das technische System:

$$W_{LSS_j} = f \{ E_{LSS_j}; W_{WF_i}; W_{LSS_{ki}} \}$$

Eigenschaften der Leitstützstruktur eines Fluids sind alle Eigenschaften des Fluids, die die Verbindung der beiden Wirkflächenpaare des Fluids beeinflussen. Diese Eigenschaften beeinflussen z.B. das Fließverhalten.

Nach Gleichung 8 (Seite 62) gilt für die Wirkung der Wirkfläche auf das Wirkflächenpaar:

$$W_{WF_i} = f \{ E_{WF_i}; W_{LSS_j} \}$$

Im oben dargestellten Beispiel ist eine wichtige Eigenschaft der Wirkfläche des Schmierstoffes die Fähigkeit auf einer anderen Wirkfläche (in diesem Fall auf der Wellenoberfläche) zu haften. Diese Fähigkeit wird als Adhäsion bezeichnet und hat ihren Ursprung in intermolekularen Kräften. Da die Adhäsion vom Kontaktpaar abhängt, muss die Eigenschaft der Wirkfläche „Schmierstoffoberfläche“ strenggenommen im Zusammenhang mit dem Kontaktpartner beschrieben werden. Zum Beispiel „Adhäsion des Schmierstoffes bei Kontakt zum Wellenwerkstoff“

Die Wirkung der Wirkfläche auf das Wirkflächenpaar wird außerdem von der Wirkung der die Wirkfläche stützenden Leitstützstruktur beeinflusst. Im beschriebenen Beispiel ist dies die Stützwirkung des Schmierstoffes in Abhängigkeit von der Drehzahl der Welle und der Viskosität des Schmierstoffes.

Nach Gleichung 7 (Seite 58) ist die Ursache der Wirkung des Wirkflächenpaares auf das technische System die Wechselwirkung der in Kontakt stehenden Wirkflächen aufeinander:

$$W_{WFP_i} = f \{ W_{WF_{1i}}, W_{WF_{2i}} \}$$

Hier wird erneut deutlich, wie das hier vorgestellte Modell den Systemgedanken aufgreift. Nicht die Wirkfläche beeinflusst das technische System, sondern das Wirkflächenpaar!

3.8.4 Fazit zu Fluide im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“

Bei Fluiden wird die geometrische Gestalt der Oberflächen durch den Kontaktpartner¹⁹⁵ vorgegeben. Wirkflächen von Fluiden passen ihre Gestalt der in Kontakt stehenden festen Wirkfläche an.

Die geometrische Gestalt der Leitstützstruktur entsteht entweder durch deren Begrenzung durch Wirkflächen oder durch eine Begrenzung aufgrund eingeschränkten Fliessverhaltens.

Der gleiche Materialanteil des Fluids kann zu zwei verschiedenen Zeitpunkten Teil der Wirkfläche oder Teil der Leitstützstruktur sein. Dies hat seine Ursache im begrenzten stofflichen Zusammenhalt eines Fluids.

Alle Grundhypothesen aus Kap 3.3 sind direkt auf Fluide übertragbar. Die Unterschiede zwischen Fluiden und Festkörpern werden durch verschiedene Eigenschaftsbeschreibungen im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ berücksichtigt.

3.9 Felder im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“

Das Elementmodell ist grundsätzlich auch auf elektrische Felder, magnetische Felder und Gravitationsfelder anwendbar.

In diesem Kapitel wird das grundsätzliche Verständnis von Feldern im Zusammenhang mit dem Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ geschaffen. Ziel ist die Durchgängigkeit des Modells auch bei der Feldbetrachtung zu zeigen. Die verwendeten Begriffe, wie Wirkflächenpaar, Leitstützstruktur, Tragstruktur, die historisch aus der Mechanik stammen und sich dort bewährt und etabliert haben, werden in diesem Kapitel auf Felder übertragen und aus Gründen der Durchgängigkeit beibehalten.

Man beachte, dass die im Folgenden geschilderten Betrachtungen nicht dazu dienen alle möglichen in der Physik bekannten Erscheinungen zu erklären, sondern vielmehr dazu ein Modell aufzubauen, das helfen kann ingenieurmäßige Problem zu lösen.

¹⁹⁵ Kontaktpartner kann per Definition (siehe Kap 3.9 Felder im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“) auch ein Feld sein. (Beispiel Tropfenform im Gravitationsfeld)

3.9.1 Das Gravitationsfeld

3.9.1.1 Einleitung

Jeder massebehaftete Körper erzeugt ein Gravitationsfeld.

Um dieses Gravitationsfeld in jedem Punkt der Nachbarschaft des Körpers vollständig zu beschreiben genügt es, die Gravitationsbeschleunigung zu kennen, die ein anderer Körper erhalten würde, wenn er an diesen Punkt gebracht würde. Da diese Beschleunigung für alle hinreichend kleinen Körper¹⁹⁶ dieselbe ist – unabhängig von ihren Abmessungen, ihrer Gestalt oder ihrer chemischen Zusammensetzung – ist sie eine eindeutige Eigenschaft dieses Punktes. Die Eigenschaft kann berechnet und mit dem Punkt verknüpft werden, selbst wenn sich an diesem Punkt kein zu beschleunigender Körper befindet.¹⁹⁷

Die *Gravitationsbeschleunigung* g wird durch einen Vektor, der auf den Schwerpunkt der feldverursachenden Masse zeigt, beschrieben:

$$\mathbf{g} = \frac{GM}{R^2} \quad (15)$$

mit:

g ... *Gravitationsbeschleunigung* [m/s^2]

M ... *felderzeugende Masse* [kg]

G ... *Gravitationskonstante* [Nm^2/kg^2] (= $6,670 \times 10^{-11} Nm^2/kg^2$)

R ... *Abstand zum Massenschwerpunkt* [m]

Das *Gravitationsfeld* ordnet jedem Punkt im Raum einen Vektor zu. Es kann durch Feldlinien dargestellt werden. Legt man in einem beliebigen Punkt P die Tangente an die durch P verlaufende Feldlinie, hat die Tangente dieselbe Richtung, wie die dort herrschende Gravitationsbeschleunigung.

Ein Maß für die Stärke des Feldes ist die Anzahl der Feldlinien, die durch eine Flächeneinheit hindurchgehen. Die Feldstärke nimmt damit quadratisch mit der Entfernung zum Massenschwerpunkt ab (siehe Abbildung 32).

¹⁹⁶ die Physik spricht in diesem Zusammenhang von einer Probenmasse

¹⁹⁷ Nach Atk74(2), S.277

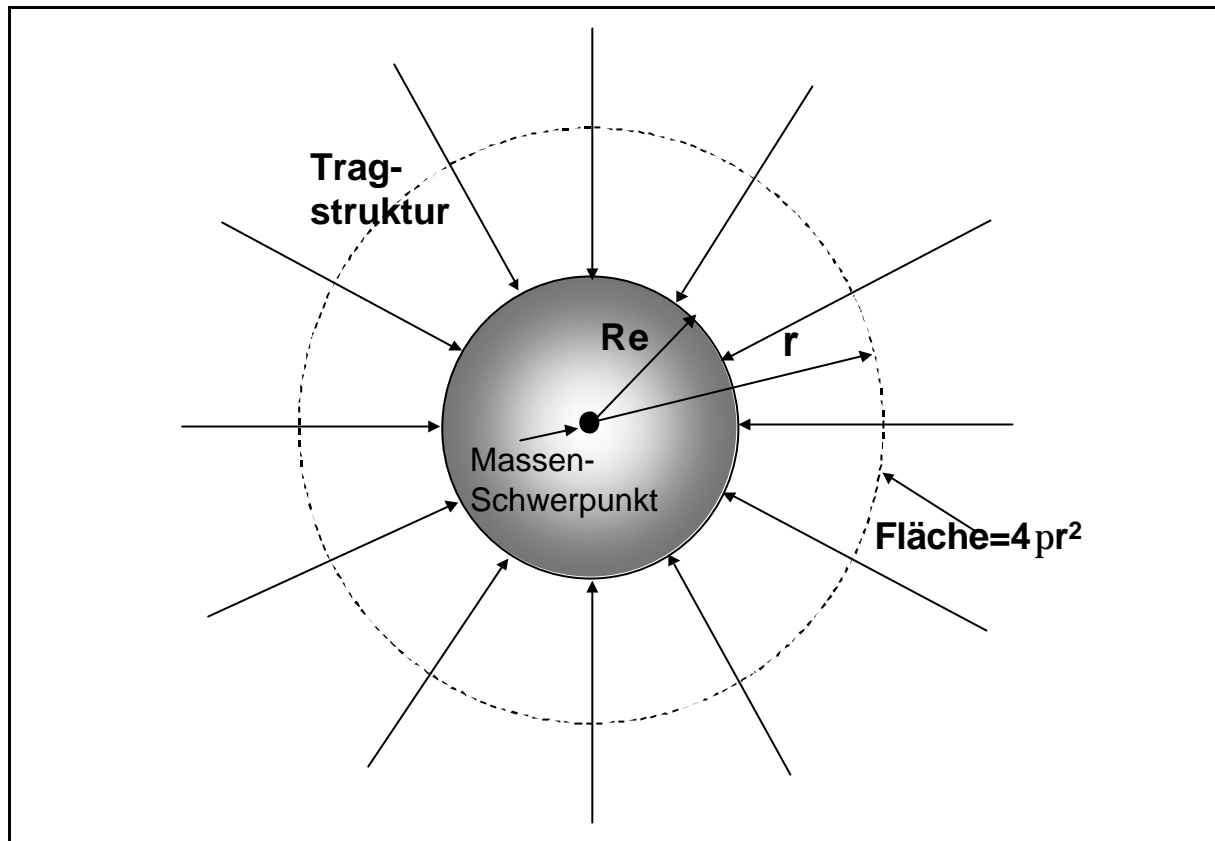


Abbildung 32 „Anzahl der Feldlinien durch eine Flächeneinheit als Maß für die Stärke eines Feldes“
 Durch Felder können sich zwei, auch in großer Entfernung zueinander befindliche, Objekte gegenseitig beeinflussen. Diese Beeinflussung wird auch als *Fernwirkung*¹⁹⁸ bezeichnet.

Die Fernwirkung wirkt durch den leeren, materielosen Raum.

Die Entdeckung dieser Fernwirkung beunruhigte im frühen 19. Jahrhundert viele Wissenschaftler und Philosophen, die der Meinung waren, dass zwei Körper nur dann in Wechselwirkung treten könnten, wenn sie miteinander in „direktem Kontakt“ stünden. Die Physik versuchte daraufhin, den nicht sichtbaren und nicht fühlbaren, Gravitationskraft übertragenden Zwischenraum z.B. zwischen Erde und Mond modellhaft als Äther¹⁹⁹ zu erklären. „Man stellte sich vor, der Äther wäre unsichtbar und hätte ähnliche Eigenschaften wie Gelatine. Die Erde erzeuge im Äther eine Verformung, die über den Äther bis zum Mond geleitet wird und auf ihn wirkt.“²⁰⁰

Die Vorstellung vom materiellen Äther war später vor allem bei Diskussionen der Relativitätstheorie nicht mehr aufrechtzuerhalten. Nichtsdestoweniger ist diese

¹⁹⁸ z.B. nach Atk74(2), S.273

¹⁹⁹ z.B. nach Atk74(2), S.7

²⁰⁰ nach Atk74(2); S. 274

Denkweise in dem Sinne fruchtbar gewesen, dass sie die Gedanken von den materiellen Körpern und den diskreten Teilchen abgelenkt und die wichtige Frage in den Vordergrund gerückt hat, ob nicht der Raum selbst Eigenschaften besitzt.²⁰¹

3.9.1.2 Das Gravitationspotential

Potenzielle Energie ist eine wechselseitige Eigenschaft eines Paares von Körpern, die sich aus ihrer Nachbarschaft zueinander und der Tatsache ergibt, dass sie aufeinander Wechselwirkungen ausüben. Die wechselseitige *potenzielle Gravitationsenergie* F_G zweier Körper mit den Massen M_1 und M_2 im *Abstand* R zueinander kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$F_G = -G \frac{M_1 M_2}{R} \quad (16)$$

F_G ... *potenzielle Gravitationsenergie [J]*

G ...*Gravitationskonstante [Nm² /kg²] (=6,670x10⁻¹¹ Nm² /kg²)*

M_1 ... *Masse Körper 1 [kg]*

M_2 ... *Masse Körper 2 [kg]*

R ... *Abstand der Massenschwerpunkte zueinander*

Aus der Gleichung ist direkt ersichtlich, dass die *potenzielle Gravitationsenergie* F_G grundsätzlich negativ ist und mit unendlich großem Abstand der beiden Körper gegen Null geht.

Das *Gravitationspotential* f_G in einem Punkt P im Abstand R von einer Masse M_1 ist definiert als die wechselseitige potentielle Energie, die eine Masseneinheit die sich im Punkt P befände, besitzen würde. Das Gravitationspotential ist im Gegensatz zur Gravitationsbeschleunigung eine skalare Größe und wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

²⁰¹ nach Atk74(2); S. 274

$$f_G = -G \frac{M_1}{R} \quad (17)$$

f_G ... *Gravitationspotential [J/kg]*

G ...*Gravitationskonstante [Nm²/kg²] (=6,670x10⁻¹¹ Nm²/kg²)*

M_1 ... *Masse Körper 1 [kg]*

R ... *Abstand zum Punkt P*

3.9.1.3 Das Gravitationsfeld im Elementmodell

Der die Fernwirkung übertragende Raum soll im Elementmodell als Tragstruktur definiert werden. Der Tragstruktur wird als Eigenschaft die Gravitationsbeschleunigung zugeordnet. Wie oben geschildert (siehe Seite 87), reicht die Gravitationsbeschleunigung aus, um das Gravitationsfeld vollständig zu beschreiben. Die Tragstruktur hat diese Eigenschaft auch dann, wenn sich kein Körper in ihrem Einflussbereich befindet. Die Tragstruktur ist Träger des Gravitationsfeldes und damit nach Kap. 3.6.3 Effekträger.

Die Erstreckung der Gravitationsbeschleunigung reiche von der Oberfläche des gravitationskrafterzeugenden Körpers bis ins Unendliche.²⁰² Damit erstreckt sich auch die Tragstruktur mit der Eigenschaft der Gravitationsbeschleunigung von der Oberfläche des Körpers bis ins Unendliche.²⁰³ Dies ist auch direkt aus Gleichung 16 ersichtlich.²⁰⁴ Da der Betrag der Gravitationsbeschleunigung quadratisch mit der Entfernung abnimmt (siehe Abbildung 32 und Erklärungen) macht es Sinn die Erstreckung der Leitstützstruktur nicht bis ins Unendliche zu betrachten, sondern nur bis zu einem gewählten Grenzwert der Gravitationsbeschleunigung. Die Wahl des Grenzwertes hängt trivialerweise von dem betrachteten Problem ab und ist damit eine problemspezifische Größe.

²⁰² Streng physikalisch betrachtet, reicht die Erstreckung der Gravitationsbeschleunigung vom Massenschwerpunkt bis ins Unendliche. Die gemachte Einschränkung ist für das hier vorgeschlagene Modell durchaus legitim, da der vom felderzeugenden Körper beanspruchte Raum keinen für eine technische Anwendung nutzbaren Raum darstellt. (Bei einem Eindringen eines zweiten Körpers verschieben sich die Oberfläche der felderzeugenden Körpers und mit ihr verschiebt sich auch die Erstreckung der Gravitationsbeschleunigung.)

²⁰³ Tatsächlich ist die Gravitationsbeschleunigung der Erde in Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit der verwendeten Messgeräte auch noch in sehr großem Abstand messbar.

²⁰⁴ Aus der Gleichung ist direkt ersichtlich, dass die potentielle Gravitationsenergie Φ_G grundsätzlich negativ ist und erst mit unendlich großem Abstand der beiden Körper gegen Null geht.

Zwei Körper im Feld

Befinden sich zwei Körper im gegenseitigen Einflussbereich so wirkt zwischen ihnen die Gravitationskraft²⁰⁵:

$$F_G = - G \frac{M_1 M_2}{R^2} \quad (18)$$

mit:

F_G ... Gravitationskraft [N]

G ... Gravitationskonstante [Nm² /kg²] (=6,670x10⁻¹¹ Nm² /kg²)

M₁... Masse Körper 1 [kg]

M₂... Masse Körper 2 [kg]

R... Abstand der Massenschwerpunkte zueinander

Befinden sich zwei Körper im gegenseitigen Einflussbereich, so existiert ein gemeinsames Feld (siehe Abbildung 33). Innerhalb dieses gemeinsamen Feldes liegt die Leitstützstruktur.

²⁰⁵ Im Gravitationsfeld der Erde entspricht die Gravitationskraft der Gewichtskraft.

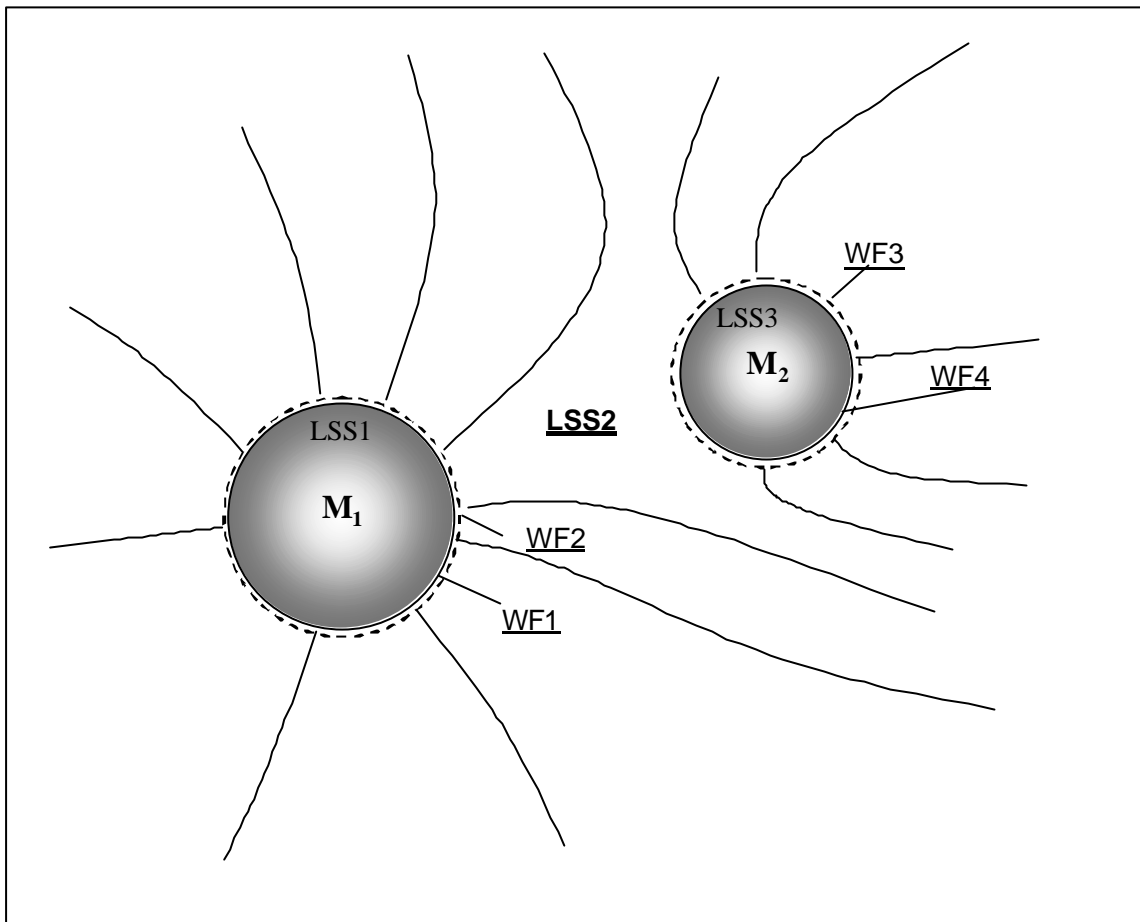


Abbildung 33 „gegenseitige Beeinflussung der Gravitationsfelder zweier Körper“

Die Eigenschaft der Leitstützstruktur wird also von beiden Körpern gemeinsam beeinflusst. Modellhaft kann die Erstreckung der für das oben dargestellte System maßgeblichen Leitstützstruktur von der Oberfläche des Körpers 1 bis zur Oberfläche des Körpers 2 gesehen werden.

Folgende Bezeichnung wird an dieser Stelle eingeführt (siehe Abbildung 33):

- Oberfläche des Körpers 1 heiße Wirkfläche 1
- die „generalisierte Oberfläche“ des felddurchsetzten Raumes um den Körper 1 heiße Wirkfläche 2,
- die „generalisierte Oberfläche“ des felddurchsetzten Raumes um den Körper 2 heiße Wirkfläche 3 und
- die Oberfläche des Körpers 2 heiße Wirkfläche 4

Der

- felddurchsetzte Raum selbst soll mit Leitstützstruktur 2 bezeichnet werden.

Auch hier wird erst durch die Einführung eines zweiten Körpers und damit eines 2. Wirkflächenpaares eine Funktion ermöglicht (Grundhypothese II). Ein Körper mit

seinem selbsterzeugten Feld und damit einem einzigen Wirkflächenpaar (Körperoberfläche, Feldoberfläche) hat keine Funktion.

Beispiel:

Die Erde mit ihrem Gravitationsfeld erfüllt allein keine Funktion. Befindet sich ein weiterer Körper (Körper 2 in Abbildung 33) in ihrem Einflussbereich, wird die Funktion „Kraft aufeinander ausüben“ durch die Existenz von 2 Wirkflächenpaaren und einer sie verbindenden Leitstützstruktur erfüllt.

Damit gilt die

Grundhypothese II

Die Funktion eines technischen Systems oder eines technischen Teilsystems wird grundsätzlich über mindestens zwei Wirkflächenpaare und eine sie verbindende Leitstützstruktur verwirklicht.

Funktionsbestimmend sind dabei allein die Eigenschaften und Wechselwirkungen der beiden Wirkflächenpaare und der sie verbindenden Leitstützstruktur.

Spielen Felder für die Funktionserfüllung eine Rolle, so ist die Wechselwirkung der Leitstützstruktur des Feldes mit mindestens zwei weiteren Leitstützstrukturen zusätzlich funktionserfüllend.

und die Gleichung (1):

$$TF = f\{WFP_i; LSS_j\} \quad (\text{siehe S. 57})$$

Auch bei Systemen, in denen die Feldwirkung eine Rolle spielt, setzt sich jedes Wirkflächenpaar aus genau 2 Wirkflächen zusammen.

Damit sind

Grundhypothese III:

Jedes System, das Funktionen erfüllt, besteht aus den Grundelementen Wirkflächenpaar und Leitstützstruktur, die in beliebiger Anzahl, Anordnung und Form auftreten können.

Ein Wirkflächenpaar setzt sich aus genau zwei Wirkflächen zusammen.

und Gleichung (2):

$$\{WF_{k1}; WF_{l2}\} \hat{=} WFP_i \quad (\text{siehe S. 57})$$

erfüllt.

Körper 1 und Körper 2 stehen miteinander in Wechselwirkung.

Modellhaft kann das Verhalten des Systems als Ergebnis einer Wechselwirkung der Leitstützstrukturen aufeinander verstanden werden. Die Masse als Eigenschaft der Leitstützstruktur 1 (Abbildung 33) ist die Ursache für die Gravitationsbeschleunigung, der Eigenschaft der Leitstützstruktur 2.

Notwendig für diese Wirkung dieser Leitstützstrukturen aufeinander ist die Existenz eines Wirkflächenpaares.

Nach Gleichung (8):

$$\mathbf{W}_{WF_i} = f \{ \mathbf{E}_{WF_i}; \mathbf{W}_{LSS_j} \} \quad (\text{siehe S.62})$$

gilt, dass die Wirkung der Wirkflächen Funktion der Eigenschaften der Wirkfläche E_{WF} und der Wirkung der die Wirkfläche stützenden Leitstützstruktur (W_{LSS}) ist. Im hier dargestellten Beispiel, in dem *nur* Fernwirkungen eine Rolle spielen, haben die Wirkflächen keine Eigenschaften, die die Wirkung der Wirkfläche beeinflussen.

Die Eigenschaften der Wirkfläche spielen bei Systemen, die nur auf Fernwirkungen beruhen also keine Rolle. Die Wirkflächen müssen aber notwendigerweise existent sein, damit eine Funktion erfüllt wird!

Deutlich wird diese Notwendigkeit der Existenz des Wirkflächenpaares, wenn man den Umstand beachtet, dass sich das Gravitationsfeld mit endlicher Geschwindigkeit im Raum ausdehnt.²⁰⁶ Das sich im Raum ausdehnende Gravitationsfeld wird erst ab dem Moment mit einem anderen Körper wechselwirken, wenn sich ein Wirkflächenpaar bildet. Das heißt erst, wenn die sich im Raum ausbreitende „Oberfläche“ des Feldes (WF_1) mit der Oberfläche eines Körpers (WF_2) ein Wirkflächenpaar bildet, kommt es zur Wechselwirkung.

Nach Gleichung (10)

$$\mathbf{W}_{LSS_j} = f \{ \mathbf{E}_{LSS_j}; \mathbf{W}_{WF_i}; \mathbf{W}_{LSS_{ki}} \} \quad (\text{siehe 64})$$

hängt die Wirkung einer Leitstützstruktur j von den Eigenschaften der Leitstützstruktur, den Wirkungen, die ihre Ursache in der Wirkung des anderen Wirkflächenpaares auf die Leitstützstruktur haben und der Wirkung der Leitstützstrukturen LSS_{ki} ab.

Die Fernwirkungen der LSS_1 (Abbildung 33) und der LSS_3 auf die LSS_2 wird durch $W_{LSS_{ki}}$ in Gleichung 10 beschrieben.

²⁰⁶ Diese Geschwindigkeit entspricht der Lichtgeschwindigkeit, die die Maximalgeschwindigkeit mit der Energie und Information verbreitet werden kann, darstellt.

Spielt wie in diesem Beispiel nur die Fernwirkung für das System eine Rolle entfällt die Wirkung der durch die Leitstützstruktur j verbundenen Wirkflächen ($W_{wf i}$).

Der Begriff der Fernwirkung hat damit im Elementmodell folgende Bedeutung:

Die Wirkung geht von der Leitstützstruktur aus und wirkt direkt auf eine andere Leitstützstruktur, ohne dass die Eigenschaften eines Wirkflächenpaares diese Wirkung beeinflussen.

Dies ist nur möglich, wenn mindestens zwei Wirkflächenpaare existieren.

Eigenschaft der Leitstützstruktur bei Auftreten von Fernwirkung

Die für die Wirkung der Leitstützstruktur relevanten Eigenschaften sind nach Kap. 3.6.3:

- Geometrieeigenschaften der Leitstützstruktur
- (Werk-) Stoffeigenschaften

Bei Feldbetrachtungen, in denen das Gravitationsfeld eine Rolle spielt, soll die Gravitationsbeschleunigung als Eigenschaft der Leitstützstruktur den „Stoffeigenschaften“ zugeordnet werden.

Fazit zu „Das Gravitationsfeld im Elementmodell“

Bei Anwesenheit einer Masse als Feldquelle, kann dem Feld als Eigenschaft die *Gravitationsbeschleunigung* g zugeordnet werden. Der Raum, den das Feld mit der Eigenschaft der Gravitationsbeschleunigung g einnimmt, wird als Tragstruktur definiert. Die Tragstruktur oder Teile der Tragstruktur können Leitstützstruktur werden.

Die Existenz einer Leitstützstruktur ist nicht an Materie gebunden.

Die Tragstruktur im Zusammenhang mit dem Gravitationsfeld erstreckt sich von der Oberfläche des die Gravitationsbeschleunigung erzeugenden Körpers bis zu einem problemspezifisch zu definierenden Abstand vom Körper.

Wirkflächen von Gravitationsfeldern bilden sich an der Oberfläche des felderzeugenden Körpers aus und (automatisch) an der Oberfläche eines in die Leitstützstruktur eingebrachten Körpers.

Die generalisierte Oberfläche des Gravitationsfeldes kann dann zur Wirkfläche werden, wenn sie mit einer anderen Wirkfläche ein Paar bildet.

Alle Grundhypothesen aus Kap 3.3 sind direkt auf Felder übertragbar. Die Unterschiede zwischen Festkörpern, Flüssigkeiten und Gravitationsfeldern werden durch verschiedene Eigenschaftsbeschreibungen der Wirkflächen und der

Leitstützstruktur im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ berücksichtigt.

3.9.2 Das elektrostatische Feld

3.9.2.1 Einleitung

Befindet sich eine Masse m in einem Punkt P eines Gravitationsfeldes, erfährt die Masse eine Gravitationsbeschleunigung. Diese Beschleunigung kann modellhaft auf eine Kraft zwischen 2 Massen (die Gravitationskraft) zurückgeführt werden (siehe Gleichung 18).

Zwischen 2 elektrischen Ladungen herrscht ebenfalls eine Kraft, die mit elektrostatischer Kraft bezeichnet wird:

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R^2} \quad (19)$$

mit:

F_e ... *elektrostatische Kraft [N]*

q_1 ... *Ladung 1 [C]*

q_2 ... *Ladung 2 [C]*

R ... *Abstand der Ladungen zueinander*

ϵ_0 ... *Elektrische Feldkonstante $8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$*

In Analogie zur Masse im Gravitationsfeld herrscht auf eine Ladung²⁰⁷ q in einem Punkt p eines Elektrischen Feldes E eine elektrostatische Kraft F_e :

$$F_e = q_1 E \quad (20)$$

mit:

F_e ... *elektrostatische Kraft [N]*

q_1 ... *Ladung im elektrostatischen Feld [C]*

E ... *elektrische Feldstärke [1N/C=1V/m]*

Diese Kraft kann die Ladung q_2 in ähnlicher Weise beschleunigen wie die Gravitationskraft die Masse m .

²⁰⁷ Die Physik spricht in diesem Zusammenhang von einer Probeladung

Die Ursache für ein elektrisches Feld E ist die Ladung q_1 .

Das elektrische Feld E ist vollständig bestimmt, wenn das *elektrische Potenzial* f_e in allen Punkten des Raumes bekannt ist.

Der Feldvektor E kann aus dem *elektrischen Potential* f_e auf dieselbe Art abgeleitet werden wie die Gravitationsbeschleunigung g aus dem *Gravitationspotenzial* f_G .²⁰⁸

3.9.2.2 Das elektrische Potenzial

Wenn sich eine Ladung q_1 im Punkt P in einer Entfernung R von einer Ladung q_2 befindet, ist die wechselseitige, *elektrostatische potenzielle Energie* W_e der beiden Ladungen

$$W_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R} \quad [\text{V/C}] \quad (21)$$

Das *elektrische Potenzial* f_e der Ladung q_1 im Abstand R ergibt sich, indem die elektrostatische potenzielle Energie auf die Ladungseinheit bezogen wird:

$$f_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{R} \quad [\text{V}] \quad (22)$$

Für die elektrische Feldstärke E gilt:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{R^2} \quad [1\text{N/C}=1\text{V/m}] \quad (23)$$

E ... *elektrische Feldstärke* [1N/C=1V/m]

q_2 ... *felderzeugende Ladung* [C]

R ... *Entfernung zur felderzeugenden Ladung*

ϵ_0 ... *Elektrische Feldkonstante* $8,8542 \cdot 10^{-12} \text{As/Vm}$

In Analogie zum Gravitationsfeld (siehe Seite 90) soll der die Fernwirkung übertragene Raum als Tragstruktur definiert werden. Der Tragstruktur wird als Eigenschaft die elektrische Feldstärke zugeordnet. Alle zu Gravitationsfeldern gemachten Aussagen lassen sich auf elektrische Felder übertragen. Die Tragstruktur

²⁰⁸ Nach Atk74(2), S.292; vergleiche auch Kap. 3.9.1.

oder Bereiche der Tragstruktur werden zur Leitstützstruktur, wenn der die Fernwirkung übertragene Raum wirkt.

Insbesondere gilt für die Wirkung der Leitstützstruktur auf das technische System die Gleichung 10:

$$W_{LSS_j} = f \{ E_{LSS_j}; W_{WF_i}; W_{LSS_{k_i}} \}$$

Fazit zu „3.9.2 Das elektrostatische Feld“

Alle auf Seite 95 gemachten Aussagen treffen auch für das elektrostatische Feld zu. Insbesondere sind dies folgende Aussagen:

Bei Anwesenheit einer elektrischen Ladung als Feldquelle, kann dem Feld als Eigenschaft die *elektrische Feldstärke E* zugeordnet werden. Der Raum, den das Feld mit der Eigenschaft der elektrischen Feldstärke E einnimmt, wird als Tragstruktur definiert. Die Tragstruktur oder Teile der Tragstruktur können Leitstützstruktur werden.

Die Existenz einer Tragstruktur ist nicht an Materie gebunden.

Die Tragstruktur im Zusammenhang mit dem elektrostatischen Feldern erstreckt sich von der Oberfläche des die elektrostatische Kraft erzeugenden Körpers bis zu einem problemspezifisch zu definierenden Abstand vom Körper.

Wirkflächen von elektrostatischen Feldern bilden sich an der Oberfläche des felderzeugenden Körpers aus und (automatisch) an der Oberfläche eines in die Leitstützstruktur eingebrachten Körpers.

Die generalisierte Oberfläche des elektrostatischen Feldes kann dann zur Wirkfläche werden, wenn sie mit einer anderen Wirkfläche ein Paar bildet.

3.9.3 Das magnetische Feld

3.9.3.1 Einleitung

Bewegen sich zwei geladene Teilchen beide, üben sie aufeinander eine Kraft aus, die von ihren Geschwindigkeiten abhängt. Diese elektrodynamische Wechselwirkung ist nicht vorhanden, wenn eine der Geschwindigkeiten gleich Null ist.

Diese Kraft hat eine völlig andere Ursache als die Kraft des elektrischen Feldes. Sie ist für die magnetischen Eigenschaften von Stoffen (z.B. die magnetische

Eigenschaft des Stabmagneten) und von Feldern (z.B. elektrisch erregte Magnetfelder in Elektromotoren) verantwortlich.²⁰⁹

3.9.3.2 Das Feld der magnetischen Induktion

Einleitung

Die sich bewegende Ladung q_1 erzeugt in jedem Punkt des Raumes nicht nur ein elektrisches Feld (E-Feld), sondern auch ein magnetisches Feld (Feld der magnetischen Induktion B , oder der Kraftflussdichte B). Die Induktionskraft auf eine weitere bewegte Ladung q_2 im Einflussbereich der bewegten Ladung q_1 ist mess- und berechenbar und hängt von den Geschwindigkeiten der bewegten Ladungen ab. Die Physik führt an dieser Stelle ein Feld der magnetischen Induktion B ein.

$$B = \frac{\mu_0 q_1 v_1 \sin \theta}{4\pi R^2} \quad (24)$$

B ... magnetische Flussdichte [1T=1N/Am]

μ_0 ...magnetische Feldkonstante oder Induktionskonstante [$\mu_0=4\pi 10^{-7}$ Vs/Am]

q_1 ... felderzeugende Ladung [C]

v_1 ... Geschwindigkeit der felderzeugenden Ladung q_1 [m/s]

θ ... Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor v_1 der Ladung q_1 und dem (gedachten) Verbindungsvektor zwischen Ladung q_1 und einer zweiten gedachten Ladung im induzierten Feld.²¹⁰

R ... Abstand zur Ladung [m]

Die *magnetische Flussdichte* B ist ein Vektor in Richtung der Tangenten an die Feldlinien. Ist die magnetische Flussdichte B für jeden Punkt des Raumes in der Umgebung der bewegten Ladung bekannt, wird das magnetische Induktionsfeld vollständig beschrieben. Analog hierzu wurde in Kap. 3.9.1 das Gravitationsfeld durch die *Gravitationsbeschleunigung* g vollständig beschrieben.

Die *magnetische Feldstärke* H ist mit der *magnetischen Flussdichte* B über die *magnetische Feldkonstante* μ_0 und die *relative Permeabilität* μ_r verknüpft:

²⁰⁹ in Anlehnung an Atk74(2) S. 321

²¹⁰ Wie zuvor in Kap. 3.9.1 beschrieben, wird das Gravitationsfeld als Beschleunigungswirkung auf eine zweite im Gravitationsfeld befindliche Masse definiert, ohne dass eine Masse zwingend in diesem Feld vorhanden sein muss. Hier wird analog vorgegangen: Das induzierte Feld wird über seine Wirkung auf eine zweite bewegte Ladung im Feld beschrieben, ohne dass diese zweite Ladung vorhanden sein muss. Aus den Bewegungsrichtungen der Ladungen zueinander ergibt sich der Winkel θ .

$$\mathbf{H} = m_0 m_r \mathbf{B} \quad (25)$$

B... magnetische Flussdichte [1T=1N/Am]

m₀ ... magnetische Feldkonstante [m₀=4π10⁻⁷ Vs/Am]

m_r ... relative Permeabilität (Materialkonstante) [1]

H... magnetische Feldstärke [A/m]

Effekte, die durch die Wirkung des induzierten magnetischen Feldes auf technische Systeme auftreten, spielen im Maschinenbau eine entscheidende Rolle. Sie sind die Grundlage aller elektrischen Energiemaschinen.

Effekte durch die Wirkung des induzierten magnetischen Feldes

Für den Maschinenbau wichtige Effekte aufgrund des induzierten magnetischen Feldes sind:

Die Kraftwirkung auf die senkrecht zum magnetischen Feld verlaufenden Anteile eines stromdurchflossenen Leiters (auch Lorentzkraft genannt)

$$\mathbf{F} = I \mathbf{B} s \quad (26)$$

F... Kraft auf die senkrecht zum magnetischen Feld verlaufenden Anteile eines stromdurchflossenen Leiters [N]

I... Stromstärke [A]

B... magnetische Flussdichte [1T=1N/Am]

s... zum Magnetfeld senkrechter Anteil der Länge des Leiters [m]

Streng physikalisch wirkt die Kraft nicht auf den stromdurchflossenen Leiter selbst, sondern auf eine sich im Magnetfeld bewegende Ladung und kann durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$\mathbf{F} = q_2 \mathbf{B} \mathbf{v}_2 \quad (27)$$

F ... Kraft auf die bewegte Ladung q₂ [N]

q₂... bewegte Ladung im Feld

B ... magnetische Flussdichte [1T=1N/Am]

v₂ ... Geschwindigkeitskomponente der bewegten Ladung q₂ senkrecht zum Feld [m/s]

Um die Auswirkungen dieses Effektes in technischen Systemen zu beschreiben ist die Gleichung 26 und die damit verbundene allgemein anerkannte Modellvorstellung (Wirkung des induzierten Feldes auf einen stromdurchflossenen Leiter)

besser geeignet. Auch im hier vorgestellten Modell soll die Wirkung des Feldes auf den stromdurchflossenen Leiter als Kraft, die an seiner Oberfläche angreift, verstanden werden.

Ein weiteres Beispiel für einen wichtigen Effekt aufgrund des induzierten magnetischen Feldes ist die Spannungsinduktion durch die Bewegung eines elektrischen Leiters im Magnetfeld.

$$U_{ind} = - n \dot{\Phi}(t) \quad (28)^{211}$$

U_{ind} ... durch die Änderung des magnetischen Flusses Induzierte Spannung [V]

$\dot{\Phi}(t)$... zeitliche Änderung des magnetischen Flusses (durch eine senkrecht zum B -Feld stehende Leiterschleife) [Nm/As]

n ... Anzahl der Leiterschleifen [1]

Der magnetische Fluss ist folgendermaßen definiert:

$$\Phi = \mathbf{B} \mathbf{A}_S \quad (29)$$

B ... magnetische Flussdichte [1T=1N/Am]

A_S ... Querschnitt des Feldlinienbündels senkrecht zum Magnetfeld [m²]

Ursache für die Spannungsinduktion ist hier die Größenänderung des Anteils der für den Effekt relevanten Tragstruktur also nach Definition (siehe Kap. 3.1.6) die Änderung der Größe der Leitstützstruktur.

Das Feld der magnetischen Induktion im Elementarmodell

Analog zum Vorgehen im Kap. „Das Gravitationsfeld im Elementmodell“ wird die Wirkung des Feldes als Eigenschaft der Leitstützstruktur definiert.

Die Erstreckung des Feldes reicht von der die Ladung tragenden Oberfläche²¹² bis ins Unendliche. Der Betrag der Feldstärke nimmt mit dem Abstand zur bewegten Ladung quadratisch ab (siehe Gl. 25 und Gl. 24). Auch hier macht es Sinn die Erstreckung der Leitstützstruktur von der die Ladung tragenden Oberfläche bis zu einem problemspezifisch festzulegenden Grenzwert zu definieren (vergleiche Erläuterungen im Kap. „Das Gravitationsfeld im Elementmodell“)

Befinden sich zwei bewegte Ladungen im gegenseitigen Einflussbereich, so bildet sich auch hier (analog zum Gravitationsfeld zweier Körper) ein gemeinsames Feld.

²¹¹ Lenzsche Regel siehe z.B. Ger48(20) S.382

²¹² Elektrische Ladungen befinden sich grundsätzlich auf der Oberfläche eines Körpers.

Die Bezeichnungen der verschiedenen Wirkflächen, Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen wird analog zur im Kapitel „Das Gravitationsfeld im Elementmodell“ auf Seite 91 geschilderten Weise definiert.

Der Nachweis der Grundhypothesen erfolgt ebenfalls analog zum erbrachten Nachweis im oben genannten Kapitel.

3.9.3.3 Das permanentmagnetische Feld

In einer letztendlichen Analyse können alle magnetischen Erscheinungen auf die Wechselwirkung zwischen geladenen Elementarteilchen zurückgeführt werden.²¹³

Die Ursache für ein permanentmagnetisches Feld ist noch nicht vollkommen geklärt.

Letztendlich spielt die Ursache für die Felderzeugung bei der Arbeit mit dem Elementmodell Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen keine Rolle.

Alle gemachten Aussagen im Kapitel „Das Feld der magnetischen Induktion“ können deshalb direkt auf Permanentmagneten übertragen werden.

3.9.3.4 Fazit zu „Das magnetische Feld“

Bei Anwesenheit einer bewegten Ladung als Feldquelle, kann dem Feld als Eigenschaft die *magnetische Flussdichte B* zugeordnet werden. Der Raum, den das Feld mit der Eigenschaft der magnetischen Flussdichte B einnimmt, wird als Tragstruktur definiert. Die Tragstruktur oder Teile der Tragstruktur können Leitstützstruktur werden.

Die Existenz einer Tragstruktur ist nicht an Materie gebunden.

Die Tragstruktur im Zusammenhang mit dem magnetischen Feld erstreckt sich von der Oberfläche des das Magnetfeld erzeugenden Körpers bis zu einem problem-spezifisch zu definierenden Abstand vom Körper.

Wirkflächen von magnetischen Feldern bilden sich an der Oberfläche des felderzeugenden Körpers aus und (automatisch) an der Oberfläche eines in die Leitstützstruktur eingebrachten Körpers.

Die generalisierte Oberfläche des magnetischen Feldes kann dann zur Wirkfläche werden, wenn sie mit einer anderen Wirkfläche ein Paar bildet.

Alle Grundhypothesen aus Kap 3.3 sind direkt auf Magnetfelder übertragbar. Die Unterschiede zwischen Festkörpern, Flüssigkeiten und Magnetfeldern werden durch

²¹³ z.B. in Atk74(2); S. 344

verschiedene Eigenschaftsbeschreibungen der Wirkfläche und der Leitstützstruktur im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ berücksichtigt.

3.9.4 Fazit zu Felder im Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“

Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ gilt auch für die oben beschriebenen Felder. Alle bisher gemachten Definitionen (Kap. 3.1) und Grundhypothesen (Kap. 3.3) lassen sich direkt anwenden. (siehe auch die einzelnen Fazits in den Kapiteln 3.9.1, 3.9.2 und 3.9.3.)

Des Weiteren kann das Elementmodell auf gleiche Art und Weise auf elektromagnetische Strahlung übertragen werden. Es empfiehlt sich der Einfachheit halber bei ingenieurrelevanten Aufgabenstellungen die elektromagnetische Strahlung als Strahlung von Quanten zu interpretieren.

4 Funktionsanalyse technischer Systeme mit dem Elementmodell

Bei der Funktionsanalyse werden bestehende Produkte hinsichtlich der in ihnen realisierten Funktionen untersucht. Dazu werden die Produkte in ihre Funktionsträger gegliedert. Um den einzelnen Funktionsträgern die über sie realisierten Funktionen zuordnen zu können, wird die funktionale Beziehung zwischen den Funktionsträgern und den mit ihnen in „Kontakt“ stehenden Systemen untersucht. Die funktionale Beziehung wird durch Energie-, Stoff- und Informationsflüsse zwischen den Funktionsträgern beschrieben.

Eine Stärke des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ ist die Unterstützung des Ingenieurs einerseits bei der Suche nach den Funktionsträgern einzelner Funktionen und andererseits bei der Analyse der Funktionsträger hinsichtlich ihrer Funktionserfüllung.

Die Funktionsanalyse wird in der Praxis sehr häufig und zu verschiedenen Zwecken angewendet.²¹⁴

- zur Fehlererkennung bei Funktionsstörungen
- zur Schwachstellenerkennung bei der Schwachstellenanalyse
- bei der Funktionsüberprüfung eigener Produkte im Rahmen einer marktgerechten Weiterentwicklung
- bei der Produktdokumentation
- zur Informationsgewinnung bei fremden Produkten hinsichtlich der enthaltenen Funktionen und Wirkprinzipien
- als Grundlage weiterführender Arbeiten wie z.B. Ermittlung der Funktionskosten

Die Funktionserfüllung ist der Zweck jedes technischen Systems. Jeder Ingenieur, der mit technischen Systemen arbeitet, wird diese laufend in Ihrer Funktion beurteilen und verstehen müssen.

Dies ist ein wichtiger Grund weshalb die Funktionsanalyse eine derart bedeutende Stellung in der Ingenieurarbeit einnimmt.

²¹⁴ z.T. nach Lehrveranstaltung „Produktentwicklung I (PE I)“ Birkhofer; Technische Universität Darmstadt; Kap 6.3.2 Funktionsanalyse.

4.1 Analyse eines Zahnradpaares mit Profilüberdeckung gleich 1,0²¹⁵

Im Folgenden wird der Zahneingriff eines einstufigen Getriebes analysiert. Die Abbildung 34 zeigt den Zahneingriff des geradverzahnten Zahnradpaares. Das Zahnrad 1 treibt Zahnrad 2 an.

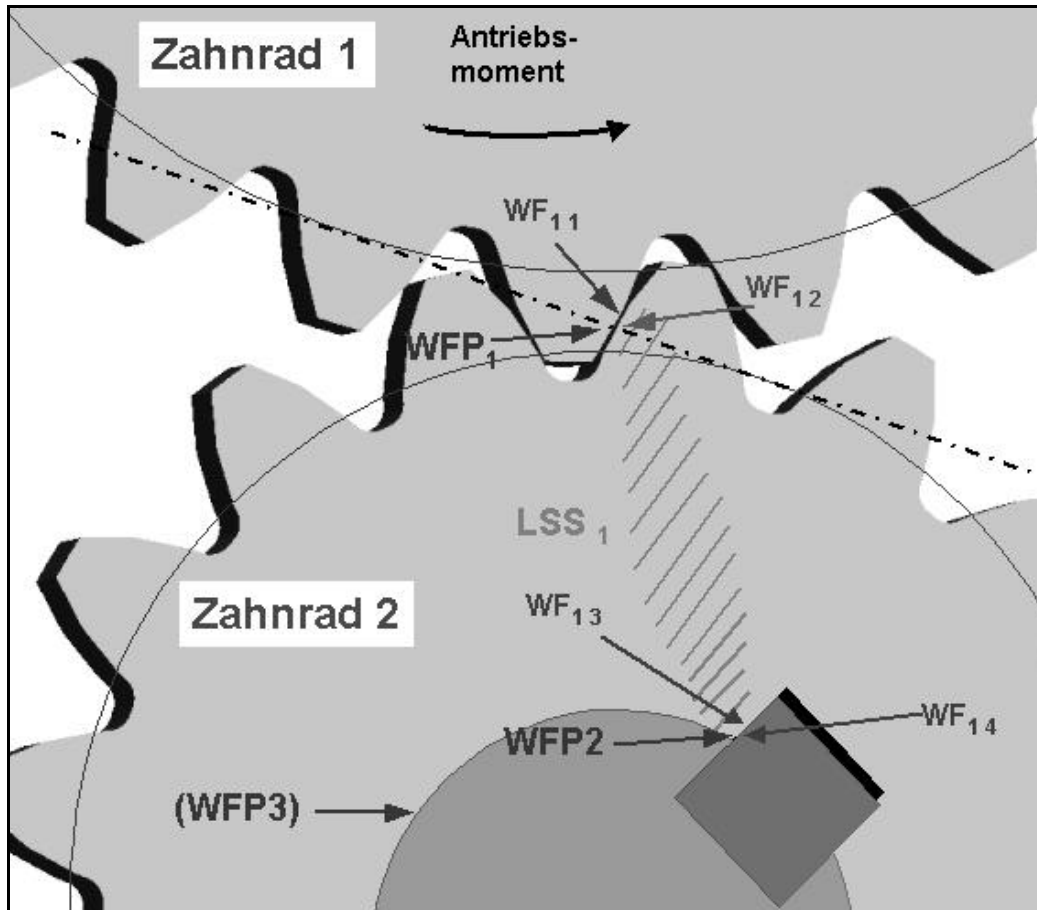


Abbildung 34 „Zahnradpaar mit Profilüberdeckung $\epsilon_\alpha=1,0$ “

Die Zahnräder werden durch folgende geometrische Größen beschrieben:

- Zähnezahl Rad 1: 16 Zähne
- Zähnezahl Rad 2: 25 Zähne
- Profilüberdeckung: 1,0
- Sprungüberdeckung: 0
- Gesamtüberdeckung: 1,0
- Evolventeneingriffswinkel: 20°

²¹⁵ Eine solche Konstellation wird aufgrund der stoßartigen Belastung der Zähne, die beim überschneidungsfreien Eingriff des Zahneingriffs entstehen in der Praxis meist vermieden. Die hier gewählten Bedingungen dienen als Beispiel zur Verdeutlichung der Vorgehensweise.

Die Hauptfunktion des in der Abbildung 34 ausschnittsweise dargestellten Getriebes könnte folgendermaßen formuliert werden:

„Drehmoment und Drehzahl wandeln“.

Je nachdem wie die Systemgrenze bei der Funktionsbetrachtung im vorliegenden System „Getriebe“ gezogen wird, können unterschiedliche Teilfunktionen analysiert werden. Eine mögliche Systemgrenzenwahl bildet der Begrenzungsrahmen der Abbildung 34.

Mit der Wahl der Systemgrenze können Wirkflächenpaare, Wirkflächen und Leitstützstrukturen weggeschnitten werden. So ist z.B. in der Abbildung 34 das WFP über welches das Antriebsmoment in Zahnrad 1 eingeleitet wird nicht sichtbar.

Eine Teilfunktion der Hauptfunktion erfüllt das Zahnrad 2 im Zusammenspiel mit Zahnrad 1 und Passfeder. Die Teilfunktion „Übertragen der von Zahnrad 1 eingeleiteten Kraft auf die Passfeder (Welle)“ stellt eine technische Funktion (siehe auch Kap. 2.7.3) dar, die im Folgenden zunächst für den dargestellten Zeitpunkt, also für den quasi stationären Zustand betrachtet wird.

4.1.1 Betrachtung des quasi stationären Zustandes

„Übertragen der von Zahnrad 1 eingeleiteten Kraft auf die Passfeder (Welle)“.

Für diese technische Funktion gilt nach Gleichung (1) (Seite 57):

$$TF = f \{ WFP_i ; LSS_j \}$$

Zum in Abbildung 34 dargestellten Zeitpunkt sind $n=2$ Wirkflächenpaare und eine Leitstützstruktur an der Erfüllung dieser technischen Funktion beteiligt.

Aus Gleichung (1) folgt

$$\text{mit } i = \{ 1; 2 \} \quad \text{da } i = 1 \text{ bis } n \text{ und } n = 2$$

$$\text{und } j = \{ 1 \} \quad \text{da } j = 1 \text{ bis } m \text{ und } 0 \leq m \leq n - 1$$

$$TF = f \{ WFP_1 ; WFP_2 ; LSS_1 \}$$

wobei nach Gleichung (2) (Seite 57) für die im **dargestellten Zeitpunkt** beteiligten Wirkflächen gilt:

$$\{ WF_{11} ; WF_{12} \} \hat{=} WFP_1$$

Das WFP_1 wird aus der WF_{11} und der WF_{12} gebildet.

Die WF_{11} ist hier die kraftübertragende Zahnflanke von Zahnrad 1 und die WF_{12} die kraftübertragende Zahnflanke von Zahnrad 2

Das WFP₂ wird aus der WF_{1,3} des Zahnrades 2 und der WF_{1,4} der Passfeder gebildet.

$$\{WF_{1,3}; WF_{1,4}\} \hat{=} WFP_2$$

Dabei ist die WF_{1,3} die kraftübertragende Nutschulter im Zahnrad 2 und die WF_{1,4} die kraftübertragende Passfederschulter.

Die beiden Wirkflächenpaare werden durch die Leitstützstruktur LSS₁ verbunden.

Die LSS₁ bestimmt die relative Lage der Wirkflächenpaare WFP₁ und WFP₂ zueinander, indem sie Energie zwischen WFP₁ und WFP₂ leitet.

Analysiert man das System genauer, d.h. vergrößert man die Auflösung der Betrachtung, kann das Wirkflächenpaar zwischen Welle und Zahnrad bedeutend werden. Auch hier muss die Auflösung der Betrachtung problemspezifisch erfolgen. Bei der standardmäßigen Auslegung z.B. der Passfeder reicht die Betrachtung von WFP₁, LSS₁ und WFP₂ aus. Will man die Passfederverbindung als Ganzes phänomenologisch erforschen, muss auch das WFP₃ (Abbildung 34) in die Analyse einbezogen werden.

An dieser Stelle wird erneut deutlich, wie wichtig die richtige, das heißt die „problemspezifische“ Wahl der Betrachtungsauflösung ist!

Im Folgenden wird das WFP 3 zwischen Welle und Zahnrad 2 nicht weiter beachtet.

(Vergleiche hierzu Veränderung der Auflösung der Betrachtung S.71)

Nach dieser stationären Betrachtung wird das beschriebene System nun über einen längeren Zeitraum betrachtet.

4.1.2 Dynamische Betrachtung

Eine eindimensionale Bezeichnung der Wirkflächenpaare (WFP₁; WFP₂) ist bei einer dynamischen Betrachtung nicht mehr sinnvoll, da jetzt theoretisch 25*16 = 400 verschiedene Wirkflächenpaare an der Kraftübertragung im Zahnflankenkontakt beteiligt sein können. Daher wird im Folgenden eine Benennungskonvention eingeführt und für das hier vorliegende Beispiel formuliert.

Für das betrachtete System bei gegebener und nicht wechselnder Drehrichtung gilt:

WF_{a1} mit $a \hat{=} \{1,2, \dots, Z_1\}$

WF_{b2} mit $b \hat{=} \{1,2, \dots, Z_2\}$

WF_{c3} mit $c \hat{=} \{1,2\}$

WF_{d4} mit $d \hat{=} \{1,2\}$

mit:

Z_1 ... Zähnezahl Zahnrad 1 (hier $Z_1=16$)

Z_2 ... Zähnezahl Zahnrad 2 (hier $Z_2=25$)

WF_{a1} ... Wirkflächen des treibenden Zahnrades

WF_{b2} ... Wirkflächen des getriebenen Zahnrades

WF_{c3} ... Wirkfläche der kraftübertragenden Nutschulter im Zahnrad 2 bei konstanter Momentenwirkrichtung

WF_{d4} ... Wirkfläche der kraftübertragenden Passfederflanke bei konstanter Momentenwirkrichtung

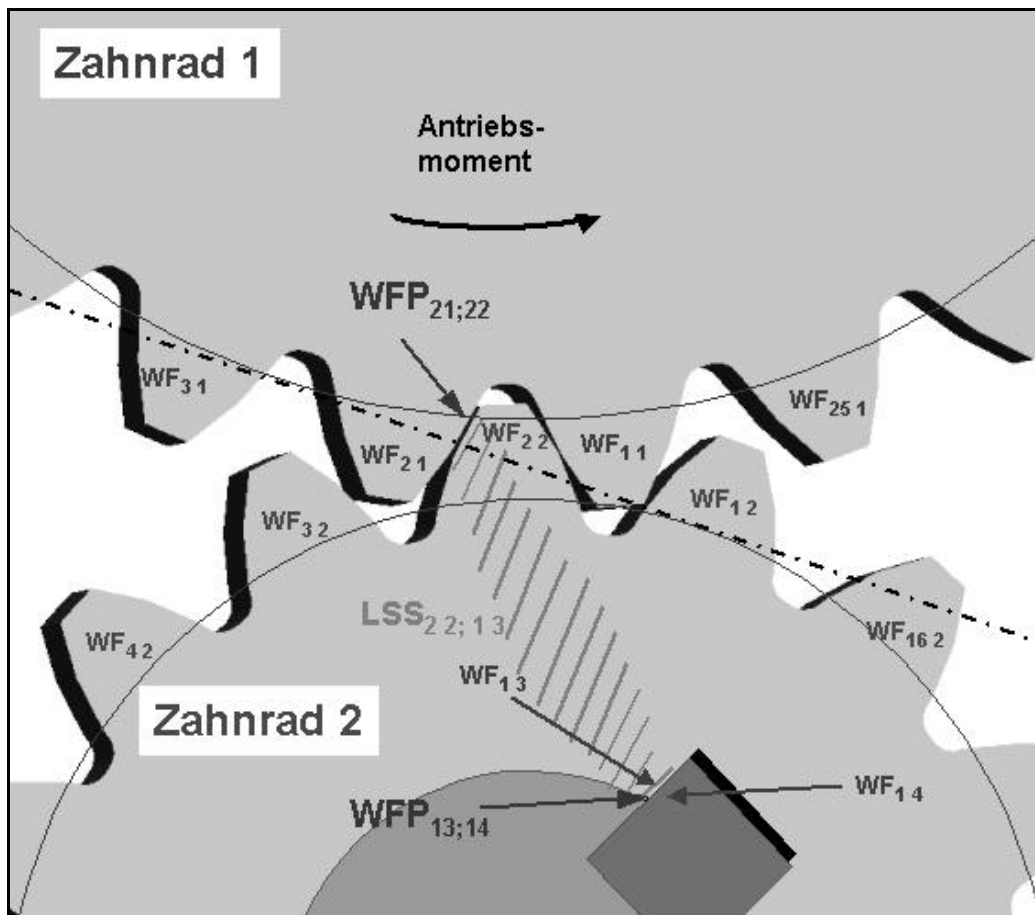


Abbildung 35 „Zahnradpaar mit Profilüberdeckung $\epsilon_\alpha=1,0$ nach oben eingeführter Benennung (vergleiche Abbildung 34)“

Auch bei dynamischer Betrachtung wird das Drehmoment in diesem Verzahnungsbeispiel mit einer Profilüberdeckung von 1,0 grundsätzlich über genau zwei Zahnflanken übertragen.

Auch hier gilt damit zu jedem Zeitpunkt für Gleichung (1):

$$TF = f \{ WFP_1 ; WFP_2 ; LSS_1 \}$$

Während der Drehung der Zahnräder ändern sich die Elemente des Wirkflächenpaares WFP_1 im Gegensatz zur rein stationären Betrachtung ständig. Die Elemente des WFP_2 hingegen bleiben zu jedem Zeitpunkt gleich

Nach Gleichung (2) gilt:

$$\{ WF_{k1} ; WF_{l2} \} \hat{=} WFP_i$$

dabei gilt für das Wirkflächenpaar im Zahnflankenkontakt:

$$k = 1 \text{ bis } s ; \text{ mit } s=16$$

$$l = 1 \text{ bis } t ; \text{ mit } t=25$$

und für das Wirkflächenpaar zwischen Zahnrad 2 und Passfeder:

$$k = 1 \text{ bis } s ; \text{ mit } s=1$$

$$l = 1 \text{ bis } t ; \text{ mit } t=1$$

Zum in Abbildung 35 dargestellten Zeitpunkt wird das WFP_1 aus der WF_{11} und der WF_{12} gebildet und wird zur eindeutigen Identifizierung mit $WFP_{11;12}$ bezeichnet.

Das WFP_2 wird aus der WF_{13} des Zahnrades 2 und der WF_{14} der Passfeder gebildet und soll als $WFP_{13;14}$ bezeichnet werden.

Je nachdem welche Wirkflächenpaare aktiv an der Funktionserfüllung beteiligt sind, werden unterschiedliche Leitstützstrukturen aktiv:

$$LSS_{b2;c3} \text{ mit } b \hat{=} \{1,2, \dots, 25\} \text{ und } c \hat{=} \{1,2\}$$

Zum dargestellten Zeitpunkt verbindet die Leitstützstruktur die WF_{12} und die WF_{13} und wird als $LSS_{12;13}$ bezeichnet.

Zahnrad 1 dreht sich in mathematisch positiver Richtung weiter und überträgt über den Funktionskontakt im $WFP_{11;12}$ die Drehbewegung auf das Zahnrad 2, welches in mathematisch negativer Drehrichtung rotiert. Der Funktionskontakt im WFP_1 wandert entlang der WF_{11} des Zahnrades 1 von innen nach außen und entlang der WF_{12} des Zahnrades 2 von außen nach innen über die Zahnflanken.

Während der Funktionskontakt entlang der aktiven Wirkfläche wandert, ändert sich die aktuelle Wirkung der Wirkflächen auf das Wirkflächenpaar, da sich die Geometrie der Wirkfläche in der direkten Umgebung des Funktionskontaktes ändert (siehe Gleichung 8 „Eigenschaften und Wechselwirkungen von Wirkflächen“ Seite 62).

Nach Gleichung 7 folgt aus dieser Veränderung auch eine Veränderung der Wirkung des Wirkflächenpaares auf das momentane Verhalten des technischen Systems.

Des Weiteren hat die zeitliche Veränderung der Wirkung der Wirkfläche auf das Wirkflächenpaar ihre Ursache in der veränderten Wirkung der Leitstützstruktur auf die Wirkfläche:

Die Wirkung der Leitstützstruktur ist abhängig von der Geometrie der Leitstützstruktur (Gleichung 10 Seite 64). Diese Geometrie ändert sich während des Zahneingriffes durch das Wandern des Funktionskontaktes entlang der Wirkfläche. Liegt der Funktionskontakt z.B. im Moment seines Zustandekommens ganz innen auf der WF_{12} des Zahnrades 1, verbindet die $LSS_{12;13}$ diese mit dem $WFP_{13;14}$ auf kürzerem Weg als am Ende des Zahneingriffes. Mit dieser Geometrieänderung der Leitstützstruktur ändert sich ihre Steifigkeit und nach Gleichung 10 ihre Wirkung auf die Wirkfläche. Damit ändert sich das Verhalten des technischen Systems.

Durch die Wahl der Evolvente als Wirkflächengeometrie ändern sich die Wirkungen der Leitstützstruktur auf das Wirkflächenpaar und die Wirkungen des Wirkflächenpaares auf das technische System derart, dass das übertragene Drehmoment konstant ist. Alle Funktionskontakte liegen auf der Eingriffslinie. Dies ist bei jeder anderen Flankenform nicht der Fall.

Der Funktionskontakt wandert auf der WF_{11} so lange nach außen bis die Wirkfläche/Zahnflanke endet; d.h. bis der Abstand des Funktionskontaktes vom Mittelpunkt des Zahnrades 1 gleich dem halben Kopfkreisdurchmesser ist. Gleichzeitig erreicht der Funktionskontakt auf der WF_{12} das Ende der Evolvente und damit der Wirkfläche. Das Wirkflächenpaar wird aufgelöst.

Alle Flächenanteile der Zahnflanke, die im bisher betrachteten Zeitintervall nie Funktionskontakt waren, sind Restfläche (vergleiche Kapitel 3.1 Definitionen).

Da, wie bereits mehrfach erwähnt, der Gesamtüberdeckungsgrad 1 beträgt, kommt es im Moment der Auflösung des Funktionskontaktes auf dem $WFP_{11;12}$ zu einem neuen Funktionskontakt im $WFP_{21;22}$. Damit wird das $WFP_{21;22}$ zum aktiven Wirkflächenpaar (siehe Abbildung 36)

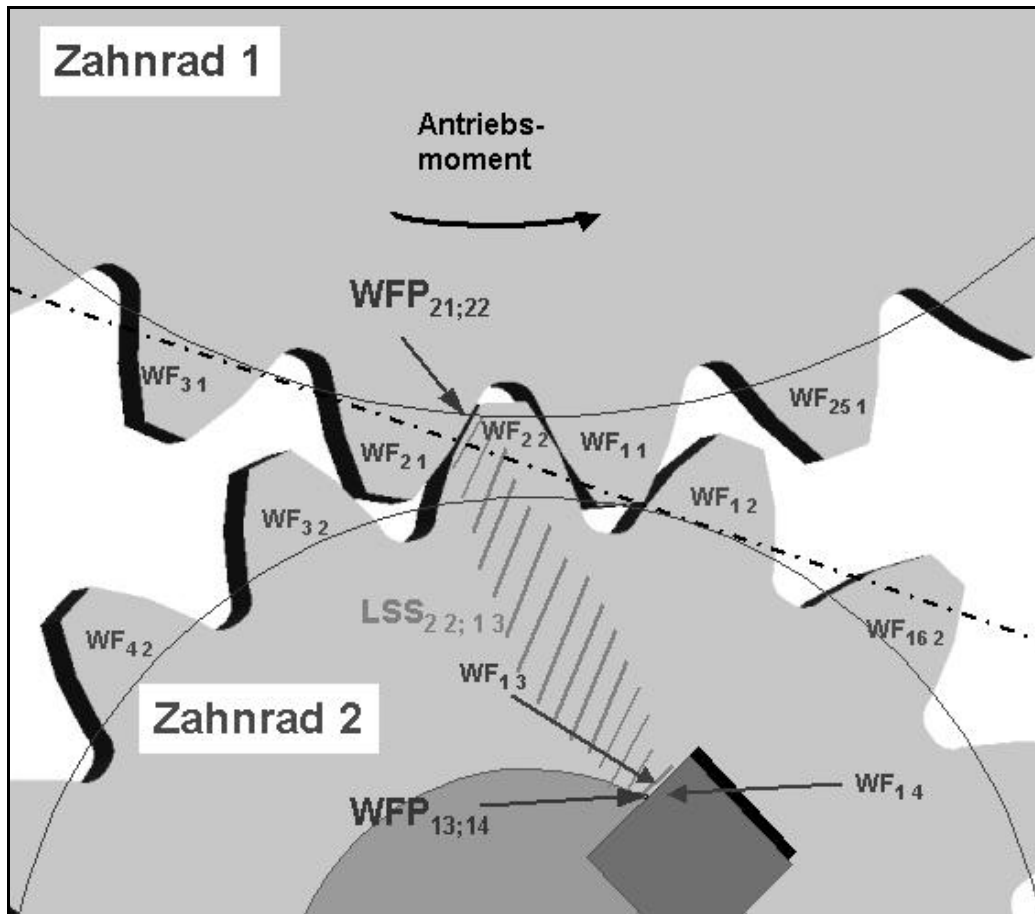


Abbildung 36 „weitergedrehtes Zahnradpaar mit Profilüberdeckung $\varepsilon_\alpha=1,0$ im Moment des Zustandekommens von $WFP_{21;22}$ “

Die Gleichung 7 (Seite 58) besagt, dass die Wirkung dieses Wirkflächenpaares auf das technische System einzig von den Wirkungen der im Funktionskontakt stehenden Wirkflächen abhängt.

Häufig wird eine derart genaue Betrachtung des Verhaltens eines technischen Systems nicht notwendig sein. Der Betrachter des Systems muss die „Auflösung seiner Betrachtung“ vielmehr problemspezifisch wählen. Er wird z.B. das Verhalten des technischen Systems „Zahnradpaarung“ über den Zeitraum der Kraftübertragung über das gleiche Wirkflächenpaar (Zahnflankenpaar) integrieren. Dadurch wird er ein für seinen Betrachtungsfall relevantes „Durchschnittsverhalten“ des technischen Systems erhalten.

Die Festlegung der „Auflösung der Betrachtung“ muss problemspezifisch erfolgen und erfordert Ingenieurskompetenz, deren Basis bereits innerhalb einer universitären Ausbildung aufgebaut werden muss.

4.1.2.1 Problemspezifische Vereinfachung

Es wird in diesem Beispiel angenommen, dass Geometrie und Stoff der jetzt in Eingriff stehenden Wirkflächen mit ausreichender Genauigkeit über dem

Eingriffszeitintervall gleich der Geometrie und dem Stoff der zuvor im $WFP_{11;12}$ in Kontakt stehenden Wirkflächen sind.²¹⁶

Außerdem soll angenommen werden, dass die Wirkung der die Wirkfläche stützenden Leitstützstruktur, unabhängig davon welches Zahnflankenpaar in Eingriff steht, **über** das Eingriffszeitintervall **gleich** sei. Das heißt die Veränderung der Steifigkeit des Zahns während der Dauer eines Zahneingriffes sei unabhängig davon welches Zahnpaar im Eingriff steht immer gleich.

Nach Gleichung 8 (Seite 62) ist die Wirkung der WF_{21} gleich der der WF_{11} und die Wirkung der WF_{22} gleich der Wirkung der WF_{12} . Damit ist die Wirkung des neu entstandenen Wirkflächenpaares $WFP_{21;22}$ gleich der Wirkung des soeben aufgelösten und damit nicht mehr existenten Wirkflächenpaares $WFP_{11;12}$. Das neu entstandene Wirkflächenpaar $WFP_{21;22}$ ist (wirkungs-) identisch mit $WFP_{11;12}$ und kann in diesem Beispiel dieselbe Bezeichnung wie $WFP_{11;12}$ erhalten z.B. WFP_1 .

Nacheinander werden hier immer wieder neue Wirkflächen Element des Wirkflächenpaares WFP_1 sein.

Nach einer vollständigen Umdrehung des Zahnrades 1 wird sich im WFP_1 ein Funktionskontakt zwischen WF_{11} und WF_{162} einstellen usw.

Außerdem soll, wie oben bereits gesagt, vorausgesetzt werden, dass für das vorliegende Beispiel mit ausreichender Genauigkeit angenommen werden kann, dass die **Wirkung** der Leitstützstrukturen auf das aktive Wirkflächenpaar **im Zeitintervall vom Zustandekommen des Funktionskontaktes bis zur Auflösung des Funktionskontaktes** bei jedem neuen Zahneingriff immer wieder gleich ist. Das heißt, es wird angenommen, dass sich die Geometrie der Leitstützstruktur und der Stoff der Leitstützstruktur über das betrachtete Zeitintervall immer wieder gleich verhalten. Dann folgt aus Gleichung 11 (Seite 66), dass auch die Wirkung der Leitstützstruktur gleich ist. Damit kann hier entsprechend der stationären Betrachtung jede Leitstützstruktur, die WFP_1 und WFP_2 verbindet, als LSS_1 bezeichnet werden.

Alle im Verlauf einer Umdrehung eines Zahnrades entstehenden Leitstützstrukturen ergeben zusammen die Tragstruktur des Zahnrades. Alle anderen Volumenelemente sind Teil der Reststruktur (siehe auch Kap. 3.1 Definitionen). Sie können entfernt werden ohne dass eine Veränderung der Funktion des Zahnrades im Zusammen-

²¹⁶ Auch diese Annahme muss „problemspezifisch“ erfolgen. Es kann durchaus sinnvoll sein die betrachteten Wirkflächen als nicht gleich zu betrachten. Ein mögliches Beispiel wäre die Dimensionierung von Zahnrädern in der Welt der Mikromechanik, deren Fertigungstoleranzen bei bestimmten Fertigungsverfahren im Prozentbereich der geometrischen Abmessungen des Zahnrades selbst liegen können.

spiel mit dem anderen Zahnrad stattfindet.²¹⁷ Die Reststruktur ist funktionslos und nimmt nicht an der Leitung von Energie, Stoff und Information teil. Oft wird sie aus Gründen, die die Funktion nicht beeinflussen, z.B. Fertigungsgründen, nicht entfernt.

4.1.3 Fazit zur Analyse eines Zahnradpaares mit Profilüberdeckung gleich 1,0

- Die Wirkung eines Wirkflächenpaares auf das technische System kann bei dynamischer Betrachtung über den Zeitraum der Existenz des Wirkflächenpaares veränderlich sein! Dies hat seine Ursache in einer Eigenschaftsänderung der Wirkflächen und/oder einer Eigenschaftsänderung der Leitstützstruktur.
- Bei der Analyse technischer Systeme muss die Auflösung der Betrachtung problemspezifisch gewählt werden.
- Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ ist unabhängig vom Genauigkeitsgrad der Betrachtung auf gleiche Art und Weise anwendbar.

Im Folgenden wird ein Zahnradpaar analysiert, dessen Profilüberdeckung größer 1 ist.

4.2 Analyse eines Zahnradpaares mit Profilüberdeckung größer 1,0

Das in Abbildung 34 (Seite 105) dargestellte Zahnradpaar wird in seinem Achsabstand verringert. Es kommt zu einer Profilverschiebung, die zu einer veränderten Zahnradgeometrie und eine veränderten Profilüberdeckung führt.

Die Zahnräder werden jetzt durch folgende Größen beschrieben:

Zähnezahl Rad 1: 16 Zähne

Zähnezahl Rad 2: 25 Zähne

Profilüberdeckung: 1,37

Sprungüberdeckung: 0

→ Gesamtüberdeckung: 1,37

Evolventeneingriffswinkel: 20°

Die Abbildung 37 zeigt dieses Zahnradpaar.

²¹⁷ Es ändert sich allerdings die Masse des Körpers. Falls die kinetische Energie des Körpers für die Funktion eine Rolle spielt (dies muss vom analysierenden Ingenieur entschieden werden!), ist der gesamte Körper Leitstützstruktur, Reststrukturen gibt es dann nicht mehr (vergleiche auch Ende Kapitel: 3.7.4 Abgeleitete Grundsätze für die Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen).

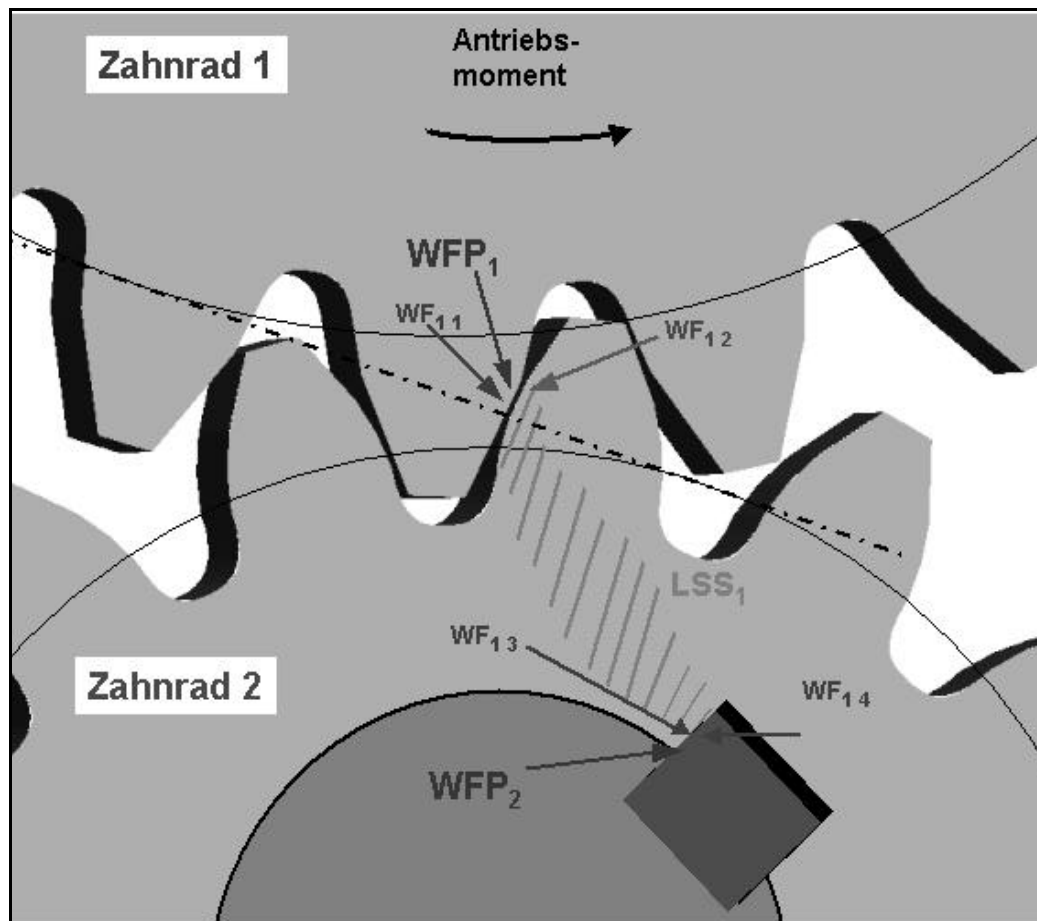


Abbildung 37 „Zahnradpaar mit Profilüberdeckung >1,0“

4.2.1 Quasi stationäre Betrachtung

Betrachtet man das gegebene System stationär für den in Abbildung 38 dargestellten Zeitpunkt²¹⁸ wird die technische Funktion „Übertragen der von Zahnrad 1 eingeleiteten Kraft auf die Passfeder (Welle)“ gleichzeitig über 2 Zahnflankenpaare erfüllt.

²¹⁸ Vergleiche Kap 4.1.1 Betrachtung des quasi stationären Zustandes in der Analyse eines Zahnradpaares mit Profilüberdeckung gleich 1,0

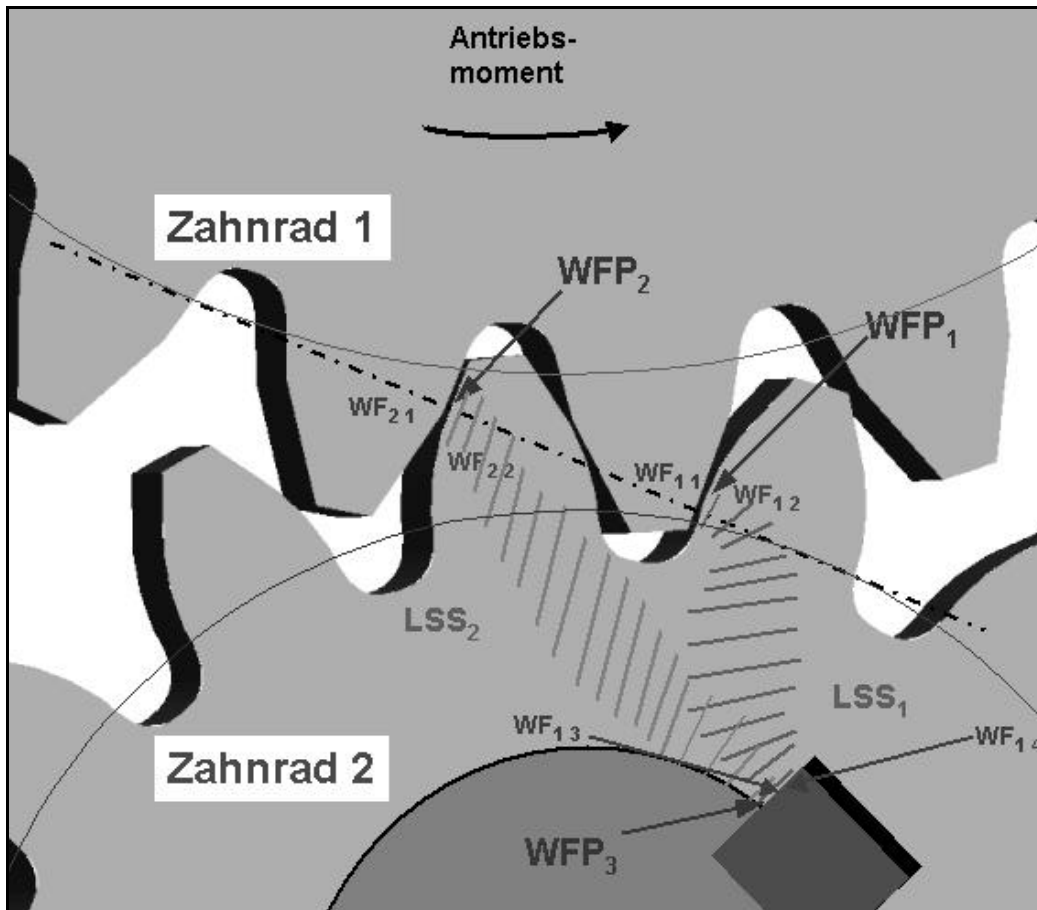


Abbildung 38 „Zahnradpaar mit Profilüberdeckung $\epsilon_\alpha > 1,0$ mit 2 Zähnen im Eingriff“

Es gilt nach Gleichung (1) für die Funktionserfüllung:

$$TF = f \{ WFP_i ; LSS_j \}$$

Es sind $n=3$ Wirkflächenpaare und zwei Leitstützstrukturen an der Erfüllung der technischen Funktion beteiligt.

Aus Gleichung (1) folgt

mit $i = \{ 1; 2; 3 \}$ da $i = 1$ bis n und $n = 3$

und $j = \{ 1; 2 \}$ da $j = 1$ bis m und $0 \leq m \leq n-1$

$$TF = f \{ WFP_1 ; WFP_2 ; WFP_3 ; LSS_1 ; LSS_2 \}$$

wobei jetzt nach Gleichung (2) für die im **dargestellten Moment** beteiligten Wirkflächen gilt:

$$\{ WF_{11} ; WF_{12} \} \hat{=} WFP_1$$

$$\{ WF_{21} ; WF_{22} \} \hat{=} WFP_2$$

$$\{ WF_{13} ; WF_{14} \} \hat{=} WFP_3$$

Das WFP₁ wird über die LSS₁ mit dem WFP₃ und das WFP₂ wird über die LSS₂ mit dem WFP₃ verbunden.

Im Unterschied zum oben beschriebenen Beispiel (4.1 Analyse eines Zahnradpaares mit Profilüberdeckung gleich 1,0) wird in diesem System, je nachdem zu welchem Zeitpunkt das System analysiert wird, die Funktion über unterschiedlich viele Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen realisiert.

Bei einer dynamischen Betrachtung dieses Systems wird die oben eingeführte Benennungskonvention bedeutend.

4.2.2 Dynamische Betrachtung

Für das betrachtete System bei gegebener und nicht wechselnder Drehrichtung gilt hier analog zum Zahnradpaar mit Profilüberdeckung=1:

WF_{a1} mit $a \hat{=} \{1,2, \dots, Z_1\}$

WF_{b2} mit $b \hat{=} \{1,2, \dots, Z_2\}$

WF_{c3} mit $c \hat{=} \{1,2\}$

WF_{d4} mit $d \hat{=} \{1,2\}$

mit:

Z_1 ... Zähnezahl Zahnrad 1 (hier $Z_1=16$)

Z_2 ... Zähnezahl Zahnrad 2 (hier $Z_2=25$)

WF_{a1} ... Wirkflächen des treibenden Zahnrades

WF_{b2} ... Wirkflächen des getriebenen Zahnrades

WF_{c3} ... Wirkfläche der kraftübertragenden Nutschulter im Zahnrad 2 bei konstanter Momentenwirkrichtung

WF_{d4} ... Wirkfläche der kraftübertragenden Passfederflanke bei konstanter Momentenwirkrichtung

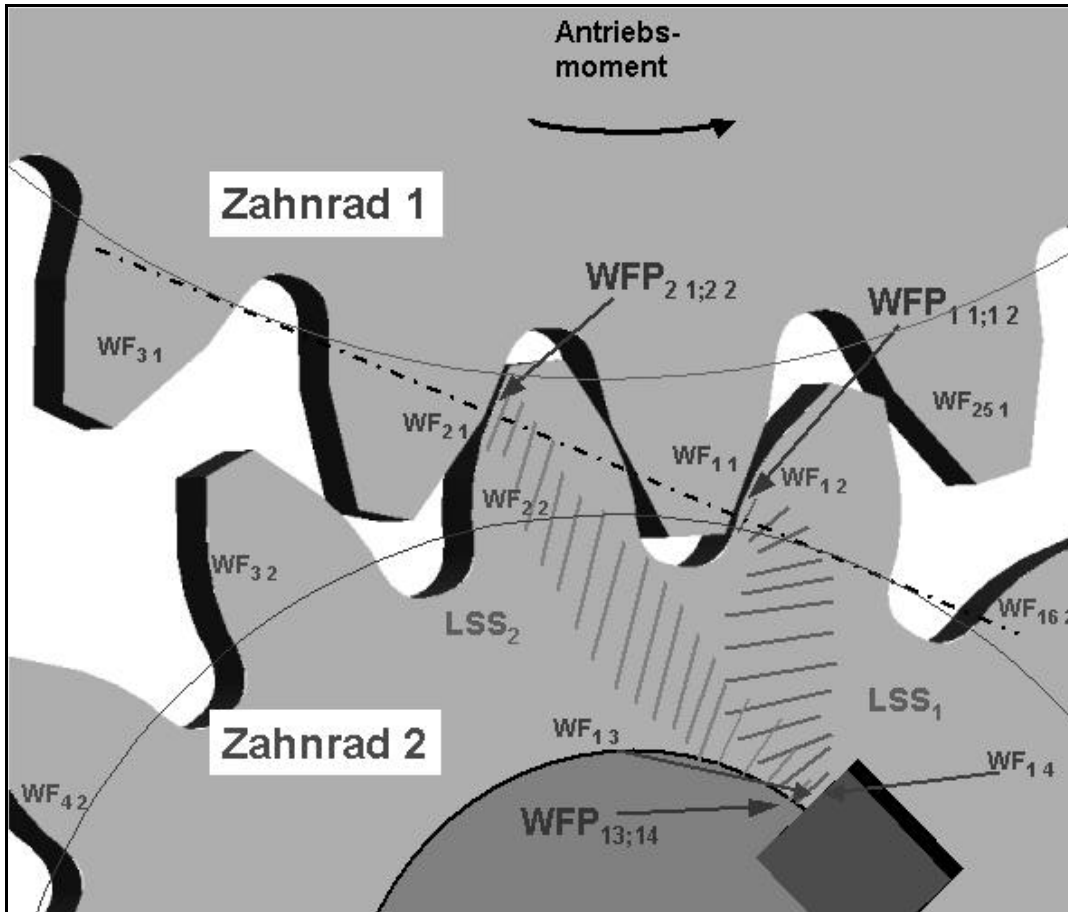


Abbildung 39 „Zahnradpaar mit Profilüberdeckung $\epsilon_\alpha > 1,0$ mit 2 Zähnen im Eingriff nach oben eingeführter Benennung“

In diesem Beispiel wird das Drehmoment, wie oben beschrieben, entweder über ein oder zwei Funktionskontakte auf den Zahnflanken der Zahnräder übertragen.

Zur Analyse des technischen Systems während einer vollständigen Umdrehung des Zahnrades 2, wird das Zeitintervall der vollständigen Umdrehung in einzelne Intervalle unterteilt. Kommt es zur Bildung oder Auflösung eines Wirkflächenpaares wird ein neues Zeitintervall begonnen.

Die folgende Betrachtung beginnt mit Zeitintervall 1 in dem WF_{31} und WF_{32} in Kontakt treten:

Zeitintervall ZI 1:

Im $WFP_{31;32}$ trifft die WF_{31} auf die WF_{32} . Es bildet sich ein Funktionskontakt. Das $WFP_{31;32}$ wird durch die $LSS_{32;13}$ mit dem $WFP_{13;14}$ (Passfederschulter / Nabenflanke) verbunden. Die $LSS_{32;13}$ definiert durch die Verbindung die geometrische Lage der WF_{31} und der WF_{32} .

Außerdem bilden die WF_{21} und WF_{22} einen Funktionskontakt im $WFP_{21;22}$. Das $WFP_{21;22}$ wird ebenfalls mit dem $WFP_{13;14}$ verbunden. Diese Aufgabe übernimmt die $LSS_{22;13}$.

$WFP_{3\ 1;3\ 2}$ wird zu $WFP_{2\ 1;2\ 2}$ parallelgeschaltet!

Die beiden Leitstützstrukturen ($LSS_{3\ 2;1\ 3}$ und $LSS_{2\ 2;1\ 3}$) beeinflussen sich dabei gegenseitig! Dies besagt auch Gleichung 10 (Seite 64) nach der die Wirkung der Leitstützstruktur auf die Tragstruktur unter anderem von der Wechselwirkung benachbarter Leitstützstrukturen im selben Körper abhängt (siehe Abbildung 19).

Die Zahnräder drehen sich weiter und die Zahnflanken (und damit die $WFP_{3\ 1;3\ 2}$ und $WFP_{2\ 1;2}$) bewegen sich mit der Drehrichtung der Zahnräder im Zeitintervall ZI1 nach rechts weiter bis es zur Auflösung eines Funktionskontaktes kommt.

Die in Kapitel 4.1.2 „Dynamische Betrachtung“ im Kapitel „Analyse eines Zahnradpaares mit Profilüberdeckung gleich 1,0“ gemachten Aussagen treffen bei dieser Analyse ebenfalls zu. Zusätzlich beeinflussen sich die beiden Leitstützstrukturen gegenseitig.

Im Zeitintervall ZI1 ändern sich sowohl die Eigenschaften der Wirkfläche als auch die der Leitstützstrukturen.

Zeitintervall ZI 2:

Der Funktionskontakt zwischen $WF_{2\ 1}$ und $WF_{2\ 2}$ wird aufgelöst. Das $WFP_{2\ 1;2\ 2}$ besteht nicht mehr. Gleichzeitig besteht damit auch die $LSS_{2\ 2;1\ 3}$ nicht mehr. Alle Wechselwirkungen, die in ZI 1 zwischen $LSS_{2\ 2;1\ 3}$ und $LSS_{3\ 2;1\ 3}$ auftraten, existieren damit zu diesem Zeitpunkt nicht mehr.

Die technische Funktion wird im Zeitintervall ZI 2 nur noch über das Wirkflächenpaar $WFP_{3\ 1;3\ 2}$ zwischen den Zahnflanken, über das Wirkflächenpaar $WFP_{3\ 2;1\ 3}$ zwischen Zahnradnutschulter und Passfeder und der sie verbindenden Leitstützstruktur $LSS_{3\ 2;1\ 3}$ realisiert.

Zeitintervall ZI 3:

Die $WF_{4\ 1}$ und die $WF_{4\ 2}$ treffen am gleichen Ort zusammen wie zuvor im Zeitintervall ZI 1 die $WF_{3\ 1}$ und die $WF_{3\ 2}$. Sie bilden nun gemeinsam das $WFP_{4\ 1;4\ 2}$. Es entsteht eine neue $LSS_{4\ 2;1\ 3}$, die die Wirkflächenpaare $WFP_{4\ 1;4\ 2}$ und $WFP_{1\ 3;1\ 4}$ miteinander verbindet.

Das $WFP_{3\ 1;3\ 2}$ bleibt bestehen und wird über die $LSS_{3\ 2;1\ 3}$ mit dem $WFP_{1\ 3;1\ 4}$ verbinden.

Zeitintervall ZI 4:

Wie in ZI 2 wird die Funktion in diesem Zeitintervall über zwei Wirkflächenpaare und eine Leitstützstruktur erfüllt.

Zeitintervall ZI 5:

Wie in ZI 3 wird die Funktion in diesem Zeitintervall über drei Wirkflächenpaare und zwei Leitstützstrukturen erfüllt.

Zeitintervall ZI 6:

...

...

Zeitintervall ZI 16:

Die zum Zeitintervall ZI 1: in Kontakt stehende $WF_{3,2}$ des getriebenen Zahnrades 2 läuft nun erneut in die Kontaktzone hinein und trifft auf die $WF_{18,1}$ des oberen Zahnrades. Das $WFP_{3,2;18,1}$ entsteht.

4.2.2.1 Problemspezifische Vereinfachung

Können folgende Vereinfachungen gemacht werden,

- Die Geometrie und der Stoff der im Zeitintervall ZI 3 in Eingriff stehenden Wirkflächen seien mit ausreichender Genauigkeit über diesem Zeitintervall gleich derer im Zeitintervall ZI 1 in Eingriff stehenden Wirkflächen.
- Die Wirkungen der die Wirkflächen stützenden Leitstützstrukturen seien über dem Zeitintervall ZI 3 gleich denen im Zeitintervall ZI 1.

dann folgt daraus nach Grundhypothese II, dass die technische Funktion im Zeitintervall ZI 1 und ZI 3 auf gleiche Art und Weise erfüllt wird.

Sind die oben gemachten Annahmen auf jedes ungerade bezifferte Zeitintervall übertragbar, kann die oben gemachte Schlussfolgerung auch auf jedes dieser Zeitintervalle übertragen werden.

Eine problemspezifische Vereinfachung kann trivialerweise nach gleicher Art und Weise auch für die gerade bezifferten Zeitintervalle vorgenommen werden.

Daraus folgt, dass das technische System sich je nachdem, ob drei Wirkflächenpaare (ungerade bezifferte Zeitintervalle) oder ob zwei Wirkflächenpaare (gerade bezifferte Zeitintervalle) an der Funktionserfüllung beteiligt sind, unterschiedlich verhält. Aufgrund dieses unterschiedlichen Verhalten entstehen z.B. Schwingungen im technischen System.

4.2.3 Fazit zur Analyse eines Zahnradpaares mit Profilüberdeckung größer 1,0

Leitstützstrukturen im selben Körper können sich in ihrer Wirkung gegenseitig beeinflussen (siehe Abbildung 19 und Gl. 10).

5 Synthese im Konstruktionsprozess mit dem Elementmodell

5.1 Einleitung

Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, mit der es möglich ist, von erwünschten Funktionen eines Maschinensystems auf Gemeinsamkeiten dessen möglicher Gestalten zu schließen.

Die Methode eignet sich vor allem für die Gestaltung technischer Systeme, die auf mechanischen oder fluidmechanischen Wirkprinzipien beruhen.

Im Analysekapitel (Kap. 4) wird beschrieben, wie aus der Gestalt und den Eigenschaften des Wirkflächenpaares in Kombination mit denen der Leitstützstruktur die Funktion des Maschinensystems erschlossen werden kann.

Grundlage dieses Kapitels ist nun die Frage: „Ist es möglich von der erwünschten Funktion auf die Gestalt zu schließen?“

Ganz sicher wird es nicht möglich sein über die zu erfüllende Funktion auf eine eindeutige Gestalt der einzelnen Bauteile im System zu schließen. Die gleiche Funktion kann auf verschiedenste Art und Weise erfüllt werden. Zum Beispiel bietet sich zur Erfüllung der Funktion „Drehmoment wandeln“ neben einem mechanischen Funktionsprinzip (z.B. Zahnradpaar) gleichermaßen ein hydraulisches Funktionsprinzip (z.B. Föttingerwandler) an. Natürlich wird sich die Gestalt der auf diesen grundverschiedenen Funktionsprinzipien beruhenden, technischen Systemen auch unterscheiden.

Nicht nur die Wahl des Funktionsprinzips, sondern auch die Ausprägung des auf dem Funktionsprinzip beruhenden Maschinensystems beeinflusst die Gestalt entscheidend. So kann das auf einem mechanischen Funktionsprinzip beruhende Maschinensystem zur Erfüllung der Funktion „Drehmoment wandeln“ durch Anzahl der Übersetzungen (z.B. mehrere Getriebestufen), grundsätzliche Art des Getriebes (Planetengetriebe, Stirnradgetriebe, Winkelgetriebe,...), Anordnung der Einzelkomponenten zueinander (z.B. fliegende Lagerung der Zahnräder, zwischen den Lagern angeordnetes Zahnrad) und viele weitere Einflüsse bis hin zu Einflüssen, die aus den Erfahrungen des Konstrukteurs resultieren, von völlig verschiedener Gestalt sein.

Der Funktion kann also nicht eindeutig eine mögliche Gestalt zugeordnet werden. Dennoch lassen sich Zusammenhänge zwischen Funktion und Gestalt im

funktionserfüllenden Bereich des Maschinensystems, dem Wirkflächenpaar, erkennen.

Das folgende Kapitel zeigt anhand eines konkreten konstruktiven Problems, wie man diesen Zusammenhang in der Konstruktion nutzen kann. Dazu wird eine grundsätzliche Vorgehensweise in Form einer Methode vorgeschlagen.

5.2 Grundsätze

5.2.1 Orthogonale Parallelprojektionen

Jede Fläche im dreidimensionalen Raum und damit auch jede Wirkfläche in technischen Bauteilen lässt sich mit der orthogonalen Parallelprojektion höchstens auf 3 orthogonal zueinander stehende Bildebenen projizieren. Ist eine Fläche auf eine Bildebene projizierbar, ist die Abbildung wiederum eine Fläche.²¹⁹

Die Abbildung auf einer Bildebene stellt dabei die zu dieser Ebene parallelen Anteile der Richtungsvektoren der Fläche dar. Orthogonale Anteile der Richtungsvektoren der projizierenden Flächen werden nicht abgebildet.

Die Abbildung ist also das projizierte Bild und stellt damit die zur Bildebene parallelen „Anteile“ der projizierenden Fläche dar.

Die Umkehrung der orthogonalen Parallelprojektion ist nicht eindeutig. Aus den 3 Abbildungen lässt sich nicht eindeutig auf die projizierende Fläche schließen.

Dennoch können aus bekannten Abbildungen einer Fläche auf Bildebenen wesentliche Gestaltmerkmale dieser Fläche abgeleitet werden.

Eine mit Hilfe der orthogonalen Parallelprojektion projizierte Fläche stellt die zu der Grundebene parallelen Anteile der projizierenden Fläche dar.

²¹⁹ Die Abbildung einer Ebene, also einer ebenen Fläche, auf eine Bildebene mit Hilfe der orthogonalen Parallelprojektion kann mathematisch gesehen auch eine Linie sein. In diesem Fall soll in der hier vorliegenden Betrachtung genauso vorgegangen werden, als hätte die Ebene keine Abbildung auf dieser Bildebene.

5.2.2 Kraftflussregel

Kräfte können im Funktionskontakt entweder *normal zum Wirkflächenpaar* oder im Funktionskontakt *parallel zwischen Wirkflächenpaaren* über *Reibkräfte* übertragen werden.²²⁰

Jede andere Krafrichtung ergibt sich aus einer vektoriellen Addition dieser beiden Komponenten.

5.3 Konstruieren mit Hilfe des Elementmodells

In der VDI 2221²²¹ wird der gestaltende Teil der Entwicklung und Konstruktion als 5. und 6. Schritt nach dem „Klären und präzisieren der Aufgabenstellung“, dem „Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen“, der „Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen“ und der „Gliederung in realisierbare Module“ angeordnet (siehe Abbildung 40, vgl. auch Kap. 2.2).

Das Elementarmodell kann beim Konstruieren vor allem in der Phase III (siehe Abbildung 40) hilfreich sein.

Das Gestalten ist der Schwerpunkt des Entwerfens. Gestalten wird dabei als das Festlegen der Gestalt- und Werkstoffeigenschaften von Gestaltungselementen verstanden, die je nach Komplexität der Aufgabenstellung von Einzelflächen bis hin zu Maschinen und Anlagen reichen können.²²²

Beim Gestalten der maßgebenden Module oder beim Gestalten des gesamten Produkts legt der Konstrukteur zunächst Wirkflächenpaare und dann die sie verbindenden Leitstützstrukturen konstruktiv fest.

„Der Gestaltungsprozess kann allgemeingültig nur als übergeordnete Strategie beschrieben werden. Im Detail, d.h. in der operativen Durchführung, unterscheidet sich das Vorgehen beim Gestalten stark.“²²³ In diesem Sinne soll das Folgende verstanden werden.

²²⁰ Intermolekulare Kräfte wie z.B. die Adhäsion, also das Aufeinanderhaften von Körpern aus verschiedenen Stoffen, nehmen eine Sonderstellung ein. Sie können sowohl Zug- und Druckkräfte im Funktionskontakt normal zum Wirkflächenpaar als auch im Funktionskontakt parallel zwischen den Wirkflächenpaaren übertragen. Intermolekulare Kräfte spielen im klassischen Maschinenbau eher eine untergeordnete Rolle.

²²¹ VDI 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren Technischer Systeme und Produkte“; S.9; Bild 3.3

²²² VDI 2223 S.4

²²³ VDI 2223 S.8

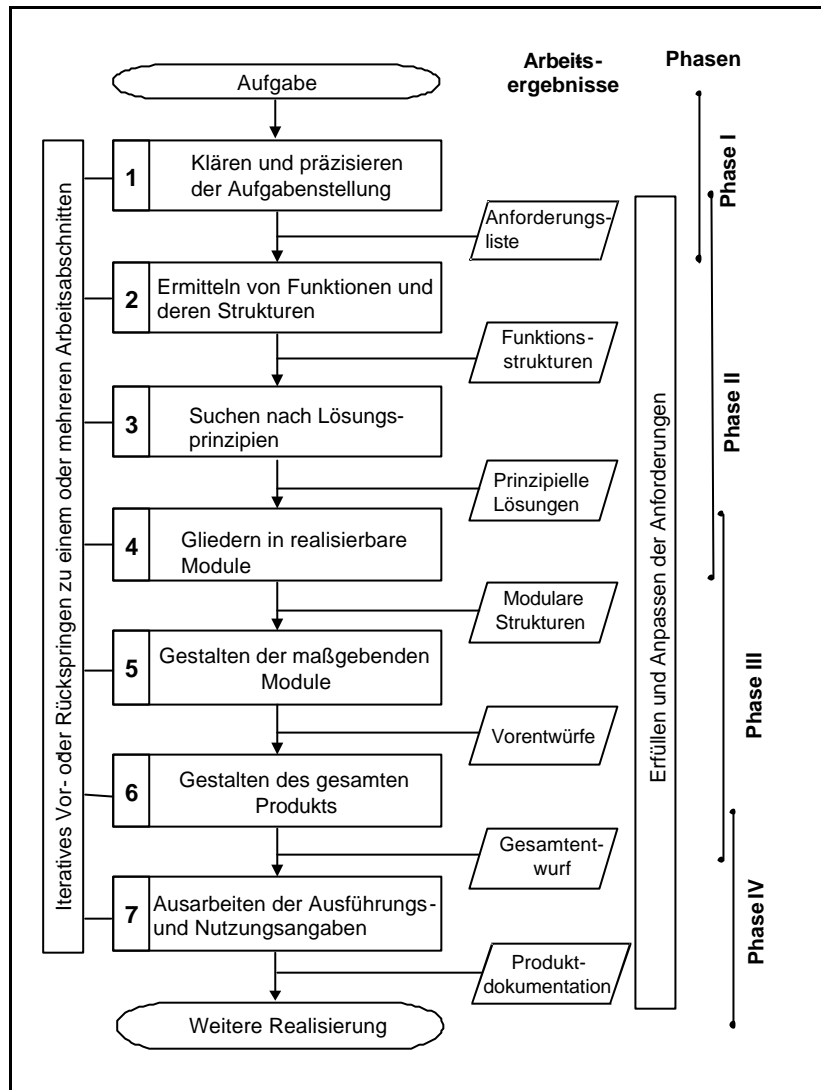


Abbildung 40 "Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren"²²⁴

5.3.1 Vorgehen

Das unten beschriebene Vorgehen ordnet sich in die Arbeitsabschnitte 4 bis 5.3 des generellen Vorgehens beim Gestalten der VDI 2223 ein (siehe Abbildung 40).

Die Umkehrung der in Kap. 5.2 beschriebenen orthogonalen Parallelprojektion wird mit der Kraftflussregel verknüpft und im Folgenden dazu verwendet, aus funktionalen Anforderungen an ein technisches System auf notwendige orthogonale und parallele Anteile der Wirkfläche zu schließen. Nachdem die orthogonalen und parallelen Anteile bekannt sind, wird daraus die Gestalt der Wirkfläche abgeleitet.

²²⁴ VDI 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ S.9 (entspricht auch Abbildung 10 in dieser Arbeit)

Dazu wird die zu gestaltende Wirkfläche nun zunächst stark abstrakt als Fläche ohne geometrische Erstreckung, unabhängig von der endgültigen Gestalt oder Ausprägung, betrachtet.

Um das Denken in abstrakten Wirkflächen zu erleichtern und den Denkvorgang zu visualisieren, sollen die 6 Seiten eines Würfels die möglichen Lagen von Projektionsebenen im Raum symbolisieren. Der als Hilfsmittel eingesetzte Würfel wird im Folgenden als „Projektionswürfel“ bezeichnet.

Um ein Wirkflächenpaar zu symbolisieren, werden zwei Projektionswürfel verwendet. Jeweils mindestens eine Würfelseite steht mit einer Seite des anderen Würfels in Kontakt. Die beiden in Kontakt stehenden Würfelseiten stellen symbolisch eine Möglichkeit dar, Elementarfunktionen zu realisieren.

Anhand dieser symbolischen Darstellung können alle möglichen Abbildungen einer orthogonalen Parallelprojektion des funktionserfüllenden Wirkflächenpaares gefunden werden.

Nach der Betrachtung der die Elementarfunktionen erfüllenden Wirkflächenpaare werden die Projektionswürfel zu einer symbolischen Darstellung des Maschinensystems zusammengefügt. Dabei kommt es zwischen den Projektionswürfeln zu Interaktionen, die die möglichen Lagen der Wirkflächenabbildungen auf den Projektionswürfel beeinflussen.

Nachdem alle Eigenschaften der Projektionswürfel im System diskutiert und festgelegt sind, wird aus den Eigenschaften der Projektionswürfel auf die Gestalt der Wirkflächenpaare der „realen“ Bauteile geschlossen.

Der Gestaltungsprozess ist ein hoch komplexer Prozess. Die hier vorgeschlagene Vorgehensweise beinhaltet mehrer Schritte, die auf Erfahrungen beruhen. Dieses „scheinbar selbstverständliche Vorgehen“ ist im Folgenden durch *kursive Schrift* gekennzeichnet.

Im Folgenden Beispiel wird diese Vorgehensweise näher erläutert.

5.3.1.1 Beispiel eines konstruktiven Problems

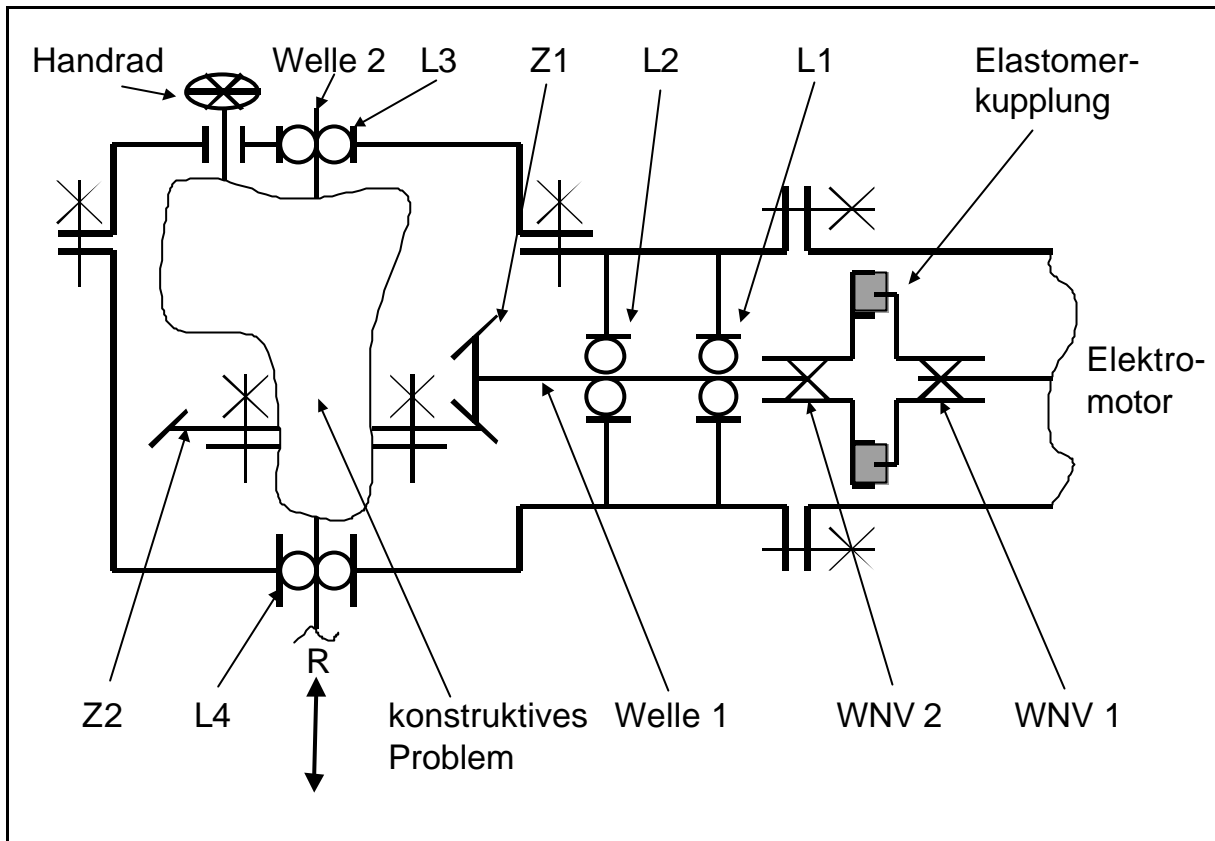


Abbildung 41 „prinzipielle Darstellung des konstruktiven Problems“

Abbildung 41 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Rührmaschine, wie sie z.B. in Großbäckereien zum Einsatz kommt.

Der Antrieb erfolgt über einen seitlich angeflanschten Elektromotor. Das Drehmoment des Motors wird über eine Elastomerkupplung auf die Ritzelwelle (Welle 1) geleitet. Die Welle wird durch die Lagerung L1/L2 gelagert. Das Zahnrad 1 (Z1) der Ritzelwelle kämmt mit dem Tellerrad (Z2).

Der Rührer (R) wird durch die Welle 2 über eine leicht trennbare Wellennabe-Verbindung angetrieben.

Die Höhe des Rührers soll sich während des Betriebes mit Hilfe eines Handrades um 150mm in der Höhe verstellen lassen.

Bis auf den in der oberen Abbildung abgedeckten Teil ist der prinzipielle Aufbau der Maschine bereits festgelegt. Der abgedeckte Bereich stellt damit ein noch zu lösendes konstruktives Problem dar.

Um die einzelnen Funktionen, die die Welle 2 erfüllen muss, darzustellen und hierarchisch zu ordnen, bietet sich das Aufstellen einer Funktionsstruktur für die Welle 2 an.

Hauptfunktion	HF1 Leiten des Drehmomentes von Tellerrad 2 auf Rührer	HF2 Welle 2 axial verstellen		Systemebene
Nebenfunktion			NF3 auftretende Kräfte eindeutig ins Gehäuse weiterleiten	
Elementarfunktion	EF4 Aufnahme des Drehmomentes von Tellerrad Z2	EF7 Axialkraft von Höhenverstellung auf Welle 2 übertragen	EF8 Radialkraft über Lagerung aufnehmen/ abgeben	Bauteilebene
	EF5 Abgabe des Drehmomentes in WNV des Rührers		EF9 Axialkraft nicht über Lagerung aufnehmen	
	EF6 Rotation ermöglichen			

Abbildung 42 „Funktionsstruktur für Welle 2“

Die von Welle 2 zu realisierenden Funktionen sind damit geklärt.

Oft lassen sich Elementarfunktionen an ein und dem selben Funktionsträger realisieren. In diesem Beispiel könnten dies die Elementarfunktionen EF6, EF8 und EF9 sein. Erfahrungen des Konstrukteurs mit ähnlichen Konstruktionen helfen hierbei.

Im Folgenden wird gezeigt, wie mit Hilfe des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ auf die Gestalt der Wirkflächenpaare der Welle 2 geschlossen werden kann. Die Vorgehensweise orientiert sich an in Kap. 5.3.1 geschilderten Vorgehen.

Elementarfunktion EF4

Zunächst soll die Elementarfunktion EF 4 „Aufnahme des Drehmomentes von Welle 2“ gestalterisch umgesetzt werden. Es wird entschieden, dass das Funktionsprinzip zur Erfüllung der EF 4 ein mechanisches Funktionsprinzip sein soll.

Daraus folgt, dass die Funktionserfüllung der Elementarfunktion über ein Wirkflächenpaar mit festen Wirkflächen erfolgen wird.²²⁵ Als nächstes wird entschieden, ob die kraftübertragende Schlussart kraft-, stoff-, oder formschlüssig sein soll. Für die EF 4 sei die Schlussart formschlüssig.

Mit Festlegung der Lage der Mittellinie von Welle 2 beginnt die Gestaltung der Welle 2. Mögliche Lagen der Projektionen von Wirkflächen werden durch zwei Projektionswürfel im Raum symbolisiert. Die Würfel werden derart ausgerichtet, dass eine Kante des Würfels parallel zur Mittellinie liegt (siehe Abb.: Abbildung 43). Der linke Projektionswürfel symbolisiert mögliche Abbildungsebenen der Wirkfläche von Welle 2. Er ist fest mit der Welle 2 (W2) verbunden. Der rechte Würfel symbolisiert mögliche Abbildungsebenen der paarbildenden Wirkfläche des Zahnrades (Z2) mit der Wirkfläche der Welle 2 (W2). Aufgrund der Entscheidung eine formschlüssige Verbindung zwischen den Wirkflächen der Welle 2 und des Zahnrades Z2 zu realisieren, müssen die paarbildenden Wirkflächen nach der Kraftflussregel (siehe Kap. 5.2.2) parallel zueinander ausgerichtet sein. Die möglichen Projektionsebenen der Wirkflächen sind in der Darstellung schraffiert dargestellt. Abbildung 43 zeigt eine mögliche Ausrichtung der Projektionsebenen der Wirkflächen zueinander. Bei der dargestellten Anordnung der Projektionswürfel zueinander gibt es die beiden Möglichkeiten M1 und M2 den rechten Würfel mit dem Zahnrad 2 zu verbinden.

²²⁵ Mit der vorgestellten Methode ist es prinzipiell genauso möglich Wirkflächenpaare für ein hydraulisches Funktionsprinzip zu gestalten. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass ein Fluid seine Gestalt, aufgrund seines nicht festen Stoffzusammenhaltes, am mit dem Fluid in Kontakt stehenden Körper frei bilden kann.

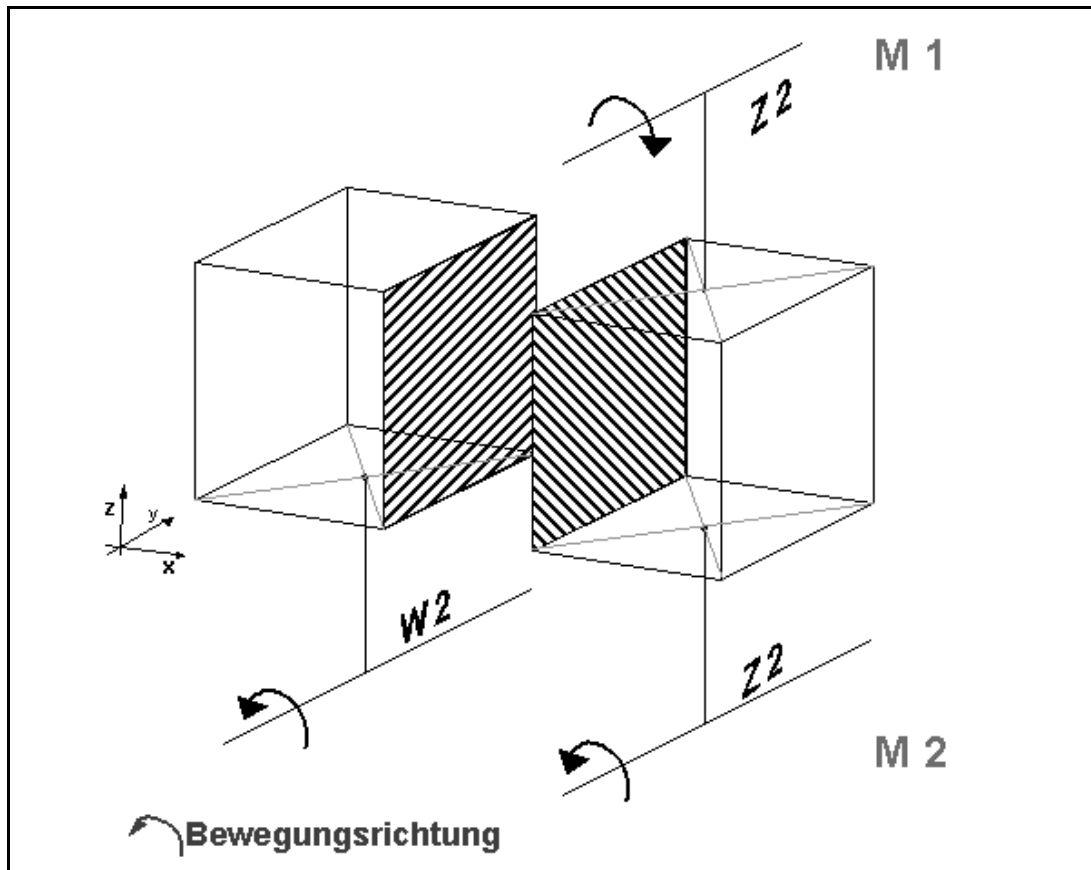


Abbildung 43 „symbolische Gestaltung der Elementarfunktion 4 M1,2“

Ein Nachteil der dargestellten Anordnung ergibt sich aus der zwangsläufig auftretenden Tangentialgeschwindigkeit zwischen den Projektionsebenen der Wirkflächenpaare. Außerdem kann hier nur in eine Rotationsrichtung Kraft übertragen werden.

Die Abbildung 44 zeigt eine weitere prinzipielle Möglichkeit (M3) die Projektionswürfel zur Erfüllung der Elementarfunktion EF 4 anzuordnen. Der Vorteil bei einer derartigen Anordnung ist die fehlende relative Parallelgeschwindigkeit im Wirkflächenpaar.

Um eine Kraftübertragung in beide Richtungen zu erreichen, sind zwei Wirkflächenpaare nötig.²²⁶

²²⁶ scheinbare Selbstverständlichkeit siehe Erläuterungen S. 125

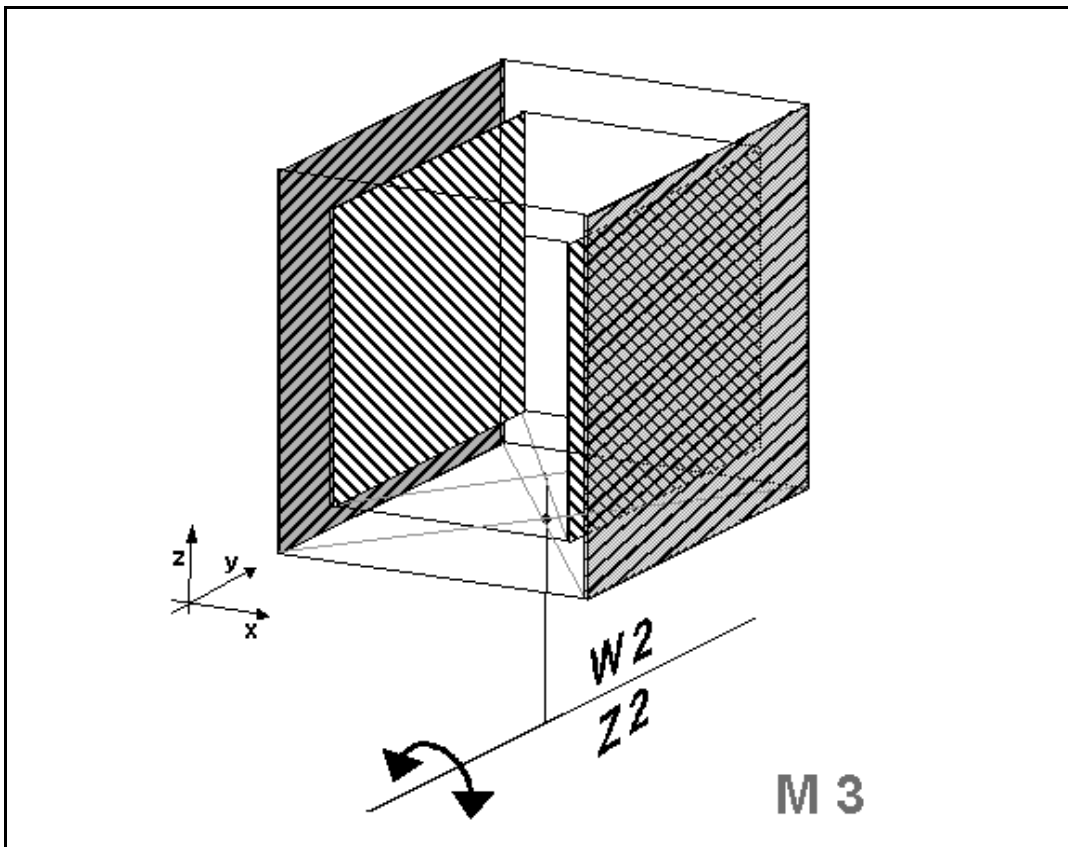


Abbildung 44 „symbolische Gestaltung der Elementarfunktion 4 M3“

Elementarfunktion 5 (EF 5)

Die gestalterische Umsetzung der Elementarfunktion 5 entspricht der der Elementarfunktion 4. Hier kommt bei einem mechanischen Funktionsprinzip und bei einer formschlüssigen Kraftübertragung prinzipiell die gleiche Ausrichtung der Projektionswürfel zueinander in Frage (siehe Abbildung 44).

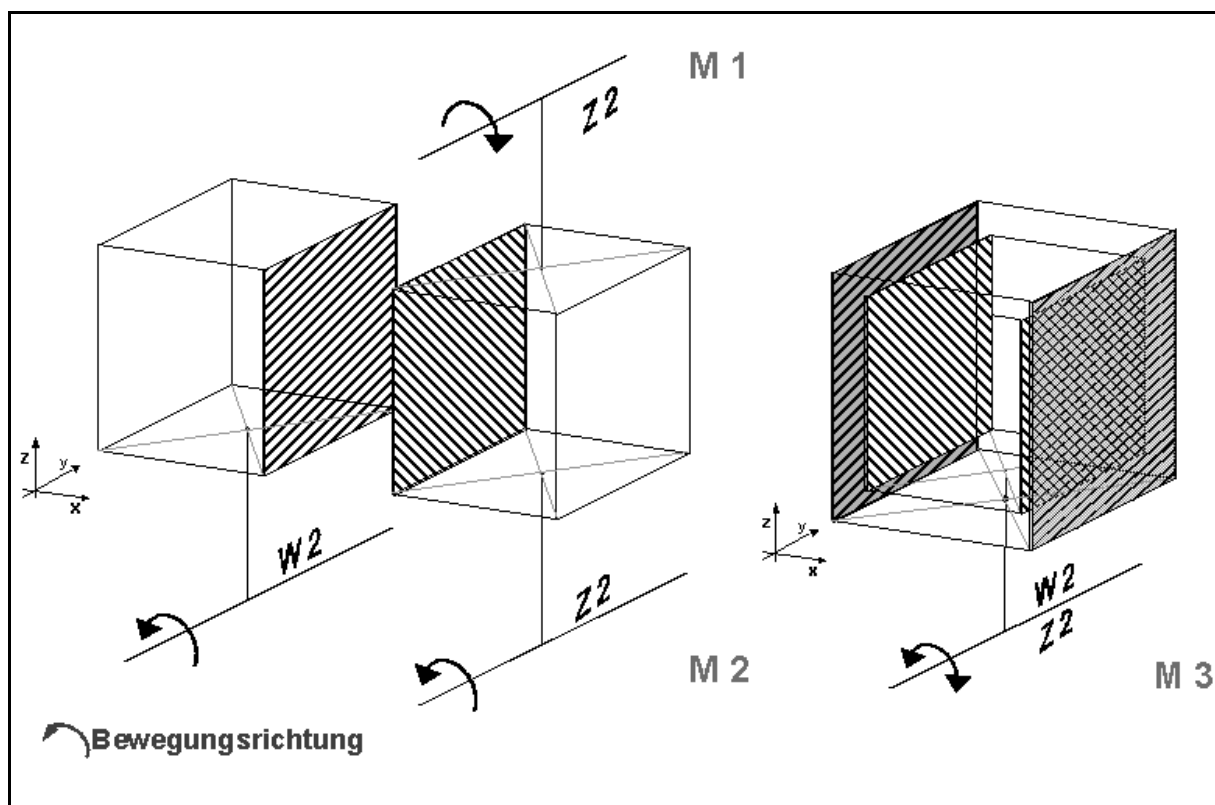


Abbildung 45 „symbolische Gestaltung der Elementarfunktion 5 M 1,2,3“

Elementarfunktion EF6, EF8, EF9

Die Elementarfunktionen EF 6, EF8 und EF9 sollen ebenfalls mit einem mechanischen Funktionsprinzip realisiert werden.

Der untere Projektionswürfel in Abbildung 46 symbolisiert mögliche Abbildungsebenen der Wirkfläche von Welle 2. Er ist fest mit der Welle 2 (W2) verbunden. Der obere Würfel symbolisiert mögliche Abbildungsebenen der paarbildenden Wirkfläche, die fest mit dem Fundament (Gehäuse) verbunden ist.

Die EF6 „Radialkraft über Lagerung aufnehmen / abgeben“ soll formschlüssig erfolgen. Die schraffiert dargestellte Projektionsebene bildet die Anteile des Wirkflächenpaares ab, die die Radialkraft in z-Richtung formschlüssig übertragen.

Die EF8 „Rotation ermöglichen“ wird dann erfüllt, wenn es keine Wirkflächenpaare senkrecht zur Drehrichtung der Welle, also in Umfangsrichtung der Welle, gibt.²²⁷ Die beiden Projektionsflächen in y,z-Ebene dürfen daher niemals Abbildungen von Wirkflächen der Welle 2 enthalten. Symbolisiert wird diese Überlegung durch das Linienkreuz, welches die Fläche des Projektionswürfels durchkreuzt.

²²⁷ scheinbare Selbstverständlichkeit siehe Erläuterungen S. 125

Um die EF 9 „Axialkraft nicht über die Lagerung aufnehmen“ zu ermöglichen, scheiden die beiden Flächen in der x,z-Ebene als Projektionsflächen aus. Symbolisiert wird dies wie oben beschrieben jeweils durch ein Linienkreuz.

Ist die Funktionsstruktur zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig, das heißt, wurde die EF 9 „Axialkraft nicht über die Lagerung aufnehmen“ noch nicht formuliert, hilft die systematische Betrachtung der einzelnen Projektionsflächen auf fehlende Funktionen zu schließen und dies in der Funktionsstruktur zu ergänzen.

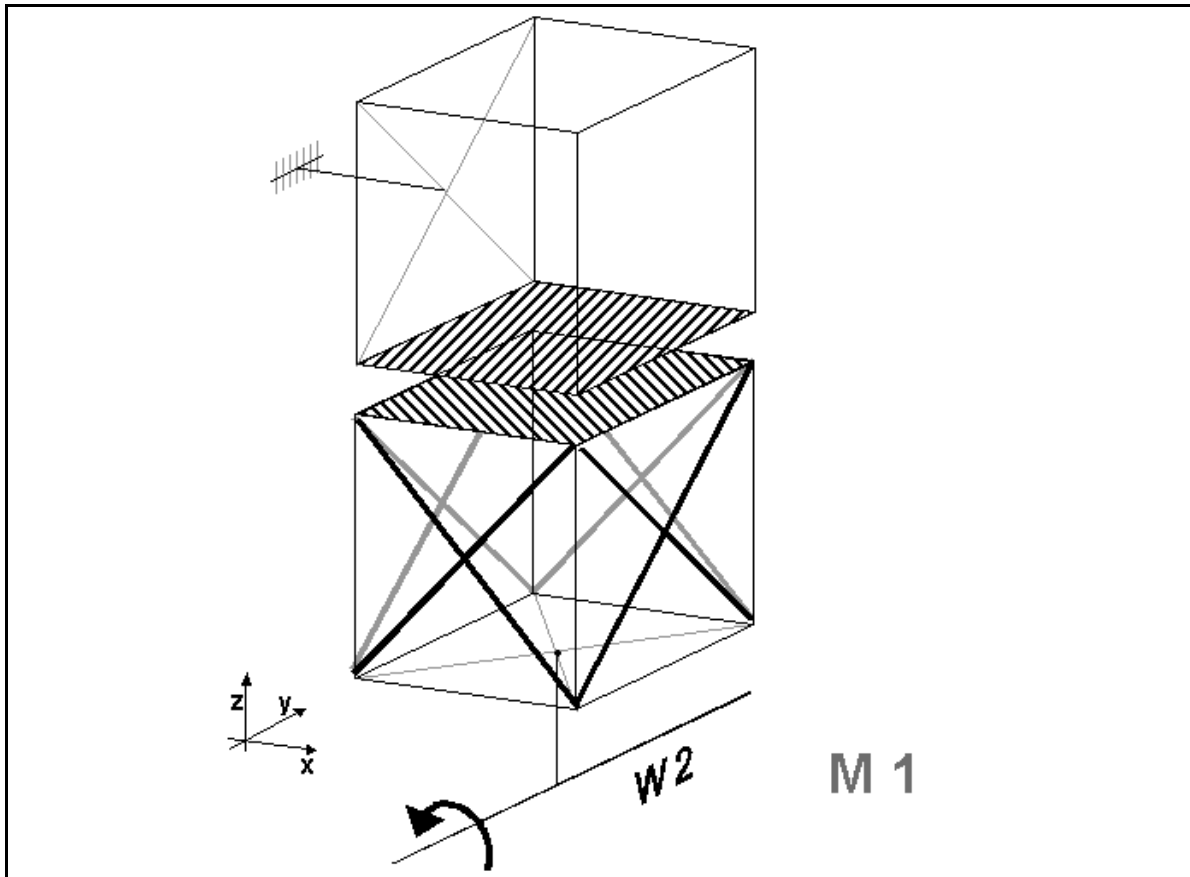


Abbildung 46 „symbolische Gestaltung der Elementarfunktionen 6,8,9 M 1“

Elementarfunktion EF 7

Die EF7 „Axialkraft von Höhenverstellung auf Welle 2 übertragen“ soll ebenfalls über ein mechanisches Funktionsprinzip mit formschlüssiger Schlussart realisiert werden. Projektionsebenen, die Abbildungen der dazu nötigen Wirkflächenpaare enthalten müssen, sind wieder schraffiert dargestellt (siehe Abbildung 47).

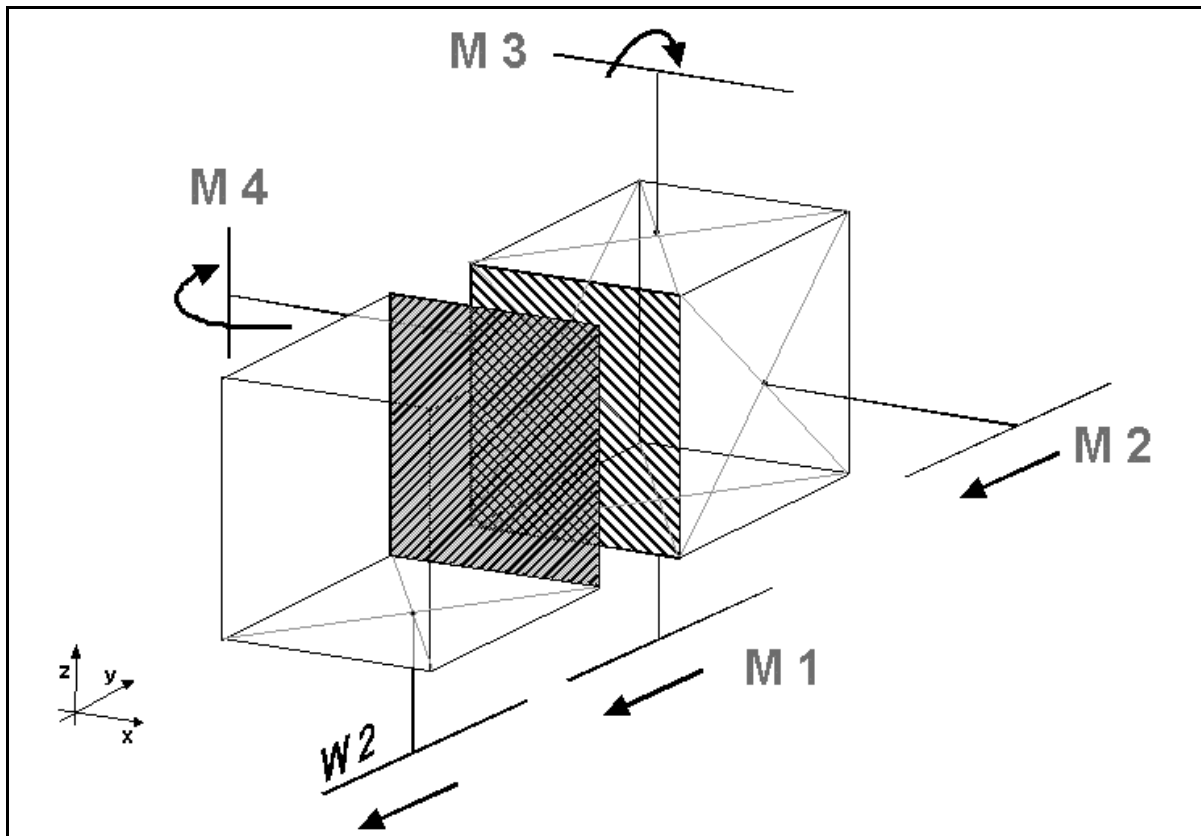


Abbildung 47 „symbolische Gestaltung der Elementarfunktion 7 M1,2,3“

Wie schon unter EF4 beschrieben, werden zur Übertragung der Kraft in zwei Richtungen auch zwei Wirkflächenpaare benötigt. Die Abbildung 48 zeigt ähnlich wie Abbildung 44 die Möglichkeit M5 der Anordnung der Projektionswürfel zur Erfüllung der Elementarfunktion EF 7.

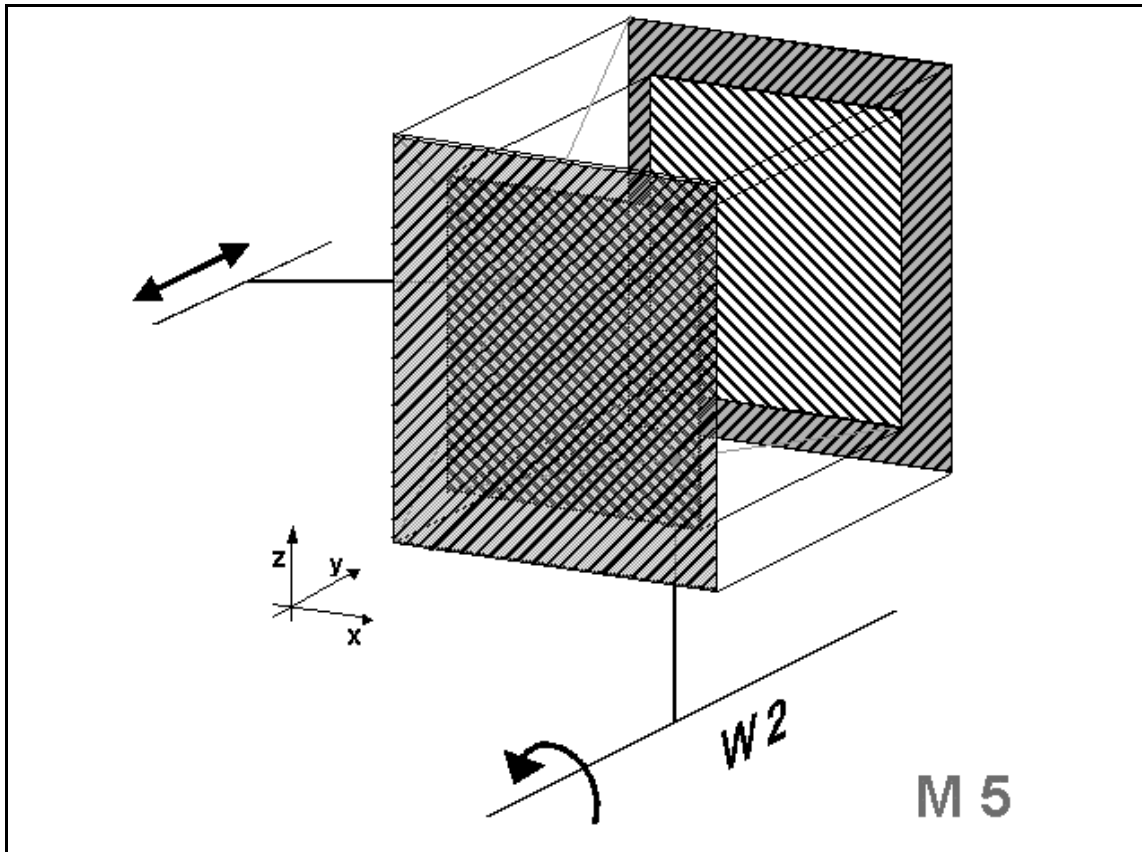


Abbildung 48 „symbolische Gestaltung der Elementarfunktion 7 M5“

Es empfiehlt sich die bisher nicht untersuchten Flächen des Projektionswürfels auf Anforderungen zu untersuchen²²⁸.

Aus der festen Verbindung der Projektionsebenen mit der Welle 2 folgt eine Bewegung der Flächen des inneren Projektionswürfels normal zur y,z -Ebene. *Rotation muss möglich sein (EF6 „Rotation ermöglichen“). Daraus folgt direkt, dass es kein Wirkflächenpaar zwischen Welle 2 und dem Fundament (Gehäuse) geben darf, welches auf die Seiten in der y,z -Ebene des Projektionswürfels projiziert.*²²⁹ Symbolisiert wird dies, wie bereits geschildert, durch ein Linienkreuz auf den entsprechenden Flächen (siehe Abbildung 49).

²²⁸ Dieser Vorgehensschritt kann auch erst beim Übergang von der Elementarfunktion zur Systemfunktion (siehe S. 135) durchgeführt werden.

²²⁹ scheinbare Selbstverständlichkeit siehe Erläuterungen S. 125

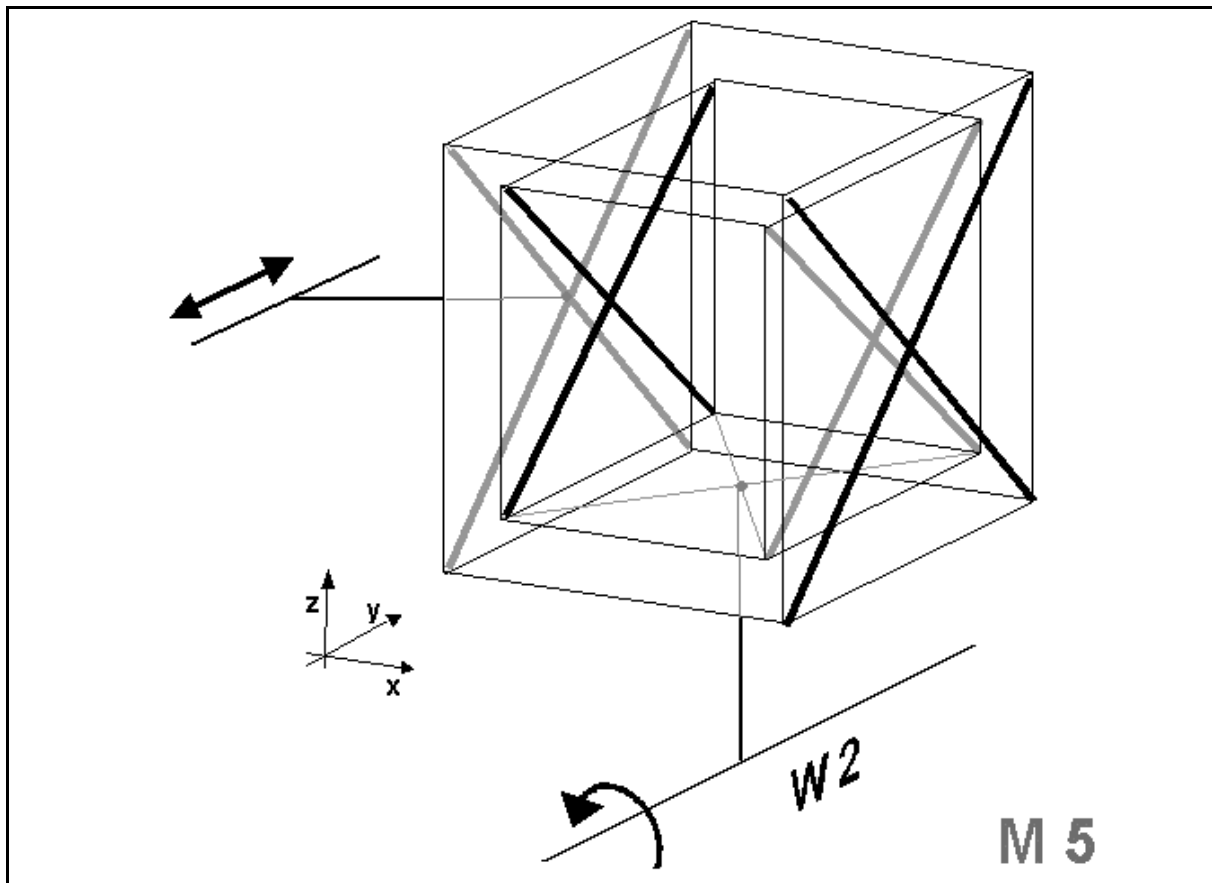


Abbildung 49 „symbolische Gestaltung der Elementarfunktion 7 M5“

Die Abbildung 50 zeigt als Kombination der Abbildung 48 und der Abbildung 49 alle Erkenntnisse, die bei der symbolischen Gestaltung der Elementarfunktion EF 7 bisher gewonnen wurden.

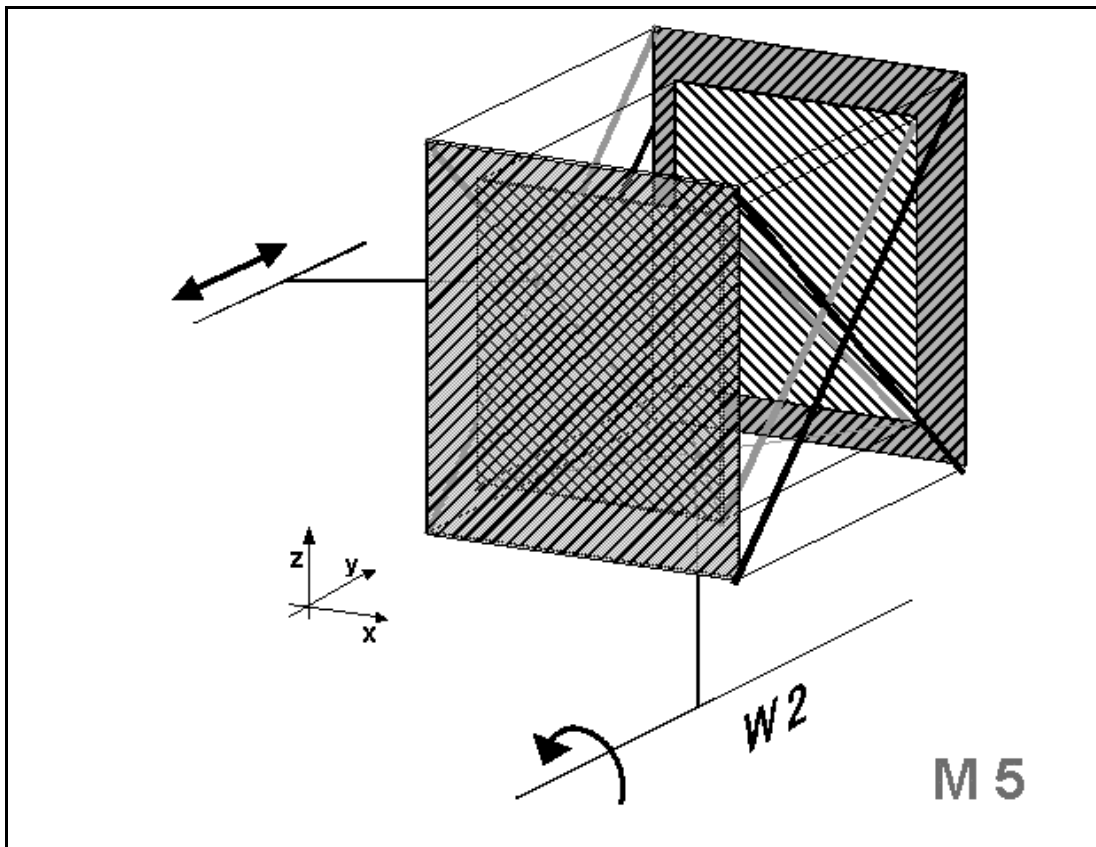


Abbildung 50 „Zusammenfassung symbolische Gestaltung der Elementarfunktion 7 M5“

Übergang von der Elementarfunktion zur Systemfunktion

Nach der separaten Betrachtung der Elementarfunktion werden nun die symbolischen Darstellungen der Elementarfunktionen in einen Systemzusammenhang gebracht.

Es muss zunächst entschieden werden in welchen Bereichen des zu konstruierenden Systems die Elementarfunktionen realisiert werden sollen. Eine Möglichkeit der Anordnung gibt Abbildung 51 wieder. Natürlich könnten hier eine Vielzahl verschiedener Anordnungen gewählt werden.

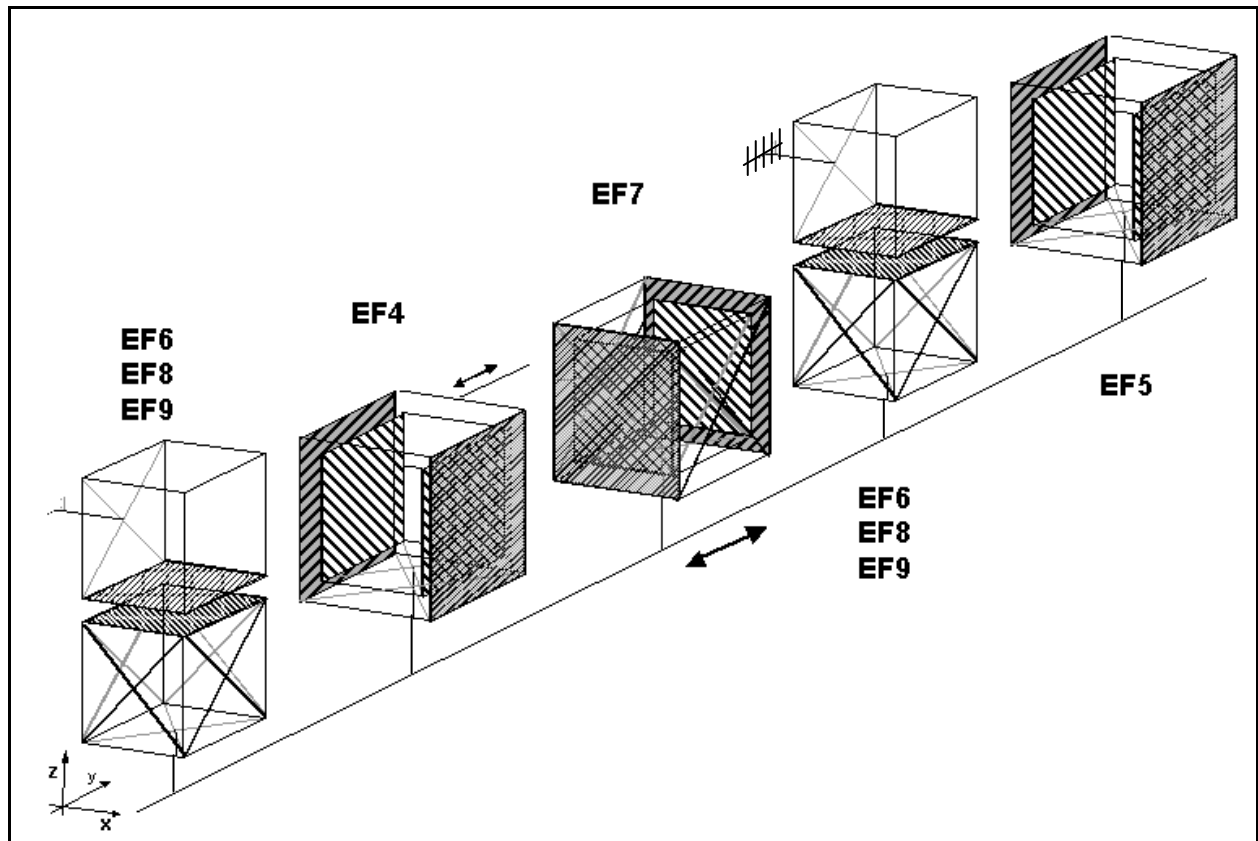


Abbildung 51 „Anordnung der Elementarfunktionen im System“

Wie bereits beschrieben, kommt es beim Übergang von der Elementfunktion zur Systemfunktion zwischen den Projektionswürfeln zu Interaktionen, die die möglichen Lagen der Wirkflächenabbildungen auf den Projektionswürfel beeinflussen. *Die feste Verbindung des Projektionswürfels für EF7 an die Welle 2 zwingt der Welle 2 eine Axialbewegung auf. An alle fest mit der Welle verbundenen Würfel wird diese Axialbewegung weitergegeben.* Damit scheidet an den Projektionswürfeln der Elementarfunktion EF4 und der Elementarfunktion EF5 die Flächen in x,z-Ebene als möglich Projektionsflächen von Wirkflächenpaaren aus. Die Abbildung 52 gibt diese zusätzliche Bedingung symbolisch als Linienkreuz auf den entsprechenden Seitenflächen der Würfel wieder.

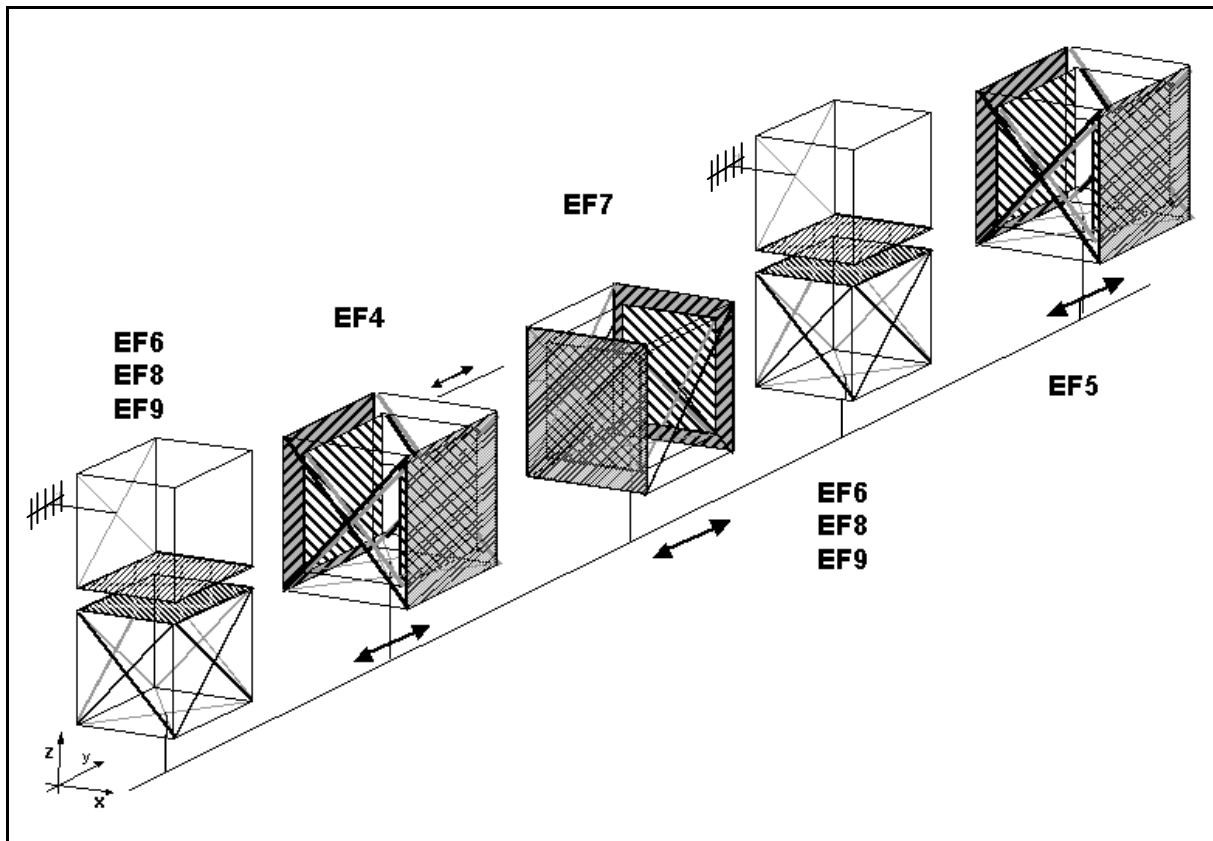


Abbildung 52 „Anordnung der Elementarfunktionen im System mit zusätzlichen Eigenschaften der Projektionswürfel aus Systeminteraktionen“

Nachdem alle Eigenschaften der Projektionswürfel im System diskutiert wurden, wird nun auf die Gestalt der auf die Würfelseiten projizierenden Wirkflächenpaare geschlossen. Die Projektionswürfel waren ja nur ein Hilfsmittel zur Darstellung der Wirkfläche ohne geometrische Erstreckung.

Die Drehbewegung der Welle, die durch den Projektionswürfel EF 4 in die Welle 2 eingeleitet wird, wird über die feste Verbindung der anderen Projektionswürfel mit der Welle auf die Würfel übertragen. Dies hat in diesem Beispiel vor allem für die Gestalt der die Lagerung symbolisierenden Würfel Auswirkungen. Das funktionserfüllende Wirkflächenpaar dieser Lagerungsstellen darf (nach der Kraftflussregel) keine zu der im Wirkflächenpaar vorliegenden Bewegungsrichtung senkrechte Komponente haben. Die einzig mögliche geometrische Gestalt eines Flächenpaares mit dieser Eigenschaft ist ein Paar aus coaxialen Zylindermantelflächen.

Die Abbildung 53 zeigt diese neue Bedingung.

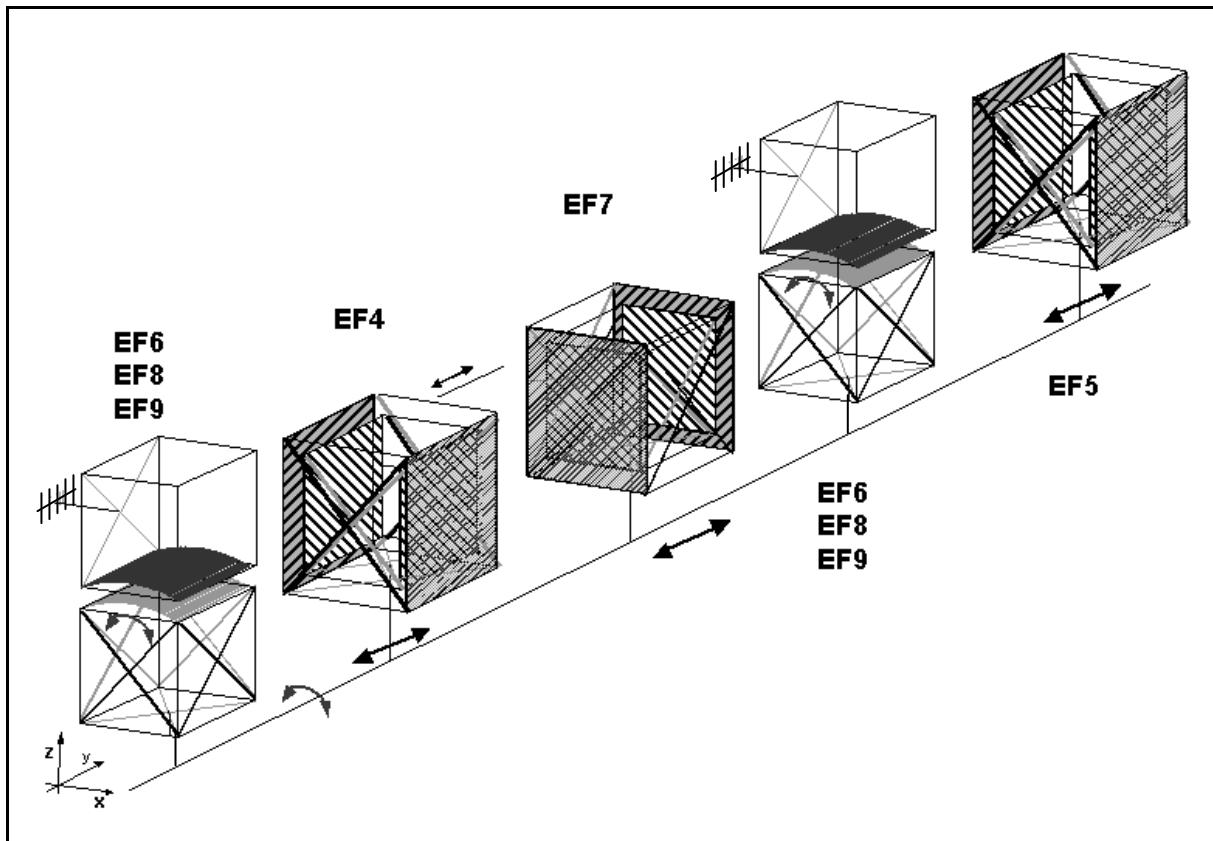


Abbildung 53 „Symbolische Darstellung nach dem Übergang einer symbolischen Darstellung ohne geometrische Erstreckung der Flächen zur Darstellung mit geometrischer Erstreckung“

Im nächsten Schritt wird die symbolische Darstellung mit geometrischer Erstreckung in eine Gestalt der Welle umgesetzt.

Einen ersten skizzenhaften Ansatz dazu zeigt Abbildung 54.

Sicher ist dieser erste Ansatz noch nicht optimal. Eine Analyse des vorgeschlagenen Systems mit Hilfe des Elementmodells kann auch hier weiterhelfen.

Die Elementarfunktion EF7 wird über einen würfelförmigen Körper, der in die Nut der Welle eingreift, realisiert. In Abbildung 53 wurde symbolisch durch ein Linienkreuz auf den Projektionswürfel­flächen in der y,z -Ebene die notwendige Bedingung des Fehlens von projizierenden Wirkflächenpaarkomponenten auf diese Ebene dargestellt. Der würfelförmige Körper hat Flächen in der y,z -Ebene und projiziert damit trivialerweise auf die y,z -Projektionsebene. Es gibt aber keinen möglichen Kontaktpartner zu dieser Fläche. Damit kann sie nie Wirkfläche werden. Es liegt also wie gefordert kein Wirkflächenpaar mit Projektionsanteilen auf die y,z -Ebene vor. Hier wird wieder deutlich, dass bei einem fehlenden Kontaktpartner zu einer Fläche diese nie eine Funktion erfüllen kann. (vgl. Grundhypothese III).

Die gleiche Beobachtung kann bei allen gestalterischen Ausprägungen der Elementfunktionen gemacht werden. Zum Beispiel bei der EF4, bei der der Kontaktpartner auf der Nabe zur Welle in der x,z -Ebene fehlt.

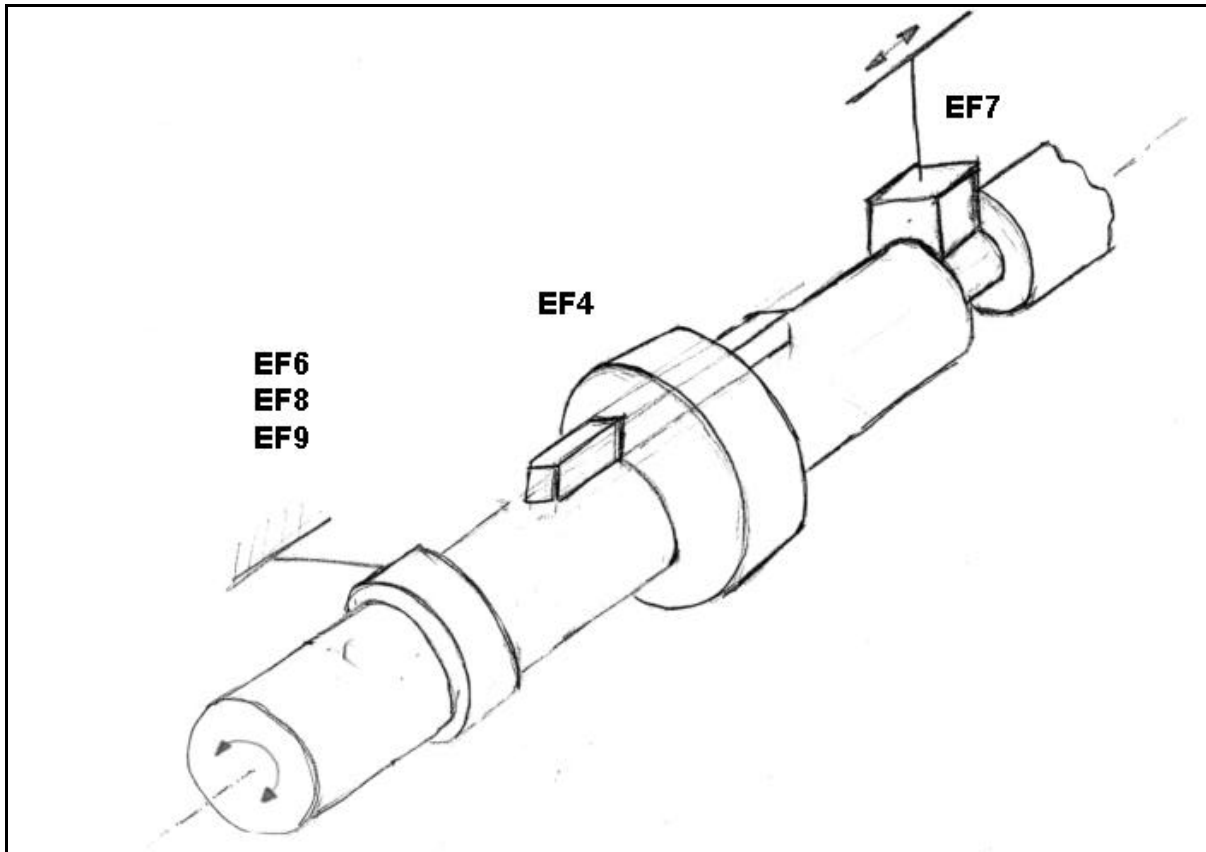


Abbildung 54 „erster skizzenhafter Ansatz zur Umsetzung der Erkenntnisse in ein „reales“ Bauteil“

Da sich die Wirkfläche im Wirkflächenpaar relativ zueinander bewegen, muss die Erstreckung der Wirkflächen gestaltet werden. Aufgrund des axialen Verschiebeweges der Welle ergibt sich die Erstreckung der Wirkfläche auf der Wellenoberfläche (Abbildung 55). Die Eigenschaften dieser Wirkflächen, wie z.B. Oberflächenqualität, müssen vom Konstrukteur entsprechend beschrieben werden.

Als nächstes werden mehrere Iterationen aus Analyse- und Syntheseschritten durchgeführt, die letztendlich zu einer optimierten Gestalt führen. (siehe Abbildung 56)

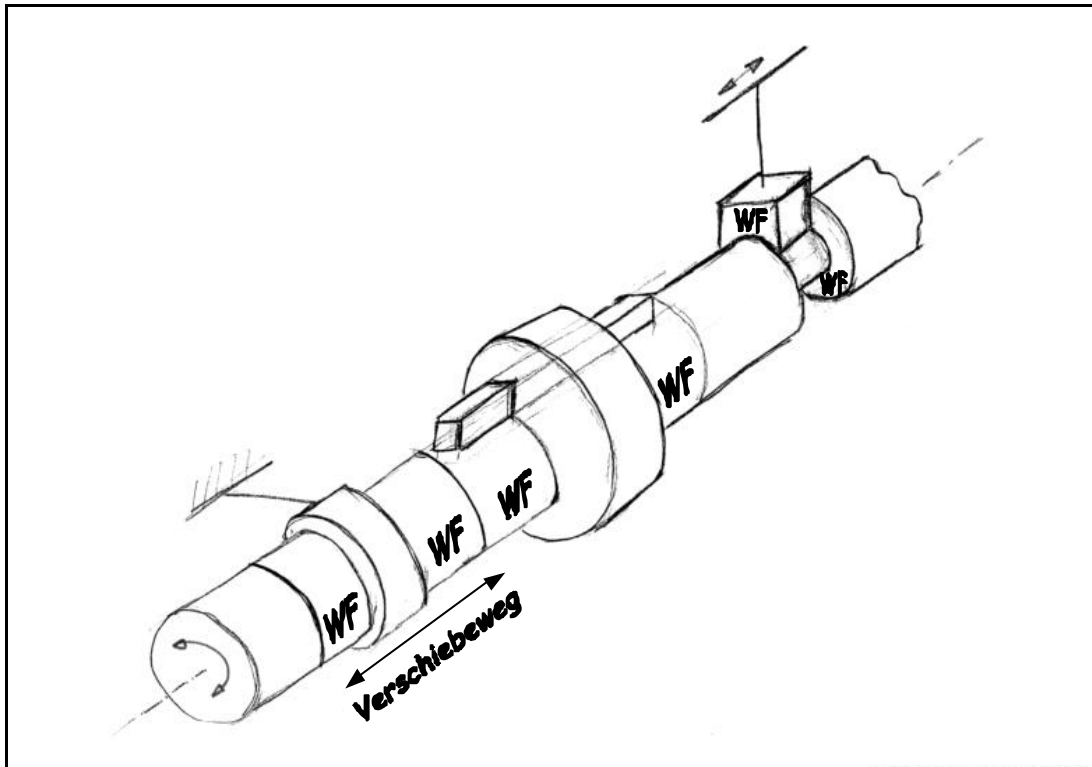


Abbildung 55 „skizzenhafter Ansatz nach erster Optimierungsiteration“

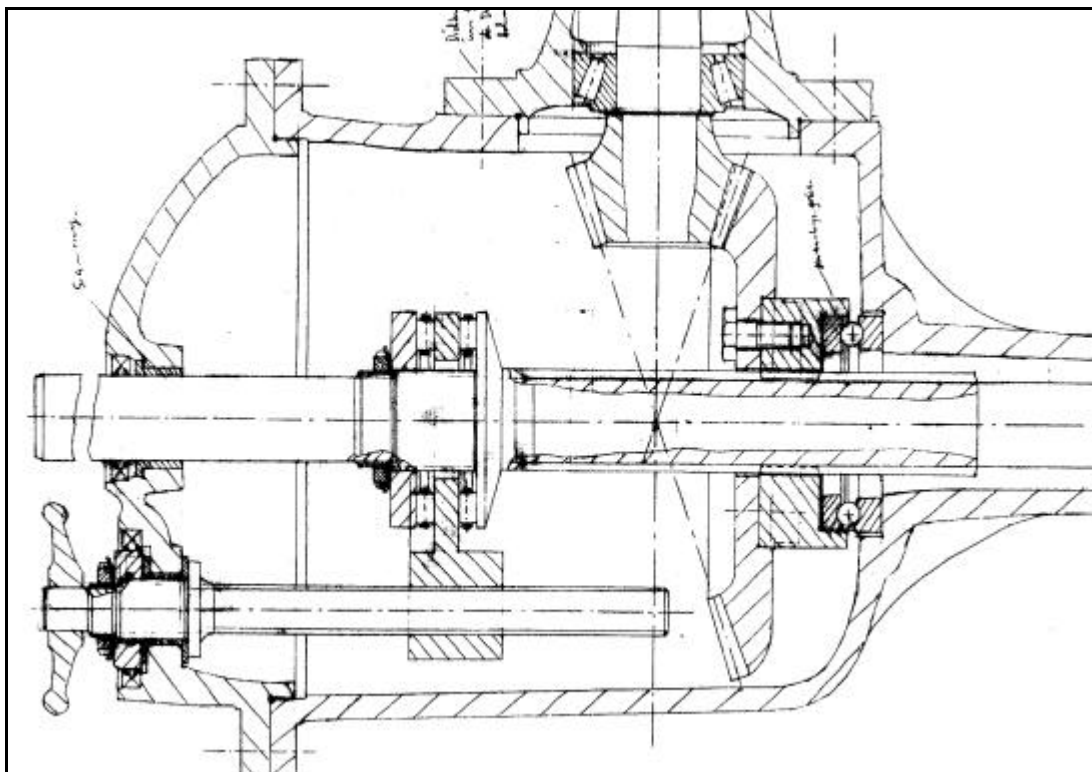


Abbildung 56 „skizzenhafter Ansatz nach mehreren Optimierungsiterationen“

5.4 Fazit zu „Synthese im Konstruktionsprozess mit dem Elementmodell“

In Kap 5 wird gezeigt wie das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ beim Synthetisieren im Produktentwicklungsprozess genutzt werden kann. Die vorgeschlagene Vorgehensweise wird sicher nie als Ganzes von einem Konstrukteur angewendet werden. Sie kann aber als Methode weiterhelfen, wenn der Konstrukteur vor einem gestalterischen Problem steht und der Lösung des Problems nicht näher kommt. Bei der Ausbildung von Studierenden am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Krafffahrzeugbau der Universität Karlsruhe wurden mit dieser Vorgehensweise sehr positive Erfahrungen gemacht.

Die Anwendung des Elementmodells sollte immer pragmatisch und problemorientiert erfolgen und als Leitfaden beim Denken dienen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschreibt einen konstruktionsmethodischen Ansatz, der technische Systeme auf „das Wesentliche“ abstrahiert. Sie klärt die Frage nach den kleinsten gemeinsamen Grundelementen eines jeden technischen Systems. Es wird gezeigt, dass sich jedes technische System aus den Grundelementen Wirkflächenpaar und Leitstützstruktur zusammensetzt. Der in der Konstruktionsmethodik bereits verwendete Begriff des Wirkflächenpaares wird dazu erweitert und ausgehend von Festkörpern auf Fluide und Felder übertragen. Auf dieser Grundlage wird ein durchgängiges konstruktionsmethodisches Modell aufgebaut, welches auf alle technischen Systeme anwendbar ist. Das Modell verknüpft die Gestalt technischer Systeme mit deren Funktion.

Das Modell, welches mit Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ bezeichnet wird, ist immer dann von Nutzen, wenn die Gestalt eines technischen Systems eine Rolle spielt. Im Produktentwicklungszyklus ist dies der Fall, wenn eine Analyse des bereits bestehenden oder des zu entwickelnden Produktes notwendig ist, oder wenn neue Funktionselemente gestaltet werden sollen. Damit ist es sowohl bei der Analyse technischer Systeme als auch bei der Synthese neuer technischer Systeme anwendbar.

Innerhalb der Arbeit wird der Einsatz des Modells in Form einer Methode exemplarisch in der Gestaltungsphase des Produktentwicklungsprozesses gezeigt. In dieser Phase legt der Konstrukteur die Gestalt des technischen Systems fest. Dies geschieht meist auf der Grundlage zuvor gefundener Lösungsprinzipien. Die Suche nach Lösungsprinzipien wird konstruktionsmethodisch durch eine Vielzahl von Methoden unterstützt. Für den Schritt vom Lösungsprinzip zur Gestalt des technischen Systems gibt es im Gegensatz dazu nur unzureichende Unterstützung. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu liefern diesen Schritt methodisch zu unterstützen.

Fundament des Modells ist die Kausalität, das heißt der Zusammenhang von Ursache und Wirkung. Das darauf beruhende Kausalitätsprinzip ist in elementarer Form bereits von Aristoteles formuliert worden²³⁰ und von Newton 1687 im dritten

²³⁰ Bro00

newtonschen Axiom²³¹, welches Wirkung und Gegenwirkung verknüpft, auf die Mechanik übertragen worden.

Wirkungen und Gegenwirkungen im technischen System werden nach bestimmten Regeln durch die Gestalt der Grundelemente realisiert. Diese Regeln werden in den Grundhypothesen dieser Arbeit formuliert und für verschiedene Technische Systeme bewiesen.

Die Stärke des vorgestellten Modells liegt in der durchgängigen Anwendbarkeit in allen Betrachtungsebenen. Das Modell ist fraktal, d.h. immer wieder nach gleicher Vorgehensweise auf unterschiedlich tiefen Betrachtungsebenen anwendbar. So wird z.B. auch die Konstruktion mit technischen Teilsystemen, deren innerer Aufbau dem Konstrukteur im Detail nicht bekannt sein muss, unterstützt. (Konstruktion mit Black-Boxes).

Das Modell kann ohne Rechnerunterstützung bei einer Vielzahl von Problemstellungen im Produktentwicklungsprozess unabhängig vom Wirkprinzip des zu entwickelnden Produktes genutzt werden. Damit geht es deutlich über bestehende Modell nach z.B. Roth oder Jung hinaus.²³²

Weiterentwicklungsbedarf besteht vor allem beim Synthetisieren mit Hilfe des Elementmodells. Bei der Durchführung, der in Kap. 5 als „scheinbar selbstverständliches Vorgehen“ bezeichneten Schritten kann das Denken im Elementmodell zwar unterstützen aber allein nicht zum Ziel führen.

Das vorgestellte Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ bildet die Grundlage des am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau entwickelten Karlsruher Lehrmodells für Produktentwicklung (KaLeP)²³³. Bereits im Grundstudium werden in der Lehrveranstaltung „Maschinenkonstruktionslehre“ zukünftigen Produktentwicklern technische Systeme auf Basis des Modells erklärt. Außerdem wird den Studierenden gezeigt wie mit Hilfe des Modells technische Systeme konstruiert werden.

Weitere Forschungsarbeiten werden sich mit der Formulierung einer durchgängigen Konstruktionsmethodik auf Basis des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ beschäftigen. Arbeiten zur Formulierung von Konstruktionsregeln auf Basis des hier vorgestellten Modells sind am Institut bereits angelaufen. Durch

²³¹ siehe New14, S. 15

²³² siehe Kap. 2.3 „Abgrenzung zum Stand der Technik“

²³³ Veröffentlichungen zu „KaLeP“: Alb99/1; Alb99/2; Alb00/1; Alb00/2; Alb00/3

das Elementmodell könnten bestehende Konstruktionsrichtlinien „griffiger“ gemacht werden.

7 Literaturverzeichnis

- Aki91 Akiyama, K.: Function Analysis - Systematic Improvement of Quality and Performance; Cambridge/Mass., Norwalk/Conn.; 1991.
- Alb02/2 Albers, A; Metz, D.: Finite Element Analysis on the Reliability of Components of a Micro Planetary Gear; 3rd international Euspens Conference, Eindhoven, Netherlands, 26. - 30. Mai 2002
- Alb02/1 Albers, A.; Matthiesen, S.: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme – Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zur Analyse und Synthese technischer Systeme; Konstruktion, Zeitschrift für Produktentwicklung; Band 54; Heft 7/8 - 2002; Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG; Düsseldorf; 2002.
- Alb01/3 Albers, A.; Frölich, A.; Weyer, S.; Metz, D.; Müller, O.; Brückner-Foit: Investigations on the Reliability of FEA Calculations on the Microscopic Scale; Karlsruhe; 2001.
- Alb01/2 Albers A.; Häußler, P.; Emmrich, D.; Müller, O.; Ilzhöfer, B.; Nowicki, L.: Automated Topology Optimization of Flexible Components in Hybrid Finite Element Multibody Systems using ADAMS/Flex and MSC.Construct ADAMS European User's Conference, Berchtesgaden, Germany, 14th-15th November 2001.
- Alb01/1 Albers, A.; Burkardt, N.; Matthiesen, S.: New education concepts for the training of creative engineers - The Karlsruhe education model for industrial product development - KaLeP -; Proceeding of the 23rd SEED Annual Design Conference and 8th National Conference on Product Design Education; Derby; United Kingdom; 2001.
- Alb00/4 Albers, A.; Burkardt, N.; Matthiesen, S; Schweinberger, D.: The „Karlsruhe Model“ - A Successful Approach to an Academic Education in Industrial Product Development; Engineering & Product Design Education Conference 2000, 5./6. September 2000; University of Sussex; 2000.
- Alb00/3 Albers, A.; Matthiesen, S.: Neue Modelle für die Ingenieurausbildung - Das Karlsruher Lehrmodell - Festschrift der Universität Karlsruhe anlässlich des 175 jährigen Bestehens; Karlsruhe; 2000.
- Alb00/2 Albers, A.; Matthiesen, S.: Neue Lehrmodelle zur Ausbildung kreativer Konstrukteure - Das Karlsruher Lehrmodell für; Produktentwicklung - KaLeP -; VDI - Tagungsband; 4. Deutscher Konstrukteurstag; 6./7. September; Bochum; 2000.
- Alb00/1 Albers, A.; Burkardt, N.; Matthiesen, S; Schweinberger, D.: The „Karlsruhe Model“ - A Successful Approach to an Academic Education in Industrial Product; Development; 3rd Workshop on Global Engineering Education (GEE' 3); RWTH Aachen; 2000.
- Alb00 Albers, A.: Skriptum zur Lehrveranstaltung "Maschinenkonstruktionslehre I); Knowledge Base Produktentwicklung; Karlsruhe; 2000.
- Alb99/2 Albers, A.; Matthiesen, S.: Maschinenbau im Informationszeitalter - Das Karlsruher

- Lehrmodell; 44.Internationalen Wissenschaftliches Kolloquium, Maschinenbau im Informationszeitalter 20. ; 23.09.1999; Technische Universität Ilmenau; 1999.
- Alb99/1 Albers, A; Birkhofer, H.; Matthiesen, S.: Neue Ansätze in der Maschinenkonstruktionslehre; Veröffentlichung zum Beitz Kolloquium 09.07.99; Universität Berlin; 1999.
- Alb98 Albers A.; Matthiesen, S: Was bringt die Zukunft? Trends in der Automatisierung von KFZ-Antriebssträngen ; VDI-Tagung "Getriebe in Fahrzeugen" ; Friedrichshafen; 1998.
- Art75 Artobolevskii, I.: General Problems in the Theory of Machines and Mechanics; Machines and Mechanics; New York; 1975.
- Art76 Artobolevskii, I.: Past, Present and future in the Theory of Machines and Mechanism; Machines and Mechanics; New York; 1976.
- Atk74(2) Atkins, Kenneth R.: Physik - Die Grundlagen des physikalischen Weltbildes; Berlin, New York; 1986.
- Bac20 Bach, C.: Die Maschinenelemente; Stuttgart; 1880, 1920.
- Bir00 Birkhofer, H.; Kloberdanz, H.; Berger, B.: Produktentwicklung I Wintersemester 2000/2001; Darmstadt; 2000.
- Bir80 Birkhofer, H: Analyse und Synthese der Funktionen Technischer Systeme; Fortschrittsbericht der VDI-Zeitschriften; Düsseldorf; 1980.
- Bre93 Breiing, A.; Flemming, M.: Theorie und Methoden des Konstruierens; Berlin; 1993.
- Bro00 Der Brockhaus in fünf Bände; Leipzig; Mannheim; 2000.
- Bro99 Brockhaus „Die Enzyklopädie in vierundzwanzig Bänden“; 20. überarbeitete und aktualisierte Auflage; Leipzig; Mannheim; 1999.
- Buz93 Buzan, Tony: Kopftraining Anleitung zum kreativen Denken Tests und Übungen; München; 1993.
- Cla98 Uwe Claussen ; Wolf G. Rodenacker: Maschinensystematik und Konstruktionsmethodik : Grundlagen und Entwicklung moderner Methoden; Berlin ; Heidelberg; 1998.
- Dae76(10) Daenzer, W.F.: Systems Engineering- Methodik und Praxis; Zürich; 1999.
- DIN 4764 Oberflächen an Teilen für Maschinenbau und Feinwerktechnik; Begriffe nach der Beanspruchung; Berlin; 1982.
- DIN 69910 Deutsches Institut für Normung e. V.; Wertanalyse; Berlin; 1987.
- Die78 Diekhöner, G.: Systematisches Lösungsfinden mit Konstruktionskatalogen; VDI-Zeitschrift Z120 Nr. 8; 1978.
- Diz65 Dizioglu, B.: Getriebelehre - Ein Lehrbuch für Studierende und Ingenieure; Braunschweig; 1965.
- Dör76(2) Dörner, D: Problemlösen als Informationsverarbeitung; Stuttgart; 1976.
- Dub29(17) Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau; Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong Barcelona; 1929.
- Dud74 Duden; Physik; Mannheim, Wien, Zürich; 1974.

- Dud97 Duden; Das Fremdwörterbuch; Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich; 1997.
- Dud96 Duden; Die Deutsche Rechtschreibung; Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich; 1996.
- Dyl91 Dylla, N.: Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren; Schriftenreihe: Konstruktionstechnik München ; 5; München; 1991.
- Ehr00(3) Ehrlenspiel, K; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren : Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung; Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hong Kong; 2000.
- Ehr95 Ehrlenspiel, K: Integrierte Produktentwicklung : Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion; 1995.
- Ehr00 Ehrlenspiel, K: Die Bedeutung der Denk- bzw. Informations-Ökonomie für die Konstruktionspraxis und die Lehre; Vortrag anlässlich der Bayrischen Konstruktions-tagung 2000 am 10./11.11.2000; Ingolstadt; 2000.
- Erk28 Erkens, A.: Beiträge zur Konstruktionserziehung; VDI-Zeitschrift Nr. 72; 1928.
- Ers75 Ersoy, M.: Wirkfläche und Wirkraum - Ausgangselement zum Ermitteln der Gestalt beim rechnergestützten; Konstruieren.; Braunschweig; 1975.
- Eye00 Eyerer, P; Krause, D; Stockmeyer, P.: TheoPrax Wie gestalte ich meine Vorlesung um? - Kombination aus Frontalvorlesung, Gruppenübung und Projektarbeit; 2000.
- Fra51 Franke, R.: Die Baulehre der Getriebe; Vom Aufbau der Getriebe Band2; Düsseldorf; 1951.
- Fra58 Franke, R.: Die Entwicklungslehre der Getriebe; Vom Aufbau der Getriebe Band 2; Düsseldorf; 1958.
- Fra76 Franke, H.-J.: Untersuchungen zur Algorithmisierbarkeit des Konstruktionsprozesses Reihe 1, Nr 47; Braunschweig; 1976.
- Fre97 Duden, Fremdwörterbuch, Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, Berchdesgaden, 1997.
- Ger48(20) Gerthsen, Ch.: Physik; bearbeitet von Helmut Vogel; 20. aktualisierte Auflage; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg; 1999.
- Gie90 Gierse, F.J.: Funktionen und Funktionsstrukturen - Zentrale Werkzeuge der Wertanalyse; VDI Berichte Nr. 846; Düsseldorf; 1990; Funktionen und Funktionsstrukturen - Zentrale Werkzeuge der Wertanalyse; VDI Berichte Nr. 846; 1990.
- Gie94 Gierse, F.J. (Hrsg.), Pauwels, M. (Übers.): Funktionsanalyse - Der Schlüssel für erfolgreiche Produkte - Prozesse - Dienstleistungen (Übers. U. Adaption v. [Aki17]; Landsberg; 1994.
- Hei01 Heidemann: Trennende Verknüpfung - Ein Prozessmodell als Quelle für Produktideen; Darmstadt; 2001.
- Hey87 Heymann, C.: Denkprozesse und Arbeitsschritte beim Konstruieren; Darmstadt; 1987.
- Hey01 Heymann, M.; Wegenroth, U.: Die Bedeutung von "tacit knowledge" bei der Gestaltung von Technik; Die Modernisierung der Moderne; Frankfurt; 2001.

- Hor70 Hortleder, G.: Das Gesellschaftsbild des Ingenieurs :Zum politischen Verhalten der technischen Intelligenz in Deutschland ; Frankfurt; 1970.
- Hub73(2); Hubka, V.: Theorie technischer Systeme : Grundlagen der wissenschaftlichen
Hub84 Konstruktionslehre; Berlin; Heidelberg; 1984.
- Hub92 Hubka, V.; Eder, E.: Einführung in die Konstruktionswissenschaft: Übersicht, Modell, Anleitungen; Berlin; Heidelberg; 1992.
- Jun 89 Jung, A.: Funktionale Gestaltbildung : gestaltbildende Konstruktionslehre für Vorrichtungen, Geräte, Instrumente und Maschinen ; Berlin; 1989.
- Jun 891 Jung, A.: Technologische Gestaltbildung : Herstellung von Geometrie-, Stoff- und Zustandseigenschaften feinwerktechnischer Bauteile; Berlin; 1991.
- Kae90 Kaesche, H.: Die Korrosion der Metalle; ; Berlin, Heidelberg, New York; 1990.
- Kes42 Kesselring, F.: Die starke Konstruktion; VDI-Zeitschrift Nr. 86; 1942.
- Kes51 Kesselring, F.: Bewertung von Konstruktionen; Düsseldorf; 1951.
- Kes54 Kesselring, F.: Technische Konstruktionslehre; Berlin; 1954.
- Kes65 Kesselring, F.: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren; Engpass Konstruktion; Düsseldorf; 1965.
- Kir98 Kirchner, F.: Wörterbuch der philosophischen Begriffe; Vollst. neu hrsg. von Arnim Regenbogen. - Hamburg : Meiner; 1998.
- Kol76 Koller, R.: Konstruktionsmethode für den Maschinen-, Geräte- und Apparatebau; Berlin, Heidelberg, New York; 1976.
- Kol78 Koller, R.: Funktionsanalyse technischer Systeme und Erstellung von Hilfsmitteln zur Produktplanung und -entwicklung; 1978.
- Kol89 Koller, R.: CAD - Automatisiertes Zeichnen, Darstellen und Konstruieren; Berlin; 1998.
- Kol98 Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau : Grundlagen zur Neu- und
Kol76(4) Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen; Berlin, Heidelberg, New York; 1998.
- Lau31 Laudien, K.: Maschinenelemente; Leipzig; 1931.
- Lin01 Lindemann, U.; Wulf, J.. Action orientation in design methodology; International Conference on Engineering Design (ICED), August 21-23 2001; Glasgow; 2001.
- Ley63 Leyer, A.: Maschinenkonstruktionslehre; Technika - Reihe, Hefte 1 - 6; Basel; 1963 - 1971.
- Mat57 Matousek, R.: Konstruktionslehre des allgemeinen Maschinenbaus; Berlin; 1957.
- Hua02 Huang, M.; Grabowski, H.: Funktionsmodellierung und Lösungsfindung mechatronischer Produkte; Karlsruhe; 2002.
- Hue00 Hütte : die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften; Hrsg.: Akademischer Verein Hütte e. V., Berlin. Hrsg. von Horst Czichos. - 31. Neubearb. und erw. Aufl.. - Berlin ; Heidelberg : Springer, 2000.

- Mey79 Meyers Enzyklopädisches Lexikon; Bibliographisches Institut AG; Mannheim; 1979.
- Mum95 Hans Dieter Mummendey: Die Fragebogen-Methode : Grundlagen u. Anwendung in Persönlichkeits-, Einstellungs- u. Selbstkonzeptforschung; Göttingen; 1995.
- New14 Newton, I.; Bernoulli, D.; d'Arcy, P.: Abhandlungen über jene Grundsätze der Mechanik, die Integrale der Differentialgleichungen liefern; Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften; Leipzig ; Berlin; 1914.
- Nie81 Niemann, G; Winter, H.: Maschinenelemente; Springer-Verlag; Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo; 1981.
- Oer74 Oerter, R.: Psychologie des Denkens; Donauwörth; 1974.
- Pah93 Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre; Berlin, Heidelberg, New York;1993.
- Pah77/(3)
- Red52 Redtenbacher, F.: Prinzipien der Mechanik und des Maschinenbau; Mannheim; 1852.
- Reu00 Reuleaux, F.: Lehrbuch der Kinematik Band 2; Braunschweig; 1900.
- Reu54 Reuleaux, F.; Moll, C.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau; Braunschweig; 1854
- Reu63 Reuleaux, F.: Kinematics of Machinery; New York; 1863.
- Reu75 Reuleaux, F. :Theoretische Kinematik (=Lehrbuch der Kinematik Band 1); Braunschweig; 1875.
- Rie13 Riedler, A.: Das Maschinenzeichnen; Berlin; 1913.
- Rod73 Rodenacker, W. G.; Claussen, U.: Regeln des Methodischen Konstruierens; Mainz; 1973.
- Rod91 Rodenacker, W. G.: Methodisches Konstruieren; Konstruktionsbücher Band 27; Berlin, Heidelberg, New York; 1991.
- Rod70(4)
- Röt27 Rötcher, F.: Die Maschinenelemente; Berlin; 1927.
- Rot70 Roth, K.: Systematik der Maschinen und ihrer mechanischen elementaren Funktionen.; Z. Feinwerktechnik, 74, Heft 11, 1970.
- Rot74 Roth, K.: Die logische Schlussmatrix, ein Algorithmus zur Analyse und Synthese von Verbindungen und Führungen in der Konstruktion; Fortschrittsbericht Reihe 1 Nr. 35; Braunschweig; 1974.
- Rot79 Roth, K.: Neue Modelle zur rechnergestützten Synthese mechanischer Konstruktionen; Konstruktion 31 H5; Braunschweig; 1979.
- Rot82(2) Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen; Berlin, Heidelberg, New York; 1994.
- Rot86 Roth, K.: Modellbildung für das methodische Konstruieren ohne und mit Rechnerunterstützung; VDI-Zeitschrift; 1986.
- Sch80 Schregenberger, J. W.: Methodenbewusstes Problemlösen : ein Beitrag zur Ausbildung von Konstrukteuren, Beratern u. Führungskräften; Zürich; 1980.
- Sch77 Schöne, A.: Über abstrakte Modelle technischer Systeme und deren Strukturen; VDI-Zeitschrift Nr. 15/16; 1977.

- Sch64 Schumpeter, J.A.: Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung; Berlin; Duncker & Humblot; 1964
- Sen96 Senge, P.: Die Fünfte Disziplin. Kunst und Praxis der lernenden Organisation; Stuttgart; 1996.
- Shi65 Shigley, J.: Theory of machines; New York; 1965.
- Ulr95 Ulrich, H. Probst, G.: Anleitung zum Ganzheitlichen Denken; Bern, Stuttgart, Wien; 1995.
- Tsc54 Tschochner, H.: Konstruieren und Gestalten; Essen; 1954.
- Ste68 Steuer, K.: Theorie des Konstruierens in der Ingenieurausbildung; Leipzig; 1968.
- VDI 849 Wertanalyse - Wertgestaltung Value Management Neue Impulse zum Ganzheitlichen Problemlösen; 1990.
- VDI 2230 Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen; Zylindrische Bl.1 Einschraubenverbindungen; Berlin; 1986.
- VDI 2803 Funktionsanalyse - Grundlagen und Methode - Berlin; 1996.
Bl.1
- VDI 2803 Funktionsstrukturen; Berlin; 1996.
Bl. 2
- VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte; Düsseldorf; 1986.
- VDI 2223 Methodisches Entwerfen technischer Produkte; Berlin; 1999.
- Wei78 Weinert, F. E.; Ist Denken lernbar; DFG-Mitteilungen 3/78; 1978.
- Wie70 Wiendahl, H.P.: Funktionsbetrachtungen technischer Gebilde - Ein Hilfsmittel zur Auftragsabwicklung in der Maschinenindustrie; RWTH Aachen; 1970.

8 Anhang

8.1 Definitionen einiger wichtiger Begriffe

<u>Begriff</u>	<u>Quelle</u>	<u>Erklärung</u>
Abstraktion	Rod91	Denkvorgang, der von etwas Wahrgenommenem oder Vorgestelltem das Unwesentliche fortlässt, um die Betrachtung zu vereinfachen
Adhäsionskräfte	Bro00	zwischen Molekülen verschiedener Stoffe wirkende Molekularkräfte. Sie bewirken eine Adhäsion, d.h. ein Aufeinanderhaften von Körpern aus verschiedenen Stoffen. Farbe auf Leinwand, Benetzen der Haut mit Wasser, Ausnutzung beim Leimen, Kleben, Kitten, usw.
Allgemein anwendbare Funktion	Pah77(3)	Funktion, die in technischen Systemen allgemein vorkommt
Analyse	Rod91	<i>Logik:</i> Die begriffliche Zerlegung eines Ganzen in seine Teile, eines Begriffs in seine Merkmale <i>Physik:</i> Die möglichst theoretisch begründete Festlegung der Einflussgrößen eines physikalischen Geschehens und deren Abhängigkeiten (Hypothesenbildung), sowie die experimentelle Bestätigung
	Dud97	Systematische Untersuchung eines Gegenstandes od. Sachverhaltes hinsichtlich aller einzelnen Komponenten oder Faktoren, die ihn bestimmen
Apparat	Kol76(4)	Technisches System, dessen primärer Zweck es ist, Stoffe in irgendeiner Weise umzusetzen und/oder einen Stofffluss zu verwirklichen
Bauteil	Kol76(4)	Aus festem Stoff bestehendes Gebilde (Körper) bestimmter Gestalt; ein nicht weiter zerlegbares Bauelement technischer Systeme. Bauteile im weiteren Sinne können auch Flüssigkeiten (Öle) und Gase (Gasfeder) sein Ein Bauteil kann aus mehreren bestehen. z.B. zwei zusammengeschweißte Blechteile (Grundelemente) ergeben zusammen ein Bauteil
Begriff	Rod91	Begriffe sind Abstraktionen (sprachliche Bezeichnungen), die Entsprechungen in der Wirklichkeit haben.

<u>Begriff</u>	<u>Quelle</u>	<u>Erklärung</u>
Effekt	Pah77(3)	Gesetz oder Grundsatz, der ein physikalisches , chemisches, biologisches usw. Geschehen beschreibt Der physikalische Effekt ist durch physikalische Gesetze, die die beteiligten Größen einander zuordnen, auch quantitativ beschreibbar: z.B. der Reibungseffekt durch das Coulombsche Reibungsgesetz
	Ers75	Ist die Bezeichnung für spezielle physikalische Erscheinungen. Er ist eine Relation zwischen zwei Systemen und liegt genau dann vor, wenn eine Änderung der physikalischen Eigenschaften des einen Systems eine Änderung der physikalischen Eigenschaften des anderen Systems zur Folge hat. (S.10)
	Rod91	Der physikalische Effekt ist der Zusammenhang zwischen Einflussgrößen eines physikalischen Geschehens. Der Effekt kann gesetzmäßig oder empirisch bekannt sein
	Kol76(4)	Physikalisches Phänomen, physikalische Erscheinung oder Ablauf eines physikalischen Geschehens, kausaler Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung, Wirkprinzip
Effektträger	Kol76(4)	Alle Arten von Stoffen oder ein Raum. Ein Raum kann beispielsweise als Leiter elektromagnetischer Wellen dienen. Als unterschiedliche Effektträger sollen zwei Stoffe gelten, welche sich wenigstens bezüglich eines Eigenschaftswertes unterscheiden
Eigenschaft		siehe Produkteigenschaft
Elementarfunktion	Pah77(3);	Funktion, die sich nicht weiter gliedern lässt und allgemein anwendbar ist
	Kol76	Eine kleinste, sinnvoll nicht mehr weiter teilbare (gliederbare) Funktion
Elementarfunktion, physikalisch-technisch	Kol76(4)	Beschreibung eines nicht mehr weiter gliederbaren Vorgangs (Tätigkeit). Beispielsweise Vergrößern eines Drehmomentes, Leiten einer Kraft oder Wandeln elektrischer Energie in mechanische Energie
Elementare Funktion	Ers75	Funktionen mit dem niedrigsten Komplexitätsgrad, die sich den sich berührenden (Wirk-) Flächen oder dem stoffgefüllten (Wirk-) Raum zuordnen lassen (S.9)
Entropie	Bro00	Physik: makrophysikalische Zustandsgröße thermodynamischer Systeme; der Teil der Wärmeenergie, der wegen seiner gleichmäßigen Verteilung auf alle Moleküle des Systems nicht in mechanische Arbeit umgesetzt werden kann.

<u>Begriff</u>	<u>Quelle</u>	<u>Erklärung</u>
Feld	Physik Lexikon	Bezeichnung für eine mit einem besonderen Zustand des Raumes verbundene Erscheinung, die durch eine oder mehrere Funktionen der Ortkoordinaten, den sogenannten Feldgrößen oder Feldfunktionen beschrieben wird (Feldvektoren)
Fernwirkung	eigene	Der Begriff der Fernwirkung hat damit im Elementmodell folgende Bedeutung: Die Fernwirkung geht von der Leitstützstruktur aus und wirkt direkt auf eine andere Leitstützstruktur, ohne dass die Eigenschaften eines Wirkflächenpaares diese Wirkung beeinflussen. Die Existenz zweier Wirkflächenpaare ist aber notwendige Bedingung für die technische Funktion
Fluid	Dubb29 (17), S.R1	Das Fluid umfasst alle Flüssigkeiten, Dämpfe und Gase, die den strömungsmechanischen Gesetzen nicht fester Kontinua folgen
fraktal	Dud97	vielfältig gebrochen, stark gegliedert, selbstabbildend
Funktion	eigene	Funktion stellt einen eindeutigen Bezug zwischen einer Eingangs- und einer Ausgangsgröße dar
	Dud97	(klar umrissene) Aufgabe innerhalb eines größeren Zusammenhangs, Rolle
	Bir00	Eine Funktion ist eine lösungsneutrale Beschreibung als Operation des gewollten Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgangsgröße
	VDI 2221	Lösungsneutral beschriebene Beziehung zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen eines Systems Es werden Gesamtfunktionen und Teilfunktionen sowie Haupt- und Nebenfunktionen unterschieden Der Funktionsbegriff wird in den Natur- und Ingenieurwissenschaften auch zur Darstellung eines physikalischen oder mathematischen Zusammenhangs, z.B. in Form einer Gleichung verwendet
	Ehr95	Eine Funktion im Sinne der Konstruktionsmethodik ist die lösungsneutrale Formulierung des gewollten (geplanten, bestimmungsgemäßen) Zwecks eines Produktes. Sie drückt die Zustandsänderung (Eigenschaftsänderung) eines Objektes (Umsatzprodukt) aus, die durch den Funktionsträger bewirkt wird
Funktion, technische	eigene	Die Funktion eines technischen Systems oder eines technischen Teilsystems wird als technische Funktion TF bezeichnet
technische Funktion (TF)	Pah77(3)	Allgemeiner und gewollter Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen

<u>Begriff</u>	<u>Quelle</u>	<u>Erklärung</u>												
	Rod70(4)	Technik (Konstruktion): Allgemeiner Wirkzusammenhang (WZH) oder die Abhängigkeiten zwischen den Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen eines Systems. Die logische, physikalische und konstruktive Funktionsstruktur wird durch die Verknüpfung oder Schaltung von Funktionselementen zur Erfüllung einer Gesamtfunktion bestimmt												
	Dud97	Mathematik: Zusammenhang zwischen Größen oder Größengruppen												
	Kol76(4)	Tätigkeit oder Fähigkeit technischer Gebilde. Qualitative und/oder quantitative (gesetzmäßige) Beschreibung oder Tätigkeit eines technischen Gebildes; beispielsweise „Kraft (500 N) leiten“												
Funktion systemtechnisch begründet	Bir00	Eine systemtechnisch begründete Funktion ist demnach eine lösungsneutrale Beschreibung des gewollten Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgangsgrößen im Black-Box-Modell durch Angabe der Größe(n) und Operation(en), evtl. ergänzt durch präzisierende Attribute oder Adjektive. Die Operationen werden dabei durch Substantiv und Verb (Infinitiv) beschrieben. Bsp: „Elektrische Energie in mechanische Energie wandeln“												
		<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left; width: 30%;">Eingangsgrößen</th> <th style="width: 40%;"></th> <th style="text-align: right; width: 30%;">Ausgangsgrößen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$E_{\text{ein}} \rightarrow$</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Größe(n) + Operation(en)</td> <td>$\rightarrow E_{\text{aus}}$</td> </tr> <tr> <td>$S_{\text{ein}} \rightarrow$</td> <td></td> <td>$\rightarrow S_{\text{aus}}$</td> </tr> <tr> <td>$St_{\text{ein}} \rightarrow$</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Substantiv + Verb (Infinitiv)</td> <td>$\rightarrow St_{\text{aus}}$</td> </tr> </tbody> </table> <p style="font-size: small; margin-top: 5px;">Funktionsdarstellung im BlackBox-Modell Quelle [Bir00]</p> </div>	Eingangsgrößen		Ausgangsgrößen	$E_{\text{ein}} \rightarrow$	Größe(n) + Operation(en)	$\rightarrow E_{\text{aus}}$	$S_{\text{ein}} \rightarrow$		$\rightarrow S_{\text{aus}}$	$St_{\text{ein}} \rightarrow$	Substantiv + Verb (Infinitiv)	$\rightarrow St_{\text{aus}}$
Eingangsgrößen		Ausgangsgrößen												
$E_{\text{ein}} \rightarrow$	Größe(n) + Operation(en)	$\rightarrow E_{\text{aus}}$												
$S_{\text{ein}} \rightarrow$		$\rightarrow S_{\text{aus}}$												
$St_{\text{ein}} \rightarrow$	Substantiv + Verb (Infinitiv)	$\rightarrow St_{\text{aus}}$												
Funktion unerwünscht	VDI 2803	Eine "unerwünschte Funktion" ist eine vermeidbare oder eine unvermeidbare, nicht gewünschte Wirkung des Wertanalyse Objektes												
Funktionsstruktur	Pah77(3)	Verknüpfung von Teilfunktionen zu einer Gesamtfunktion												
Funktionssynthese	Kol76	Die möglichen Funktionsstrukturen aufzeigen und die günstigste anzugeben, ist Aufgabe und Ziel von Arbeitsschritten, die zusammenfassend als Funktionssynthese bezeichnet werden sollen												
Funktionsträger	Pah77(3)	Technisches Gebilde, das eine Funktion erfüllt												
Generalisierung	Dud97	Verallgemeinerung												
	div	Physik: generalisierte Kraft kann z.B. ein Moment sein												
Gerät	Kol76(4)	Technisches Gebilde dessen primärer Zweck es ist, Daten in irgendeiner Weise umzusetzen und/oder einen Datenfluss zu ermöglichen												

<u>Begriff</u>	<u>Quelle</u>	<u>Erklärung</u>
Gestalten	VDI 2223 S.4	<p>Gestalten wird als das Festlegen der Gestalt und Werkstoffeigenschaften von Gestaltungselementen verstanden, die je nach Komplexität der Aufgabenstellung von Einzelflächen bis hin zu Maschinen und Anlagen reichen können</p> <p>Beim Gestalten legt der Konstrukteur Gestalt- und Werkstoffeigenschaften direkt fest (z.B. die Form und die Abmessungen eines Einzelteils und seinen Werkstoff.) (Direkt festgelegte Produkteigenschaften werden nach DIN 2300 auch Beschaffenheitseigenschaften genannt)</p>
Funktion, Gesamtfunktion	Pah77(3) VDI 2803	<p>Funktion, die die Aufgabe in ihrer Gesamtheit erfasst</p> <p>Die Gesamtfunktion ist die gesamte Wirkung aller ihrer in einer Funktionenstruktur untergeordneten Funktionen</p>
Gravitationsfeld	Atk74(2)	Das Gravitationsfeld in einem beliebigen Punkt des Raumes ist durch die Gravitationsbeschleunigung g gegeben, die ein kleiner Körper erfahren würde, wenn er an diesem Punkt gebracht wird. Es könnte auch als die Gravitationskraft pro Masseneinheit auf einen kleinen Körper in diesem Punkt definiert werden
Grundfunktion	Pah77(3)	<p>Funktion, die in einem bestimmten System (z.B. Baukasten) grundlegend und dort immer wiederkehrend ist</p> <p>Die Gesamtfunktion ist die gesamte Wirkung aller ihrer in einer Funktionenstruktur untergeordneten Funktionen</p>
Hauptfunktion	Pah77(3)	Teilfunktion, die unmittelbar der Gesamtfunktion dient
Heuristik	Bro00	<i>griechisch:</i> die (methodische) Kunst der Wahrheitsfindung; heuristische Prinzipien sind Regeln, Hypothesen, versuchsweise Annahmen, die nur vorläufig, im Hinblick auf das zu Findende aufgestellt, nicht als tatsächlich bzw. endgültig betrachtet werden.
Hypothese, die; -,n	Fre97	<p>Annahme, Vermutung, Unterstellung, unbewiesene Voraussetzung</p> <p>Ausformulierte Idee als Arbeitsgrundlage mit der Absicht, sie zu beweisen oder zu widerlegen</p>
Kausalität	Bro00	<ol style="list-style-type: none"> <i>allgemein:</i> der Zusammenhang von Ursache und Wirkung <i>Philosophie:</i> das Vorliegen eines (gesetzmäßigen) Wirkzusammenhangs zw. Ereignissen bzw. Erscheinungen in der Weise, dass ein Ereignis A unter bestimmten Bedingungen ein Ereignis B (mit Notwendigkeit) hervorbringt (verursacht), wobei die Ursache A der Wirkung B zeitlich vorausgeht und b niemals eintritt, ohne das vorher A eingetreten ist
Kausalität/ Kausalitätsprinzip	Bro00	Die universelle Gültigkeit der Kausalität behauptet das Kausalitätsprinzip, wonach jedes Geschehen seine (materielle)

<u>Begriff</u>	<u>Quelle</u>	<u>Erklärung</u>
		Ursache hat, und es keine ursachelosen „akausalen“ Dinge, Erscheinungen, Abläufe usw. gibt. Dieses in elementarer Form bereits von Aristoteles formulierte Kausalprinzip entspricht der Interpretation des Satzes vom zureichenden Grund: Nichts geschieht ohne Ursache. Von den ursprünglich vier Ursachearten des Aristoteles entspricht die Wirkursache (causa efficiens) der neuzeitlichen Kausalität, die zum universellen Erklärungsmodell der Naturwissenschaft wurde. Die anderen Ursachearten, besonders die Zweckursache wurden in der Neuzeit als unwissenschaftlich verworfen
		Kausalprinzip und Kausalgesetz (gleiche Ursachen haben gleiche Wirkungen)
Konstruktionsmethode	Kol76(4)	Regelwerk zum planmäßigen Entwickeln einer Lösung für eine bestimmte technische Aufgabenstellung
Kopplung (als Relation)	Hub73(2)	Eine Kopplung ergibt sich, wenn bestimmte Outputs des Elements (Systems) zugleich als Input eines Elementes (Systems) figurieren. Die Kopplung kann entweder in Serie, parallel, als Rückkopplung oder als Kombination angeordnet werden. Kopplungen können stofflicher energetischer oder informeller Art sein
Kraftleitungsstruktur	Ers75 101	Die von den Kraftleitungslinien gebildete Struktur. Verbindung zweier Wirkflächen
Logische Funktion	Pah77(3)	Funktion, die eine Verknüpfung zwischen Eingang und Ausgang in Form von Aussagen einer zweiwertigen Logik ermöglicht: UND, ODER, NICHT -Funktionen und deren Kombination
Lösung	Pah77(3)	Erfüllung der Aufgabe durch konkrete Angabe von Merkmalen zur stofflichen Verwirklichung
Maschine	Kol76(4)	Technisches System, dessen primärer Zweck es ist, Energie in irgendeiner Weise umzusetzen und/oder einen Energiefluss zu ermöglichen
Methode	Dud96	<i>griechisch:</i> wissenschaftlich planmäßiges und folgerichtiges Verfahren, Art des Vorgehens
	Pah77(3)	Planmäßiges Vorgehen zum Erreichen eines bestimmten Ziels
Methodik	Dud96	Verfahrenslehre , Verfahrensweise; Vortrags-, Unterrichtslehre
	Pah77(3)	Planmäßiges Vorgehen unter Einschluss mehrerer Methoden und Hilfsmittel
Methodiker	Dud96	Planmäßig Verfahrender; Begründer einer Methode

<u>Begriff</u>	<u>Quelle</u>	<u>Erklärung</u>
Modell	Dud96	Vereinfachte Darstellung der Funktion oder des Ablaufs eines Sachverhalts, die eine Untersuchung oder Erforschung erleichtert oder erst möglich macht
		Muster, Vorbild, Typ, Entwurf, Nachbildung, Gießform
	Pah77(3)	Ein dem Zweck entsprechender Repräsentant (Vertreter) eines Originals
Nebenfunktion	Pah77(3)	Teilfunktion, die die Hauptfunktion unterstützt und daher nur mittelbar der Gesamtfunktion dient (Einordnung je nach Betrachtungsebene unterschiedlich)
Paradigma	Dud97	Regelsystem, Muster, Modell
		(<i>ling.</i>) Beugungsmuster, Gesamtheit der Flexionsformen
Prinzip	Pah77(3)	Grundgesetz, Grundsatz, wovon Späteres oder Besonderes abgeleitet wird
Prinzip, physikalisch	Kol76(4)	Festlegung des Effektes, einer Effektekette und eines Effeketrägers, mit welchem eine bestimmte technische Funktion verwirklicht wird. Effekt und Effekträger legen die Gestalt eines technischen Gebildes nicht fest Beschreibung physikalischer Vorgänge (Tätigkeit; Ursache- Wirkzusammenhänge, Wirkprinzip)
Produkteigenschaft	Kol76(4)	Ein zum Wesen eines Produktes gehörendes Merkmal, wie beispielsweise Leistung, Lebensdauer, Zuverlässigkeit u.a. nicht als Eigenschaften eines Produktes sollen die ein Produkt beschreibenden Parameter bezeichnet werden
Prinzipielle Lösung	Pah77(3)	Kombination von Wirkprinzipien zum Erfüllen der Gesamtfunktion (Wirkstruktur) mit erster Konkretisierungsvorstellung
Struktur-Funktions- element	Ers75	Die Wirkflächen bilden zusammen mit dem sie verbindenden Wirkraum das Struktur-Funktionselement
Synthese	Dud97	1. (<i>philo.</i>) Vereinigung verschiedener geistiger Elemente zu einem neuen (höheren) Ganzen
		2. (<i>philo.</i>) Verfahren von elementaren zu komplexen Begriffen zu gelangen
	Bloom	einzelne Komponenten eines Sachverhaltes kombinieren und zu neuen Ganzheiten zusammenführen
	Ers75	schrittweise Ermittlung der Gestalt unter Berücksichtigung einschränkender Bedingungen mit anschließender Optimierung
System	Pah77(3)	Gesamtheit geordneter Elemente, z.B. Funktionen oder technische Gebilde, die aufgrund ihrer Eigenschaften durch Relationen verknüpft und durch eine Systemgrenze umgeben sind

<u>Begriff</u>	<u>Quelle</u>	<u>Erklärung</u>
	Ulr95	Ein System ist ein aus Teilen bestehendes Ganzes
Systematik	Pah77(3)	Ganzheitliche Betrachtung mit ordnenden Gesichtspunkten bzw. Merkmalen
Systemgrenze	Pah77(3)	Trennung zwischen System und Umgebung. Die nach außen bestehenden Verbindungen (Eingänge und Ausgänge), die das Systemverhalten zeigen, werden dabei kenntlich
Technisches Gebilde	Pah77(3)	Anlage, Apparat, Maschine, Gerät, Baugruppe oder Bauelement
	Ers75	Aufteilung des Technischen Gebildes: Maschine, Gerät: Mechanische Vorrichtung mit einer Gesamtfunktion, die zum Leiten, Ändern, Speichern und Verknüpfen von Stoff, Energie oder Nachricht dient Teilverband: Eine Zusammensetzung von Einzelteilen, die das Erfüllen einer (oder mehrerer) Teilaufgabe(n) übernimmt Einzelteil: Die fertigungstechnisch bedingte Kombination von Wirkraum und (Wirk-) Flächen Wirkraum- (Wirk-) Flächen: Die Orte an bzw. in dem Einzelteil, wo eine elementare Funktion erzwungen wird
Technisches System	Ehr95 S.21	Technische Systeme sind künstlich erzeugte geometrisch-stoffliche Gebilde, die einen bestimmten Zweck (Funktion) erfüllen, also Operationen (physikalische, chemische, biologische Prozesse) bewirken. Sie sind somit Sachsysteme (im oben definierten Sinne) Sieht man vornehmlich das geometrisch-stoffliche Gebilde und weniger den Prozess oder das Verfahren, welches das Gebilde durchführt, so spricht man von einem Technischen Produkt.
Teilfunktion	Pah77(3)	Funktion, die eine Teilaufgabe erfasst
These, die; -,n	Dud97	Kernsatz, wichtige Aussage, Lehrsatz Ausgangsargument, zu beweisende (wiss.) Behauptung <i>Gegensatz: Antithese</i>
Thermodynamische Funktion	Bro00	Für die mathematische Behandlung thermodynamischer Problemstellungen bedeutsame Funktion, die jeweils von zwei einfachen Zustandsgrößen (Druck, Volumen, Temperatur, Entropie) eines im Gleichgewicht befindlichen thermodynamischen Systems abhängen.

<u>Begriff</u>	<u>Quelle</u>	<u>Erklärung</u>
Verhalten	Bir00	<p>Das Verhalten ist die Beschreibung eines beobachteten oder gemessenen Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgangsgrößen beim Wirken eines realen Produktes</p> <p>(Das reale, teilweise auch unerwünschte Verhalten eines Produktes kann sich also mehr oder weniger von seiner gewollten Funktion unterscheiden. Funktion und Verhalten müssen deswegen also deutlich unterschieden werden. Der Unterschied ergibt sich aufgrund von Nebeneffekten wie z.B. Reibung, Erwärmung, Schwingungen sowie Bauteil- und Materialeigenschaften wie Masse, Elastizität, Dämpfung)</p>
Verbindungsstruktur	Kol76(4)	Die Festlegung welche Gestaltelemente (z.B. Bauteile) mit welchen anderen technisch verbunden sind
Wirkung	Bro00	<p><i>Philosophie:</i> ein Geschehen, das ohne ein anderes Geschehen, die Ursache, nicht stattfände. Nach dem Gesetz der Kausalität muss jedes Geschehen im naturgesetzlichen oder geschichtlichen (auch rechtlichen) Zusammenhang eine Ursache haben</p> <p><i>Physik:</i> 1. Größe der Dimension Energie x Zeit oder Impuls x Weg, Einheit ist J*s; 2. Größe, die eine Ein- oder Rückwirkung (Aktion oder Reaktion) bzw. Wechselwirkung ausdrückt (z.B. in der Mechanik, newtonsche Axiome)</p>
	Kir98	<p>Wirkung heißt "das als Vorgang oder Ergebnis gedachte Endglied des Kausalzusammenhangs."</p> <p>Der Kausalzusammenhang (die Kausalität) schließlich kann man bestimmen als</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Folgezusammenhang von Ursache und Wirkung 2) Abhängigkeit eines Geschehens von etwas anderem, durch das es <p>bedingt, bestimmt bzw. eindeutig festgelegt ist.</p> <p>Die causa formalis ist eine bildende, gestaltende Ursache</p>
Wirkbewegung	Pah77(3)	Bewegung mit der eine Wirkung ermöglicht oder erzwungen wird.
	Rod91	Definierte Bewegung oder Relativbewegung einer oder mehrerer Wirkflächen, gekennzeichnet durch Kraft-, Bahn-, und Geschwindigkeitsverlauf

<u>Begriff</u>	<u>Quelle</u>	<u>Erklärung</u>
Wirkfläche	eigene	Wirkflächen sind feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte ²³⁴ Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise im Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen und am Energie-, Stoff- und Informationsaustausch ²³⁵ des technischen Systems beteiligt sind.
Wirkflächenpaar		Wirkflächenpaare werden aus genau zwei Wirkflächen gebildet, die zeitweise, ganz oder teilweise, in Kontakt stehen und zwischen denen Energie, Stoff und Information übertragen wird
	Ers75	Ist diejenige Begrenzungsfläche, die mit einer zweiten Begrenzungsfläche eines anderen Einzelteils, mit einem zu bearbeitenden Produkt oder mit einer bedienenden Person in Berührung sind (von außen beanspruchte Fläche)
	Pah77(3)	Fläche, an der oder über die eine Wirkung ermöglicht oder erzwungen wird
	Rod73	Grenzfläche, die zwei Medien voneinander trennen. Grenzfläche zum Erzwingen eines physikalischen Geschehens Die Berührfläche zwischen Lager und Welle, die in ein Elektrolyt eingetauchte Fläche einer Elektrode oder die Phasengrenze zwischen Wasser und Wasserdampf in einem Dampfkessel sind alle Wirkflächen, solange die auf ihnen hervorgerufene Wirkung zum Erfüllen gewünschter Funktionen dient Nach Rodenacker können zwei Wirkflächen ein Wirkflächenpaar bilden ohne sich zu berühren (siehe Rod70 (4); S.152; Abb.2.1.3/19
	Kol76(4)	Teiloberfläche technischer Gebilde, welche für die Funktion (das Wirken) des betreffenden technischen Gebildes von wesentlicher Bedeutung ist, z.B. die Reibfläche einer Brems Scheibe

²³⁴ „Generalisiert“ wird hier in der Bedeutung „verallgemeinert“ in Anlehnung an die Physik verwendet, in der eine „generalisierte Kraft“ auch ein Moment oder ein Impuls sein kann.

²³⁵ „Energie, Materie und Information werden in der konstruktionsmethodischen Literatur grundlegend nebeneinander gestellt. Unter Energie wird in diesem Zusammenhang mechanische Energie, thermische Energie, elektrische Energie, Kernenergie, usw. verstanden. Gleichzeitig wird aber auch Kraft, Strom, Wärme usw. dem Begriff Energie zugeordnet. Dies ist physikalisch zwar nicht richtig, zeigt aber erneut, wie Ingenieure zu Vereinfachungen und Modellen neigen, solange sie zielführend sind. Im weiteren Verlauf der Arbeit soll der Begriff der Energie in diesem Sinne verstanden werden.“ Alb02/1

<u>Begriff</u>	<u>Quelle</u>	<u>Erklärung</u>
	Rot82(2)	Ist die Paarung zweier ursprünglich mindestens in einem Freiheitssinn gegeneinander beweglicher Glieder (oder Enden <i>eines</i> elastischen Gliedes) an zwei zu ihnen (ihm) gehörenden Wirkflächen. An dieser Stelle entsteht meist durch Berührung eine Wirkung. Im Unterschied zum Elementenpaar setzt man stets auch die Wirkungen von Funktionsgrößen (Kraft, Drehmoment, Geschwindigkeit usw.) voraus und betrachtet alle Berührstellen, die nicht in der gleichen kontinuierlichen Fläche liegen, als verschiedene Wirkflächenpaare.
Wirkgeometrie	Pah77(3)	Anordnung von Wirkflächen (bzw. -linien, -räumen), über die eine Wirkung erzwungen oder ermöglicht wird
Wirkkörper	Pah77(3)	Körper, durch den oder an dem eine Wirkung erzwungen oder ermöglicht wird
Wirkort	Pah77(3); Ers75 (S11); Rod70	Ort an dem durch Wirkflächen und Wirkbewegungen Wirkungen erzwungen oder ermöglicht werden
Wirkprinzip	Pah77(3)	Grundsatz von dem sich eine bestimmte Wirkung zur Erfüllung der Funktion ableitet physikalischer, biologischer, chemischer Effekte oder Effekte sowie geometrische und stoffliche Merkmale in Verbindung mit einer Teilfunktion
Wirkraum	Rot82(2)	Ist der die Wirkflächen verbindende stoffgefüllte Raum fester Körper
	Ers75	Stofflich erfüllter Raum, wo eine gewünschte Wirkung erzwungen wird. Stoff der den Raum erfüllt ist die Voraussetzung zum Hervorrufen der Wirkung
Wirkung	Ers75	Ist das Ergebnis, das durch einen physikalischen Effekt erzielt wird.(S10)
	Pah77(3)	keine explizite Definition
Wirkungsweise	Pah77(3)	Zusammenwirken von technischen Gebilden, um Funktionen nach bestimmten Wirkprinzipien zu erfüllen
Zustand	Mey79	In der Physik: Inbegriff sämtlicher physikalischer Größen eines physikalischen Systems, die es in jedem Zeitpunkt in seinen Eigenschaften und seinem (dynamischen) Verhalten eindeutig beschreiben und einander zugeordnete Werte haben, z.B. die Gesamtheit der thermodynamischen Zustandsgrößen und Zustandsfunktionen (zur Charakterisierung des thermodynamischen Zustands eines Systems). Häufig wird das besonders wichtige bzw. interessierende Charakteristika eines Zustandes hervorgehoben (so z.B. Bewegungs-, Spannungs-, Aggregats- oder Gleichgewichtszustand)

<u>Begriff</u>	<u>Quelle</u>	<u>Erklärung</u>
Zustandsgrößen	Bro99	Thermodynamik: mikroskopische Parameter, die kennzeichnend für den Zustand eines thermodynamischen Systems sind. Die direkt messbaren einfachen Zustände sind Druck, Temperatur und Volumen. Die damit verknüpften abgeleiteten Zustandsgrößen heißen <i>thermodynamische Funktionen</i> . [Danach ist die Entropie auch Zustandsgröße!]
Zweck	Pah77(3)	Ziel, Sinn eines Tuns, vorgestellter oder gewollter Vorgang oder Zustand
	Kol6(4)	Sinn eines technischen Produktes, oder: „Was soll ein technisches Produkt bewirken (z.B. ein Automobil vor Diebstahl sichern, Rasen kurz halten, Daten dokumentieren)“
Zweckfunktion	Kol76(4)	Die Funktion, welche den Zweck eines technischen Gebildes realisiert; kann auch als Haupt- oder Kernfunktion bezeichnet werden

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Sven Matthiesen
Geburtsdatum: 20. Januar 1971
Geburtsort: Gronau in Westfalen
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig

Studium

10/91 – 06/97 Studium des allgemeinen Maschinenbaus, Universität Karlsruhe (TH)
10/93 Diplomvorprüfung
11/93 – 02/95 Wissenschaftliche Hilfstätigkeit bei der Betreuung von Studierenden in den Übungen zur Maschinenkonstruktionslehre I bis III
01/95 – 07/95 Konstruktive Studienarbeit am Forschungszentrum Karlsruhe mit Patenterteilung und Prämierung durch Umweltpreis
08/95 – 08/96 Wissenschaftliche Hilfstätigkeit am Forschungszentrum Karlsruhe, Entwicklung und Konstruktion von Robotern zur Untersuchung von Altlastenverdachtsflächen
09/96 – 06/97 Wissenschaftliche Hilfstätigkeit am Institut für Maschinenkonstruktionslehre, Aufgabenbereich: Entwicklung und Konstruktion
11/96 – 05/97 Konstruktive Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit den Firmen GEZE und BASF
06/97 Diplomprüfung
21/10/02 Promotionsprüfung zum Doktor-Ingenieur der Fakultät für Maschinenbau an der Universität Karlsruhe (TH); mit Auszeichnung bestanden

Berufstätigkeit

07/97 – 11/97 Mitarbeiter der BMW AG München; Qualitätssicherung in der Karosseriemontage
12/97 – 11/02 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Arbeitsgruppe „Entwicklungsmethodik und Entwicklungsmanagement“
05/00 – 10/02 Mitglied der Studienkommission der Fakultät für Maschinenbau
25.-30.09.2000 Lehrauftrag an der Technischen Universität Sofia (Bulgarien) für das Fach
und 07.-16.04.00 „Maschinenkonstruktionslehre“