

Die Josef Honerkamp Entdeckung des Unvorstellbaren

Einblicke in die Physik und ihre Methode



SACHBUCH



Springer Spektrum

Die Entdeckung des Unvorstellbaren

Josef Honerkamp hat mehr als 30 Jahre als Professor für Theoretische Physik gelehrt, zunächst an der Universität Bonn, dann viele Jahre an der Universität Freiburg. Er ist Autor mehrere Lehrbücher, im Rahmen seiner Forschungstätigkeit hat er auf folgenden Gebieten gearbeitet:

Quantenfeldtheorie, Statistische Mechanik, Nicht-lineare Systeme und Stochastische Dynamische Systeme. Er ist Mitglied der Heidelberger Akademie der Wissenschaften.



Josef Honerkamp

Die Entdeckung des Unvorstellbaren

Einblicke in die Physik und ihre Methode



Springer Spektrum

Josef Honerkamp
Universität Freiburg Fakultät für Physik
Freiburg, Deutschland

ISBN 978-3-662-44755-0

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

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt 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 benutzt werden dürften.

Planung und Lektorat: Dr. Andreas Rüdinger, Sabine Bartels

Redaktion: Dr. Sonja Bernhart

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE.

Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.springer-spektrum.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort		IX
1 Prolog		1
<i>Brief vom 3.7.2007</i>		1
<i>Brief vom 17.7.2007</i>		8
2 Die Bewegung		19
Das erste physikalische Gesetz in mathematischer Form und die geradlinig-gleichförmige Bewegung	19	
Das Trägheitsgesetz und ideale Bezugssysteme	25	
Das Galileische Relativitätsprinzip	30	
Kräfte und das Gravitationsgesetz	37	
Bewegungsänderungen und ihre Ursache	45	
<i>Brief vom 4.9.2007</i>	51	
Die Newtonsche Bewegungsgleichung	54	
Nachfolger Newtons, Bewegungen starrer Körper	59	
Eingeschränkte Bewegungen	67	
Das Hamiltonsche Prinzip	71	
Bewegungen in Nicht-Inertialsystemen	77	
3 Von Blitzen, Feldern und Wellen		83
<i>Brief vom 9.10.2007</i>	83	
Die Elektrisierer	84	
Elektrostatik	90	
Konstante Ströme	97	
Die magnetische Wirkung des elektrischen Stroms	106	

VI Inhaltsverzeichnis

Erste technische Verwertungen, Telegraf und Elektromotor	113
Das Induktionsgesetz	117
Die Maxwellsche Theorie des Elektromagnetismus	122
Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen	130
Theorien über das Licht	138
Wellen	148
4 Thermodynamik und Statistische Mechanik	157
<i>Brief vom 8.1.2008</i>	157
Was ist Wärme	159
Energie	165
Entropie	173
Thermodynamische Kreisprozesse, Kühltisch und Wärmepumpe	181
Verhalten von Gasen und Flüssigkeiten	189
Mischungen und Zweiphasensysteme	194
Statistische Mechanik	197
Emergenz	205
5 Die Relativitätstheorien	211
<i>Brief vom 2.4.2008</i>	211
Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	213
Raum und Zeit: Der Begriff der Gleichzeitigkeit	220
Raum und Zeit: Zeitdehnung und Längenkontraktion	225
Raum und Zeit: Das Zwillingsparadoxon	228
Die Masse eines Körpers als Maß für dessen Energieinhalt	232
Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie: Das Äquivalenzprinzip	236
Folgerungen aus der Allgemeinen Relativitätstheorie	246
6 Quanten	257
<i>Brief vom 8.7.2008</i>	257
Kathoden- und Röntgenstrahlen	259

Radioaktivität	268
Wärmestrahlen	275
Lichtquanten	284
Das Bohrsche Atommodell	291
Atombau und Spektrallinien	298
Das Pauli-Prinzip	306
Die Geburt der Quantenmechanik	314
Die Unbestimmtheitsrelation	321
Schrödingers Katze	328
Das Gedankenexperiment von Einstein, Podolski und Rosen	337
Die Bellschen Ungleichungen	344
Quanteninformatik	346
7 Epilog	357
<i>Brief vom 11.2.2009</i>	357
Literatur	371
Index	375

Vorwort

Die Idee zu diesem Buch entstand aus einem Unbehagen heraus. Schon immer hatte ich dieses gespürt, wenn ich mit Freunden, Bekannten oder Kollegen, die den Naturwissenschaften fremd gegenüberstanden, ins Philosophieren geriet und dabei versuchte, einen Einblick in das Weltbild eines Physikers zu geben. Hinterher war ich immer frustriert. Zunächst hatte ich geglaubt, ich hätte so schnell nicht die richtigen Worte gefunden, aber bald hatte ich eingesehen, dass das Problem tiefer liegt. Es sind die Unterschiede im Vorverständnis, in der Ansicht, welche Fragen interessant sind, welche Kenntnisse und Fähigkeiten besonders schätzenswert sind. Das Selbstverständnis eines Faches hat man ja über viele Jahre in einer Art intellektueller Sozialisation verinnerlicht und lässt sich einem Außenstehenden nicht so schnell vermitteln.

Nachdem ich nun als Emeritus nicht mehr Physik selbst betrieb, aber immer häufiger die Gelegenheit erhielt, in allen möglichen Kreisen über Physik zu reden, wurde das Unbehagen noch größer. Und obwohl ich mir nach meinem letzten Lehrbuch geschworen hatte: „Nie wieder ein Buch“, habe ich mich nun doch entschlossen, einmal in aller Ruhe darzulegen, wie in der Regel ein Physiker seine Wissenschaft sieht und wie er sie versteht.

Es sollte also in erster Linie ein Buch über die Physik als Wissenschaft werden. Dabei sollte aber das „Metaphysische“ nicht einfach nur als Behauptung daherkommen, sondern sollte sich letztlich auch als Schlussfolgerung beim Leser selbst einstellen können, nachdem man die physikalischen Theorien und ihre Geburtswehen, ihre Eigenarten, ihre Folgen und Grenzen kennen gelernt hat.

Natürlich sollte das alles möglichst allgemein verständlich und in einem erzählerischen Ton geschehen, und bei der Überlegung, wie man das auch noch unterhaltsam gestalten könnte, erinnerte ich mich daran, dass der große Mathematiker Leonard Euler im Jahre 1769 ein Buch unter dem Titel *Briefe an eine deutsche Prinzessin über verschiedene Gegenstände aus der Physik und Philosophie* veröffentlicht hatte. Da es nun heute Prinzessinnen in größerer Anzahl nicht gibt, kam mir die Idee, „Briefe an eine Abiturientin über verschiedene Bereiche der Physik, nicht ohne Philosophie und Geschichte“ zu schreiben, wobei die „Abiturientin“ lediglich das Anspruchsniveau charakterisieren sollte. Diese Form schien mir wie geschaffen für mein Vorhaben: Ein Brief ist meistens so kurz, dass man ihn gerne ohne Pause liest, er kann persönlicher gehalten sein und lebendiger gestaltet werden. Nachdem ich mehrere Kapitel in dieser Art geschrieben hatte, merkte ich aber, dass man diese Form nicht ganz durchhalten kann. Briefe sind nun einmal etwas für menschliche Dinge, und ich wollte doch über die anderen Dinge dieser Welt reden. So ist eine Mischform entstanden, jedem Kapitel geht ein Brief voran, in dem Gedanken über das Thema des Kapitels ausgeführt sind. Für den Namen der „Abiturientin“ habe ich übrigens den meiner ältesten Enkelin Caroline gewählt.

Das Buch stellt die Entstehung unseres Wissens über die Natur im Bereich der Physik dar, und zwar auf drei Ebenen:

- auf einer rein physikalischen Ebene: Wichtigste physikalische Phänomene, Begriffe, Voraussetzungen, Prinzipien und Theorien werden erklärt. Man soll also wirklich etwas über Physik lernen.
- auf der wissenschaftstheoretischen Ebene: Die naturwissenschaftliche Methode und die Art ihres Anspruchs auf „Wahrheit“ werden transparent gemacht. Man soll also die Macht dieser Methode kennen lernen, aber auch die Grenzen der Theorien.
- auf wissenschaftshistorischer Ebene: Die Diskussionen im Rahmen der beiden oberen Ebenen folgen der geschichtlichen Entwicklung. Die Art des Fortschritts in der Physik wird so transparent.

Dabei liegt der Schwerpunkt auf der „alten“ Physik. Über aktuelle Fragen der Physik, z. B. über schwarze Löcher oder über den Urknall gibt es viele gute Bücher, kaum aber darüber, wie die Physik begann, wie man auf die ersten Probleme stieß, wie man sie löste und wie die naturwissenschaftliche Methode immer neue Erfolge zeitigte, die sich auch in der technischen Revolution widerspiegelten. Es soll aber auch gezeigt werden, wie bei der Entstehung dieses Wissens die Wissenschaftler erst noch auf schwankendem Boden standen, wie dieser sich allmählich festigte und wie das geistige Band, der Kanon der Theorien, immer größer, fester und kohärenter wurde.

Mit der Entwicklung der Physik bis zur Quantenmechanik hat man dann den Weg der Physik weit genug verfolgt, um das Weltbild der Physiker, deren Denkweise und deren intellektuellen Wertekanon zu verstehen. Man wird sehen, wie die Begriffe, die zur Erklärung der Welt notwendig werden, immer unanschaulicher werden, wird erkennen, dass diese Begriffe immer so neu und so unvorhersagbar sind, dass sie

durch reines Denken allein nicht zu entdecken wären. Die Beschränkung unserer Vorstellungskraft auf die Welt unserer menschlichen Erfahrungen wird deutlich werden, und man wird sich damit abfinden, dass wir die Natur außerhalb unserer menschlichen Erfahrungen nur verstehen und über sie verfügen können, wenn wir Unvorstellbares akzeptieren.

Ich habe drei Zielgruppen für dieses Buch im Auge:

- alle, die einfach einmal wissen wollen, wie die Physik „funktioniert“, um was es dort bei den prominenten Theorien geht, warum und in welcher Form es dort gesichertes Wissen gibt.
- Physiker: Diese sollten das Buch unterhaltsam finden und häufig auf etwas stoßen, was sie noch nicht wissen, vergessen haben oder so noch nie gesehen haben, insbesondere Studierende der Physik, die einen groben Überblick über die Themen ihres Studiums erhalten wollen.
- Schülerinnen und Schüler (nicht nur Abiturientinnen), in denen vielleicht die Liebe zur Physik oder einer anderen Naturwissenschaft geweckt werden kann.

Bei der Entstehung dieses Buch haben mich viele durch Wort und Tat unterstützt. Zunächst möchte ich meiner Frau danken, die alle Briefe und Abschnitte als Erste auf ihre Verständlichkeit geprüft hat, ebenso meinen Kindern Stefanie und Carsten, dann meinem Mitarbeiter Andreas Liehr, meinen Kollegen Hartmann Römer, Hans Mohr, Andreas Voßkuhle, Klaus Eichmann, Helmut Hoving sowie Klaus Scharpf, Martin Sunder-Plassmann, Christoph Horst, Christiane Zahn, die vorab alle oder einzelne Teile des Manuskripts kritisch gelesen haben und wertvolle Hinweise gegeben haben. Danken möchte ich auch den Freunden meines Rotary-Clubs und des Stammtisches Oberkirch Freiburg und den vielen weiteren,

die mich ermutigt haben und mir zeigten, dass eine solche Darstellung auf großes Interesse stoßen würde.

Der Spektrum-Verlag hat mich, insbesondere durch ihren Programmleiter Dr. Andreas Rüdinger, außerordentlich sorgfältig und kompetent bei der Veröffentlichung des Manuskripts begleitet.

Emmendingen, im November 2009

Josef Honerkamp

1

Prolog

Emmendingen, am 3.7.2007

Liebe Caroline,

Du hast Dich gestern über das Wort „Feldtheorie“ amüsiert, als wir gerade an einem großen Weizenfeld vorbei gingen. Das „Feld“ in der Physik ist wieder mal so ein Beispiel, indem ein Wort aus der Umgangssprache genommen und dann zu einem Fachbegriff mit einer ganz spezifischen Bedeutung gemacht wird. So, wie das Weizenfeld eine räumliche Ausdehnung hat, so erstreckt sich das Feld auch über den Raum, genauer: Wenn man jedem Ort in einem Raum eine physikalische Größe zuordnet – diese dort messen könnte oder wenn man weiß, dass sie dort existiert – dann spricht man von einem Feld. Ist diese Größe z. B. die Temperatur der Luft, so liegt also ein Temperaturfeld vor. Auf Wetterkarten sieht man oft solch ein Temperaturfeld angedeutet, wenn für verschiedene Orte über Europa die Temperatur angezeigt wird. Dabei ist dort die Temperatur jeweils am Boden des entsprechenden Ortes angegeben. Man könnte auch die Temperatur in verschiedenen Höhen angeben. Wir haben es in der Atmosphäre der Erde also mit einem Temperaturfeld zu tun, das von drei Koordinaten abhängt, zwei davon charakterisieren den Ort am Boden, die dritte ist durch die Höhe über dem Boden bestimmt. Wenn man noch die Änderung der Temperaturen mit der Zeit verfolgen will, ist das Temperaturfeld eine Funktion nicht nur vom Ort sondern auch noch von der Zeit.

Nun kann man an jeder Wetterstation aber auch den Wind messen. Dieser hat eine Stärke und eine Richtung. Die Windgeschwindigkeit ist also eine gerichtete Größe, man nennt so etwas einen Vektor. Wenn man sich also die Windgeschwindigkeit an jedem Ort zu jeder Zeit angegeben denkt, erhält man ein Vektorfeld, das Windgeschwindigkeitsfeld.

Solch ein Feld ist also nichts Tiefsinniges, einfach eine physikalische Größe, die wir uns an jedem Ort und zu jeder Zeit existierend denken. Dabei muss man natürlich noch sagen, welche Orte und Zeiten man meint, ob man die Atmosphäre über Europa bis zu 10000 m Höhe meint, und das im Zeitraum vom 1. bis 30. Juli 2007, oder ob man den gesamten Weltraum zu allen Zeiten im Sinne hat.

Neben dem Temperaturfeld und dem Windgeschwindigkeitsfeld kennst Du sicher noch andere Felder, nämlich das Magnetfeld und das elektrische Feld. Diese Begriffe sind ja schon in den täglichen Sprachgebrauch übergegangen, aber wenige werden wissen, wann diese Begriffe eigentlich entstanden sind, welche intellektuelle Leistung dahinter steht. Und die wenigsten werden wissen, dass das Feld heute der zentrale Begriff für das Verständnis der physikalischen Welt geworden ist.

Ehe ich Dir davon berichte, sollte ich auf einen anderen, sehr viel näher liegenden Begriff zu sprechen kommen, den des „Teilchens“. Wenn wir uns in der Welt umschaun, sehen wir ja keine Felder, sondern Steine, Bäume, Tiere, Menschen, Sterne. Nun betrachtet ein Physiker nicht gerne etwas, was wächst oder lebt – als Physiker, meine ich – das ist ihm zu kompliziert. Beschränken wir uns auf Steine und Sterne, oder z. B. auf Bälle, Äpfel und Birnen.

Was unterscheidet nun ein Teilchen von einem Feld? Zunächst, ganz klar, ein Feld ist ausgedehnt, ein Teilchen dagegen auf eine mehr oder weniger kleine Raumgegend beschränkt. Ein Feld ist eben ein Feld, es herrscht an jedem Ort. Ein Teil-

chen ist ein ganz lokales Gebilde, es ist nur an einem bestimmten Ort vorhanden. Gut, es kann sich bewegen, von Ort zu Ort, mit einer bestimmten Geschwindigkeit, aber es bleibt ein lokales Gebilde. Ein Feld ist stets überall vorhanden und kann sich an jedem Ort mit der Zeit verändern. „Teilchen“ und „Feld“ sind also irgendwie komplementäre Begriffe.

Plausibel ist, dass den Menschen in der Geschichte der Wissenschaft der Begriff des Teilchens zuerst in den Sinn kam. Schon um 400 v. Chr. vermutete der griechische Philosoph Demokrit, dass die ganze Welt aus sehr kleinen, unsichtbaren Teilchen bestände, die keine innere Struktur besitzen und unteilbar (gr. *a-tomos* = unteilbar) sind. Aristoteles kritisierte das heftig, er meinte, wenn Teilchen ausgedehnt seien, können sie niemals unteilbar sein. Aber dieser Streit geht uns jetzt nichts an, denn die Teilchen, von denen wir reden, sind ja normale, sichtbare und mehr oder weniger ausgedehnte Objekte.

Die Bewegung solcher Teilchen – wie Bälle, Kanonenkugeln und vor allem Sterne und Planeten – das war das erste Thema der modernen Naturwissenschaft, die für uns mit Galileo Galilei beginnt. „Nichts ist älter in der Natur als Bewegung, und über dieselbe gibt es weder wenig noch geringe Schriften der Philosophen. Dennoch habe ich deren Eigentümlichkeiten in großer Menge und darunter sehr wertvolle in Erfahrung gebracht“, schreibt Galilei in seinem bedeutendsten Werk „Discorsi“, das er im Jahre 1638 verfasst hat. Das waren damals Themen, die viel diskutiert wurden, auch im Kreis von Gebildeten an den Höfen.

Du kennst, wie die meisten, Galilei von seiner Auseinandersetzung mit der Inquisition der katholischen Kirche her. Du weißt, dass er der Meinung abschwören musste, dass die Erde nicht der Mittelpunkt der Welt ist. Dieser Streit um das Kopernikanische Weltbild ist aber nur der Anlass und Aufhänger für eine viel tiefer liegende Auseinandersetzung. Darüber ein andermal mehr. Hier ist zu bemerken, dass Galilei als Begrün-

der der modernen naturwissenschaftlichen Methode gilt. Er führte zwei konstituierende Elemente in die Betrachtung der Phänomene dieser Welt ein: das Experiment und die Mathematik.

Der englische Physiker Isaac Newton, geboren im Jahre 1642, in dem Galilei starb, brachte diese Methode zum ersten Höhepunkt. Er verstand, die Planetenbahnen genau zu berechnen. Seine Methode, Bewegungen von Objekten mit Hilfe von mathematischen Gleichungen zu berechnen, war so erfolgreich, dass sie im 18. und beginnenden 19. Jahrhundert zum Inbegriff von Wissenschaft überhaupt führte. Diese Methode ist natürlich noch heute gültig und aktuell und gehört zum unverzichtbaren Lehrstoff in Physik an den Universitäten. Man nennt diesen Zweig der Physik die „Klassische Mechanik“, in ihr geht es also darum, die Bewegung von Teilchen zu berechnen.

Aber man kannte noch andere Phänomene wie die Bewegung von isolierten Objekten. Da gab es die merkwürdigen Versuche und Entdeckungen in der Elektrizität, mit denen auch „junge Elektrischer“ die Herrschaften bei Hofe und Gesellschaften unterhielten. Es dauerte einige Zeit, bis man diese Phänomene verstand und reproduzierbare Experimente machen konnte. Auch das ist eine abenteuerliche Geschichte. Was ich aber hier sagen will, ist, dass hierbei der Begriff des Feldes und der Feldtheorie ins Spiel kam. Man führte ein elektrisches und ein magnetisches Feld ein. Beides sind Vektorfelder wie ein Windgeschwindigkeitsfeld, haben also eine Stärke und eine Richtung. Alle Erfahrungen, die man mit elektrischen und magnetischen Phänomenen im Laufe der Jahrhunderte gewonnen hatte, konnte man mithilfe der Vorstellung von solchen Feldern sehr ökonomisch beschreiben und in mathematische Beziehungen zwischen diesen Feldern fassen. Diese Beziehungen erwiesen sich als universell, immer wieder und unter allen Umständen als gleich, und der schottische Physiker

James Clerk Maxwell stellte im Jahre 1868 ein Gleichungssystem für das elektrische und magnetische Feld auf, das alle diese Beziehungen vollständig und widerspruchsfrei formuliert. Das war die Elektrodynamik, die erste Feldtheorie, ein großer Erfolg wie die Newtonsche Mechanik und ebenso wie diese ein Grundpfeiler auch der heutigen Physik und Technik. Mithilfe der Maxwell'schen Theorie lassen sich alle elektrischen und magnetischen Effekte quantitativ bestimmen.

Als man mit Beginn des 20. Jahrhunderts lernte, dass es Atome wirklich gibt und wie diese aufgebaut sind, als man also wiederum einen neuen Phänomenbereich kennen lernte und studierte, musste man diese beiden großen Theorien erweitern, zur Quantenmechanik und zur Quantenelektrodynamik. Die Namen dieser Theorien weisen darauf hin, dass es in ihnen wohl auch um die Erklärung mechanischer bzw. elektrodynamischer Phänomene geht, dass aber auf der atomaren Ebene ein ganz neuer Begriff wichtig wird, der eines Quants. Dieser löst gewissermaßen das Konzept eines Teilchens ab. Quanten können zwar auch noch als lokalisierte Objekte angesehen werden, haben aber Eigenschaften, die sich mit unseren Vorstellungen über Teilchen nicht immer vertragen. Dennoch spricht man von ihnen auch oft als Teilchen – aus lauter Gewohnheit. Andererseits hat man es in der Quantenelektrodynamik statt mit Feldern nun mit entsprechenden Quantenfeldern zu tun; die Quantenelektrodynamik ist also eine Quantenfeldtheorie.

Nun kann ich hier nicht erklären, was eine Quantenfeldtheorie ist. Schade, denn das Quantenfeld ist zum zentralen Begriff der Physik der fundamentalen Wechselwirkungen geworden. Ich will wenigstens versuchen zu erklären, warum das so ist:

Erstens: Man kann in solchen Quantenfeldtheorien auch Quanten definieren. Das bedeutet, dass sich statt des Gegensatzes von Teilchen und Feldern nun ein anderes Verhältnis zwischen Quanten und Quantenfeldern ergibt: Das Quantenfeld

ist die zentralere Größe. Ja, lokalisierbare Objekte wie Quanten kann man als energetische Verdichtungen des Feldes verstehen, gewissermaßen als „Energieknubbel“. Diese Energieknubbel können sich unter gewissen Umständen neu bilden, sich auflösen, d. h. man kann auch Teilchenerzeugung und Teilchenvernichtung in solchen Theorien gut beschreiben, und die alte Frage, ob es denn ein kleinstes Teilchen gibt, und wieso das dann unteilbar ist, erübrigt sich. Es kann eben nur bestimmte solche Energieknubbel geben – mit verschiedenen Massen. Masse und Energie sind ja über die Einsteinsche Formel $E = mc^2$ äquivalent, besser gesagt: Masse ist eine Form von Energie. Und diese Massen oder Energieknubbel können sich unter bestimmten Umständen ineinander umwandeln. „Da unten“ sind alle irgendwie gleich.

Zweitens: Es kamen im Verlauf des letzten Jahrhunderts noch zwei weitere Quantenfeldtheorien dazu. Man entdeckte nämlich im Bereich der Atome und Atomkerne noch andere Phänomene, nämlich die Radioaktivität und die Kernkräfte. Man nannte die Wechselwirkung vermittelt durch die Kernkräfte, die für den Zusammenhalt der Atomkerne sorgen, „starke Wechselwirkung“, jene, die die Radioaktivität beschreibt, „schwache Wechselwirkung“, wobei Du Dich jetzt an den Namen „stark“ und „schwach“ nicht stören solltest. Die schwachen und die starken Kräfte führen nur zu Wechselwirkungen auf atomarer Distanz, sie sind sozusagen nur kurzreichweitig. Gravitative und elektromagnetische Kräfte sind dagegen langreichweitig. Diese spüren und messen wir über Distanzen des täglichen Lebens, deshalb kennen die Menschen diese seit alters her und haben sie zuerst erforscht.

Vier fundamentale Kräfte oder Wechselwirkungen kannte man also in der Mitte des letzten Jahrhunderts. Warum gerade vier? Das fragte sich natürlich jeder, der damit zu tun hatte. Dabei hatte man auch stets eine alte Idee im Hinterkopf, die Idee der Vereinheitlichung von Theorien. Einstein hat in seinen letzten Jahren intensiv versucht, die Maxwellsche Elektrodyna-

mik mit der Gravitationstheorie, wie sie von ihm in der Allgemeinen Relativitätstheorie formuliert wurde, zu verschmelzen. Eine solche vereinheitlichte Theorie der elektromagnetischen und gravitativen Kräfte wäre ja noch fundamentaler, würde ja alle gravitativen und elektrischen und magnetischen Phänomene – ausgehend von einem einzigen Gleichungssystem – berechnen können. Das wäre doch fantastisch. Aber Einstein hatte keinen Erfolg, es ging einfach nicht.

Inzwischen hat man aber auf der Ebene der Quantenfeldtheorien eine Vereinheitlichung gefunden, die so genannte elektroschwache Theorie, eine Vereinheitlichung der schwachen und elektromagnetischen Quantenfeldtheorien. Diese hat bisher alle experimentellen Tests gut bestanden. Man arbeitet an einer „Großen Vereinheitlichen Theorie“ der schwachen, elektrodynamischen und starken Wechselwirkung und an einer „Theorie für Alles“, in der auch noch die Einsteinsche Gravitationstheorie enthalten ist.

Die heutigen Theorien für die fundamentalsten Dinge, aus denen die Welt gestrickt ist, sind also Feldtheorien, und zwar Quantenfeldtheorien. Man könnte also sagen „Alles ist Feld“, Materie ist nur eine Verdichtung des Feldes. Man hofft, das fundamentale Feld finden zu können und eine Theorie für dieses Feld, aus der man alle Gesetze der Physik ableiten kann, wenigstens im Prinzip.

Ich finde die ganze Geschichte ungeheuer interessant und irgendwie schön, und ich weiß, viele empfinden es genau so. Du wirst vielleicht denken: „Wenn es nur nicht so kompliziert wäre und immer so viel mit Mathematik einherginge. Wenn nur nicht immer so viele neue Begriffe auftauchten.“ Vielleicht müsste ich einmal versuchen, Dir einiges etwas genauer zu erklären, auch wenn es jeweils immer „ein weites Feld“ ist. Aber immerhin weißt Du jetzt, welche Rolle der Begriff des Feldes in der Physik spielt und verstehst, warum die Physiker großen Respekt vor einer Feldtheorie haben. Ich bin gespannt auf Deine Reaktion auf diesen Brief ...

Emmendingen, am 17.7.2007

Liebe Caroline,

nun, da habe ich ja mit meinem Brief über den Feldbegriff in der Physik eine große Lawine von Fragen losgetreten. So muss ich wohl umgehend antworten und wenigstens die drängendsten Fragen versuchen zu beantworten. Du hast Recht, ich gebrauche häufig das Wort „Theorie“ und Du hast das Gefühl, dass ich damit mehr meine als man umgangssprachlich darunter versteht. Denn: „Das ist nur so eine Theorie“ oder „das ist ein fürchterlicher Theoretiker“ sind doch typische Sprüche, in denen die Theorie nicht gut wegkommt und eher im Gegensatz zur Praxis oder Erfahrung gesehen wird. „Grau, teurer Freund, ist alle Theorie, und grün des Lebens goldner Baum“, heißt es im „Faust“. Du wirst sehen, eine physikalische Theorie ist weder grau, noch steht sie im Gegensatz zur Erfahrung.

Du kennst sicherlich die Evolutionstheorie, weißt vielleicht auch etwas über Wissenschaftstheorien. Das sind respektable wissenschaftliche Theorien, die beschreibende und erklärende Aussagen in Übereinstimmung mit der Erfahrung enthalten. Physikalische Theorien zeichnen sich aber durch eine ganz wesentliche zusätzliche Eigenschaft aus: Sie sind mathematisch formuliert. Alle Theorien, von denen ich im letzten Brief gesprochen habe, die Newtonsche Mechanik, die Maxwellsche Elektrodynamik und ihre Erweiterungen für den atomaren Bereich, die Quantenmechanik und die Quantenelektrodynamik, diese vier Theorien – aber auch andere, von denen ich noch gar nicht gesprochen habe, werden definiert durch einen mathematischen Ausdruck, also z. B. durch einen Satz von Gleichungen wie bei der Elektrodynamik.

Man nennt diese mathematischen Gleichungen auch die Grundgleichungen oder das Grundgesetz der Theorie. Zur Lösung dieser Gleichungen gibt es allgemein anerkannte, in der Mathematik auch sonst bekannte Methoden. Man kann also logisch einwandfrei die Folgerungen aus den Grundgleichungen

bezüglich messbarer Größen ziehen und so Vorhersagen machen, und zwar quantitativ – man kann also wirklich behaupten, wie groß dieser oder jener Effekt ist, welchen Wert diese oder jene Größe genau haben muss, wenn ich sie so oder so messen würde. Die mathematische Formulierung der Grundgesetze und die weiteren mathematischen Folgerungen ermöglichen diese quantitativen Schlüsse. Den Unterschied zwischen quantitativen und nur qualitativen Schlüssen sollte man nicht unterschätzen. Klar, es macht doch einen Unterschied, ob ein Effekt sehr groß ist oder ob er, zwar vorhanden, eigentlich immer vernachlässigbar ist. Aber noch wichtiger: Die quantitativen Aussagen ermöglichen ein sehr scharfes Urteil darüber, ob die Theorie etwas taugt, indem man diese Aussagen mit Experimenten konfrontiert und – Spitz auf Knopf – prüft, ob nun Theorie und Experiment übereinstimmen. Wenn eine Theorie in mathematischer Form antritt, will sie auch exakt gültig sein, experimentelle Ergebnisse und Berechnungen auf der Basis der Theorie müssen bei Berücksichtigung der Messfehler übereinstimmen.

Was heißt das konkret für unsere Maxwellschen Gleichungen? Solch ein Typ von Gleichungen nennt der Mathematiker partielle Differenzialgleichungen, solche kommen in den verschiedensten Gebieten vor und es gibt allgemeine und gut studierte Methoden, sie für alle möglichen Situationen zu lösen. Mit der Anwendung solcher Methoden auf die Maxwellschen Gleichungen lassen sich alle elektrischen und magnetischen Effekte und Phänomene erklären und genau berechnen und man kann die gesamten Gesetze der Elektrotechnik auf diese Maxwellschen Gleichungen zurückführen. Natürlich gibt es Situationen, in denen das Ausrechnen an praktische Grenzen stößt. Mitunter muss man z. B. zusätzlich Gesetze oder Beziehungen aus anderen Bereichen der Physik bemühen, um eine praktische Aufgabe zu lösen. Aber immer, wenn es um das elektrische und das magnetische Feld geht, dann gelten die Maxwellschen Gleichungen.

An diese Macht von Theorien haben sich die Physiker inzwischen so gewöhnt, dass sie darüber kaum noch staunen. Erst wenn man eine Größe besonders präzise messen kann und dadurch die Theorie einer besonders strengen Prüfung unterziehen kann, horchen sie noch auf. So wird z. B. heute für den so genannten Landé-Faktor des Elektrons ein Wert von 2,0023193043622 gemessen, mit einer Ungenauigkeit in den letzten beiden Ziffern. Für eine solche exakte Messung muss man einen großen Aufwand treiben. Mit Hilfe der Quantenelektrodynamik berechnet man, auch mit großem Aufwand, für diese Größe einen Wert von 2,0023193048 mit einer Ungenauigkeit von 8 in der letzten Ziffer aufgrund der Ungenauigkeit von physikalischen Konstanten, die in die Rechnung eingehen. Diese Übereinstimmung gilt wohl als die genaueste in der gesamten Naturwissenschaft.

Eine Theorie sollte aber nicht nur allen Prüfungen bei der Konfrontation mit experimentellen Fakten standhalten, sie sollte auch Aussagen gestatten, die in dem historischen Zeitpunkt, in dem die Theorie aufgestellt wird, neu sind. In der Tat, Maxwell hat z. B. bald gesehen, dass seine Gleichungen auch Lösungen haben, die elektromagnetischen Wellen entsprechen. Wieder ein neuer Begriff? Eigentlich nicht, Du kennst ja Wasserwellen, dort ist es die Höhe des Wasserspiegels, die sich auf und ab bewegt. Bei Schallwellen ist es die Dichte der Luft, die, an einem festen Ort betrachtet, abwechselnd mal größer, mal kleiner wird. Nun, bei elektromagnetischen Wellen werden die Felder, an einem festen Ort betrachtet, abwechselnd mal größer, mal kleiner in ihrer Stärke. Sie können aber auch noch in der Richtung periodische Bewegung machen. Das ist ein wenig komplizierter, aber mathematisch beschrieben, wird das sehr durchsichtig.

Heinrich Hertz hat solche Wellen dann auch tatsächlich am 13. November 1886 erzeugen können – und sie wieder auffangen können. Er hat damit der Maxwellschen Theorie zur endgültigen allgemeinen Akzeptanz bei den Physikern verholfen.

Diese standen der Maxwellschen Theorie ja zunächst sehr reserviert gegenüber, die Mathematik war ihnen zu schwer (ist das nicht tröstlich?). Welche Folgen diese Entdeckung der elektromagnetischen Wellen hatte, weißt Du, benutzt Du doch schließlich jeden Tag das Fernsehen, Radio, Handy, Du surfst über ein Funknetz mit Deinem Notebook im Internet und schließt über Funk Dein Auto auf und zu. Ich kann es nicht lassen, Dir die Maxwellschen Gleichungen auch einmal zu zeigen. Wenn man etwas sehr schönes hat oder kennt, muss man es einfach zeigen. Erschrecke aber bitte nicht, Du musst sie ja nicht verstehen. Hier sind sie:

$$\begin{aligned}\nabla \times E(r, t) + \frac{\partial B(r, t)}{\partial t} &= 0, \\ \nabla \cdot E(r, t) &= \frac{1}{\varepsilon_0} \varrho(r, t), \\ \nabla \cdot B(r, t) &= 0, \\ \nabla \times B(r, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial E(r, t)}{\partial t} &= \mu_0 J(r, t).\end{aligned}$$

Gar nicht so schlimm, nicht wahr. Was Du auf jeden Fall siehst: Es kommen die Felder $E(r, t)$ und $B(r, t)$ vor, das elektrische bzw. das magnetische Feld. Die stehen auf der linken Seite mit einigen Ausdrücken, die offensichtlich mathematischen Operationen entsprechen, darunter befinden sich ja auch das Plus- und das Minuszeichen. Auf der rechten Seite stehen die Quellen, d. h. die Verursacher der Felder: elektrische Ladungen und der elektrische Strom. Das ist alles. Und das ist eine physikalische Theorie – und eine der schönsten und nützlichsten.

Wie kam Maxwell dazu, solche Gleichungen aufzuschreiben? Nun, das ist eine lange Geschichte, die Geschichte der Elektrodynamik. Die will ich Dir ein anderes Mal erzählen. Aber wie kam man überhaupt dazu, eine große Fülle von Erfahrungen

zu nur wenigen mathematischen Gleichungen zu verdichten und das Experiment zum Richter über eine Theorie zu machen? Diese Art, Physik zu betreiben, war zu Zeiten Maxwells schon 250 Jahre alt und hatte zu den großen Erfolgen der klassischen Mechanik geführt. Entdeckt hatte sie Galilei.

Ich hatte schon erwähnt, dass Galilei als der Begründer der naturwissenschaftlichen Methode gilt, weil er das Experiment und die Mathematik in das Nachdenken über die Welt einführte. Das war damals eine Revolution. Diese Art zu denken und zu forschen hat in der Tat die heutige säkularisierte und technisierte Welt, die so genannte westliche Welt hervor gebracht. Galilei wusste übrigens, dass das so unerhört neu war und ahnte sicherlich, wie weittragend das sein wird. Am 7. Mai 1610 schrieb er nämlich an einen toskanischen Staatssekretär, nachdem er dargelegt hatte, dass er auf diese Weise einige höchst bemerkenswerte Gesetze entdeckt hatte: „Daher erlaube ich mir, das eine neue Wissenschaft zu nennen, die von ihren Grundlagen angefangen von mir entdeckt worden ist.“ Mag sein, dass er deshalb auch später gegenüber den Vertretern der Inquisition so arrogant wirkte. Das Neue, das er in die Welt brachte, war wirklich ein großer Schritt für die Menschheit gewesen. Die Kirche spürte intuitiv, dass da jemand war, der ihr die Deutungshoheit über diese Welt wegnahm. Statt Autorität nun Mathematik und Experiment! Und sie kaut noch heute an dem Problem.

Aber lass mich mehr bei diesem Neuen bleiben, das die Zukunft mehr beeinflusst hat als diese Auseinandersetzung zwischen der Inquisition und Galilei. Lass mich zunächst ein wenig mehr von ihm erzählen.

Galileo Galilei wurde im Jahre 1564 in Pisa geboren, im Jahre 1581 schrieb er sich an der dortigen Universität für das Fach Medizin ein. Zunächst musste er wie alle Studenten die so genannte Artistenfakultät durchlaufen, an der auch Naturphilosophie gelehrt wurde. Diese bestand in der Interpretation

antiker Autoritäten, vor allem der Schriften Aristoteles. Die Beschreibung der Welt sowie der Bewegung der materiellen Körper in der Welt gehörte damals noch zur Philosophie und Aristoteles galt als uneingeschränkte Autorität, zu jeder Erfahrung hatte er eine plausible Erklärung geliefert.

Die Erde ruht danach im Mittelpunkt der Welt; irdische Materie strebt dem Weltmittelpunkt als ihrem „natürlichen Ort“ zu. Das erklärt die Kugelgestalt der Erde und die Fallbewegung, für die nach Aristoteles auch gilt, dass schwere Körper schneller fallen als leichte.

Die Erde ist der Bereich des Entstehens und Vergehens, streng getrennt von ihr sind die himmlischen Sphären. Denn Gestirne, vom Mond an aufwärts, waren von ganz anderer Materie, ätherisch, ewig, unzerstörbar. Planeten vollführen verschlungene Wege auf ihren Kristallsphären, die ganze Welt wird schließlich von der Sphäre der Fixsterne abgeschlossen, die von dem ersten Bewegter, Gott, oder den Engeln in Bewegung gehalten wird.

Galilei hat dieses alles vermutlich treu studiert und in sich aufgenommen, es muss aber wohl keinen großen Eindruck auf ihn gemacht haben. Erlebnisse, die für sein späteres wissenschaftliches Arbeiten prägend waren, kamen nicht von diesem etablierten konservativen Lehrbetrieb, sondern von außerhalb. Galilei lernt 1583 von Ostilio Ricci, einem Ingenieur und Geometriker, der am Hofe die Pagen in Geometrie zu unterweisen hatte, die klassische Geometrie des Euklid kennen. Er wird davon so beeindruckt, dass er bald nach einigen Kämpfen mit seinem Vater den Plan eines Medizinstudiums zu Gunsten der Mathematik aufgibt.

Galilei war nicht der Einzige, auf den Euklid so einen bedeutenden Einfluss hatte. Euklids wichtigstes Werk, die „Elemente“, von denen leider nur 13 Bücher erhalten sind, ist nach der Bibel das Werk, das in der westlichen Welt am meisten übersetzt, veröffentlicht und studiert wurde. Einstein tröstete sich

mit diesen Schriften über öde Schuljahre hinweg. Der Philosoph Bertrand Russel schreibt in seiner Autobiografie „Mein Leben“: „Im Alter von elf Jahren begann ich Euklid zu lesen. Dies war eines der größten Ereignisse meines Lebens, atemberaubend wie die erste Liebe.“

Der Reiz der Geometrie von Euklid beruhte nicht auf dem ästhetischen Genuss, der einem durch die Betrachtung der geometrischen Figuren und Körper bereitet werden konnte. Was wichtiger war: Von Euklid kann man lernen, wie die Struktur einer Theorie sein soll, ja wie überhaupt Ordnung und Zusammenhang in einem Wissensgebiet formuliert werden kann: Er entwickelte das axiomatische deduktive Verfahren und er benutzte die Mathematik für seine Deduktionen. Da es auch noch um mathematische Objekte ging, um geometrische Figuren, konnte er die reinste Form einer Theorie entdecken.

Eine Theorie ist danach eine Menge von Aussagen mit einer hierarchischen Struktur: Es gibt eine Untermenge, die die Axiome (Basisaussagen, Grundannahmen, Grundregeln, Grundgleichungen) bilden. Alle anderen Aussagen sind daraus ableitbar, und zwar mit logischen oder mathematischen Schlüssen. Die Menge der Axiome sollte in sich widerspruchsfrei sein. Man sollte aus einem oder einigen Axiomen nicht eine Aussage ableiten können, die einem anderen Axiom widerspricht.

Aus abgeleiteten Aussagen können weitere Aussagen abgeleitet werden. Es entsteht so eine Hierarchie von Aussagen. Abgeleitete Aussagen können somit durch Aussagen, die in dieser Hierarchie den Axiomen näher stehen, oder gar durch die Axiome selbst erklärt werden.

Eine Theorie einer solchen Struktur ist also zum ersten Male mit der Geometrie von Euklid aufgestellt worden. Die Geometrie gilt seitdem als Muster einer jeden exakten Wissenschaft, und das Verfahren, wie in der Geometrie („more geometrico“) Aussagen aus Axiomen ableiten zu können, ist das Ideal einer jeden anderen Wissenschaft geworden. Spinoza hat selbst eine

Ethik „more geometrico“ angestrebt. Immanuel Kant hielt den kategorischen Imperativ – „handle so, dass die Maxime deines Willens jederzeit als Prinzip einer allgemeinen Gesetzgebung gelten könne“ – für das Grundaxiom einer jeden Ethik. Historisch wird eine Wissenschaft natürlich nie so entstehen, dass man zuerst die Axiome (Grundaussagen) findet und dann wirklich alle anderen Aussagen ableitet. Die Aussagen, auf die man alle anderen reduzieren kann, werden sich erst im Verlauf der Entwicklung herauschälen. Eine Wissenschaft braucht eine gewisse Reife, um dem Ideal „more geometrico“ nahe zu kommen.

Die Physik ist in diesem Sinne schon früh eine sehr reife Wissenschaft geworden. Das aber nicht etwa, weil die Physiker schlauer sind. Nein, es gibt offensichtlich bei der Bewegung von Planeten und Kugeln wie für elektromagnetische und andere physikalische Phänomene Gesetzmäßigkeiten, die sich besonders gut experimentell isolieren und auch mathematisch erfassen lassen. Galilei hat als Erster diese Natur der Natur erkannt, als er die Bewegung studierte, und als Maxwell etwa 250 Jahre später mit seinen Gleichungen die Axiome der Elektrodynamik formulierte, war diese Art, Wissenschaft zu betreiben, bei Physikern und Mathematikern schon zum Inbegriff von Wissenschaft überhaupt geworden.

In der Physik, in der es um so fundamentale Aspekte der Natur geht wie um die Bewegung von Himmelskörpern oder den Aufbau der Materie, kann man dem Ideal einer Theorie Euklidischer Prägung natürlich besonders nahe kommen. In Chemie, Biologie oder gar in der Medizin studiert man wesentlich speziellere und komplexere Prozesse, an denen jeweils sehr viele und auch komplexere Teilchen beteiligt sind. Zwar sind diese Teilchen und Prozesse grundsätzlich auch physikalischer Natur, aber eben nur grundsätzlich. Man muss, um halbwegs ökonomisch argumentieren zu können, in diesen Bereichen der Naturwissenschaft jeweils neue Begriffe einführen, und mit

der Betrachtung, wie z. B. ein Protein aus einzelnen Atomen zusammengesetzt ist, kann man oft nicht viel gewinnen. Die Funktionen und Verhaltensweisen einer Zelle z. B. möchte man doch durch die Eigenschaften der Proteine, also durch die unmittelbaren Bausteine der Zelle erklären und nicht erst durch die Eigenschaften der Atome, die ja die Bausteine der Bausteine wären.

Dabei kann man bisher oft nur qualitative Schlüsse aus den Beobachtungen und Experimenten ziehen und mathematische Beschreibungen finden hier wegen der Komplexität nur langsam Eingang. An eine hierarchische Struktur mathematischer Beziehungen ist selten zu denken. In der Reihenfolge: Chemie, Biologie, Medizin, sind wohl diese Wissenschaften geeignet, sich dem Ideal „more geometrico“ irgendwie zu nähern. Dabei spielt die Formalisierung durch die Mathematik eine entscheidende Rolle. Erst dadurch werden Schlussfolgerungen unanfechtbar und von ihrer Gültigkeit kann eindeutig auf die Gültigkeit der Annahmen zurückgeschlossen werden. Ob eine Mathematisierung einer Wissenschaft aber auch immer zur Entdeckung fundamentaler Mechanismen und Gesetze führt und damit zu einer Hierarchisierung der Aussagen „more geometrico“, wage ich nicht zu behaupten. Die Sprache der Mathematik ist dazu wohl notwendig, aber vielleicht nicht hinreichend.

In der Physik gibt es allerdings auch das Gebiet „Komplexe Systeme“. Ein Teilgebiet davon ist die Thermodynamik, auch Wärmelehre genannt. Da geht es z. B. um den Zusammenhang von Druck und Temperatur bei Gasen und Flüssigkeiten, also bei Systemen, die viele Teilchen enthalten. Auch hier gibt es Begriffe, die neu sind, d. h. nur auf der Beschreibungsebene des Gases auftreten, z. B. „Druck“ und „Temperatur“: Einzelne Teilchen besitzen keine Temperatur und keinen Druck. Dennoch lassen sich die Thermodynamik und auch die verwandte Statistische Mechanik sehr gut „more geometrico“ gestalten.

Dieses Beispiel ist vielleicht ein Fingerzeig, dass das Euklidische Ideal nicht ganz auf die Physik beschränkt sein muss.

Die Geschichte, wie diese Methode, der Welt zu begegnen, ihren Weg genommen hat, ist unerhört spannend und tief Sinnig. Ich denke, wenn man sich in diese Geschichte hinein versenkt, wird man besser verstehen, die Kraft der Wissenschaft und ihre Früchte richtig einzuschätzen und – auch zu genießen.

Ja, ich will versuchen, wirklich mit Dir diesen Weg zu gehen. Dabei muss ich gar nicht auf die neuesten Entwicklungen zu sprechen kommen. Das würde den Rahmen sprengen und ist für unser Vorhaben auch nicht so wichtig. Es gibt übrigens auch genügend gute Bücher darüber. Einen Einblick darin, wie eine Naturwissenschaft und insbesondere die Physik „funktioniert“ und was man von deren Erkenntnissen zu halten hat, das lernt man am besten, wenn man die Entstehung dieser Denkweise bis zu ihren markantesten Höhepunkten verfolgt. Der vorerst letzte große Höhepunkt war die Formulierung der Quantenmechanik. Und diese stellt einen Höhepunkt nicht nur hinsichtlich der Erweiterung unseres Weltbildes dar, sondern sie zeigt auch besonders deutlich, wie diese Art, Wissenschaft zu betreiben, zu ihren Ergebnissen kommt.

Genug der Vorrede. Fangen wir an ...