

Die Welt nach Einstein — eine Revolution unseres Denkens!?

Ulrich Eckhardt
Universität Hamburg
Fachbereich Mathematik
— Optimierung und Approximation —
Bundesstraße 55
20 146 Hamburg
E-Mail: Eckhardt@math.uni-hamburg.de

Albert Einstein, 14. 3. 1879 – 18. 4. 1955

Inhaltsverzeichnis

1	Welche Spuren hat Einstein hinterlassen?	1
2	Was ist Physik?	4
3	Die antike Kosmologie	7
4	Von Kopernikus bis Newton	15
5	Von Newton zu Einstein	18
6	Einstein	21
	Literatur	28

Vortrag am 26. Januar 2006 im Rahmen der Veranstaltungsreihe „Einstein, relativ“ an der Universität Hamburg.
Sämtliche biographischen Angaben sind den Lexika [20] beziehungsweise [24] entnommen.

1 Welche Spuren hat Einstein hinterlassen?

Im Jahre 1905 publizierte Albert Einstein seine Arbeit, mit der die „spezielle“ Relativitätstheorie geschaffen wurde [11], im Jahre 1916 erschien Einsteins Arbeit über die „allgemeine“ Relativitätstheorie [13]. Wenn wir uns heute fragen, wo und wann wir den Wirkungen dieser beiden epochalen Arbeiten begegnen, dann fällt die Antwort recht unbefriedigend aus. Man sagt uns, daß beispielsweise beim GPS-System relativistische Korrekturen erforderlich seien, um maximale Positionsgenauigkeit zu erhalten, und populär ist die Verbindung der Formel $E = mc^2$ mit der Atombombe und der Kernenergie.

Betrachten wir zum Vergleich zwei andere Beispiele einer physikalischen Grundlagenarbeit, die unser Leben *wirklich* verändert hat. Im Jahre 1841 formulierte Julius Robert von Mayer (1814–1878) den ersten Hauptsatz der Thermodynamik, der besagt, daß es ein festes Umrechnungsverhältnis von mechanischer Energie und Wärmeenergie gibt. 1845 konnte Robert Mayer den „Wechselkurs“, das sogenannte *mechanische Wärmeäquivalent*¹, dieser beiden Energiearten angeben [53]. Auf der Grundlage dieser Erkenntnis entstanden die Wärmekraftmaschinen wie die Dampfmaschine und der Verbrennungskraftmotor. Wir können hier in Hamburg buchstäblich nicht über die Straße gehen, ohne mit den Folgen von Mayers Entdeckung recht handfest konfrontiert zu werden.

Ein anderes Beispiel: Im Jahre 1936 legte Alan Turing (1912–1954) der *London Mathematical Society* eine Arbeit vor [71], in der er die theoretischen Prinzipien einer ganz einfachen Rechenmaschine beschrieb, die sich als universelles Modell aller „denkbaren“ Rechner herausstellte. Wir sind heute den Konsequenzen dieser Arbeit Turings ausgeliefert, und selbst im Kinderspielzeug steckt heute schon ein Mikroprozessor, der nichts anderes ist als eine *Turing-Maschine*.

Demgegenüber betreffen die Auswirkungen der Arbeiten Einsteins exotische Randgebiete, wer braucht schon wirklich das GPS-System? Von den Atombomben und Kernreaktoren wollen wir uns ja ohnehin so schnell wie möglich verabschieden!

Formulieren wir es etwas anders: Wenn schon Albert Einstein unseren Alltag nicht merklich beeinflußt hat, dann doch unser Bewußtsein. Man liest oft, daß Einsteins Forschungen eine neue Sicht der uns umgebenden Welt gebracht haben. Als im Jahre 1919 Sir Arthur Stanley Eddington (1882–1944) die relativistische Ablenkung des Lichtes am Sonnenrand gemessen hatte, lautete eine Schlagzeile der Londoner *Times* vom 7. November 1919: „Revolution in der Wissenschaft – Neue Theorie vom Universum – Newtons Theorie widerlegt – Raum ‚gekrümmt‘.“ Häufig liest man auch, daß Einstein Kant „widerlegt“ habe und daß die Euklidische Geometrie nicht mehr aktuell sei. Kann man jetzt wirklich die Werke von Euklid, Newton und Kant umweltschonend entsorgen? Hierzu vielleicht einige kleine Beispiele.

Einstein hat in der Tat gezeigt, daß der Newtonsche beziehungsweise Kantsche Begriff der „absoluten Zeit“ in der Physik keinerlei Bedeutung hat. Wir lesen mit einigem Befremden, daß in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig die Zeit mit einer Unsicherheit von 1.5×10^{-14} bestimmt wird, das heißt, die Länge eines Jahres wird auf eine millionstel Sekunde „relativ zu einer idealen Uhr“ gemessen. Mit anderen Worten: In den letzten Millionen Jahren hat es vier große Eiszeiten gegeben. Wenn in einer Million Jahren, nach möglicherweise vier weiteren Eiszeiten, die – hoffentlich – intelligenten Nachfolger des Menschen die Physikalisch-Technische Bundesanstalt immer noch betreiben, dann würde deren Uhr höchstens um eine Sekunde von der „idealen Uhr“ abweichen! Wozu dieser Aufwand, wenn es eine absolute Zeit doch gar nicht gibt? Und weiter: Was bedeutet hier die Aussage „relativ zu einer idealen Uhr“? Schließlich: Es wäre ja alles noch halbwegs im Lot, wenn die Physikalisch-Technische Bundesanstalt eine feste Position in einem, Inertialsystem einnehmen würde. Dies ist aber sicher nicht der Fall, die Bundesanstalt

¹ 1 kcal \approx 427 kp cot m in „alten“ Einheiten, Im SI-System verliert dieser Umrechnungsfaktor seinen Sinn, da Arbeit, Emnergie und Wärme in der gleichen Einheit (J) gemessen werden.

bewegt sich – wie wir alle – mit einer Geschwindigkeit von 0.46 km/s (= 1656 km/h) um den Erdmittelpunkt, mit einer Geschwindigkeit von 29.8 km/s (= 107 280 km/h) um die Sonne, mit einer Geschwindigkeit von etwa 20 km/s (= 72 000 km/h) gemeinsam mit der Sonne relativ zu den sonnennahen Fixsternen und mit einer Geschwindigkeit von etwa 250 km/s (= 900 000 km/h) um das Zentrum der Milchstraße – ganz zu schweigen von der Bewegung des Milchstraßensystems! Übrigens: Dies alles betrifft lediglich die „offizielle“, gesetzliche Zeit, in Braunschweig kann man die Zeit sogar zehnmal so genau ermitteln!

Diese Zeit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt wäre übrigens im Rahmen der genannten Genauigkeit auch ein brauchbarer Zeitstandard für die Bewohner der Fixsternsysteme unserer galaktischen Nachbarschaft, Mit einer Toleranz von etwa 10 Sekunden pro Millionen Jahre sogar für jeden Bewohner unseres Milchstraßensystems, sofern er sich nicht an einem gar zu exotischen Ort befindet, etwa nahe am Ereignishorizont eines Schwarzen Loches! Für mich ist diese Zeit jedenfalls „ganz schön absolut“!

Hierbei sollte vielleicht angemerkt werden, daß Isaac Newton (1642–1727) in seinem 1687 erschienenen Werk *Philosophiæ naturalis principia mathematica* aus guten Gründen den Begriff der absoluten Zeit besonders erklären mußte (zitiert nach nach der Übersetzung J. Ph. Wolfers, 1872, siehe [47, S. 227 ff]):

[I.] Die *absolute, wahre* und *mathematische Zeit* verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig, und ohne Beziehung auf irgend einen äusseren Gegenstand. Sie wird so auch mit dem Namen: *Dauer* belegt.

Die *relative, scheinbare* und *gewöhnliche Zeit* ist ein fühlbares und äusserliches, entweder genaueres oder ungleiches, Maass der Dauer, dessen man sich gewöhnlich statt der wahren Zeit bedient, wie Stunde, Tag, Monat, Jahr.

Man muß sich vor Augen halten, daß der Begriff „Zeit“ für Newtons Zeitgenossen eine ganz andere Bedeutung hatte als heute. Die Tageszeit wurde vorwiegend durch Sonnenuhren bestimmt, welche im Laufe des Jahres um eine Viertelstunde vor- beziehungsweise nachgehen. Für den Alltag waren auch die sogenannten *babylonischen Stunden* gebräuchlich, die zwar die Länge unserer heutigen Stunden hatten, deren Zählung aber aus praktisch einsehbaren Gründen bei Sonnenaufgang begann oder die *Temporalstunden* (auch *Jüdische Stunden*), bei denen der Tag zwischen Sonnenauf- und Untergang in zwölf Abschnitte geteilt wird, die je nach der Jahreszeit von ungleicher Länge sind. Zwar gab es schon Räderuhren, aber die relativ genaue Pendeluhr (1657) und die Unruh (1665) wurde erst von Newtons Zeitgenossen Christiaan Huygens (1629–1695) erfunden. Die erste über längere Zeit verläßlich genaue Uhr wurde von John Harrison aus Anlaß einer Preisausschreibens der englischen Regierung aus dem Jahre 1714 konstruiert und im Jahre 1761 erfolgreich erprobt [70, Abschnitt 2.8.6]. Erst im 16. und 17. Jahrhundert setzte sich die heutige Zählung von Mitternacht zu Mitternacht durch.

Wenn man Paradoxa liebt, dann kann man sagen, daß erst nachdem Einstein nachgewiesen hatte, daß es eine absolute Zeit nicht geben kann, eine Zeitdefinition² gefunden wurde, die der Newtonschen absoluten Zeit so nahe kommt, wie es sich Newton selbst nicht hätte träumen lassen! Dies war wohl auch ein wichtiger Punkt in dem Vortrag von Herrn Hickethier [30]: Einerseits hat Einstein den Begriff der Gleichzeitigkeit aus der Physik verbannt (Hickethier spricht vom „Infragestellen der absoluten Zeit“ [30, S. 16]), andererseits haben die modernen Medien eine neue Art von Gleichzeitigkeit geschaffen. Ob, wie Hickethier weiter argumentiert, „Einstein selbst aus diesem Kontext heraus“ zu verstehen ist [30, S. 17], ist eine Frage, die man in der Physik wohl ein wenig anders beantworten würde.

²Eine Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ¹³³Cs entsprechenden Strahlung.

Ähnlich geht es mit dem absoluten Raum Newtons, von dem Einstein ebenfalls gezeigt hat, daß es ihn nicht gibt. Nun erfährt man aus der Presse, daß der Astrometrie-Satellit Hipparcos der ESA, welcher von 1989 bis 1993 aktiv war, 118 218 Sterne hochpräzise vermessen habe, vornehmlich zu dem Zweck, ein genaues Referenzsystem für die Astronomie zu definieren, also eines Systems, welches frei von Trägheitskräften ist, und das wäre ja ein System, welches für die praktische Anwendung über die gleichen Eigenschaften verfügt, wie sie der absolute Raum Newtons hat. Übrigens ist auch hier die Genauigkeit in einem Bereich, der für Newton unvorstellbar gewesen wäre.

Man könnte einwenden, daß Einstein das menschliche Denken von den von veralteten Vorstellungen über das Universum befreit habe. Hierzu eine kleine Geschichte: Im Schloß Neuburg an der Donau fand vom 3. Juni bis 16. Oktober 2005 die Bayerische Landesausstellung 2005 „Von Kaisers Gnaden – 500 Jahre Fürstentum Pfalz-Neuburg“ statt. In dieser Ausstellung war eine Planetenprunkuhr Ottheinrichs zu sehen, die in der Zeit von 1554 bis 1561 von Philipp Imsser (1500–1570) und Gerhard Emmoser (gest. 1584) (Technisches Museum Wien, Kat. Nr. 7.102) hergestellt worden war. Bei den Führungen teilte die Führerin beziehungsweise der Führer dem Publikum mit der angemessenen Herablassung mit, daß diese Uhr noch nach der geozentrischen Theorie gearbeitet sei. Man hörte dann die Geräusche des Amüsemments über unsere unwissenden Vorfahren. Vielleicht wußte der eine oder die andere ans dem Publikum auch, daß zum Zeitpunkt der Konstruktion dieser Uhr Nicolaus Kopernicus (1473–1543) bereits sein berühmtes Werk publiziert hatte (welches allerdings damals kaum jemand gelesen hatte). Bei nüchterner Überlegung hätte man sich fragen müssen, wozu eine nach „der heliozentrischen Theorie“ gebaute Uhr denn eigentlich nütze sei. Ottheinrich wollte mit Hilfe dieser Uhr feststellen, ob er am Abend eine Chance haben würde, beispielsweise die Venus zu sehen, und dazu braucht man auch heute noch die geozentrische Position. Daß Ottheinrich auch noch an Astrologie interessiert war, hat mit seiner Zeit wenig zu tun. Man liest etwa, daß es in den Vereinigten Staaten 1970 schätzungsweise 10 000 berufsmäßige Astrologen gab, aber nur 2 000 Astronomen (nach Robert S. Morison (zitiert bei [63, S. 34])). Heute dürfte sich das Verhältnis eher zu Ungunsten der Astronomen verändert haben. Übrigens: In dem ausgezeichneten Katalog der Landesausstellung wird in dem entsprechenden Beitrag von Günther Oestmann eine sachlich exzellente und richtige Darstellung gegeben, Führer und Besucher hatten diesen Beitrag wohl nicht gelesen.

Zur Zeit sind die Resultate der „Pisa-Studie“ in aller Munde. Noch erschreckender als diese Resultate waren die Ergebnisse des bundesweiten Studien-Eingangstests Physik aus dem Jahre 1978 [34]. Dort wurden die Kenntnisse von Studienanfängerinnen und -anfängern getestet, also von Personen, die zumindest der Meinung waren, Physik sei für sie das richtige Studienfach. Von den Befragten konnten beispielsweise nur 17 % die Frage, wodurch die Mondphasen entstehen, richtig beantworten. 18 % brachten wenigstens eine teilweise richtige Antwort. Man kann also durchaus sagen, daß die Kenntnisse in Physik (oder Astronomie) einer Auswahl von naturwissenschaftlich interessierten Abiturientinnen und Abiturienten damals – also 435 Jahre nach Kopernikus – noch überwiegend „vorkopernikanisch“ waren, heute sähe das Resultat wohl kaum besser aus! Wenn Herr Hickethier in seinem Vortrag die Industriegesellschaften des 20. Jahrhunderts als „Wissensgesellschaften“ bezeichnet [30, S. 13], so muß man vor diesem Hintergrund fragen, welches „Wissen“ hier gemeint ist.

Vielleicht können wir erkennbare Spuren Einsteins bei seinen Fachkollegen ausmachen. Hierzu schrieb Hermann Nicolai, der Direktor des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Potsdam im Oktober 2005 im *Physik Journal* [51]:

Das Resultat solcher Entwicklungen läßt sich in der deutschen Hauptstadt besichtigen, welche ja bekanntlich einmal (trotz knappen Geldes!) ein leuchtendes Weltzentrum der theoretischen Physik war: Zwar prangt hier fast an jeder Hauswand ein Ausspruch von Einstein, doch gibt es für die Art der theoretischen Physik, mit welcher Einstein

sich vorwiegend beschäftigt hat, an keiner der drei großen Berliner Universitäten mehr einen Lehrstuhl.

Zu dieser trüben Bilanz gehört genauso, dass die Allgemeine Relativitätstheorie – nach Einsteins eigener Einschätzung seine bedeutendste Leistung – mit lediglich zwei W3(C4)-Professuren an deutschen Universitäten vom Aussterben bedroht ist. Seit 1997 haben allein in meiner Abteilung elf (darunter sechs deutsche) Mitarbeiter permanente Stellen gefunden – davon leider nur einer in Deutschland! Damit wird das Institut immer mehr zum „Durchlauferhitzer“: Der Nachwuchs wird aus dem Ausland geholt, hier ausgebildet, und dann wieder ins Ausland entlassen.

Also: Relativitätstheorie – zumindest in Deutschland – auf der „Roten Liste“?

Es stellt sich also die Frage:

Sind Einsteins Theorien folgenlos geblieben?

Wir sehen, daß wir so nicht weiter kommen in der Einschätzung der Folgen der Einsteinschen Theorien.

Wir versuchen, die Wirkung Einsteins deutlicher zu fassen, indem wir die Frage einengen. Sicherlich hat Einstein die Physik verändert. Nun sind die Subtilitäten der Physik – besonders der modernen – nicht jedermanns Sache und die Wirkung Einsteins auf die Physik ist unbestritten (wenn auch seine Theorie, wie wir gesehen haben, eher eine Randerscheinung in der deutschen Forschungslandschaft darstellt). Wir wollen uns daher fragen, was sich seit Einstein für unser „Weltbild“ geändert hat. Dabei werde ich auch diesen Begriff noch enger fassen und mich auf unsere Vorstellung vom Kosmos, also auf die *Kosmologie* beschränken. Bevor wir uns jedoch dieser Fragestellung zuwenden, möchte ich ganz kurz klären, was Physik eigentlich ist.

2 Was ist Physik?

Diese Frage ist nicht ganz leicht zu beantworten. Man könnte pragmatisch sagen: Physik ist alles, was von Berufsphysikern in Fachzeitschriften publiziert wird. Es ist weise, sich zunächst wieder zu beschränken auf die Frage: Was ist eine physikalische Aussage? Anstelle einer umfangreichen Definition – sofern eine solche überhaupt möglich ist – gebe ich zwei Beispiele für Aussagen an, die geeignet sind, den Sachverhalt wenigstens zu illustrieren:

- Am 29. März 2006 wird eine totale Sonnenfinsternis stattfinden. In der brasilianischen Küstenstadt Natal geht die total verfinsterte Sonne um 8:34 UT auf. Die totale Sonnenfinsternis endet um 11:46 UT in Kasachstan.
- In ihrem Buch *The Year 2000* prognostizieren die beiden – wenigstens seinerzeit – angesehenen Futurologen Herman Kahn und Anthony J. Wiener [31] für das Jahr 2000 die folgenden Pro-Kopf-Bruttonationalprodukte (in US-Dollar, Wert von 1965):

Land	niedere	mittlere	hohe
	Schätzung		
Westdeutschland	5.150	7.790	10.410
Ostdeutschland	—	8.355	—
Japan	3.990	8.590	10.000

Demnach würde „die Bundesrepublik in der Entwicklung des Sozialprodukts je Einwohner ... sowohl von Japan als auch von der DDR überholt werden“ [10, S. 281].

Was ist der Unterschied zwischen beiden Aussagen? Beide wurden auf der Basis einer anerkannten Theorie mittels unumstrittener mathematischer Methoden gewonnen. Beide basieren auf empirischen Daten. Interessant ist auch, daß Astronomie und Wirtschaftswissenschaften gemeinsam haben, daß sie die Objekte ihrer Wissenschaft nur beobachten können, bei beiden Disziplinen sind Experimente nicht gut möglich. Nun ist aber die erste der beiden Prognosen in einem äußerst strengen Sinne „wahr“, die zweite nicht. Man erwartet, daß die Aussage über die Sonnenfinsternis minutengenau (sogar noch genauer) zutrifft. Man kann bei den angegebenen Zahlen sogar noch garantierte Genauigkeitsschranken angeben, und wenn das Ereignis nicht innerhalb dieser Schranken eintreffen sollte, dann wäre dies eine unerhörte wissenschaftliche Sensation, die zu einer Revision der Grundlagen Anlaß gäbe. Auch bei der zweiten Aussage hat man Schranken (niedere – hohe Schätzung), jedoch hat das Nichteintreffen der Prognosen meines Wissens keinerlei Überraschung ausgelöst. Was ist der Grund für diese unterschiedliche Aufnahme der beiden Prognosen?

Wir können einige Gründe angeben, von denen allerdings keiner für sich das erstaunliche Versagen der zweiten Prognose zu erklären vermag:

- Die zweite Prognose betrifft die Handlungen von Menschen, und diese sind (gottlob) nicht voraussagbar. Da die Prognosen von Kahn und Wiener von den handelnden Personen gelesen wurden (etwa von [10]), hat es „Rückkopplungsphänomene“ gegeben, die möglicherweise dazu geführt haben, daß die Prognose sich selbst falsifizierte.
- Astronomen und Wirtschaftswissenschaftler haben eine unterschiedliche Einstellung zu empirischen Daten. Der Astronom lernt, daß die größten Feinde einer exakten Beobachtung der Beobachter und sein Instrument sind. Newcomb charakterisierte die Situation in der Astronomie wie folgt [50, Nr. 181]:

Contemporaneous with the accession of Pond to the Directorship of the Greenwich Observatory was the foundation by Friedrich Wilhelm Bessel of the German School of practical astronomy. The fundamental idea of this school in the trial of the instrument reverses the maxim of English criminal law. The instrument is indicted as it were for every possible fault, and is not exonerated till it has proved itself correct in every point. The methods of determining possible errors of an instrument were developed by Bessel with an ingenuity and precision of geometric method never before applied to such problems. Not only this, but even when every source of error admitting of determination and correction has been allowed for, the instrumental arrangement must admit of being varied from time to time in order that, if any undiscovered errors still exist, they may be detected by the discrepancies between different methods of observation.

- In den Wirtschaftswissenschaften hat man es mit einer großen Anzahl von Einflußgrößen zu tun, die man nicht, wie es in der Physik üblich ist, in „Größen erster Ordnung“ und „vernachlässigbare Größen“ unterteilen kann.

Ein weiterer Punkt, der mir sehr wichtig erscheint: Physiker und Ingenieure, zum Teil auch Mathematiker, sind erfolgsorientierte Pragmatiker, die sich Ideologien gegenüber reserviert verhalten und nur Resultate gelten lassen. Ein Beispiel möge dies verdeutlichen:

Im Jahre 1919 veröffentlichte Robert Hutchings Goddard (1882–1945), der US-amerikanische Raketenpionier, eine Arbeit mit dem Titel *A method for reaching extreme*

altitudes (Smithsonian Collection 2, 1919). In dieser Arbeit stellte er die Aufgabe, eine Rakete mit gegebenem Brennstoffvorrat so zu steuern, daß sie maximale Höhe erreicht. Er benutzte dabei (im wesentlichen) das folgende mathematische Modell:

Für eine Rakete gelten die folgenden Bewegungsgleichungen:

$$\begin{aligned} h' &= v_h \\ v_h' &= \frac{1}{m}(c\beta\frac{v_h}{v} - D) - \frac{R_0^2 g_0}{(R_0 + h)^2} \\ x' &= v_x \\ v_x' &= \frac{1}{m}(c\beta v_x/v - D) \\ y' &= v_y \\ v_y' &= \frac{1}{m}(c\beta v_y/v - D) \\ m' &= -\beta \end{aligned}$$

Hierbei bezeichnet $m = m(t)$ die Masse von Rakete und Treibstoff zu einem gegebenen Zeitpunkt, (x, y, h) sind die Koordinaten der Rakete (als Funktionen der Zeit), wobei h die Höhe sei. (v_x, v_y, v_h) sind die entsprechenden Geschwindigkeitskomponenten und $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_h^2}$ die Geschwindigkeit. $D = 0.5\rho_0 e^{-\alpha h} v^2 F_D C_D$ beschreibt den Luftwiderstand, wobei $\rho_0 e^{-\alpha h}$ die Luftdichte in der Höhe h ist. g_0 ist die bekannte Schwerebeschleunigung an der Erdoberfläche, $g(h) := R_0^2 g_0 / (R_0 + h)^2$ die Fallbeschleunigung in der Höhe h . Die Größen $g_0, R_0, \rho_0, F_D, C_D$ und α werden als konstant angenommen. Auf die Angabe von Anfangsbedingungen wurde verzichtet.

Die Aufgabe besteht nun darin, den Massendurchsatz (Schub) $\beta(t)$ so zu bestimmen, daß die Rakete bei einer vorgegebenen Treibstoffmenge maximale Höhe erreicht.

Diese Aufgabenstellung ist ein sehr frühes Beispiel einer Optimalsteuerungsaufgabe. Wenn man die Formeln genau analysiert, dann macht man die folgende Entdeckung: Die Schwerebeschleunigung g_0 tritt nur in der zweiten Gleichung auf, und das heißt aber, daß die Wirkung der Schwere nur in vertikaler Richtung variiert, in horizontaler Richtung aber konstant ist. Ein solches ebenes Schwerepotential besitzt aber nur ein einziger Körper, eine unendlich ausgedehnte ebene Scheibe! War also Goddard ein heimlicher Anhänger des babylonisch-ägyptischen Weltbildes, nach dem die Erde eine Scheibe ist?

Man weiß seit Newton, daß die genannte Aufgabe „eigentlich“ mittels der Newtonschen Gravitationsgleichungen zu formulieren ist. Nach Brennschluß würde sich dann die Rakete auf einer Keplerschen Ellipse um den Erdmittelpunkt bewegen. In der obigen Formulierung wäre ihre Bahn eine Galileische Parabel. Goddard wußte, daß für die Größenordnung der Parameter, die ihn interessierten, die Parabelbahn ausreichend genau sein würde, das heißt, man kann im Kontext seiner Aufgabe die Erde tatsächlich als eine Scheibe ansehen. Warum nun diese archaische Sicht der Dinge? Wenn man wie oben ein ebenes Potential benutzt, dann wird die Rechnung erheblich einfacher (dieses Argument hat allerdings heute keine Bedeutung, denn dem Computer ist es gleich, wenn die Formeln ein wenig komplizierter sind). Wichtiger ist aber, daß man der obigen Aufgabenstellung verschiedene qualitative Eigenschaften ansehen kann, die durch die Newtonsche Formulierung verschleiert werden. Insbesondere kann man (unter gewissen vereinfachenden Annahmen) eine „geschlossene Lösung“ angeben, an der man noch mehr „sieht“. Plakativ könnte man sagen: Die obige Formulierung entspricht nicht dem Kopernikanischen Weltbild, aber man kann mit ihr außerordentlich bequem rechnen!

Eine kleine Anmerkung hierzu: Nach 1916, also nach Einsteins Arbeit über die allgemeine Relativitätstheorie [13] müßte man die obigen Gleichungen „eigentlich“ relativistisch schreiben, was einen weiteren Gewinn an (nutzloser) Präzision, jedoch einen immensen Verlust an Übersichtlichkeit bedeuten würde.

Wir können aus diesem kleinen Beispiel folgern, daß man die Sicht der Entwicklung der Wissenschaften, wie sie Thomas Kuhn in seinem vielzitierten Buch zeichnet [35] mit Skepsis sehen kann. Demnach entwickeln sich die Wissenschaften – genauer die Naturwissenschaften, oder noch genauer, die Physik und die Chemie – durch Revolutionen, bei denen „alte“ Theorien unter der Guillotine landen, um neuen Theorien Platz zu machen. Wir hatten gesehen, daß eine „überlebte“ Theorie, das Galileische Fallgesetz, durch das Newtonsche Gravitationsgesetz oder durch die Einsteinsche allgemeine Relativitätstheorie nicht verdrängt wurde, sondern an ihrer Stelle von Nutzen sein kann.

Es ist recht instruktiv, einmal nachzusehen, an welchen Bibliotheken der Universität Hamburg dieses Buch vorhanden ist (Tabelle 1). Besonders interessant sind die Bibliotheken, die in dieser Aufstellung nicht vorkommen. Es sind dies gerade die sogenannten „exakten“ Naturwissenschaften wie Physik und Chemie, aber auch Biologie oder Mathematik. Ganz sicher existieren die von Herrn Schnädelbach [62] beklagten „zwei Kulturen“ auf den „Chefetagen“ der Wissenschaft nicht, auf den unteren Ebenen aber sehr wohl. Hierfür mag die Verteilung von Kuhns Buch ein Indiz sein, aber auch die Tatsache, daß die deutsche Übersetzung des Buches höchst mangelhaft ist, wie schon der Titel belegt. Es geht eben nicht um wissenschaftliche Revolutionen, Kuhn schreibt ausschließlich über *naturwissenschaftliche* Revolutionen!

Bibliothek	Anzahl
Wirtschaftswissenschaften	8
Philosophisches Seminar	5
Zentralbibliothek Recht	3
Informatik	3
Staats- und Universitätsbibliothek	3
Volkskunde	2
Erziehungswissenschaft	2
Ärztliche Zentralbibliothek	2
Sozialwissenschaft	2
Ethnologie	1
Sport	1
Anglistik und Amerikanistik	1
Allgemeine und Angewandte Sprachwissenschaft	1
Psychologie	1

Tabelle 1: Standorte des Buches von Kuhn an Instituten der Universität Hamburg.

3 Die antike Kosmologie

Wir werfen zunächst einen Blick auf die Antike. Besonders in der Zeit der Vorsokratiker [7] gab es eine Fülle von Modellen für die Struktur des Universums. Wir betrachten einige von diesen näher. Dabei wird Vollständigkeit nicht angestrebt, und ich muß warnend vorausschicken, daß ich kein Alttertumswissenschaftler bin, ich beherrsche noch nicht einmal die altgriechische Sprache. Ich muß Sie jetzt bitten, alles zu vergessen, was Sie in der Schule gelernt haben. Wir wollen versuchen,

der Geschichte – soweit dies überhaupt möglich ist – unvoreingenommen entgegenzutreten, das heißt ohne die oben erwähnte Herablassung des Modernen:

Verzeiht! es ist ein groß Ergetzen,
Sich in den Geist der Zeiten zu versetzen,
Zu schauen, wie vor uns ein weiser Mann gedacht
Und wie wirs dann zuletzt so herrlich weit gebracht!

Eine interessante Theorie wurde von Parmenides (um 540–470 v. Chr.) aufgestellt. Demnach gab es in der Welt keine Leere, und daraus folgt, daß die Objekte der Welt dicht gedrängt ohne Zwischenräume aneinander stoßen. Damit ist aber eine Bewegung nicht möglich, ein moderner Physiker würde sagen, daß in Parmenides' Universum die Materie „auskristallisiert“ sei. Demgemäß leugnete Parmenides auch die Existenz von Bewegung. Die alltägliche Beobachtung von Bewegung erklärte er als Sinnestäuschung. Schon sehr früh wußte man in Griechenland, daß unsere Sinneswahrnehmungen nicht immer verlässlich sind. Parmenides griff übrigens das Bild des Xenophanes von Kolophon (6./5. Jhdt. v. Chr.) auf, nach dem das All eins, kugelförmig und begrenzt sei. Dieses Bild des Seins (oder Gottes) ist nach Jorge Luis Borges eine der „paar wenigen Methaphern“, die Universalgeschichte ausmachen (*Die Sphäre Pascals* in [6], siehe auch [42]).

Zenon von Elea (um 490–430 v. Chr.) war ein Schüler von Parmenides. Wir kennen ihn durch Zitate, insbesondere von Aristoteles und Platon. Letzterer läßt in dem Gespräch *Parmenides* – unter anderen – Sokrates, Zenon, Parmenides und Aristoteles miteinander diskutieren. Zenon lieferte eine theoretische Unterstützung für diese Sicht, indem er durch *Aporien* oder Paradoxa belegte, daß die übliche Sicht der Bewegung zumindest zweifelhaft sei. Er zeigte, daß die Annahme von Bewegung als Ortsveränderung in der Zeit zu Widersprüchen führt:

Ausgehend von einer Vorstellung von Zeit als Folge von – endlich oder unendlich vielen – *Zeitpunkten* oder *Momenten* würde ein abgeschossener Pfeil in jedem der Zeitpunkte feststehen und sich somit auch insgesamt nicht bewegen.

Nimmt man die Zeit als ein unendliches Kontinuum an, so ergibt sich das Paradox, daß z.B. Achill im Wettlauf mit einer Schildkröte, die einen Vorsprung hat, diese niemals überholen könnte. Wenn Achill die Ausgangsposition der Schildkröte erreicht hat, so ist diese selber wieder ein Stück weitergekommen, so daß der Abstand zwischen beiden zwar kleiner wird, aber immer bestehen bleibt.

Über diese Paradoxa ist seit Zenons Zeiten viel geschrieben worden. Es gibt zahllose „Widerlegungen“ der Aporien, von denen die weitaus meisten nicht schlüssig sind. das Zenonsche Paradoxon *Stadion*, welches besagt, daß man eine gegebene Strecke von einem Punkte A nach einem Punkte B nicht durchlaufen könne. Die Argumentation ist ähnlich wie im *Achilles*-Paradoxon. Die Anekdote sagt, daß Diogenes von Sinope (†323 v. Chr.) das Paradoxon *Stadion* ad absurdum führte, indem er sich erhob und von A nach B ging. Man kann derartige *Gedankenexperimente* leicht denunzieren, indem man ihre (stillschweigenden) Voraussetzungen mißversteht. So wird von Mathematikern gern behauptet, daß das Beispiel von Achilles und der Schildkröte durch die moderne Analysis erledigt sei. Schließlich konvergiere die unendliche Reihe der Wegstrecken, die Achilles zurücklegen muß, gegen einen bestimmten Wert, und dies sei eben der Punkt der Strecke, an dem Achilles die Schildkröte eingeholt habe (man kann diesen Punkt auch ohne unendliche Reihen einfach elementar ausrechnen, diese „Lösung“ bietet G. D. Gomperz an [7, S. 178]). Ein Physiker könnte etwa sagen, daß Achilles sich der Schildkröte nach Durchmessung hinreichend vieler Teilstrecken bis auf Bruchteile von Bruchteilen eines Atomdurchmessers genähert habe, und spätestens dann sei nach der Heisenbergschen Unschärferelation die Frage, ob er sie eingeholt habe, ohnehin keine korrekt gestellte physikalische Frage mehr. Meiner Tochter verdanke ich

sogar noch eine „biologische“ Widerlegung des Paradoxons: Natürlich wird die Schildkröte Achilles überholen. Bekanntlich erreichen nämlich Schildkröten ein sehr hohes Alter, das heißt Achilles würde irgendetwann an Entkräftung oder Altersschwäche sterben, während sich die Schildkröte dann noch in der Blüte ihrer Jugend befindet und erst richtig loslaufen könne.

Eine Interpretation der Zenonschen Paradoxa ist, daß man entweder die Zeit als diskret annehmen kann, daß heißt, jedes Zeitintervall besteht aus endlich vielen „Zeitatomen“, dann aber trifft das Pfeilparadoxon zu, oder aber man denkt sich die Zeit als kontinuierlich verlaufend, dann aber muß in der Tat Achilles unendlich viele „Zeitpunkte“ überwinden, ob er nun die Schildkröte zu überholen beabsichtigt oder aber nur eine bestimmte Strecke zurücklegen möchte. Das Unendliche hat, wie man im alten Griechenland schon wußte, seine Tücken, und ist sicher nicht trivial. Übrigens: Die Zenonschen Paradoxa sind bis in die heutige Zeit Gegenstände von wissenschaftlichen Untersuchungen. So hat zum Beispiel Friedrich Engels in seinem wissenschaftstheoretisch gemeinten „Anti-Dühring“ das Pfeilparadoxon benutzt, um zu zeigen, daß die mechanische Bewegung einen „Widerspruch in sich enthält“ und daher nicht physikalisch, sondern nur dialektisch zu verstehen sei [17, S147 f]. Wesentlich tiefsinniger sind Versuche, die Zenonschen Paradoxa mit Hilfe der modernen „Nichtstandard-Analyse“ zu modellieren [46]. Man spricht (nach dem bekannten Physiker Richard P. Feynman) sogar von einem „Quanten-Zeno-Effekt“ [49]. Eine sehr eingehende Behandlung der Zenonschen Paradoxa wurde von dem bedeutenden Mathematiker und ebenso bedeutenden Wissenschaftshistoriker Bartel Leendert van der Waerden geliefert [72]. Bertrand Russell hat sich in seinen *Principles of Mathematics* ausführlich mit Zenon auseinandergesetzt [55, S. 336–354]. Eine allgemeinverständliche Darstellung findet man bei Sainsbury [56].

Wichtig ist, daß die Zenonschen Paradoxa bereits sehr früh Warntafeln errichteten, die vor allzu unbefangenen Umgang mit dem Unendlichen abhalten sollten. Man kann den Paradoxien des Unendlichen dadurch entgehen, indem man es in der uns umgebenden Natur als schlicht nicht gegeben annimmt - und das taten die Atomisten - oder aber, indem man nach Aristoteles zwischen dem *aktuell Unendlichen*, welches unserer Vorstellungskraft in der Tat nicht zugänglich ist, und dem *potentiell Unendlichen* (dem *schlechten Unendlichen* Hegels) unterschied. Unter letzterem verstand man Prozesse, die in ihren Teilen dem endlichen menschlichen Verstand zugänglich sind, die aber unbegrenzt fortgesetzt werden können. Ein klassisches und mustergültiges Beispiel für den Umgang mit dem potentiell Unendlichen ist der Beweis von Euklid (365–300 v. Chr. (?)), daß es unendlich viele Primzahlen gibt. Für ein modernes literarisches Beispiel sei auf die Geschichte vom Türhüter in Kafkas *Prozeß* verwiesen. Eine mathematische Theorie des Unendlichen - freilich nicht frei von Paradoxa oder zumindest von schwer akzeptablen Phänomenen - wurde erst in der Neuzeit von Bernard Bolzano (1781–1848) und von Georg Cantor (1845–1918) erbracht.

Nach diesem Exkurs wenden wir uns einer geschlossenen Kosmologie zu, die von Epikur (ca. 341–270 v. Chr.) entwickelt wurde, der ein großes Lehrgedicht verfaßt hat, welches uns allerdings nur in wenigen Fragmenten vorliegt. Titus Lucretius Carus (99–55 v. Chr.) hat uns die Lehre von Epikur in dem Lehrgedicht *De natura rerum* überliefert, welches nahezu vollständig erhalten ist. In diesem Lehrgedicht, welches über 7 000 Verse enthält, entwirft Lukrez ein poetisches und schlüssiges Bild vom Universum. Demnach gibt es Leere als notwendige Voraussetzung von Bewegung. Alle Materie besteht aus Atomen, und deren Bewegung ist grundsätzlich vertikal. Wenn nun alle Atome gleich schnell seit Ewigkeiten und für alle Ewigkeit parallel zueinander durch das unendliche All fallen, hätten wir ein sehr langweiliges Universum, in welchem die Teilchen ohne jede Wechselwirkung treiben. Hier führt interessanterweise Epikur den Zufall ein. Immer wieder kommt es vor, daß unvorhersehbar ein Teilchen von der Geradlinigkeit abweicht. Dann kann es zu Kollisionen von Teilchen kommen mit dem Ergebnis, daß Teilchen zusammenklumpen und damit die Himmelskörper bilden. Durch das Element des Zufalls kann Epikur beziehungsweise Lukrez den menschlichen freien Willen zwanglos erklären. In heutige Denkweise würde man fordern müssen, daß die Bahnen der Teilchen grundsätzlich kollisionsfrei sind, und das schränkt die

Möglichkeiten der Bewegung stark ein. Es dürfen sich zum Beispiel keine Wirbel bilden, denn in diesen würde die Materie für alle Zeiten „gefangen“ sein. Unter geeigneten Voraussetzungen bleibt eigentlich nur noch die Epikursche Parallelbewegung der Atome in einer ausgezeichneten Richtung. Demgemäß muß Epikur auch die Annahme eines Zentrums des Alls verwerfen, und es kann auf der Erde keine Antipoden geben, denn diese würden nun tatsächlich in der Vorzugsrichtung der Bewegung von der Erde fallen. Übrigens nimmt Lukrez neben den „gewöhnlichen“ Atomen auch noch solche an, die mit der normalen Materie nicht wechselwirken [40, II:107–109]:

Übrigens schwärmen im Raum viel Körperchen, die mit den Dingen
Keinen Verein erhalten und ausgeschlossen von diesem
Nie zu gemeinsamen Trieb zusammengesellen sich können.

Diese Atome spielen in der Kosmologie Lukrez' eine wichtige Rolle, und wir können sie als Vorläufer der „dunkeln Materie“ ansehen. Es folgt ganz natürlich, daß unsere Erde nicht die einzige Welt ist, es gibt vielmehr unzählige Welten im unbegrenzten All. Lukrez glaubt auch, an unserer Erde Alterserscheinungen beobachtet zu haben, daß nämlich nicht mehr „alles so zu sein scheint, wie es früher einmal war“. Für Lukrez altert also die Erde und wird irgenwann vergehen, aber ständig werden neue Welten gebildet, so daß das Leben im Universum ewig ist.

Nach einigen Autoren hat Epikur auch für die Zeit und den Raum eine diskrete Struktur angenommen, es gibt kleinste Zeiteinheiten und kleinste Raumelemente [19, S. 156]. In einem solchen diskreten Universum ist das Achilles-Paradoxon von Zeno nicht möglich, wohl aber das Pfeil-Paradoxon.

Interessant ist Lukrez' beziehungsweise Epikurs Theologie: Es gibt Götter, die in den Intermundien, also in den Räumen zwischen den Welten leben, aber diese sind im Schicksal der Erdbewohner nicht interessiert. Die Erdbewohner sind sterblich, und es gibt kein Leben nach dem Tode. Man kann zu den Göttern beten, man kann es auch unterlassen, beides hat keinerlei Wirkung.

Lukrez liefert eine „universelle Theorie von Allem“, wobei für uns heute etwa die Erklärung der Bewegung der Gestirne nicht recht überzeugend erscheint. Dafür werden unzählige Details des erlebbaren Alltags auf die Atome zurückgeführt oder doch wenigstens in dem Gedicht behandelt. Uns muten die wissenschaftlichen Ratschläge für das korrekte Verhalten beim ehelichen Sexualverkehr [40, IV:1242 f] recht seltsam an.

Rainer Maria Rilke (1875–1926) hat in seinem Gedicht *Herbst* (aus dem Buch der Bilder) das Epikursche Weltbild poetisch genutzt. Mir ist nicht bekannt, ob Rilke dabei sich wirklich auf Epikur bezogen hat.

Die Blätter fallen, fallen wie von weit,
als welkten in den Himmeln ferne Gärten;
sie fallen mit verneinender Gebärde.

Und in den Nächten fällt die schwere Erde
aus allen Sternen in die Einsamkeit.

Wir alle fallen. Diese Hand da fällt,
Und sieh dir andre an: es ist in allen.

Und doch ist Einer, welcher dieses Fallen
unendlich sanft in seinen Händen hält.

An dem Lukrezschen Werk ist bemerkenswert, daß es in einer „gehobenen“ Sprache, die nicht die Sprache des Alltags ist, ein Bild des gesamten Kosmos zeichnet. Wir würden heute die Sprache der Mathematik vorziehen, die ja auf ihre Weise auch keine Alltagssprache ist. Die Darstellung in einer besonderen Sprachform hebt das Gesagte heraus, macht es unverwechselbar und verleiht

ihm Gewicht. Die Darstellung bei Lukrez beziehungsweise Epikur ist nicht quantitativ, es treten keine Formeln auf, und dem Gedicht kann man nicht entnehmen, auf welche Weise die nächste Sonnenfinsternis zu berechnen ist, es wird noch nicht einmal klar, was die Ursache für ein solches Phänomen sein könnte. Auf der anderen Seite ist das Gemälde höchst allgemeinverständlich, es geht aus von der sinnlich wahrnehmbaren Welt und von einleuchtenden Voraussetzungen. Wir alle erleben unmittelbar, daß ein fallengelassener Körper sich in der Vertikalen bewegt und es ist einsichtig, daß es Leere geben muß, in die hinein Bewegung stattfindet. Das Werk ist „didaktisch“ konzipiert, demgemäß schreibt Lukrez an seinen (fiktiven) Adressaten Memmius [41, I, 1114–1117] (zitiert nach [40, I, 1091–1094]):

Hast du, mein Memmius, dies, von geringem Bemühen gleitet,
Völlig erkannt (denn eins wird klarer dir werden durchs andre),
Dann wird finstere Nacht dir nicht die Wege bedecken,
Daß zum Verborgnen nicht der Natur du solltest gelangen;
Also zündet ein Ding dem andern Dinge das Licht an.

Gegenüber heutigen physikalischen Darlegungen fällt auf, daß für die einzelnen Aussagen jeweils eine Fülle von verschiedenen Beweisen gebracht wird, durchsetzt mit Analogien und mythischen oder poetischen Bildern. Heute ist man eher der Meinung, daß ein überzeugender Beweis besser ist als deren zwei (oder nach Cicero: *perspiceritas argumentatione elevatur*).

Was auch auffällt, ist das völlige Fehlen von Bezügen auf Experimente. Die antike Wissenschaft basierte fast ausschließlich auf Beobachtungen. Bei einem Experiment beobachtet man Phänomene, die in einem Labor unter hochgradig künstlichen „unnatürlichen“ Bedingungen erzeugt. An die Vorstellung, daß man auf diese Weise gültige Aussagen über die Natur finden könne, muß man sich gewöhnen. Man assoziiert dabei Geständnisse, die durch Folter erzielt wurden, und über deren Wert man heute ebenfalls eine andere Meinung hat als in früheren Zeiten. Noch Goethe waren die Experimente Newtons höchst suspekt, und er bezweifelte, daß man zu verlässlichen Aussagen über die Natur des Lichts gelangen könne, indem man sich erst einmal in ein dunkles Labor einschließt. Er läßt seinen *Faust* demgemäß sagen:

Geheimnisvoll am lichten Tag,
Läßt sich Natur des Schleiers nicht berauben,
Und was sie deinem Geist nicht offenbaren mag,
Das zwingst du ihr nicht ab mit Hebeln und mit Schrauben.

Schließlich argumentiert man heute – im allgemeinen – sachlicher, als es damals der Fall war. Wenn beispielsweise Lukrez diejenigen, die ein Zentrum des Universums annehmen, als „Toren“ bezeichnet [41, I, 1050] (*stolidi* [41, II, 1068]) und dieses unterfangen „eitel“ (*vanus*), dann wird das einen modernen Leser eher befremden. Ebenso verhält es sich noch mit Goethes *Farbenlehre*. Der auch heute noch lesenswerte Inhalt ist verschüttet unter einer wütenden (und auch unsachlichen) Polemik gegen Newton, die den Zugang zum Werk für uns erschwert.

Interessant an diesem Weltbild wäre seine Physik: Wir haben hier keinen absoluten Raum, jedoch eine absolute Richtung. Eine Geometrie, die diesem Universum angepaßt wäre, hätte neben den Euklidischen Axiomen eine weitere Grundrelation etwa der Form „zwei Punkte liegen auf einer Vertikalen“ eingeführt [73, S. 99]. Eine „Relativitätstheorie“ im Epikurschen Universum hätte eine recht komplizierte Form. „Bewegungsinvarianten“ wären die (dreidimensionalen) Translationen und die Rotationen um vertikale Achsen. Diese Auszeichnung der Vertikalen ist für unsere Alltagserfahrung sehr naheliegend. Man muß sich vor Augen halten, daß „seit Menschengedenken“ die vertikale Richtung ausgezeichnet war. Es gibt starke Indizien dafür, daß die alten Ägypter eine besondere Maßeinheit für Höhen hatten, die durch die verwendeten Meßverfahren, aber auch

durch die unmittelbare Anschauung nahegelegt wurden. Auch in der Neuzeit haben sich Spuren solcher unterschiedlicher Maßeinheiten für horizontale und vertikale Abstände erhalten, etwa im englischen *fathom* (Faden), welches in der Seefahrt ein Tiefenmaß von 6 Fuß ist, während das *yard* (Gerte) als Horizontalmaß 3 Fuß hat. Unsere Anschauung „mißt“ Höhen anders als horizontale Entfernungen. Ein Abstand von 5 m wird als „nah“ empfunden, eine Höhendifferenz von 5 m als „hoch“. Robert Havemann spricht von der „Käseglockenstruktur“ des physischen Raumes [26, S. 40].

Überhaupt lohnt sich – sofern man dazu Zeit und Geduld hat – die Lektüre des Lukrez auch für einen heutigen Leser unbedingt. Man findet in dem Werk eine Fülle von Ideen, die teilweise äußerst modern anmuten, etwa die Idee von „Wärmetod“, die von Lukrez verworfen wird [41, I, 1084 ff], aber auch die Vorstellung einer „dunklen Materie“, also einer Art der Materie, die nicht auf gewöhnliche Weise mit der normalen Materie wechselwirkt [41, II, 107–109] (zitiert nach [40, II, 107–109]):

Übrigens schwärmen im Raum viel Körperchen, die mit den Dingen
Keinen Verein erhalten und ausgeschlossen von diesem,
Nie zu gemeinsamem Trieb zusammengesellen sich können.

Auch den Begriff der Relativität der Zeit findet man bei Lukrez, er lehnt eine absolute Zeit ab [41, I, 459–463] (zitiert nach [41, I, 448–452]):

Auch bestehet für sich die Zeit nicht. Selber die Dinge
geben uns erst den Begriff von dem, was früher geschehen,
Was jetzt wirklich geschieht und was in der Folge noch sein wird
Keiner hat an und für sich die Zeit jemals noch empfunden,
Ganz von der Dinge Bewegung getrennt, in friedlicher Ruhe.

Bemerkenswert ist, daß Epikur, beziehungsweise Lukrez, trotz der Warnungen der Eleaten vor dem Unendlichen, ein räumlich und zeitlich unendliches All annehmen, in dem stetes Werden und Vergehen herrscht. Lukrez schreibt [41, I, 958–967] (zitiert nach [40, I, 942–950]):

Aber es ist das All von keiner Seite begrenzet;
Wär' es, so müßt ein Äußerstes sein; doch scheint es, daß nirgends
Könn' ein Äußerstes sein, wo sich nicht ein endlicher Punkt zeigt,
Über welchen hinaus nicht weiter die Kräfte des Sinns gehn.
Aber da außer dem All sonst nichts annehmen sich lasset,
Ist kein Äußerstes da, kein Maß noch Ende der Dinge.
Sei wo du willst in ihm und in welchen Gegenden, immer
Wird von dem Ort, wo du bist, sich ebendieselbige Weite,
Sich ein unendliches All nach allen Seiten erstrecken.

Hieran schließt sich ein „Gedankenexperiment“ an. Wenn das All eine Grenze habe, und man schieße von dort aus einen Pfeil ab, dann würde dies zu einer absurden Situation führen. Auch für die Dauer des Alls gibt es bei Lukrez keinen Anfang und kein Ende.

Das erklärte Ziel Epikurs war es, dem Menschen die Furcht vor den Göttern und vor dem Tode zu nehmen, das heißt, das Werk hatte eine „aufklärerische“ Zielsetzung. Hieraus erklärt sich auch leicht, daß wenig Wert auf eine zahlenmäßig genaue Theorie etwa der Planetenbewegungen gelegt wird. Aus der entscheidenden Rolle des Zufalls bei der Atombewegung (wer denkt dabei nicht an Heisenberg?) folgert Lukrez sehr schlüssig die Willensfreiheit des Menschen [41, II, 289–293] (zitiert nach [40, II, 280–284]):

... daß aber im Innern der Geist selbst
Nicht notwendig bestimmt zu jeder der Handlungen werde,
Gleichsam in Bande gelegt, um alles zu dulden, zu leiden;
Dieses bewirkt allein die geringe Beugung der Stoffe
Am verschiedenen Ort und in nicht zu bestimmenden Zeiten.

Epikurs Wissenschaftsverständnis ist davon bestimmt, daß der menschliche Geist aus der sinnlichen Wahrnehmung der Dinge das All zu erforschen in der Lage ist [41, I, 402–409] (zitiert nach [41, I, 393–400]):

Aber Gemütern schärferen Sinns sind diese geringen
Spuren der Wahrheit genug, das Weitere selbst zu erforschen.
Gleich den Hunden, sobald auf die sicheren Spuren des Weges
Einmal geleitet sie sind, des bergumschweifenden Wildes
Lager sie leicht aufspüren und Laub und Büsche durchstöbern,
Also magst du auch selbst in diesen Dingen erforschen,
Wie aus dem einen das andere kommt; in verborgene Winkel
Dringen, hervorzuziehn aus ihnen die Beute der Wahrheit.

Diese Grundhaltung finden wir wieder im neunzehnten Jahrhundert, populär ausgedrückt beispielsweise in der Figur des Sherlock Holmes von Sir Arthur Conan Doyle (1859–1930), der den Rationalismus verkörpert, dem nichts verborgen ist:

How often have I said to you that when you have eliminated the impossible whatever remains, however improbable, must be the truth.

The sign of the four

Es erscheint kein Zufall zu sein, daß das Thema der Dissertation von Karl Marx (1841, Promotion per Post an der Universität Jena) lautete *Differenz der demokritischen und epikureischen Naturphilosophie*.

Sokrates (470–399 v. Chr.), Platon (427–347 v. Chr. (?)) und besonders Aristoteles (384–322 v. Chr.) schufen ein geschlossenes Weltbild, welches bemerkenswert lange – bis in das sechzehnte Jahrhundert – am Leben blieb. Bei Aristoteles hat man ein eindeutiges Zentrum des Universums, nämlich den Erdmittelpunkt. Es ergeben sich hieraus sofort Konsequenzen: Wenn die Erde im Zentrum des Universums steht, dann hat sie eine herausragende Sonderstellung. Wenn man – wie bei Epikur – eine Entwicklung, also auch ein „Altern“ der Erde annimmt, dann bezieht dieser Prozeß indirekt auch das gesamte Universum mit ein. Mit anderen Worten: Wenn die Erde irgendwann einmal „sterben“ sollte, dann wird damit der Rest des Universums bedeutungslos. Daher nahm Aristoteles an daß die Erde im wesentlichen unveränderlich sei. Daß die Erde kugelförmig sei, war den Griechen bekannt (es gab natürlich auch andere Modelle des Universums, etwa eben das Epikureische), Eratosthenes von Syene (290–205 v. Chr. (?)) hat wenig später sogar den Erdradius recht genau bestimmt. Die Epikureische vertikale Bewegung wird nun durch die Bewegung in Richtung des Zentrums ersetzt. Hierbei haben die Elemente nach Aristoteles unterschiedliche Vorzugsrichtungen, beispielsweise strebt Erde nach dem Zentrum, Feuer vom Zentrum fort. Man sieht, daß die naheliegende Setzung eines Weltzentrums schwerwiegende erkenntnistheoretische Konsequenzen hat. Nach Aristoteles hat ein Körper (der vorwiegend aus den Elementen Erde und Wasser gebildet ist) das Bestreben (nach Monod [48] den „Traum“), dem Zentrum aller Bewegung so nahe wie möglich zur Ruhe zu kommen. Das heißt, die Aristotelische Mechanik war *teleologisch*, das heißt zielorientiert. Es ergeben sich sofort kosmologische Probleme, die Epikur bereits deutlich genannt hat. Wenn das Feuer vom Zentrum wegstrebt, dann kann das Universum in der uns bekannten Form nicht ewig dauern, denn irgendwann wird das gesamte Feuer sich im

unendlichen All verloren haben. Auf der anderen Seite würden alle anderen Elemente irgendetwas im Zentrum versammelt sein, das Universum wäre also irreversibel „entmischt“. Um die letztgenannte Schwierigkeit zu beheben, wurde ein fünftes Element eingeführt, die *quinta essentia*, aus der die Himmelskörper bestehen sollten. Dieses Element hat als die ihm gemäße Bewegungsform die Kreisform, die als eine besonders vollkommene Form galt, wie auch die Kugel des Parmenides. Durch diesen genialen Trick waren die genannten Schwierigkeiten zunächst einmal beseitigt. Das Aristotelische und das Platonische Weltbild zeichnen sich durch eine größere logische Geschlossenheit aus, als diese bei dem Epikureischen der Fall war. Es treten nunmehr auch qualitative Überlegungen auf, etwa in Platons *Timaios*, die im Jahre 1800 Hegel zu einer unvorsichtigen Aussage über die Anzahl der Planeten verleitete. Pythagoras (580 (?) – 500 (?) v. Chr.) und die Pythagoreer hatten den Sinn für Zahlenverhältnisse und das Quantitative erschlossen.

Neben den philosophisch orientierten Weltbildern entwickelte sich – sozusagen im Parterre des Wissenschaftsgebäudes – auch die zahlenmäßig exakte Wissenschaft, die von Klaudios Ptolemaios (85 (?) – 165 (?) n. Chr.) in einem System dargestellt wurde. Dieser Teil der Wissenschaft war aus praktischen Bedürfnissen erwachsen, eine genaue Kenntnis des Jahreslaufes ist für die Landwirtschaft unerlässlich, und die jährliche Bewegung der Sonne am Himmel war deshalb für alle sesshaft gewordenen Kulturen eine Notwendigkeit, die durch in Berge von babylonischen astronomischen Keilschrifttafeln, durch Megalithbauten wie Stonehenge oder durch mittelamerikanische Monumentalbauten eindrucksvoll belegt wird. Eine weitere Anwendung war die Astrologie, deren Bedeutung einst und heute schon eingangs erwähnt wurde. Da es bei der Astrologie um relative Gestirnsstände, also etwa Konjunktionen, bei denen sich die Planeten dicht beieinander befinden, ankommt, und weil gerade Konjunktionen mit sehr hoher Genauigkeit beobachtet werden können, war dies Anwendung ein bedeutender Motor der Entwicklung der rechnenden Astronomie. Parallel zu den „wissenschaftlichen“ Systemen der Philosophen entstanden daher komplizierte „technische“ Rechensysteme zur Prognose von Himmelserscheinungen. Hier begegnen wir den Wurzeln der von Schnädelbach [62] in seinem Vortrag beklagten Trennung der Bevölkerung der Universitas in zwei Kulturen [66].

Ptolemäus behielt vom Aristotelischen Weltbild die Trennung in sublunare Materie, also die irdischen vier Elemente, und in superlunare Materie, also die Materie des fünften Elements. Nun bewegen sich die Planeten noch nicht einmal näherungsweise auf Kreisbahnen, sondern vollführen am Himmel komplizierte Schleifenbewegungen, dies war auch schon den alten Babyloniern bekannt. Um diese Bewegungen zu modellieren, kam Ptolemäus auf eine Idee, die – im Prinzip – genial war: Er ließ die Planeten auf Kreisen umlaufen, deren Mittelpunkte ihrerseits auf Kreisen laufen. Dabei sollten die Kreisbewegungen gleichförmig sein. Damit war die Idee der Kreisbewegungen „gerettet“. Vom heutigen Standpunkt aus ist diese Lösung wirklich hervorragend, man kann sie interpretieren als Fourier-Darstellung der Planetenbewegungen, also als ein ganz modernes Konstrukt (Jean-Baptiste-Joseph de Fourier, 1768–1830). Es ist offensichtlich, daß die Idee ausbaufähig ist. Man kann nämlich Kreise auf Kreise setzen in der Hoffnung, damit höhere Vorhersagegenauigkeit zu erhalten. Tatsächlich weiß man heute, daß zumindest die Planetenbewegungen auf diese Weise mit beliebiger Genauigkeit darstellbar sind. Es ist also kein Wunder, daß sich das Ptolemäische System über einen Zeitraum von etwa 1 500 Jahren unangefochten am Leben erhalten konnte.

Nun hatte man beobachtet, daß die damals bekannten Planeten – wie übrigens fast alle Körper im Sonnensystem – sich durchweg nahezu in einer Ebene und in einer Richtung bewegten. Aus diesem Grunde nahm Ptolemäus an, daß auch die Bewegungen in allen seinen Kreisbahnen in der „richtigen“ Richtung verlaufen, der Fachausdruck hierfür ist *rechtläufig*.

Um die Vorhersagegenauigkeit des Ptolemäischen Systems an die ständig wachsenden praktischen Anforderungen anzupassen, mußten zahlreiche Modifikationen, das heißt Kompromisse, in Kauf genommen werden. Die bedeutendsten dieser Modifikationen waren

- Es erwies sich als notwendig, die Mittelpunkte der Grundkreise (*Deferenten*) nicht in den Erdmittelpunkt zu legen, sondern in fiktive Punkte, man mußte also *exzentrische* Kreise einführen.
- Auch die Forderung der gleichförmigen Kreisbewegungen mußte fallengelassen werden. Die Bewegung auf dem Deferenten erfolgte so, daß sie von einem fiktiven Punkt (dem *punctum aequans*) aus gleichförmig erschien.

4 Von Kopernikus bis Newton

Die beiden genannten Abweichungen von der „reinen Aristotelischen Lehre“ erschienen als ein Ärgernis. Arabische Astronomen [57] und auch Kopernikus (1473–1543) versuchten, diese beiden Modifikationen zugunsten einer mit der Aristotelischen Theorie verträglicheren Konstruktion zu beseitigen. Zu Kopernikus’ Zeiten war die Übereinstimmung von Beobachtung und Theorie nämlich äußerst ungenügend. So beobachtete Tycho Brahe (1546–1601) am 17. August 1563 (gregorianischer Zählung) eine sehr enge Konjunktion von Jupiter und Saturn. Wie jedes handelsübliche Astronomie-Programmsystem zeigt, waren diese beiden Planeten am angegebenen Datum mit bloßem Auge nicht zu unterscheiden. Die Alfonsinischen Tafeln, die etwa aus dem Jahre 1250 stammten, ergaben einen Fehler von fast einem Monat für die Konjunktion, die *Prutenicae tabulae* von Erasmus Reinhold (1511–1553), die nach der Kopernikanischen Theorie berechnet worden waren, hatten einen Fehler von Tagen. Diese „skandalöse“ Abweichung bei einem Ereignis, welches – im Prinzip – minutengenau berechenbar sein sollte, soll Tycho Brahe dazu bewegt haben, sich der Bestimmung genauer Daten zu widmen.

Ein weiterer Punkt, den Kopernikus an der Planetentheorie des Ptolemäus revidieren wollte, war die zentrale Stellung der Erde. Kopernikus wollte – wie wir alle wissen – die Sonne in das Zentrum der Welt setzen. Hierbei konnte er sich – natürlich – auf antike Vorbilder stützen. Leider führte das nicht zu einer Verbesserung oder auch nur Vereinfachung des Ptolemäischen Systems, insbesondere nicht zu einer höheren Genauigkeit. Man kann etwas überspitzt sagen, daß Kopernikus kein Revolutionär war, sondern allenfalls ein Reformator. Hätte er – was seinem Aristotelische geschulten Geist extrem widersprochen hätte – sich dazu bereit gefunden, auf die Annahme der allgemeinen Rechtläufigkeit zu verzichten, dann hätte er sein System den Daten mit beliebiger Genauigkeit anpassen können, und die Geschichte der Astronomie wäre sicherlich anders verlaufen!

Es ist bemerkenswert, daß selbst Galileo Galilei (1564–1642), der die Aristotelische Bewegungstheorie vom Thron stürzte, indem er das Aristotelische teleologische Prinzip durch das *Objektivitätsprinzip* [48] ersetzte, im Grunde seines Wesens ebenfalls ein rechtgläubiger Aristoteliker war [22, S. 212 f.]:

Bei Ptolemäus finden sich die Übel, bei Kopernikus ihre Heilung. Werden nicht erstlich alle Philosophenschulen es als großen Mißstand bezeichnen, daß ein Körper, der sich von Natur aus im Kreis dreht, eine unregelmäßige Bewegung um seinen eigenen Mittelpunkt, eine regelmäßige Bewegung hingegen um einen anderen Punkt ausführt? Und doch kommen solche mißgestalteten Bewegungen in dem Bau des Ptolemäus vor, bei Kopernikus hingegen sind sie alle um ihren eigenen Mittelpunkt gleichförmig. Bei Ptolemäus muß man den Himmelskörpern entgegengesetzte Bewegungen zuschreiben, und sie alle von Osten nach Westen sich bewegen lassen und dabei gleichzeitig von Westen nach Osten, während bei Kopernikus alle Umdrehungen in einer Richtung von Abend nach Morgen gerichtet sind.

Es war Johannes Kepler (1571–1630), der, wenn auch widerstrebend und sehr gegen seinen Willen, das Aristotelische Dogma endgültig beseitigte. Er führte Ellipsenbahnen für die Planeten ein und erreichte damit eine bis dahin unerhörte Steigerung der Vorhersagegenauigkeit. Kepler ahnte bereits, daß es zwischen den Himmelskörpern eine Kraftwirkung geben müsse, die diese auf ihren Bahnen halte. Er nahm auch an, daß die Phänomene von Ebbe und Flut auf unserer Erde durch die Wirkung des Mondes verursacht werden. Dieser Gedanke einer unsichtbaren geheimnisvollen Kraft, die auf sehr große Entfernung auf geradezu magische Weise wirke, war zu Keplers Zeit revolutionär und ungewohnt. Sogar für Galilei war die Keplersche Erklärung der Gezeiten nicht akzeptabel, und er tat letztere als „Kindereien“ ab [23, Vierter Tag, [499]].

Für die Zeitgenossen Kopernikus’ – wie auch für ihn selbst – gab es ein weiteres ernstes Problem. Wenn sich die Erde tatsächlich um die Sonne bewegen sollte, dann müßte sich diese Bewegung in einer entsprechenden Bewegung der Fixsterne bemerkbar machen. Das völlige Fehlen dieser sogenannten *Parallaxe* ließ nur zwei Schlüsse zu, die beide gleich unannehmbar erschienen:

- Entweder war das Kopernikanische Weltsystem falsch
- Oder aber die Fixsterne waren über jede Vorstellungskraft weit von der Erde entfernt.

Tatsächlich konnte eine Fixsternparallaxe erstmalig im Jahre 1838–39 durch Friedrich Wilhelm Bessel (1794–1846) gemessen werden. Das Ptolemäische Universum konnte man sich etwa als einen hübschen Briefbeschwerer auf Gottes Schreibtisch vorstellen. In der Mitte die Erde, umkreist von Sonne, Mond und Planeten auf Kristallsphären, umgeben von der Fixsternsphäre, ganz außen das *primum mobile*, und nach Ansicht der Platoniker gab das Ganze noch eine wohlklingende Sphärenmusik ab. Das Fehlen einer meßbaren Parallaxe bedeutete, daß diese Kristallkugel unermeßlich groß sein mußte. Wenn Gott die Erde in diesem riesigen Universum hätte sehen wollen, dann hätte er ein sehr starkes Mikroskop verwenden müssen.

Auf der Grundlage der Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung konnte dann Isaac Newton (1642–1727) seine Gravitationstheorie aufstellen. Im Jahre 1687 erschien sein Werk

Philosophiae naturalis principia mathematica, London, 1687.

Der Mathematiker Harro Heuser hat im gerade abgelaufenen Jahr eine sehr interessante und kompetent geschriebene Biographie Newtons vorgelegt [29].

Die Newtonsche Theorie erbrachte einen neuen Sprung in der Erklärungsfähigkeit und der erreichbaren Genauigkeit. Wenn man die eingangs erwähnte Sonnenfinsternis in ihrem Verlauf bis auf Bruchteile von Sekunden vorhersagen kann, dann allein auf der Grundlage der Newtonschen Gravitationstheorie.

Im Juli 2004 kam die Cassini/Huygens-Raumsonde der NASA/ESA nach knapp 7 Jahren Anflug im Saturnsystem an und liefert seither interessante Bilder und Meßdaten vom Saturn, seinen Ringen und seinen über 30 Monden. Am 14. Januar 2005 trat die von den Europäern gebaute Abstiegs-sonde in die Atmosphäre des größten Saturnmondes Titan ein und hat vor Ort diese erstaunliche Atmosphäre erforscht, in der bereits organische Moleküle nachgewiesen wurden [59]. Die außerordentlich trickreiche Flugbahn dieses Raumfahrtunternehmens beruht ebenfalls auf Newtons Theorie.

Auch diese neue Theorie hatte einen hohen erkenntnistheoretischen Preis. Newton mußte eine Reihe von wichtigen Annahmen machen, die mit der überlieferten Aristotelischen Physik in krassem Widerspruch standen:

- Das Newtonsche Trägheitsprinzip erforderte zwingend die Einführung des absoluten Raumes und der absoluten Zeit, andererseits waren die einzige Wirkung dieser beiden Hilfskonstrukte, das Trägheitsprinzip formulierbar zu machen. Auf diese Zirkularität in Newtons Theorie hat insbesondere Ernst Cassirer im Jahre 1921 deutlich aufmerksam gemacht [8].

- Newton war gezwungen, die bereits von Kepler geahnte Schwerkraft, die instantan und unvermittelt wirken sollte, einzuführen. Diese geradezu magische Fernwirkung hatte ja schon Galileis Mißfallen erregt.
- Zur mathematischen Formulierung seiner Gravitationsgesetze benötigte Newton ein neues mathematisches Instrument, die Infinitesimalrechnung. Diese war zu Newtons noch logisch widersprüchlich, also für seine Zeitgenossen kaum akzeptierbar und blieb bis in das neunzehnte Jahrhundert mysteriös. Sogar Karl Marx unternahm drei vergebliche Ansätze, dieser für ihn „widersprüchlichen“ Mathematik eine „dialektische“ Basis zu geben [45].

Nach Erscheinen des Newtonschen Werkes setzte denn auch sofort die Kritik daran ein. Einer der hervorragendsten und kompetentesten Kritiker war der Philosoph und Mathematiker George Berkeley (1685–1753). Er kritisierte in seiner Schrift *de motu* (1720) die Newtonsche Bewegungstheorie [4]. Insbesondere waren für Berkeley die beiden Konzepte des absoluten Raumes und der absoluten Zeit nicht akzeptabel. Einstein spricht davon, daß selbst Newton ein „Unbehagen“ bei diesen Begriffen empfand [14, S. 116].

Berkeley kritisierte in seinem *The Analyst* (1734) auch die neu eingeführte Infinitesimalrechnung. Auch hierzu ist zu sagen, daß Berkeleys Einwände durchaus berechtigt waren. Für seine Theorie benötigte Newton eine Präzision der Begriffe „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“. Für uns ist dies schwer vorstellbar, da wir – durch den Kraftfahrzeugverkehr – alltäglich mit derlei Begriffen umgehen. Wenn ich mit einem Kraftfahrzeug nach München fahre – es sind dies ziemlich genau 800 km – und ich benötige dazu 8 Stunden, dann war meine Durchschnittsgeschwindigkeit 800 km / 8 Stunden oder 100 km/h. Das heißt, die Durchschnittsgeschwindigkeit, die ich auf dieser Strecke hatte, berechnet sich als der Quotient $\Delta s / \Delta t$, wobei Δs die zurückgelegte Wegstrecke und Δt die dazu benötigte Zeit ist. Die so erhaltene Durchschnittsgeschwindigkeit ist nur ein grobes Maß für die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit, zum Beispiel enthält die angegebene Zeit eine Mittagspause, Baustellenverkehr und Strecken, auf denen ich wesentlich schneller fuhr. Will man es genauer haben, dann muß man für geeignete Teilstrecken Δs die erforderlichen Zeiten Δt ermitteln. Man weiß, daß die weißen Begrenzungspfähle an der Autobahn 500 m voneinander entfernt sind. Benötige ich von einem dieser Pfähle zum nächsten gerade 15 Sekunden, dann ist meine Durchschnittsgeschwindigkeit auf dieser Strecke $\Delta s / \Delta t = 500 \text{ m} / 15 \text{ s} = 0.5 \text{ km} / (15 / 3600 \text{ s}) = 120 \text{ km/h}$. Der Begriff der Durchschnittsgeschwindigkeit hat den Nachteil, daß man für eine vollständige Angabe immer noch die Wegstrecke beziehungsweise das Zeitintervall, auf die sich die Angabe bezieht, hinzufügen muß. Newton hatte daher die Idee, die Geschwindigkeit auf „kleine“ Zeitintervalle – im Extremfall für das Zeitintervall Null anzugeben. Man hat dann einerseits eine Zahlenangabe für die „momentane“ Geschwindigkeit, die auch ohne Angabe eines Meßintervalls sinnvoll ist, jedoch ergibt sich das Problem, daß nicht ganz klar ist, ob ein solcher Ausdruck auch sinnvoll gebildet werden kann. Zu Newtons Zeit war dies eine außerordentlich kühne Idee. George Berkeley kritisierte diese Idee in seiner Schrift *The Analyst* von 1734. Das Problem der Begründung der Infinitesimalrechnung blieb bis ins neunzehnte Jahrhundert offen. Es ist interessant, daß sogar Karl Marx um 1850 drei vergebliche Versuche unternahm, die Infinitesimalrechnung „dialektisch“ zu begründen [45]. Eine strenge Grundlegung wurde von Cauchy (1789–1857) im Jahre 1821 (*Cours d'Analyse*) und später von Karl Theodor Wilhelm Weierstraß (1815–1897) gegeben. Einstein bemerkt zur Differentialrechnung: „... vielleicht der größte gedankliche Schritt, den zu tun einem Menschen je vergönnt war.“ [14, S. 160]. Übrigens: Man wird an die Zenonschen Paradoxien erinnert, wenn man sich mit dem Begriff der momentanen Geschwindigkeit auseinanderzusetzen versucht. Tatsächlich ist dieser Zusammenhang nicht zufällig. Man möchte meinen, daß der Begriff der Geschwindigkeit heute, im Zeitalter der Motorisierung, allgemein geläufig sein sollte. Nur ganz am Rande sei erwähnt, daß in dem zitierten Studiengangstest Physik aus dem Jahre 1978 [34, S. 504] lediglich 45 %

der befragten Studienanfängerinnen und -anfänger eine korrekte Definition der Geschwindigkeit geben konnten. Die Autoren der Studie bemerkten demgemäß [34, S. 505]:

Konkret: Ist es sinnvoll, über das Bohrsche Atommodell zu sprechen (und entsteht dabei relevantes Verständnis), wenn die Teilnehmer den Geschwindigkeitsbegriff nicht voll verstanden und präsent haben, nicht definieren können, was man unter einem Isotop versteht, und einfache Sachverhalte graphisch nicht darstellen und interpretieren können?

Um alle die Einwände gegen den absoluten Raum und die absolute Zeit – also letztlich gegen das Trägheitsprinzip – richtig einschätzen zu können, muß man sich vor Augen halten, daß zwar das Newtonsche Trägheitsprinzip auf Galilei zurückgeht, daß dieser aber als guter Aristoteliker sich heftig gegen die von Newton postulierte geradlinige Bewegung im kräftefreien Falle als Konsequenz eben dieses Trägheitsprinzips gewehrt hätte. Er führt in seinem *Dialog* zahlreiche Beweise dafür an, daß die geradlinige Bewegung in der Natur nicht auftreten könne. Er läßt Salviati sagen [22, S. 144]:

Da außerdem die geradlinige Bewegung ihrer Natur nach unendlich ist – denn die gerade Linie ist unendlich und von unbestimmter Länge –, so kann kein beweglicher Körper den natürlichen Trieb haben, sich in gerader Linie zu bewegen, wohin er unmöglich gelangen kann, insofern einer solchen Bewegung kein Ziel gesetzt ist. Und die Natur, wie Aristoteles selbst sehr richtig bemerkt, versucht nicht, was unmöglich zu leisten ist, versucht also nicht dahin zu treiben, wohin zu gelangen unmöglich ist.

Das bedeutet, daß für die geradlinige Bewegung eine Zweckursache zu Problemen mit der Unendlichkeit führen muß.

Allen Einwänden konnten Newton und insbesondere die Newtonianer ein gewichtiges Argument entgegenhalten: Die neue Theorie bestand zahllose Bewährungsproben glänzend. Dies allein ist der Grund, weshalb sie über zweihundert Jahre lang unangefochten bestehen blieb.

5 Von Newton zu Einstein

Von Kopernikus' Zeiten bis zum Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts vergrößerte sich das bekannte Universum ständig. Edmund Halley (1656–1742) wandte die Newtonsche Gravitationstheorie auf die Kometen an und entdeckte, daß die Bahnen dieser Himmelskörper weit über die Grenzen des damals bekannten Sonnensystems hinausreichten. Damit hatte sich unsere unmittelbare Nachbarschaft beträchtlich vergrößert.

Immanuel Kant (1724–1804) hat in seiner im Jahre 1755 anonym erschienenen Schrift *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels oder Versuch von der Verfassung und dem mechanischen Ursprunge des ganzen Weltgebäudes nach Newtonischen Grundsätzen abgehandelt* [32, I, 219–396] eine Darstellung der Kosmogonie und Kosmologie gegeben. Kant gibt eine Erklärung für die Entstehung des Sonnensystems und macht sich Gedanken die Struktur des Universums. Unter der Annahme, daß das Newtonsche Gravitationsgesetz universell gilt, folgerte er, daß das gesamte Milchstraßensystem um ein Gravitationszentrum rotiere, welches Kant allerdings in einem Himmelskörper lokalisieren wollte. Aus der Tatsache, daß die Fixsterne unbewegt erscheinen, also keine Anzeichen irgendeiner Rotation aufweisen, konnte er die Dimensionen des Milchstraßensystems abschätzen. Kant nahm an, daß das Universum räumlich und zeitlich unendlich sei. Er postulierte eine große Anzahl von Sternsystemen, welche dem Milchstraßensystem ähnlich sein und die jeweils um ein Gravitationszentrum kreisen sollten. Diese Systeme ihrerseits bildeten Systeme höherer Ordnung, und Kant schwebte ein hierarchisch organisiertes Universum vor.

Kants Theorien muten in vielen Aspekten recht modern an. Er überlegte sich zum Beispiel, daß sich die Erdrotation infolge der Gezeitenreibung verringern müsse³. Diese Idee wurde von George H. Darwin im Jahre 1898 in seinem Buch *The Tides* quantitativ ausgeführt und gezeigt, daß die Gezeitenreibung eine wichtige Rolle bei der Entstehung des Mondes gebildet haben könne [44].

Kant bezieht sich in seiner Schrift auf die Atomisten, und auch auf Epikur, jedoch teilt er dessen auf Atheismus hinauslaufende Göttertheorie nicht, vielmehr sieht Kant in der Ordnung der Natur einen Hinweis auf Gottes Wirken

... es ist ein Gott eben deswegen, weil die Natur auch selbst im Chaos nicht anders als regelmäßig und ordentlich verfahren kann.

Man könnte dieses Zitat auf die moderne „Chaostheorie“ anwenden! Auch mit der Rolle des Zufalls bei Epikur ist Kant überhaupt nicht einverstanden. Er schreibt:

Epikur war gar so unverschämt, daß er verlangte, die Atomen wichen von ihrer geraden Bewegung ohne alle Ursache ab, um einander begegnen zu können.

Ein wichtiger Aspekt der Kantschen Kosmologie ist die darin vertretene Vorstellung von der ständigen Entwicklung des Universums. Diese Vorstellung „lag in der Zeit“. Erasmus Darwin (1731–1802), ein Zeitgenosse Kants, hatte in England die *Zoonomia, or the laws of organic life* publiziert, in der er ähnliche Gedanken äußerte, wie später (und unabhängig von ihm) sein Enkel Charles Darwin (1809–1882). Ein besonders interessantes Beispiel für die Entwicklungsidee in der Theologie ist *Die Erziehung des Menschengeschlechts* (1780) von Gotthold Ephraim Lessing (1729–1781). In dieser Schrift entwickelte Lessing die Idee, daß die Beziehung zwischen Gott und den Menschen sich nach Maßgabe der Entwicklung des Menschen weiterentwickelte.

Das Kantsche System blieb zu seiner Zeit unbeachtet. 1795/1796 erschien in Paris die zweibändige Schrift „Exposition du système du monde“ von Pierre Simon Laplace (1749–1827), welche eine kürzere Fassung seines Werkes *Traité de mécanique céleste* darstellte. In der letzten von Laplace besorgten Ausgabe dieses Werkes, die 1835 (nach seinem Tode) erschien, ist eine Darstellung seines Weltsystems, welches dem Kantschen sehr ähnlich war, beigefügt. Dieses Weltsystem erregte die Aufmerksamkeit der Zeitgenossen. Es entsprach dem Geschmack seiner Zeit, daß sich nach diesem System – wie auch bei dem von Kant – die Welt ohne Zutun eines Schöpfers gebildet haben sollte. Die Vorstellung eines räumlich und zeitlich unendlichen Universums ließ keinen „Platz“ und auch keine Notwendigkeit für einen Gott. Bekannt ist die folgende Anekdote [52, S. 40]:

Der französische Mathematiker und Astronom Pierre Simon de Laplace hatte seine »Himmelsmechanik« veröffentlicht. Napoleon ließ es sich nicht nehmen, den Gelehrten zu beglückwünschen: »Ein großartiges Werk, Marquis! Aber warum kommt in einem Buch über den Himmel das Wort Gott überhaupt nicht vor?« »Dieser Hypothese bedurfte ich nicht!« erwiderte Laplace.

In der Folgezeit wurde die Vorstellung eines räumlich und zeitlich unendlichen Universums heftig und kontrovers diskutiert. An der Kantschen Kosmologie waren es die Aspekte der räumlichen und zeitlichen Unendlichkeit des Universums, der Entstehung von Welten ohne Eingriff eines Schöpfers sowie die Idee einer selbständigen Aufwärtsentwicklung die – begrifflicherweise – von Friedrich Engels (1820–1895) begeistert aufgegriffen wurden. Es ist sicher Engels zu verdanken, daß die Kantsche Schrift später wieder zu Ehren kam.

³Immanuel Kant, „Untersuchung der Frage, ob die Erde in ihrer Umdrehung um die Achse, wodurch sie die Abwechselung des Tages und der Nacht hervorbringt, einige Veränderung seit den ersten Zeiten ihres Ursprunges erlitten habe, und woraus man sich ihrer versichern könne“.

Interessant ist, daß Friedrich Engels vertrat insbesondere mit Vehemenz und Entschiedenheit die These von der Unendlichkeit des Universums. Nun hatte gerade Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822–1888) aus dem zweiten Hauptsatz der Wärmehlehre geschlossen, daß unser Universum einen „Wärmemetod“ erleiden müsse, einen Zustand, in dem die Temperaturunterschiede im Universum sich soweit ausgeglichen haben würden, daß keine weitere Entwicklung mehr möglich sei. In der Einleitung zu seinem Entwurf einer Naturdialektik schrieb Engels [18, S. 34]:

Wir kommen also zu dem Schluß, daß auf einem Wege, den es später einmal die Aufgabe der Naturforschung sein wird aufzuzeigen, die in den Weltraum ausgestrahlte Wärme die Möglichkeit haben muß, in eine andre Bewegungsform sich umzusetzen, in der sie wieder zur Sammlung und Betätigung kommen kann. Und damit fällt die Hauptschwierigkeit, die der Rückverwandlung abgelebter Sonnen in glühenden Dunst entgegenstand.

Es ist interessant, daß Engels, der auf dem Gebiete der Physik bestenfalls interessierter Laie war, hier den Naturforschern der nachfolgenden Generationen die Aufgabe gestellt hat, den Nachweis zu erbringen, daß seine Sicht der Kosmologie richtig sei. In der Tat haben zahlreiche Wissenschaftler und Philosophen in den Sowjetunion und in den „sozialistischen“ Staaten versucht, diese „Hausaufgabe“ zu erledigen. Auch dies ist eine Art „zweier Kulturen“, die besonders den Naturwissenschaftlern nicht gefiel.

Robert Havemann geht in seinem Buch *Dialektik ohne Dogma* auf dieses „Unendlichkeitsgebot“ in der vierten und fünften Vorlesung über *Endlichkeit und Unendlichkeit* sowie über *Endlichkeit und Unendlichkeit der Zeit* ein [26]. Er schreibt:

Ich erinnere mich an eine Unterhaltung, die ich vor vier Jahren mit dem damaligen Inhaber des Lehrstuhls für dialektischen Materialismus an der naturwissenschaftlichen Abteilung der Moskauer Lomonossow-Universität, Fatalijew, hatte. Es ging um die Frage, ob die Welt ein endliches Volumen haben könnte und ob dies mit dem dialektischen Materialismus vereinbar sei. Fatalijew meinte, der Gedanke, daß der Kosmos ein Volumen endlicher Größe haben könnte, sei weder mit dem dialektischen Materialismus noch mit der einfachen Logik in Einklang zu bringen. Er sagte mir: «Sie geben doch zu, daß bei diesen Theorien von einem Radius der Welt gesprochen wird.» Ich sagte: «Natürlich! Man kann die Größe mit Hilfe eines Radius angeben.» Darauf fragte er: «Und was ist außerhalb dieses Radius?» Ich meine, damit war die Unterhaltung an einem Punkt angelangt, an dem es nicht mehr möglich war, sie fortzusetzen und wo unter Naturwissenschaftlern und Kennern der Materie nur noch ein peinliches Gefühl der Verzweiflung entstehen kann. Denn man bedenke, daß dieser Mann (ein sehr ehrenwerter, sympathischer und lustiger Mensch) tatsächlich vom Katheter der Lomonossow-Universität den dialektischen Materialismus vertrat, und zwar gegenüber Naturwissenschaftlern, die ihr Fach studieren und die bereit sind, auch der Philosophie jede Achtung entgegenzubringen. Verschiedene Diskussionen zwischen Philosophen und Naturwissenschaftlern, die inzwischen in der Sowjetunion durchgeführt wurden, haben dort wohl schon einen Wandel angebahnt. Aber der Inhaber des philosophischen Lehrstuhls an der Universität Leipzig, Zweiling, vertritt noch heute den gleichen Standpunkt wie Fatalijew. Und der Ordinarius für Philosophie der Naturwissenschaften an der Berliner Humboldt-Universität, Ley, hat erst kürzlich erklärt, daß Theorien, nach denen die Zeit einen Anfang $t = 0$ hatte, im Falle ihrer Richtigkeit die Erschaffung der Welt durch Gott beweisen würden und daher mit dem dialektischen Materialismus unvereinbar seien.

Die Einsteinsche allgemeine Relativitätstheorie wurde demgemäß unter Stalin verboten, da Einstein Modelle untersuchte, die ein endliches Universum zuließen [27, S. 19] Es ist interessant, daß das Argument von Fatalijew sich auch in dem Lehrgedicht von Lukrez wiederfindet.

Der Grund für dieses Insistieren auf einem räumlich und zeitlich unendlichen All liegt darin, daß ein solches All eine atheistische Weltanschauung zu unterstützen schien, die in den sozialistischen Ländern „Staatsreligion“ war. Der – logisch nicht ganz korrekte – Umkehrschluß, daß ein endliches All theologische Ansichten bestätigen könne, wurde gezogen, wie Havemann [26, S. 63] schreibt:

Ich habe vor einiger Zeit an einer Diskussion im philosophischen Institut der Humboldt-Universität teilgenommen, wo Prof. Ley erklärte, daß man sich wohl mit der Idee eines endlichen Volumens der Welt zur Not einverstanden erklären könnte, aber die Idee einer Endlichkeit der Zeit sei absolut unannehmbar. Sie wäre nichts anderes als eine direkte Bestätigung der theologischen Ansichten über die Schöpfung der Welt. Weil diese Theorien die Theologie bestätigen, müßten sie falsch sein. Es eröffnet sich hier der interessante Aspekt, daß eine wissenschaftliche Untersuchung eine Entscheidung über die Richtigkeit einer Philosophie oder einer Theologie herbeiführen kann.

Der Zeitgenosse Laplaces, Friedrich Wilhelm Herschel (1738–1822) hat versucht, die großräumige Struktur unserer Galaxie, der Milchstraße, mit den Mitteln der messenden und beobachtenden Astronomie abzuschätzen. Hierzu benutzte er Hilfsmittel aus der Statistik und wurde damit zum Begründer der Stellarstatistik. Es ist mir nicht bekannt, ob Herschel die Kantsche Schrift kannte. Harlow Shapley (1885–1972) konnte zeigen, daß die sogenannten extragalaktischen Nebel nicht zu unserem Milchstraßensystem gehören, das heißt, er konnte die Grenzen des bekannten Kosmos weiter ausdehnen. Es gelang ihm im Jahre 1917, die Entfernung des Andromedanebels auf einige Millionen Lichtjahre zu bestimmen.

Edwin Powell Hubble (1889–1953) schloß aus der Rotverschiebung der Spektrallinien der extragalaktischen Systeme, daß sich diese von uns entfernen, und zwar wächst die Fluchtgeschwindigkeit mit der Entfernung der Objekte. Diese Entdeckung kann man als wahrhaft revolutionär für unser Weltbild bezeichnen. Zunächst einmal ergibt sich aus der Fluchtbewegung eine „praktische“ Endlichkeit des (beobachtbaren) Universums: Wir können nur den Teil des Universums sehen, dessen Fluchtgeschwindigkeit kleiner ist als die Lichtgeschwindigkeit. Man nimmt heute an, daß das beobachtbare Universum einen Radius von etwa 3 Milliarden pc hat (entsprechend $9.258 \cdot 10^{25}$ m).

Eine weitere Schlußfolgerung aus den Hubbleschen Beobachtungen ist, daß das Universum irgendwann in zurückliegender Zeit einen sehr kleinen Raum eingenommen haben muß – sofern man annimmt, daß die Expansion ständig stattgefunden hat. Damit käme man auf ein „Weltalter“ von 12 bis 15 Milliarden Jahren. Zu dieser Zeit war das Universum in einem extremen singulären Zustand, man spricht vom „Urknall“, der zu dieser Zeit stattgefunden habe.

Es hat um dieses Weltbild heftige Kontroversen gegeben. Selbstverständlich wurde diese Idee eines räumlich und zeitlich endlichen Universums von den Vertretern des dialektischen Materialismus – in Ost und West – entschieden abgelehnt, wie aus den obigen Zitaten von Havemann hervorgeht.

6 Einstein

In seiner Arbeit von 1916 [13] legte Albert Einstein den Grundstein für eine völlig neue Theorie des Universums. Diese Theorie löste die Probleme der Newtonschen Gravitationstheorie auf eine sehr elegant Art und Weise, die eine völlig neue Sicht der Kosmologie mit sich brachte. Im vergangenen Jahr und in dieser Vorlesungsreihe wurde Ihnen diese Theorie in allen Einzelheiten

und von verschiedenen Wissenschaftlern aus verschiedenen Gesichtspunkten dargestellt. Was ist nun das Besondere und Neue an dieser Theorie?

Es ist vielleicht von Nutzen, sich zunächst einmal die Welt zu vergegenwärtigen, in die Einsteins geistiges Kind hineingeboren wurde. Der Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts war eine Zeit geistiger Neudefinition des Weltbildes. Ausgelöst von Nietzsche, Spengler und anderen, hatte sich eine tiefe Skepsis breitgemacht, die insbesondere die „klassischen“ Autoritäten in Frage stellte. Die alten „Werte“, Gott, Religion, Kaiser, Vaterland, Ordnung, Moral und so weiter wurden in Frage gestellt, man betrachtete sie als freie Konventionen, man neigte einem philosophischen Relativismus zu. Gleichzeitig hatte sich seit Ende des neunzehnten Jahrhunderts in der Physik eine „Krise“ entwickelt, die etwa mit den Arbeiten von Maxwell begann. Es waren die Maxwell'schen Gleichungen, die Einstein auf die spezielle Relativitätstheorie führten, wie dies auch der Titel seiner Arbeit aus dem Jahre 1905 belegt [11]. Aus ganz anderen Gründen und ohne erkennbaren Zusammenhang mit der „Krise“ der Physik, begannen auch die Grundlagen der Mathematik Risse zu zeigen. Beginnend mit den bereits erwähnten Arbeiten von Bernard Bolzano (1781–1848) und von Georg Cantor (1845–1918) über das Unendliche ergaben sich schwerwiegende Paradoxien und Zumutungen an die naive Sicht der Mathematik. Auch hier findet man die Spuren Zenons. Das Übertreten des Aristotelischen Verbots, sich mit dem aktual Unendlichen zu befassen, hatte schwerwiegende Folgen, die mit den Arbeiten von Kurt Gödel (1906–1978) einen vorläufigen Abschluß fanden.

Einer der Gründe für die enorme Akzeptanz von Albert Einstein mag sein, daß er in seiner Berliner Zeit von 1914 bis 1918 diesen Strömungen des Relativismus durch den zufällig gewählten Namen *Relativitätstheorie* den Anschein einer physikalischen Motivation gab. In dem unlängst erschienenen Buch von Hagner [25] sind hierfür schöne Beispiele zu finden, insbesondere die Schilderung eines Besuchs von Aby Warburg bei Albert Einstein. Die Relativitätstheorie wurde von den „Progressiven“ als Begründung für die Ablehnung absoluter Werte mißverstanden und von den „Reaktionären“ aus dem gleichen Grunde denunziert.

Was hat aber nun Einstein wirklich für unser kosmologisches Weltbild, für unsere Vorstellung von unserem Platz im Kosmos, beigetragen. Wir können hierzu eine Antwort finden, wenn wir die Unterschiede zu den beschriebenen Kosmologien ins Auge fassen.

Die Epikursche Kosmologie war deskriptiv, die Argumentation Epikurs beziehungsweise Lukrez' ist nicht „naturwissenschaftlich“ im heutigen Sinne, eher schon „juristisch“. Die Sprache ist „gehoben“, poetisch, beladen mit Assoziationen und Beispielen aus dem Bereich der alltäglichen Erfahrung und sinnlichen Wahrnehmung. Bei der Argumentation werden Beweise auf Beweise gehäuft (typisch für Lukrez ist der Gebrauch der Worte „weiter“, „außerdem“, „schließlich“). Mathematische Formeln kommen nicht vor, quantitative Aussagen sind nicht intendiert. Die Darstellung ist auch auf seltsame Weise unbeeinflusst von Wissen, daß zumindest zur Zeit von Lukrez vorhanden war, etwa die Eratosthenessche Erdvermessung oder das präzise Ptolemäische Weltmodell. Die Epikursche Physik ist universell, sie liefert ein Modell, das den gesamten Bereich des Lebens erklärt, angefangen von Verrichtungen des Alltags bis hin zu Göttern und dem Kosmos. Epikur leitet die Gesamtheit der Erscheinungen aus wenigen Prinzipien logisch her, aus der Existenz von Atomen und dem Leeren, aus Prinzipien wie „Aus Nichts wird nichts“, „Nichts von dem, was ist, wird vernichtet“ (übrigens ein schönes Beispiel für einen frühen „Erhaltungssatz“). Dabei beruft er sich immer auf die Anschauung, bringt Beispiele aus dem Alltag, weist auch darauf hin, daß sich alles auf einfache Weise aufeinander aufbaut. Alles was man zum Verständnis seiner Kosmologie benötigt, ist etwas Zeit und guter Wille.

Wenn wir Kants Kosmologie betrachten, dann ist diese auch argumentativ dargestellt, wenig quantitativ, wenn Kant auch hin und wieder Zahlenangaben und einfache Rechnungen einfügt. Zahlreiche Einzelheiten der Kantschen Schrift sind hochgradig spekulativ, etwa seine Überlegungen zur Natur der Bewohner der Planeten des Sonnensystems. Auch dort, wo Kant für uns sehr

moderne Gedanken äußert, bleibt die Darstellung seltsam diffus. Der erste Teil des Kantschen Werks beginnt mit einem „Kurzen Abriß der nötigsten Grundbegriffe der Newtonischen Wissenschaft“. Man hat Schwierigkeiten, in diesem Abriß die Newtonsche Theorie wiederzuerkennen. Kant spricht von einer *schießenden Kraft* und der *anderen Kraft* und beschreibt diese wortreich, man erkennt in diesen beiden Kräften die Zentrifugalkraft und die Schwerkraft, aber man kann nicht ganz sicher sein, ob die von Kant beschriebenen Kräfte mit den Newtonschen identisch sind. Kants Werk bedarf der Exegese, die Begriffe sind nicht immer eindeutig zu rekonstruieren. Man bemerkt diese Eigenschaften der Kantschen Darstellung gut bei Vergleich mit dem Werk Newtons. Letzteres ist einem modernen Leser (vorausgesetzt er versteht Latein oder aber er benutzt eine gute Übersetzung) viel leichter zugänglich als das Kantsche. Ganz auffallend ist, daß Kant keinerlei Mathematik benutzt.

Schon Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832), der sich ja selbst als Naturforscher sah, und der auch auf dem Gebiete der Naturforschung Wichtiges geleistet hat, sah die zunehmenden Abstraktheit der Naturforschung mit Mißtrauen, welches sich in seiner Polemik gegen die Newtonsche Farbenlehre deutlich und unmißverständlich ausdrückte. Demgemäß war seine Haltung zur Mathematik äußerst zwiespältig, wie man aus zahlreichen Textstellen belegen kann. Er wußte, daß sie notwendig war für die Naturwissenschaft, er litt darunter, daß sie ihm nicht zugänglich war und er wollte sie nur dort zulassen, wo sie seiner Meinung nach notwendig und nützlich war. Bekannt ist sein Ausspruch

Die Mathematiker sind eine Art Franzosen: redet man zu ihnen, so übersetzen sie es in ihre Sprache, und dann ist es alsobald ganz etwas anderes.

Weniger bekannt ist das Pendant hierzu:

Wie man der französischen Sprache niemals den Vorzug streitig machen wird, als ausgebildete Hof- und Weltsprache, sich immer mehr aus- und fortbildend, zu wirken, so wird es niemand einfallen, das Verdienst der Mathematiker gering zu schätzen, welches sie, in ihrer Sprache die wichtigsten Angelegenheiten verhandelnd, sich um die Welt erwerben, indem sie alles, was der Zahl und dem Maß im höchsten Sinne unterworfen ist, zu regeln, zu bestimmen und zu entscheiden wissen.

Am deutlichsten hat Goethe seine Einstellung zur Mathematik im folgenden Zitat ausgedrückt:

Wir müssen erkennen und bekennen, was Mathematik sei, wozu sie in der Naturforschung wesentlich dienen könne, wo hingegen sie nicht hingehöre, und in welche klägliche Abirrung Wissenschaft und Kunst durch falsche Anwendung seit ihrer Regeneration geraten sei.

Die große Aufgabe wäre, die mathematisch-philosophischen Theorien aus den Teilen der Physik zu verbannen, in welchen sie Erkenntnis, anstatt sie zu fördern, nur verhindern, und in welchen die mathematische Behandlung durch Einseitigkeit der Entwicklung der neueren wissenschaftlichen Bildung eine so verkehrte Anwendung gefunden hat.

Wir können dieses interessante Thema hier nicht weiter ausführen.

Im neunzehnten Jahrhundert erfolgte der massive Einbruch der Mathematik in die Physik. Diese Mathematisierung der Physik wurde durchaus nicht allgemein begrüßt, es gab hartnäckigen Widerstand und besorgte Stimmen, die die Physik gegen die Mathematik zu retten versuchten. Ich zitiere hier den französischen Epistemologen Abel Rey (1873–1940), der im Jahre 1907 ein Buch über die Entwicklung der Physik schrieb, welches kaum bekannt ist, fast nur im Zusammenhang mit Lenins Werk *Materialismus und Empiriokritizismus* aus dem Jahre 1909 [39]. Die folgenden Zitate sind demgemäß Lenins Werk entnommen. Abel schreibt [39, S. 329]:

Die abstrakten Fiktionen der Mathematik haben gewissermaßen eine spanische Wand aufgerichtet zwischen der physikalischen Realität und der Weise, wie die Mathematiker die Wissenschaft von dieser Realität verstehen.

...

Doch die Kompliziertheit ihrer Theorie, ihre Umschweife hinterlassen ein peinliches Gefühl. Es ist zu gemacht, zu sehr gesucht, konstruiert (édifié); der Experimentator findet hier nicht jenes spontane Vertrauen, das ihm die stete Berührung mit der physischen Realität einflößt

Schließlich, deutlich und unmißverständlich [39, S. 329]:

Die Krise der Physik besteht in der Eroberung der Physik durch den Geist der Mathematik. Die Fortschritte der Physik einerseits und die der Mathematik andererseits führten im 19. Jahrhundert zu einer innigen Verbindung dieser beiden Wissenschaften ... Die theoretische Physik wurde zur mathematischen Physik ...

Das folgende Zitat ist ebenfalls aufschlußreich [39, S. 330]:

Die Elemente als reale, objektive Gegebenheiten, d. h. als *physische* Elemente, sind ganz verschwunden. Übriggeblieben sind formale Relationen, ausgedrückt in Differentialgleichungen.

Lenin resümiert [39, S. 330]:

Der große Erfolg der Naturwissenschaft, die Annäherung an so gleichartige und einfache Elemente der Materie, deren Bewegungsgesetze sich mathematisch bearbeiten lassen, läßt die Mathematiker die Materie vergessen, »Die Materie verschwindet«, es bleiben nur Gleichungen.

Es ist interessant, daß vor etwa einem Jahrzehnt ein Artikel in der *Wirtschaftswoche* erschien, der die zunehmende Mathematisierung in den Wirtschaftswissenschaften beklagte. Auch hier liest man „Der Siegeszug der Gleichungen führt die Wirtschaftswissenschaften ins Abseits“. Es ist vielleicht eine Bestätigung dieser Befürchtungen, daß der Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften häufig an Mathematiker verliehen wird, wie in diesem Jahr an Robert J. Aumann und Thomas C. Schelling für ihre Arbeiten auf dem Gebiet der Spieltheorie.

Es ist nun ein ganz besonderes Charakteristikum der Einsteinschen Weltbeschreibung, daß sie auf sehr tiefligender Mathematik beruht. Man kann die allgemeine Relativitätstheorie nicht in einem Lehrgedicht à la Lukrez darstellen. Einstein hat gezeigt, daß die Newtonsche Theorie ihre Widersprüche verliert, wenn man sie als eine geometrische Theorie auffaßt. Diese Theorie, welche inspiriert wurde durch die Minowskische Raumzeit, ist in keiner Weise „anschaulich“, und die schönen Modelle einer Gummihaut, die von Kugeln eingebeult wird, sind nicht „richtig“, sie sind unvollkommene Modelle dessen, was nicht mittelbar ist. Man wird an die Gleichnisse Jesu erinnert, der ebenfalls Unbeschreibliches faßbar machen wollte. Auch Jesus wählt als Vergleiche Alltagssituationen, etwa Arbeiter in einem Weinberg, wobei ihm und seinen Zuhörern völlig klar sein mußte, daß die Tragweite der Vergleiche sehr gering war und daß das, was eigentlich damit gesagt werden sollte, unsagbar und unfassbar ist.

Ein weiterer Gesichtspunkt der Einsteinschen Theorie ist ihr Pragmatismus. Einstein selbst hat darauf hingewiesen, daß man ein und dieselbe Erscheinung mit sehr verschiedenen Modellen darstellen kann, wobei als Auswahlkriterium nicht irgendeine „Wahrheit“ dient, sondern die einfache Handhabbarkeit. Wir hatten dies am Anfang durch das Beispiel von Goddard illustriert. Es ist

ein Wesenszug nicht nur der modernen Physik, sondern auch der modernen Mathematik, daß das Wort „Wahrheit“ nach Möglichkeit vermieden wird. Wir reden in der Mathematik und Logik von „Herleitbarkeit“, mit der Wahrheit halten wir es wie Pontius Pilatus in dem Gespräch mit Jesus im Johannesevangelium. Dort fragt Pilatus „Was ist Wahrheit?“ – und verläßt den Raum.

Einstein hat darauf hingewiesen, daß die Natur, obwohl sie durch immer kompliziertere Mathematik beschrieben werden muß, doch immer noch verständlich bleibt. In der Tat, es könnte ja durchaus sein, daß wir zur Beschreibung des Kosmos eine Mathematik benötigen würden, über die wir noch nicht – oder sogar niemals – verfügen. Schon die mittelalterlichen Philosophen, etwa Wilhelm von Ockham [3] waren davon beeindruckt, daß unsere Welt konsistent ist, also Gesetzen gehorcht, die wir erkennen und verstehen können. Viele dieser Philosophen interpretierten dies als einen Gnadenakt Gottes: In einer kontingenten Welt, in der jeder Vorgang durch den für uns unerforschlichen Willen Gottes gelenkt wird, gibt es für uns keinerlei Möglichkeit des Verstehens. Eine solche Welt wäre eine Alptraumwelt! Albert Einstein formulierte seine Verwunderung über die Verstehbarkeit der Welt 1936 in einem Artikel in der Zeitschrift *The Journal of the Franklin Institute*, in dem er sich auch zu Kant äußert [15, S. 65]

Daß die Gesamtheit der Sinneserlebnisse so beschaffen ist, daß sie durch das Denken (Operieren mit Begriffen und Schaffung und Anwendung bestimmter funktioneller Verknüpfungen zwischen diesen sowie Zuordnung der Sinneserlebnisse zu den Begriffen) geordnet werden können, ist eine Tatsache, über die wir nur staunen, die wir aber niemals werden begreifen können. Man kann sagen: Das ewig Unbegreifliche an der Welt ist ihre Begreiflichkeit. Daß die Setzung einer realen Außenwelt ohne jene Begreiflichkeit sinnlos wäre, ist eine der großen Erkenntnisse Immanuel Kants.

Dieser Trend zur Mathematisierung hat sich in zahlreichen Gebieten der Physik fortgesetzt, man kann extreme Zustände der Materie nur noch mittels mathematischer Gleichungen beschreiben, dies gilt nicht nur für die Welt im Großen, dies gilt auch für die Welt der Elementarteilchen, die sich durch quantenmechanische Wellenfunktionen anscheinend vollständig und mit hoher Präzision aber unter Verlust jeder Anschauung darstellen lassen.

Als Folge der allgemeinen Relativitätstheorie wurde unser Universum über alle Vorstellungskraft kompliziert: Es hatte eine nichteuklidische Geometrie, es war angefüllt von exotischen Objekten wie Schwarzen Löchern, und in neuester Zeit ist es möglicherweise eingebettet in ein relativ hochdimensionales Universum mit „engerollten“ Dimensionen, welches selbst die Fachleute nur unvollkommen verstehen. Das Ganze ist noch mit mysteriöser Dunkler Materie beziehungsweise Dunkler Energie angefüllt, welche man nicht sehen oder wahrnehmen kann, welche sich allein durch Wirkung manifestiert.

In der letzten Zeit hat sich die Komplexität des beobachtbaren Universums noch weiter vergrößert. Indizien darauf, daß die Expansion des Universums sich beschleunigt, bedeuten, daß das Universum im Großen „flach“ sein könnte, das heißt, daß die Geometrie sich der Euklidischen großräumig annähert. Untersuchungen von Inhomogenitäten der kosmischen Hintergrundstrahlung lassen sich dadurch interpretieren, daß das Universum eine kompliziertere „Topologie“ haben könnte, als bisher angenommen.

Es gibt eine große Anzahl von hochspekulativen Modellen des Universums. So hat im Jahre 1957 Hugh M. Everett, III in seiner Dissertation die Theorie der Paralleluniversen vorgeschlagen. Diese Theorie bietet einen überraschenden Ausweg aus dem statistischen Indeterminismus der Quantentheorie. Sie postuliert eine unermesslich große Anzahl von Universen (daher wird sie auch als Multiversentheorie oder Vielweltentheorie bezeichnet), die sogenannten Paralleluniversen, die sich jeweils untereinander um gewisse Details unterscheiden. Es ist übrigens interessant, daß Everetts Theorie trotz ihrer mathematischen Eleganz seinerzeit nicht anerkannt wurde, so daß Everett sich frustriert von der Physik abwandte und auf anderen Gebieten Erfolg suchte. Er starb

als Multimillionär. Im letzten Jahrzehnt gewann die Vielweltentheorie zunehmend das Interesse der Kosmologen, da sich immer mehr Beobachtungstatsachen mit dieser auf den ersten Blick recht bizarren Theorie vereinbaren lassen ⁴.

Es gibt eine Reihe von Wissenschaftlern, die die „finite nature“-Theorie vertreten. Edward Fredkin, der zu dem legendären MIT-Team gehörte, ist einer der Vertreter dieser Theorie. Im Januar dieses Jahres publizierte er einen Artikel, in dem er seine Ansicht darlegte [21]. Demnach gilt

- At some scale, space, time and state are discrete.
- The number of possible states of every finite volume of space–time is finite.
- There are no infinities, infinitesimals, or locally generated random variables.
- The fundamental process of physics must be a simple deterministic digital process.

Ein für MATHEMATICA-Nutzer bekannterer Autor, der diese Theorie vertritt, ist Stephen Wolfram [74]. Es gibt inzwischen auch Physiker, die aus gewissen Aspekten der String-Theorie eine „finite nature“ für denkbar halten. In der Märznummer von *Spektrum der Wissenschaft* erschien ein Artikel von Lee Smolin [65] zu diesem Thema. Demnach gibt es eine kleinstmögliche Zeiteinheit, die Planck-Zeit von 10^{-43} s und eine kleinstmögliche Planck-Länge von 10^{-33} cm. Wenn man die „finite nature“-Hypothese akzeptiert, dann ist – und dies behaupten die Vertreter dieser Annahme – das Universum nichts anderes als ein Computer: Eine endliche Anzahl von Elementen – die „Teilchen“ – wechselwirken miteinander und ändern in diskreten Zeitschritten ihren Zustand, der wiederum mit endlich vielen Zustandsvariablen beschrieben werden kann.

Lassen Sie mich mit mit einigen Bemerkungen schließen:

- Einstein hat in seiner „speziellen“ Relativitätstheorie nachgewiesen, daß die Lichtgeschwindigkeit die Grenzgeschwindigkeit für jede Art von Übertragungen ist. Nach den euphorischen Ankündigungen des „Raumfahrtzeitalters“ hat man jetzt verstanden, daß wir durch diese Beschränkung auf die Erde angewiesen sind. Utopische Ideen einer „Besiedlung des Alls“, wie sie noch nach dem zweiten Weltkrieg nicht nur von Science-Fiction-Autoren propagiert wurden, sterben nun aus. Wir haben gelernt, daß unsere Probleme hier und nur hier liegen, daß es der Probleme mehr als genug gibt, und daß wir durch eine unsichtbare Mauer – verursacht durch die Lichtgeschwindigkeit – vom Universum abgeschnitten sind.
- in der Mathematik hat man vor einigen Jahrzehnten das sogenannte „Chaos“ entdeckt. Gödel hatte gezeigt, daß es – vereinfacht gesagt – immer mathematisch richtige Aussagen geben wird, die unserer Mathematik grundsätzlich nicht zugänglich sind, die also eine „neue“ Mathematik erfordern. Chaotische Systeme sind zu Verhaltensweisen fähig, die zwar nicht außerhalb unserer Mathematik liegen, die aber grundsätzlich nicht ausrechenbar sind. Es war schon ein Schock, als man feststellte, daß sogar bei der Bewegung der Planeten chaotische Zustände eine Rolle spielen können.
- Was heißt es eigentlich, daß unser Universum Euklidisch sei? Oder, umgekehrt, welche Rolle spielt die Mathematik und speziell die Geometrie in der Physik? Hiermit hat sich Einstein sehr intensiv beschäftigt. In einem Euklidischen Raum ist das Verhältnis des Kreisumfangs zum Kreisdurchmesser gerade gleich der irrationaln Zahl π . Wir kennen diese Zahl recht genau, der japanische Forscher Yasumasa Kanada hat diese Zahl auf 1 241 100 000 000

⁴Siehe den Artikel von Max Tegmark: Parallel-Universen. *Spektrum der Wissenschaft*, August 2003:34–45.

(= $1.24 \cdot 10^{12}$) Dezimalstellen berechnet. Man weiß, daß schon 39 Dezimalstellen von π ausreichen, den Umfang eines Kreises, der das bekannte Universum umspannt, bis auf den Radius eines Wasserstoffatoms genau zu bestimmen. Diese letztere Aussage ist natürlich nur dann richtig, wenn das Universum Euklidisch ist, was es im mittleren Skalenbereich nach Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie sicher nicht ist. Man kann sich jetzt fragen, was die „Bedeutung“ von π ist. Was „bedeutet“ die hundertste Dezimalstelle von π ? Ist π ein Objekt der Natur, so wie manche Menschen annehmen oder gehört π zu den idealen Objekten eines Platonischen „Ideenhimmels“?

Literatur

- [1] Amir D. Aczel: *Die göttliche Formel. Von der Ausdehnung des Universums*, Aus dem Amerikanischen von Hainer Kober, (*rororo Sachbuch 60935*), Rowohlt, Reinbek bei Hamburg, 2002.
- [2] Suzanne Bäuml, Evamaria Brockhoff und Michael Henker, Hrsg.: *Katalog zur Bayerischen Landesausstellung 2005: „Von Kaisers Gnaden“. 500 Jahre Fürstentum Pfalz-Neuburg*, (*Veröffentlichungen zur Bayerischen Geschichte und Kultur*, 50), Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, Haus der Bayerischen Geschichte, Augsburg und Verlag Friedrich Pustet, Regensburg, 2005.
- [3] Jan P. Beckmann: *Wilhelm von Ockham*, (*Beck'sche Reihe, Denker, BsR 533*), Verlag C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München, 1995.
- [4] George Berkeley: *Schriften über die Grundlagen der Mathematik und Physik*, Eingeleitet und übersetzt von Wolfgang Breidert, (*suhrkamp taschenbuch wissenschaft 496*), Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main, 1985.
- [5] Max Born: *Die Relativitätstheorie Einsteins*, (*Heidelberger Taschenbücher 1*), Vierte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1964.
- [6] Jorge Luis Borges: *Ausgewählte Essays*, (*Band 790 der Bibliothek Suhrkamp*), Suhrkamp Verlag, 1982.
- [7] Wilhelm Capelle, Hrsg.: *Die Vorsokratiker. Die Fragmente und Quellenberichte übersetzt und eingeleitet von Wilhelm Capelle*, (*Kröners Taschenausgabe, Band 119*), Alfred Kröner Verlag, Stuttgart, 1968.
- [8] Ernst Cassirer: *Zur Einstein'schen Relativitätstheorie. Erkenntnistheoretische Betrachtungen*, Bruno Cassirer Verlag, Berlin, 1921.
- [9] Paul Davies: *Der Plan Gottes. Die Rätsel unserer Existenz und die Wissenschaft*, (*Insel-Taschenbuch 1934*), Aus dem Englischen von Anita Ehlers, Insel-Verlag, Frankfurt am Main und Leipzig, 1996.
- [10] Herbert Ehrenberg: *Zwischen Marx und Markt. Konturen einer infrastrukturorientierten und verteilungswirksamen Wirtschaftspolitik*, (*dtv 1133*), Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1976.
- [11] Albert Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 17:891–921, 1905.
- [12] A. Einstein: Lichtgeschwindigkeit und Statik des Gravitationsfeldes. *Annalen der Physik*, 38:355–369, 1912.
- [13] Albert Einstein: Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 49:769–822, 1916.
- [14] Albert Einstein: *Mein Weltbild*, Herausgegeben von Carl Seelig, Neue, vom Verfasser durchgesehene und wesentlich erweiterte Auflage, (*Ullstein Buch Nr. 65*), Ullstein GmbH, Frankfurt/M — Berlin — Wien, 1970.
- [15] Albert Einstein: *Aus meinen späten Jahren*, (*Ullstein-Buch Nr. 35196: Ullstein-Materialien*), Verlag Ullstein GmbH, Frankfurt/M — Berlin — Wien, Juni 1984.

- [16] Albert Einstein und Max Born: *Briefwechsel 1916–1955*, Geleitwort von Bertrand Russell, Vorwort von Werner Heisenberg. (*Ullstein-Buch; Nr. 34345: Ullstein-Sachbuch*), Verlag Ullstein GmbH, Frankfurt am Main, Berlin, 1986.
- [17] Friedrich Engels: *Herrn Eugen Dührings Umwälzung der Wissenschaft* (*»Anti-Dühring«*), Dietz Verlag, Berlin, 1960.
- [18] Friedrich Engels: *Dialektik der Natur*, Verlag für fremdsprachige Literatur, Peking, 1976.
- [19] Epikur: *Briefe, Sprüche, Werkfragmente, Griechisch/Deutsch*. Übersetzt und herausgegeben von Hans-Wolfgang Krautz, (*Reclams Universal-Bibliothek Nr.9984*), Philipp Reclam jun., Stuttgart, 1985.
- [20] Hans-Ludwig Wußing, Hans Dietrich, Walter Purkert und Dietrich Tutzke, Hrsg.: *Fachlexikon abc. Forscher und Erfinder*, Verlag Harri Deutsch, Thun · Frankfurt am Main, 1992.
- [21] E. Fredkin: Five big questions with pretty simple answers. *IBM J. Res. & Dev.*, 48(1):31–45, January 2004.
- [22] Galileo Galilei: *Sidereus Nuncius. Nachricht von neuen Sternen. Dialog über die Weltsysteme (Auswahl). Vermessung der Hölle Dantes. Marginalien zu Tasso*, Herausgegeben und eingeleitet von Hans Blumenberg, (*sammlung insel 1*), Insel-Verlag, Frankfurt am Main, 1965.
- [23] Galileo Galilei: *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische*, Aus dem Italienischen übersetzt und erläutert von Emil Strauss, Druck und Verlag von B. G. Teubner, Leipzig, 1891.
- [24] Siegfried Gottwald, Hans-Joachim Ilgands und Karl-Heinz Schlotte, Hrsg.: *Lexikon bedeutender Mathematiker*, Verlag Harri Deutsch, Thun · Frankfurt (M.), 1990.
- [25] Michael Hagner, Hrsg.: *Einstein on the Beach. Der Physiker als Phänomen*, S. Fischer Verlag GmbH, Frankfurt am Main, 2005.
- [26] Robert Havemann: *Dialektik ohne Dogma? Naturwissenschaft und Weltanschauung. Hat Philosophie den modernen Naturwissenschaften bei der Lösung ihrer Probleme geholfen? Naturwissenschaftliche Aspekte, philosophische Probleme*, (*Rororo 683, rororo aktuell*), Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Reinbek bei Hamburg, 1964.
- [27] Otto Heckmann: *Sterne, Kosmos, Weltmodelle. Erlebte Astronomie*, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, München, 1980.
- [28] Dieter B. Herrmann: *Geschichte der Astronomie von Herschel bis Hertzprung*, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1975.
- [29] Harro Heuser: *Der Physiker Gottes. Isaac Newton oder Die Revolution des Denkens*, (*Herder Spektrum, Band 5591*), Verlag Herder, Freiburg im Breisgau · Basel · Wien, 2005.
- [30] Knut Hickethier: Nach Einstein. Die Veränderung von Zeit und Raum durch die Medien. Vortrag in der Reihe *Einstein, relativ* am 24. 11. 2005.

- [31] Herman Kahn und Anthony J. Wiener: *Ihr werdet es erleben. Voraussagen der Wissenschaft bis zum Jahre 2000*, mit einem Nachwort von Daniel Bell, Aus dem Englischen übertragen von Klaus Feldmann, (rororo 6677, 6678, 6679), Reinbek bei Hamburg, Februar 1971.
The Year 2000. A Framework for Speculation on the Next Thirty-Three Years, The Hudson Institute, Inc., 1967.
- [32] Immanuel Kant: *Werke in sechs Bänden*. Herausgegeben von Wilhelm Weischedel, (*Theorie-Werkausgabe*), Insel-Verlag Wiesbaden, 1960.
- [33] Georg Klaus und Manfred Buhr, Hrsg.: *Philosophisches Wörterbuch*, 3. unveränderte Auflage, Bibliographisches Institut, Leipzig, 1965.
- [34] Friedrich Krause und Anastasia Reiners-Logothediou: Der bundesweite Studieneingangstest Physik 1978. *Physikalische Blätter*, 35:495–510, 1979.
- [35] Thomas Samuel Kuhn: *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, (*suhrkamp taschenbuch wissenschaft Band 25*), 2. Aufl., 1. Aufl. 1967, Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main, 1976.
The Structure of Scientific Revolutions, (*International Encyclopedia of Unified Science, Vol. II, No. 2*), The University of Chicago Press, Chicago & London, The University of Toronto Press, Toronto, 1962.
- [36] Thomas S. Kuhn: *The Copernican Revolution. Planetary Astronomy in the Development of Western Thought*, Harvard University Press, Cambridge, 1957.
- [37] L. D. Landau und E. M. Lifschitz: *Lehrbuch der theoretischen Physik. Band I. Mechanik*, In deutscher Sprache herausgegeben von G. Heber, 7. Auflage, Akademie-Verlag, Berlin, 1970.
- [38] J. Laskar: A numerical experiment on the chaotic behaviour of the Solar System. *Nature*, 338:237–238, 1989.
- [39] W. I. Lenin: *Materialismus und Empiriokritizismus. Kritische Bemerkungen über eine reaktionäre Philosophie*, Verlag für fremdsprachige Literatur, Moskau, 1947.
Материализм и эмпириокритицизм. Критические заметки об одной реакционной философии. Москва, Звено, 1909.
- [40] T. Lucretius Carus: *Von der Natur der Dinge* Nach der Übersetzung von K. L. von Knebel herausgegeben von Prof. Dr. Otto Güthling, Zweite, berichtigte Auflage, (*Römische Klassiker in Reclams Universal-Bibliothek Nr. 4257–59*), Verlag von Philipp Reclam jun., Leipzig (1927).
- [41] Titius Lucretius Carus: *De rerum natura. Welt aus Atomen*, Lateinisch und deutsch, Übersetzt und mit einem Nachwort herausgegeben von Karl Büchner, (*Reclams Universal-Bibliothek Nr. 4257–59/59a–e*), Philipp Reclam jun., Stuttgart, 1973.
- [42] Dietrich Mahnke: *Unendliche Sphäre und Allmittelpunkt. Beiträge zur Genealogie der mathematischen Mystik*, (*Deutsche Vierteljahrsschrift für Literaturwissenschaft und Geistesgeschichte, Buchreihe, 23. Band*), Max Niemeyer Verlag, Halle/Saale, 1937.
- [43] Gerhard Maier: Schnellstraße zum Ruhm. Der Siegeszug der Gleichungen führt die Wirtschaftswissenschaften ins Abseits und zerstört die Berufschancen der Volks- und Betriebswirte. *Wirtschaftswoche*, Nr. 7 · 7. 2. 1992, S. 67–68.
- [44] B. G. Marsden and A. G. W. Cameron, editors: *The Earth–Moon System*, Plenum Press, New York, 1966.

- [45] Karl Marx: *Mathematische Manuskripte*, Herausgegeben, eingeleitet und kommentiert von Wolfgang Endemann. (*Scriptor-Taschenbücher Sozialwissenschaften; S 10: Beiträge zur Theorie der Gesellschaft*), Scriptor-Verlag, Kronberg, Ts., 1974.
- [46] William I. McLaughlin: Eine Lösung für Zenons Paradoxien. *Spektrum der Wissenschaft*, Januar 1995:66–71.
- [47] Karl von Meyenn, Hrsg.: *Lust an der Erkenntnis. Triumph und Krise der Mechanik. Ein Lesebuch zur Geschichte der Physik*, (Serie Piper, 1146), R. Piper Verlag, München, Zürich, Februar 1990.
- [48] Jaques Monod: *Zufall und Notwendigkeit. Philosophische Fragen der modernen Biologie*, (dtv 1069), Deutsch von Friedrich Giese, Vorrede zur deutschen Ausgabe von Manfred Eigen. Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1975.
- [49] Oliver Morsch: Zeno und der Quanten-Schnellkochtopf (Forschung aktuell). *Spektrum der Wissenschaft*, Februar 2002:14–16.
- [50] Simon Newcomb: *A Compendium of Spherical Astronomy. With its Applications to the Determination and Reduction of Positions of the Fixed Stars*, Dover Publications, Inc., New York, 1960, (Macmillan Company, London, 1906).
- [51] Hermann Nicolai: Kein Nährboden für Einsteins Nachfolger? Theoretische Physik in Deutschland – einige Anmerkungen zum Einstein-Jahr. *Physik Journal*, 4(10):3, 2005.
- [52] Ewald Oetzel und Wolfgang Polte: *Der gescholtene Thales. Anekdotisches um Gelehrte und Gelehrte aus zwei Jahrtausenden*, Mit Illustrationen von Manfred Bofinger, Urania-Verlag, Leipzig · Jena · Berlin, 1989.
- [53] *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Band 37. Reprint der Bände 37, 180 und 99*,
 Band 37: Sadi Carnot: Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers (1842),
 Band 180: Robert Mayer: Die Mechanik der Wärme. Zwei Abhandlungen (1842/1845),
 Band 99: Rudolf Clausius: Über die bewegende Kraft der Wärme (1850),
 Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, Frankfurt am Main, 2003.
- [54] Abel Rey: *La théorie physique chez les physiciens contemporains*, F. Alcan, Paris, 1907.
- [55] Bertrand Russell: *The Principles of Mathematics*. Cambridge University Press, Cambridge/New York, 1903.
- [56] R. M. Sainsbury: *Paradoxien, Reclams Universal-Bibliothek Nr. 8881*, Philipp Reclam jun., Stuttgart, 1993.
Paradoxes, Cambridge University Press, Cambridge, 1988.
- [57] George Saliba: Der schwierige Weg von Ptolemäus zu Kopernikus. *Spektrum der Wissenschaft*, September 2004:76–83.
- [58] Wilhelm Schell: *Theorie der Bewegung und der Kräfte. Ein Lehrbuch der theoretischen Mechanik mit besonderer Rücksicht auf die Bedürfnisse technischer Hochschulen*, Druck und Verlag von B. G. Teubner, Leipzig, 1868.
- [59] Klaus Schilling: Cassini-Huygens-Mission zum Saturnmond Titan. Vortrag an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg am 3. Februar 2005.

- [60] Paul Arthur Schilpp, Hrsg.: *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher. Eine Auswahl, (Facetten der Physik)*, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1983.
- [61] Paul Arthur Schilpp, editor: *Albert Einstein, Philosopher–Scientist, (The Library of Living Philosophers, 7)*, The Library of Living Philosophers, Evanston, Ill., 1949.
- [62] Herbert Schnädelbach: Einstein trifft Schiller. Erinnerungen an eine zukunftsfähige Wissenschaft. Vortrag in der Reihe *Einstein, relativ* am 1. 12. 2005.
- [63] Dietrich Schroerer: *Physik verändert die Welt? Die gesellschaftliche Dimension der Naturwissenschaft*, Aus dem Englischen übersetzt von Ernst Streeruwitz, (*Facetten der Physik, Band 16*)/, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig, 1984.
Physics and its Fifth Dimension, Addison–Wesley Publishing Company, 1972.
- [64] Harro Segeberg: „Alles relativ“? Die neue Physik und die Literatur des 20. Jahrhunderts. Vortrag in der Reihe *Einstein, relativ* am 15. 12. 2005.
- [65] Lee Smolin: Quanten der Raumzeit. *Spektrum der Wissenschaft*, März 2004:54–63.
- [66] C. P. Snow: *Die zwei Kulturen. Literarische und naturwissenschaftliche Intelligenz*, Klett-Cotta, Stuttgart, 1967.
[engl. Ausgabe 1959]
- [67] Arnold Sommerfeld: *Vorlesungen über theoretische Physik, Band I. Mechanik*, Vierte Auflage, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.–G., Leipzig, 1949.
- [68] Glenn D. Starkman und Dominik J. Schwarz: Missklänge im Universum. *Spektrum der Wissenschaft*, Dezember 2005:30–37.
- [69] Max Tegmark: Parallel-Universen. *Spektrum der Wissenschaft*, August 2003:34–45.
- [70] Wolfgang Trapp: *Kleines Handbuch der Maße, Zahlen, Gewichte und der Zeitrechnung (Reclams Universal-Bibliothek 8737)*, Verlag Philipp Reclam jun., Stuttgart, 1992.
- [71] Alan Turing: On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society, Series 2*, 42:230–265, 1936.
- [72] B. L. van der Waerden: Zenon und die Grundlagenkrise der griechischen Mathematik. *Mathematische Annalen*, 117:141–161, 1939.
- [73] Hermann Weyl: *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft, (Scientia Nova)*, 6. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München, 1990.
- [74] Stephen Wolfram: *A New Kind of Science*, Wofram Media, Champaign, IL.