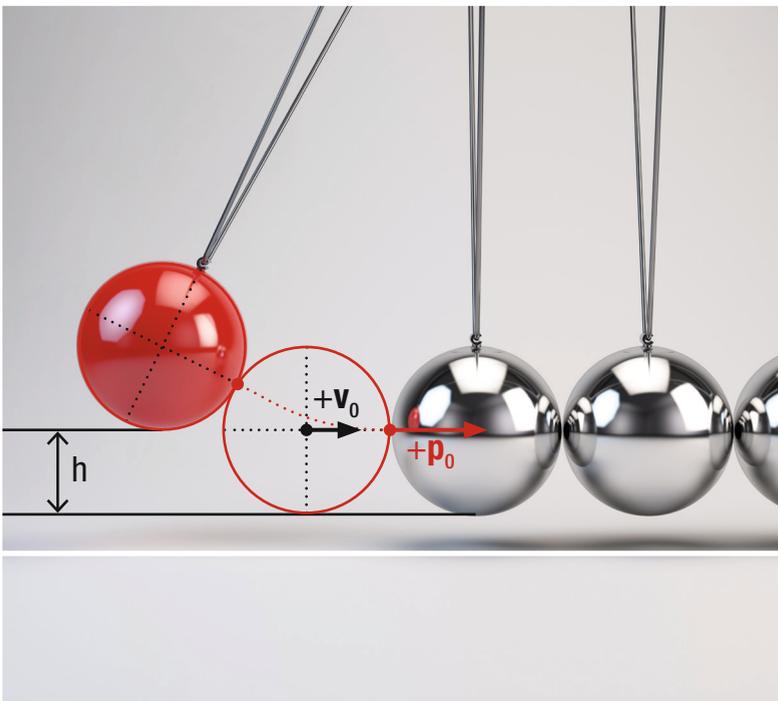


Werner Bieck

Impulsströme

Eine Einführung in die Grundlagen der
physikalischen Modellierung



HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Werner Bieck

Impulsströme

Eine Einführung in die Grundlagen der
physikalischen Modellierung

HANSER

Über den Autor:

Dr. Werner Bieck, Dipl.-Phys. und wissenschaftlicher Autor, Wiltingen



Print-ISBN: 978-3-446-47702-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-47789-6

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2024 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © shutterstock.com/Sashkin

Satz: Eberl & Kösel Studio, Kempten

Druck und Bindung: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

Für Ulrike ...

In Erinnerung an einen besonderen Menschen - Rosi.

Vorwort

„Der Spaß an der Wissenschaft liegt nicht in der Entdeckung von neuen Sachverhalten, sondern darin, neue Denkansätze für sie zu entwickeln.“

William Lawrence Bragg¹

Im Verlauf der naturwissenschaftlichen Ausbildung von Schülern und Studenten ist leider immer wieder festzustellen, dass ein wesentlicher Aspekt wissenschaftlichen Arbeitens konsequent vernachlässigt wird: Die Vermittlung der Grundzüge physikalischer Modellierung. Eine dezidierte Unterscheidung zwischen Modell und Erfahrungswelt (→ „*Realität*“), welche in der Naturwissenschaft immer nur ausschnittsweise durch ein geeignet zu wählendes Modell beschrieben werden kann, findet nicht statt. Vielmehr vermittelt die Lehre oftmals den falschen Eindruck, dass ein Modell – einmal validiert – der Realität gleichzusetzen sei, d. h. Modelle herangezogen werden können, um Phänomene aus der Erfahrungswelt zu *erklären*, also im Sinne von *zu beweisen, warum* sich Dinge genau so verhalten, wie zu beobachten ist. Dieser Eindruck wird bereits in der Schulausbildung bewusst oder unbewusst vermittelt, verbaut dadurch oftmals die Sicht auf die wesentlichen Aspekte naturwissenschaftlicher Arbeit und sorgt selbst später im Studium für Verwirrung, insbesondere dann, wenn verschiedene und scheinbar widersprüchliche Modelle herangezogen werden können, um die gleiche Sache zu *beschreiben*. *Erklärung* im wissenschaftlichen Kontext heißt eben nur, dass man Phänomene mithilfe eines Modells auf wenige grundlegende Prinzipien zurückführen und hierüber klassifizieren kann. *Nicht mehr, aber auch nicht weniger!*

Ein schönes Beispiel hierfür ist das physikalische Konzept der „*Kraft*“, worauf wir noch später im Buch ausführlich eingehen werden. Diese Modellvorstellung wurde seinerzeit u. a. von Isaac Newton axiomatisch eingeführt und seither von Generationen von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren erfolgreich eingesetzt, um unterschiedlichste Bereiche der Erfahrungswelt zu beschreiben. Dennoch hat bis zum heutigen Tage *niemand* jemals eine „*Kraft*“ *gemessen*! Das Konzept der Kraft ist vielmehr eine reine Modellgröße, gewissermaßen eine Rechenvorschrift innerhalb der Modellwelt, deren Entsprechung in der realen Welt immer noch nicht gefunden wurde, weil nicht gefunden werden kann. Diese Aussage mag auf den ersten Blick überraschen, zumal doch bereits in der Schule scheinbar überzeugend vermittelt wird, was „*Kräfte*“ sind und wie diese wirken, um in der Folge bereitwillig zu akzeptieren, es täglich mit „*realen Kräften*“ zu tun zu haben, die sich zudem mithilfe von „*Kraftmessern*“ auf einfache Weise messtechnisch erfassen lassen. Ein

grundlegender Irrtum, welcher letztlich auf ein fehlendes Modellverständnis zurückzuführen ist.

Die mangelnde Differenzierung zwischen Modell und Realität sorgt nicht nur bei der theoretischen Beschreibung physikalischer Zusammenhänge für Probleme, auch der experimentelle Zugang wird oftmals fehlerhaft interpretiert. Einerseits ist der Messaufbau häufig theoretisch motiviert, dient er doch der Validierung theoretischer (Vor-)Überlegungen mittels quantitativer Erfassung bestimmter modellspezifischer Größen. Andererseits stellt das Experiment oftmals eine Vereinfachung der zu untersuchenden realen Gegebenheiten dar, um beispielsweise auf diese Weise erst einen messtechnischen Zugang zu ermöglichen, welcher ansonsten aufgrund der Komplexität der Problemstellung oder aufgrund gegebener apparativer Einschränkungen scheitern müsste. Das Experiment kann somit selbst wieder ein eigenes Modell der Erfahrungswelt sein und die zugehörige Messgröße, d. h. beispielsweise die *reale* Digitalanzeige eines Messinstrumentes, kann in der Folge nur bedingt der *theoretischen* Modellgröße entsprechen! Leider ist aber immer wieder festzustellen, dass bei einer quantitativen Abweichung zwischen Theorie und Experiment der *realen* Anzeige eines Messgerätes mehr Vertrauen entgegengebracht wird als jeder *theoretischen* Simulation. Nicht selten unterliegt man intuitiv dem Trugschluss, *real* ist per se *richtig*, weil gemessen und greifbar. *Theoretisch* hingegen ist gleichzusetzen mit *fiktiv* und damit zwangsläufig *fehlerbehaftet*. Beide Aspekte der Modellierung unserer Erfahrungswelt sollen in diesem Buch ausführlich behandelt werden, mit dem Ziel, die wesentlichen Grundlagen der wissenschaftlichen Modellierung anhand konkreter Beispiele aus Physik und Technik zu vermitteln. Dies scheint mir umso wichtiger, als die rechnergestützte Modellierung zur Simulation physikalischer oder ingenieurtechnischer Zusammenhänge, sowohl in der Ausbildung als auch im späteren Berufsleben, mittlerweile eine zentrale Rolle spielt. Der Software-Anwender *muss* hierbei stets wissen, wie das von ihm eingesetzte *Programm* arbeitet, d. h. was die implementierten *Berechnungsmodelle* bestenfalls liefern können, um letztendlich entsprechende Simulationsergebnisse korrekt zu interpretieren.

Im Laufe meiner langjährigen beruflichen Tätigkeit in der industriellen Forschung und Entwicklung habe ich u. a. mit Physikern, Mathematikern und Ingenieuren, mehrheitlich aus den Bereichen Elektrotechnik bzw. Maschinenbau, zahlreiche Modelle zur Produkt- und Prozessoptimierung entwickelt und konnte auf diese Weise erfahren, dass die Physik diesbezüglich so manches aus den Ingenieurwissenschaften lernen kann. Während wir Physiker im Laufe unserer Ausbildung erlernen wie komplexe Problemstellungen auf einfache Prinzipien zurückgeführt und diese experimentell geprüft werden können (→ Reduktionismus), so hat der Ingenieur auch weiterhin in der komplexen Erfahrungswelt zu arbeiten und muss genau hierfür tragfähige Lösungsansätze entwickeln, die im Physikstudium gar nicht oder nur selten vermittelt werden. Stattdessen werden typischerweise Vor-

lesungsreihen „*Physik für ...*“ angeboten, um Studenten, gleich welcher Disziplin, die Grundzüge und Arbeitsweisen der Physik näher zu bringen. Dieses recht einseitige Unterfangen wissenschaftlichen Austauschs mag zu Recht den Eindruck einer gewissen „*akademischen Überheblichkeit*“ wecken, die uns Physikern anzuhaften scheint. Es lohnt sich aber, die Perspektive zu wechseln und physikalische Problemstellungen auch aus Sicht anderer wissenschaftlicher Disziplinen zu betrachten und zu verstehen! Deshalb verbinde ich mit diesem Buch nicht zuletzt die Hoffnung, dass meine Erfahrungen aus interdisziplinärer Forschung und Entwicklung dazu beitragen mögen, den leider oftmals steinigen Weg der Physikausbildung ein wenig zu erleichtern, indem ich alternative Perspektiven auf unsere Erfahrungswelt aufzeigen möchte – Denkanstöße, die es erlauben sollten das physikalische Modellverständnis zu fördern und damit so manche historisch bedingte „*Hürde der Erkenntnis*“ mit etwas mehr Leichtigkeit zu nehmen.

Werner Bieck

Wiltingen, Oktober 2023

Danksagung

Dieses Buch entstand in einem Zeitraum von etwa drei Jahren. Die Ausarbeitung des Manuskripts wurde sukzessive fortgeführt, gerade so wie es die Zeit erlaubte – neben Familie und Beruf, samt den negativen Auswirkungen der Corona-Pandemie. Ein besonderer Dank gilt deshalb meiner Frau Ulrike für ihre stete Unterstützung und ihr Verständnis für den wissenschaftlichen Enthusiasmus eines Physikers. Einige der Bilder, insbesondere aus Kapitel 1 und Kapitel 2, stammen aus meinem firmeninternen Fortbildungsseminar zum Thema „*Modelling & Simulation*“, für deren Verwendung ich Dr. Alain Schumacher recht herzlich danken möchte. Die Durchführung zahlreicher internationaler Fortbildungsprogramme über naturwissenschaftliches Arbeiten im industriellen Umfeld lieferten nicht nur einen Teil der Motivation, sondern auch wichtige Beiträge für dieses Buch. Bei diesen Lehrveranstaltungen wurde über einen Zeitraum von mehr als 15 Jahren so manche Verständnishürde aus Forschung und Lehre mit dem jeweiligen Teilnehmerfeld aus Naturwissenschaft und Technik nicht nur erkannt und diskutiert, sondern auch erfolgreich aufgearbeitet, sodass ich selbst so manches dabei lernen konnte. Insofern gilt mein Dank allen Teilnehmern, die mit ihrem *Fragemut* hierzu beigetragen haben. Nicht zuletzt möchte ich meinen Kollegen des *Basics & Simulation-Teams* danken, für die langjährige und stets konstruktive und spannende Zusammenarbeit, bei der wir gemeinsam zahlreiche F&E-Probleme aus Physik und Technik haben lösen können. Ein herzliches Dankeschön geht insbesondere an Dr. Una Karahasanovic für ihre Anregungen und Hinweise bei der Durchsicht des Manuskripts. Auch möchte ich mich beim Carl Hanser Verlag für die Bereitschaft bedanken, dieses Buch in das verlagseigene Wissenschaftsprogramm aufzunehmen. Natalia Silakova und Christina Kubiak gilt mein Dank für ihre Un-

terstützung und kompetente Betreuung bei der abschließenden Erstellung der Buchvorlage.

Eine wissenschaftliche Ausarbeitung bleibt ohne eingehende Literaturrecherche doch zumindest lückenhaft. In diesem Fall hatte die Corona-Pandemie auch positive Auswirkungen. Viele internationale Bibliotheken und Zeitschriftenverlage erlaubten einen kostenlosen Online-Zugriff auf einen Großteil ihrer historischen und z. T. auch zeitgenössischen Dokumente. Eine dankenswerte Initiative, die zumindest im Falle historischer Quellen auch beibehalten werden sollte! Die digitalen Bibliotheken JSTOR oder NUMDAM gehen hier beispielhaft voran. In diesem Zusammenhang ist auch der Preprint-Dokumentenserver <http://www.arxiv.org> zu nennen. Die Qualität der dort eingestellten und von mir zitierten Publikationen ist durchweg von hoher wissenschaftlicher Aussagekraft, auch ohne den üblichen Peer-Review-Prozess durchlaufen zu haben – eine unterstützenswerte Initiative, die es insbesondere Schülern und Studenten ermöglicht, schnell und kostenlos auf aktuelle Forschungsarbeiten zuzugreifen. Auch das Wikipedia-Projekt (<http://de.wikipedia.org>) sei an dieser Stelle erwähnt. Die Qualität vieler Artikel ist mittlerweile recht hoch und darin aufgeführte Referenzen dokumentieren zudem eine fundierte Literaturrecherche, weshalb ich gelegentlich auch auf lesenswerte Wikipedia-Einträge verweise – guten Gewissens und entgegen üblicher und z. T. überholter wissenschaftlicher Gepflogenheiten.

Anmerkungen

- ¹ William Lawrence Bragg (1890 – 1971), englischer Physiker und Nobelpreisträger (1915). Originalzitat: „The fun in science lies not in discovering facts, but in discovering new ways of thinking about them.“ Aus L. Bragg, *A Short History of Science: Origins and Results of the Scientific Revolution*, chapter XV, The Atom, Doubleday (1959), S. 124; zitiert in R. Shour, *Sir Lawrence Bragg's quote on the essence of science*, Researchgate (2019).

Inhalt

Vorwort	VII
À Propos	1
1 Modelle in der Physik	9
1.1 Modellierungskonzepte	13
1.2 Definition und Abstraktionsebenen eines Modells	15
1.3 Modelleigenschaften und Modellierungsziele	22
1.4 Ein Modellierungsleitfaden	25
1.5 Potential, Grenzen und Risiken der Modellierung	29
2 Mathematische Strukturen in der Physik	43
2.1 Der mathematische Abbildungsprozess	44
2.2 Physikalische Gleichungen	51
2.3 Die mathematische Symmetrie	55
2.4 Die mathematische Analogie	58
2.5 Die mathematische Dualität	60
3 Der Messprozess und Maßeinheiten	65
3.1 Die Festlegung der Naturkonstanten	70
3.2 Die Längenmessung	71
3.3 Die Massenbestimmung	73
3.4 Die Zeitmessung	74

4	Grundlegende physikalische Konzepte.	81
4.1	Das Konzept der Energie	82
4.1.1	Was ist Energie?	84
4.1.1.1	Die Energie – eine physikalische Beschreibung	85
4.1.1.2	Die Koenergie oder Duale Energie	90
4.1.2	Was ist Entropie?	94
4.1.2.1	Der klassische (historische) Entropiebegriff	97
4.1.2.2	Eine zeitgemäße Interpretation der Entropie	103
4.2	Das Konzept der Kraft	119
4.2.1	Die Newton'sche Mechanik	123
4.2.2	Die Analytische Mechanik	138
4.2.3	Die Kontinuumsmechanik.	145
4.2.3.1	Der kartesische Spannungstensor	147
4.2.3.2	Der kartesische Verzerrungstensor	150
4.2.3.3	Materialeigenschaften	151
4.2.3.4	Die Bilanzgleichungen	153
4.2.4	Die Quantenmechanik	155
4.2.4.1	Randerscheinungen in der Physik um 1900.	156
4.2.4.2	Erste quantenmechanische Modell-Ansätze	157
4.2.4.3	Erste grundlegende Experimente zur Quantenmechanik	158
4.2.4.4	Der quantenmechanische Kraftbegriff.	161
4.3	Das Konzept der Zeit	162
4.3.1	Was ist Zeit?	163
4.3.2	Die Zeit als Messgröße	165
4.3.3	Entropie und die Richtung der Zeit	169
4.3.4	Das Kausalitätsproblem in der Physik.	173
4.3.5	Zeit-Paradoxien.	176
4.3.5.1	Die Spezielle Relativitätstheorie: Eine kurze Einführung	177
4.3.5.2	Zeitreisen in die Zukunft: Das Zwillingsparadoxon	188
4.3.5.3	Zeitreisen in die Vergangenheit: Das allgemeine Kausalitätsprinzip	191

4.4	Das Konzept des Raumes.	196
4.4.1	Was ist Raum?	197
4.4.2	Inertialsysteme und Bewegung im Raum	203
4.4.3	Die Vermessung des Raumes	210
4.4.4	Das kosmologische Paradoxon – Kann Raum bewegt werden?	220
4.4.5	Ein kosmologisches Modell.	237
4.4.5.1	Das erweiterte Relativitätsprinzip	241
4.4.5.2	Zeit und Raum nach Milne	242
4.4.5.3	Das Milne-Universum.	251
4.4.5.4	Lokale Beschleunigungen und Gravitationskräfte	254
4.4.5.5	Die Lichtablenkung im Gravitationsfeld	263
4.4.5.6	Milne und das Olbers-Paradoxon	268
4.4.5.7	Zusammenfassung	271
5	Impulsströme	293
5.1	Der allgemeine Impulserhaltungssatz	295
5.2	Kontaktwechselwirkungen	299
5.2.1	Die allgemeine Kontinuitätsgleichung.	301
5.2.2	Die Reibung	302
5.2.3	Das Hebelgesetz	312
5.2.4	Beispiele zur Impulsstrom-Mechanik	316
5.2.4.1	Ein Vergleich: mechanische Spannung vs. elektrische Stromdichte.	317
5.2.4.2	Die Bewehrungstechnik im Bauingenieurwesen.	320
5.2.4.3	Das Boussinesq-Problem	324
5.2.4.4	Tragwerke	326
5.2.4.5	Verbundmaterialien	328
5.2.4.6	Granulare Materie	330
5.2.4.7	Die Sanduhr	334
5.2.4.8	Spannungsinduzierte Bewegung	336
5.2.5	Stoßvorgänge	349
5.2.5.1	Die Stoßzeit	353
5.2.5.2	Die Stoßkaskade	363

5.3	Feldwechselwirkungen	366
5.3.1	Das Gravitationsfeld	367
5.3.1.1	Der Gravitations-Plattenkondensator	374
5.3.1.2	Geophysik: über den Wärmehaushalt der Erde	379
5.3.1.3	Zusammenfassung	391
5.3.2	Das magnetische Feld	394
5.3.3	Das elektrische Feld	398
5.3.4	Der Maxwell'sche Spannungstensor	401
5.3.4.1	Der Feldimpuls	403
5.3.4.2	Die Maxwell-Heaviside-Gleichungen	407
5.3.5	Die elektromagnetische Dualität	409
6	Résumé	419
7	Physikalische Größen	425
8	Aufgaben	427
9	Mathematischer Anhang	441
9.1	Vektoren	442
9.2	Tensoren	443
9.3	Vektor- und Tensoranalysis	445
9.4	Impulsströme in der Kontinuumsmechanik	449
10	Zitate	455
11	Glossar	465
12	Verweise	479
13	Weiterführende Literatur	483
	Index	493

À Propos

SCIENTIFIC EDUCATION:

The problem [in education] is not people being uneducated. The problem is that people are educated just enough to believe what they have been taught, and not educated enough to question anything from what they have been taught.

Richard Feynman¹

Dieses Buch befasst sich mit den Grundzügen der physikalischen Modellierung und der Vielzahl an Fragen, die erfahrungsgemäß damit verbunden sind:

- Was sind physikalische Modelle und was macht man damit?
- Wie erstellt man ein solches Modell und was ist hierbei im Einzelnen zu beachten?
- Welche Vorteile und welche Grenzen und Risiken sind mit der Modellierung physikalischer Phänomene aus unserer Erfahrungswelt verknüpft?
- Gibt es in diesem Zusammenhang eigentlich „wahre“ Modelle?
- Wenn ja, woran erkenne ich dann „unwahre“, soll heißen „falsche“ Modelle?
- Hatte etwa Newton mit seiner richtungweisenden *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* letztlich doch „Unrecht“ und sind demzufolge Einsteins *Relativitätstheorien* „rechtens“?
- Wie sind physikalische Modellgrößen und Modellgesetze diesbezüglich eigentlich einzuordnen?
- Was versteht man in der Physik beispielsweise unter dem Modellbegriff *Energie* und wieso braucht es unbedingt die *Entropie*?
- Gibt es *Kräfte* „wirklich“ oder haben wir es vielmehr mit *Impulsströmen* zu tun?
- Wie lässt sich entscheiden, ob eine Modellvorstellung tatsächlich „stimmt“?
- Lassen sich hierfür geeignete objektive Kriterien finden?
- u. v. m.

Ein Fragenkatalog, der sich beliebig erweitern ließe und dennoch beschäftigt sich die naturwissenschaftliche Ausbildung nur in den seltensten Fällen, sei es einführend in der gymnasialen Oberstufe oder auch später detailliert auf der Universität, mit diesen wichtigen Grundsatzthemen. Im Gegenteil, sie werden oftmals lapidar abgehandelt, indem man mehr oder weniger plausibel erscheinende Erläuterungsversuche seitens Dritter unreflektiert übernimmt. Im Wesentlichen spiegeln all diese Fragen eine entscheidende Unschlüssigkeit wider, nämlich:

„Wie(so) »funktioniert« eigentlich die Naturwissenschaft Physik?“

Was genau tun wir Physiker, wenn wir versuchen etwas Ordnung in die phänomenologische Vielfalt unserer Erfahrungswelt zu bringen? Was für eine Art von Wissen schafft die Physik? Ich möchte von mir behaupten, „*Physiker aus Leidenschaft*“ zu sein, und sollte deshalb gleich zu Beginn eine allgemein verbreitete Wunschvorstellung in Sachen Naturwissenschaft korrigieren und zum Ausdruck bringen, was Physik *definitiv* nicht ist: Die Physik ist keine Wissenschaft, die uns eine *objektive Beschreibung* der Natur ermöglicht, wovon man übrigens Ende des 19. Jahrhunderts noch felsenfest überzeugt war! Sie ist bestenfalls eine *Darstellung unserer Vorstellung von der Natur*², unseres *subjektiven Wissens* oder was wir diesbezüglich oftmals *glauben* zu wissen. Niels Bohr beschrieb diesen Sachverhalt mit den folgenden Worten:

„*Indeed from our present standpoint, physics is to be regarded not so much as the study of something a priori given, but as the development of methods for ordering and surveying human experience.*“³

Um einen besseren Einblick in die Arbeitsweise der Physik zu vermitteln, werde ich u. a. am Beispiel zweier Modell-Konzepte zu beschreiben versuchen, wie die Physik methodisch vorgeht, um Naturphänomene zu „*verstehen*“: Das heutzutage scheinbar „*wohlverstandene*“ Newton’sche Konzept „*wirkender Kräfte*“ wird dem „*recht unverständlichen*“ Konzept „*strömender Impulse*“ gegenübergestellt und es wird sich hierbei zeigen, um dies vorwegzunehmen, dass es mit dem physikalischen Verständnis so seine Bewandnis zu haben scheint, denn das Impulsstrom-Konzept ist der schlüssigere, weil widerspruchsfreie Ansatz für eine konsistente (nicht nur klassische) Naturbeschreibung! Thematisch beschränkt sich dieses Buch auf Problemfelder aus der klassischen Physik. Abgesehen von einem kleinen Ausflug in die Quantenmechanik, werden inhaltlich relevante Aspekte der großen Kontinuum-Theorien aus der Mechanik, der Elektrodynamik und der Thermodynamik behandelt.

Bei der Literaturrecherche zu diesem Buch bestätigte sich einmal mehr ein bemerkenswerter Sachverhalt (natur-)wissenschaftlicher Arbeit: Das „*Wissen schaffende Rad der Physik*“ wurde und wird in unserer Welt immer wieder aufs Neue erfunden, soll heißen, grundlegende Gedanken, Ideen oder Interpretationen zu wissenschaftlichen Themen werden *niemals* nur von *einer* Person, an *einem* Ort (etwa im stillen Kämmerlein) und zu *einem* bedeutsamen Zeitpunkt (der besagten Sternstunde) erdacht und für die Nachwelt dokumentiert (weil ansonsten unwiederbringlich verloren) – das sind *Wissenschaftsmärchen*! Ganz im Gegenteil, ein bewährtes wissenschaftshistorisches Prinzip besagt, dass *kein* Naturwissenschaftler im Alleingang „*Wissen schafft*“, d. h. neue und die Wissenschaft bereichernde Ideen in lehrbuchreifer Form alleine hervorbringt.⁴ Es gab oder gibt in der Wissenschaftsgemeinde stets Forscher, die auf derselben naturwissenschaftlichen Fragestellung arbeiten oder bereits gearbeitet haben und deren Resultate bzw. Über-

legungen entscheidend zur Lösung der eigenen aktuellen Problemstellung beitragen können. Zu jedem einzelnen Fachgebiet gibt es gerade deshalb eine Fülle ausgezeichneter zeitgenössischer, aber auch historischer Literatur, sowohl in Form von Lehrbüchern und wissenschaftlichen Publikationen als auch von im Netz frei verfügbaren Artikeln oder didaktisch kompetent ausgearbeiteten Skripten zu Vorlesungsveranstaltungen, auf die ich bei der Anfertigung dieses Buches verschiedentlich zurückgegriffen habe, um die mir wichtigen Gesichtspunkte zum Thema eingehender darzulegen und worauf an entsprechender Stelle verwiesen wird. Die zugehörigen Links zu Referenzen aus dem Internet werden ebenfalls aufgeführt (Stand: Oktober 2023). Die wissenschaftliche Ausarbeitung dieses Buches ist also ganz im Sinne Eugen Roths verfasst, wie er es seinerzeit im Vorwortgedicht zu einem seiner Bücher auf humorvolle Weise zu beschreiben vermochte:

„[...]

Die Wissenschaft, sie ist und bleibt,

Was einer ab vom andern schreibt.

Doch trotzdem ist, ganz unbestritten,

sie immer weiter fortgeschritten“⁵

Selbstverständlich wird mit diesem Buch nicht einfach nur irgendwo irgendetwas abgeschrieben, obgleich der Text tatsächlich nichts grundsätzlich Neues beschreibt! Vielmehr wird allgemein Bekanntes aus Physik und Technik in einen nach meiner Auffassung schlüssigeren, weil konsistenten naturwissenschaftlichen Kontext gesetzt, sodass sich so manche wissenschaftliche Ungereimtheit auf einfache Weise darstellen und in der Folge auch widerspruchsfrei auf- bzw. erklären lässt.

Erfahrungsgemäß können Links im Internet recht kurzlebig sein, sodass der interessierte Leser die zugehörige Literatur zudem auch auf der IPR-Homepage zusammengestellt finden und darüber frei verfügen kann, sofern keine weiteren urheberrechtlichen Einschränkungen bestehen sollten. Trotz aller Sorgfalt bei der Literaturrecherche kann ich nicht ausschließen, weitere thematisch relevante Beiträge übersehen bzw. schlicht aus Unkenntnis nicht berücksichtigt zu haben.

„[...]

Drum eins: seid nicht gleich ergrimmt,

Wenn irgendwas bei mir nicht stimmt,

Weil es an Wissen mir gebrach -

Schlagt halt im großen [Physik-Standardwerk] nach!“⁵

Entsprechende Hinweise, Anmerkungen oder Korrekturvorschläge werden gerne entgegengenommen.

Zum Aufbau des Buches

Das Buch beschreibt, was ich als Erstsemester sehr gerne über Physik erfahren hätte, jedoch der Lehralltag einer Universität wohl auch noch heutzutage nur sporadisch zu vermitteln scheint, zumindest nach meinen Erfahrungen. In Kapitel 1 *Modelle in der Physik* werden die mir wichtigen Gesichtspunkte zum physikalischen Modellbegriff zusammengefasst und anhand einiger Beispiele eingehender erläutert. Anschließend skizziert Kapitel 2 *Mathematische Strukturen in der Physik* den mathematischen Abbildungsprozess Physik \leftrightarrow Mathematik und stellt in diesem Zusammenhang drei mathematische Strukturelemente vor, die in der theoretischen Physik eine besondere Rolle spielen: Die Symmetrie, die Analogie und die Dualität. Das Wissen um diese Strukturen erleichtert ganz wesentlich die Behandlung vieler physikalischer Problemstellungen aus unterschiedlichsten Disziplinen. Nachdem die prinzipielle Anwendbarkeit einer Modellvorstellung *einzig* auf experimentellem Wege geprüft werden kann, geht Kapitel 3 *Der Messprozess und Maßeinheiten* auf den physikalischen Messprozess und die Definition von geeigneten Maßeinheiten ein, denn nicht selten sind damit recht hartnäckige Anschauungsprobleme verbunden. Beispielsweise verknüpft man mit der Festlegung einer bestimmten Maßeinheit gerne ein spezifisches physikalisches Phänomen und folgert fast zwangsläufig, dass unterschiedliche Einheiten phänomenologisch stets unterschiedliche physikalische Qualitäten beschreiben müssen – dem ist aber nicht so. Im Anschluss werden in Kapitel 4 *Grundlegende physikalische Konzepte* fünf gewichtige physikalische Modellvorstellungen vorgestellt und die z.T. erheblichen Schwierigkeiten diskutiert, die mit diesen Überlegungen immer noch verbunden sind: die uns scheinbar so geläufige *Energie* und etwas eingehender die (weil häufig weniger vertraute) *Entropie*, die allen gleichsam bekannte *Kraft*, der wohl eher problematisch zu nennende Begriff der *Zeit* und zuletzt der uns umgebende und nicht weniger problematische *Raum*.

- Die einführende Diskussion der *Konzepte zur Energie/Entropie* soll in erster Linie auf eine Reihe signifikanter Fehlinterpretationen und Missdeutungen aufmerksam machen, die im Rahmen der physikalischen Lehre üblicherweise so anfallen, weil zur „*Erklärung*“ der Konzepte oftmals auf Alltagserfahrungen oder Analogien zurückgegriffen wird, die in den seltensten Fällen schlüssig sind und deshalb auch nur bedingt den physikalischen Sachverhalt sinnvoll wiedergeben können.
- Ähnliches gilt für die Kraft. Die bestehenden prinzipiellen Schwierigkeiten in Verbindung mit dem physikalischen *Konzept der Kraft* werden meines Erachtens umso deutlicher, beleuchtet man den Kraftbegriff im Rahmen verschiedener mechanischer Modellansätze. Entsprechend wird „*die Kraft*“ nicht nur im ursprünglichen Bild der *Newton'schen Mechanik*, sondern auch aus Sicht der *Analytischen Mechanik*, der *Kontinuumsmechanik* und – wenn auch nur kurz – aus der Perspektive der *Quantenmechanik* besprochen. Auf diese Weise sollten

sich althergebrachte wissenschaftliche Glaubensbekenntnisse bzw. Gewohnheiten leichter erkennen und ausräumen lassen.

- Mit dem *Konzept der Zeit* sind gleich eine ganze Reihe grundsätzlicher Fehleinschätzungen verbunden. Die Analyse des physikalischen Zeitbegriffs erfordert deshalb eine gewissenhafte Betrachtung sowohl der Messgröße „Zeit“ als auch der damit verknüpften Problematik einer „*Zeitrichtung*“ und darauf aufbauend des „*Kausalitätsproblems*“ in der Physik. Abschließend wird die Physik vermeintlicher „*Zeit-Paradoxien*“ besprochen – notwendigerweise, denn es gibt sie nicht! Hierfür bedarf es u. a. einer kurzen Einführung in die spezielle Relativitätstheorie.
- Das *Konzept des Raumes* ist nicht weniger heikel, weil verbunden mit „*allzu vertrauten Erfahrungstatsachen*“ die wir bereits von Kindesbeinen an erlernen und in einer Weise verinnerlichen, dass es vielen vermutlich schwerfallen mag, sich wenigstens z. T. von diesem traditionellen Denken zu lösen, um alternativen Modellvorstellungen „*etwas Raum zu geben*“. Der physikalische Begriff des Raumes ist eng verknüpft mit dem Phänomen Bewegung, insbesondere mit beschleunigter Bewegung, weshalb auch „*die Zeit*“ bei der Definition und der Vermessung physikalischen Raumes die entscheidende Rolle spielt. Tatsächlich ist die Messgröße „Zeit“ grundlegender als die physikalische Längenmessung. Deshalb soll abschließend ein (fast) in Vergessenheit geratenes kosmologisches Modell vorgestellt werden, das einzig auf der Zeitmessung beruht und in der Folge kosmologische Zusammenhänge deutlich einfacher zu beschreiben vermag als derzeit akzeptierte Standardmodelle, inklusive der aus den Relativitätstheorien bekannten Gesetzmäßigkeiten. Insbesondere stützt das Modell auf kosmologischer Ebene die Vorstellung von Impulstransportprozessen und liefert diesbezüglich auch eine plausible Erklärung für die Sonderrolle der „*Gravitationskraft*“ im Reigen der physikalischen „*Grundkräfte*“.

Mit der eingehenden Betrachtung dieser uns scheinbar doch so vertrauten Größen aus Physik und Technik sollten die damit verknüpften Probleme deutlich werden und damit der Einstieg in Kapitel 5 umso leichter fallen: Das einst von Max Planck vorgeschlagene *Konzept des Impulsstroms* und damit verbunden die Fülle an Phänomenen, die sich nur mithilfe dieser Modellvorstellung auf *einfachste Weise* beschreiben lassen, wie z. B. die Physik der Reibung, das Hebelgesetz, Stoßvorgänge, die mechanischen Eigenschaften von Verbundmaterialien, granulares Materialverhalten, spannungsinduzierte Bewegungsvorgänge, allgemeine Feld-Materie-Wechselwirkungen u. v. m.

Motivation: Neben der Vermittlung mir wichtiger Aspekte zum physikalischen Modellverständnis, soll die kritische Analyse der für die Physik so wesentlichen Modellvorstellungen den Leser dazu ermutigen eventuelle Verständnisfragen zu naturwissenschaftlichen Themen stets selbstbewusst anzusprechen. Schließlich gibt es diesbezüglich keine „*dumme Fragen*“, schlimmstenfalls bestätigt die eine

oder andere „flapsige Antwort“ vermeintlicher Experten, dass die vorgebrachten Bedenken mehr als nur gerechtfertigt sind, denn

„Man kann sich selbst auf dümmste Sachen

Bisweilen einen Reim noch machen.“⁶

um so manchen naturwissenschaftlichen *faux pas* in der physikalischen Lehre humorvoll zu umschreiben. Keines der in diesem Buch diskutierten wissenschaftlichen Konzepte ist „zweifelsfrei wahr“ und deshalb anstandslos zu akzeptieren und mag es noch so erfolgreich sein. Womöglich sind Ihre Bedenken ein erster Puzzlebaustein zu neuer Physik, wer weiß – also immer raus damit!

Mathematik: Wie theoretisch wird es werden, wie viel Mathematik wird gebraucht? Gewisse mathematische Vorkenntnisse werden vorausgesetzt. Sie beschränken sich im Wesentlichen auf die Differential-/Integralrechnung in drei Dimensionen, die zugehörigen Integralsätze und etwas Tensor-Rechnung. Zur Orientierung sind die entsprechenden Grundlagen im mathematischen Anhang zusammengestellt. Als „Leistungskursler“ bzw. „Erstsemester“ in Physik/Mathematik sollte man damit zurechtkommen, so hoffe ich (Rückmeldungen hierzu sind erwünscht). Insgesamt 151 Abbildungen ergänzen die Ausführungen im Text und sollen auf diese Weise zu einem leichteren Verständnis der jeweiligen physikalischen Zusammenhänge beitragen. Die formale mathematische Schreibweise folgt DIN 1338, d. h. physikalische Größen wie etwa die Geschwindigkeit v , die Masse m oder der Drehimpuls L werden grundsätzlich kursiv dargestellt. Entsprechende vektorielle Größen \mathbf{v} , \mathbf{L} , etc. werden fett und kursiv gesetzt und tensorielle Größen $\hat{\sigma}$ erhalten zur Unterscheidung zusätzlich ein Kapitälchen. Mathematische Zeichen mit feststehender Bedeutung sowie physikalische Einheiten stehen hingegen gerade, z. B. **div**, **lim**, **tan** bzw. **m** (Meter), **C** (Coulomb) oder **s** (Sekunde). Im Text zusätzlich aufgeführte physikalische Maßeinheiten stehen stets in eckigen Klammern, z. B. Länge [m], elektrische Ladung [C] oder Zeit [s]. In den Bildern stehen hingegen sämtliche Formelzeichen der besseren Lesbarkeit wegen grundsätzlich gerade.

Zitate und Sprachgebrauch: Zitierte Textstellen sind, soweit möglich, der jeweiligen Originalliteratur entnommen und genügen der zu jener Zeit üblichen Rechtschreibung, was zuweilen ungewohnt erscheinen mag.

„Entsprechende Textpassagen sind auf diese Weise formatiert. Die zugehörige Quelle wird in einer Endnote aufgeführt⁷ [zu Verständniszwecken hinzugefügte Ergänzungen stehen jeweils in eckigen Klammern].“

Bisweilen finden sich auch Auszüge zitierter Textstellen „entsprechend hervorgehoben im Text selbst“ oder Inhalte bzw. Aussagen Dritter werden sinngemäß wiedergegeben mit anschließender Nennung der jeweiligen Referenz, sei es in der Form (Autor) oder (Autor, Jahr) und in Abschnitt 12 *Verweise* im Detail aufgelistet oder auch als Quellenangabe⁷ in einer weiteren Endnote benannt und jeweils am Schluss eines jeden Kapitels aufgeführt, zusammen mit weiteren thematisch ergänzenden

Anmerkungen zum jeweiligen Text. Gelegentlich wird auch auf eine ausführlichere Textstelle mit Z_n verwiesen, welche in Abschnitt 10 *Zitate* nachgelesen werden kann. In Sachen Sprachgebrauch vs. Sprachverständnis folge ich nicht dem aktuellen „Trend“ das generische Maskulinum oder das generische Femininum „gendergerecht“ zu ersetzen, nicht nur aus Gründen der besseren Lesbarkeit. Im Buch beziehe ich mich verschiedentlich auf Schüler, Studenten, Physiker, Mathematiker, Ingenieure, u. v. m. und gehe selbstverständlich davon aus, dass *alle* Geschlechter die genannten *Ausbildungsgänge* und *Berufsbilder* in vergleichbarer Weise erfolgreich zu gestalten wissen.

Referenz: Wesentliche Aspekte dieses Buches gehen auf die inspirierenden Arbeiten von Prof. G. Falk, Prof. F. Herrmann und Prof. G. Job zurück, u. a. zusammengestellt im sogenannten **Karlsruher Physik-Kurs (KPK)**.⁸ Zudem lieferte meine mehr als 15-jährige Erfahrung bei der Durchführung internationaler Fortbildungsseminare über naturwissenschaftliches Arbeiten im industriellen Umfeld wichtige Beiträge für dieses Buch. Bei diesen Lehrveranstaltungen wurde so manche Verständnishürde aus Forschung und Lehre mit dem Teilnehmerfeld aus Naturwissenschaft und Technik erfolgreich aufgearbeitet.

Abschließend sei nochmals Eugen Roth zitiert:

*Der Leser, traurig, aber wahr,
Ist häufig unberechenbar:
Hat er nicht Lust, hat er nicht Zeit,
Dann gähnt er: »alles viel zu breit!«
Doch wenn er selber etwas sucht,
Was ich, aus Raumnot, nicht verbucht,
Wirft er voll Stolz sich in die Brust:
»Aha, das hat er nicht gewusst!«
Man weiß, die Hoffnung wär' zum Lachen,
Es allen Leuten recht zu machen.“⁵*

Deshalb habe ich für alle, die thematisch noch etwas mehr erfahren möchten, in Kapitel 13 *Weiterführende Literatur* eine Reihe von Publikationen zusammengestellt und kurz kommentiert – ein kleiner Auszug aus meiner „*persönlichen Favoritenliste*“. Ich wünsche allen Lesern viel Spaß mit der Lektüre und erhoffe mir zahlreiche Fragen und Anregungen, ob nun zufrieden oder unzufrieden mit den Ausführungen in diesem Buch, auf dass Ihre Beiträge die hier dargestellten Zusammenhänge sinnvoll ergänzen mögen!

Entsprechende Rückmeldungen bitte ich an WBi.IPR-Mail@t-online.de zu senden.

Werner Bieck, Wiltingen im Oktober 2023

Anmerkungen

- 1 Richard Phillips Feynman (1918 – 1988), amerikanischer Physiker und Nobelpreisträger (1965).
- 2 siehe Ernst Peter Fischer, *Die andere Bildung – Was man von den Naturwissenschaften wissen sollte*, Ullstein Verlag, 2003, S.162 ff.
- 3 Niels Henrik David Bohr (1885 – 1962), dänischer Physiker und Nobelpreisträger (1922). N. Bohr, *Essays 1958–1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*, Ox Bow Press, Woodbridge, CT (1987), S.10; zitiert in *Physics Today* **57**, 2, 10 (2004), <http://doi.org/10.1063/1.1688051>.
- 4 aus K. Simonyi, *Kulturgeschichte der Physik*, Verlag Harri Deutsch, 2001, S. 397.
- 5 Eugen Roth (1895 – 1976), deutscher Lyriker. Zitate aus *Eugen Roths Großes Tierleben*, Vorwortgedicht „Zum Geleit“, Absätze 3 bzw. 4, S.5 f., Nikol Verlagsgesellschaft, Hamburg, 2006 (siehe auch Zitat Z_0); Lizenzausgabe: Carl Hanser Verlag, München, 1989. Die Einzelausgaben *Tierleben, Band 1 und 2* wurden erstmals in den Jahren 1948/49 publiziert.
- 6 Horst Lachmund, *Aus dem Hirn geschüttelt*, Gedichte & Betrachtungen, Trier (2020).
- 7 Quellenangabe zum Zitat. Sämtliche in diesem Buch aufgeführten Text- und Bild-Zitate genügen §51 des deutschen Urheberrechtsgesetzes.
- 8 siehe <http://www.karlsruher-physikkurs.de/> sowie die Hinweise in Kapitel 13 *Weiterführende Literatur*.

1

Modelle in der Physik

„Bei dem Versuch die Fülle von Beobachtungen mithilfe eines Modells zu beschreiben, nutzt der Wissenschaftler ein ganzes Arsenal an Konzepten und ist sich sehr selten der Tatsache bewusst, wie unendlich problematisch diese Vorstellungen sind. Er verwendet diese Ideen als etwas Selbstverständliches, als etwas mit objektivem Wahrheitsgehalt, welcher nicht ernsthaft angezweifelt werden kann.“

Albert Einstein¹

Naturwissenschaftliches Arbeiten ist Modellierung. Seit den Anfängen der modernen experimentellen Physik, häufig namentlich verbunden mit den Studien Galileo Galileis² zu Gesetzmäßigkeiten der Mechanik, wurde bis heute mithilfe der Mathematik eine komplexe und vielschichtige Modellwelt geschaffen. Diese mathematischen Modelle dienen der Beantwortung von Fragen nach dem *Wie*: Sie beschreiben, *wie* sich Dinge verhalten, *wie* Phänomene der Erfahrungswelt in Beziehung zueinander stehen. Mit diesem Wissen lässt sich planerisch vorgehen, d.h. zukünftiges Verhalten vorhersagen. Eine praktische Sache, wenn man z.B. eine stabile und tragfähige Brücke bauen möchte oder ein Flugzeug konstruieren möchte, das auch abheben, fliegen und sicher wieder landen kann. Hierfür ist *Know-how* gefragt, also das Wissen um das *Wie*. Weitergehende *klärende* Fragen nach dem *Warum* sind hierfür nicht relevant und können in der Physik auch nicht beantwortet werden. Das *Warum* sucht nach einem tieferen philosophischen Grund, gewissermaßen nach dem „*meta*-physikalischen Motiv“, *weswegen* sich die Dinge wie beobachtet verhalten. Im wissenschaftlichen Kontext bedeuten *Erklärungen* jedoch nur, dass man Phänomene mithilfe eines Modells auf wenige grundlegende Prinzipien zurückführen und hierüber klassifizieren kann. „*Wo das [so gewonnene] Wissen aufhört, beginnt der Glaube*“³ an Aspekte *jenseits* der Physik (→ der *Meta*-Physik) – in unterschiedlichster Ausprägung.

Bild 1.1 soll exemplarisch die historische Entwicklung physikalischer Modelle (→ Theorien) skizzieren, allesamt basierend auf Beobachtungen, darauf aufbauenden Erfahrungen sowie weiterführenden spezifischen Untersuchungen. Selbstverständlich, und entgegen dieser kurzen und stark vereinfachten Darstellung, waren und sind die Wissen schaffenden Entwicklungsprozesse physikalischer Theorien keineswegs eine geradlinige und zielorientierte Erfolgsgeschichte menschlicher Vernunft. Im Gegenteil, sie gingen einher mit zahlreichen Irrungen und Wirrungen, mit Fakten negierenden Glaubensbekenntnissen, mit Stagnation und Rückschritt, zuweilen gefolgt von überraschenden, weil zufälligen Wendungen, die erst

so manchen Ausweg aus wissenschaftlichen Sackgassen ermöglichten, bis die Modellvorstellungen zu unterschiedlichsten Aspekten der Erfahrungswelt letztendlich *den* tragfähigen und detailreichen Entwicklungsstand unserer heutigen Zeit erreichten – allerdings ohne jegliche Gewähr, dass wir uns nicht hier und da wieder einmal auf einem dieser „*wissenschaftlichen Holzwege*“ befinden.⁴ Eine umfassende Darstellung zur geschichtlichen Entwicklung der Physik findet sich beispielsweise in (Simonyi, 2001).

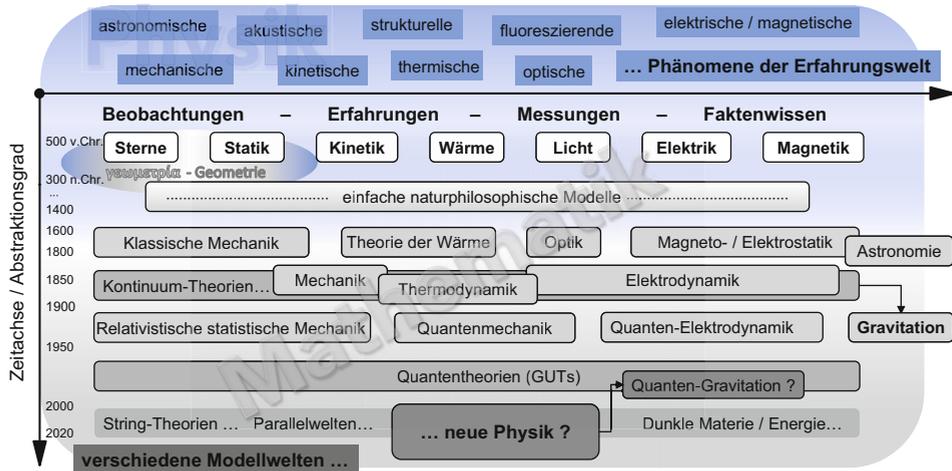


Bild 1.1 Schematische Darstellung zur zeitlichen Entwicklung physikalischer Modelle, motiviert aus der Erfahrungswelt des Menschen. Die sogenannte „*Wissenschaftliche Revolution*“ in Europa begann etwa im 16. Jahrhundert und benötigte mehr als 200 Jahre, um das bis dato etablierte religiös-traditionelle Denken zu überwinden.

Das gesammelte frühe Faktenwissen führte zwangsläufig zu einer ersten Gliederung der beobachtbaren Phänomene in Teilbereiche, welche zu jener Zeit augenscheinlich nichts miteinander gemein hatten. Es gab zahlreiche Erfahrungswerte aus dem Bereich der Sternenkunde und der Mechanik (→ Statik), Beobachtungen zur Bewegung (→ Kinetik), Erfahrungen in Verbindung mit Wärme, zu Lichterscheinungen sowie solche zu magnetischen und elektrischen Erscheinungen etc. Erste naturphilosophische Modellvorstellungen suchten nach Ordnung in dieser Vielfalt des Naturgeschehens. Im antiken Griechenland erzielte man mithilfe der Geometrie anfänglich bemerkenswerte Erfolge in diesem Bemühen. Aber erst mit der Entwicklung geeigneter analytischer Methoden, wie etwa der Infinitesimalrechnung oder der Vektoranalysis, war es möglich, Modelle formal zu beschreiben und Phänomene der Erfahrungswelt erfolgreich in entsprechende Bereiche der Mathematik abzubilden. Die ursprüngliche phänomenologische Gliederung wurde hierbei weitestgehend beibehalten. Es entstanden so physikalische Disziplinen, wie die *Klassische* oder *Analytische Mechanik*, die *Wärmelehre*, die *Optik* sowie die

Elektro- und Magnetostatik. Kontinuumansätze, die mögliche Substrukturen in der phänomenologischen Welt außer Acht lassen, ermöglichten ausgesprochen tragfähige und weitreichende Theorien zur Beschreibung bestimmter Teilaspekte unserer Welt, wie die *Kontinuumsmechanik*, die *Thermodynamik* und die *Elektrodynamik*.

Es zeigte sich auf diesem Wege, dass ursprünglich als qualitativ verschieden angenommene Phänomene der gleichen Modellvorstellung genügen können. Mit der Einführung weiterer Substrukturen zur Beschreibung der Materie entstanden in der Folge die *Statistische Mechanik* und die *Quantenmechanik*, und diese Entwicklung der Erweiterung bestehender oder der Schaffung neuer physikalischer Modelle hält bis heute an. Die differentialgeometrische Darstellung der *Gravitation* scheint hierbei eine Sonderstellung einzunehmen, obgleich ausgesprochen zutreffend in der Beschreibung kosmologischer Phänomene, passt diese Kontinuum-Theorie so gar nicht zu bereits bestehenden Modellwelten aus der Quantenphysik. Alle Versuche der Vereinheitlichung von Gravitation und Quantenmechanik blieben bisher erfolglos, ganz im Gegensatz zur *Quantenfeldtheorie der Elektrodynamik* (QED) oder etwa zur Physik der Elektronenhülle, die auf atomarer bzw. molekularer Ebene Umstrukturierungsprozesse der Elektronenkonfiguration beschreibt (→ Chemie).

Zudem ist festzustellen, dass die im Verlauf der letzten drei Jahrhunderte geschaffenen großen physikalischen Theorien allesamt heute noch in Anwendung sind, selbstverständlich nur im Rahmen des jeweils zulässigen Applikationsbereiches dieser Modellvorstellungen. Wissenschaftstheoretische Betrachtungen, wonach der wissenschaftliche Entwicklungsprozess „*revolutionär*“ durch sogenannte *Paradigmenwechsel* geprägt sei, treffen meines Erachtens nicht bzw. nur sehr eingeschränkt zu.⁵ Ebenso wie etwa „*darwinistische*“ Prozesse, wonach „*erklärungsstarke*“ mit „*erklärungschwachen*“ Theorien konkurrieren und letztere zwangsläufig aus unserem Weltbild verdrängen.⁶ Der Entwicklungsprozess einer physikalischen Theorie ist objektiv, d.h. wissenschaftstheoretisch nur schwer zu fassen, denn „*Wissenschaft hat viele subjektive Komponenten, schließlich wird sie von Menschen gemacht.*“⁷ Der Mensch nimmt in diesem Prozess gleich in mehrfacher Hinsicht die zentrale Rolle ein! Die Entstehung und insbesondere die Akzeptanz einer physikalischen Modellvorstellung muss deshalb immer im historisch-gesellschaftlichen Kontext gesehen werden. Ein Naturwissenschaftler kann sich als Mensch, mit all seinen Stärken und Schwächen, den psychologischen Einflüssen des jeweils vorherrschenden gesellschaftlichen Zeitgeistes kaum entziehen. Hier spielen sowohl soziale, politische als auch religiöse Aspekte eine wesentliche Rolle.⁸ Ein wichtiger sozialer Aspekt zeigt sich beispielsweise (nicht nur) heutzutage im oftmals fehlenden gegenseitigen Respekt bei wissenschaftlichen Kontroversen. Dieses Defizit an sozialer Kompetenz kann sich nachweislich kontraproduktiv auf den Entwicklungsprozess vielversprechender physikalischer Modellvorstellungen auswirken!

Stephen R. Covey hat diesen Mangel an Kommunikationsfähigkeit sehr treffend beschrieben:

„The biggest communication problem is, we do not listen to understand. We listen to reply!“⁹

Das „*profilierungsneurotische Verhaltensmuster*“ unbedingter Widerrede ist nicht nur in Coveys Zielgruppe aus Politik und Wirtschaftsmanagement recht ausgeprägt – es gab und gibt sie leider auch in der Physik. Ein Beispiel: Lord Rayleighs bemerkenswerter Rat an junge Physiker, seinerzeit publiziert in *Phil. Trans.* 183 (1892), auf dass ihre innovativen Arbeiten nicht durch sogenannte „*Gutachten*“ anerkannter Experten aus eben solchen Motiven unbedacht abschlägig beurteilt werden:

„Sie sollten [ihre Arbeit] nur dann einer wissenschaftlichen Gesellschaft zusenden, wenn in ihnen nicht zu viele neue Gedanken enthalten seien. Außerdem wäre es klüger, sich vorerst mit leicht beurteilbaren Ausführungen zu einem allgemein akzeptierten Thema Anerkennung zu verschaffen!“¹⁰

Man denke auch an die Entdeckung der Quasi-Kristalle durch den Physiker Dan Shechtman (1982), die lange Zeit von namhaften Wissenschaftlern (u. a. Nobelpreisträger) auf z. T. polemische Weise disqualifiziert wurde, um ein Beispiel aus heutiger Zeit zu benennen. Shechtman erhielt schließlich 2011 den Nobelpreis für seine richtungsweisende Arbeit.

Die aktuelle Forschung nach „*neuer Physik*“ beschäftigt sich u. a. in der Teilchenphysik mit alternativen Modellvorstellungen wie den „*String-Theorien*“ oder „*Parallelwelten*“, in der Quantenphysik mit „*Grand Unified Theories*“ (GUTs), also Versuche der weiteren Vereinheitlichung bereits bestehender Modelle, unter Beibehaltung der Quantenstruktur, oder in der Kosmologie mit sog. „*dunkler Energie*“ bzw. „*dunkler Materie*“, allerdings ohne nennenswerte Fortschritte in den genannten Bereichen zu erzielen! Bestenfalls finden „*althergebrachte*“ theoretische Vorhersagen nach vielen Jahrzehnten endlich ihre experimentelle (und nobelpreiswürdige) Bestätigung (→ Higgs-Boson, Gravitationswellen, etc.). Was also ist genau diese „*neue Physik*“, deren Forschungsvorhaben in erster Linie dadurch auffallen, dass sie ausgesprochen teuer sind und vergleichsweise wenig Neues zutage fördern? Die Wortschöpfung steht synonym für alles, was wir Physiker auf unserem Weg zur „*Weltformel*“ bisher glauben übersehen zu haben bzw. immer noch nicht verstanden haben mathematisch konsistent zu beschreiben. In der Physik entspricht die „*einheitliche Theorie für Alles*“ dem „*Heiligen Gral*“ aus der Artus-Sage, denn für beide Hypothesen gibt es keine tragfähigen Argumente, die eine Suche danach rechtfertigen könnte. Gegen Ende meines Studiums konnte ich mich für solche vorwiegend theoretischen Arbeiten zur Grundlagenphysik nicht so recht begeistern, obwohl mir seinerzeit die *Theoretische Physik* sehr am Herzen lag. Es waren u. a. die (mir) unverständlichen Konzepte der *Klassischen Physik*, die mich damals

davon abhielten „*neue Physik*“ mit ungleich „*exotischeren*“ Konzepten zu wagen. Man kann nicht den zweiten Schritt vor dem ersten tun und darauf hoffen, dass man nicht gänzlich ins Stolpern gerät – das schien mir zu jener Zeit wenig sinnvoll und so ist es auch heute noch, zumal sich meines Erachtens an dem Dilemma in der theoretischen Physik bis heute faktisch nichts geändert hat.

■ 1.1 Modellierungskonzepte

Modellieren heißt, sich ein Bild von einer realen Gegebenheit zu machen, sodass mittels der gewählten Darstellung alle relevanten Aspekte einer Problemstellung sich eindeutig beschreiben lassen und die damit verbundenen Fragen nach dem *Wie* beantwortet werden können. Dies kann auf ganz unterschiedliche Art und Weise geschehen, wie Bild 1.2 verdeutlichen soll.

Ausgehend von realen Beobachtungen und Erfahrungen, wie z. B. dem jahreszeitlichen Verlauf von Sonnenaufgang bzw. -untergang, den unterschiedlichen Phasen des Mondes, das periodische Verhalten von Ebbe und Flut etc., kann sogenanntes Faktenwissen geschaffen werden. Hierbei werden Daten aus Beobachtungen und Messungen tabellarisch festgehalten und kontinuierlich anhand aktueller Beobachtungen überprüft und ergänzt. Mithilfe dieser empirisch gewonnenen Fakten lassen sich zuverlässige Vorhersagen treffen, ohne im Detail beschreiben zu müssen, wie diese Phänomene genau zustande kommen. Es reicht völlig aus, zu wissen, dass diese Phänomene in der dokumentierten Art und Weise immer wieder auftreten. Auf Basis dieser Kenntnisse können in der Folge mittels hypothetischer Annahmen weiterführende Modelle zum Geschehen und damit *Know-how* aufgebaut werden (→ konstruktive Theorien). Beschreibt solch ein Modell widerspruchsfrei die Beobachtungen, kann es ersatzweise zur Erstellung von Prognosen verwendet werden. Auf diese Weise ist z. B. das geozentrische Planetenmodell (→ Ptolemäische Modellvorstellung¹¹) entstanden. Im Rahmen der beschränkten Beobachtungsgenauigkeit stand dieses Modell für mehr als 1800 Jahre in Einklang mit Daten und – im Mittelalter noch wichtiger – mit den kirchlichen Dogmen zum Christentum im damaligen Europa. Erste kleinere Abweichungen in der Beobachtung der Planetenbewegungen konnten noch durch Aufstellung zusätzlicher Hypothesen (→ Epizyklen) berücksichtigt werden, um auf diese Weise das Modell zu retten, bis es schließlich um 1600 durch das heliozentrische Weltbild (→ Kopernikanisches Modell¹²) ersetzt werden musste.

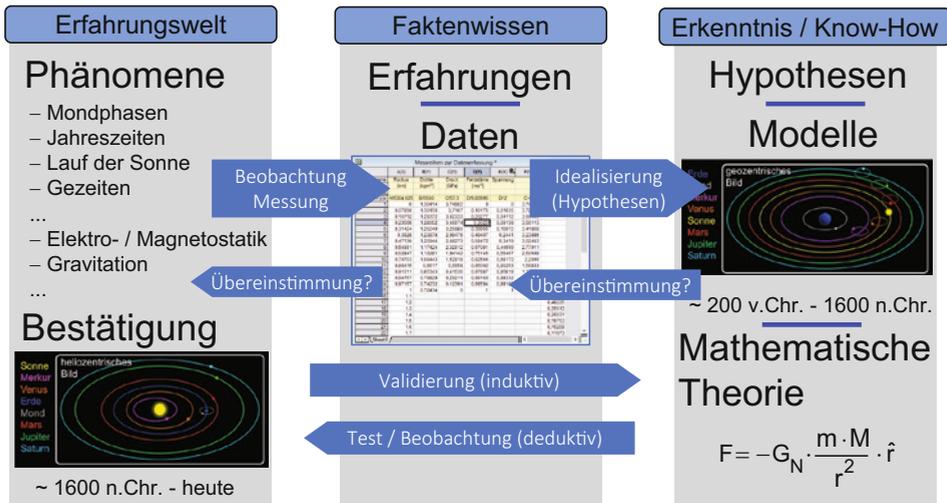


Bild 1.2 Darstellung verschiedener Modellkonzepte zur Beschreibung von Beobachtungen aus der Erfahrungswelt mittels Faktenwissen, weiterführender Hypothesen & Modelle bzw. mathematischer Theorien.¹³

In einem weitergehenden Abstraktionsschritt lassen sich Modelle oftmals über mathematische Theorien formal beschreiben. Im Falle der Planetenbewegung ergeben sich die Bahngleichungen beispielsweise direkt aus dem Newton'schen Gravitationsgesetz.¹⁴ Umfangreiche Tabellenwerke werden so durch kompakte Gleichungen ersetzt, und auch deren Gültigkeit lässt sich experimentell überprüfen.

Neben der bereits geschilderten konstruktiven Methode, um ein geeignetes Modell für spezifische Aspekte der Erfahrungswelt zu erstellen, verwendet die Physik ein weiteres „Modellierungsverfahren“, indem axiomatisch wenige, grundlegende Prinzipien postuliert werden (→ Prinzipientheorie), woraus mithilfe geeigneter mathematischer Methoden nachprüfbar physikalische Aussagen abzuleiten sind. Auch diese intuitiven Modell-Ideen sind im Allgemeinen *nicht* auf induktivem Wege aus der Erfahrungswelt ableitbar. Es gibt tatsächlich *keine* erfolgversprechende Verfahrensweise, wie man zu solchen Prinzipien gelangen kann!¹⁵ Eingebungen dieser Art „fallen einfach vom Himmel“ und können sich hin und wieder als zielführend erweisen, aber nicht selten „fällt man damit auf die Nase“. Ein guter Kandidat hierfür wäre nach meinem Dafürhalten die „String-Theorie(n)“ (→ String-Kosmologie – Quantengravitation), weil einerseits erhebliche mathematische Hürden zu überwinden sind, um auf Basis der Modellvoraussetzungen überhaupt zu empirisch verwertbaren Aussagen zu gelangen und diese andererseits dennoch kaum experimentell nachprüfbar sind!¹⁶ Ein gravierendes Dilemma, sodass String-Theoretiker bereits ernsthaft die Frage erörtern, ob die Qualität einer physikalischen Theorie zwingend an der Faktenlage empirischer Befunde geprüft werden müsse, wenn