

## DAS WISSENSCHAFTLICHE ERBE ALBERT EINSTEINS

Prof. Dr. sc. nat. *Armin Uhlmann*

Sektion Physik und Naturwissenschaftlich-Theoretisches Zentrum  
der Karl-Marx-Universität

Albert Einstein hat ein überaus reiches wissenschaftliches Erbe hinterlassen, das von einzelnen zu benennenden Entdeckungen über die Begründung ganzer Theorien bis zur nicht leicht faßbaren, aber doch allgemein anerkannten und gefühlten Bereicherung wissenschaftlichen Denkens reicht.

Einstein war kein Spezialist im heutigen Wortverständnis. Er war eher das Gegenteil eines Spezialisten: Alle Probleme, die ihn stärker interessierten, und es interessierten ihn wahrlich sehr viele, griff er energisch auf und beleuchtete sie von allen ihm zugänglichen Seiten. Auf sehr verschiedenen Gebieten gelang es ihm dabei überaus rasch, *den* Punkt zu finden, an dem die Hebel der wissenschaftlichen Analyse mit größter Effizienz ihre unaufhaltsame und unwiderstehliche Arbeit verrichten konnten.

Lassen Sie mich als ein erstes Beispiel Einsteins Theorie der Brownschen Bewegung nennen. Suspendiert man sehr kleine Teilchen, die mit einem Mikroskop aber noch in ihrer Bewegung zu verfolgen sind, in irgendeiner Flüssigkeit, so unterliegen diese einer nicht endenden und sehr irregulären zitternden Bewegung. Robert Brown, ein Biologe, untersuchte zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts in einer Reihe kluger Experimente diese Bewegung, die etwa um 1650 von Leeuwenhoek erstmalig erwähnt wurde. Brown erkannte, daß die Bewegung unabhängig davon eintritt, ob die Teilchen organischen oder anorganischen Ursprungs waren, daß sie sich völlig unabhängig voneinander bewegten und auch unabhängig von ihrer Zahl und Dichte. Er fand die kleineren Teilchen aktiver bewegt als die größeren und beobachtete, daß die Bewegung mit zunehmender Temperatur reger und aktiver wurde.

Als Albert Einstein die Theorie dieser Erscheinung aufstellte, kannte er weder die Brownschen Untersuchungen, noch hatte er diese Bewegung durch ein Mikroskop je betrachtet. Sein Ziel war es, in den noch nicht beendeten Streit über die Atomistik, der bis in den Anfang unseres Jahrhunderts währte, einzugreifen. „Mein Hauptziel war es,“ so schrieb er später, „Tatsachen zu finden, welche die Existenz von Atomen von bestimmter endlicher Größe möglichst sicherstellten. Dabei entdeckte ich, daß es nach der atomistischen Theorie eine der Beobachtung

zugängige Bewegung suspendierter mikroskopischer Teilchen geben müsse, ohne zu wissen, daß die Beobachtungen über die ‚Brownsche Bewegung‘ schon lange bekannt waren.“<sup>1</sup>

Einsteins Annahme war wie folgt: Die Molekeln der Flüssigkeit müßten die suspendierten Teilchen in so schneller Folge und unabhängig voneinander stoßen, daß die beobachtete Brownsche Bewegung erst das Resultat ungeheurer vieler solcher Stöße ist. Auf Grund ganz zufälliger Schwankungen werden sich nämlich die von allen Seiten erfolgenden Stöße von Zeit zu Zeit *nicht* kompensieren und so dem beobachteten Teilchen zu einer kurzen und abrupten Bewegung verhelfen.

Die Experimente bestätigten glänzend Einsteins Annahmen und Berechnungen. An die Adresse von Ostwald und Mach gerichtet schrieb er später: „Die Abneigung dieser Forscher gegen die Atomtheorie ist ohne Zweifel auf ihre positivistische philosophische Einstellung zurückzuführen. Es ist dies ein interessantes Beispiel dafür, daß selbst Forscher von kühnem Geist und feinem Instinkt durch philosophische Vorurteile für die Interpretation von Tatsachen gehemmt werden können.“<sup>2</sup>

Einsteins Theorie der Brownschen Bewegung, unabhängig davon ein Jahr später auch von Smoluchowski gefunden, war nun alles andere als ein Schlußpunkt. Einstein selbst bewegte die Frage, ob die von ihm eingeführte Annahme über die zufälligen Stoßprozesse korrekt und widerspruchsfrei ist. Langevin gab später eine andere Herleitung der Einsteinschen Formeln und wurde dadurch zum Begründer der Theorie der stochastischen Differentialgleichungen. Von Wiener wurde ein mathematisches Modell für die Brownsche Bewegung erfunden, das Ausgangspunkt eines ganzen Zweiges der Wahrscheinlichkeitstheorie, der Theorie der stochastischen Prozesse, geworden ist. Eine weitere wichtige Verfeinerung brachten Arbeiten von Ornstein und Uhlenbeck.

Die Einstein-Smoluchowskische Theorie der Brownschen Bewegung gehört zu der von Boltzmann und Gibbs begründeten Statistischen Mechanik. In dieser werden die Gesetze der Mechanik durch Annahmen ergänzt, die den *Zufall* an entscheidender Stelle in die Theorie einführen. Noch heute bereitet es Schwierigkeiten zu erkennen, wie dies logisch widerspruchsfrei geschehen kann und als Folge welcher Notwendigkeiten man im einzelnen dies zu verstehen hat.

Alle Erfahrungen auf diesem Gebiet zeigen, daß, wie es auch Einstein tat, der Zufall als objektiver Faktor in Rechnung gezogen werden *muß*. Und es ist klar, daß dies nicht nur die Naturwissenschaften betrifft. Natürlich kann man im täglichen Leben, in der Wirtschaft usw. den Zufall weitgehend zurückdrängen, ihn aber vollständig ausschließen zu wollen, gleicht einem Kampf gegen Windmühlensflügel. Eine qualitative Berücksichtigung zufälliger Faktoren und die quantitative Abschätzung ihrer Wahrscheinlichkeiten und Schwankungen ist keineswegs ein

<sup>1</sup> Einstein, A.: Autobiographisches. In: *Schilpp, P. A.* (Hrsg.): Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher. Stuttgart 1951.

<sup>2</sup> Ebenda.

Zeichen von Fatalismus, sondern entspringt offenbaren Naturnotwendigkeiten. Für unser mehr am Verfolgen linearer Kausalketten geschultes Denken bringt freilich die Kategorie des Zufalls einiges an Strapazen mit sich.

Diese Hürden für unser Verständnis des Zufalls erhöhten sich noch beträchtlich in den zwanziger Jahren, als die Quantenphysiker die A-priori-Wahrscheinlichkeiten entdeckten. Mit diesen wird z. B. das Verhalten von Elektronen beschrieben, die unabhängig voneinander gleichen physikalischen Bedingungen unterliegen. Das Erstaunliche aber ist, daß diese Wahrscheinlichkeiten prinzipiell *nicht* auf das Verhalten des Individuums, also des einzelnen Elektrons, zurückführbar sind.

Einstein, der sehr Wesentliches zur Begründung der Quantenphysik beitrug, dafür ja auch den Nobelpreis erhielt, konnte und wollte dieser Entwicklung nicht folgen, die auf diesem Gebiet der Physik den Widerspruch zwischen Individuum und Kollektiv logisch unauflösbar erscheinen läßt. „Ich glaube“, schreibt er in seinen schon oben zitierten autobiographischen Notizen, „daß diese Theorie (gemeint ist die Quantentheorie – A. U.) keinen brauchbaren Ausgangspunkt für die künftige Entwicklung bietet“.<sup>3</sup> Mit der ihm eigenen Konsequenz hat er sich trotz der ihm völlig bewußten überwältigenden Erfolge dieser Theorie an ihrer weiteren Entwicklung nicht beteiligt. Dafür hat er durch scharfsinnige Gedankenexperimente versucht, aus den Grundannahmen der Quantentheorie eklatante, unannehmbare Widersprüche herzuleiten, deren Analyse jedoch nur zu einem vertieften Verstehen, nicht aber zur Aufhebung oder auch nur bloßen Beschädigung dieser Theorie führte.

Seine spätere Haltung zur Quantenphysik ist um so bemerkenswerter, da er als einer der ersten die Bedeutung der zu ihr führenden frühen Ansätze von Planck einsah und bereits 1905 durch seine Erklärung des lichtelektrischen Effekts ihre allgemeine Anerkennung vorbereitete. Aufsehen erregten auch seine Ansätze zur Theorie der spezifischen Wärme fester Körper und seine Überlegungen zu Plancks Formel für die Hohlraumstrahlung, die zu den ersten quantenstatistischen Arbeiten überhaupt zu zählen sind.

Wie ungewohnt und neu seine Überlegungen zur frühen Quantenphysik waren, belegt der Wahlvorschlag für Albert Einstein in die Akademie, der von Planck, Nernst, Rubens und Warburg unterzeichnet ist, und der neben einer großartigen Würdigung seiner Leistungen immerhin noch 1913 den Satz enthält: „Daß er in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie z. B. in seiner Hypothese der Lichtquanten, wird man ihm nicht allzu schwer anrechnen dürfen; denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, läßt sich auch in der exaktesten Naturwissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen . . .“<sup>4</sup>

<sup>3</sup> Ebenda.

<sup>4</sup> Treder, H.-J.: Physiker über Physiker, Bd. I. Berlin: Akademie-Verlag 1975.

Nach dieser sehr toleranten und vorsichtigen, aber doch falschen Einschätzung der Lichtquantenhypothese durch Physiker von Weltruf lassen Sie mich die Überleitung zu Einsteins bedeutendsten Leistungen durch einige Zitate aus Leopold Infelds „Erinnerungen an Einstein“ finden. Als Professor Witkowski in Krakow Einsteins Abhandlung (1905) las, rief er seinem Kollegen Loria zu: „Ein neuer Kopernikus ist geboren! Lesen Sie Einsteins Aufsatz!“ Loria, der danach auf einer Tagung Max Born traf, erzählte diesem über Einstein. „Es stellte sich heraus, daß weder Born noch sonst jemand etwas von Einstein gehört hatte. Sie gingen zur Bibliothek, nahmen den 17. Band der ‚Annalen der Physik‘ aus dem Regal und begannen, Einsteins Artikel zu lesen. Sofort erkannte Max Born seine Größe . . .“<sup>5</sup>

Es waren Einsteins Theorien über Raum, Zeit und Gravitation, die sein besonderes Ansehen unter den vielen hervorragenden Physikern, die zu seiner Zeit wirkten, begründeten. Diesen Theorien hat Einstein die Namen „Spezielle Relativitätstheorie“ und „Allgemeine Relativitätstheorie“ gegeben.

Unser Raum- und Zeitbegriff entstammt elementaren Erfahrungen, die die Menschheit in ihrer frühesten Geschichte sammelte, und wir finden ihn bereits im Tierreich vorgeprägt. Die mit dem Raum verbundenen meßbaren Größen ordnete und verband Euklid zu seinem genialen System von Axiomen der Geometrie. Newton, die Grundgesetze der Mechanik formulierend, fügte zu Euklids Raumvorstellungen nichts wesentlich Neues hinzu. Diese Raumvorstellung und den linearen Fluß der Zeit explizit betonend, sprach er vom absoluten Raum und von der absoluten Zeit.

Absolut, das heißt hier: Absolut unbeeinflusst vom Geschehen *in* diesem Raum, *in* dieser Zeit. Raum und Zeit übernahmen die Rolle einer Bühne, auf der, dabei selbst unberührt, unverändert und unbetroffen verbleibend, täglich ein neues Stück gespielt wird.

Sollte es aber tatsächlich so sein, daß die Natur Raum und Zeit, diese wichtigen Instrumente ihrer Existenz, in ewiger und unabänderlicher bürokratischer Erstarrung beläßt? Einer solchen Annahme ist zwar mehrfach, beginnend bereits mit Leibniz, widersprochen worden, doch es waren Einsprüche, die sich auf keine Erfahrung, auf keinen Beweis zu stützen vermochten. Im vergangenen Jahrhundert aber stellte sich an die Seite der Mechanik die ihr ebenbürtige, mit weitreichenden Konsequenzen beladene Elektrodynamik.

Im Verhältnis dieser beiden Theorien wurde bald eine fatale Unverträglichkeit entdeckt. Das Relativitätsprinzip von Galilei – eine Stütze der Mechanik, aber über diese hinausreichend – besagt, daß die Naturgesetze zwischen gleichförmig und geradlinig bewegten zulässigen Bezugssystemen nicht differenzieren, daß eine solche geradlinig gleichförmige Bewegung eines physikalischen Systems in diesem keine Kräfte und also keine Wirkung in ihm selbst verursachen kann. Es

folgt hieraus die völlige Ununterscheidbarkeit und Gleichberechtigung gleichförmig und geradlinig zueinander bewegter Inertialsysteme. Im Widerspruch hierzu ergaben die Maxwell'schen Gleichungen der Elektrodynamik für das Licht eine genau bestimmte Geschwindigkeit. Damit schien es, als müßte es doch ein besonderes, einziges, ausgezeichnetes Bezugssystem in Raum und Zeit geben, in dem das Medium, der sogenannte Äther, welches die elektromagnetischen Schwingungen trägt, ruht. Und in diesem und genau diesem Bezugssystem sollte dann das Licht die ihm nach der Elektrodynamik zustehende Geschwindigkeit besitzen.

Aber dieses System ließ sich nicht finden, wie Michelson und Morley in einem klugen Experiment zeigten. Dies war so, obwohl die Meßgenauigkeit gut das zehnfache des zu erwartenden Effekts ausmachte. Lorentz nahm daher an, daß sich alle Körper verkürzen, wenn sie sich gegen den Äther bewegen und zwar so, daß die Übereinstimmung mit dem Experiment wiederhergestellt war.

Poincaré, der Wahrheit wohl am nächsten kommend, aber dann wohl doch philosophisch fehlgeleitet, erfand in Verallgemeinerung der Lorentz'schen Überlegungen ein Prinzip der „Konspiration“: Zum Äther verhält sich die Natur konspirativ, nämlich so, daß kein Experiment feststellen kann, *wo* der Äther eigentlich ruht und *wie* wir uns gegen ihn bewegen. Diese Poincaré'sche Konstruktion zeigte beinahe in die richtige Richtung; denn bei einer solchen Lage der Dinge mußte der Äther doch ganz einfach überflüssig sein und brauchte gar nicht zu existieren!

Einsteins Vorgehen aber war anders, indem er die Lösung des Rätsels nicht in der Art der Vorgänge im Raum und in der Zeit, sondern *im Begriff des Raumes* und *im Begriff der Zeit selbst* suchte. Er fand, daß der skizzierte Widerspruch uns etwas über die Struktur von Raum und Zeit zu sagen gestattet, etwas, was wegen der Beschränktheit unserer Sinnesorgane nicht unmittelbar zu erfahren ist, etwas, was auch nicht andeutungsweise in den uralten menschlichen Erfahrungen mit Raum und Zeit enthalten war.

Indem er am Galileischen Relativitätsprinzip in seiner allgemeinsten Form festhielt, nahm er an, daß das Licht überall und immer die gleiche Geschwindigkeit besitzen müsse und daß diese Geschwindigkeit die größte aller überhaupt erreichbaren Geschwindigkeiten sei, mit der die Übertragung von Signalen möglich ist. Diese radikal-einfache Erklärung des erwähnten Michelson-Morley-Experiments verlangt jedoch einen hohen Preis. Die so selbstverständliche Regel für die Addition von Geschwindigkeiten, die jedermann ohne weitere Überlegung anwendet, wird außer Kraft gesetzt und damit Wesentliches der Mechanik. Von der These der maximalen Signalgeschwindigkeit ausgehend, fand Einstein durch ganz elementare, aber an begriffliche Abstraktionsfähigkeit einige Anforderungen stellende Schlüsse, daß die Fragen: „Wie groß ist der räumliche Abstand zweier Ereignisse? Wieviel Zeit ist zwischen ihnen vergangen?“ *keine Bedeutung an sich* haben. Sie sind vielmehr vom Bewegungszustand des Beobachters bzw. der Meßinstrumente wesentlich abhängig.

Ereignisse, zwischen denen kein kausales Verhältnis möglich ist, weil zur Her-

<sup>5</sup> Born, M.; Infeld, L.: Erinnerungen an Einstein. Berlin 1967.

stellung eines solchen, Vorgänge mit Überlichtgeschwindigkeit von Nöten wären, zeigen ein besonders absurd erscheinendes Verhalten: Die Zeit messende Beobachtungsinstrumente können für das gleiche Paar von Ereignissen in Abhängigkeit von ihrer Bewegung sowohl Gleichzeitigkeit als auch zeitliches Vor- und Nacheinander registrieren – ohne irgendwelchen Hokusfokus, ohne Halluzinationen oder Betrügereien, sondern ganz objektiv und real. Die Reihenfolge kausal zusammenhängender Ereignisse aber bleibt stets unangetastet.

Mit Einsteins *Spezieller Relativitätstheorie* erkennen wir Raum und Zeit als Teilaspekte eines einheitlichen Ganzen. Je nachdem, wie wir uns in diesem Gebilde bewegen, sehen wir und erscheinen uns jeweils etwas verschiedene Portionen von diesem Gebilde als Raum und als Zeit. Nur die Tatsache, daß selbst die schnellste Rakete geradezu unglaublich langsam im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit ist, verhindert, daß jeder von uns dies alles als ganz selbstverständlich und zu den alltäglichen Erfahrungen gehörig empfindet.

Der Wahrheitsgehalt der Speziellen Relativitätstheorie wurde bald so hoch eingeschätzt, daß man die Verträglichkeit einer Theorie, einer Behauptung mit ihr zu einem Korrektheitskriterium erhob. Daher wurde die Mechanik abgeändert. Die unlösbare Verstrickung und Verknotung des Raumes mit der Zeit brachte einen Wandel und eine ebensolche Verkettung der wichtigsten physikalischen Begriffe Energie, Impuls, Masse mit sich. U. a. führte dies zur berühmt gewordenen Formel  $E = m \cdot c^2$  und anderen, nicht weniger wichtigen.

Einsteins Überlegungen zu Raum und Zeit bereicherten aber auch das Arsenal des physikalischen Argumentierens. Die fundamentale Bedeutung einer exakten und logisch expliziten Meßvorschrift für die korrekte Existenz eines quantifizierbaren Begriffes wurde eindrucksvoll belegt. Diese begriffliche Analyse sollte bei der Formulierung der zeitgenössigen Quantentheorie nochmals eine große Rolle spielen, allerdings abgewandelt, da sich ja auch die Natur nicht wiederholt: bei der Analyse von Begriffspaaren mit gegenseitig unverträglichen Meßvorschriften.

Wenn wir uns nun der *Allgemeinen Relativitätstheorie* ein wenig zuwenden, so ist es sicher auch hier richtig, mit einer kurzen historischen Bemerkung zu beginnen.

Das Problem, wie der uns umgebende Raum wirklich beschaffen ist, erfuhr durch die Entdeckung der nicht-euklidischen Geometrien eine Wendung von wissenschaftsgeschichtlicher Bedeutung. Die Entdeckung, daß außer Euklids Geometrie noch weitere, und dieser ebenbürtige konsistente Geometrien möglich sind, zeigte in eine verlockende Richtung. Carl Friedrich Gauß, der zusammen mit Bolyai und Lobatschewski dies alles in Gang gebracht hat, bemühte sich auch sogleich, eine Entscheidung herbeizuführen. Im Zuge einer Landvermessung versuchte Gauß eine eventuelle Abweichung von Euklids Geometrie, nach der die Winkelsumme in einem Dreieck  $180^\circ$  sein muß, experimentell zu ermitteln. Dieser Versuch schlug fehl. Dasselbe Schicksal erfuhr ein im Jahre 1900 publiziertes Unterneh-

men von Schwarzschild, der Dreiecke betrachtete, deren Eckpunkte von einem Stern und von zwei extrem auseinanderliegenden Punkten der Bahn der Erde um die Sonne gebildet wurden. Auch heute noch ist die Meßgenauigkeit nicht ausreichend, um durch geometrische Messungen zu entscheiden, ob im Mittel der Raum unserer Galaxis bzw. Metagalaxis vom Euklidischen abweicht und wenn ja, wie.

Bei dieser experimentellen Lage scheint es sinnlos und bloß spekulativ, die Frage der für unseren Teil des Weltraumes zutreffenden Geometrie weiter zu verfolgen. Aus dieser Sackgasse werden wir jedoch durch zwei Überlegungen erlöst, die uns schon aus der Speziellen Relativitätstheorie ihrem Charakter nach bekannt sind. Einmal müssen wir nicht die Geometrie des Raumes isoliert betrachten. Wir sollten vielmehr auf die Geometrie des aus Raum und Zeit zusammengesetzten einheitlichen Gebildes zielen. Und weiter wissen wir bereits, daß jede Änderung dieser Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit ihre notwendige Reflektion in den Gesetzen der Mechanik, in den Gesetzen der Physik überhaupt findet. Daher wird von jeder Abweichung vom Euklidischen nicht nur die Raumgeometrie berührt, sondern ein so großes Netz von Begriffen und Naturgesetzen betroffen, daß tatsächlich einige, der gegenwärtigen Meßkunst zugängige Entscheidungsexperimente herausdestilliert werden können und konnten. Sie geben uns, über eine Kette theoretischer Argumente vermittelt, in der Tat den Beweis, daß Massenansammlungen, Energien und ihre Bewegung die Geometrie von Raum und Zeit ein wenig verändern.

Somit aber fällt endgültig die Starre und die Unveränderlichkeit des Raumes und der Zeit, die unseren täglichen Erfahrungen so überaus natürlich und unabänderlich zu sein scheint. Dafür erhebt sich freilich die leicht beunruhigende Frage, ob dieser unser Raum und diese unsere Zeit schon immer so gastfreundliche Behälter waren und ob sie es auch immer bleiben werden! Die Antwort ist wahrscheinlich „nein“. Aber die Dauer solcher Veränderungen ist so unglaublich groß, daß sie für alles menschliche Tun und Lassen schlechthin die Ewigkeit ist.

Damit aber bin ich etwas voraus geeilt; denn außer der Entwicklung unserer geometrischen Einsichten – und hier muß ich nachholend unbedingt den großen Mathematiker Riemann erwähnen – und außer der Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie, zu deren Vollendung Minkowski beitrug, war noch ein weiterer großer Gedanke notwendig. Auch dieser Gedanke trägt das Mal des genial Einfachen und berührt erstmals an der richtigen Stelle das Problem, wie denn dasjenige, was in Raum und Zeit vor sich geht, diese Raum-Zeit seinerseits beeinflusst.

Erinnern wir uns, wie Galilei die Aristotelischen Ansichten zu den Gesetzen des freien Falles überwand. Als Fazit stellte er fest: Jeder Körper, der nur der Schwere und sonst keiner anderen Kraft unterliegt, fällt gleich schnell. Wieso ist dieses Gesetz, das jeder Schüler lernt, paradox? Das höchst Merkwürdige liegt in seinem universellen Anspruch! Da ist also eine Kraft, die Schwerkraft, die

„merkt“, daß etwas da ist und dieses Etwas anzieht – ohne auch nur im größten unterscheiden zu können, *was* da ist. Die Eigenschaften dessen, auf das diese Kraft wirkt, sind ihrem Wirken völlig gleichgültig!

Diese paradoxe Universalität aber fanden wir schon beim vor-Einsteinschen Raum- und Zeitbegriff. Und hier entsteht nun ein Zusammenhang: Diese Schwerkraft ist etwas Geometrisches, etwas, was der Raum-Zeit eigen ist. Diese Schwerkraft signalisiert wo und wie das Raum-Zeit-Gebilde uneben wird, seine Flachheit aufgibt, sich krümmt. Diesen Gedanken weiter verfolgend erkennen wir, daß nicht nur Raum und Zeit, sondern sogar Raum, Zeit und Gravitation den gleichen universellen Charakter besitzen, daß diese drei Dinge nur verschiedene Seiten, verschiedene Aspekte einer einzigen Sache sind.

Auf Grund der Kleinheit der Gravitationskonstanten und auf Grund der Größe der Lichtgeschwindigkeit bleibt dieser in höchstem Maße grundlegende Zusammenhang der naiven Anschauung verborgen und es bedurfte des Genies Einstein, ihn aufzudecken.

Tatsächlich benötigte Einstein zu dem bereits Genannten noch die Forderung, daß näherungsweise die Newtonsche Gravitationstheorie gilt – und darüber hinaus etwa 8 Jahre des Nachdenkens, um dies alles zu einer Theorie zu gestalten und diese in das objektive Gewand mathematischer Formeln zu kleiden. Dann aber zeigte sich, daß für irgendein Hin- und Herrücken der Theorie keine Möglichkeiten mehr bestanden: Nicht vor und nicht nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie gab es je eine naturwissenschaftliche Theorie, deren Ableitung so zwingend und eindeutig gewesen wäre, deren Form in ihrem zentralen Teil so unänderlich und endgültig unserem heutigen Verständnis erscheint.

Die astrophysikalischen und kosmologischen Folgerungen kann ich hier nicht ausbreiten. Einen hierher gehörenden Problemkreis haben wir bei der Frage nach der Stabilität von Raum und Zeit übrigens kurz gestreift.

Ich möchte vielmehr mit einigen anderen Bemerkungen abschließen. Die erste ist die folgende: Nach der Integration der Schwerkraft in die Geometrie von Raum und Zeit erhob sich ganz selbstverständlich das Problem: Ist dies bereits das Ende der Geometrisierung physikalischer Größen? Bedeutende Anstrengungen wurden von Einstein selbst und vielen führenden Geometern unseres Jahrhunderts zur Beantwortung dieser Frage unternommen. Der Erfolg war fast ausschließlich ein mathematischer. Derselbe Gedanke, sei er noch so verführerisch genial, bewirkt beim nächstliegenden physikalischen Problem leider meist nur noch ein Bekratzen der Oberfläche. Damit ist nicht behauptet, das Geometrisierungskonzept sei tot. Nein, vielleicht langt ein kleiner Stoß in eine neue Denkrichtung, um es wieder zu Glanz und Ansehen kommen zu lassen. Vielleicht bewirken sogar die derzeitigen hoffnungsvollen Bemühungen um die sogenannten Eichfeldtheorien einen Anstoß in eine neue fruchtbare Richtung.

Die zweite Bemerkung zielt auf ein zeitgenössiges Märchen. Infeld charakterisiert es in seinen bereits erwähnten „Erinnerungen“ durch folgende hübsche Anekdote:

„Während eines Gespräches mit Eddington sagte der polnische Professor Ludwig Silberstein: ‚Herr Professor Eddington, Sie sind einer der drei Menschen, die die Relativitätstheorie verstehen‘. Als Professor Eddington eine zweifelhafte Miene aufsetzte, fügte Prof. Silberstein hinzu: ‚Aber, Herr Professor Eddington, Sie sind zu bescheiden.‘ – ‚Nein, antwortete Eddington, es ist keine Bescheidenheit; ich möchte nur gern wissen, wer der dritte ist.‘“<sup>6</sup>

Heute freilich haben wir sehr viele Physiker, die die für ein erstes Verständnis der Allgemeinen Relativitätstheorie notwendigen rudimentären Kenntnisse der Differentialgeometrie besitzen und beherrschen. Der Schrecken der Unverständlichkeit dieser Theorie ist vergangen, ihre Schönheit ist geblieben!

Auf der anderen Seite ist es so: Ein vollständiges Verstehen der in dem Begriffnetz einer großen Theorie angehäuften Erfahrungen, das Ziehen aller wesentlichen Konsequenzen der in ihr enthaltenen Gesetzmäßigkeiten ist unmöglich. Denn durch jede der großen physikalischen Theorien wurde ein Funken des Unererschöpflichen mit eingefangen.

Meine letzte Bemerkung aber ist nun die: Die Grundlagen der Physik sind heute in zwei großen Theorienkomplexen enthalten. Der eine ist die Relativitätstheorie, der andere, viel umfangreichere, die Quantenphysik und die Statistik. Wie passen beide zusammen?

Die Vereinigung von Quantentheorie und Spezieller Relativitätstheorie hat sich als bedeutend schwieriger erwiesen als erwartet worden war. Ihre formale Vereinigung erschien zunächst keineswegs besonders problematisch und war von verblüffenden experimentellen Erfolgen, besonders bei quantenelektromagnetischen Vorgängen, begleitet. Doch bis heute verbleibt das Gefühl, es seien wesentliche physikalische Fragen umgangen und durch raffinierte mathematische Technik überspielt worden. Das Verhältnis von Quantenphysik und Allgemeiner Relativitätstheorie aber ist, mit Welk zu sprechen, ein Land, das ferne leuchtet. Wieviel wir an mathematischer Kunst zu erwerben, an begrifflicher Schärfe zu gewinnen und an physikalischer Intuition zu erarbeiten haben, um in die Nähe dieses Landes zu gelangen, wissen wir heute noch nicht.

<sup>6</sup> Ebenda.