

Vom Modell zur Theorie am Beispiel der Quantenmechanik

Gebhard Gröbl

Institut für Theoretische Physik der Universität Innsbruck

Vortrag an der Sommerakademie ‚Modelle‘ von Pro Scientia

5. September 2015, Celje, Slowenien

Abstract

Eine physikalische Theorie ist ein Gedankengebäude, das Wirklichkeit mit (mathematischen) Begriffen nachahmt, eine Parallelwelt aus Zahlen und Relationen. Eine Theorie wird aus Modellen abstrahiert und erlangt breitere Gültigkeit, indem sie zu unsicheren Details schweigt. Provisorische Modelle füllen die Lagunen der Theorie und lassen vielfach erst ein überprüfbares Bild der Wirklichkeit entstehen. So kommt es, dass die Evolution physikalischer Theorien von den Krisen ihrer Modelle getrieben wird: Modelle sind zwar wandelbar, ohne dass die Theorie gleich aufgegeben werden muss, in Ausnahmefällen aber bringt das Versagen eines Modells das ganze theoretische Gerüst ins Wanken und kann zur Überwindung der Theorie durch eine neue führen. Dieses Muster von Erosion und Überwindung kennzeichnet auch die Entstehung der Quantenphysik.

Um 1900 wurde klar: Atommodelle aus Massenpunkten und Kraftfeldern geben weder die Farben leuchtender Gase noch die Frequenzverteilung der Wärmestrahlung, die aus Hochöfen kommt, richtig wieder. Nur unmotiviert Auswahlregeln lassen die atomaren ‚Strahler‘ der klassischen Theorie korrekt leuchten, widersprechen aber den Regeln der Mechanik. Aus dieser Einsicht heraus entstand bis 1925 ein völlig neues Materiebild, die Quantentheorie. Aus einem Konglomerat von Massenpunkten, die ihre Bewegung durch den leeren Raum mit Kräften beeinflussen, wurde das (konfigurations)raumfüllende Kontinuum der ‚Wellenfunktion‘, das eine teilchenartige Körnigkeit nur in der Wechselwirkung mit Teilchendetektoren zeigt. Was davon zu halten ist, bleibt bis heute umstritten, zumal die Rekonstruktion der klassischen Physik in deren makroskopischem Gültigkeitsbereich nicht recht gelingen will.

Theorie als gemeinsames Muster von Modellen

Früher hatten Modelle in der Physik eine ähnliche Funktion wie in der Architektur. Sie dienten der unmittelbaren materiellen Veranschaulichung dessen, was für die meisten Menschen unvorstellbar war. ZB die Planetenmodelle, sogenannte Orreries: <https://de.wikipedia.org/wiki/Orrery>



Heute spielen Modelle in einem so handgreiflichen Sinn nur mehr eine sehr eingeschränkte didaktische Rolle in Technikmuseen. Vermutlich weil die Physik Bereiche erschlossen hat, die sich einer Materialisierung durch starre Körper entziehen. Ich will versuchen, den modernen Sprachgebrauch der Begriffe Theorie und Modell im Bereich der Physik zu schildern. Heute ist ein Modell ein ‚nur‘ gedachtes Abbild einer wirklichen Situation. Modelle gehören zu den wichtigsten Instrumenten der Physik.

Kennzeichen einer Theorie: (ZB Theorie der Mechanik, Elektrizität, Wärme, Relativitätstheorie, Quantentheorie) Sie besteht in einem allgemeinen Regelwerk, das viele verschiedene Situationen *gedanklich darstellt*; sie schränkt die denkbaren Sachverhalte zwar drastisch ein, kennt aber meist auch Optionen, von denen die Wirklichkeit keinen Gebrauch macht; sie ist an der Wirklichkeit überprüfbar und muss sich daher auch als falsch herausstellen können. Eine Theorie ist charakterisiert durch einige allgemeine Naturgesetze, bestenfalls in Form von mathematischen Strukturrelationen eines bestimmten Typs (Gewöhnliche Differentialgleichungen vom Newtonschen Typ; partielle Differentialgleichungen vom Maxwellschen oder Schrödingerschen Typ, Teilchenmultiplets).

Beispiel einer Theorie (Punktmechanik): Sie beschreibt einen autonomen Teil der Welt, der aus wohlbegrenzten, stabilen und hinreichend kleinen Körpern besteht. Erfasst werden dabei nur die Orte der beteiligten Körper und die Zeit. Die Veränderung der Orte im Laufe der Zeit ist mithilfe von Massen und Kräften mathematisch durch Differentialgleichungen reglementiert. Orte und Geschwindigkeiten der involvierten Körper zu einer einzigen Zeit legen ihre Orte (und Geschwindigkeiten) zu allen anderen Zeiten fest. Die gesamte Geschichte dieses Teils der Welt ist so vollkommen bestimmt. Das ist an gleichartigen Teilen der Welt überprüfbar. Stimmen deren Zustände zu einer Zeit überein, dann stimmen ihre gesamten Geschichten überein, dh ein Determinismus gilt. Weiter folgen Erhaltungs-

sätze für Energie, Impuls etc aus der allgemeinen mechanischen Theorie. Allerdings: Die Ortsdetails hängen von den speziellen Kraftgesetzen ab. Die Vorhersagekraft der allgemeinen Theorie ist somit noch etwas schwach. Sie wird verstärkt durch die Einschränkung auf ein spezielles Modell.

Kennzeichen von Modellen (der Punktmechanik): Eine genauere Festlegung der Kräfte zwischen den Körpern spezifiziert ein mechanisches Modell („mechanisches System“). Die möglichen Geschichten in Form von Wann/Wo Protokollen werden festgelegt und berechenbar. Ein Modell weitet die Vorhersagekraft der Theorie enorm aus. Es gibt unendlich viele mechanische Systeme mit denselben Bausteinen. Höchstens eines davon kann einen bestimmten Teil der Welt richtig darstellen. Modelle vereinfachen fast immer bewusst. Die davon verursachten Fehler sollten abschätzbar sein.

Lehrbücher der Physik spiegeln diese Dichotomie von Theorie und Modell wieder: Kapitel mit allgemeiner Theorie wechseln sich mit Kapiteln über Beispielsysteme ab. Die Einschränkung auf Beispiele spezifiziert dabei vielfach nicht vollständig, sondern behandelt wiederum eine ganze Modellklasse. (zB ‚lineare Schwingungen‘)

Beispiel eines Modells (Bewegung zweier Körper unter dem Einfluss der Schwerkraft): Die Aussage

$$\text{Anziehungskraft} = GMm/R^2$$

impliziert, dass ein Mondumlauf um die Erde 28 Tage dauert. (Benötigt wird der Abstand R von der Erde zum Mond, der Erdradius r und die Erdbeschleunigungskonstante g zur Berechnung von GM über $GM = g r^2$). Beteiligte Vereinfachung: Ignorieren der Erde/Mondbewegung um die Sonne und der Eigendrehbewegungen von Mond und Erde. Diese Anwendung des Gravitationsgesetzes war historisch ein wesentliches Argument für die Newtonsche Mechanik. Eine analoge Anwendung aus der jüngsten Vergangenheit: Die Kollisionszeiten der Bruchstücke des Kometen Shoemaker-Levy mit Jupiter (zwischen 16. und 22. 7. 1994) mit einer gesamten Einschlagsenergie von 50 Mio Hiroshimabomben konnte einige Monate im Voraus auf wenige Minuten genau berechnet werden. Siehe

https://en.wikipedia.org/wiki/Comet_Shoemaker%E2%80%93Levy_9,
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/Shoemaker-Levy_9_on_1994-05-17.png?uselang=de

Shoemaker-Levy 9: entdeckt am 24. März 1993; Quasisatellit des Planeten Jupiter; im Juli 1992 in 21 Fragmente mit einem Durchmesser von 50 bis 1000 m Durchmesser zerbrochen; Einschlaggeschwindigkeit ca 60 km/s; der Einschlag aller 21 Fragmente wurde über 6 Tage hinweg beobachtet.





Entstehung einer Theorie

Die großen Theorien der Physik wurden vermutlich alle als gemeinsame Struktur aus einzelnen zuvor entwickelten Modellen abstrahiert. Newtons Mechanik entstand aus der Einsicht in einheitliche Regeln für die Bewegung von Körpern am Himmel und auf der Erde: sie erklärt die Planetenbahnen mit denselben Regeln wie sie es mit den einfachsten Bewegungen irdischer Körper tut. Ähnlich ging es bei der Entstehung der Elektrodynamik zu: Maxwell studierte Faradays weitläufige ‚Experimental Researches in Electricity‘, dann Amperes Schriften und schließlich die deutschen Autoren Weber und Neumann und berichtete seinem Freund Lewis Campbell [p 157 von N Forbes, B Mahon]:

*I am working away at Electricity again and have been working my way into the views of the heavy German writers. It takes a long time to reduce to order all the notions one gets from these men but I hope to see my way through the subject and arrive at **something intelligible in the way of a theory.***

Das ist Maxwell dann in einem überwältigenden Maß gelungen. Heinrich Hertz formulierte angeblich (und wohl etwas übertrieben): *Was ist Maxwells Theorie? Das sind seine Gleichungen.* Heute wird fast das gesamte Feld von Optik und Elektrizität mit Maxwells Theorie gedanklich bearbeitet. Diese stellte ungreifbare raumfüllende elektrische und magnetische Felder der handfesten scharf lokalisierten Materie, wie Steine, Stühle und Sterne es sind, zumindest gleichberechtigt, wenn nicht vorrangig zur Seite. Zusammen mit der Mechanik von Newton (und ihrer Weiterentwicklung durch Einstein) bildet Maxwells Theorie die sogenannte klassische Physik.

Konsistenzprobleme zeigten sich im klassisch physikalischen Weltbild um etwa 1900 bei der systematischen quantitativen Ausformulierung einer zusammenhängenden, einheitlichen Theorie von elektrisch geladener Materie und elektromagnetischen Feldern. Die mathematisch konsistente Kopplung zwischen isolierten Punktteilchen und raumfüllenden Feldern als ein gemeinsames System von gewöhnlichen und partiellen Differentialgleichungen misslang (bis heute). Die erfolgreichen physika-

lischen Anwendungen der klassischen Theorie („Elektrodynamik“) basieren auf vereinfachten (entkoppelten oder „einbahngekoppelten“) Teilproblemen, die das eigentliche Problem verstümmeln. Trotz grandioser Erfolge im makroskopischen Bereich – die Elektrotechnik zeugt davon - zeigen diese lösbaren Ersatzprobleme, angewandt auf atomare Systeme, eine Welt, die nicht die wirkliche ist.

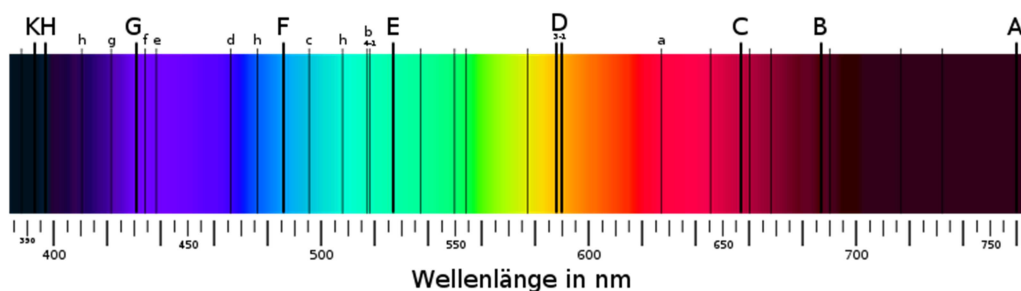
Das Scheitern der Modelle bringt ihre Theorie ins Wanken

Wenn keines der plausiblen Modelle einer Theorie die Wirklichkeit korrekt wiedergibt, gerät die Theorie ins Wanken und eine neue entsteht.

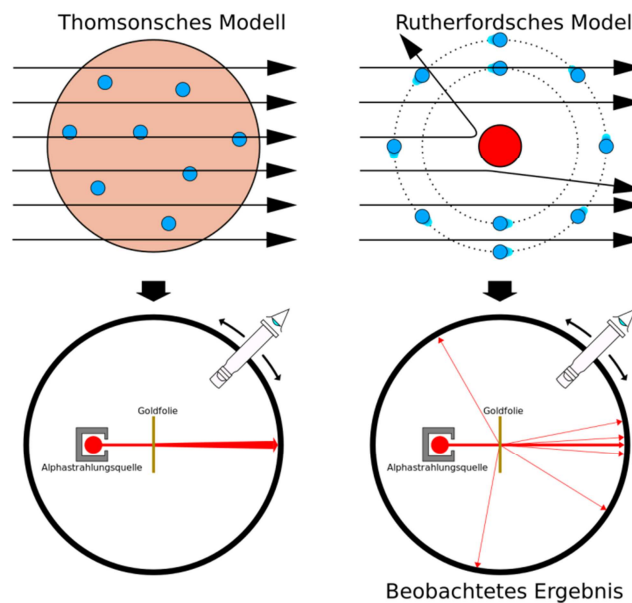
Ein mathematisch konsistentes (elektrodynamisch stabiles!) Atommodell fand Thomson 1904: Atome sind Kugeln mit einem Durchmesser von ca 1/10 nm. Diese Kugeln tragen die Gesamtmasse des Atoms und eine gleichmäßig dichte Wolke positiver (aus der Chemie bekannten) Gesamtladung Ze . (Z ist die chemische Ordnungszahl und e die Elementarladung) In diese Kugel sind überdies Z einzelne auf Punkte konzentrierte Ladungen der Stärke $-e$ (Elektronen) eingebettet. Diese Elektronen tragen nur einen winzigen Bruchteil der Atommasse. Wenn ein solches in die positive Ladungswolke eingebettetes Elektron um seine Gleichgewichtslage schwingt, dann leuchtet das Atom für die Dauer von ca 10ns mit der Schwingungsfrequenz des Elektrons. Die Größenordnung dieser Frequenz ist zwar dieselbe, die an der Strahlung von H-Atomen zu beobachten ist, die Details weichen jedoch von der Wirklichkeit deutlich ab. Das Thomson Modell ist somit ‚falsch‘! Zur Spektralzerlegung von Licht siehe https://en.wikipedia.org/wiki/Visible_spectrum



Spektral zerlegtes Sonnenlicht: <https://de.wikipedia.org/wiki/Fraunhoferlinie>



Rutherfords (elektrodynamisch instabiles) Atommodell (1912): Die beobachtete Ablenkung von Heliumkernen an Goldfolien legt nahe: Die positive Ladung Ze eines Atoms ist keine homogene Wolke, sondern zusammen mit fast der gesamten Atommasse im Zentrum des Atoms, einem ‚Kern‘ mit einem Radius von ca 1fm, konzentriert. Die massearmen Elektronen befinden sich außerhalb des Kerns in einem Abstand von ca 1/10 nm. Sie geben dem Atom seine Größe. Sie müssen sich (zumindest nach den Regeln der klassischen Mechanik!) wie Planeten auf Ellipsen um den positiven Kern bewegen, um nicht sofort mit diesem in einer Explosion zu zerstrahlen. Maxwells Theorie bewirkt jedoch ein Problem: Auch ein kreisendes Elektron strahlt ab und spiralt innerhalb von Nanosekunden in den Kern. Rutherfords Modell erklärt zwar die Streuung von Alphastrahlung an Goldfolie, liefert aber keine stabilen Atome! Siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Rutherford-Streuung>



Moral: Thomsons und Rutherfords Modelle sind hinsichtlich ihres elektrodynamischen Strahlungsverhaltens unrealistisch bis absurd.

Mit Regelbruch zu neuen Modellen

Bohrs Stabilisierung von Rutherfords Atom für $Z=1$ (1913): Im glatten Widerspruch zur Elektrodynamik postulierte Bohr: Ein an einen Kern gebundenes Elektron kann dauerhaft auf einer Kreisbahn um den Kern laufen, wenn ihr Umfang U einen der Werte hat, der $PU=nh$ erfüllt. Hier ist n eine positive ganze Zahl und h die Plancksche Konstante (‚Wirkungsquant‘). (Der Impuls $P=mv$ des Elektrons auf der Kreisbahn ist nach den Gesetzen der klassischen Mechanik durch den Umfang U festgelegt. Damit sind die Radien aller von Bohr ‚erlaubten‘ Kreisbahnen und auch ihre Energien berechenbar.) Das Atom strahlt nur dann, wenn es von einer erlaubten Bahn auf eine andere erlaubte (kleinerer Energie) absackt und die Energiedifferenz der beiden Bahnen wird dann nach außen als elektromagnetische Strahlung freigesetzt.

Spektral zerlegtes Wasserstofflicht; Siehe: https://en.wikipedia.org/wiki/Visible_spectrum



Warum und unter welchen Umständen ein Elektron seine Bahn wechselt, das bleibt bei Bohr unregelt. (Schrödinger bedauerte ‚diese verdammte Quantenspringerei‘, an der auch seine spätere Version der neuen Theorie leidet.)

Bohrs Regelwerk gibt das Frequenzspektrum, das von verdünntem, heißem atomarem Wasserstoffgas ausgeht, sehr gut, dh bis auf 3-4 Dezimalstellen der beobachteten Frequenzen, wieder. ABER: es bricht die Regeln der klassischen Elektrodynamik! Daher war nach Bohrs Entdeckung die Frage am Tisch: Lässt sich die Auszeichnungsregel stabiler Bahnen systematisch und allgemein in die klassische Elektrodynamik einarbeiten, sodass ein korrektes Bild der Wirklichkeit entsteht? Dies wurde zB für das He-Atom versucht, ist aber nicht so gelungen, dass die beobachteten Spektren reproduziert werden konnten. Stattdessen wurde bis 1925 eine viel tiefer gehende Abänderung der klassischen Mechanik vollzogen.

Vermutlich bremste Bohrs erfolgreicher Regelbruch alle weiteren Versuche rein klassische Alternativmodelle der Atomspektren zu erfinden. Stattdessen war man schnell bereit, die Gesetze der makroskopischen Physik im mikroskopischen Bereich aufzugeben. Natürlich sollte eine neue mikroskopische Theorie mit den ‚guten‘ alten makroskopischen Theorien in friedlicher Koexistenz bestehen können.

Zwei weitere Beobachtungen brachten die klassische Physik in Bedrängnis. Der photoelektrische und der Comptoneffekt. Beide konnten nur durch die Anwendung ‚nicht Maxwellscher‘ Regeln in ihren groben Zügen verstanden werden, indem die Wechselwirkung von Elektronen mit einem hochfrequenten elektromagnetischen Feld (UV-Licht bzw Röntgenstrahlung) als Stoßprozess zwischen klassischen Teilchen modelliert wurde. Wiederum taucht in diesen aus Maxwells Warte ‚absurden‘ Erklärungen die Plancksche Konstante h auf. Sie stellt die Verbindung zwischen der Wellencharakteristik der Strahlung, der Frequenz, und den Teilchenkenngößen Energie und Impuls der hypothetischen Strahlungsteilchen („Photonen“) her.

Der Photoeffekt wurde 1887 von Heinrich Hertz in groben Zügen entdeckt, 1905 von Einstein in den Begriffen seines Photonenmodells gedeutet und in den Jahren 1914-1916 von Millikan quantitativ gemessen. Die Zweifel an Einsteins Deutung des Effekts als Energieerhaltung bei einem Teilchenstoß waren zunächst massiv. Erst als Compton 1922-1923 einen analogen Effekt bei der Streuung von Röntgenstrahlung an (fast) ungebundenen Elektronen gemessen konnte, und in Comptons Modellierung auch die Impulserhaltung eine (erfolgreiche) Rolle spielte, gewann die Photonenhypothese enorm an Glaubwürdigkeit. Das wiederholte Auftreten ein und desselben Wirkungsquantums konnte kein Zufall sein.

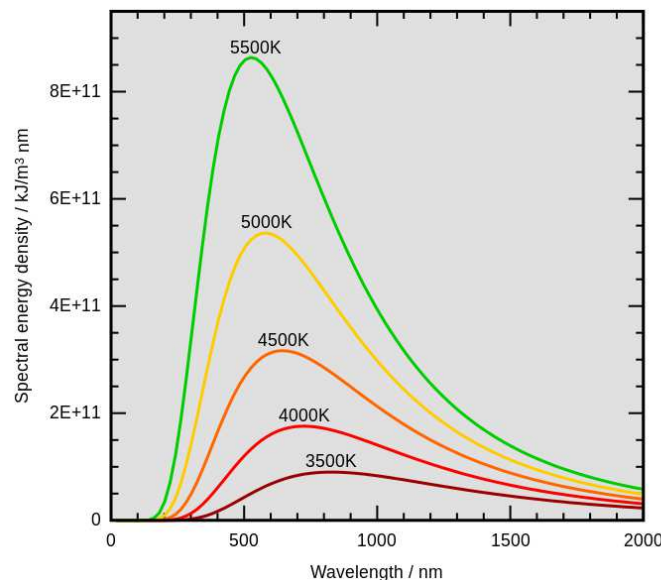
Systematischere Modelle als Vorstufen einer neuen Theorie

Unter dem Eindruck von Einsteins Photonenhypothese suchten De Broglie (1923) und Schrödinger (1926) nach einer Wellengleichung, die hinter der klassischen Mechanik stehen könnte. Dh sie gaben die *gewöhnlichen* Differentialgleichungen als Beschreibungsmuster für die Bewegung von Körpern auf und suchten zur Beschreibung mikroskopischer Körper nach einer *partiellen* Differentialglei-

chung, welche die klassische Mechanik als strahlenoptischen Grenzfall hat. Eine solche Wellengleichung wurde zunächst in speziellen Fällen gefunden. Sie reproduziert das beobachtete Wasserstoffspektrum und noch vieles andere mehr, was von Bohrs eingeschränktem Repertoire nicht beschrieben wird: Mehrelektronenatomspektren und Molekülspektren. Alle Einzelfälle realisieren einen gemeinsamen allgemeinen Gleichungstyp, der unendlich viele Modellausprägungen kennt, die sogenannte Schrödingergleichung. Sie enthält neben der Elektronenmasse und -ladung wiederum die Konstante h .

Heisenberg und Born (1925) gelang es, ausgehend vom klassisch mechanischen harmonischen Oszillatorsystem, ein Modell einer atomaren Sendeantenne zu formulieren, das eine Diskretisierung der von einem Atom abgestrahlten Energien impliziert. Dieses Modell schien – wieder unter Verwendung von h - eine Rechtfertigung für Plancks Hohlraumstrahlungsformel (1900) zu liefern. Diese Formel Plancks hatte die Konstante h erstmals ins Spiel gebracht. h erwies sich in der Folge als universell und charakteristisch für die gesamte Quantentheorie. Für den Zahlenwert von h gibt es bis heute wie für die anderen fundamentalen Naturkonstanten keine Erklärung. Siehe:

https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_K%C3%B6rper



Die neue Theorie

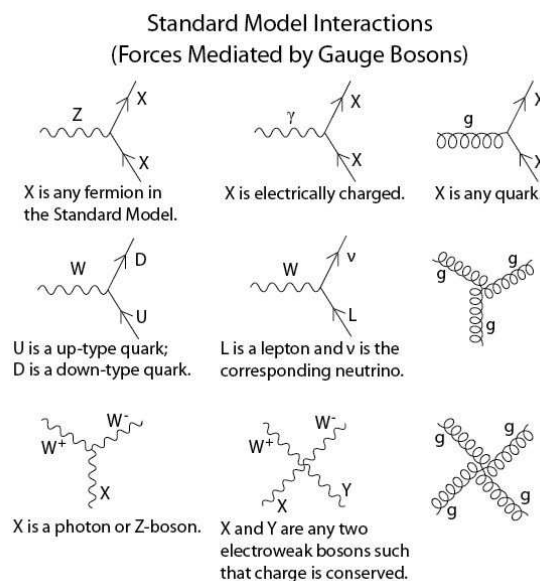
Die beiden Modellklassen von Heisenberg bzw Schrödinger besitzen strukturelle Parallelen zu klassisch mechanischen Modellklassen. Ein spezielles Modell entsteht durch ‚Quantisierung‘ eines klassischen Modells, ist aber ein eigenständiges nichtklassisches Modell einer völlig neuen übergeordneten Theorie, der Quantenmechanik. Diese wurde in den Jahren 1927-1932 aus den damals vorliegenden Modellen abstrahiert. (Dirac, Schrödinger, von Neumann) Der Unterschied zwischen Heisenbergs und Schrödingers Modellen wurde als unwesentlich erkannt, denn beide Modellklassen sind äquivalent.

Während der Ist-Zustand eines klassisch mechanischen Systems die Vorgabe der Orte und Geschwindigkeiten aller involvierten Konstituenten, also endlich viele reelle Zahlen, umfasst, ist der Zustand eines (sehr einfachen) quantenmechanischen Systems erst durch die Vorgabe von zwei reellen Zahlen für jede mögliche klassische Ortsaufstellung des Systems, und davon gibt es unendlich viele, ge-

geben. Ein solcher Ist-Zustand verändert sich dann im Lauf der Zeit in berechenbarer Weise. Er gestattet jedoch lediglich die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten sogenannter ‚Messereignisse‘. Das sind Vorgänge in denen das Quantensystem in einem makroskopischen System seine Spuren hinterlässt. Ob ein radioaktiver Zerfall einen Geigerzähler auslöst oder nicht, das gehört weiterhin in den Bereich jener ‚verdammten Quantenspringerei‘. Die Quantentheorie wird daher von vielen als eine Theorie davon verstanden, wie die Welt bei Beobachtung erscheint, und nicht davon, wie die Welt ist. Manche sind auf diesen Anthropozentrismus stolz, andere halten ihn für ein Symptom der Unvollkommenheit und auch für ein Signal der internen Widersprüchlichkeit der Theorie, denn die ‚Beobachtung‘ hat einen merkwürdigen Sonderstatus im Regelwerk der Theorie.

Eine Übertragung der ‚Quantisierungsrezepte‘ auf partielle Differentialgleichungen, zB auf jene Maxwells, führt weiter in den Bereich der *Quantenfeldtheorie*. Das Wort Quantentheorie fasst alle Systeme der Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie zusammen (Systeme mit endlich oder unendlich vielen Konstituenten). Nach der Entdeckung der Feldquantisierung begann die Suche nach realistischen Modellen. In der Quantenelektrodynamik wurde das Ziel einer stimmigen Fusion von Mechanik und Elektrizität bis zu einem erstaunlichen aber doch noch unvollständigen Grad vollzogen. Fermis ‚Theorie‘ (eigentlich Modell) des Betazerfalls wies den Weg zur den quantenfeldtheoretischen Modellen der Elementarteilchenphysik. Ein sogenanntes ‚Standardmodell‘ ist das bislang am tiefsten reichende Modell, das noch einigermaßen abgesicherten Bezug zur Wirklichkeit hat. Andere Bereiche der Physik wie Stringtheorie, Quantenkosmologie spinnen das Denkmuster der Quantisierung weiter fort, entziehen sich aber (vorläufig) einer Konfrontation mit der Wirklichkeit. Sie gehören in den Bereich der ‚Science Fiction‘ im besten Sinn des Wortes.

Ob Illustrationen wie die folgende, siehe https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model , dieselbe aufklärerische Wirkung wie ein Orrery entfalten können, das darf bezweifelt werden. Nur zu einem kleinen Zirkel von Eingeweihten sprechen diese Zeichen und erinnern sie an ein präzises Formelgeflecht. Eine eklatante Not an treffenden und allgemein verständlichen Modellen der Modelle bedroht die öffentliche Teilnahme an den Ergebnissen der modernen Physik. Dagegen kommen auch die meist hilflosen Versuche von Zeitschriften wie Scientific American nicht an.



Zusammenfassung

Die Quantentheorie entstand beim Versuch, zwei sehr gute Theorien (Mechanik und Elektrizität) in einem stimmigen, gemeinsamen, einheitlichen Gedankengebäude aufgehen zu lassen. Einem Gebäude, das nicht nur denkbar, sondern auch wirklichkeitsnah ist. Dies gelang nur durch drastische Modifikation der bestehenden Theorien. Die Hinweise zur Bildung der neuen Theorie kamen aus dem Studium einfacher Modellsysteme. (Atome als elektrisch gebundene Planetensysteme und Elektronen als Empfangs- und Sendeantennen elektromagnetischer Strahlung höchster Frequenz) Wir sehen: Der Modellbegriff der bildenden Kunst im Sinn des Vorbilds eines Abbilds ist also auch der Physik nicht ganz fremd, wenngleich der ästhetische Anspruch ein geringerer ist.

Siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Aktmodell#/media/File:2009-08-31-akt-muehla-099.jpg>



Moral

Modelle und Theorie brauchen einander. Modelle ohne übergeordnete gemeinsame Theorie produzieren unnötigen Leerlauf und Verwirrung. Das im Wesentlichen Gleiche wird – ohne es zu merken – wieder und wieder abgeleitet. Eine Theorie ohne Modelle bleibt kraftlos, beinahe inhaltsleer und vor allem *schwer vermittelbar*. Letztlich wäre zur Beschreibung unserer einen Welt nur ein einziges Modell einer ultimativen Theorie nötig. Am stärksten spräche eine Theorie, die überhaupt nur ein einziges Modell besitzt. Diese Theorie wird jedoch wohl kaum jemals gefunden werden und daher müssen wir wohl noch lange mit der Dichotomie von Theorie und Modell leben.

Literatur:

Vom Scheitern der klassischen Physik

F K Richtmyer, E H Kennard, *Introduction to modern Physics*, McGraw-Hill, 1947;

Mechanik

J V Jose, E J Saletan, *Classical Dynamics - a contemporary approach*, Cambridge UP, 1998;

L Sklar, *Philosophy and the Foundations of Dynamics*, Cambridge UP, 2013;

Elektrodynamik

A Zangwill, *Modern Electrodynamics*, Cambridge UP, 2013;

H Spohn, *Dynamics of Charged Particles and their Radiation Field*, Cambridge UP, 2004;

N Forbes, B Mahon, *Faraday, Maxwell and the Electromagnetic Field*, Prometheus, 2014;

Quantentheorie

S Weinberg, *Lectures on Quantum Mechanics*, Cambridge UP, 2013;

S Weinberg, *The Discovery of Subatomic Particles*, Cambridge UP, 2003;

A Z Capri, *Quips, Quotes and Quanta, an Anecdotal History of Physics*, World Scientific, 2011