Gottfried Falk

Physik •

Zahl und Realität

Die begrifflichen und
mathematischen Grundlagen
einer universellen quantitativen
Naturbeschreibung

Mathematische Physik und Thermodynamik

1990 Birkhäuser Verlag
Basel • Boston • Berlin

Autor
Prof. Dr. Gottfried Falk
Heinrich-Weitz-Straße 23
D-7500 Karlsruhe 41

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Falk, Gottfried:

Physik: Zahl und Realität; die begrifflichen und mathematischen Grundlagen einer universellen quantitativen Naturbeschreibung; mathematische Physik und Thermodynamik / Gottfried Falk. – Basel; Boston; Berlin; Birkhäuser, 1990

ISBN-13: 978-3-0348-9921-5

e-ISBN-13: 978-3-0348-9135-6

DOI: 10.1007/ 978-3-0348-9135-6

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2 UrhG werden durch die «Verwertungsgesellschaft Wort», München, wahrgenommen.

© 1990 Birkhäuser Verlag Basel

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1990

Printed on acid-free paper

ISBN-13: 978-3-0348-9921-5

VORWORT

Was den Leser erwartet

Unter den Naturwissenschaften steht die Physik im Ruf besonderer Exaktheit. Der Grund hierfür ist die Rolle, die die Zahl und damit die Mathematik in ihr spielt. Die anerkannte Wichtigkeit des Messens für die Physik unterstreicht diese Feststellung, denn „Messen“ bedeutet nichts anderes, als eine Beobachtung in Zahlen auszudrücken. In Anbetracht dieser Sachlage ist man versucht, Physik geradezu als das Bemühen zu bezeichnen, die Natur, die Welt mit Hilfe des *Begriffs der Zahl* beschreibend zu erfassen.

Ist das, was wir Physik nennen, aber tatsächlich in dieser Weise festlegbar? Zwar kennt die Physik eine große Anzahl von Formeln, d.h. (formalisierter) Aussagen, die mit dem Begriff der Zahl operieren — etwa die Fallgesetze, die allgemeine Gasgleichung, die Balmer-Formel des Wasserstoffs und viele mehr —, aber es gibt auch physikalische Aussagen, in denen Zahlen nur eine untergeordnete, unter Umständen gar keine Rolle spielen, so die Behauptung, daß alle Materie aus bestimmten elementaren Bausteinen, den Elementarteilchen, zusammengesetzt ist, oder daß es unmöglich ist, Prozesse in der Welt zu realisieren, die gegen die beiden Hauptsätze der Thermodynamik verstoßen. Diese nicht direkt (und unmittelbar erkennbar) an die Zahl gebundenen Aussagen stehen — wie die beiden eben genannten — oft sogar im Ruf besonderer Fundamentalität.

Wird nun die Zahl in der Physik nur mehr oder weniger zufällig verwendet, oder besteht zwischen denjenigen physikalischen Aussagen, die unabhängig an Zahlen — an Daten, wie man heute lieber sagt — gebunden sind, und solchen, die ohne Zahlen und damit ohne Mathematik auskommen oder auszukommen scheinen, ein grundsätzlicher Unterschied? Dem traditionellen physikalischen Denken erscheint diese Frage belanglos, jedenfalls ist sie kein Gegenstand der etablierten Lehre. Daß sie indessen weder belanglos noch „akademisch“ ist, beweist die im vorliegenden Buch begründete, für manchen sicher unerwartete Antwort:

Zwischen den beiden angeführten Aussagetypen der Physik besteht logisch ein fundamentaler Unterschied. Er beruht darauf, daß alles Beobachten (wozu auch das Messen gehört), wie auch die Weitergabe des (wirklich und nicht vermeintlich) Beobachteten grundsätzlich mittels *endlich vieler* Daten geschieht. Das *Unendliche*, in welcher Form es auch auftritt, ist niemals Folge der Beobachtung, sondern stets *freie Zutat unserer Art, das Beobachtete zu beschreiben*. Die Aussagen der Physik über die Natur zerfallen deshalb in zwei grundsätzlich verschiedene Typen: In solche, die mit endlich vielen Daten auskommen, und solche, deren quantitative Fassung unendlich viele Daten erfordert. Die ersten nenne ich *naturwissenschaftlich*,

die zweiten *transzendent* oder *metaphysisch* — denn sie behaupten Sachverhalte, die unsere Erfahrung prinzipiell übersteigen, da sie mehr Daten erfordern als unsere Beobachtungen und Messungen je zu liefern vermögen.

Überraschend ist nun, daß, mit dieser logischen Elle gemessen, so vertraute und hoch bewertete Aussagen wie die beiden Hauptsätze der Thermodynamik, oder die Behauptung, daß die Materie aus ein für alle mal, also absolut gegebenen „letzten Bausteinen“, eben den Elementarteilchen, zusammengesetzt ist, nicht naturwissenschaftlich, sondern metaphysisch sind. Im Grunde ist es jedoch nicht weniger überraschend, daß es überhaupt Aussagen der Physik gibt, die von finiter Art, in der Terminologie dieses Buches also naturwissenschaftlich sind.

Diese wenigen Bemerkungen mögen fürs erste genügen, um die Behauptung zu rechtfertigen, daß es im vorliegenden Buch nicht um eine „akademische“, sondern um die konkrete Frage geht, was die Physik zur *Wissenschaft* macht, d.h. zu einem Kanon *beweisbarer und damit allgemein-verbindlicher Aussagen* (nicht etwa über die Natur und die ihr „zugrundeliegende Wirklichkeit“, sondern) über unsere quantitativen, d.h. in Zahlen faßbaren Erfahrungen mit der Realität, mit den realen Phänomenen.

Eine Wissenschaft vom Umfang der Physik ist nicht das Werk eines Einzelnen, oder weniger Einzelner, sondern das gemeinsame Werk vieler Generationen forschender und denkender Menschen. Es ist eine Art geistigen Turmbaus, an dem Individuen mit den unterschiedlichsten Absichten, Auffassungen und Interessen beteiligt sind. Wenn trotz dieser Vielfalt aber kein Turmbau zu Babel, sondern ein Ganzes von Bestand herauskommen soll, so gelingt das nur, wenn aus freier Entscheidung gewisse, Harmonie und Konsens schaffende Regeln des Handelns und Denkens anerkannt werden, Regeln, die mehr sind als temporäre Modeerscheinungen. Das mathematisch-logische Denken liefert derartige, wie freiwillig anerkannte Zwänge wirkende Regeln und stellt damit ein vorzügliches Mittel dar, intellektuelle Strukturen zu errichten, die als allgemein-verbindlich gelten können.

In jahrzehntelangem Bemühen habe ich versucht, aus dem, was uns die letzten drei Jahrhunderte als Erbe an Physik hinterlassen haben, einen begrifflich-mathematisch harten Kern herauszuschälen, der ähnliche Allgemeinverbindlichkeit beanspruchen kann, wie sie der Mathematik von jeher zugestanden wird. Im vorliegenden Buch zeige ich, wie der harte Kern der *Thermodynamik* aussieht, d.h. jenes Teils der Physik, der nach verbreiteter Auffassung zu ihren bestfundierten Gebieten zählt. Hierzu gehört (überraschenderweise) auch die Hamilton-Theorie, denn diese läßt sich, wie wir (im Kap. V des 2. Teils) zeigen, als thermodynamische Beschreibung der Mechanik ansehen. Damit wird bereits ein typisches Resultat der logisch verschärften Fassung der Physik sichtbar: Entgegen der herkömmlichen Auffassung ist nicht die Thermodynamik eine Folge der (um statistische Postulate erweiterten) Mechanik, sondern umgekehrt die Mechanik ein Spezialfall der in der

Thermodynamik entwickelten mathematischen Beschreibung der Realität in Anwendung auf traditionell „mechanisch“ genannte Erfahrungstatbestände.

Vermutlich wird der Leser fragen, welche mathematischen und physikalischen Voraussetzungen er mitbringen sollte, um das Buch mit Gewinn zu lesen. Darauf kann ich nur antworten, daß ich mich nach Kräften bemüht habe, die entscheidenden Überlegungen von mathematisch-technischen Details so frei zu halten, wie ich konnte, schon um die wichtigsten Gedanken auch demjenigen zu vermitteln, der geistige Orientierung sucht, für den der Umgang mit dem Werkzeug Mathematik jedoch nicht zum täglichen Brot gehört. Der Text enthält daher immer wieder Passagen, in denen ich allein mit sprachlichen Mitteln auszukommen versuche, um die begriffliche und logische Sachlage auseinanderzusetzen. Ich habe auch Wiederholungen nicht gescheut, wenn sie meiner Meinung nach einem flüssigeren Lesen zu gute kommen. Dennoch war die Mathematik nicht ganz zu vermeiden, denn entscheidend für die naturwissenschaftliche Verbindlichkeit einer Theorie ist nun einmal ihre mathematische Formulierung. Ob und wie weit es mir aber tatsächlich gelungen ist, das Buch auch dem mathematisch-physikalischen Nichtspezialisten zugänglich zu machen, muß der Leser selbst entscheiden. In keinem Fall erwarte er jedoch eine Darstellung *ad usum delphini*, oder gar eine populärwissenschaftliche Unterhaltung, sein Mitdenken ist jederzeit und überall erforderlich. Im übrigen kann mit dem 2. Teil des vorliegenden Buches ebenso gut begonnen werden wie mit dem 1., denn beide Teile sind weitgehend voneinander unabhängig. Ähnliches gilt sogar für die einzelnen Kapitel des 2. Teils. Ein in mathematischem Denken geübter Leser wird, so hoffe ich, das Buch leicht lesbar finden. Er kann die Lektüre beginnen, wo er will, denn auf die Reihenfolge der Einzelheiten kommt es nicht an (sondern nur auf ihr gesamtes Geflecht).

Physikalische Vorkenntnisse des Lesers sind natürlich vorteilhaft, aber nicht unbedingt erforderlich. Lediglich für das Mittelstück des 1. Teils, das eine Übersicht über die begrifflich-mathematische Struktur der sogenannten „klassischen“ Theorien der Physik (von Newtons Mechanik bis zu Einsteins Relativitätstheorie) enthält, sind sie notwendig. Im 2. Teil ist die Kenntnis traditioneller Auffassungen nicht einmal unbedingt von Vorteil. Einmal wird der hier propagierte (Gibbssche) Aufbau der Thermodynamik vollständig entwickelt, zum anderen wird dieser für die meisten Leser vermutlich neu sein. Ein gewisses Umlernen ist daher wohl in jedem Fall nicht ganz zu vermeiden, und das ist nicht immer leichter als Neulernen.

Ein Wort noch zu den das ganze Buch durchziehenden historischen Bezugnahmen. Sie stützen sich durchweg auf die Originalabhandlungen und Werke der angegebenen Autoren. Dabei kann es kaum ausbleiben, daß der Leser hin und wieder Unterschiede zu Interpretationen derselben Textstellen durch andere Autoren feststellen wird. Es ist schwerlich möglich, die Wiedergabe des geistigen Inhalts einer Abhandlung vom Denken des Interpreten völlig frei zu halten (besonders dann wenn es um die Einschätzung

der wissenschaftlichen Tragweite von Ideen geht). Das wird durch das bekannte Beispiel der Interpretation der Machschen „Mechanik“ durch Einstein wohl hinreichend belegt. Letzterer hat Machs Werk stets als Quelle entscheidender Anstöße zu seiner Allgemeinen Relativitätstheorie bezeichnet. Als er dem Urheber dieser Anregungen als Ausdruck des Dankes seine Abhandlungen über die Allgemeine Relativitätstheorie jedoch zusandte (in der Einstein selbst die konsequente Fortsetzung und Vollendung Machscher Einsichten erblickte), vermochte Mach keinen Zusammenhang zwischen seinen und Einsteins Ideen zu erkennen: Er hatte nach eigener Ansicht offenbar etwas anderes in seine „Mechanik“ hineingeschrieben, als Einstein herausgelesen hat.

Im vorliegenden Buch sind die Interpretationen der historischen Texte auch nur das, was ich aus den Werken der großen Naturforscher herausgelesen habe (und vielleicht nicht das, was sie hineingeschrieben haben). Aber welche Interpretation des geistigen Inhalts von Dokumenten der Vergangenheit könnte mehr behaupten?

Gegenstand und Ziel des Buches

Dem eigentlichen Thema des Buches habe ich in einem 1. Teil einen Essay vorangestellt, der als Übersicht wie als Einführung dienen kann. Sein Ziel ist es, den Zusammenhang zwischen der Sichtweise der Physik, wie sie in diesem Buch vorgestellt wird, und gewohnten, vornehmlich durch die Mechanik geprägten Sichtweisen aufzuzeigen und deutlich zu machen, daß die hier entwickelten Gedanken einer verpflichtenden geistigen Tradition folgen. Dabei habe ich mich, wie schon gesagt, bemüht, die mathematischen Details so elementar und durchsichtig zu halten wie der Gegenstand und meine Fähigkeit ihn darzustellen es mir erlaubten, ohne dem Gedanken die für eine mathematische Behandlung charakteristische Schärfe zu nehmen. So wird, wie ich hoffe, die Absicht des Buches auch dem Leser deutlich, der zwar an der mathematischen Naturwissenschaft und ihren erkenntnistheoretischen Aspekten interessiert ist, für den es aber eine Zumutung bedeuten würde, die zum Teil mühsamen, wenn meist auch elementaren Details des 2. Teils („Thermodynamik“) selbst in einen größeren Zusammenhang zu bringen. Allerdings ist dabei in erster Linie an einen Leser gedacht, der über ein gewisses physikalisches Grundwissen verfügt, etwa das, was herkömmliche Ausbildungsgänge vermitteln.

Es geht in diesem Buch ausschließlich um *mathematische Naturwissenschaft*, das heißt um die *quantitative*, auf das Messen und damit *auf die Zahl gegründete Beschreibung unserer Erfahrungen* mit der Realität. Das betrifft die begrifflich-logische Seite dieser Beschreibung ebenso wie ihr Verhältnis zu dem, was man naturwissenschaftliche Erkenntnis zu nennen pflegt. So geht es unter anderem auch um das Weltbild, das die Physik seit nunmehr drei Jahrhunderten als rational-verbindlich anbietet. Vor allem aber

und in erster Linie geht es um eine *Beschreibungsweise* realer, empirischer Sachverhalte, die der Thermodynamik entstammt und die ich deshalb *thermodynamisch*, oder kurz *dynamisch* nenne. Entgegen dem ersten Namen ist diese Beschreibungsweise keineswegs auf Probleme der Wärme beschränkt, sondern auf die ganze Physik anwendbar.

Die Wissenschaft Physik trat ihren Weg an mit dem Ziel, die Welt und das Geschehen in ihr in Form mathematischer Gesetze zu begreifen. Diese Gesetze schienen unlösbar verknüpft mit einem Weltbild, das auf Beobachtung und Experiment sowie die mathematische Fassung der durch diese gewonnenen Erfahrungen gegründet schien. Nach allgemeiner Überzeugung kam diesem Weltbild ein Grad von Zuverlässigkeit zu, der sonst nur mathematischen Wahrheiten zugestanden wird. Diese Sicht der Physik war bis zum Beginn unseres Jahrhunderts praktisch unangefochten.

Seitdem aber hat sich ein Wandel vollzogen. Verbreitete Redewendungen wie die von der „Revolution“ oder dem „Umsturz“ im Weltbild der Physik verraten, daß dieser Wandel zwar allgemein gespürt, seine wahre Natur jedoch selten klar erkannt wurde. Rein äußerlich (wie es schien) machte er sich darin bemerkbar, daß die Begriffe, mit denen man — um mit der Erfahrung in quantitativer Übereinstimmung zu bleiben — zu operieren gezwungen war, immer mathematischer und damit der Anschauung unzugänglicher wurden. Gleichzeitig verlor die alte Anschauung ihre Zuverlässigkeit. Mehr und mehr mußte sie abgeändert und um ad hoc-Annahmen ergänzt werden, die keine intuitiv begreifbare Eigenevidenz besaßen, sondern die allein durch die neuen mathematischen Beschreibungsmittel erzwungen wurden. Die Anschauung diente häufig bloß noch der nicht-mathematischen, nur zu oft unzureichenden Verständlichmachung mathematischer Zusammenhänge. Sie wurde mehr und mehr zum *Modell*, d.h. zur begrenzten, nur noch speziellen Zwecken dienenden, jedoch verallgemeinerungsunfähigen Illustration. Natürlich kommt einer solchen Anschauung auch keine logische Verbindlichkeit mehr zu. Zwingend ist allein die mathematische Formel. Was war geschehen, worin unterscheidet sich die Physik unseres Jahrhunderts von der früheren?

Wörter wie „Revolution“ oder „Umsturz“ bringen nur ungenügend zum Ausdruck, was es mit dem Wandel auf sich hat. Es geht nämlich nicht darum, ein Weltbild, an das man geglaubt hat, durch ein anderes, neues zu ersetzen, sondern darum, die Idee eines naturwissenschaftlichen Weltbilds überhaupt aufzugeben. Im Gegensatz zur mathematischen Naturwissenschaft des 18^{ten} und 19^{ten} Jahrhunderts hat die moderne Physik gar kein Weltbild im gewohnten Sinn des Wortes mehr anzubieten. Zwar verführen alte Sprach- und Denk-Gewohnheiten den Physiker — und mit ihm andere — dazu, nach wie vor an ein naturwissenschaftliches Weltbild zu glauben, aber nach den Einsichten, die die moderne Physik gewonnen hat, steht außer Frage, daß die logische Verbindlichkeit nicht nur dieses, sondern eines

wissenschaftlichen Weltbilds überhaupt eine Illusion war. Die naturwissenschaftlich wie philosophisch zentrale neue Einsicht ist: *Ein mathematisch-naturwissenschaftliches Bild der Welt, das logische Verbindlichkeit besitzt, kann es gar nicht geben.*

Das bedeutet nicht, daß die Physik unserer Zeit nicht nach wie vor reale Phänomene in quantitative Zusammenhänge zu bringen sucht. Sie tut das sogar in höherem Maß als früher und gewiß mit vergleichbarem Erfolg. Die Zusammenhänge führen jedoch nicht zu einer Gesamt-*Schau*, zu einem *Bild* der Welt, das auch ohne Mathematik verständlich und (a priori) einleuchtend ist. Logisch verbindlich ist allein ein abstraktes *Gefüge von Relationen zwischen Begriffen, die freie Erfindungen des menschlichen Geistes sind* und nicht, wie man einst glaubte, Bilder von Realitäten, die es auch ohne den menschlichen Geist gibt — so wie Lebewesen, Steine, Erde, Mond, Sonne Realitäten sind, die es ohne den menschlichen Geist gibt. *Unsere Erfahrung mit der Realität schlägt sich naturwissenschaftlich-quantitativ allein in Beziehungen nieder, die zwischen erfundenen Begriffen bestehen — oder vielmehr von uns so festgelegt werden, daß sie die realen Erfahrungen wiedergeben —, nicht aber in Bildern, die wir uns von diesen Begriffen machen.*

Zwar können Beziehungen zwischen Begriffen auch durch Bilder vermittelt werden, aber nur in seltenen Fällen gelingt es, diese Beziehungen auf ein gewünschtes Maß zu beschränken und von überflüssigem, ja fehlleitendem Beiwerk freizuhalten. Das war in der klassischen Physik weitgehend gelungen, und dadurch war der Eindruck entstanden, das Bild der Welt, das sie vermittelte, trüge wissenschaftlich-verbindliche Züge. Die Physik unserers Jahrhunderts folgt dagegen einem von der Mathematik längst beschrittenen Weg: Wo sie sich nicht mehr auf die intuitive Anschauung, auf (vermeintlich) apriorische Gewißheiten, sondern nur noch auf das mathematische Denken stützen kann, führt sie nicht zu logisch zwingenden bildhaften Begriffen, somit auch nicht zu einem Weltbild, sondern nur zu mathematischen Begriffsstrukturen, deren Verbindlichkeitsanspruch allein in der Logik ihrer Konstruktion liegt.

Die Wandlung, die wir in der mathematischen Naturwissenschaft erleben, ist, so behaupte ich, der Schritt von der naiv-idealisierenden Anschauung zum mathematischen Denken — ein Schritt, der von der Mathematik, wie gesagt, längst vollzogen worden ist (und uns deshalb als Vorbild dienen kann). Wissenschaftlich handelt es sich dabei keineswegs um einen bedauerlichen Rückschritt gegenüber einer harmonischeren Vergangenheit, sondern um eine sachgemäße Fortentwicklung des Jahrtausende alten Versuchs, die Welt mit Hilfe der Zahl zu begreifen, oder besser, die mit Hilfe der Zahl begreifbare Seite der Welt zu erweitern, auszudehnen. Diesen Sachverhalt, seine naturwissenschaftlichen und philosophischen Implikationen sowie seinen Zusammenhang mit der (thermo-)dynamischen Beschreibungsweise der

Natur bewußt zu machen, ist ein zweites Ziel des hier präsentierten Versuchs einer Standortbestimmung der mathematischen Naturwissenschaft, d.h. der Physik unserer Zeit.

Danksagung

Meinem Freund und Kollegen Wolfgang Ruppel danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskripts sowie für eine Reihe von Verbesserungsvorschlägen. In wissenschaftlicher, didaktischer und textverarbeitender Hinsicht erfreute ich mich der tatkräftigen Unterstützung meiner jungen Kollegen Gunter Heiduck und Arnd Diestelhorst. Meinem Sohn Klaus Falk danke ich für das Zeichnen der Abbildungen. Nicht zuletzt gilt mein Dank Frau Evmarie Schwartz, die die Reinschrift des Manuskripts besorgte und meine vielen Änderungswünsche geduldig ertrug.

Karlsruhe, im August 1990

G. F.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Teil Mathematische Naturwissenschaft: Einordnung in eine wissenschaftliche Tradition

Das mechanistische Weltbild	3
Anschauung und Denken	6
Das Unendliche	8
Gleichheit und Nicht-Unterscheidbarkeit	12
Zahl und Größe	14
Geometrie: Urbild mathematischer Naturwissenschaft	19
Axiomatik: Mathematik als Sprache	26
Die Kinematik der Newtonschen Mechanik	31
Newtons Dynamik	34
Die Retardierung und ihre Folgen	41
Elektrodynamik	48
Das System „Elektromagnetisches Feld“	55
Die Elektronentheorie von Lorentz	58
Energie- und Impulsbilanz des Elektromagnetischen Feldes	65
Mechanik in feldtheoretischer Darstellung	71
Das Problem der Synthese von Mechanik und Elektrodynamik	76
Konstruktion einer zu Maxwells Theorie passenden Mechanik	81
Relativitäts- (= Symmetrie-)Prinzipien	84
Einsteins Kinematik	92
Einsteins Verschärfung der Maxwellschen Theorie	100
Das Weltbild der Relativitätstheorie und die Frage seiner Naturwissenschaftlichkeit	107
Der Begriff der allgemein-physikalischen Größe	111
Thermodynamik in traditioneller Sicht	115
Das (thermo-)dynamische Beschreibungsverfahren	118

2. Teil Thermodynamik

I. Die Anfänge der Lehre von der Wärme

1. Exakte Naturwissenschaft	125
2. Historische Auffälligkeiten	126
3. Das Größenpaar Wärmemenge und Temperatur	130
4. Historische Anmerkungen zum Begriff der Wärme	132
5. Der Begriff der Wärmekapazität	133
6. Kalorimetrie	136
7. Historischer Rückblick: Die Messung der Temperatur	138
8. Der Begriff der latenten Wärme	141
9. Ein exaktes Meßverfahren für Wärmemengen	145

10. Das Problem der adiabatischen Vorgänge	147
11. Prozesse mit konstantem Wert von S	150
12. Die Erzeugung von Wärme	154

II. Wärme und Arbeit

13. Das Carnotsche Prinzip	159
14. Das Prinzip von der Unmöglichkeit eines perpetuum mobile	166
15. Der Carnotsche Kreisprozeß	167
16. Das Mengenmaß der Carnotschen Theorie	171
17. Historischer Rückblick: Gastemperatur und chemisches Mengenmaß	176
18. Absolute Temperatur und historische Gastemperatur	180
19. Verwendung des thermodynamischen Mengenmaßes	185
20. Konstruktion einer weiteren mengenartigen Größe	189
21. Das Problem der Irreversibilität	192

III. Thermodynamik

22. Gibbs: Thermodynamik als mathematisch- naturwissenschaftliche Theorie	197
23. System-unabhängige und system-abhängige Relationen zwischen Größen	201
24. Ein Satz über ideale Gase	207
25. Mathematische Grundregeln der Thermodynamik	212
26. Der Begriff der Massieu-Gibbs-Funktion	216
27. Gleichgewicht und Stabilität	219
28. Beispiele von M-G-Funktionen	227

IV. Die mathematischen Grundlagen der Thermodynamik

29. Vorbemerkungen	235
30. Das Begriffstripel Größe-Wert-Zustand	237
31. Die mathematische Realisierung der Begriffe „Größe“ und „Wert“ in der klassischen Physik	240
32. Die mathematische Realisierung des Begriffs „Zustand“ in der klassischen Physik	243
33. Größenbereiche	245
34. Differentiation im Größenbereich	250
35. Homogene Elemente eines Größenbereichs	254
36. Das Zusammenspiel der Begriffe „Größe“ und „System“	256
37. Homogenität der M-G-Elemente und extensive Größen	263
38. Mechanik in thermodynamischer Beschreibung	268
39. Intensive Größen	270
40. M-G-Funktionen im Wertebereich	274
41. Systemcharakterisierung mittels intensiver Variablen	277
42. Beispiele physikalischer Standard-Systeme	280

43. Systemreduktion	289
44. Gleichgewichte, Extremaltheoreme, Stabilität	291
45. Beispiele: Gleichgewichte und Reduktionen	297
46. Zerlegung und Zusammensetzung von Systemen.....	309
47. Beispiele zerlegbarer und unzerlegbarer Systeme.....	313
48. Zerlegung idealer Gase: Die statistische Interpretation der Thermodynamik.....	328
49. Der thermodynamische Atom- und Molekülbegriff.....	339
50. Atomphysikalische Anwendungen	347
51. Der (thermo-)dynamische Begriff der Elementarität	355
52. Geometrische und physikalische Ausdehnung.....	367
 V. Hamilton-Theorie: Die thermodynamische Fassung der Me- chanik	
53. Herkömmliche Darstellung der Hamilton-Mechanik.....	379
54. Hamiltonsche Größenbereiche.....	382
55. Mechanische Systeme und ihre Größen	387
56. Erzeugendenwechsel und Automorphismen	394
57. Kanonische Transformationen.....	399
58. Lie-sche Scharen kanonischer Transformationen	404
59. Bewegungen.....	410
60. Formale Potenzreihen und ihre Konvergenz	417