

# Über das Wesen der Theoretischen Physik

Autor(en): **Fierz, Markus**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Studia philosophica : Schweizerische Zeitschrift für Philosophie =  
Revue suisse de philosophie = Rivista svizzera della filosofia =  
Swiss journal of philosophy**

Band (Jahr): **16 (1956)**

PDF erstellt am: **11.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-883419>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Über das Wesen der Theoretischen Physik<sup>1</sup>

von Markus Fierz

Indem ich im Titel meines Vortrages «über das Wesen» und nicht «das Wesen» sage, möchte ich zum Ausdruck bringen, daß ich mein Thema durchaus nicht erschöpfend behandeln kann; denn wie könnte es gelingen, das Wesen einer Sache ganz zu erfassen? Wissen wir denn überhaupt, worin das Wesen von irgendetwas besteht, ja, wissen wir überhaupt, ob der Wesensbegriff selber ein sinnvoller Begriff sei?

Aristoteles suchte ganz allgemein festzulegen, was das Wesen der Dinge sei. Einerseits schien ihm dieses in ihrer begrifflichen Definition zu bestehen, andererseits war ihm das Wesen der Dinge etwas wie ihre Seele, das heißt dasjenige, was ihnen Wirksamkeit, Aktualität, verleiht. Liest man die Ausführungen des Aristoteles, so wird man nicht daran zweifeln können, daß er sich der Schwierigkeiten und Dunkelheiten seiner Auffassung durchaus bewußt war, und so wird man ihm kaum vorwerfen können, seine Ausführungen seien nicht sehr lichtvoll. Wenn nun meine eigenen Aussagen des Lichtes entbehren sollten, so bitte ich Sie, mir dies ebenfalls nicht allzusehr zu verübeln, denn auch ich bin mir mancher Schwierigkeiten und Dunkelheiten wohl bewußt.

Um nun aber einen Anfang zu finden, will ich im Sinne des Aristoteles mit einer begrifflichen Formulierung dessen, was theoretische Physik sei, anfangen: Theoretische Physik können wir als eine Wissenschaft auffassen, deren Ziel es ist, in einer mathematischen Struktur ein Abbild der Welt zu entwerfen.

Wie immer bei solch kurzen Formulierungen, mögen sie noch so glücklich gewählt sein – und ob dies für die hier gegebene zutrifft, ist zudem noch eine Frage –, zeigt sich bei näherem Zusehen, daß sie der Genauigkeit entbehren. Sie werden bestenfalls eine Ahnung dessen, was gemeint ist, vermitteln.

---

<sup>1</sup> Vortrag, gehalten in der Basler Philosophischen Gesellschaft.

Halten wir aber gleichwohl an unserer Erklärung fest, so dürfen wir noch hinzufügen: Theorie, das heißt Schau. Hier soll demnach die Welt im Bilde einer mathematischen Struktur erschaut werden. Nun wissen Sie ja, daß für Plato die mathematischen Strukturen den Ideen verwandt, ja vielleicht mit ihnen identisch waren. In diesem Sinne hätte dann die theoretische Physik eine Schau der Weltidee zum Ziele. Freilich, die wirkliche theoretische Physik kann sich kaum ein solch hohes Ziel setzen. Und wenn wir auch jenes ideale Ziel anerkennen, so offenbart sich in ihm unsere Wissenschaft doch nur ahnungsweise.

Darum, um nicht im ahnungsweisen und schwankenden zu bleiben, wollen wir die Verwirklichung der Idee, die konkrete Wissenschaft betrachten. Auch sie schwebt freilich in schwankender Erscheinung. Ob es uns gelingen wird, sie in dauernden Gedanken zu befestigen, das werden Sie ja sehen.

Man sagt gewöhnlich, die Physik sei die Lehre von der unbelebten Natur. Ob das völlig zutrifft, will ich jetzt nicht näher untersuchen. Sicher ist sie eine Erfahrungswissenschaft, die sich auf Experimente stützt. Der theoretische Physiker macht freilich keine Experimente. Seine Arbeit geschieht nicht im Laboratorium. Er ersinnt meist keine Apparate, die das Werkzeug des Experimentators sind. Sein Werkzeug ist Tinte und Papier, oder, weniger banal gewendet, die Mathematik. Diese ist für ihn allerdings viel mehr als nur Werkzeug; man könnte sagen, sie gehöre zu seinen Lebenselementen.

Wir unterscheiden also experimentelle und theoretische Physiker, was aber nicht heißen soll, daß ein und derselbe Mann nicht beides zugleich sein könnte – an Beispielen fehlt es nicht. Doch wir reden hier vor allem vom theoretischen Physiker und seiner Tätigkeit.

Während die Mathematik, ohne die unsere Wissenschaft undenkbar wäre, urälteste Wissenschaft ist, so ist die theoretische Physik kaum 400 Jahre alt. Mathematische Texte sind uns schon aus altbabylonischer Zeit, das heißt aus dem Beginn des zweiten vorchristlichen Jahrtausends, erhalten. Die Kenntnisse der babylonischen Mathematiker sind den Griechen überliefert worden, und in der alexandrinischen Epoche erlebte die Mathematik ihre erste große Blüte. Wenn nun auch Archimedes, den manche den größten Mathematiker des Altertums nennen, schon gewisse einfache physikalische Gesetze gefunden hat, eine Physik in unserem Sinne kannte die Antike nicht. Diese ist eine Schöpfung der neueren Zeit. Galilei, Kepler, Gilbert, das sind die ersten großen Physiker.

Johannes Kepler, der von 1571 bis 1630 lebte, ist jedermann wenigstens dem Namen nach bekannt. Nach ihm benennen wir die Gesetze, die die Planetenbewegung regeln. Aber seine Werke, in denen er diese Gesetze bekanntgemacht hat, haben selbst die wenigsten Physiker gelesen, und sein Denken ist uns in vielem fremd geworden. Eben darum möchte ich näher auf die Ideen Keplers eingehen. So werden nämlich gewisse Züge, die für die theoretische Physik kennzeichnend sind, und die bei Kepler fehlen, deutlich werden. Wie wir sehen werden, kann man auch sagen, daß unserer Physik Zielsetzungen fehlen, die für Kepler von entscheidendem Gewicht waren. Damit aber gewinnen wir einen kontrastierenden Hintergrund für unsere Betrachtungen (vgl. auch W. Pauli, *Der Einfluß archetypischer Vorstellungen auf die Bildung Naturwissenschaftlicher Theorien bei Kepler*, Zürich 1952).

Kepler war ein begeisterter Anhänger der Lehre des Kopernikus. Die Sonne, das Zentrum der Welt, war ihm ein Abglanz der Gottheit. Sonne und Planeten und die mächtige Sphäre des Fixsternhimmels bildeten für ihn die Welt. Sein Ziel war, den Weltenbau als harmonisches, durch göttliche Gesetze geregeltes Ganzes zu begreifen. Jene Gesetze waren ihm mathematischer oder, genauer gesagt, geometrischer Art. Denn Gott ist der Geometer. Unter «Geometrie» verstand Kepler die Euklidische Geometrie, die Lehre von den Konstruktionen mit Lineal und Zirkel.

Alles, was mit Lineal und Zirkel konstruiert werden kann, das hat, so dachte Kepler, wahres Sein und ist von jeher im göttlichen Wesen enthalten. Die damals aufkommende analytische Betrachtungsweise der Geometrie lehnte er darum ab. Zwar erkannte er durchaus, daß sie oft weiter führt als die klassische Geometrie; aber eben das schien ihm ein leeres Spiel zu sein, das sich mit Hirnge-spinsten abgibt.

Die Euklidische Geometrie gipfelt in der Konstruktion der fünf regulären Körper. Mit ihrer Hilfe und mittels der Kugel konstruierte Kepler darum ein Modell des Sonnensystems, das er «Mysterium Cosmographicum» nannte. Damit sollen die folgenden Fragen beantwortet werden:

«Was ist die Welt, aus welchem Grund, nach welchem Plan ist sie von Gott erschaffen?»

Woher nahm er die Zahlen, woher die Norm für seine gewaltige Schöpfung?

Woher die Sechszahl der Planeten, woher die Intervalle zwischen ihren Bahnen?

Warum ist der Sprung zwischen Jupiter und Mars, die doch nicht die äußersten sind, so groß?

Das alles lehrt dir Pythagoras mit seinen fünf Körpern.»

(An Raimarus Ursus, 15. November 1595).

Und nun beschreibt er seine Konstruktion: Man denke sich eine Kugel vom Durchmesser der Saturnbahn. In diese setze man einen Würfel, der mit seinen Ecken die Kugel berührt. Im Innern des Würfels denke man sich eine zweite Kugel, welche die Würfelseiten berührt: ihr Durchmesser bestimmt die Bahn des Jupiters. In die zweite Kugel setze man ein Tetraeder und in dieses eine dritte Kugel, welche die Marsbahn liefert. Mit Hilfe des Dodekaeders, des Ikosaeders und des Oktaeders konstruiert man in gleicher Weise drei weitere Kugeln, welche die Bahnen von Erde, Venus und Merkur bestimmen. Da es genau fünf reguläre Körper gibt, erhält man in dieser Weise genau sechs Kugeln. Deshalb schien es Kepler, sein Modell erkläre die Sechszahl der Planeten.

Es ist gewiß bemerkenswert, daß Keplers Konstruktion das empirische Verhältnis der Durchmesser der Planetenbahnen zueinander, wie es uns scheint, zufällig, ungefähr richtig wiedergibt. Aber Kepler war überzeugt, daß dies durchaus kein Zufall sein könne. So sagte er: «Diese Anordnung der Körper werden weder die Metaphysiker noch die Mathematiker zu ändern vermögen.»

Und an Mästlin, seinen Lehrer, schreibt er am 3. Oktober 1595: «Ich vermute, daß durch alle Wissenschaften das Axiom gilt: Wo am Himmel oder auf der Erde ein konstantes Zahlenverhältnis auftritt, da kann dies mittelbar oder unmittelbar von den fünf Körpern abgeleitet werden.»

Kepler dachte sich das ganze Planetensystem in eine riesengroße Kugel eingeschlossen, das ist die Fixsternsphäre. Diese ist das Abbild des in sich ruhenden Gottes. Die Polyeder dagegen sind Abbild des Schöpfergottes und daher dem Range nach geringer.

An all diesen Vorstellungen hat er zeitlebens festgehalten. In sie hat er die nach ihm benannten Planetengesetze eingeordnet, und nur so schienen sie ihm wahren Sinn zu offenbaren.

Wie Kopernikus und Galilei glaubte er, der *endliche* Weltenraum sei vom Fixsternhimmel umschlossen. Die Vorstellungen Giordano Brunos, des Unglücklichen, der, wie Kepler sagt (an Brugger, 30. Novem-

ber 1607), in Rom aufglühenden Kohlen gebraten wurde<sup>1</sup>, diese Vorstellungen vom unendlichen Raume, in dem die Sterne als Sonnen frei schweben, haben Kepler wie Galilei mit Schaudern von sich gewiesen.

Ich nenne Keplers «Mysterium Cosmographicum», das ihm den Weltenbau als harmonisches Ganzes begreiflich machen sollte, ein «Modell», weil ja nicht daran gedacht ist, daß diese Kugeln und Polyeder als starre, körperhafte Gebilde im Himmel wirklich existieren. Sie liefern vielmehr den ideellen Bauplan der Welt, der aus dem Wesen der Gottheit entsprungen ist. In ihm wird Gottes Planen anschaulich und begreiflich. An der Anschaulichkeit war Kepler offenbar viel gelegen, denn er hat sich jahrelang darum bemüht, ein plastisches Modell seines Mysteriums durch einen Mechaniker anfertigen zu lassen.

In dieser eigentümlichen Vorstellungswelt sind die Keplerschen Gesetze, die besagen, daß die Planetenbahnen Ellipsen seien und die die Planetengeschwindigkeiten auf diesen Bahnen festlegen, nur ein Element. Isaac Newton hat sie 1686 mechanisch erklärt, dabei aber die ganze übrige Konstruktion Keplers geopfert.

In der Newtonschen Theorie sind, wie schon bei Galilei, nicht die Bahnen selber, sondern die Geschwindigkeitsänderungen der Planeten, die Beschleunigungen, der Ausgangspunkt. Newton hat gezeigt, daß dann, wenn die Beschleunigung eines Planeten stets proportional zu seinem reziproken Abstand von der Sonne, und auf diese zu gerichtet ist, die Bahn immer ein Kegelschnitt sein wird. Ist die Bahn speziell eine Ellipse, so gelten alle drei Keplerschen Gesetze.

Die Newtonsche Theorie enthält gar nichts, was die geistvolle geometrische Konstruktion Keplers ersetzen könnte. Darum erklärt sie auch gerade das nicht, was Kepler die Hauptsache war. Sie erklärt nicht, woher Gott die Zahl und Norm für seine gewaltige Schöpfung hernahm. Sie erklärt weder die Sechszahl der Planeten, noch die Intervalle zwischen ihren Bahnen. Zwar war auch Newton davon überzeugt, daß der, wie er sagt, «hochelegante Bau» des Planetensystems nur dem Willen eines weisen Schöpfers entspringen könne. Aber sein Ursprung ist Gottes freier Wille und Ratschluß, und dieser ist mathematisch nicht zu fassen.

Newton meinte, daß unsere Welt, so wie dies schon Giordano Bruno lehrte, in einem unendlichen Raume schwebt und daß es sehr wohl noch andere, ähnlich gebaute Planetensysteme geben könne,

---

<sup>1</sup> Er sagt, mit bösem Wortspiel: «Prunus prunis tostus.»

die den gleichen mechanischen Gesetzen gehorchen. Das alles ist grundverschieden von Keplers Auffassung. Aber wir denken heute im wesentlichen so wie Newton.

Freilich finden sich auch bei ihm noch altertümliche Züge, so die Vorstellung, der Raum sei Ausdruck der göttlichen Allgegenwart; ferner seine Überzeugung, daß der Raum von einem spirituellen Medium, dem Äther, erfüllt sei, das die Schwerkraft bewirke und alles Leben regle. Diese naturphilosophischen Ideen sind ein Erbgut der italienischen Philosophie des 16. Jahrhunderts. Man kann zum Beispiel nachweisen, daß der Äther eine halb materialistische Umdeutung der Weltseele vorstellt.

So wichtig diese Ideen für das historische Verständnis von Newtons Philosophie auch sind und damit ein merkwürdiges Licht auf die geistesgeschichtlichen Hintergründe unserer Wissenschaft werfen, sie sind in der Folgezeit dem Bewußtsein der Physiker entschwunden. (Siehe hiezu meine Abhandlung: Über den Ursprung und die Bedeutung der Lehre Isaac Newtons vom absoluten Raum, «Gesnerus» 11 [1954] S. 62–120).

Die physikalische Zielsetzung, die bei Galilei zuerst deutliche Gestalt annimmt und die mit Newtons Hauptwerken eine gewisse Vollendung erreicht, hat ihren großen Erfolg durch einen ungeheuren Verzicht erkauft (vgl. hiezu W. Heisenberg, Zur Geschichte der physikalischen Naturerklärung, Berichte der Sächs. Akad. mathem. physikal. Klasse, 85, 1933).

Die neue Physik verzichtet darauf, die Welt, das heißt den Bau des Sonnensystems, als gesetzmäßige, harmonische Struktur zu begreifen. Wenn bei Kopernikus, Galilei und Kepler die Welt ein Zentrum, die Sonne, besitzt, die, Quelle allen Lichtes, als Abbild Gottes gelten kann, fehlt uns jedes Weltzentrum. Wie bei Giordano Bruno sind alle Sterne Sonnen, alle sind gleichberechtigt, ihre Anzahl ist zufällig oder willkürlich, vielleicht auch unendlich groß: Die Weltstruktur entbehrt eines für uns faßbaren Sinnes. Sicherlich kann der Weltsinn nicht in pythagoreischer Art, als Harmonie von Zahl und Gestalt, erfaßt werden. Das physikalische Naturgesetz bestimmt die konkret vorliegende Struktur, zum Beispiel des Planetensystems, nicht. Die Anzahl der Planeten und die Proportionen ihrer Bahnen sind willkürlich oder zufällig; denn unser Planetensystem ist wohl nur ein Beispiel eines derartigen Systems neben vielen andern, die im grenzenlosen Raum angetroffen werden können.

Aber Newtons Bewegungsgleichungen und das von ihm aufgestellte Gravitationsgesetz, sie gelten nicht nur für unser, sie gelten für jedes Planetensystem. Die Newtonsche Theorie setzt voraus, daß irgendwann und irgendwo eine willkürliche Anzahl von Weltkörpern, in irgendeiner Anordnung und mit beliebigen Geschwindigkeiten, gegeben sein könne: das nennt man einen «Anfangszustand». Der weitere Bewegungsablauf ist sodann gesetzmäßig bestimmt und im Prinzip berechenbar. Daß die Bewegungsgesetze für beliebige Körper und für jeden Anfangszustand gelten, das ist ihre Stärke. Aber gerade darum wird unser Sonnensystem zu einem zufälligen Anwendungsbeispiel dieser Gesetze, das jeder Einzigartigkeit entbehrt. Darum sind wir auch nicht gezwungen, die besondere Struktur des Sonnensystems, so wie dies Kepler erstrebte, zu erklären. Daß das Sonnensystem für uns dennoch etwas Einzigartiges ist, das können wir natürlich nicht bestreiten. Denn hier sind wir geboren, hier erfüllt sich unser Schicksal und sonst nirgends. Aber das sind Gesichtspunkte, die außerhalb der Physik liegen.

Grundsätzlich handelt die Physik gerade von dem, was nicht einzigartig ist. Wir können auch sagen: die Physik betrachtet die Erscheinungen nur insofern sie nicht einzigartig sind. Für den Astronomen ist die Sonne nur ein der Beobachtung besonders leicht zugänglicher Stern neben vielen andern, gleichartigen Fixsternen. Der Experimentalphysiker aber untersucht in seinem Laboratorium experimentell hervorgerufene Erscheinungen, wobei er sich nur für das interessiert, was nicht einmalig, was reproduzierbar ist. Ein Experiment findet nur dann Anerkennung, falls es wann, wo und von wem auch immer, wenn nur die Regeln der Kunst befolgt werden, erfolgreich durchgeführt werden kann. Zwar ist jedes Experiment ein Einzelvorgang, der, streng genommen, nie ein zweites Mal verwirklicht werden kann. Aber eben dies, was den Einzelvorgang auszeichnet, gilt als unwesentlich, und man nimmt an, es sei möglich, aus den einzelnen Experimenten einen allgemeinen reproduzierbaren Vorgang zu abstrahieren.

Experimentell hervorgerufene Vorgänge sind etwas künstliches und offenbaren eine präparierte Natur. Die Theorie bezieht sich eben auf solche Präparate, nicht auf die Natur, wie wir sie als immer neu, als lebendig und schöpferisch erleben. Die lebendige Natur kann die Physik nicht erfassen, ja man kann mit einem gewissen Recht sagen, daß sie die Natur töte. Zugleich ist sie aber die Grundlage der Technik, die den Bau künstlich erfundener und in beliebiger Anzahl her-



stellbarer Maschinen zum Ziele hat. So gesehen bringt uns die Physik der Natur nicht näher. Und doch ist die Technik für unser Leben notwendig. Ohne sie ist es unmöglich, die Menschheit, die sich in den letzten hundert Jahren gewaltig vermehrt hat und die sich noch weiterhin vermehrt, zu ernähren, zu beschäftigen und zu regieren.

Unser Interesse gilt hier freilich nicht der Technik, sondern der Physik als Naturwissenschaft, insbesondere der theoretischen Physik. Diese handelt nun nicht direkt von der Natur, sondern von Modellen. Ein Modell ist eine gedachte, eine ideale Struktur. Zum Beispiel ist das Bild des Planetensystems: eine große Kugel in der Mitte – die Sonne –, um die kleinere Kugeln – die Planeten – kreisen, ein derartiges Modell. Ein anderes Modell ist das des festen Körpers, des Kristalls: man stellt sich viele Massenpunkte, welche Atome versinnbildlichen, in einem Raumgitter angeordnet vor und studiert die Dynamik eines derartigen Systems. Auch der Feldbegriff, der der Theorie des Elektromagnetismus zugrundeliegt, entspricht einem Modell.

Solche Modelle kann man mehr oder weniger anschaulich beschreiben und ihr Verhalten durch Differentialgleichungen charakterisieren. Man kann die Modelle als wesentlichen Teil der physikalischen Sprache auffassen, denn sie sind Phantasiegebilde, Vorstellungen sehr komplexer Art, die wir im Gespräch beim andern wachrufen wollen. Die Worte, die wir hiezu verwenden, sind Nebensache. Hauptsache ist, daß wir dem andern unsere Modellvorstellungen mitteilen können, und daß er unsere Formeln, die diese charakterisieren, versteht: mathematisch sowohl wie in Beziehung auf das Modell. Das Verständnis dieser Modellbeziehung der mathematischen Formeln ist für das physikalische Denken unentbehrlich und erschwert vielen mathematisch sehr fähigen Leuten den Zugang zur theoretischen Physik ungemein.

Wenn man ein Modell für irgendein physikalisches Gebilde erdacht hat, dann kann man durch anschauliche Erwägungen und mathematische Analyse erforschen, welche Forderungen aus dem Modell einer experimentellen Prüfung zugänglich sein werden. Nicht jeder Zug des Modells muß prüfbar sein. Oft aber können Erscheinungen, die experimentell ganz verschiedenartig sind, durch die Eigenschaften eines einzigen Modells erklärt werden. Eine solche Erklärung ist desto überzeugender, je einfacher und einheitlicher das Modell ist und je mannigfaltiger die damit erklärbaren Erscheinungen sind. Was hier

«einfach» und «einheitlich» heißen soll, ist schwer zu erklären. Es besteht hierüber ein gewisser Consensus der theoretischen Physiker. Man wird wohl auch zugeben müssen, daß hier, wie bei jeder schöpferischen Tätigkeit, ein instinktives Gefühl wegleitend sein wird, eine Befähigung zu richtigem Urteil, die ich gerne «Geschmack» nenne.

Um das, was ich als «einfach und einheitlich» betrachte, zu illustrieren, möchte ich auf die allgemeine Relativitätstheorie Einsteins hinweisen. Diese ist eine Theorie der Schwerkraft und von Raum und Zeit. Sie stützt sich auf die Tatsache, daß alle Körper in einem bestimmten Schwerfeld gleich schnell fallen: Man sagt, träge und schwere Masse seien gleich. Schon Newton hat betont, daß sich dies zum Beispiel darin äußert, daß die Schwingungszeit eines Pendels nur von seiner Länge, nicht von seiner Masse abhängt. Man kann darum sagen, das Feld der Schwerkraft sei gar kein Kraftfeld, sondern ein Beschleunigungsfeld: jedem Raumpunkt ist eine Beschleunigung zugeordnet, die ein dort befindlicher Körper erfahren wird. Die Beschleunigung ist aber kein dynamischer, sondern ein rein kinematischer Begriff; er bezieht sich nur auf Raum und Zeit. Wenn man die Zeit als vierte Dimension zu den drei Raumdimensionen hinzufügt, so wird die Beschleunigung zu einem geometrischen Begriff in einer vierdimensionalen Mannigfaltigkeit.

Ausgehend von solchen Erwägungen suchte Einstein nach einer rein geometrischen Theorie der Gravitation. Er fand die hierzu notwendigen mathematischen Begriffe in der von Bernhard Riemann (1826–1866) entwickelten Differentialgeometrie schon fertig vor. Gleichwohl war die Aufgabe noch schwierig genug, und erst nach manchem Irrweg gelangte er 1916 zu Gleichungen, die alle physikalischen Forderungen erfüllten. Von der Analysis, der Theorie der Differentialgleichungen, her betrachtet, sind Einsteins Gleichungen freilich sehr verwickelt. Aber nicht der analytische, sondern der geometrische Gesichtspunkt muß hier ja maßgebend sein; denn die Gravitation soll als Folge der geometrischen Struktur von Raum und Zeit aufgefaßt werden. So gesehen erweisen sich die Grundgleichungen der Theorie als die denkbar einfachsten. Sie führen in erster Näherung zum Newtonschen Gravitationsgesetz und liefern ferner, in höherer Näherung, kleine Korrekturen, die aufs beste mit der Erfahrung übereinstimmen. Aber das ist nicht ausschlaggebend für ihre Überzeugungskraft. Diese beruht vielmehr darauf, daß die physikalische Idee, die der Theorie zugrundeliegt, fast zwangsläufig zu den Gleichungen

Einsteins führt. Darum erweckt die Theorie auch, besonders im Vergleich mit allen Versuchen, sie durch etwas anderes zu ersetzen oder sie zu erweitern, den Eindruck der Einheitlichkeit und Einfachheit.

Die allgemeine Relativitätstheorie darf als Krönung der klassisch-physikalischen Theorienbildung, die mit Galilei und Newton anhebt, angesehen werden. Zugleich können wir in ihr eine unerwartete Rechtfertigung der geometrischen Phantasien Keplers erblicken, die hier, freilich in völlig gewandelter Gestalt, ihre Auferstehung feiern. Die allgemeine Relativitätstheorie ist ja die Grundlage aller modernen kosmologischen Spekulationen geworden. Diese verzichteten darauf, eine Deutung für ein, nach kosmischen Maßstäben, so kleines System, wie es unser Sonnensystem ist, zu finden; sie möchten vielmehr von der Weltstruktur im Großen ein Bild in großen Zügen entwerfen.

Wenn wir jetzt zu unserem Ausgangspunkt zurückkehren, so erinnern Sie sich, daß ich sagte, die Theoretische Physik suche nach einem mathematischen Abbild der Weltstruktur. Wir können nun diese Aussage präzisieren. Kepler strebte nach diesem Ziele, aber sein Streben hat sich als allzu kühn erwiesen.

Die Physik liefert Aussagen über mögliche Strukturen. Was im einzelnen verwirklicht wird, das erscheint als willkürlich oder zufällig. Die Willkür, die sich im Bau der Systeme und in den Anfangsbedingungen offenbart, ist wesentlich; denn sie entspricht der Freiheit des Experimentators, der im allgemeinen Rahmen dessen, das den Naturgesetzen gemäß möglich ist, frei schalten und walten kann.

Wenn nun in der Quantentheorie über Einzelereignisse nur statistische Aussagen möglich sind, das Einzelereignis als solches deshalb in gewissem Grade außerhalb des theoretisch voraussagbaren liegt, so dürfen wir dies als natürliche und folgerichtige Weiterentwicklung unserer Erkenntnis betrachten.

Man hat freilich im Rahmen der klassischen Physik einem durchgängigen Determinismus das Wort geredet. Indem man den Experimentator mit zur physikalischen Welt rechnete, indem man so den Dualismus Objekt – Beobachter aufhob, kam man zu einem physikalischen Weltbild, in dem alles einzig und allein von einem nach unerforschlichem Ratschluß gesetzten Anfangszustand abhängig war. Formal – logisch ist eine solche Auffassung vielleicht möglich. Aber sie scheint mir dem physikalischen Sinn der klassischen Theorienbildung gänzlich zu widersprechen. Denn diese Gesetze sollen ja bei jedem beliebigen Anfangszustand gelten, was voraussetzt, daß wenig-

stens grundsätzlich alle möglichen Anfangsbedingungen hergestellt werden können. Der Willkür in deren Wahl entspricht, so scheint mir, die Freiheit des Experimentators, der damit als außerhalb der physikalischen Welt stehend, und sie beobachtend zu gelten hat.

In der Quantentheorie erweist sich nun dies Mitrechnen des Physikers zur physikalischen Welt auch als formal und logisch unmöglich. Hier muß darum notwendig ein von den physikalisch zu untersuchenden Objekten verschiedener Beobachter angenommen werden. Die Rückwirkung der Beobachtung auf das physikalische Objekt kann nach dieser Theorie – und sie entspricht unserer Erfahrung – eine wohlbestimmte untere Grenze nie unterschreiten. Das hat zur Folge, daß, sofern diese Rückwirkung in Betracht kommt, die Aussagen der Theorie einen statistischen Charakter erhalten.

Mir scheint nun diese statistische Interpretation der Quantentheorie, in welcher der Wahrscheinlichkeitsbegriff als Grundbegriff eingeht, in einer induktiven Wissenschaft höchst angemessen zu sein.

Denn das induktive Schließen ist ja selber ein Schließen nach Wahrscheinlichkeiten. Aus der Erfahrung kann eine Theorie nie streng bewiesen werden, sondern man wird lediglich ihre Glaubwürdigkeit prüfen können.

Man möchte nun freilich wünschen, daß eine glaubwürdige Theorie vor allem logisch-mathematisch widerspruchsfrei sei. Das ist aber leider nicht immer der Fall. Es gibt Theorien, mit deren Hilfe sich sehr subtile Effekte quantitativ voraussagen lassen, und die gleichwohl widerspruchsvoll sind, so daß aus ihnen auch ganz unsinnige Folgerungen gezogen werden können. Dies trifft zum Beispiel für die heutige relativistische Quantentheorie zu. Die dieser Theorie zugrunde liegenden Modellvorstellungen halten denn auch einer physikalischen Kritik nicht stand. Es ist jedoch bisher niemandem gelungen, bessere Modellvorstellungen zu ersinnen oder einen mathematisch einwandfreien Formalismus aufzustellen.

Es scheint, daß hier ungeheure Schwierigkeiten zu überwinden sind, und daß Begriffe, die seit je erfolgreich verwendet werden, einer gründlichen Revision bedürfen. Daß aber jede Revision physikalischer Grundbegriffe größte Schwierigkeiten bieten muß, mag vielleicht folgende Erwägung zeigen:

Die Grundlehren und Grundgedanken unserer physikalischen Theorienbildung können in höchst gedrängter Form, auf kleinem Raum, und dennoch mit ausreichender Klarheit und Deutlichkeit

dargestellt werden. Darum ist es für den theoretisch-physikalisch Begabten möglich, sich in wenigen Jahren ein weit und tief reichendes Verständnis der theoretischen Physik und ihrer Probleme zu erwerben. So kommt es denn auch, daß wir kaum einen bedeutenden theoretischen Physiker nennen könnten, der nicht schon in sehr jungen Jahren, meist vor seinem 30. Altersjahr, die entscheidenden Leistungen seines Lebens vollbracht hätte.

Diese Prinzipien aber genügen, um eine ungeheure Fülle experimenteller Erscheinungen übersichtlich zu ordnen und quantitativ zu deuten. Der Versuch, an ihnen etwas zu ändern, führt darum meist zu einer völligen Verwirrung des kunstvollen Gewebes mannigfaltiger Folgerungen, die aus ihnen gezogen werden können. Indem man an einer Stelle eine Schwierigkeit zu beheben trachtet, schafft man gewöhnlich dort tausend neue, wo bisher niemals solche auftraten. Eine erfolgreiche Umgestaltung der theoretischen Grundlagen muß dagegen zu einer Theorie führen, die überall dort, wo schon die alten Grundlagen hinreichend waren – und das ist ein weites Feld –, praktisch die schon bekannten Schlußfolgerungen liefert. Die alte Theorie muß somit als Grenzfall der neuen fortbestehen. Diese Notwendigkeit schränkt die möglichen Änderungen unserer theoretischen Grundlagen derart ein, daß es den Anschein hat, des Rätsels Lösung werde eindeutig sein und werde, wenn einmal gefunden, jedem Einsichtigen zwingend erscheinen. Dieser Eindruck ist durch die bisherige Entwicklung der Physik, in welcher wir ja schon einige Wandlungen grundlegender Ideen erlebt haben, wohl begründet. Der zwingende Charakter der entscheidenden Schritte führt uns zum Glauben, die abstrakte und künstliche Welt, welche die Physik aufbaut, sei ein Spiegelbild von etwas wirklichem. Es fehlt ihr freilich jener einmalige und unwiederbringliche Zauber des wirklichen Lebens. Sie spiegelt ein Reich bloßer Möglichkeiten wieder. Aber auch dieses ideale Reich übt seinen Zauber aus und scheint uns Wirklichkeit zu besitzen.

Dies klingt vielleicht allzu schön und allzu idealistisch. Wir wissen ja auch, daß es viel irdischere Gründe gibt, an die Wahrheit physikalischer Theorien zu glauben. Die Maxwellschen Felder müssen wohl wirklich sein, denn die Elektrizitätswerke laufen, das Licht brennt in unsern Stuben. Es muß wohl Atome geben, denn die Atombomben explodieren. Aber das Rätsel und der Zauber, der ihm eignet, das sind auch Wirklichkeiten. Ihnen möchten wir gerne eine höhere Wirklichkeit zugestehen.