

H I R Z E L



Zeit in Wissen- schaft, Philosophie und Kultur

Eine Publikation des MinD-Hochschul-Netzwerkes

Herausgegeben von

Anna Seemüller, Tanja G. Baudson und Martin Dresler

Zeit in Wissenschaft, Philosophie und Kultur

Zeit in Wissenschaft, Philosophie und Kultur

Eine Publikation des MinD-Hochschul-Netzwerkes

Herausgegeben von

Anna Seemüller, Tanja G. Baudson, Martin Dresler



S. Hirzel Verlag Stuttgart

Ein Markenzeichen kann warenrechtlich geschützt sein, auch wenn ein Hinweis auf etwa bestehende Schutzrechte fehlt.

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

ISBN 978-3-7776-1789-3

Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Übersetzung, Nachdruck, Mikroverfilmung oder vergleichbare Verfahren sowie für die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen.

© 2009 S. Hirzel Verlag
Birkenwaldstr. 44, 70191 Stuttgart

Printed in Germany

Einbandgestaltung: deblik, Berlin
Druck: Djurcic, Schorndorf
Umschlagbilder: fotolia, Angela Meder

www.hirzel.de

Inhaltsverzeichnis

Inhalt.....	5
<i>Anna Seemüller, Tanja Gabriele Baudson und Martin Dresler</i>	
Einleitung	7
<i>Ernst Peter Fischer</i>	
„Freie Erfindungen des menschlichen Geistes“	10
<i>Thomas Fischbacher</i>	
Der Zeitpfeil – Vom Wesen der Asymmetrie zwischen Vergangenheit und Zukunft	23
<i>Claudius Gros</i>	
Zukunftsforschung ohne Orakel.....	32
<i>Rüdiger Vaas</i>	
Wenn gestern morgen ist – Zeitreisen und Zeitparadoxien in Physik und Philosophie	42
<i>Jan-Jürgen Eden</i>	
Zeitreise im Kino – Zeitmaschinen, Zeitreisen und ihre Auswirkungen im Film.....	58
<i>Werner Große</i>	
Zeitkippen.....	67
<i>Robert Kosten</i>	
Realtime Raytracing.....	80
<i>Henning Christ</i>	
Rechenzeit	86
<i>Walther Ch. Zimmerli und Mike Sandbothe</i>	
Zeit als philosophisches Grundproblem des 20. Jahrhunderts	92

<i>Karl Mertens</i>	
Die Zeitstruktur kluger Handlungen.....	110
<i>Rudolf Kötter</i>	
Zeit ist Geld.....	128
<i>Kurt Weis</i>	
Leben wir in Zeitgefängnissen?.....	141
<i>Astrid Loos</i>	
Alles nur eine Frage der Zeit?.....	151
<i>Margarete Payer</i>	
Ist Zuspätkommen unhöflich? – Ein Blick auf andere Zeitkulturen.....	162
<i>Christiane Zehrer</i>	
Von Abseitsfalle bis Zuschauergunst – Zeit und Beschleunigung im modernen Mediensport.....	176
<i>Sabine Schmidt-Lauff</i>	
Zeit für Bildung.....	187
<i>Andreas Losch</i>	
Die Erfahrung der Zeit jenseits der ewigen Gegenwart.....	197
<i>Melanie Lahmer und Tanja Gabriele Baudson</i>	
Number forms: Synästhetische Zeitwahrnehmung.....	206
<i>Stefan Wladarsch</i>	
Erlebte Zeit – erzählte Zeit.....	216
<i>Norbert Richard Wolf</i>	
Zeit in Sprache und Literatur.....	229
<i>Corinna Handschuh</i>	
Tempus im Sprachvergleich.....	238
Über die Autorinnen und Autoren.....	247

Anna Seemüller, Tanja Gabriele Baudson und Martin Dresler

Einleitung: Zeit in Wissenschaft, Philosophie und Kultur

Was also ist die Zeit? Wenn niemand mich danach fragt, weiß ich's, will ich's aber einem Fragenden erklären, weiß ich's nicht. Augustinus' berühmtem Ausspruch in seinen *Confessiones* zufolge ist ein Kongress zum Thema *Zeit* eine zweiseitige Angelegenheit, besteht doch die Gefahr, durch solch intensives Fragen am Ende weniger über das Phänomen der *Zeit* zu wissen als zuvor. Im Oktober 2008 stellten sich auf der siebten MinD-Akademie in Nürnberg dennoch über 200 Teilnehmer diesem Wagnis. An vier Tagen wurde das Thema *Zeit* aus den unterschiedlichsten Perspektiven vorgestellt und intensiv diskutiert. Als Ergebnis dieser Bemühungen liegt nun dieser Tagungsband mit 21 Beiträgen aus Wissenschaft, Philosophie und Kultur vor. Ein zweiter Band in englischer Sprache umfasst unter dem Titel *Chronobiology and Chronopsychology* Beiträge, die das Phänomen *Zeit* aus psychologischer und neurowissenschaftlicher Sicht betrachten.

Die Bedeutung des Themas *Zeit* in der Geistesgeschichte geht bis in die Antike zurück und wurde seither immer wieder thematisiert. Die Veränderungen des physikalischen Zeitbegriffs durch Relativitätstheorie und Quantenphysik markieren zu Beginn des 20. Jahrhunderts einen erneuten Höhepunkt der Zeitdiskussion. Im einführenden Beitrag dieses Tagungsbandes stellt Ernst Peter Fischer mit seinem Beitrag „*Freie Erfindungen des menschlichen Geistes*“ Einsteins Suche nach den Naturgesetzen und seine außergewöhnlichen Leistungen im Bereich der Physik vor. Daran anknüpfend beschäftigt sich Thomas Fischbacher in seinem Beitrag zum *Zeitpfeil* in der Physik mit der Asymmetrie zwischen Vergangenheit und Zukunft: Wir können uns an die Vergangenheit erinnern und die Zukunft beeinflussen, aber nicht umgekehrt. Der Frage, ob wir vorhersagen bzw. berechnen können, wie sich unsere Gesellschaft in der Zukunft entwickeln wird, widmet sich die *Zukunftsforschung ohne Orakel* im Beitrag von Claudius Gros. Wie man durch eine Zeitreise direkt in die Zukunft gelangt, beschreibt Rüdiger Vaas in seinem Beitrag *Wenn gestern morgen ist*. Darin stellt er die physikalischen Möglichkeiten von Zeitreisen vor und beschreibt Zeitparadoxien, die diese nach sich ziehen können. Jan-Jürgen Eden betrachtet anschließend *Zeitreisen im Kino* und stellt dabei verschiedene cineastische

Konzeptionen und Effekte von Zeitmaschinen vor, die Auswirkungen von Zeitreisen auf die Gegenwart finden dabei besondere Beachtung. Eine anschauliche und praktisch durchführbare Möglichkeit der „Zeitreise“ stellt Werner Große in *Zeitkippen* vor: Werden im Film Raum- und Zeitachse vertauscht und der Film dann abgespielt, zeigen sich spannende optische Phänomene. In zahlreichen Beispielen wird gezeigt, wie sich diese Manipulation auf die Tiefeninformationen des Raums auswirkt. Informationstechnische Aspekte der Darstellung dreidimensionaler Welten auf einem zweidimensionalen Bildschirm diskutiert Robert Kosten mit der Methode des *Realtime Raytracing*. Weitere Fortschritte in der Computertechnik machen diese Technik für die Anwendung im Ingenieurbereich oder bei Computerspielen interessant. Prinzipielle Grenzen der *Rechenzeit* von Computern untersucht Henning Christ. Neben der Betrachtung des theoretisch Möglichen geht er dabei auf die experimentelle Umsetzung des Konzepts eines Quantencomputers ein.

Im Weiteren nähern wir uns der Zeit aus philosophischer, kultureller und sprachwissenschaftlicher Sicht. Die *Zeit als philosophisches Grundproblem des 20. Jahrhunderts* wird von Walther Ch. Zimmerli und Mike Sandbothe diskutiert, die insbesondere die philosophischen Aspekte der durch die moderne Physik ausgelösten Zeitdebatten beleuchten. Die Beschäftigung des Einzelnen mit dem Thema Zeit beinhaltet die Planung seines Handelns in der Gegenwart und Zukunft sowie die Reflexion seines Handelns in der Vergangenheit. Mit der Frage, wodurch sich die *Zeitstruktur kluger Handlungen* auszeichnet, beschäftigt sich Karl Mertens. Auch von ökonomischen Faktoren wird die Zeitstruktur des Handelns beeinflusst: *Zeit ist Geld* ist ein Bonmots Benjamin Franklins und gleichzeitig der Titel des Beitrags von Rudolf Kötter. Darin betrachtet er die unterschiedlichen Einstellungen zum Umgang mit der Zeit in der Geschichte der ökonomischen Entwicklung. Im darauf folgenden Beitrag von Kurt Weis steht unsere Vorstellung und unser Erleben von Zeit sowie ihre Gestaltung im Vordergrund. Mit der Frage *Leben wir in Zeitgefängnissen?* bezieht er sich zum einen auf unsere „persönlichen Zeitgefängnisse“, zum anderen auf die Zeitstrafe im Gefängnis und das Leben mit dieser. Wie sich die Wahrnehmung der Gesellschaft in Bezug auf Kriminalität über die Zeit verändert hat, beschreibt Astrid Loos in *Alles nur eine Frage der Zeit?* Zudem beschäftigt sie sich mit den Faktoren, die eine kriminelle Handlung begünstigen, und der individuellen Rentabilität.

Die Rolle der Zeit im kulturellen Kontext findet sich in dem Beitrag von Margarete Payer, in dem sie die Pünktlichkeit mit Blick auf unterschiedliche Zeitkulturen vergleicht. Die Frage *Ist Zuspätkommen unhöflich?* beantwortet sie mit Beispielen aus Alltag und Literatur. Mit Zeit und Beschleunigung in einer speziellen kulturellen Praxis – dem modernen Mediensport – setzt sich Christiane Zehrer in ihrem Beitrag *Von Abseitsfalle bis Zuschauergunst* auseinander. Über *Zeit für Bildung* schreibt Sabine Schmidt-Lauff und widmet sich dabei der entscheidenden Rolle der Zeit in der Erwachsenenbildung und dem lebenslangen Lernen. Die Zeitvorstellungen Naturwissenschaft und Theologie stellt Andreas Losch in seinem Beitrag *Die Erfahrung der Zeit jenseits der ewigen Gegenwart* einander gegenüber. Dabei beschreibt er ihre Unter-

schiede ebenso wie ihre Verschränkungen und geht auf den Dialog zwischen Naturwissenschaft und Theologie ein. Eine spezielle Form der Synästhesie und ihre Implikationen für zeitbezogene Informationen betrachten Melanie Lahmer und Tanja Gabriele Baudson in ihrem Artikel zu *number forms*.

Die abschließenden drei Beiträge untersuchen Aspekte der Zeit in Sprache, Literatur und Erzählungen. In seinem Bericht *Erlebte Zeit – erzählte Zeit* geht Stefan Wladarsch auf Prozesse des Erlebens und Erzählens ein, wie z.B. Zeitempfinden und Bedürfnisse. Die *Zeit in Sprache und Literatur* stellt Norbert Richard Wolf anhand von Textausschnitten vor und berücksichtigt dabei sowohl die unterschiedlichen Zeitmodi, die Zeitordnung als auch Sprecher und Sprechhaltung. Eine sprachübergreifende Betrachtung der grammatischen Darstellung von Zeit in den Sprachen der Welt gibt Corinna Handschuh in ihrem Beitrag *Tempus im Sprachvergleich*.

Die vorliegenden Beiträge bieten somit einen Einblick in die Vielfältigkeit der Betrachtungen des Themas Zeit und umfassen sowohl theoretische als auch empirische Ansätze. Abschließend danken wir den Autoren der einzelnen Beiträge, die diese Reise durch die Zeit überhaupt erst ermöglicht haben, sowie Rudolf Schiffmann für seine wertvolle Unterstützung beim Lektorat einzelner Beiträge. Allen Lesern wünschen wir eine vergnügliche und spannende Lesezeit!

Anna Seemüller, Tanja Gabriele Baudson und Martin Dresler

Ernst Peter Fischer

„Freie Erfindungen des menschlichen Geistes“

1 Einleitung

Die Physik, die Einstein gelernt hat, stammt aus dem 19. Jahrhundert. Die Physik, die wir heute lernen, stammt von Einstein und somit aus dem 20. Jahrhundert. Wenn gesagt wird, dass er seiner Wissenschaft mit seinem Wirken einen revolutionären Wandel verordnet hat, und wenn wir diese Erneuerung verstehen wollen, dann bleibt kein anderer Weg als der, der zu den Kenntnissen zurückführt, die Einstein als Student oder vorher erwerben konnte. Über sie soll hier aber erst gesprochen werden, nachdem wir auf zwei persönliche Erfahrungen hingewiesen haben, die von dem Knaben Einstein bekannt sind und die seine physikalische Neugier verständlich machen. Sie müssen trotzdem wohl all jenen unbegreiflich bleiben, die sie selbst nicht gemacht haben.

Einstein selbst hat einmal gesagt, das eigentlich Unbegreifliche an der Natur sei die Tatsache, dass sie irgendwie doch begreiflich ist. Schließlich kennen wir die Planetengesetze und andere Festlegungen des Verhaltens physikalischer Körper. Für den durchschnittlichen Laien steckt das eigentlich Unbegreifliche eher woanders, nämlich in der Frage, wie jemand dazu kommen kann, ein Naturgesetz aufzustellen. Was lockt ihn, sich auf die Fährte zu begeben? Und was macht ihn so sicher, dass er am Ende etwas findet und nicht mit leeren Händen dasteht?

2 Einsteins Suche nach den Naturgesetzen

Für das Verständnis von Einstein ist es wesentlich, dass sein Suchen nach den Naturgesetzen ohne äußeren Zwang und allein aus innerer Notwendigkeit begonnen hat. Überspitzt formuliert kann man sagen, dass nicht Einstein hinter der Wahrheit her war, sondern dass es umgekehrt die Wahrheit war, die ihn angespornt und angetrieben hat. Nur so wird wenigstens in Ansätzen

verständlich, was für den allgemeinen Hausverstand unbegreiflich bleibt, dass nämlich ein hübscher Knabe offenbar von selbst auf die Frage kommt, ob man die Welt noch sehen kann, wenn man auf einem Lichtstrahl reitet. Kann man sich in solch einem Fall noch im Spiegel sehen? Und als ihm sein Vater einen Kompass in die Hand drückt, wundert sich Albert erneut, und zwar über die Frage, wie und wodurch die Nadel erfährt, in welche Richtung sie zeigen muss. Selbst wenn wir annehmen, dass irgendwo ein Magnet liegt, bleibt offen, wie dessen Wirkung die Nadel erreicht. Was bewegt den Kompass und wie kommt es zu ihm?

Mit diesen beiden Themen, die ihren Platz in Einsteins Kopf suchten, bevor er in die Schule kam, sind nicht zufällig zugleich auch zwei der Bereiche benannt, denen er als Physiker sein Leben gewidmet hat und mit denen er bis zu seinem Tod beschäftigt war. Gemeint ist zum einen die Natur des Lichts und zum anderen das Verständnis für den Raum, in dem ja etwas enthalten sein muss, das die Magnetnadel erfasst und auf das sie reagiert. Um diese beiden Fragen kümmerten sich die Naturforscher so erfolgreich seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts, dass sie gegen Ende dieses Zeitraums – also als Einstein zum Studium nach Zürich kam – sogar sagen konnten, dass beides – das Licht und die Kraft, die auf den Magneten wirkt – in der Tiefe zusammenhängen. Von dieser Verbindung zwischen seinen Kinderfragen hat Einstein spätestens in seinen Physikvorlesungen oder aus den Büchern erfahren, und es leuchtet ein, wenn man vermutet, dass er damit ein prägendes Beispiel für die Möglichkeit kennen lernte, wie sich verschiedene Ideen vereinheitlichen lassen – etwas, das er für den Rest seines Lebens als Forscher tun wollte.

Die Bewegung einer Magnetnadel hatte den Physikern zu Beginn des 19. Jahrhunderts in dem Augenblick eine Herausforderung für ihre Phantasie beschert, in dem sie beobachteten, dass das Einschalten eines elektrischen Stroms Einfluss darauf nehmen konnte. Stellte man eine Magnetnadel neben einen Draht, dann schlug sie aus und änderte ihre Richtung, sobald ein Stromfluss nachweisbar war. Um erklären zu können, wie die Elektrizität im Draht bis zum Metall der Nadel im Kompass kommen und den Zwischenraum überbrücken kann, machte der englische Physiker Michael Faraday den merkwürdigen Vorschlag, dass ein elektrischer Strom um sich herum ein Magnetfeld aufbaut. Was zunächst seltsam klang, konnte bald systematisch bewiesen werden, und nicht nur das. Faraday war sogar in der Lage, einen Schritt weiter zu gehen und zu zeigen, dass die Natur dabei symmetrisch operiert und nicht nur ein Strom für ein Magnetfeld sorgt, sondern ein Magnetfeld auch einen Strom starten kann. Faraday konnte durch Änderung eines Magnetfeldes einen elektrischen Strom in Gang setzen, und falls es noch jemanden gibt, dem dies neu ist: Unser ganzes elektrisches System funktioniert nach diesem Prinzip, das die Physiker Induktion nennen. Der Strom, der bei uns zu Hause aus den Steckdosen kommt, entsteht durch Magnete, die sich und ihre dazugehörigen Felder drehen.

Was Faraday praktisch vorbereiten konnte, baute – immer noch im 19. Jahrhundert – der schottische Physiker James Clerk Maxwell in ein umfassendes theoretisches Gebäude ein. Maxwell konnte mit höchst raffinierten mathematischen Methoden alle Beobachtungen seiner Zeit in vier Gleichungen zusammenfassen, die als Maxwell Gleichungen berühmt sind und von zeitgenössischen Physikern nahezu angebetet wurden. Ihnen schien es, als habe ein Gott diese

Zeichen geschrieben. Auch Einstein stand als Student der Physik völlig unter dem Bann der Maxwell Gleichungen, mit denen ein neues Forschungsgebiet eröffnet wurde, das heute Elektrodynamik heißt. Das etwas kompliziert klingende Wort kann leicht zerlegt werden in das Dynamische und das Elektrische, und dann versteht man, um was es hier geht, nämlich um die Bewegung von Elektrizität.

Damit nähern wir uns allmählich Einsteins berühmtester Leistung, denn die zentrale Arbeit, die er in seinem Wunderjahr 1905 veröffentlicht und die ein neues Verständnis von Raum und Zeit begründet, trägt den Titel *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. Bei seinen hier aufgeführten Überlegungen geht Einstein von Maxwells Theorie aus, die oben genannt wurde, und er versucht deren Gleichungen mit der anderen – etwas älteren – Sammlung von Naturgesetzen zu verbinden, die allgemein als Newtonsche Physik bekannt sind. Isaac Newton hatte bereits vor 1700 die Gesetze der Bewegung aufgestellt, die wir zum einen in der Schule lernen und mit denen wir unter anderem ausrechnen können, welche Kraft man braucht, um ein Auto auf 100 km/h zu beschleunigen, oder wie lange ein Bremsweg ist, wenn man auf trockener Straße plötzlich zum Stehen kommen muss.

Übrigens – zwar kann man in einigen Büchern lesen, dass Einsteins Physik Newtons Mechanik abgelöst und obsolet gemacht habe, aber das stimmt nur sehr bedingt. Wenn die NASA heute einen Satelliten durch den Weltraum schickt, wird dessen Bewegung vor allem mit den Newtonschen Bewegungsgesetzen berechnet, mit denen man auch auf dem Mond landen konnte. Einsteins Korrekturen spielen da keine (praktische) Rolle. Sie kommen nur an anderen Stellen zum Tragen, was unseren Helden zu einem wunderbaren Schluss geführt hat. Da zum einen sowohl Newtons als auch Einsteins Gleichungen die meisten Bewegungen ausreichend gut beschreiben (also zum gleichen Ergebnis kommen), und da zum anderen die beiden Gedankengebäude auf völlig verschiedenen Ausgangspositionen basieren, kann man den merkwürdigen Schluss ziehen, dass physikalische Theorien „freie Erfindungen des menschlichen Geistes“ sind, wie es Einstein in seinem Buch *Mein Weltbild* ausgedrückt hat. Er bestätigt als praktizierender Physiker, was der Philosoph Immanuel Kant aufgrund theoretischer Überlegungen in seiner *Kritik der reinen Vernunft* behauptet hat, dass nämlich die Menschen die Naturgesetze keineswegs in der Natur vorfinden, sondern sie ihr vielmehr vorschreiben. Wir holen die Gesetze nicht aus der Natur, wir legen sie in sie hinein. Und keiner konnte das zu Beginn des 20. Jahrhunderts besser als Einstein, zu dem wir jetzt wieder zurückkehren.

3 Raum und Zeit

Als Einstein Physik studierte, trugen die Professoren in getrennten Veranstaltungen alles Wissenswerte über die beiden großen Säulen der Physik vor und schienen gar nicht zu bemerken, dass die Konstruktionen so ohne weiteres gar nicht nebeneinander stehen konnten. Dies lag an

einer Besonderheit der Maxwell'schen Theorie, die von elektrischen und magnetischen Feldern handelte, und der in dem Zusammenhang ein neues Verständnis von Licht gelungen war. Maxwell konnte zeigen, dass Faradays Idee im mikroskopischen Bereich funktionierte. Ein winziges magnetisches Feld baute blitzschnell ein ebenso winziges elektrisches Feld auf, das wiederum ein zweites magnetisches Feld entstehen ließ (was zugleich das erste zurückgehen ließ), das erneut ein elektrisches Feld in die Welt setzte (während wiederum das erste verschwand), und bei diesem gegenseitigen Aufschaukeln und Abbauen kam eine so genannte elektromagnetische Wellenbewegung zustande, die von uns als Licht wahrgenommen wird. So sah es Maxwell, und so verstand es Einstein, dem damit als Student völlige Gewissheit vermittelt wurde, dass seine Wissenschaft über die Ausbreitung von Licht Bescheid wüsste.

Einstein liebte das Symmetrische des Gedankengangs, was er schon bei Faraday bewundert hatte, der sicher war, dass die Wirkung der Elektrizität auf den Magnetismus auch in die umgekehrte Richtung nachweisbar sein muss. Deshalb störte es Einstein umso mehr, dass diese Symmetrie, die er im Kleinen so schätzte, im Großen nicht zu finden war. Sie fehlte in Hinblick auf die Newtonsche Physik, die von den mechanischen Bewegungen handelte, und zwar dort, wo es um die Geschwindigkeit der Wellenbewegung ging, die das Licht nach Maxwells Vorstellungen ausmacht. Seine Gleichungen sagten merkwürdigerweise voraus, dass diese Geschwindigkeit konstant ist und nicht davon abhängt, von welchem Standpunkt aus man sie betrachtet. Das leuchtet nicht sofort ein, weshalb sich auch niemand wunderte, dass die Sache bei Newton völlig anders aussah, wie man sich leicht an dem Beispiel eines Menschen klarmachen kann, der an einem Hafen steht und alle möglichen Boote vorbeifahren sieht. Nehmen wir an, an Bord eines der Boote geht ein Mann spazieren – mit 3 km/h –, und er tut das in Fahrtrichtung des Schiffes, das selbst mit 20 km/h unterwegs ist. Für den Beobachter auf der Hafemole kommt der Passagier dann mit 23 km/h voran, da sich Geschwindigkeiten addieren. So sagt es der gesunde Menschenverstand, und so sagen es die Newton'schen Gleichungen. Nehmen wir nun an, der Mann auf Deck habe eine Taschenlampe in der Hand. Aus ihr tritt das Licht mit einer Geschwindigkeit aus, die von den Physikern seit Maxwells Zeiten mit dem Buchstaben c bezeichnet wird (was mit dem lateinischen Wort für Geschwindigkeit zu tun hat). Während der Mann auf dem Schiff sieht, wie sich das Licht mit c km/h ausbreitet, sollte sein Pendant im Hafen feststellen, dass das Licht aus der vorbeifahrenden Lampe schneller als mit c unterwegs ist, nämlich mit $(c + 20)$ km/h. So sagt es erneut der gesunde Menschenverstand, und so sagen es wiederum die Newtonschen Gleichungen, die nun nicht mehr mit der Maxwell'schen Elektrodynamik zusammenpassen. Bei Maxwell sehen sowohl der Passagier an Deck als auch der Beobachter im Hafen, wie sich das Licht mit gleicher Geschwindigkeit bewegt, und damit stimmt an dieser Stelle etwas nicht. Irgendwo muss im Gebäude der Physik ein Baufehler stecken, was aber die Professoren nicht zu kümmern schien, in deren Vorlesung Einstein saß.

Für Einstein lag der Fall klar. Da die Gleichungen von Maxwell und Newton zusammenpassen mussten, bestand die Notwendigkeit, an einem der beiden Säulen eine Korrektur vorzunehmen, und Einstein entschied sich dafür, Maxwells System unangetastet zu lassen und New-

tons Physik zu verfeinern. Er legte kühn – als freie Erfindung seines Geistes – fest, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant ist, und gab sich die (schwere) Aufgabe, die dazugehörigen Konsequenzen auszuarbeiten. Das Ergebnis seines Nachdenkens stellte er 1905 unter dem schon zitierten Titel vor, wobei er in dieser Arbeit ausdrücklich darauf hinweist, dass die Annahme einer konstanten Lichtgeschwindigkeit zwar auf den ersten Blick unsinnig erscheint, dass man aber trotzdem weiter lesen sollte, weil sich mit dieser Ausgangsposition neue Einsichten erschließen – und zwar zum einen ganz erstaunliche und zum zweiten solche, die sich im Experiment nachprüfen lassen (was dann später auch erfolgreich gelungen ist).

Es ist eine Sache, eine kühne Hypothese aufzustellen, und es ist eine andere Sache, die nötigen Folgerungen daraus zu ziehen. Es ist nun auf diesem Gebiet, auf dem sich Einsteins eigentliche Meisterschaft entfaltet, und er selbst hat den dazugehörigen Charakterzug der hartnäckigen Sturheit als seinen großen Vorzug genannt. Wie sich nämlich in langem Nachgrübeln herausstellte, konnte die Newton'sche Mechanik nur dann geändert werden, um der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit Rechnung zu tragen, wenn man Hand an ihre begrifflichen Fundamente legte und genauer zu verstehen versuchte, was die Größen eigentlich bedeuten, die wir Raum und Zeit nennen und mit denen wir jede Bewegung beschreiben. Denn wer sich bewegt, verändert seine Position im Raum im Laufe der Zeit.

Zu Newtons Erbschaft gehörte die Idee, dass es sich bei Raum und Zeit um etwas Absolutes handelt, wie er geschrieben hat. Es gibt den Raum, in dem wir und die Welt uns aufhalten. Er stammt – laut Newton – von Gott und hat ansonsten keine andere Bedingung. Er ist uns also – wortwörtlich – unbedingt gegeben, wofür man auch absolut sagen kann. Dasselbe gilt für die Zeit, die unabhängig von allen Bedingungen und unerbittlich ihren Weg nimmt, wie ein Blick auf eine Uhr immer dann besonders deutlich werden lässt, wenn sich ein Fußballspiel dem Ende zuneigt und das eigene Team im Rückstand liegt. Dann würden wir gerne die Zeit aufhalten, was aber nicht geht, da sie ihren absolut unstörbaren Gang geht.

Raum und Zeit waren also absolut, bevor Einstein kam, und der Ausdruck „Relativitätstheorie“, mit dem seine Einsichten bezeichnet werden, lässt jetzt sofort erkennen, was er vor allem getan hat. Einstein hat die Grundgrößen unseres Denkens relativiert. Er hat gezeigt, dass sie aufeinander zu beziehen sind, dass Raum und Zeit zusammengehören und wir in einer Raumzeit leben. Natürlich klingt das letzte Wort ungewohnt, aber die Relativität kann höchst praktisch erläutert werden. Mit diesem zentralen Ausdruck der Theorie ist vor allem gemeint, dass Raum und Zeit nur dann zu sinnvollen physikalischen Angaben (Messergebnissen) führen, wenn sie in Hinblick auf einen Bezugskörper gemacht (gemessen) werden. Zeit ist das, was eine Uhr anzeigt. Und Raum (eine Position im Raum) ist das, was eine Messlatte anzeigt. Um sich über einen Ort zu verständigen, muss man immer angeben, relativ zu welchem Objekt eine Bestimmung gemeint ist. Wenn man sich zum Beispiel über die Position eines Fußballspiels verständigt, nennt man das Stadion, in dem er stattfindet, und es braucht nicht betont zu werden, dass – von Erdbeben und Kontinentalverschiebungen abgesehen – zwei Fußballspiele im Berliner Olympiastadion nur dann am gleichen Ort stattfinden, wenn diese Angabe relativ zur Erde (als Bezugskörper) gemacht wird. Denn nur solch eine Angabe leuchtet einem Beobach-

ter außerhalb des Sonnensystems ein, für den unser Planet ja durch seine vielfältigen Bewegungen dauernd die Position im All wechselt.

Die Aussage, zwei Ereignisse finden am gleichen Ort statt, macht nur Sinn, wenn man den Körper nennt, auf den man sich dabei bezieht. Und dieser Gleichörtlichkeit kann man die Frage nach der Gleichzeitigkeit an die Seite stellen, auf die es Einstein vor allem ankam, weil sie eine überraschende Antwort bekommt. Zunächst gilt wieder: Die Aussage, zwei Ereignisse finden zur gleichen Zeit statt, macht nur Sinn, wenn man die Uhr nennt, auf die man sich dabei bezieht. Allerdings taucht nun eine zusätzliche Komplikation (Bedingung) auf. Sie besteht darin, dass es Zeit braucht, bis sich zwei Beobachter über ihre jeweilige Zeitmessung ausgetauscht haben. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, die Einstein als Bedingung in sein theoretisches Gebäude einbringt, bringt nämlich als eine wichtige Folge die Tatsache mit sich, dass sich Licht nicht unendlich schnell ausbreiten kann. Es ist schnell; es ist immer gleich schnell, aber es ist nicht unendlich schnell. Es dauert einfach etwas, bis sich Zeiten vergleichen lassen, was auch heißt, dass es ausgeschlossen ist, Gleichzeitigkeit an verschiedenen Orten zu ermitteln. Die Zeit, die gemessen wird, hängt von der Position ab, die die verwendete Uhr im Raum einnimmt, was letzten Endes genau heißt, was oben schon gesagt wurde, dass nämlich Raum und Zeit zusammengehören und wir in einer Raumzeit stecken, auch wenn unser gesunder Menschenverstand sich zunächst gegen solch eine Einsicht sträubt.

Damit haben wir die Kernaussage der Relativitätstheorie genannt, die Einstein 1905 vorgelegt hat und die heute mit dem Beiwort „speziell“ genauer bezeichnet wird, wobei man sich inzwischen anzugewöhnen scheint, es groß zu schreiben. Zu der Speziellen Relativitätstheorie gehört eigentlich unvermeidlich das berühmte Zwillingsparadoxon, bei dem einer von zwei Zwillingen erst auf eine kosmische Reise geht, dann dabei nahe an die Lichtgeschwindigkeit herankommt, um zuletzt nach geeigneter Abbremsung jünger als der Bruder zur Erde zurückzukehren. Seine Zeit vergeht an den erfahrenen anderen Orten anders – genauer: sie vergeht langsamer –, was hier nicht weiter verfolgt und nur mit dem Hinweis erwähnt wird, dass das unterschiedliche Vergehen von Zeit, das ruhende oder rasende Personen spüren, zwar nicht für echte Zwillinge, aber für sehr empfindliche Uhren und kurzlebige Elementarteilchen sorgfältig überprüft und präzise bestätigt worden ist. Es kann also nicht bestritten, muss aber sehr wohl verstanden werden.

4 Energie und Masse

Wie nach den bisherigen Ausführungen weiter zu erwarten ist, kennt die Physik neben der Speziellen auch eine „Allgemeine Relativitätstheorie“, die ebenfalls von Einstein stammt und für die er zehn Jahre länger gebraucht hat, nämlich bis 1915. Bevor wir uns dieser Leistung zuwenden, die viele für seine allergrößte halten und deren experimentelle Nachprüfung ihn von

1919 an zu einem berühmten Weltstar gemacht hat, bleiben wir noch ein wenig in dem Wunderjahr 1905, in dem der Angestellte am Berner Patentamt neben der speziellen Fassung der Relativitätstheorie noch vier weitere Arbeiten vorlegt, von denen wir nur zwei näher ins Auge fassen wollen, obwohl sie alle unsere besondere Aufmerksamkeit verdient hätten. Wir wollen nicht weiter über die beiden Texte sprechen, in denen es Einstein unter den Titeln *Eine neue Bestimmung der Moleküldimension* und *Über die von der molekulartheoretischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* erstens gelingt, eine Doktorarbeit anzufertigen, die von seiner Hochschule angenommen wird, und in denen er zweitens der Physik einen Weg öffnet, die Zahl der Atome, die sich in einem gegebenen Volumen befinden, genauer als jemals zuvor zu bestimmen. Wenn man sich hierzu philosophisch äußern möchte, kann man sagen, dass Einstein mit diesen Arbeiten die damals heiß diskutierte Frage, ob es Atome wirklich gibt, endgültig positiv beantwortet. Die Physik kann den fruchtlosen Streit über die tatsächliche Existenz von Atomen hinter sich lassen und sich endlich ernsthaft dem Problem zuwenden, wie diese Grundbausteile der Materie denn im Detail beschaffen und mit physikalischen Mitteln zu verstehen sind. Dies wird sie dann auch in den nächsten Jahrzehnten erfolgreich tun.

Von den insgesamt fünf Arbeiten, die Einstein in seinem Wunderjahr vorlegt, war ihm die erste die wichtigste und wurde die letzte die einflussreichste. Wir wollen das Feld von hinten aufrollen und also mit dem Text beginnen, in dem sich Einstein einer eher spröden und öden Frage zuwendet. Sie lautet, „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“ und hat eine phantastische Antwort, die alle Welt kennt. Die Antwort steckt in der heute berühmtesten Gleichung der Welt, in der die Zusammengehörigkeit (Äquivalenz) von Masse (m) und Energie (E) eines Körpers festgestellt wird. Und das Verbindungsglied ist unser alter Bekannter, die Lichtgeschwindigkeit c , die zum Quadrat erhoben werden muss: E gleich m mal c zum Quadrat. So heißt es bei Einstein, und so steht es heute auf T-Shirts, wobei überliefert ist, dass den Entdecker der Formel ein merkwürdiges Gefühl beschlich, als ihm die entscheidenden Gedanken kamen. Ihm schien es, als ob sich die Götter über ihn lustig machten und in ein großes Gelächter ausbrachen, als sie ihrer Kreatur namens Einstein zuschauten, der sich an der Frage probierte, ob Licht (durch seine Energie) Masse übertragen kann. Er kam weder von dem Verdacht los, dass ihn der Herrgott an der Nase herumführte, noch von dem Gedanken, den er schließlich publizierte.

Die Äquivalenz von Energie und Masse erinnert an die Gleichrangigkeit von Raum und Zeit in der Speziellen Relativitätstheorie, und die legendäre Formel ist tatsächlich eine Konsequenz der elektrodynamischen Arbeit, die oben vorgestellt worden ist. Der Begriff der Trägheit, der im Titel vorkommt, meint die Eigenschaft, die einer Masse zukommt und die in dem Widerstand besteht, den sie einer Beschleunigung entgegenbringt. Denken wir uns als Masse einen Ball, dann kann man diesen zunächst natürlich problemlos mit großer Geschwindigkeit wegwerfen, wenn man Kraft genug hat. Die Schwierigkeit taucht auf, wenn man näher an die Lichtgeschwindigkeit herankommt. Da diese nicht überschritten werden kann, muss die Trägheit des zu beschleunigenden Körper zunehmen, was offenbar durch die Energie möglich wird,

die inzwischen in ihm steckt. Einstein konnte diesen Zusammenhang auf eine exakte Formel – die berühmte Gleichung – bringen, die natürlich wieder symmetrisch funktioniert. Die Energie kann nicht nur in die Masse eines Körper hinein gehen, sondern auch wieder herauskommen. Masse kann in Energie verwandelt werden, und das Licht, das dabei frei wird, hat die Welt am Ende des Zweiten Weltkriegs gesehen, als die ersten Atombomben explodierten.

Wissenschaft ist ein merkwürdiges Geschäft. Da sitzt jemand in einer kleinen Amtsstube in Bern, denkt über die Frage nach, „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“, und vierzig Jahre später kann mit seiner Antwort ein Weltkrieg gewonnen und die Erde in eine gefährliche Lage gebracht werden. Das Beispiel Einstein zeigt, dass im Grunde jeder Wissenschaftler, der still in seinem Zimmer hockt und seinen Gedanken nachgeht, die Welt nachhaltiger verändern kann, als es sämtliche Politiker und Generale getan haben, aber dieses Thema lenkt uns hier nur von Einsteins erster Arbeit im Wunderjahr ab, der wir uns jetzt zuwenden. Sie spielt deshalb eine besondere Rolle, weil er sie zum einen selbst als revolutionär einschätzte und weil ihm zum zweiten dafür der Nobelpreis für Physik verliehen wurde. Der Veröffentlichung trägt den sicher niemanden vom Hocken reißenen Titel *Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Standpunkt*, aber sie hat ihren Autor zutiefst erschüttert und ihn sogar glauben lassen, dass seine geliebte Wissenschaft der Physik keinen festen Boden mehr unter ihren Füßen hatte, auf dem sie stehen konnte.

5 Licht und Materie

Einsteins Unruhe muss man verstehen vor dem oben geschilderten Hintergrund, dass er vollkommen und fest von der Gültigkeit der Maxwell'schen Physik überzeugt war. Maxwell hatte gezeigt, dass Licht als Wellenbewegung verstanden werden kann, was mit Experimenten aus dem Anfang des 19. Jahrhunderts in Einklang stand. Kurz nach 1800 konnte der Engländer Thomas Young zeigen, dass Licht plus Licht Dunkelheit ergeben kann. Die Wissenschaftler sprechen von einer Interferenz, wie sie auch mit Wasserwellen zu beobachten ist, die sich gegenseitig verstärken oder auslöschen können.

Wenn etwas bombenfest als bewiesen galt, dann die Tatsache, dass Licht sich wie eine Welle ausbreitete, selbst wenn es da eine Kleinigkeit gab, die nicht so recht passen wollte. Bei seinen Versuchen, die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie besser zu verstehen, hatte der deutsche Physiker Philipp Lenard festgestellt, dass Licht Auswirkungen auf die Leitfähigkeit eines Drahtes zeigt. Je mehr Licht, desto besser die Leitfähigkeit, so dachte jeder, bis Lenard genauer hinschaute. Die Wirkung des Lichts lag nicht an seiner Intensität, sondern an seiner Frequenz. Je höher sie war, desto besser konnte der Strom fließen, und da waren die Physiker zunächst einmal sprachlos – bis sich Einstein mit einer Deutung an die Öffentlichkeit wagte, die er so vorsichtig wie möglich unter die Leute brachte. Das kompliziert klingende Gerede

von einem „heuristischen Standpunkt“, den er einmal einnehmen will, heißt in der Praxis, dass sich Einstein eine wilde Spekulation erlaubt, von deren Korrektheit er – zumindest nach außen hin – zwar nicht überzeugt ist, die aber weiterhilft. Die Spekulation, die er riskiert, bestand in der Annahme, dass Licht zwar eine Welle ist, wenn es sich ausbreitet, dass damit aber Schluss ist, wenn das Licht eingefangen wird. Wenn es irgendwo ankommt und seine Energie abgibt, agiert das Licht als Teilchen, wie Einstein meinte, was deshalb so ungeheuerlich war, weil das ganze 19. Jahrhundert an der Abschaffung dieser Idee gearbeitet hatte. Einstein führte sie keck wieder ein, wobei er nicht gewöhnliche Partikel im Sinne hatte, sondern auf die seltsamen Quanten schielte, die Max Planck im Jahre 1900 eingeführt hatte.

Damit ist ein entscheidendes Stichwort für die Physik genannt worden, die entstanden ist, nachdem Einstein sein Studium abgeschlossen hatte. Im Herbst 1900 hatte Planck in Berlin bemerkt, dass die Strahlung, die ein immer stärker erhitzter Körper abgab, nur dann richtig vorhergesagt werden kann, wenn man annimmt, dass die Energie nicht stetig, sondern sprunghaft abfließt. Dieses Element der Unstetigkeit nannte Planck ein Quantum, wobei nicht unbemerkt geblieben ist, dass sein Wort inzwischen zu einem Modewort der Wirtschaft geworden ist, da Unternehmen ihr Heil in Quantensprüngen suchen. Für Planck war die Entdeckung der „Quantenhopserei“, wie es später einmal verächtlich hieß, eher unangenehm (obwohl sie ihm bald den Nobelpreis für Physik eintragen sollte). Schließlich glaubte er an eine lückenlose und kontinuierliche Natur, wobei er sich diesen Gedanken durch die Vermutung bewahrte, das von ihm gelegte „Quantenei“ – wie Einstein es nannte – sei nur eine mathematische Hilfsgröße ohne physikalische Bedeutung.

Diese Hoffnung, die Planck in den Jahren nach 1900 noch hegte, zerstörte Einstein fünf Jahre später. Er zeigte, dass es Lichtquanten nicht nur in der mathematischen Phantasie, sondern in der physikalischen Wirklichkeit gab. Wenn Licht auf Materie traf, wurde Energie tatsächlich sprunghaft und unstetig ausgetauscht. Licht war keine Welle, sondern ein Strom aus Quantenteilchen, was genauer heißen musste, Licht trat nicht nur als eine Welle in Erscheinung (das hatte ja Maxwell gezeigt), sondern auch als ein Strom aus Quantenteilchen, und damit war die Physik endgültig verrückt. Wie konnte etwas Welle und Teilchen zugleich sein? Einstein grübelte und grübelte und kam zu der verzweifelten Einsicht, dass da ein großes Geheimnis verborgen, und noch längst nicht verstanden war, was Licht ist. Und wenn man seinen Briefen und Gesprächen glauben darf, dann hat er es bis zum Ende seines Lebens nicht verstanden.

Das Vertrackte liegt darin, dass die Frage „Was ist Licht?“ nicht eine Antwort, sondern zwei Lösungen kennt, wodurch eine gewisse Willkür in die Physik kommt. Konnte man sich aussuchen, was richtig ist? Der uralte Glaube, dass Wissenschaft von Fragen handelt, die durch klare Logik und im klärenden Experiment eindeutig entschieden werden können, brach zusammen, und Einstein wusste das, und was es bedeutete. Er hatte sofort das Gefühl, dass der Boden nicht mehr hielt, auf dem das ehrwürdige Gebäude der klassischen Physik errichtet worden war, und – noch schlimmer – er sah keinen Platz, der ein neues tragen und halten konnte.

Es sollte bis Mitte der zwanziger Jahre dauern, bevor man die traditionelle Grundlage der Physik ersetzen und eine neue finden konnte. In den Jahren um 1925 entstand die in unseren

Tagen nach wie vor gültige Physik der Atome mit Namen Quantenmechanik, mit der sich Einstein leider nie richtig anfreunden konnte. Er verlangte von einer wissenschaftlichen Theorie ganz genaue Vorhersagen über das Verhalten der Materie, und es war ihm in der Seele verhasst, dass in der Quantendarstellung der Materie unbestimmte und unbestimmbare Zustände von Atomen und Kernen auftreten sollten. Einstein hielt die Quantenmechanik, wie sie offiziell hieß, natürlich nicht für falsch. Dazu sagte sie zu genau voraus, was im Experiment geprüft werden konnte. Er hielt sie nur für unvollständig, und um diese Einstellung seinen Kollegen nahe zu legen, dachte er sich alle möglichen Gedankenexperimente aus, mit denen er zeigen wollte, dass es Elemente der Wirklichkeit gibt, von denen die Quantentheorie nichts weiß. Einstein diskutierte seine Versuche zur Widerlegung der neuen Atomphysik vor allem mit dem dänischen Physiker Niels Bohr, dessen Schüler vor allem für die modernen Merkwürdigkeiten verantwortlich waren. Aber Bohr ist es bis zuletzt immer wieder gelungen, Fehler in Einsteins Vorschlägen zu entdecken, was unseren Helden allerdings nicht dazu gebracht hat, sich mit der Quantentheorie zu versöhnen.

Bei den Gesprächen zwischen Bohr und Einstein ging es nicht nur um Physik – darüber konnte man sich irgendwie immer einigen. Bei diesen Diskussionen ging es natürlich auch um Philosophie, also um die Deutung von Physik bzw. um die Deutung des Wissens, das wir Physik nennen. Jeder, der sich um eine Deutung bemüht, beginnt mit einer Grundeinstellung, und die hieß bei Einstein, wie schon erwähnt, dass alles zusammenpassen muss. Er verstand ja das Licht vor allem nicht, weil sich in seinen Augen Welle und Teilchen nicht zusammenfügen ließen, was Bohr deshalb nicht störte, weil seine Grundeinstellung völlig anders aussah. Er hing an Polaritäten. Für ihn war alles ein Wechselspiel zwischen Plus und Minus, zwischen Tag und Nacht, zwischen Zufall und Notwendigkeit, zwischen Bewusstem und Unbewussten und also auch zwischen Welle und Teilchen. Für Bohr gab es auch kein Problem mit dem bis heute bestehenden Widerspruch zwischen den beiden großen Theorien der Physik, die damals entstanden sind und vom Kleinsten – den Atomen – und vom Größten – dem Kosmos – handeln. Während eine Theorie auf sprunghaften Quanten basierte, konnte die andere kontinuierliche Felder vorstellen. Diese andere – das war Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, mit der er 1919 berühmt geworden war, die dann aber plötzlich in Widerspruch zu der Quantentheorie geriet. Wohlgermerkt – es handelt sich weniger um einen physikalischen und mehr um einen philosophischen Widerspruch. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, die wir gleich genauer kennen lernen, erfasst den Raum lückenlos und ohne Quanten. Die Quantentheorie der Atome tut fast das Gegenteil. Sie erfasst die Wirklichkeit durch diskrete Unstetigkeiten, ohne über diese Lücken (Quanten) etwas sagen zu können. So gesehen passen beide natürlich nicht zusammen. Sie tun dies bis heute nicht, was unter anderem daran liegt, dass Einsteins jahrelange Versuche in seinen späten Jahren, das aufzustellen, was er selbst eine einheitliche Feldtheorie nannte und die Kosmisches und Atomares zugleich beschreiben sollte, gescheitert sind. Bohr und seine Anhänger hat das nie gestört. Wenn man Dualitäten gelten lässt und ihre Spannungen ernst nimmt, dann bilden das große Paar aus Einsteins Feldtheorie des Kosmos und Bohrs Quantentheorie der Atome nur ein weiteres Paar bzw. eine weitere Polarität. Das ist dasselbe

wie die doppelte Beschreibung von Licht als Welle und Teilchen, nur auf einem abstrakteren Niveau mit mathematischen statt mit anschaulichen Elementen.

Es könnte tatsächlich sein, dass Einsteins Ansicht von Einheit nicht die Tragweite hat, die Bohrs Ansicht von Einheit auszeichnet. Die hier angepriesene Einheit der Zweiheit stellt für einen streng physikalisch orientierten Wissenschaftler wie Einstein eher eine „Beruhigungsphilosophie“ dar, wie er einmal gesagt hat, aber die poetischen Elemente solch einer Weltdeutung sind ihm sicher nicht entgangen. Sie finden sich etwa bei Goethe, der dichten konnte, dass er in seinen Liedern „eins und doppelt“ ist. Und es sind bekanntlich zwei Seelen, die in der einen Brust wohnen, aus der Faustens Stimme zu uns spricht.

6 Allgemeine Relativitätstheorie

Wir haben uns damit nicht unbedingt zu weit von Einsteins Hauptleistung entfernt, denn in einem seiner schönsten Sätze hat er dargelegt, wie seiner Ansicht nach die beiden so getrennt wirkenden Bereiche von Wissenschaft und Kunst zusammengehören: „Das Schönste, was wir erleben können, ist das Geheimnisvolle. Es ist das Grundgefühl, das an der Wiege von wahrer Wissenschaft und Kunst steht. Wer es nicht kennt und sich nicht mehr wundern, nicht mehr staunen kann, der ist sozusagen tot und sein Auge ist erloschen.“ Wir nähern uns nämlich jetzt dem größten Geheimnis, das Einstein hinterlassen hat, nämlich seiner Allgemeinen Relativitätstheorie, von der einmal behauptet wurde, dass sie kaum mehr als eine Handvoll Menschen verstehen. Es ist vor allem ein Geheimnis, wie er die dazugehörigen mathematischen Gleichungen ableiten konnte, wobei an dieser Stelle auch nicht der geringste Versuch unternommen werden soll, sie vorzuführen. So einschüchternd das alles klingt, so wunderbar herrlich sind die Einsichten, die als Endergebnis zuletzt möglich werden, und sie lassen sich relativ einfach formulieren. Eine fast poetische Darstellung seiner großen Theorie in einem Satz hat Einstein im Übrigen selbst geliefert, was ihm möglich geworden ist, weil er eben immer gut mit der Sprache umgehen konnte.

Während die Spezielle Relativitätstheorie von den Beschreibungen der Welt für den Fall handelt, dass ein Betrachter ruht, während der andere gleichförmig – etwa auf einem Schiff – vorbeizieht, geht es in der Allgemeinen Relativitätstheorie um den Fall einer beliebigen Bewegung. Dies ist nötig, weil wir auf der Erde solch eine Bewegung durchführen. Wir drehen uns auf einem Planeten, der selbst um unser Zentralgestirn kreist, während weiter das ganze Sonnensystem in der Milchstraße wandert, die ihrerseits nicht still steht. Wenn physikalische Gesetze einen Sinn machen, müssen sie in jedem wie auch immer bewegten Koordinatensystem formuliert werden können, was allen Beschreibungen Bedingungen auferlegt, nach denen Einstein suchte. Dieses Forschen führte bald – wie nicht anders zu erwarten – zu den Grundgrößen von Raum und Masse, und merkwürdiger Weise stellte sich erneut heraus, das zusammenge-

hört, was der gesunde Menschenverstand trennt. Während wir denken, dass eine Masse nur einen Ort im Raum hat – ihre Position –, zeigte Einstein, dass eine Masse Einfluss auf den Raum hat. Sie ändert seine Geometrie, wie man sagt, sie krümmt den Raum. Es ist diese höchst merkwürdige Raumkrümmung, die 1919 als wirklich vorhanden nachgewiesen wurde und die Einstein zum Weltstar machte. Die Beobachtung nutzte eine Sonnenfinsternis aus, deren Eintreten es Physikern erlaubt, unmittelbar an unserem Zentralgestirn vorbeizuschauen. Wenn man dies tut, fällt der teleskopische Blick auf Sterne, deren Position man bestimmen kann, und das dabei erzielte Ergebnis wird mit den Daten verglichen, die durch Beobachtungen gewonnen worden sind, die gemacht worden sind, ohne in Sonnennähe zu kommen. Wie sich herausstellt, führen beide Blicke zu verschiedenen Ergebnissen, die dann übereinstimmen, wenn der Raum um die Sonne so gekrümmt ist, wie die Allgemeine Relativitätstheorie es vorgeschagt hatte. Einstein triumphierte, und er wurde eine gefeierte Persönlichkeit, um die sich ein riesiger Presserummel entfaltete.

So wichtig diese Popularität für Einsteins Leben ist, hier geht es um den gesamten Blick, der uns nun auf den Kosmos möglich ist, und der sich wie folgt zusammensetzt: Nach der Speziellen Relativitätstheorie hängen Raum und Zeit zusammen, nach der Allgemeinen Relativitätstheorie hängen sowohl Raum und Masse – wie oben skizziert – als auch Zeit und Energie zusammen (was hier nur angeführt wird). Nach der Äquivalenzformel E gleich m mal c zum Quadrat hängen auch Energie und Masse zusammen. Damit stecken sie alle unter einer Decke – der Raum, die Zeit, die Materie und die Energie, und zwar als einheitliches Gebilde, für das man früher noch den Namen *prima materia* hatte, aus der alles andere hervorgegangen ist. Und weil es dieses urtümliche Zusammenhängen gibt, können wir – dank Einstein – zum ersten Mal in der Geschichte der menschlichen Kultur sinnvoll und systematisch über den Anfang der Welt nachdenken, den wir uns heute am liebsten als Urknall vorstellen, durch dessen Wucht die Viererbande aus Raum, Zeit, Masse und Energie entsteht. Einstein selbst denkt nicht vom Anfang bis zu uns her, sondern lieber umgekehrt von uns bis zum Beginn zurück. Er überlegt eher vorsichtig, ob es möglich ist, den leeren absoluten Raum herzustellen, von dem Newton überzeugt war, dass Gott die Welt mit ihm begonnen hat. Es geht leider nicht, wie Einstein in einem wunderbaren Satz erläutert, der seine Allgemeine Relativitätstheorie und die anderen Überlegungen zusammenfasst:

„Früher hat man geglaubt, wenn alle Dinge aus der Welt verschwinden, so bleiben noch Raum und Zeit übrig; nach der Relativitätstheorie verschwinden aber Zeit und Raum mit den Dingen.“ Und zwar, weil sie untrennbar zusammenhängen, wie Einstein herausgefunden hat – ohne uns zu sagen, wer dies so eingerichtet hat.

7 Einstein und Kant

Wir wollen die notwendigerweise unvollständige Darstellung von Einsteins Physik durch den Hinweis abschließen, dass die Allgemeine Relativitätstheorie nicht nur astronomische und kosmologische Bereiche erläutert und verständlich macht. Sie kann zur Philosophie beitragen, und sie hat eines ihrer grundlegenden Probleme gelöst, das Immanuel Kant formuliert hat. Es geht um die Frage, ob die Welt einen Anfang im Raum haben kann oder nicht. Wir befinden uns zweifellos in einem Weltraum, und seit der Antike will man wissen, ob er unendlich ausgedehnt ist oder ob es da Grenzen gibt (und wenn dies der Fall ist, was sich dahinter befindet).

Kant vertrat nun die Meinung – in seiner *Kritik der reinen Vernunft* –, dass die menschliche Vernunft damit überfordert ist und über den Anfang der Welt im Raum nichts sagen kann. So kann man irren, wenn man die Physik nicht ernst nimmt, denn Einstein hat die Antwort auf Kants Herausforderung geben können, und zwar in seinem Buch *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, das er 1916 geschrieben hat. Dort gibt es ein Kapitel mit der Überschrift „Betrachtungen über die Welt als Ganzes“, und hierin findet sich ein Abschnitt, der dem Leser „Die Möglichkeit einer endlichen und doch nicht begrenzten Welt“ vor Augen führt. Als anschauliches Beispiel kann man sich die Oberfläche eines Globus vorstellen, die zweifellos nicht unendlich ist – die Weltkugel steht schließlich in unserem Wohnzimmer –, auf der es aber auch keine Grenzen gibt. Jedenfalls nicht für zweidimensionale Wesen. Unsere Situation ist genauso, nur eine Dimension höher. Da wir – Einstein zufolge – in einer Raumzeit leben, die insgesamt vier Dimensionen aufweist – drei räumliche und eine zeitliche –, stellt der Raum so etwas wie die Oberfläche des Globus dar, den wir soeben betrachtet haben. Unsere Wirklichkeit spielt sich auf der dreidimensionalen Oberfläche eines vierdimensionalen Kontinuums ab, und so leben wir in einer Welt, die endlich ist, ohne Grenzen zu kennen.

So widersinnig viele Details von Einsteins Theorien unserem normalen Hausverstand scheinen, zuletzt können wir uns mit den wissenschaftlichen Einsichten versöhnen. Denn eine Welt ohne Grenzen, die gefällt uns, und dass sie dabei sogar nur endlich groß ist, macht sie uns erneut sympathisch.

Literatur

- Einstein, A.: Eine neue Bestimmung der Moleküldimension. Bern: Wyss (1905).
Einstein, A.: Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Standpunkt. *Annalen der Physik*, 17, 132–148 (1905).
Einstein, A.: Über die von der molekulartheoretischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*, 17, 549–560 (1905).
Einstein, A.: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 17, 891–921 (1905).
Einstein, A.: Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, 18, 639–641 (1905).
Einstein, A.: Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 49, 769–822 (1916).
Einstein, A.: *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*. Berlin: Springer (1916).
Einstein, A.: *Mein Weltbild*. Amsterdam: Querido (1934).
Kant, I.: *Kritik der reinen Vernunft*. Riga: Hartknoch (1781).

Thomas Fischbacher

Der Zeitpfeil

Vom Wesen der Asymmetrie zwischen Vergangenheit und Zukunft

1 Einleitung

Es gibt Beobachtungen, die so tief in unserer Alltagserfahrung verwurzelt sind, dass es als große Leistung angesehen werden muss, überhaupt erst den Gedanken formulieren zu können, dass es sich hierbei nicht um Selbstverständlichkeiten handelt und die Welt im Prinzip auch anders funktionieren könnte. Ein Beispiel wäre sicherlich die Tatsache, dass wir in einer dreidimensionalen Welt leben. Viel fundamentaler noch ist die Beobachtung, dass die Nichtgegenwart in ‚Vergangenheit‘ und ‚Zukunft‘ zerfällt, die für uns auf sehr verschiedene Weise in Erscheinung treten: während wir uns an die Vergangenheit erinnern und die Zukunft beeinflussen können, ist dies umgekehrt jeweils nicht möglich. Wir stellen insbesondere auch fest, dass die Mehrzahl der Prozesse, die wir alltäglich beobachten, nicht von selbst rückwärts ablaufen können: Der Teebeutel färbt allmählich das Teewasser, aber umgekehrt wird sich niemals Tee spontan in den Teebeutel zurückziehen und klares heißes Wasser zurücklassen.

Kurioserweise zeigt sich allerdings, dass alle fundamentalen physikalischen Gesetze, die den alltäglichen Phänomenen letztendlich zugrunde liegen, formal genau diese Symmetrie zu haben scheinen. Am einfachsten ist dies für die Newton'sche Gravitationstheorie zu ersehen: In einer ‚Spielzeug-Welt‘, in der es nur Punktmassen gibt, die sich gemäß Newtons Gesetzmäßigkeiten bewegen und einander anziehen, könnte man alle Körper kurz anhalten, um alle Geschwindigkeiten simultan umzukehren, und danach zusehen, wie sich die Welt gerade auf dieselbe Weise entwickeln würde, die ein rückwärts abgespielter Film zeigen würde, auf dem die bisherige Bewegung aufgezeichnet wurde. Beim Versuch diesen Gedanken wirklich präzise zu fassen, tauchen etliche theoretisch-physikalische Fußangeln auf, die bewältigt werden können, aber einige technische Tricks erfordern. Da diese allerdings am Wesen der Sache nichts ändern, wollen wir uns für diesen Artikel auf die Diskussion einer Modellwelt zurückziehen, deren Physik wesentlich einfacher ist als die der Realität und in der das wesentliche Phänomen

,in Reinkultur‘ studiert werden kann, dass allein auf Basis zeitumkehrsymmetrischer Fundamentalgesetze dennoch Prozesse beobachtet werden – typischerweise Stoffmischungsvorgänge –, die die Zeitumkehrsymmetrie brechen.

2 Fundamentalphysik und ihre Symmetrien

Vor dem zweiten Weltkrieg existierten im Wesentlichen zwei Arten physikalischer Aussagen: Zum einen gab es effektive Modelle, die es erlaubten, viele Experimente mit akzeptabler Genauigkeit zu beschreiben, etwa das Gesetz von Boyle-Mariotte, nach dem der Druck einer Gasportion sich (bei gleich bleibender Temperatur) bei Verdopplung des Volumens halbiert. Weder wurde von derartigen Gesetzen erwartet, dass sie dazu geeignet sein könnten, reale Systeme beliebig genau zu beschreiben, noch war das wirklich der Fall: Allerdings waren (und sind) diese Modelle für die Mehrzahl der technischen Anwendungen völlig ausreichend. Zum anderen gab es Aussagen, von denen man annahm – und annimmt –, dass sie exakt gelten, weil ihnen fundamentale Einsichten zugrunde liegen. Hierzu gehören etwa der Energieerhaltungssatz, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, die Masselosigkeit des Photons, und etliche weitere.

Nach dem zweiten Weltkrieg zeigte sich im Rahmen der Entwicklung und experimentellen Überprüfung der Quantenelektrodynamik, dass unser Verständnis der Physik eine neue Qualität erhielt: Erstmals stimmten theoretische Vorhersagen und experimentelle Messdaten für Phänomene, bei denen dies nicht von fundamentalen Prinzipien gefordert wurde, bis an die Grenzen der Leistungsfähigkeit der theoretischen und experimentellen Werkzeuge überein – was speziell bedeuten sollte: mit einer phantastischen Genauigkeit von besser als eins zu einer Milliarde. Während die Quantenelektrodynamik lediglich Aussagen über Prozesse macht, an denen Elektronen, Positronen und elektromagnetische Strahlung (Photonen) beteiligt sind, wie etwa Compton-Streuung, wurde das theoretische Rahmenwerk – die Quantenfeldtheorie – so weiterentwickelt, dass wir heute über eine umfassende theoretische Beschreibung aller Wechselwirkungsprozesse der Elementarteilchen (ausgenommen Gravitation) verfügen, die heute mit allen experimentellen Daten verträglich erscheint. Dies ist das sogenannte ‚Standardmodell der Elementarteilchenphysik‘. (Gravitation ist strukturell wesentlich verschieden von den anderen fundamentalen Wechselwirkungen und hat sich bisher dem Versuch widersetzt, sich in eine rundum überzeugende allgemeine Theorie der Dynamik der grundlegenden physikalischen Quantenfelder – oft als ‚Weltformel‘ bezeichnet – einbauen zu lassen.) Die Physik glaubt heute guten Grund zu der Annahme zu haben, denjenigen Prozessen auf der Spur zu sein, die letztendlich allen beobachtbaren makroskopischen Vorgängen zugrunde liegen. Deswegen wird hier der Begriff ‚Fundamentalphysik‘ verwendet.

Sowohl die (Quanten-)Elektrodynamik als auch die Gravitationsphysik sind zeitumkehrsymmetrisch im zuvor beschriebenen Sinn. Erweitert man nun beispielsweise die Quantenelektrodynamik um eine (rudimentäre) Beschreibung der Eigenschaften von Atomkernen, so lässt sich aus ihr die gesamte theoretische Chemie ableiten und damit auch die Biochemie. Auf ähnliche Weise lassen sich auch effektive Beschreibungen anderer Systeme gewinnen. Auch wenn wir beispielsweise über keine in sich stimmige Beschreibung der Quantengravitation verfügen, spielen die hier zugrunde liegenden Probleme keine Rolle bei dem Versuch, ein effektives quantitatives Sternmodell aufzustellen durch Kombination eines einfachen kernphysikalischen Modells mit einem einfachen Modell der Gravitationsphysik. Ähnliche Spiele lassen sich sehr weit treiben und führen so gut wie immer zu brauchbaren Modellen, in denen die Grundgleichungen, die Fundamentalprozesse beschreiben, strikt zeitumkehrsymmetrisch sind, während das Verhalten des Gesamtsystems diese Eigenschaft nicht zeigt. Zwar kennen wir heute einige exotische Fundamentalprozesse, die tatsächlich nicht zeitsymmetrisch sind, etwa den CP-verletzenden Zerfall der neutralen K-Mesonen, doch scheinen diese im heutigen Universum für die Frage der weithin beobachteten Zeitasymmetrie keine Rolle mehr zu spielen. Falls der liebe Gott einen Schalter umlegen würde und damit ab sofort diese exotischen Prozesse abschalten würde, würde das höchstwahrscheinlich außer den experimentellen Elementarteilchenphysikern niemand bemerken. Dennoch waren diese Prozesse im frühen Universum anscheinend im Zusammenhang mit der Entstehung des Ungleichgewichts zwischen Materie und Antimaterie sehr wichtig.

3 Vom Wesen der Entropie

Mit dem Begriff ‚Zeitpfeil‘ – also der Zeitumkehr-Asymmetrie der Physik – werden verschiedenartige Phänomene verbunden. Die astronomische Beobachtung, dass das Universum eine heiße Vergangenheit (‚Urknall‘) und kalte Zukunft hat, wird gemeinhin der ‚kosmologische Zeitpfeil‘ genannt und soll hier nicht näher diskutiert werden. Zu allermeist bezeichnet der Ausdruck ‚Zeitpfeil‘ jedenfalls den sogenannten ‚thermodynamischen Zeitpfeil‘, der mit der Beobachtung verbunden ist, dass – so liest man häufig –, die Entropie im Universum im Laufe der Zeit zunimmt (oder zumindest nicht abnimmt). An dieser Stelle ist eine Begriffsklärung dringend nötig: Die ‚Hauptsatzthermodynamik‘ lässt sich so formulieren, dass alle wesentlichen Einsichten durch das Studium von Systemen gewonnen werden können, welche aus Komponenten zusammengesetzt sind, die jeweils für sich im ‚thermodynamischen Gleichgewicht‘ sind (etwa ein warmer und ein kalter Stahlblock, die in Kontakt gebracht werden). Würden die Komponenten isoliert bleiben, würden sich makroskopische Materialparameter wie Temperatur, Stoffkonzentrationen, etc. nicht ändern. In diesem populären ‚hemdsärmeligen‘ Zugang ist der Begriff ‚Universum‘ ein *terminus technicus*, der die (als groß angenom-

mene) äußere Umgebung des Systems beschreibt. Wenn wir etwa das Abkühlen einer Tasse Tee beschreiben würden, wäre mit dem ‚Universum‘ speziell die Küche gemeint, die ja hinreichend groß ist, um durch Aufnahme der Wärme aus dem Tee ihre eigene Temperatur nicht merklich zu ändern. *Ganz sicher* bezieht sich der Ausdruck ‚Universum‘ bei der Beschreibung der Abkühlung von Tee jedenfalls nicht auf irgendwelche fernen Sterne oder Galaxien!

In der phänomenologischen (Hauptsatz-)Thermodynamik ist die ‚Entropie‘ definiert als eine additive Zustandsgröße: Die Entropie des Gesamtsystems ist die Summe der Entropien aller Systemkomponenten. Da wir lediglich den Fall betrachten, dass diese sich für sich genommen im thermodynamischen Gleichgewicht befinden, können wir die Definition verwenden, dass der *reversible* Übergang zwischen zwei Gleichgewichtszuständen durch Zufuhr der Wärmemenge q (etwa: 1 Joule) mit einer Entropiezunahme q/T verbunden ist. Wenn speziell Wärme von einem heißen auf einen kalten Körper übergeht, nimmt die Gesamtentropie beider Körper zu, weil die Entropiezunahme des kalten Körpers (durch die kleinere Temperatur im Nenner) die Entropieabnahme des warmen Körpers überkompensiert. Der umgekehrte Prozess – spontane Wärmetrennung – wäre mit einer Entropieabnahme verbunden und wird nicht beobachtet.

Während die axiomatische Hauptsatz-Thermodynamik auch für sich genommen bereits eine reizvolle Theorie ist, die viele interessante Aussagen liefert, lässt sich der Ursprung des Zeitpfeils nur verstehen, wenn der Kontakt zur Fundamentalphysik der mikroskopischen Prozesse hergestellt wird. Dies geschieht im Rahmen der *statistischen Mechanik*, die eine tiefe Einsicht in die Natur des Phänomens ‚Wärme‘ erlaubt.

3.1 Statistische Mechanik

Aus der statistischen Mechanik benötigen wir zwei Paare von Begriffen: Zunächst müssen wir uns über die Unterscheidung zwischen *Arbeit* und *Wärme* klar werden. Sowohl Arbeit als auch Wärme sind Energieformen, die einem System zugeführt werden können. Wir können uns als ‚System‘ hier etwa speziell einen gefüllten Gaszylinder vorstellen, dessen ‚Zustände‘ wir entweder klassisch durch die Positionen und Geschwindigkeiten der darin enthaltenen Gasteilchen beschreiben oder quantenmechanisch als komplizierte Mehrteilchen-Quantenzustände, die aus stehenden Materiewellen im Zylinder konstruiert werden. Die Zufuhr von *Arbeit* ändert die Energien der einzelnen Zustände, nicht jedoch ihre Besetzungen: Wenn wir den Zylinder anheben, erhöhen wir die potentielle Energie jedes Einzelzustands. Die Zufuhr von *Wärme* ändert die Besetzungsstatistik der Zustände, nicht jedoch ihre Energie: In einem sehr kalten Gaszylinder wird das Gas ein ausgeprägtes Dichteprofil annehmen und am Boden (energiearme Zustände!) merklich dichter sein als an der Decke. Wird er aufgewärmt, homogenisiert sich dieses Dichteprofil.

Weiterhin müssen wir das Konzept von *Mikrozuständen* und *Makrozuständen* kennen: Unter einem *Mikrozustand* wollen wir eine vollständige Beschreibung aller Parameter des Sys-