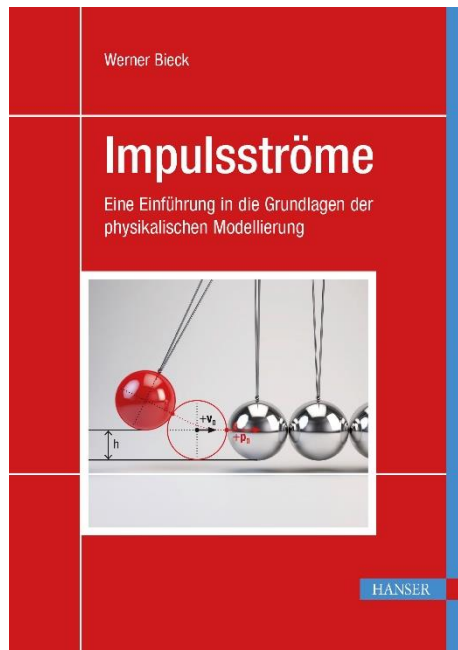


HANSER



Leseprobe

zu

Impulsströme

von Werner Bieck

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

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

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446477025>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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

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).

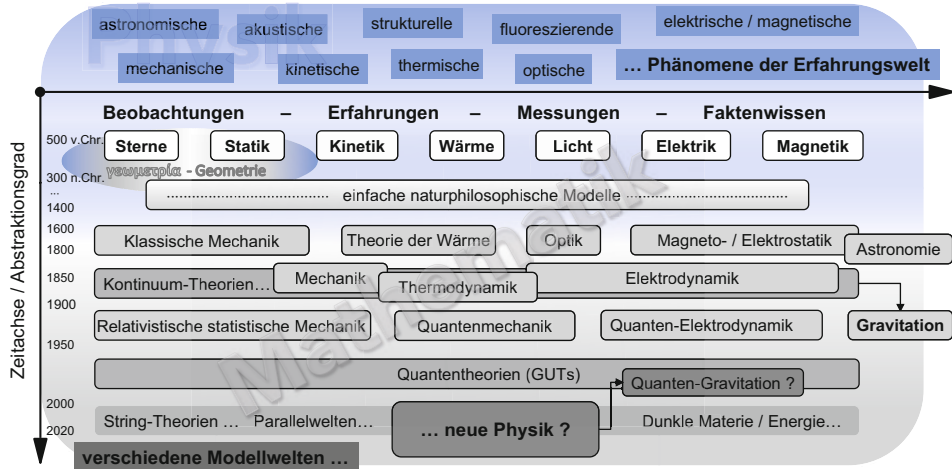


Bild 1.1 Schematische Darstellung zur zeitlichen Entwicklung physikalischer Modelle, motiviert aus der Erfahrungswelt des Menschen. Die sogenannte „*Wissenschaftliche Revolution*“ in Europa begann etwa im 16. Jahrhundert und benötigte mehr als 200 Jahre, um das bis dato etablierte religiös-traditionelle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

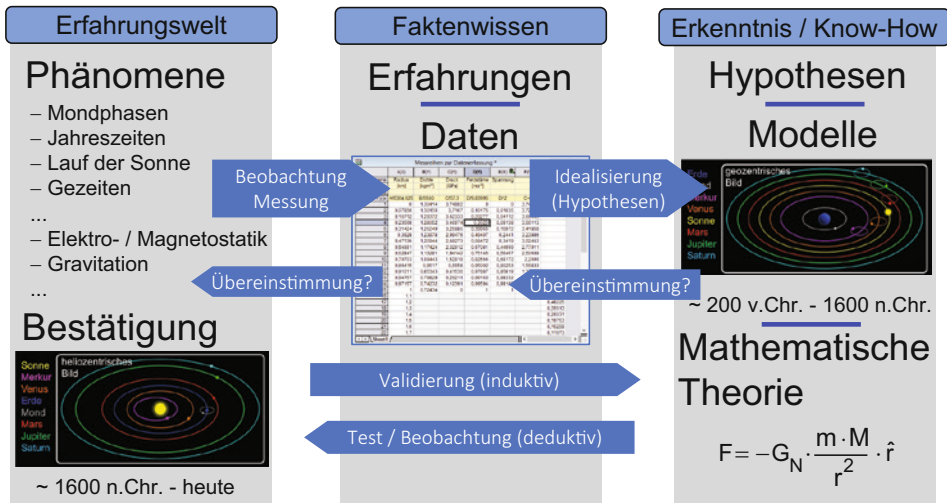


Bild 1.2 Darstellung verschiedener Modellkonzepte zur Beschreibung von Beobachtungen aus der Erfahrungswelt mittels Faktenwissen, weiterführender Hypothesen & Modelle bzw. mathematischer Theorien.¹³

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

doch die Mathematik konsistent sei, diese unerwartete (neue) Zusammenhänge zeige und es zudem an erfolgversprechenden Alternativen fehle (→ Postempirismus)?! (Hossenfelder, 2018).¹⁷

■ 1.2 Definition und Abstraktionsebenen eines Modells

Zu Beginn dieses Abschnitts bedarf es in Sachen „Modell“ noch einer sinnvollen begrifflichen Festlegung, also einer Antwort auf die Frage:

Was genau ist ein Modell?

In der Literatur gibt es hierfür keine eindeutige Definition, weil dieser Begriff, je nach Kontext, in unterschiedlicher Weise zu interpretieren ist. Wir wollen uns auf *physikalische Modelle* beschränken und in unserer Betrachtung nicht zu tief in die Wissenschaftstheorie einsteigen.¹⁸

Unter einem physikalischen Modell verstehen wir folgenden Sachverhalt:



„Ein physikalisches Modell ist ein idealisiertes Bild von Teilaspekten der menschlichen Erfahrungswelt (→ Realität), das stellvertretend zu naturwissenschaftlichen Verständniszwecken herangezogen werden kann.“

Modelle fokussieren also immer auf spezifische Gesichtspunkte unserer Erfahrungswelt und können folglich diese unsere Wirklichkeit bestenfalls „*realitätsnah*“ jedoch *niemals* „*realitätsgetreu*“ beschreiben!¹⁹ Aber was heißt das nun wieder genau? Besser gefragt:

Wofür stehen in diesem Zusammenhang die Begriffe „*Realität*“ bzw. „*Erfahrungswelt*“?

Beide Bezeichnungen habe ich bereits mehrfach synonym und kommentarlos verwendet und damit stillschweigend vorausgesetzt, dass der Leser intuitiv schon das „*Richtige*“ damit verbinden wird, nämlich „*die uns gemeinsame Welt da draußen*“. Aber ist *Ihre* Erfahrungswelt auch *wirklich* die meine? Die moderne Kognitionsforschung geht beispielsweise davon aus, dass das menschliche Gehirn prinzipiell keine objektive Wirklichkeit kennt, weil eine Außenwelt nur auf indirektem Wege, nämlich über unsere Sinneswahrnehmungen zugänglich ist (mittels diverser, teils komplementärer biologischer Sensoren, inklusive neuronaler Messwertübertragung und Datenauswertung). Nach A. K. Seth kann deshalb die individuell wahrgenommene Realität kein unmittelbares Abbild einer objektiven Außenwelt sein, vielmehr beruhe diese Wahrnehmung auf Prognosen, die unser Gehirn zu mög-

lichen Ursachen eintreffender Sinnessignale erstellt. Sensorisch erkannte Abweichungen zu diesen Annahmen (→ sensorische Vorhersagefehler) führen zu einer fortlaufenden Korrektur der subjektiv empfundenen Erfahrungswelt. Wahrnehmung sei also nichts anderes als eine sensorisch kontrollierte Halluzination.²⁰ Eine bemerkenswerte These und das Interessante hierbei ist, dass wir Physiker methodisch auf die exakt gleiche Weise vorgehen, wenn wir Modelle (→ Prognosen) zu bestimmten Aspekten unserer Außenwelt erstellen. Auf der Suche nach möglichen sensorischen Vorhersagefehlern zu einer gegebenen Modellvorstellung müssen wir in der Regel unsere Sinneswahrnehmung durch eine ausgeklügelte Messtechnik erweitern, die allerdings auf der gleichen oder einer ähnlichen Modellvorstellung beruht – kognitiv also kein einfaches Unterfangen, möchte man aus einer Vielzahl möglicher Erfahrungswelten (→ „*naturwissenschaftliche Halluzinationen*“) auf „*die Realität*“ als „*das unmittelbare Abbild einer objektiven Außenwelt*“ schließen. Es spricht mittlerweile einiges dafür, dass es diese eine Realität so nicht geben kann! Folgt man beispielsweise den Ausführungen der Psychologie über die Bildung von Bewusstsein, so ist Physik nichts anderes als eine mathematische Beschreibung von geschaffenen Bewusstseinsinhalten über alternative Erfahrungswelten ... – aber zurück zum eigentlichen Thema.

Je nach Verwendungszweck und Komplexität lassen sich physikalische Modelle unterschiedlichen Abstraktionsebenen zuordnen. Die einfachste Form ist das Replikat (→ physikalisches Experiment), ein auf wesentliche Aspekte abzielender experimenteller Aufbau des interessierenden Naturgeschehens, zur Untersuchung und quantitativen Erfassung bestimmter Modellgrößen. Experimentelle Aufbauten dieser Art erlauben vergleichende Tests und Optimierungen, wie in Bild 1.3 im Falle der Lichtbrechung verdeutlicht.

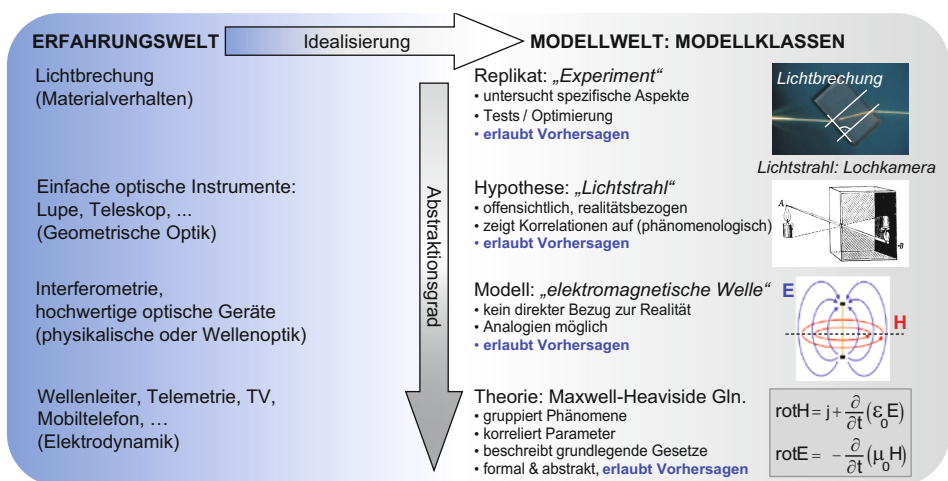


Bild 1.3 Komplexität und Abstraktionsebenen physikalischer Modelle am Beispiel des Phänomens „Licht“ (weitere Details hierzu werden in Abschnitt 1.5 diskutiert).²¹

Die erzielten experimentellen Befunde motivieren u. a. die „*Lichtstrahl*“-Hypothese der geometrischen Optik, womit das Zusammenspiel verschiedener optischer Elemente untersucht und auf theoretisch einfache Weise dargestellt werden kann, um z. B. mittels phänomenologischer Gesetzmäßigkeiten das Abbildungsverhalten eines Linsenensembles zu bestimmen.

Komplexere optische Geräte, Interferometer, Beugungsphänomene etc. werden schließlich über das Modell²² „*Elektromagnetische Welle*“ zutreffender beschrieben (→ physikalische Optik oder Wellenoptik). Dieses Modell umfasst eine ganze Reihe weiterer Hypothesen, welche unter bestimmten vereinfachenden Annahmen auf jene des „*Lichtstrahls*“ reduziert werden können. Modellen dieser Komplexität fehlt es oft an direkten, d. h. erkennbaren Bezügen in die Erfahrungswelt, sodass zu deren Beschreibung sog. *Analogien* aus bekannten Bereichen des Naturgeschehens herangezogen werden (im Falle der Wellenoptik z. B. Wasserwellen). In der physikalischen Lehre werden recht häufig *Analogien* zur Veranschaulichung abstrakter Modellvorstellungen verwendet, was durchaus problematisch ist, weil diese oftmals „*qualitativ schwach, suggestiv und selten logisch zwingend sind*“ (Hägele, 2007).

Die höchste Abstraktionsstufe der Modellierung (klassischer) elektromagnetischer Erscheinungen ist schließlich die mathematische Theorie zur Elektrodynamik, zusammenfassend beschrieben durch die sogenannten Maxwell-Heaviside-Gleichungen,²³ welche in ihrer heutigen Form erstmals von Oliver Heaviside 1884 aufgestellt wurden (Heaviside, 1891–1912). Diese formale Theorie erlaubt eine umfassende Gruppierung verschiedenster elektromagnetischer Phänomene, beispielsweise nach ihrem Zeitverhalten, beschreibt grundlegende Gesetzmäßigkeiten und korreliert die zugehörigen Parameter.

Eine weitere Steigerung der Abstraktion ergibt sich allerdings beim Übergang zur Theorie der Quanten-Elektrodynamik. Ein notwendiger Schritt, um die Phänomene auf der Ebene der Elementarteilchen konsistent zu beschreiben. Alle Modellklassen, von einfachen experimentellen Aufbauten bis hin zu komplexen Theorien, zeigen eine gemeinsame Eigenschaft: Sie erlauben sowohl qualitative als auch quantitative *Vorhersagen!* Sie beschreiben *wie* entsprechende Phänomene in der Erfahrungswelt ablaufen werden, bei Vorgabe eines bestimmten Ausgangszustandes unter wohl definierten Randbedingungen.

Weitere Beispiele physikalischer Modelle verschiedenster Abstraktionsstufen sind in Bild 1.4 aufgeführt. Mechanische Werkzeuge wie z. B. der Hebel, ein Flaschenzug, die schiefe Ebene gehören zur Gruppe der Replikate. Das Konzept der Kraft, des Massenpunktes, des Lichtstrahls etc. sind (nicht zu beweisende) Hypothesen. Deren Zusammenwirken führt zu Modellen und diese wiederum zu umfassenden Theorien, wie jene der *Klassischen Mechanik* oder der *Klassischen Elektrodynamik*.

ORIGINAL aus der ERFAHRUNGSWELT

Maschinen, ...

Bauwerke: Häuser, Brücken, ...

Bewegung (Fußball, Rad, Auto, ...)

Planetenbewegung ...

Wärme (thermische Ausdehnung, ...)

Hochfrequenz-Elektrizität (Leiter, Antennen, ...)

Einfache optische Instrumente, ...

MODELLE verschiedener Abstraktionsstufen

Replikate – einfache Werkzeuge, ...

Hypothese – Kraft, Drehmoment, ...

Modell – Statik¹Modell – Kinematik: $\mathbf{v} = \dot{\mathbf{r}}(t)$, Schwerpunkt, ...Erfahrung – empirische Gesetze (→ Beobachtung)²Modell – Kinetik → $\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$ (Gravitationsgesetz)³Theorie – Theorie der Gravitation⁴Hypothese – Temperatur (makroskopisch)⁵Hypothese – kinetische Energie (atomare Skala)⁶Theorie – Theorie der Elektrodynamik⁷Hypothese – Geometrische Optik (Lichtstrahl)⁸

¹Pierre Varignon 1654-1722, ²Johannes Kepler 1571-1630, ³Isaac Newton 1642-1727, ⁴Albert Einstein 1879-1955, ⁵Anders Celsius 1701-1744, ⁶Ludwig Boltzmann 1844-1906, ⁷James Clerk Maxwell 1831-1879, ⁸Willebrord van Roijen Snell (Snellius) 1591-1626

Bild 1.4 Einige Beispiele physikalischer Modelle verschiedener Abstraktionsebenen und deren Erfinder.

Wie bereits im Vorwort angesprochen, kann das Experiment selbst ein eigenes Modell der Erfahrungswelt sein. Wie verhält es sich dann mit den darauf aufbauenden theoretischen Überlegungen? Stehen diese theoretischen Modelle noch in einer direkten Beziehung zu Aspekten aus der Erfahrungswelt oder repräsentieren sie ausschließlich das Modell-Experiment, wie in Bild 1.5 auf schematische Weise dargestellt? Diese Frage zum Realitätsbezug idealer Modelle wird in der Wissenschaftstheorie ausgesprochen kontrovers diskutiert. Insbesondere weist man zu Recht darauf hin, dass sich theoretische Aussagen zu Gesetzmäßigkeiten *immer* auf idealisierte Modellvorstellungen beziehen, die aber definitionsgemäß nur Teilaspekte der Erfahrungswelt abbilden können. Wenn wir zudem davon ausgehen müssen, dass es *die eine Erfahrungswelt* nicht geben kann, wie „real“ sind auf diese Weise gefundene „Modell-Gesetze“ eigentlich noch?

Nancy Cartwright vergleicht in diesem Zusammenhang phänomenologische (→ empirische) Gesetzmäßigkeiten, wie sie vorwiegend in der experimentellen Physik formuliert werden, mit den grundlegenden Aussagen aus der theoretischen Physik:

„In modern physics [...] phenomenological laws are meant to describe, and they often succeed reasonably well. But fundamental equations are meant to explain, and paradoxically enough the cost of explanatory power is descriptive adequacy. Really powerful explanatory laws of the sort found in theoretical physics do not state the truth. [...] In fact the way they are used in explanation argues for their falsehood. We explain by ‘ceteris paribus’ laws [lat.: unter sonst gleichen Umständen], by composition of causes, and by approximations that improve on what fundamental laws dictate. In all of these cases the fundamental laws patently do not get the facts right.

Index

A

Analytische Mechanik 138
ART 176, 215, 238, 264

B

Bilanzgleichungen 153

C

Caloricum 97
Carnot-Prozess 104
CMB 207

D

Dissipativität 100
Distanz-Leiter 214
DOE 24
Doppler-Effekt
– longitudinaler 215
– transversaler 222
Dualität
– elektro-magnetische 409

E

EBL 269
Eigenzeit 182, 187, 225
Einstein-Rosen-Brücke 194
Energie 84
– innere/äußere 98

Entropie 95
– klassisch 97
– zeitgemäß 103
Erfahrungswelt 15

F

Feldimpuls 403
Feldwechselwirkung 366
– elektrische 398
– gravitative 367
– magnetische 394
Friedmann-Gleichung 253

G

Gibbs'sche Fundamentalform 86
Gleichung
– homologe 58
Gutachten 12, 487

H

Hamilton-Gleichungen 140
Hamilton-Jacobi-Gleichung 143
Hebelgesetz 312
Hubble
– Diagramm 218
– Konstante 215
– Strömung 256

I

- Impulserhaltungssatz 295
- Impulsstrom 293
 - Beispiele 316
- Induktionsproblem 21
- Inertialsystem 203
- Instrumentalist 20
- Isotropiesystem 210, 261

K

- Koenergie 90
- Kontaktwechselwirkung 299
- Kontinuitätsgleichung
 - allgemeine 301
- Kontinuumsmechanik 145
- Kraft
 - Coriolis-Kraft 121
 - Grundkräfte 120
 - lebendige 136
 - Scheinkräfte 120

L

- Lagrange-Gleichungen 138
- Lamé-Konstanten 152
- Legendre-Transformation 90
- Lenz-Runge-Vektor 266
- Lichtablenkung 263
- Lichtmodelle 33
- Licht-Uhr 179

M

- Maßeinheiten 68
- Materialeigenschaften 151
- Mathematische Strukturen 43
 - Abbildung 44
 - Analogie 58
 - Dualität 60
 - physikalische Gleichungen 51
 - Symmetrie 55
- Messprozess 65
 - Länge 71

- Masse 73
- Zeit 74
- Modell 9
 - Abstraktionsebenen 16
 - Definition 15
 - Eigenschaften 22
 - Gesetze 18
 - Grenzen und Risiken 30
 - Grundregeln 31
 - Leitfaden 26
 - Ziele 22
- Modellierungskonzepte 13
- Monopole
 - magnetische 410

N

- Naturkonstanten 70
- Nernst-Theorem 108
- Newton'sche Mechanik 123
- Noether-Theorem 142

O

- Ontologie 20
- Ortsraum 225

P

- Paradoxon
 - Gibbs 112
 - kosmologisches 220
 - Milne 262
 - Olbers 268
 - spektrales 269
 - wissenschaftliches 30
 - Zeit 176
- Perkolation 330
- physikalische Größe 51, 68
 - intensive 86
- Physikalische Größen 425
- Physikalische Konzepte 81
 - Energie 82
 - Entropie 94
 - Kraft 119

- Raum 196
- Zeit 162
- Physiker-Tricks 99, 167, 314
- Postempirismus 15
- Prinzipientheorie 14

Q

- Quantenmechanik 155
 - erste Experimente 158
 - erste Modelle 157
 - Randerscheinungen um 1900 156

R

- Raum 197
 - Vermessung 210
- Raumkrümmung 216, 223
 - intrinsische 235
- Realist 20
- Realität 15
- Reibung 302
- Relativitätsprinzip
 - erweitertes 241
 - SRT 177
- ROI 27
- Rotverschiebung 214

S

- SI-Standard 69
- Spannungstensor 147
 - Maxwell 401
- SRT 177

- Stoß 349
 - Kaskade 363
 - Zeit 353
- Strom 293

T

- Theorie 9
 - konstruktive 13

V

- Vergleiche
 - Äpfel mit Birnen 32, 52, 57, 169
- Verzerrungstensor 150
- V-Zyklus 27

W

- Wärme-Begriffe 96
- Wirkung 138, 143
- Wissenschaft
 - pathologische 67, 295

Z

- Zeit 163
 - Kausalität 173
 - Messgröße 165
 - Richtung 169
- Zeitraum 225
- Zeitreisen
 - Vergangenheit 191
 - Zukunft 188