

Paul Weingartner

ZU WELCHEN PHILOSOPHISCHEN FRAGEN FÜHREN NEUERE FORSCHUNGSERGEBNISSE DER NATURWISSENSCHAFT HEUTE?

Ein Dialog erfüllt erst seinen Zweck wenn beide Dialogpartner voneinander lernen. Er soll dazu dienen, die Abkapselungen auf beiden Seiten und die Meinung, unser Wissen wäre in einem Bereich endgültig, aufzubrechen. In den Wissenschaften stellen diese Abkapselungen ein Hindernis, sich mit dem anderen Fach zu beschäftigen, dar. Und Unkenntnis des anderen Faches führt leicht zu Vorurteilen und Arroganz. Für jeden Philosophen ist es heute wichtiger denn je, sich mit einem außerphilosophischen Fach eingehend (nicht nur oberflächlich) zu beschäftigen. Die Naturwissenschaften spielen dabei wegen der Fülle von neuen Resultaten und der Entstehung neuer Fragestellungen und Probleme eine besonders wichtige Rolle. Auch Naturwissenschaftler (es genügt: einige von ihnen) sollen sich eingehend (nicht nur oberflächlich) mit philosophischen Fragen beschäftigen. Eine solche Beschäftigung mit dem jeweils anderen Fach fördert das gegenseitige Verständnis und erweitert unser ungemein beschränktes und von Fehlern durchsetztes Wissen. Ich glaube, daß Karl Popper ganz recht sieht, wenn er sagt:

In bezug auf das Wenige, was wir wissen, unterscheiden wir uns, aber in bezug auf die Unendlichkeit unseres Nichtwissens sind wir alle gleich.

Und aus dieser Einsicht ergeben sich zwei Verhaltensnormen für Philosophen und Naturwissenschaftler:

- (a) Verhalte dich so wie Sokrates: Sei dir des vielen Nichtwissens und der vielen ungelösten Fragen stets bewußt, sei bescheiden und nicht anmaßend.
- (b) Lerne aus dem Wissen anderer, aber auch aus den eigenen Fehlern und den Fehlern anderer.

Der Titel läßt eine bestimmte abgegrenzte Anzahl von philosophischen Fragen erwarten. Eine

solche definitive Aufzählung ist aber hier gar nicht möglich. Ich werde daher nur drei wichtige Fragen herausgreifen. Weiters muß betont werden, daß jene philosophischen Fragen, zu denen neue Probleme der heutigen Naturwissenschaft – und hier greife ich wieder nur die Physik heraus – führen, nicht unbedingt ganz neue philosophische Fragen sind. Viel häufiger ist es so, daß damit alte philosophische Fragen in ein neues Licht gerückt werden, einen neuen und anderen Aspekt bekommen, eine Akzentverschiebung erfahren, neue Details bekommen etc. Man könnte deshalb die Frage im Titel auch so stellen: Zu welchen Korrekturen, Verfeinerungen, neuen Aspekten von alten philosophischen Fragen führt die Naturwissenschaft heute? Aus der Fülle von solchen möglichen Fragestellungen greife ich die drei folgenden heraus:

- (1) Gibt es Gesetze (Gesetzmäßigkeiten), die allen Wissenschaften zugrundeliegen?
- (2) Was ist ein Gesetz (Naturgesetz)?
- (3) Hat alles einen zureichenden Grund?

1. Gibt es Gesetze, die allen Wissenschaften zugrundeliegen?

1.1 Eine erste Antwort auf diese Frage hat Aristoteles gegeben. Er hat den Satz vom ausgeschlossenen Widerspruch als Grundprinzip sowohl für das Seiende (die Ontologie) als auch für das Erkennen (Erkenntnistheorie) angegeben.

Dabei weiß man heute, daß er im dritten Kapitel des vierten Buches der *Metaphysik* eine Formulierung dieses Prinzips gibt, die maximal universell ist – oder anders ausgedrückt: die invariant gegenüber allen bis heute bekannten Logiksystemen ist. Die Formulierung heißt:

Zwei Aussagen, wovon eine die Negation der anderen ist, können nicht beide zugleich wahr sein.¹ Daß dieses Prinzip neben schwächeren zweiwertigen Logiksystemen (wie intuitionistische oder Minimalkalkül) auch mehrwertige Logiksysteme toleriert, sieht man daran, daß auch bei solchen in keiner Wahrheitswertzeile für eine Aussage und ihre Negation der Wert 'wahr' (bzw. ein designierter Wert) auftritt, wohl aber möglicherweise beidesmal der Wert 'indefinit'. Das Prinzip: Von zwei Aussagen, von denen eine die Negation der anderen ist, muß genau eine wahr sein – oder: jede Aussage ist entweder wahr oder falsch (= nicht wahr), ist hingegen ein Bivalenzprinzip, was weit weniger allgemein ist. Aristoteles hat aber noch einige weitere wichtige Einsichten gehabt:

(1) Er hat das Widerspruchsprinzip nicht als äquivalent mit dem *tertium non datur* angesehen (er behandelt dieses auch erst im 7. Kapitel des 4. Buches).

(2) Er hat bereits eingesehen, daß die Gültigkeit (oder Anwendbarkeit) des *tertium non datur* (als Bivalenzprinzip) abhängig ist von der Definitheit (d.h. der präzisen oder eindeutigen Bestimmbarkeit) der Begriffe (Prädikate).² Es war im wesentlichen dieselbe Einsicht, die Brouwer 2300 Jahre später veranlaßt hat, in bezug auf unendliche Bereiche, bei denen gewisse Begriffe (Prädikate) nicht eindeutig sind, die generelle Gültigkeit des *tertium non datur* aufzugeben. Auf diese Weise fällt ein neues Licht von der mathematischen Grundlagenforschung, insbesondere vom Intuitionismus und vom Konstruktivismus auf die alte philosophische Frage, ob auch das *tertium non datur* als ein allgemeinstes Grundgesetz angesehen werden kann.

(3) Bernays hat bemerkt, daß das *tertium non datur* für die 19 aristotelischen Schlußfiguren (der Syllogistik) nicht erforderlich ist.³ An

anderer Stelle habe ich eine Rekonstruktion des aristotelischen logischen Quadrats angegeben, die diese Beobachtung erfüllt.⁴ Aristoteles scheint also in bezug auf die Begründung der Syllogistik mit möglichst wenig Voraussetzungen gearbeitet zu haben.

1.2 Eine zweite Antwort hat Leibniz gegeben.

1.21 Es ist die Antwort des Rationalismus auf die Frage nach der Begründung von Wissenschaft. Sie lautet grob gesprochen folgendermaßen:

(1) Es gibt erste evidente Prinzipien (etwa: der Satz vom ausgeschlossenen Widerspruch oder das Identitätsprinzip), Axiome, die die Quellen der menschlichen Erkenntnis sind. Es gibt logische und mathematische Prinzipien der Deduktion, mit deren Hilfe Theoreme aus den ersten Prinzipien abgeleitet werden können. Es gibt ein Wahrheitskriterium, mit dem Prinzipien und Deduktionsregeln von anderen Sätzen aussortiert werden können. Mit anderen Worten: Eine wissenschaftliche Erkenntnis ist entweder ein erstes Prinzip (Axiom) oder ein aus einem solchen (deduktiv) abgeleiteter Satz. Die ersten und einfachsten dieser evidenten Prinzipien liegen dann allen Wissenschaften zugrunde.

(2) Parallel dazu gibt es ein Verfahren der begrifflichen Analyse, das komplexe Begriffe auf einfachere und einfachste Grundbegriffe (die in den Axiomen vorkommen) durch Definitionsketten zurückführt: Es gibt angeborene Grundbegriffe, die die Bausteine von Axiomen darstellen. Es gibt logische und mathematische Definitionsprinzipien, mit deren Hilfe komplexe Begriffe auf die angeborenen Grundbegriffe zurückgeführt werden können. Ein Kriterium läßt wieder angeborene Grundbegriffe von anderen unterscheiden.⁵

1. Met IV,3; 1005a19. Für verschieden starke Interpretationen des Widerspruchsprinzips cf. N. Rescher (1969) p. 144 ff.

2. Met 1011b23-29; 1012a 20-24.

3. P. Bernays (1976) p. 82.

4. P. Weingartner (1992) p. 163.

5. Dieses Wissenschaftsideal ist bei Descartes und Leibniz anzutreffen. Eine ausführliche Darstellung mit Belegstellen ist in Weingartner (1983) p. 151-159 gegeben.

1.22 Leibniz hat dieses Wissenschaftsideal weit differenzierter beschrieben als Descartes und hat es außerdem im folgenden, zweifachen Sinn erweitert:

(1) Wie Descartes hat er die *more geometrico*-Struktur – d.h. ein Axiomensystem nach dem Vorbild von Euklid – als die ideale Struktur in der Wissenschaft angesehen. Er hat aber darüberhinaus ganz allgemeine Metaprinzipien über solche Axiomensysteme der Wissenschaft aufgestellt (siehe dazu Kapitel 3). Außerdem war Leibniz weit kritischer, was die Durchführung des axiomatischen Aufbaus in den verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen betrifft. Aus bestimmten, in Kapitel 3 angeführten Gründen war er der Meinung, daß so etwas in bezug auf Logik, Mathematik und Metaphysik möglich ist, nicht jedoch in bezug auf Physik (Naturwissenschaft) und auch nicht in bezug auf Jurisprudenz und Ethik.

(2) Leibniz hat sowohl eine Mathematisierung der Sprache der Wissenschaft also auch eine Mathematisierung des Universums im Sinne ganz allgemeiner mathematischer Strukturprinzipien für das Universum angegeben. In bezug auf das erstere hat er eine Mathematisierung der Syllogistik konstruiert, die ein Entscheidungsverfahren für die syllogistischen Modi liefert.⁶ In bezug auf das zweite hat Leibniz ein übergeordnetes Prinzip angegeben, das die mathematische Ordnung im Universum bestimmt und dessen Spezifizierungen die Prinzipien der Perfektion, der Maximierung der Existenz (von compossiblen Objekten), der Minimierung von Gesetzen, der Maximierung der Varietät und Differenziertheit, der Ordnung, der Einfachheit, der Kontinuität usw. sind. Dieses übergeordnete Prinzip lautet: In allen Prozessen und Zuständen des Universums ist eine Eigenschaft entweder maximiert oder minimiert.⁷ Während dieses Prinzip nur generell sagt, daß

eine Eigenschaft maximiert oder minimiert wird, sagen die oben angegebenen Spezifizierungen, welche Eigenschaft maximiert oder minimiert wird: also z.B. die Perfektion (= nach Leibniz die Quantität der Essenz) oder die Fülle (= Reichtum an Existenz) oder die Kontinuität, die Harmonie usw.

1.23 Im Lichte von neuen Erkenntnissen in der logisch-mathematischen Grundlagenforschung und in der Quantentheorie ergibt sich eine Kritik an diesem Wissenschaftsideal. Einmal deshalb, weil ein vollständiges Axiomensystem (das wäre – bezogen auf ein bestimmtes Gebiet – ein solches, aus dem jeder wahre Satz über Objekte oder Phänomene dieses Gebietes aus dem Axiomensystem ableitbar ist) für die Gebiete von ganzen Wissenschaftsdisziplinen nicht erreichbar ist (siehe dazu Kapitel 3). Dann deshalb, weil eine durchgängige Maximierung der Kontinuität in der Natur im mikrophysikalischen Bereich nicht vorhanden ist, was aber andererseits nicht sagt, daß dort die Diskontinuität maximiert wird.

1.3 Eine dritte Antwort stammt vom Wiener Kreis und seinem Programm der "Unified Science".

Diese Antwort knüpft in zwei wesentlichen Punkten an die von Leibniz an und strebt noch nach einer weitergehenden Verallgemeinerung.

(1) Einmal wird die Idee von Leibniz zu verwirklichen versucht, eine allgemein verbindliche symbolische Einheitssprache der Wissenschaften zu entwickeln.

(2) Zweitens wird sein Ideal, eine Wissenschaft *more geometrico*, d.h. im Sinne eines Axiomensystems aufzubauen, zu einem Programm gemacht. Dabei sollte mit der Mathematik begonnen werden, die auf einem Axiomensystem der Mengenlehre aufgebaut wird, wobei die zugrundeliegende Logik, die Prädikatenlogik erster Ordnung ist.⁸ Mit einem Axiomensy-

6. Cf. Leibniz (OF) p. 77-84. Für Details siehe Weingartner (1983) p. 175ff.

7. Leibniz (GP) 7, 270-279; 303. Für Details siehe N. Rescher (1967) p. 41 und Weingartner (1983) p. 178ff.

8. Begründungen der Ordinalzahl- und Kardinalzahltheorie mit Hilfe eines Axiomensystems der

stem für die Physik sollte dann fortgesetzt werden. Wie in Kap. 3 kurz erläutert werden wird, ist dieses Programm an gewisse wesentliche Grenzen gestoßen. Darüberhinaus stellt sich die Frage ob derartige Ideale – außer für begrenzte Gebiete innerhalb einer Disziplin – überhaupt erstrebenswert sind.⁹

Nach dem Programm der "Unified Science" ist zumindest allen echten Wissenschaften eine einheitliche Sprache zugrunde zu legen. Die Gesetze, die allen Wissenschaften zugrundeliegen, sind nach dieser Auffassung die Gesetze der Prädikatenlogik erster Ordnung und der Mengenlehre als Grundlagen für die Mathematik. Darüber hinaus hoffte man im Sinne eines Physikalismus eine Reihe von Gesetzen aus anderen Erfahrungswissenschaften auf physikalische Gesetze zurückführen zu können, sodaß auch grundlegende physikalische Gesetze als solche Gesetze angesehen werden können, die vielen Wissenschaften zugrundeliegen.¹⁰

1.4 Eine vierte Antwort oder ein neuer Gesichtspunkt?

Bei der Anwendung der klassischen Logik, d.h. der Prädikatenlogik erster Ordnung, auf Quantenphänomene ergaben sich bestimmte Schwierigkeiten, die zur Überlegung führten, ob diese Logik nicht zu starke Annahmen macht. Die Schwierigkeiten waren verschiedener Art, mindestens ein Teil davon ist aber durchaus nicht spezifisch für Quantenphänomene. Hier sollen zwei wichtige Gruppen von solchen Schwierigkeiten kurz angeführt werden.

Mengenlehre sind tatsächlich systematisch durchgeführt worden. Cf. Bernays-Fraenkel (1958). Für die Mengenlehre als Grundlage der Mathematik und für verschiedene Positionen (Russell-Whitehead, Hilbert, Brouwer u.a.) bezüglich der Grundlagen der Mathematik cf. Fraenkel-Bar Hillel-Levy (1973).

9. Cf. Weingartner (1996).

10. Derartige Hoffnungen finden noch bei Carnap ihren Ausdruck. Cf. P.A. Schilpp (1963) p. 882ff. und 945f.

1.41 Das Problem der Kommensurabilität

In der Aussagenlogik (der Teil der Prädikatenlogik erster Ordnung, der sich nur mit ganzen Aussagen, die nicht weiter zerlegt werden beschäftigt) gilt das folgende Gesetz (Regel):

Wenn die Aussage p und die Aussage q einen Wert bekommt, dann auch die zusammengesetzte Aussage $p \wedge q$ (d.h. die Aussage (p und q)). Dies ist ganz unproblematisch, wenn – wie in der Aussagenlogik üblich – alle Aussagen Wahrheitswerte (d.h. die Werte "wahr" oder "falsch") bekommen. Aber bereits in dem Fall, in dem Aussagen einen anderen Wert (außer wahr oder falsch) wie etwa "unbestimmt", "indefinit" annehmen dürfen, wird die mit "und" (Konjunktion) zusammengesetzte Aussage auch nicht nur die Werte wahr oder falsch annehmen (sondern Werte, wie sie etwa in dreiwertigen, oder generell in mehrwertigen Logiken vorgeschlagen werden). Ganz generell wird die Regel nicht mehr gelten, wenn statt den Wahrheitswerten andere Werte verwendet werden: z.B. Werte für Meßbarkeit (von Zuständen, die durch Aussagen beschrieben werden), für Beobachtbarkeit, für Testbarkeit, für Nicht-Redundanz, für Relevanz etc. Sie gilt eben z.B. nicht für Zustände, die durch Aussagen beschrieben werden, in denen gleichzeitig einem Teilchen ein bestimmter Ort und demselben Teilchen ein bestimmter Impuls zugeschrieben wird. Dieser Sachverhalt ist nicht spezifisch für Quantenphänomene und Niels Bohr ist angeblich schon als Schüler bei der Betrachtung von menschlichen Handlungen darauf gestoßen.¹¹ Meine Handlung, jetzt an diesem Aufsatz weiterzuschreiben und die, jetzt eine kleine Bergtour zu machen – beide sind getrennt möglich – sind nicht gleichzeitig beobachtbar (obwohl getrennt und nacheinander schon). Biologen haben herausgefunden, daß bei einer Reihe von weiblichen Tieren sexuelle Erregung und Aggression nicht beobachtbar ist

11. Cf. A. Pais (1991) pp. 24f. und 439-447. 1953 bringt er in einem Vortrag die Unmöglichkeit der gleichzeitigen Anwendung von Gerechtigkeit und Liebe als Beispiel. Ibid. p. 447.

(hingegen sexuelle Erregung und Angst sehr wohl), während bei männlichen Tieren sexuelle Erregung und Angst nicht beobachtbar sind (dagegen sexuelle Erregung und Aggression). Einem Mathematiker, der ein Theorem T1 und ein anderes T2 bewiesen hat, wird es nicht einfallen, ein weiteres Theorem anzugeben, das aus der (aussagenlogischen) Konjunktion von beiden ($T1 \wedge T2$) besteht. Obwohl natürlich $T1 \wedge T2$ wahr ist, wann immer T1 wahr ist und T2 wahr ist. D.h. logisch gültig ist diese Konsequenz schon, aber sie ist redundant.

1.42 Das Problem der Distributivität

In der Aussagenlogik und in der dazu entsprechenden Booleschen Algebra gelten auch die sogenannten Distributionsgesetze. Birkhoff und von Neumann haben 1936 einen Aufsatz veröffentlicht, in dem sie die Schwierigkeiten aufzeigen, die bei der Anwendung des Distributionsgesetzes auf Situationen in der Quantenmechanik entstehen.¹² In einem vereinfachten Gedankenexperiment sei die Position (Ort) des Teilchens durch L (links im Kasten) oder R (rechts im Kasten) gegeben und der Impuls durch einen "geraden" (symmetrischen) Zustand E oder durch einen ungeraden E'. (Dies hängt damit zusammen, daß die Wellenfunktion invariant bleibt oder sich ändert). Die entsprechende Instanz des Distributivgesetzes für die Zustände ist dann:

$$E \cap (L \cup R) = ((E \cap L) \cup (E \cap R)).$$

Da R (relativ zur Lage im Kasten) $= L'$ ("nicht-links") bedeutet, bekommt $L \cup L'$ den Wert 1, sodaß die linke Seite gleich E wird. Wegen der Inkommensurabilität von E und L bzw. E und R bekommt die rechte Seite den Wert 0. D.h. das Distributionsgesetz ist (in der Richtung von links nach rechts) verletzt.

1.43 Neue Fragestellung.

Die Schwierigkeiten bei der Anwendung der Standard-Logik (Prädikatenlogik erster Ord-

nung) führen zu folgender Frage: Können neue Entdeckungen in den empirischen Wissenschaften zu einer Abänderung (oder zu einer Abschwächung) der Logik führen?

Die Reaktion verschiedener Physiker und Wissenschaftstheoretiker war verschieden. Birkhoff und von Neumann haben einen nicht-distributiven Verband als die Struktur der Quantenmechanik angesehen. Dann stellt sich die Frage, ob es dazu eine entsprechende Logik gibt.¹³ Natürlich kann es nicht eine Logik mit einer zweiwertigen Wahrheitstafelsemantik sein, aber dies schließt nicht andere schwächere Logiken prinzipiell aus. Mittelstaedt hat 1978 ein Axiomensystem eines orthokomplementären quasimodularen Verbandes für eine Quantenlogik vorgeschlagen.¹⁴ Es sieht aber so aus, daß man auch mit bescheideneren Mitteln, beispielsweise mit einem Filter (einschränkenden Relevanzkriterium), der bei Bedarf auf die klassische zweiwertige Logik (Prädikatenlogik erster Ordnung) aufgesetzt wird, die gleichen Hauptziele erreicht, nämlich diejenigen Richtungen der Implikation (oder Ableitung), die zu Schwierigkeiten führen, vermeidet.¹⁵ Ein solcher Filter (Relevanzeinschränkung der klassischen gültigen Konsequenzen auf die gültigen und kompaktesten nicht-redundanten Konsequenzen) ist auch für die Vermeidung von anderen Schwierigkeiten in der Theorie der Bewährung, Erklärung, Wahrheitsnähe u.a. nachweislich nützlich.¹⁶ Die Schwierigkeiten scheinen ganz allgemein daher zu rühren, daß die klassische zweiwertige Logik (PL1) – bzw. der klassische Deduktionsbegriff – sowohl redundante als auch nicht maximal kompakte Konsequenzelemente zuläßt. Die Antwort auf die neue Fragestellung scheint also zu sein, daß man für bestimmte Anwendungen der Gesetze der Logik, insbesondere jener der logischen

12. Cf. Birkhoff-v. Neumann (1936) p. 831.

13. Cf. Jauch und Piron (1970).

14. Mittelstaedt (1978).

15. Für einen solchen Vorschlag cf. Weingartner (1993).

16. Cf. Schurz-Weingartner (1987) und Weingartner (1988).

Folgerung (Deduktion) nicht alle gültigen, sondern nur die nicht-redundanten und kompaktesten Elemente der Konsequenzklasse verwenden darf.

2. Was ist ein Gesetz?

Diese Frage ist so alt wie die Philosophie. Eine erste grobe Antwort kann der weiteren Differenzierung dienen: Ein Gesetz ist eine Regel oder ein Ordnungsprinzip, durch das gewisse Dinge geregelt (geordnet) werden. Es lassen sich dazu drei Fragen stellen: Wer hat die Regel (das Ordnungsprinzip) erlassen, eingesetzt? Welche Dinge werden geordnet? Was ist die Regel, das Ordnungsprinzip selbst? Diese letzte Frage beschäftigt uns hier. Aber so, daß auch in bezug auf die zweite eine Spezifizierung gemeint ist, nämlich insofern, als Naturdinge (im weitesten Sinne des Wortes) als die geordneten Dinge angesehen werden. Damit ist dann gesagt, daß jetzt über Naturgesetze gesprochen werden soll und nicht über mathematische Gesetze, juridische Gesetze oder ethische Gesetze.

2.1 Aristoteles entdeckte bereits einen wesentlichen Punkt: die Invarianz.

Um die von uns beobachtbare Welt zu beschreiben und zu erklären – so warf er dem Parmenides vor – kann man nicht mit einem Prinzip (einer Kategorie) auskommen. Um Veränderung beschreiben zu können, muß man zwischen etwas, was sich ändert und etwas, was dabei unverändert (invariant) bleibt, unterscheiden. Naturgesetze im weitesten Sinne sind Invarianzbedingungen.

2.2 Um eine Sonnenfinsternis mit Hilfe der Newtonschen Gesetze vorhersagen zu können, ist die Kenntnis der Konstellation von Sonne, Erde und Mond zu einem bestimmten Zeitpunkt t_0 (z.B. Gegenwart) nötig.

Nur aus den beiden Prämissen: (1) Gesetz und (2) Anfangs- oder Randbedingungen kann man

die Vorhersage ableiten. Ein Gesetz ist also gegenüber (Änderungen von) Anfangs- oder Randbedingungen invariant. Kann man aber eindeutig das, was Anfangs- oder Randbedingungen sind, abgrenzen? Sind z.B. die tatsächlichen Abstände der Planeten voneinander solche Anfangs- oder Randbedingungen, sodaß bei Änderungen die Newton'schen Gesetze invariant blieben; und zwar auch so, daß ihre Anwendung auf die Planetenbahnen nicht tangiert würde? Newton war überzeugt davon. D.h. er dachte, daß die Planetenbewegungen bei Änderung der Abstände genau so strikt und präzise vorhersagbar wären (aufgrund seiner Gesetze) wie bisher.

Kepler war anderer Ansicht. Er war der Meinung, daß die Abstände spezielle mathematische Proportionen darstellen, die für die Harmonie des Systems maßgebend sind. Heute würde man vielleicht eher von Stabilität sprechen. Die Frage, die sich daran anschließt, ist, ob eine Änderung der Abstände der Planeten bewirken könnte, daß ihre Bewegungen nicht mehr präzise vorhersagbar wären.

2.3 Die Entdeckung von chaotischem Verhalten an einem einfachen Beispiel.

Auf diese und auf ähnliche Fragen fiel neues Licht durch die Entdeckung von chaotischem Verhalten einfacher Systeme, die die Newtonschen Gesetze erfüllen. Eines der einfachsten derartigen Systeme, bei dem chaotisches Verhalten nachgewiesen wurde, ist das bekannte Pendel, das immer ein Schulbeispiel für Regelmäßigkeit und Vorhersagbarkeit war. In nicht zu großen Oszillationen wird sein periodisches Verhalten durch die bekannte Gleichung $T = 2\pi \sqrt{l/g}$ beschrieben. John Miles entdeckte 1984¹⁷, daß ein solches Pendel chaotisch wird, wenn sein Aufhängepunkt in der Schwingungsebene um eine Distanz d hin und her bewegt wird, und zwar mit einer ganz geringfügigen Abweichung T^* von der Periode des Pen-

17. J. Miles (1984). Cf. J. Lighthill (1986).

dels T . Die Distanz d muß dabei ca. $1/64$ der Pendellänge betragen. Vorausgesetzt, daß die Dämpfung (z.B. durch die Luft) nicht den Wert von ca. 10% der Bewegungsenergie überschreitet, fand Miles ein maximal chaotisches Verhalten bei $T^* = 1,00234 T$.

Um Mißverständnissen vorzubeugen, muß erwähnt werden, daß es sich hier nicht einfach um instabiles Verhalten des Pendelgewichts handelt, wie das von nicht-linearen Oszillationen in der Mechanik seit langem bekannt ist. Ein derartiges instabiles Verhalten, das bei einem Bewegen des Aufhängepunktes (in der Schwingungsebene) ganz natürlich zu erwarten ist, würde in derselben Schwingungsebene, in der die Oszillation des Aufhängepunktes stattfindet, erfolgen. Im Gegensatz dazu entstehen bei Werten von $1,00234 T$ eine unabsehbare Anzahl von Verzweigungen (Gabelungen), die ein Ausbrechen aus der Ebene und eine beliebige Abhängigkeit von Anfangsbedingungen zur Folge hat. Und dies macht Vorhersagbarkeit nahezu unmöglich. Die Kurve des unvorhersagbaren Verhaltens eines solchen Pendels ist gekennzeichnet durch typische Zirkulation der Amplituden für eine längere Zeit t diesseits einer Koordinatenachse, dann durch einen kurzen Übergang auf die andere Seite der Koordinatenachse (dort wieder länger verweilend – wie oben beschrieben), dann wieder Übergang auf die andere Seite usw., jeweils in neuen aber ähnlichen Kurven. Selbst bei genügend hoher Präzision (sagen wir 10^{-4}) der Anfangsbedingungen ändert sich t (für die Zeiten diesseits und jenseits der Achse) diskontinuierlich, wenn man eine Anfangsbedingung zum nächsten Nachbar hin verändert. Und eine weitere Steigerung der Präzision der Anfangsbedingungen bringt nur eine ganz geringfügige Verbesserung der Vorhersagbarkeit.

2.4 Chaotisches Verhalten im allgemeinen.

Das zuletzt Gesagte ist spezifisch charakteristisch für chaotisches Verhalten: Benachbarte Lösungen laufen exponentiell auseinander. Ob-

wohl so etwas auch bei bekannten Instabilitäten von Systemen auftreten kann, ist das Auseinanderlaufen (Divergenz) dabei relativ auf eine Stelle bezogen, während es ein Zusammenlaufen (Konvergenz) in bezug auf eine andere Stelle gibt. In typisch chaotischen Systemen (obwohl sie eine begrenzte Gesamtenergie haben) divergieren benachbarte Lösungen überall.

Nun ist durch das spezifische Beispiel des Pendels und durch mehrere andere gezeigt worden, daß dynamische Systeme, die die Gesetze der Newtonschen Theorie erfüllen, chaotisch werden können. D.h., daß unter den Systemen, die die Gesetze der Newtonschen Mechanik erfüllen, es eine bemerkenswerte Anzahl von Systemen gibt, die chaotisches Verhalten an den Tag legen und die jenseits eines bestimmten Vorhersagebereiches keine Vorhersage erlauben. Und dies gilt, ganz ohne in den Bereich der Quantenmechanik vorzustoßen, von makroskopischen Systemen, für die die Newtonschen Gesetze wohl die wichtigsten Gesetze darstellen.¹⁸

2.5 Wogegen ist ein Gesetz invariant?

Die Entdeckung von dynamisch-chaotischen Systemen führt zu einem erneuten Überdenken der Frage: Was ist ein Gesetz?

Der erste Punkt, der hier zu bedenken ist, ist dieser: Der Terminus "Gesetz" (mindestens im Sinne von "physikalisches Gesetz", wenn nicht "Naturgesetz") hatte durch die Gesetze der Newtonschen Dynamik und allgemeiner durch die physikalischen Bewegungsgleichungen im Sinne von Differentialgleichungen eine fest umrissene Bedeutung bekommen, in der die Vorhersagbarkeit eine wichtige Komponente ist. Das Verhalten von einem Teil solcher Systeme, die diese Gesetze erfüllen, ist nun als

18. Für Details siehe Lichtenberg-Liebertmann (1983) und Lighthill (1986). Zum dynamischen Chaos im allgemeinen siehe Ios-Helleman-Stora (1983), Giannoni-Voros-Zinn-Justin (1991) und *Proceedings of the Royal Society* 413(1987).

chaotisch und nicht vorhersagbar in einem gut definierten Sinn erwiesen.

Die zweite, mehr generelle Überlegung ist diese: Ein Gesetz ist verstanden als etwas, das invariant ist gegenüber Abänderungen in den Anfangs- oder Randbedingungen. Was bedeutet es aber, wenn durch Abänderung von Randbedingungen wesentliche Bedingungen (die Vorhersagbarkeit) einer bestimmten Gesetzesartigkeit (derjenigen der Newtonschen Dynamik) verändert werden (nicht invariant bleiben)?

Und noch allgemeiner: Welche Bedingungen können sich ändern, ohne daß Gesetze, bzw. wesentliche Charakteristika ihres Typs sich ändern? Eine der grundlegendsten Eigenschaften von physikalischen Gesetzen ist diese: sie sind invariant gegenüber Transformationen der Raum-Zeit-Koordinaten. Aber bei der Beschreibung der Entwicklung des Universums in den ersten Minuten nach dem Urknall macht auch diese Eigenschaft Schwierigkeiten.

Die im Universum verteilte Gesamtenergie hat eine bestimmte Größe, und sie bleibt nach dem Energiesatz konstant. Würden alle Gesetze gleichbleiben, wenn sich diese Größe der Gesamtenergie (ein wenig oder drastisch) ändern würde? Wir haben keine Antwort auf diese Frage.¹⁹

Wie steht es mit sogenannten Naturkonstanten? Die dimensionslosen (z.B. das Verhältnis von Proton und Elektronmasse, 1836:1) erinnern an die Abstandsverhältnisse der Planeten, für die sich Kepler besonders interessierte. Wir haben keine Ahnung, welche Gesetze gegenüber solchen Änderungen invariant bleiben würden.

Diese Überlegungen zeigen, daß die alte Frage "Was ist ein Gesetz?" immer erneut gestellt werden muß und daß sie durch die gegen-

wärtige Forschung in den Naturwissenschaften wieder in neues Licht gerückt wird und durch neue interessante Aspekte bereichert wird.

3. *Hat alles einen zureichenden Grund?*

Das "Prinzip des zureichenden Grundes" von Leibniz gibt darauf eine positive Antwort: Alles hat einen zureichenden Grund. Es ist sein berühmtes Prinzip der Metaphysik, aber auch das erste Prinzip der kontingenten Wahrheiten:

Jusqu'icy nous n'avons parlé qu'en simples Physiciens: maintenant il faut s'élever à la Métaphysique, en nous servant du Grand principe, peu employé communément, qui porte que rien ne se fait sans raison suffisante, c'est à dire que rien n'arrive, sans qu'il soit possible à celui qui connoitroit assés les choses, de rendre une Raison qui suffise pour déterminer, pourquoy il en est ainsi, et non pas autrement.²⁰

Aber Leibniz war nicht nur ein Philosoph, sondern auch ein Logiker und Mathematiker. Und es mag sein, daß dies der Grund war, warum er auch andere Formulierungen dieses Prinzips gab, in denen Beweis, Begründung und Wahrheit eine wichtige Rolle spielen:

... que rien n'est sans raison, ou que toute verité a sa preuve a priori, tirée de la notion des termes, quoyqu'il ne soit pas tousjours en nostre pouvoir de parvenir à cette analyse.²¹

Generaliter omnis propositio vera (quae identica sive per se vera non est) potest probari a priori ope Axiomatum seu propositionum per se verarum, et ope definitionum seu idearum. ... Constat ergo omnes veritates etiam maxime contingentes probationem a priori seu rationem aliquam cur sint potius quam non sint habere. Atque hoc ipsum est quod vulgo dicunt, nihil fieri sine causa, seu nihil esse sine ratione.²²

Il y a aussi deux sorte de Verités, celles de Raisonnement et celles de Fait. Les Verités de Raisonnement sont nécessaires et leur opposé est impossible, et celles de Fait sont contingentes et

19. Nach einer interessanten Theorie von August Meessen ist die Lichtgeschwindigkeit eine von der Gesamtenergie des Universums *abhängige* Konstante, würde sich also bei Änderung der Gesamtenergie ändern – und zwar nach der Beziehung $c = 2 E \cdot a/h$ (wobei E die Gesamtenergie des Universums, a die Elementarlänge und h das Wirkungsquantum sind). Cf. Meessen (1989).

20. GP 6, p. 602.

21. GP 2, p. 62.

22. GP 7, pp. 300-301.

leur opposé est possible. Quand une vérité est nécessaire, on en peut trouver la Raison par l'Analyse, la resolvant en idées et en vérités plus simples, jusqu'à ce qu'on vienne aux primitives. ... Mais la raison suffisante se doit aussi trouver dans les vérités contingentes ou de fait, c'est à dire dans la suite des choses repandues par l'univers des Creatures, ou la Resolution en raisons particulieres pourroit aller à un detail sans bornes, à cause de la variété immense des choses de la Nature et de la division des corps à l'infini.²³

3.1 Bevor ich eine Interpretation von den oben gegebenen Formulierungen des Prinzips von Leibniz geben will, möchte ich folgende drei Punkte betonen:

(1) Man hat zu beachten, was Leibniz unter Analyse versteht. Wie Rescher sagt, Analyse ist

... a logical process of a very rudimentary sort, based on the inferential procedures of definitional replacement and determination of predicational containment through explicit use of logical process of inference.²⁴

(2) Ein wichtiger Punkt ist weiters, daß in bezug auf die sogenannten Vernunftwahrheiten der Beweisprozeß nach einer finiten Anzahl von Schritten terminiert, d.h. daß die betreffende zu beweisende Proposition finit analytisch ist. Mit anderen Worten, man kann sie nach endlich vielen Schritten auf einfache einleuchtende Axiome zurückführen. Andererseits, daß in bezug auf die sogenannten Tatsachenwahrheiten der Beweisprozeß nicht in einer endlichen Anzahl von Schritten terminiert, d.h. daß die betreffende zu beweisende Proposition infinit analytisch ist. Mit anderen Worten, man würde unendlich viele Schritte brauchen, um sie auf einfache einleuchtende Axiome zurückzuführen. In beiden Fällen aber handelt es sich um einen echten Beweisprozeß, der mindestens intendiert ist als eine Ableitung von strengster Art, d.h. als ein Beweis eines Satzes innerhalb eines deduktiven Systems. Deshalb scheut sich auch Leibniz nicht, in beiden Fällen von einem

notwendigen A-priori-Beweis zu sprechen, auch wenn im Falle der kontingenten Tatsachenwahrheiten die Notwendigkeit hypothetisch ist (ex hypothesi).

(3) Man muß beachten, daß Leibniz zwei Weisen zu sprechen gebraucht, eine mehr ontologische (metaphysische) Art und eine mehr logische Art, wenn er das Prinzip vom zureichenden Grund beschreibt.²⁵ Wenn man die Annahme macht, daß ein Sachverhalt genau dann eintritt, wenn die Proposition, die ihn repräsentiert, wahr ist, dann kann man statt zu sagen: "Wenn ein Sachverhalt eintritt, gibt es einen hinreichenden Grund dafür" auch sagen: Wenn eine Proposition (die diesen Sachverhalt repräsentiert) wahr ist, dann kann es (mindestens von jemandem, der die Dinge genügend kennt oder ein Allwissender ist) eine Erklärung dafür geben. Oder: Wenn eine Proposition (die einen Sachverhalt repräsentiert) wahr ist, dann kann man einen Beweis für diese Proposition aus passenden Prämissen in einem deduktiven System erbringen.

3.2 Meine Interpretation des Prinzips vom zureichenden Grund, die ich an anderer Stelle vorgeschlagen und dort ausführlich begründet habe²⁶, ist folgende:

Das Prinzip des zureichenden Grundes ist ein Vollständigkeits-Prinzip. Es ist ein Prinzip über die Vollständigkeit des umfassenden Systems des Wissens, das als deduktives System, *more geometrico* aufgebaut ist: Jede wissenschaftliche Wahrheit hat einen Beweis. Dies ist eine bestimmte Art eines Vollständigkeitssatzes, der allgemein genommen sagt, daß jeder wahre (gültige) Satz beweisbar (aus den Axiomen) ist. Natürlich ist "jeder" eingeschränkt auf ein Gebiet und auf eine wissenschaftliche Beschreibung im Sinne eines deduktiven Systems (über dieses Gebiet). Nach Leibniz gibt es vier

23. GP 6, pp. 612-613.

24. Rescher (1967), p. 23.

25. Cf. das erste Zitat am Beginn des Kapitels 3 (Fußnote 20).

26. Weingartner (1983), Kapitel 2.5.

große Gebiete der Wissenschaft, in bezug auf welche umfassende deduktive Systeme konstruiert werden können: Logik und Mathematik, Physik, Jurisprudenz (mit Ethik), Metaphysik und Natürliche Theologie (mit Theodizee). Nach Leibniz scheinen alle vier Systeme vollständig zu sein; d.h., das Prinzip des zureichenden Grundes gilt für sie in dem Sinne, daß jede wahre Aussage eines dieser Gebiete ihren Beweis in einem der vier deduktiven Systeme hat. Im Falle von Logik und Mathematik und im Fall von Metaphysik – das sind Bereiche, die nach Leibniz mit notwendigen Wahrheiten, mit Vernunftwahrheiten (*verités de raison*) zu tun haben – kann ein solcher Beweis effektiv in einer endlichen Anzahl von Schritten durchgeführt werden mit Hilfe der Methode der Analyse. Andererseits können die Beweise nicht in einer endlichen Anzahl von Schritten durchgeführt werden in den Bereichen von Physik und Jurisprudenz (einschließlich Ethik), weil diese Bereiche mindestens zum Teil kontingente Wahrheiten (Tatsachenwahrheiten, *verités de fait*) enthalten. Eine unendliche Anzahl von Schritten bei der Analyse (Zurückführung auf einfache einleuchtende Axiome) wäre hier notwendig. Aber das ist eine Aufgabe, die von Menschen nicht erbracht werden kann, sondern nur von Gott, dem allwissenden Seienden.

3.3 Das Prinzip des zureichenden Grundes (im oben interpretierten Sinne) hat ungefähr 240 Jahre nach Leibniz eine wichtige Korrektur erfahren:

1931, als Gödel seinen berühmten Unvollständigkeitssatz publizierte. Die Korrektur ließ die Sicht von Leibniz in einem neuen Licht erscheinen und zeigte sogar, daß Leibniz in einem bedeutenden Punkt recht hatte: Die Logik erster Ordnung (oder Prädikatenlogik erster Ordnung PL1)²⁷, die grundlegende logische

Theorie, die auch sehr umfassenden mathematischen Systemen wie z.B. dem der Mengenlehre zugrundeliegt, ist tatsächlich vollständig, d.h. jeder wahre Satz dieses Gebiets ist aus den Axiomen des Systems beweisbar. Genauer: Jeder (in jedem Individuenbereich, bzw. im abzählbaren Individuenbereich) allgemeingültige Satz, ausdrückbar in der PL1, ist aus den Axiomen der PL1 ableitbar (bzw. mit Hilfe dieser beweisbar). Anders formuliert: Jeder Satz (der PL1) ist entweder widerlegbar (d.h. seine Negation ist beweisbar) oder er ist (im abzählbaren Bereich) erfüllbar. Dies hat auch Gödel 1930 bewiesen. Aber die Ansicht von Leibniz über die Mathematik war zu optimistisch und auch vielleicht zu vereinfacht in dem Sinne, daß er dachte, Logik und Mathematik wären ein einheitliches und homogenes Feld von notwendigen Wahrheiten. Eines der Unvollständigkeitstheoreme von Gödel (1931) besagt, daß die arithmetische Theorie der ganzen Zahlen nicht vollständig ist, und das gilt auch für viele andere mathematische Theorien.²⁸ D.h. es gibt dort wahre Sätze, die aus dieser Theorie nicht herleitbar sind. Genauer: Für jedes (deduktive, üblicherweise axiomatisch aufgebaute) widerspruchsfreie System S, das die arithmetische Theorie der natürlichen Zahlen (mit den Grundbegriffen +, · und Nachfolger) enthält, gilt: Die Beweisbarkeit (d.h. die Axiome und Schlußregeln) ist nicht rekursiv definierbar in S oder es gibt in S (wohlgeformte) Sätze, die weder beweisbar noch widerlegbar sind. Mit anderen Worten: Wenn die Beweisbarkeit in S rekursiv definierbar ist, gibt es in S Sätze, die weder beweisbar noch widerlegbar sind. Insbesondere gehört auch der Satz, der besagt, daß das System S widerspruchsfrei ist, zu diesen in S weder beweisbaren noch widerlegbaren Sätzen.²⁹ Um das Antezedens des vorletzten Satzes

27. "Erste Ordnung" heißt, daß nur über einen Typ von Variablen (Individuenvariablen) quantifiziert wird. Über die Prädikats- und Relationszeichen wird nicht quantifiziert.

28. Allerdings nicht für alle. So ist beispielsweise die Theorie der reell abgeschlossenen Körper oder die elementare Geometrie entscheidbar. Cf. auch die gleich zu machenden Spezifizierungen.

29. Inzwischen sind auch konkrete unentscheidbare zahlentheoretische Sätze gefunden worden, cf. Paris-Harrington (1977) und die Unentscheidbarkeit

nachzuweisen, hat Gödel eine spezielle Arithmetisierung erfunden, die jedem sprachlichen Ausdruck (Term, Atomformel, zusammengesetzte Formel, Sequenz von Formeln im Sinne der logischen Folge, Beweisfigur) eine natürliche Zahl eindeutig zuordnet. Konkret hat er damals nachgewiesen, daß eine solche rekursive Definierbarkeit möglich ist, wenn S das System Principia Mathematica oder eines der bekannten Systeme der Mengenlehre (Zermelo-Fraenkel, Neumann-Bernays) plus die Theorie der natürlichen Zahlen (Peanosche Axiome) ist.³⁰ Ein Motiv für Leibniz' Optimismus bezüglich der Vollständigkeit oder sogar Entscheidbarkeit der Logik und Mathematik könnte gewesen sein, daß er eine positive Lösung im Gebiet der Syllogistik für das folgende wichtige Problem bezüglich der Grundlagen logischer und mathematischer Beweise gefunden hat:

Gibt es eine ars inveniendi? D.h., gibt es eine mechanische und kombinatorische Methode, mit deren Hilfe man jede Wahrheit finden kann? Eine der Stellen, in welchen Leibniz seine ars inveniendi beschreibt, ist die folgende:

In Philosophia habe ich ein mittel funden, dasjenige was Cartesius und andere per Algebram et Analysis in Arithmetica et Geometria gethan, in allen scientien zuwege zu bringen per Artem Combinatoriam, welche Lullius und P. Kircher zwar excolirt, bey weiten aber in solche deren intima nicht gesehen. Dadurch alle Notiones compositae der ganzen welt in wenig simplices als deren Alphabet reduciret, und aus solches alphabets combination wiederumb alle dinge, samt ihren theorematibus, und was nur von ihnen zu inventieren möglich, ordinata methodo, mit der zeit zu finden ein weg gebahnet wird.³¹

Methodus inveniendi perfecta, si praevidere

der Kontinuumsannahme in einem System der Mengenlehre (auch mit sehr starken Unendlichkeitsaxiomen) ist ein anderes wichtiges Beispiel.

30. Der Begriff des Systems S ist dann vor allem durch Turing (1937) zum Begriff "formales System" im Sinne von mechanischem Verfahren zur Erzeugung von Formeln (aus Axiomen) erweitert und präzisiert worden.

31. GP I, pp. 57-58.

possimus, imo demonstrare antequam rem aggre-
diamur, nos ea via ad exitum perventuros;
perfecta magis illa quae nullis utitur theorematibus
apud alios demonstratis, vel problematis ab aliis
solutis.³²

Ich stimme mit Hermes überein, daß eine Interpretation der Leibnizschen Idee der ars inveniendi im Lichte der modernen Mathematik mit Hilfe des Begriffs der rekursiven Aufzählbarkeit gegeben werden kann.³³ Die Behauptung von Leibniz, daß er eine ars inveniendi gefunden hätte, um alle wissenschaftlich untersuchten Wahrheiten herauszufinden, bedeutet dann nichts anderes, als daß er eine bestimmte mathematische Funktion gefunden hat, genauer eine rekursive Funktion, deren Werte alle wahren Sätze (Propositionen) sind. Beziehungsweise heißt das auch, daß die Menge der wahren Sätze (Propositionen) eine rekursiv aufzählbare Menge bildet.

Heute wissen wir, daß Leibniz so eine generelle ars inveniendi nicht finden hätte können. Gödels Unvollständigkeitssatz sagt uns auch, daß die Menge aller wahren Sätze (auch sogar nur diese von Logik und Mathematik) nicht rekursiv aufzählbar ist. Aber Leibniz mag gehofft haben, so ein allgemeines Prinzip der ars inveniendi zu finden, weil er tatsächlich eines für einen eingeschränkten Bereich gefunden hat: für die Syllogistik.³⁴

3.4 Gibt es Vollständigkeit in der Physik?

3.4.1 Eine physikalische Theorie über ein bestimmtes Gebiet G der physikalischen Realität wäre vollständig, wenn alle wahren Sätze über G aus der Theorie (plus entsprechenden einschränkenden Bedingungen)³⁵ folgen. Die oben erwähnten Erkenntnisse im Gebiet der Mathe-

32. OF, p. 161.

33. Hermes (1975), p. 98.

34. Cf. Weingartner (1983) p. 174 ff.

35. Ich fasse Rand- oder Anfangsbedingungen und andere Spezifizierungen – wie etwa, daß ein Schwingungsvorgang räumlich begrenzt ist und im Unendlichen Null ist ... usw. – mit dem Terminus "einschränkende Bedingungen" zusammen.

matik lassen vermuten, daß auch die besten physikalischen Theorien (wie etwa die von Newton, Maxwell oder Einstein, aber auch die Quantentheorie) nicht vollständig in diesem Sinne sind. D.h. es gibt korrekte Beschreibungen von Phänomenen, die nicht aus der Theorie (plus einschränkender Bedingungen) folgen.

Dieser (in der Logik und Mathematik übliche) Begriff von Vollständigkeit stellt Aussagen (der Theorie) anderen Aussagen, die Beschreibungen von physikalischen Phänomenen (Fakten, Zuständen) sind, gegenüber.

3.42 Das EPR-Argument

Ein davon verschiedener Begriff von Vollständigkeit (einer physikalischen Theorie) bezieht sich auf die Korrespondenz dieser mit der physikalischen Realität. Er (bzw. eine notwendige Bedingung dafür) ist in einem berühmten Artikel von Einstein, Podolsky und Rosen näher bestimmt worden:

Every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory. We shall call this the condition of completeness.³⁶

Diese Vollständigkeitsforderung bezieht sich auf die Ausdrucksfähigkeit der Fach-Sprache der physikalischen Theorie in dem Sinn, daß jede Beziehung zwischen Elementen der physikalischen Realität auch in der Sprache der Theorie formuliert werden kann.

Dabei wird physical reality folgendermaßen bestimmt:

If without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e. with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity.³⁷

Einstein, Podolsky und Rosen zeigten in doch sehr überzeugenden (wenn vielleicht auch nicht ganz lückenlosen) Argumenten, daß zunächst entweder (1) oder (2) gilt:

(1) Die quantenmechanische Beschreibung der physikalischen Realität (im oben bestimmten Sinne), die durch die Wellenfunktion gegeben ist, ist nicht vollständig (im oben bestimmten Sinne).

(2) Wenn die Operatoren, die zwei physikalischen Größen entsprechen, nicht kommutativ sind, kann den beiden Größen nicht gleichzeitig physikalische Realität zukommen.

In einem zweiten Schritt wird dann gezeigt: Wenn (1) falsch ist, dann ist auch (2) falsch. Aus diesen beiden Schritten: (1) oder (2); wenn nicht-(1) dann auch nicht-(2) folgt dann logisch: (1), d.h. die Unvollständigkeit der quantenmechanischen Beschreibung der physikalischen Realität durch die Wellenfunktion. Dieses Resultat hat zu einer lang anhaltenden Kontroverse zwischen Albert Einstein und Niels Bohr und später zu einer bis heute nicht beendeten Diskussion unter Physikern und Wissenschaftstheoretikern geführt. Einstein hat Bohrs Gegen-Argumente auch später nicht akzeptiert. Er kleidet 1949 (in seiner Autobiographie) Bohrs Standpunkt in die Auffassung des Physikers B und seine eigene in die des Physikers A, um dann einen wesentlichen Teil des EPR-Arguments noch einmal folgendermaßen darzustellen. Dabei kommt die wichtige Voraussetzung des EPR-Arguments, nämlich die Lokalitätsannahme, besonders deutlich zum Ausdruck, wo er sagt:

Aber an einer Annahme sollten wir ... festhalten.

Für die weitere Diskussion denke ich mir zwei Physiker A und B, die bezüglich des durch die ψ -Funktion beschriebenen realen Zustandes eine verschiedene Auffassung vertreten.

A. Das einzelne System hat (vor der Messung) einen bestimmten Wert von q (bzw. p) für alle Variablen des Systems, und zwar den Wert, der bei einer Messung dieser Variablen festgestellt wird. Ausgehend von dieser Auffassung wird er erklären: Die ψ -Funktion ist keine erschöpfende Darstellung des realen Zustandes des Systems, sondern eine unvollständige Darstellung; sie drückt nur dasjenige aus, was wir auf Grund früherer Messungen über das System wissen.

B. Das einzelne System hat (vor der Messung) keinen bestimmten Wert von q (bzw. p). Der

36. Einstein-Podolsky-Rosen (1935) p. 777.

37. Ibid.

Messwert kommt unter Mitwirkung der ihm vermöge der ψ -Funktion eigentümlichen Wahrscheinlichkeit erst durch den Akt der Messung zustande. Ausgehend von dieser Auffassung wird (oder wenigstens darf) er erklären: Die ψ -Funktion ist eine erschöpfende Darstellung des realen Zustandes des Systems.

Nun präsentieren wir diesen beiden Physikern folgenden Fall. Es liege ein System vor das zu der Zeit t unserer Betrachtung aus zwei Teilsystemen S_1 und S_2 bestehe, die zu dieser Zeit räumlich getrennt und (im Sinne der klassischen Physik) ohne erhebliche Wechselwirkung sind. Das Gesamtsystem sei durch eine bekannte ψ -Funktion ψ_{12} im Sinne der Quantenmechanik vollständig beschrieben. Alle Quantentheoretiker stimmen nun im Folgenden überein. Wenn ich eine vollständige Messung an S_1 mache, so erhalte ich aus den Messresultaten und aus ψ_{12} eine völlig bestimmte ψ -Funktion ψ_2 des Systems S_2 . Der Charakter von ψ_2 hängt dann davon ab, was für eine Art Messung ich an S_1 vornehme. Nun scheint es mir, dass man von dem realen Sachverhalt des Teilsystems S_2 sprechen kann. Von diesem realen Sachverhalt wissen wir vor der Messung an S_1 von vornherein noch weniger als bei einem durch die ψ -Funktion beschriebenen System. Aber an einer Annahme sollten wir nach meiner Ansicht unbedingt festhalten: Der reale Sachverhalt (Zustand) des Systems S_2 ist unabhängig davon, was mit dem von ihm räumlich getrennten System S_1 vorgenommen wird. Je nach der Art der Messung, welche ich an S_1 vornehme, bekomme ich aber ein andersartiges ψ_2 für das zweite Teilsystem ($\psi_2, \psi_2^1 \dots$). Nun muss aber der Realzustand von S_2 unabhängig davon sein, was an S_1 geschieht. Für denselben Realzustand von S_2 können also (je nach Wahl der Messung an S_1) verschiedenartige ψ -Funktionen gefunden werden. (Diesem Schlusse kann man nur dadurch ausweichen, dass man entweder annimmt, dass die Messung an S_1 den Realzustand von S_2 (telepathisch) verändert, oder aber dass man Dingen, die räumlich voneinander getrennt sind, unabhängige Realzustände überhaupt abspricht. Beides scheint mir ganz inacceptabel.)

Wenn nun die Physiker A und B diese Ueberlegung als stichhaltig annehmen, so wird B seinen Standpunkt aufgeben müssen, dass die ψ -Funktion eine vollständige Beschreibung eines realen Sachverhaltes sei. Denn es wäre in diesem Falle unmöglich, dass demselben Sachverhalt (von S_2) zwei verschiedenartige ψ -Funktionen zugeordnet werden könnten.³⁸

38. Einstein (1949) p. 82ff.

3.43 Bells Angriff auf die Lokalitätsannahme.

Inzwischen ist aber durch die Widerlegung der sogenannten Bellschen Ungleichung und der GHZ-Korrelationen durch die Quantenmechanik³⁹ die Lokalitätsannahme arg ins Wanken geraten. Obwohl das andererseits nicht heißt, daß jemand eine allgemein akzeptable Erklärung für die Nicht-Lokalität (Fernwirkung) hätte:

Wenn ich ein herkömmliches Quantenmodell erstelle, wo Wirkungen nichtlokal sein können – im Sinne von 'plötzliche Ausbreitung über beliebig weite Distanzen' – so gibt es Situationen, wo die Wirkung vor der Ursache kommt. Daher müssen wir irgendwie subtiler vorgehen – man muß einen Weg finden, wo sich etwas sehr schnell ausbreiten kann, ohne mit der Speziellen Relativitätstheorie in Konflikt zu geraten – und dies ist noch nicht geschehen.⁴⁰

Die Schwierigkeit mit Fernwirkungen ist die, daß Signale nach der Relativitätstheorie nur höchstens mit Lichtgeschwindigkeit übertragen werden können. Die Lichtgeschwindigkeit – das sind experimentelle Resultate – hängt weder von der Bewegung der Lichtquelle, noch von der des Beobachters ab. Damit man mit der Lichtgeschwindigkeit als einer Höchstgeschwindigkeit für (wirkliche) Signalübertragung nicht in Schwierigkeit kommt, scheint es noch einen anderen Ausweg zu geben: Die betreffenden Systeme oder Teilchen enthalten eine – metaphorisch gesprochen – genetische Information für ihr späteres Verhalten (wenn sie sehr weit voneinander entfernt sind). Und diese verborgenen Parameter ("Gene") sind in der Quantenmechanik nicht erfaßt, d.h. sie ist unvollständig. In der "genetischen Annahme"⁴¹ steckt aber – das darf nicht übersehen werden –

39. Die Experimente dazu stammen vor allem von Clauser et al. (1978) und A. Aspect et al. (1982). Für einen Überblick der experimentellen Daten siehe M. Redhead (1987) Kap. 4.5. Zum Zusammenhang zwischen EPR-Paradoxon und Bellscher Ungleichung bzw. GHZ-Korrelation siehe Bell (1992) und Zeilinger (1992).

40. J.S. Bell (1992) p. 94.

41. Cf. dazu Bell (1992) p. 89f., wo Bell einen Vergleich mit eineigen Zwillingen macht.

eine starke deterministische Voraussetzung (für die Quantenmechanik), die von vielen Physikern heute nicht mehr akzeptiert wird.

Eine der großen ungeklärten Fragen heißt also: Was ist diese nicht-lokale Fernwirkung. Dabei ist eines sicher: man kann sie nicht dazu benutzen, um Signale zu senden. Kann es sich dann trotzdem um eine Art kausaler Beziehung handeln? Gilt hier das Prinzip von Leibniz: Jedes Ereignis hat seinen zureichenden Grund? Haben die Korrelationen von Ereignissen (in einer EPR-Situation) einen zureichenden Grund, eine Ursache, die der wissenschaftlichen Beobachtung, Messung oder Überprüfung entzogen ist?

Die Physiker Chiao, Kwiat und Steinberg haben neueste Untersuchungen gemacht, die die Nicht-Lokalität weiter bestätigen. Es handelt sich vor allem um drei Arten von Experimenten: (1) Die Messung der Tunnelzeit beim sogenannten Tunneleffekt, (2) die Messung des Ausgleichs der Dispersion, (3) Die Messung von Koinzidenzereignissen nach dem Franson-Experiment.

Die Forscher betonen aber eindeutig, daß die Ergebnisse nicht die Verletzung der Kausalität der Relativitätstheorie bedeuten.⁴² Dazu soll ihre Interpretation des ersten Experiments und seine Anordnung kurz erläutert werden. Es werden "identische" Elektronenpaare erzeugt (mit einem optisch nicht-linearen Kristall), die nach gleichen Weglängen (diese werden durch Laufzeitvergleich mit einem Interferometer vorher exakt ermittelt) auf verschiedene Detektoren auftreffen. In eine Bahn wird dann eine Barriere gegeben und die Ankunftszeiten bei beiden Detektoren gemessen. Die Barriere bestand aus einem Spiegel, der gut 99% der Photonen reflektiert und schwach 1% durchläßt (Tunnel). Das überraschende Ergebnis ist, daß – im Mittel genommen – die Tunnelphotonen schneller waren als die ungehemmten Photonen. Die durchschnittliche Tunnelgeschwindigkeit betrug dabei 1,7 der Lichtgeschwindigkeit.

42. Cf. Chiao-Kwiat-Steinberg (1993).

Verletzt das die Kausalität im Sinne der Relativitätstheorie, nach der Signalgeschwindigkeiten (und kausale Einflüsse) sich nicht schneller als die Lichtgeschwindigkeit fortbewegen können? Die folgende Interpretation verletzt nicht die Relativitätstheorie⁴³: Die Position eines Photons ist quantenmechanisch und nach der Unschärferelation eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die man sich im Sinne einer Gaußschen Glockenkurve vorstellen kann (die Breite ist ein Maß für die Ortsunschärfe, das Maximum der Glockenkurve drückt die größte Aufenthaltswahrscheinlichkeit aus): Vergleicht man nun die beiden Wellenpakete, wird das des Tunnel-Photons zu 99% durch den Spiegel zurückgeworfen und zu 1% durchgelassen. Es könnte dabei der Scheitelpunkt des Tunnel-Photons durch die Barriere (Spiegel) derart verformt worden sein, daß er ein wenig vorher am Detektor anlangt, als der Scheitelpunkt des anderen Photons. Obwohl der Beginn der Glockenkurve (das bedeutet die äußerst geringe Wahrscheinlichkeit für den frühestmöglichen Zeitpunkt, das Photon zu beobachten) für beide Photonen der gleiche wäre, d.h. die Bedingung für kausale Ausbreitung der Relativitätstheorie nicht verletzt ist. Entsprechende Interpretationen, die verträglich mit der Relativitätstheorie sind, werden auch für die anderen beiden Experiment-Arten gegeben.

3.5 Welches sind die allgemeineren philosophischen Fragen, die dahinterliegen?

Leibniz hatte behauptet, daß in der Logik und Mathematik der Satz vom zureichenden Grund als Vollständigkeitsprinzip gilt: Jeder gültige (wahre) Satz der Logik und Mathematik hat einen Beweis im jeweiligen more geometrico aufgebauten Axiomensystem, und dem Menschen ist es möglich ein solches zu erstellen. Er hat sich dabei in bezug auf die Mathematik getäuscht – wie oben in 3.3 kurz erläutert wurde.

43. Cf. das Zitat von Bell, in dem er einen Weg zu finden fordert, der nicht mit der Relativitätstheorie in Konflikt kommt (Anm. 37).

Aber es muß ihm zugute gehalten werden, daß er in bezug auf die Physik von vornherein vorsichtiger war: Obwohl ein vollständiges Axiomensystem (aus dem jede physikalische Wahrheit folgt) bzw. ein vollständiges System von Gründen (Ursachen) für alle physikalischen Sachverhalte (für Gott) existiert, ist es für den Menschen nicht möglich, für alle physikalischen Phänomene (Sachverhalte) die hinreichenden Gründe zu finden: Unendlich viele Beweisschritte wären nötig, um von bestimmten physikalischen Sachverhalten auf ihre hinreichenden Gründe zurückzufinden.

Unabhängig davon, ob Leibniz mit der letzteren Ansicht recht hat (unendliche Kausalreihe, unendlich viele Beweisschritte) bzw. ob und wie solche Begriffe einigermaßen präzisiert werden können, um als sinnvolle Antworten zu erscheinen, lauten die dahinterliegenden allgemeineren Fragen:

3.51 Ist die Gesamtheit der physikalischen Gesetze (die heute bekannt sind) vollständig in bezug auf die Gesamtheit der physikalischen Phänomene⁴⁴ (die heute bekannt sind). D.h. sind alle wahren Beschreibungen dieser Phänomene aus den Gesetzen (plus entsprechenden einschränkenden Bedingungen) herleitbar? Diese Frage wird sicher mit Nein zu beantworten sein. Wie Einstein einmal gesagt hat, ergeben sich bei der Lösung eines Problems zehn neue, von denen noch niemand auch nur geträumt hat. Es gibt nämlich eine Reihe von Problemen und nachgewiesenen Phänomenen, für die wir noch keine Gesetze (und nicht einmal vernünftige Hypothesen), mit denen sie erklärt werden können, gefunden haben.

44. Ein physikalisches Phänomen oder ein physikalischer Sachverhalt ist ein Zustand oder Prozeß (Zustandsänderung in der Zeit), der durch Aussagen beschrieben wird, in denen raum-zeitlichen Dingen oder Systemen (von Dingen bzw. Partikeln) gewisse Eigenschaften zugeschrieben werden. Statt den "Dingen" stehen auf einer abstrakteren Stufe dann u.a. auch Massenpunkte oder andere idealisierte Objekte, denen Merkmale zugeschrieben werden.

3.52 Gibt es (prinzipiell) ein vollständiges (finites oder infinites)⁴⁵ Axiomensystem physikalischer Gesetze für alle wahren physikalischen Sachverhalte? Oder noch allgemeiner: Gibt es ein Axiomensystem über diese Welt (über das Universum), aus dem alle wahren Aussagen über diese Welt (über das Universum) herleitbar sind? Oder anders formuliert: Kann man alle wahren Beschreibungen von Sachverhalten dieser Welt mit Hilfe eines Systems von Gesetzen über diese Welt erklären? Nach Leibniz gibt es das für Gott (wobei jetzt dahingestellt bleiben soll, inwieweit er damit impliziert hat, daß Gott "axiomatisch" denken würde – d.h. die wahren Axiome kennen würde und die besonderen Wahrheiten als Konsequenzen dieser Axiome).⁴⁶

Für die menschliche Erkenntnis wurde aber so etwas bereits im Mittelalter stark bezweifelt. Ein berühmtes Beispiel ist die Frage nach der zeitlichen Dauer der Welt (des Universums). Ist die Welt ewig oder existiert sie eine endliche Zeitdauer? Diese Frage wurde für Bonaventura und Thomas von Aquin zur Streitfrage über die Vollständigkeit der Naturgesetze (Axiome) dieser Welt (des Universums): Bonaventura behauptete und verteidigte, daß diese Frage (ewig oder endliche Zeitdauer) mit Hilfe der wahren Naturgesetze dieser Welt entschieden werden kann. Thomas von Aquin argumentierte dafür, daß diese Frage mit Hilfe aller wahren Naturgesetze dieser Welt (des Universums) nicht entschieden werden kann, daß also das System aller wahren Naturgesetze dieser Welt unvollständig in bezug auf diese Frage ist. Er vertrat, daß sowohl die "Beweise" für die Ewigkeit, als auch die für die Zeitlichkeit Scheinbeweise sind und versuchte, jeweils die Beweisfehler

45. Infinit oder nicht finit axiomatisierbar heißt: die Zulassung von Axiomenschemata mit beliebig vielen Einsetzungen (d.h. Axiomen, die keine freien Variablen enthalten). Die Zulassung von unendlich vielen Axiomen wäre kein Gewinn, da man sie mit allen wahren physikalischen Sachverhalten gleichsetzen könnte.

46. Cf. dazu Thomas v. Aquin (Sth) I, q 14,7, wo diese Frage ausdrücklich diskutiert wird.

(Ableitungsfehler oder falschen Prämissen) aufzuzeigen. Ein wichtiger Grund für ihn war, daß es Zeit nur mit diesem Universum, d.h. mit den veränderlichen Körpern und gebunden an sie, nicht unabhängig oder "außerhalb" des Universums, gibt. In ähnlicher Weise gibt es für ihn Raum nicht als (absoluten) Behälter, sondern nur als Distanzen zwischen und Abmessungen von materiellen Körpern⁴⁷. Die Nähe zur Auffassung in der Relativitätstheorie ist unverkennbar.

Es gibt aber nicht nur diese Schwierigkeiten für eine positive Antwort auf 3.52. Sobald man statistisch-probabilistische Gesetze als echte Gesetze im Universum zuläßt, erlaubt man Verzweigungen und Vorhersagbarkeit nur für das Gesamtsystem, aber Nicht-Vorhersagbarkeit des Einzelfalles. Also ist ein solcher Einzelfall (das Abstrahlen eines bestimmten α -Teilchens im radioaktiven Zerfall oder das Auftreten eines bestimmten quantenmechanischen Tunneleffekts) nicht mit Hilfe des betreffenden statistisch-probabilistischen Gesetzes entscheidbar. Dies hängt wieder eng mit dem EPR-Paradoxon zusammen:

If ... we can predict with certainty ... the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity.

Wenn also der bestimmte Wert nicht sicher vorhersagbar ist, dann bleibt (nach Einstein) die Korrespondenz mit der Realität offen, d.h. diese Gesetze sind unvollständig in bezug auf dieses Element der physikalischen Realität.

Für die menschliche Erkenntnis werden wir daher die Frage 3.52 ebenfalls sicher – übereinstimmend mit Thomas von Aquin und Leibniz – mit Nein beantworten müssen.

3.53 Hat alles einen zureichenden Grund? Diese traditionelle Formulierung ist zu grob, um genauer beurteilt werden zu können. Die Erkenntnisse in den Naturwissenschaften führen zu spezifischeren Fragestellungen:

47. Cf. (STh) I, q 46.

3.54 Haben alle physikalischen Ereignisse dieser Welt (des Universums) einen physikalischen zureichenden Grund (eine physikalische Ursache) in dieser Welt (im Universum)? Anders formuliert: Ist diese Welt (das Universum) physikalisch ursachen-vollständig in bezug auf das Gebiet der physikalischen Ereignisse innerhalb dieser Welt? Das "innerhalb" heißt hier, daß nur Ereignisse "nach" der Entstehung der Welt berücksichtigt werden, nicht solche im Entstehungsprozeß, weil nach den heutigen kosmologischen Erkenntnissen nicht eindeutig ist, ob während dieses Prozesses bereits die heute bekannten Raum-Zeit-invarianten Gesetze gelten.

3.55 Haben alle physikalischen Ereignisse dieser Welt einen zureichenden Grund (eine zureichende Ursache) in dieser Welt? Hier ist nicht verlangt, daß die Ursachen oder Gründe physikalische Ereignisse sind. D.h. Nicht-Körperliches (Geistiges) wie Gedanken, Erkenntnisse, Bewertungen usw. sind als Gründe (Ursachen) für physikalische Ereignisse (z.B. Körperbewegung, Fahrzeuglenkung, seelische Verfassung und Krankheit, Operation, Schreiben eines Buches, technischer Bau nach Plan ... usw.) zugelassen⁴⁸. Anders formuliert: Ist diese Welt (das Universum) Ursachen-vollständig in bezug auf das Gebiet der physikalischen Ereignisse innerhalb dieser Welt?

Die Frage (3.54) ist sicher mit Nein zu beantworten. Physikalische Ursachen und Gründe sind nicht allein hinreichend für alle physikalischen Phänomene und Sachverhalte. Unzählige physikalische Prozesse sind mitverursacht von Tieren oder Menschen, die die körperliche Welt dauernd verändern. Lebende Systeme und Vernunftwesen sind aber nicht rein physikalische Ursachen.

48. Die mindestens mitverursachende Wirkung von Geistigem auf Körperliches wurde von vielen Philosophen eindeutig bejaht und begründet. Für eine zeitgenössische Argumentation im Lichte der gegenwärtigen Forschung siehe: Popper-Eccles (1982).

Die Frage (3.54) ist so formuliert, daß nur von der Verursachung durch physikalische Ereignisse (Phänomene, Sachverhalte) dieser Welt geredet wird. In der Frage 3.55 ist das offengelassen. Es ist nur von zureichenden Gründen (Ursachen) dieser Welt die Rede. Gehören dazu auch die Ereignisse bei der Entstehung des Universums? Inklusiv des "Big Bang"? Es ist naheliegend, daß bei einer solchen Hinzurechnung die Frage (3.55) eher zu verneinen ist. In den ersten Entstehungsphasen kann man schwerlich Raum-Zeit-invariante Naturgesetze im heute verstandenen Sinne annehmen, und deshalb tut man sich dann auch schwer, von Kausalität (Verursachung) durch "schon" bestehende Zustände oder Prozesse zu sprechen. Warum soll man annehmen, daß der "Big Bang" Ursachenvollständig (von der Welt her) ist?

Aber man braucht diese Fokussierung auf die Entstehung der Welt gar nicht zu machen, um zu sehen, daß eine positive Antwort auf 3.55 problematisch ist. Randbedingungen gehen nicht in die Gesetze ein. Also kann man für sie nicht in einem bestimmten Gesetz den hinreichenden Grund finden. Wie sind sie aber dann begründet? Gibt es einen hinreichenden Grund für Naturkonstanten – etwa für die Lichtgeschwindigkeit?⁴⁹ Oder für das Verhältnis von Proton und Elektronmasse (1 : 1836)? Oder für den bestimmten Betrag der Masse (Energie) des Universums? Alle diese Größen sind nicht naturgesetzlich vorgeschrieben, jedenfalls nach bisherigem Wissen nicht. Diese nicht von Gesetzen vorgeschriebenen Randbedingungen und andere Bedingungen sind ein zweites wichtiges Indiz dafür, daß die Frage 3.55 mit Nein zu beantworten ist.

Man kann die Frage 3.55 auch erkenntnistheoretisch stellen:

3.56 Haben alle physikalischen Ereignisse dieser Welt einen für den Menschen erkennbaren zureichenden Grund (Ursache) in dieser Welt? Auf Grund unserer Erfahrung in den Wissenschaften, daß sich die neuen Probleme eher

vervielfachen und trotz der zahlreichen Problemlösungen nicht vermindern (cf. den Hinweis auf Einstein bei Frage 3.51) ist es plausibel, diese Frage mit Nein zu beantworten. Aber unabhängig von einer solchen Plausibilitätsüberlegung folgt aus einem Nein auf die Frage 3.55 auch ein solches auf die Frage 3.56. Denn die vom Menschen erkennbaren zureichenden Gründe (in dieser Welt) sind eine Untermenge der tatsächlichen zureichenden Gründe (in dieser Welt).

Leibniz hat mit seinem Prinzip aber auch Gründe erlaubt, die außerhalb dieser Welt liegen und die sich auf Wirkungen beziehen, die nicht nur physikalische Ereignisse (Sachverhalte) sind, sondern beliebige Ereignisse und Sachverhalte. Bereits bei der Beantwortung von 3.54 und der Formulierung von 3.55 haben wir Gründe (nicht-materieller Art dieser Welt) zugelassen, die nicht mehr die Eigenschaften echter physikalischer Ursachen haben (also z.B. die Raum-Zeit-Invarianz oder die Gesetze der Relativitätstheorie nicht erfüllen). Wobei die Frage ob die "Fernwirkungen" oder Korrelationen, die von den oben angeführten Experimenten (cf. Kap. 3.43) nahegelegt werden, als Kausalität zu interpretieren sind, nach dem bisherigen Stand der Forschung eher offen bleiben muß.⁵⁰

Aber Leibniz geht in seinem Satz vom zureichenden Grund – wie große Philosophen der Antike und des Mittelalters – mit den möglichen und den tatsächlichen Gründen über diese Welt hinaus. Und mit Gott als dem Schöpfer und Erhalter dieser Welt kann er das System der Gründe und Ursachen für alle Ereignisse dieser Welt vervollständigen. Ein solcher Schritt wurde oft als unerlaubte Extrapolation kritisiert, weil dabei die Termini "Ursache" und "Grund" nicht mehr dieselbe Bedeutung haben, die sie in Anwendung auf Ereignisse und Prozesse dieser Welt haben. Dieser Punkt wurde schon im Mittelalter ausführlich diskutiert, und Thomas von Aquin hat dafür seine Analogie-

49. Cf. die Vermutung von A. Meessen, Anm. 19.

50. Cf. die Diskussion bei Suarez (1992).

lehre vorgeschlagen: diese Termini sind analog, d.h. haben tatsächlich verschiedene Bedeutung, aber darüber hinaus liegen ähnliche Proportionen (Isomorphien) vor, sodaß gewisse Relationen wie Irreflexivität oder Transitivität erhalten bleiben.

Durch das Einsetzen eines Schöpfers und Erhalters dieser Welt kann die Ursachen- und Begründungsvollständigkeit für Ereignisse und Sachverhalte dieser Welt (inklusive ihrer Entstehung) erreicht werden, und zwar im hinreichenden Sinne, noch nicht im notwendigen. So wie beim Auffinden von Prämissen, aus denen die Conclusio wirklich folgt, diese hinreichend sind, aber zunächst noch nicht notwendig, weil auch andere Prämissen für die Ableitung in Frage kommen können. Erst wenn alle anderen ausgeschlossen sind, sind die einzig übrig bleibenden Prämissen notwendig. Die Gottesbeweise versuchen diese Notwendigkeit zu zeigen: d.h. zu zeigen, daß die Annahme einer ersten Ursache, eines letzten Ziels, eines notwendigen Seienden, eines Weltschöpfers und Erhalters notwendig ist. Die Conclusio (das Konsequens) eines Beweises stellt ja immer die notwendige Bedingung in bezug auf das ganze Argument dar. Dabei stellt sich die Frage, ob die Welt (mit allen ihren Ereignissen und Sachverhalten) hinreichend ist, um die Existenz Gottes (oder bescheidener: einer ersten Ursache, eines Weltschöpfers ... usw.) zu begründen. Hier handelt es sich wieder um Vollständigkeit im ersten Sinne (cf. (1) und (2) oben):

3.57 Ist die Gesamtheit der wahren Aussagen über diese Welt (GW) vollständig in bezug auf welttranszendente Aussagen wie z.B.: Mindestens und höchstens eine erste Ursache für diese Welt existiert (abgekürzt: EU)? Ist EU aus dieser Gesamtheit GW ableitbar? Oder ist sowohl EU als auch non-EU mit GW widerspruchsfrei vereinbar? Im letzteren Fall wäre EU unabhängig von GW.

Aristoteles und große mittelalterliche Philosophen (wie Albertus Magnus, Thomas von Aquin oder Duns Scotus) haben angenommen,

daß EU aus der uns bekannten Untermenge von GW ableitbar ist. Dies haben sie in ihren Gottesbeweisen zu zeigen versucht. Dabei ist die formale Richtigkeit einiger solcher Beweise (d.h. daß die Konklusion wirklich aus den Prämissen folgt) mit den Hilfsmitteln der modernen Logik mehrfach gezeigt worden.⁵¹ Sodaß noch die Frage nach der Wahrheit der verwendeten Prämissen zu überlegen ist. Einige (wie: es gibt mindestens etwas, was bewegt, verursacht, verändert usw. wird) ist unschwer aus den wahren Sätzen über diese Welt zu gewinnen. Diejenige Prämisse, die immer als die meist problematische angesehen wurde, besagt, daß eine Verursachungskette endlich sein muß (nicht ins Unendliche fortsetzbar ist), wenn immer es sich um eigentliche Verursachung handeln soll (abgekürzt: KE). Wenn die Welt als endlich (räumlich und zeitlich) angenommen wird (wie in der Relativitätstheorie), ist diese Prämisse KE nicht so schwer zu verteidigen, sofern die Kausalkette auf die Welt beschränkt ist. Allerdings bleibt dann das Problem der Ausdehnung der Kausalrelation (d.h. gewisser formaler Eigenschaften von ihr, wie etwa bei Thomas von Aquin: Irreflexivität und Transitivität) in analoger Weise auf eine transzendente Ursache. Wenn die Welt zwar dem Raum nach, aber nicht der Zeit nach als endlich angesehen wird (dies selbst ist wahrscheinlich mit Hilfe von GW nicht entscheidbar, cf. 3.52f.), ist KE von vornherein nicht akzeptabel.

3.58 Ist die Gesamtheit der wahren Aussagen über diese Welt (GW) vollständig in bezug auf wichtige Fragen (bzw. deren Antworten) des Menschen, die ihn selbst betreffen? Gemeint sind Fragen wie: Ist die menschliche Seele unsterblich? Wird das personale Bewußtsein durch den Tod ausgelöscht? Gibt es eine ausgleichende Gerechtigkeit für menschliche

51. Cf. Ricken (1991) – dort weitere Literatur. Formalisierungen des Bewegungs-(Ursache-)Beweises von Thomas von Aquin wurden (u.a.) von Essler (1969) Kap. V,1 und Nieznanski (1981) gegeben.

Handlungen "nach" dem Tod? Was ist das Ziel des menschlichen Lebens?

Diese Frage ist mit Sicherheit zu verneinen. Eine Hauptfunktion der Religionen und ihrer Offenbarungstexte ist es, diese Unvollständigkeitslücke zu schließen oder mindestens im Sinne der Heilsfunktion auszufüllen. Und zwar so, daß für die Religionen – mindestens für die, die weltoffen sind, wie das Christentum, das Judentum oder der Islam – das System von GW + Offenbarung hinreichend vollständig ist, um alle Fragen, die zum Heil (ewigen Glück) notwendig sind, zu beantworten. Für weniger weltoffene Religionen mag nur jener Teil von GW, der die "Innenwelt" des Menschen (durch Meditation) betrifft, der maßgebliche sein. Aber allen Religionen ist gemeinsam, daß sie die oben angegebenen wichtigen Fragen des Menschen beantworten – unabhängig davon, ob sie ein teilweises Erforschen und Wissen von GW dafür als relevant unterstützend, irrelevant oder sogar schädlich ansehen.

Literatur

- Aristoteles: *Metaphysik*. Übers. v. H. Bonitz, neu bearbeitet von Horst Seidl. Band 1: Bücher I-VI (1978), Band 2: Bücher VII-XIV (1980). Felix Meiner, Hamburg.
- Aspect, A. - Dalibard, J. - Roger, G. (1982): Experimental Tests of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. In: *Physical Review Letters* 49, pp. 1804-1807.
- Bell, J.S. (1992): Indeterminismus und Lokalität. In: Reichel - Prat (1992), pp. 85-98.
- Bernays, P. (1958): *Axiomatic Set Theory*. North Holland, Amsterdam.
- Bernays, P. (1976): Thesen und Bemerkungen zu den philosophischen Fragen und zur Situation der logisch-mathematischen Grundlagenforschung. In: Bernays (1976), P.: *Abhandlungen zur Philosophie der Mathematik*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, pp. 79-84.
- Berry, M.V. - Percival, I.C. - Weiss, N.O. (eds.) (1987): Dynamical Chaos. In: *Proceedings of the Royal Society of London A* 413 (Nr. 1844).
- Birkhoff, G. - v. Neumann, J. (1936): The Logic of Quantum Mechanics. In: *Annals of Mathematics* 37(1936), pp. 823-843.
- Carnap, R. (1963): *The Philosophy of Rudolf Carnap* (ed. P.A. Schilpp). Open Court, La Salle/Illinois.
- Clauser, J.F. - Shimony, A. (1978): Bell's Theorem: Experimental Tests and Implications. In: *Reports on Progress in Physics* 41, pp. 1881-1927.
- Einstein, A. (1949): *Albert Einstein. Philosoph - Scientist* (ed. P.A. Schilpp). Open Court, La Salle/Illinois.
- Einstein, A. - Podolsky, B. - Rosen, N. (1935): Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? In: *Physical Review* 47, pp. 777-780. Neudruck in: Wheeler, A. - Zurek, W.H. (eds.) (1983): *Quantum Theory and Measurement*. Princeton University Press, Princeton.
- Essler, W.K. (1969): *Einführung in die Logik*. Kröner, Stuttgart.
- Fraenkel, A. - Bar-Hillel, Y. - Levy, A. (1973): *Foundations of Set Theory*. North-Holland, Amsterdam.
- Giannoni, M.J. - Voros, A. - Zinn-Justin, J. (eds.) (1991): *Chaos and Quantum Physics*. Sitzung der École d'Été de Physique Théorique, Les Houches, Université de Grenoble, 52, 1989. North-Holland, Amsterdam.
- Gödel, K. (1930): Die Vollständigkeit der Axiome des logischen Funktionenkalküls. In: *Monatshefte für Mathematik und Physik* 37, pp. 349-360.
- Gödel, K. (1931): Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. In: *Monatshefte für Mathematik und Physik* 38, pp. 173-198.
- Hermes, H. (1975): Ideen von Leibniz zur Grundlagenforschung: Die ars inveniendi

- und die ars iudicandi. In: Müller, K. - Schepers, H. - Totok, W. (eds.): *Studia Leibnitiana Supplementa*. Vol. 15-4. F. Steiner, Wiesbaden.
- Ioos, G. - Helleman, R.G.H. - Stora, R. (eds.) (1983): *Chaotic Behaviour of Deterministic Systems*. Sitzung der École d'Été de Physique Théorique, Les Houches, Université de Grenoble, 36, 1981. North-Holland, Amsterdam.
- Jauch, J.M. - Piron, C. (1970): What is Quantum Logic? In: P. Freund et al. (eds.): *Quanta*. University of Chicago Press, Chicago, pp. 166ff.
- Leibniz, G.W. (OF): *Opusculum et fragments inédits de Leibniz* (ed. L. Couturat). Paris 1903. Nachdruck: Olms, Hildesheim 1961.
- Leibniz, G.W. (GP): *Die philosophischen Schriften von G.W. Leibniz* (ed. C.I. Gerhardt). 7 Vols. Berlin 1875-90. Nachdruck: Olms, Hildesheim 1960-1961.
- Lichtenberg, A.J. - Liebermann, M.A. (1983): *Regular and Stochastic Motions*. Springer, New York.
- Lighthill, J. (1986): The Recently Recognized Failure of Predictability in Newtonian Dynamics. In: *Proceedings of the Royal Society London A* 407 (Nr. 1822), pp. 35-50.
- Meessen, A. (1989): Is it Logically Possible to Generalize Physics through Space-Time-Quantization? In: Weingartner, P. - Schurz, G. (eds.): *Philosophie der Naturwissenschaften. Akten des 13. Intern. Wittgenstein Symposiums 1988*. Hölder-Pichler-Tempsky, Wien, pp. 19-47.
- Miles, J. (1984): *Physica D* 11. pp. 309ff.
- Mittelstaedt, P. (1978): *Quantum Logic*. Reidel, Dordrecht.
- Nieznanski, E. (1981): Ein formalisierter Beweis für die Existenz eines ersten notwendigen Seienden. In: Morscher, E. et al. (ed.): *Philosophie als Wissenschaft*. Comes Verlag, Bad Reichenhall, pp. 379-389.
- Pais, A. (1991): Niels Bohr's Times. In: *Physics, Philosophy and Polity*. Clarendon Press, Oxford.
- Paris, J. - Harrington, L. (1977): A Mathematical Incompleteness in Peano Arithmetic. In: Barwise, J. (ed.): *Handbook of Mathematical Logic*. North-Holland, Amsterdam, pp. 1133-1142.
- Popper, K.R. - Eccles, J. (1982): *Das Ich und sein Gehirn*. Piper, München.
- Redhead, M. (1987): *Incompleteness, Nonlocality and Realism. A Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics*. Clarendon Press, Oxford.
- Reichel, H.C. - Prat de la Riba, E. (eds.) (1992): *Naturwissenschaft und Weltbild*. Hölder-Pichler-Tempsky, Wien.
- Rescher, N. (1967): *The Philosophy of Leibniz*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Rescher, N. (1969): *Many Valued Logic*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Ricken, F. (ed.) (1991): *Klassische Gottesbeweise in der Sicht der gegenwärtigen Logik und Wissenschaftstheorie*. Kohlhammer, Stuttgart.
- Schurz, G. - Weingartner, P. (1987): Verisimilitude Defined by Relevant Consequence-Elements. A new Reconstruction of Popper's Original Idea. In: Kuipers, Th. (ed.): *What is Closer-to-the-Truth?* Rodopi, Amsterdam, pp. 47-77.
- Suarez, A. (1992): Unentscheidbarkeit, Unbestimmtheit, Nicht-Lokalität. Gibt es unverfügbare Kausalverbindungen in der physikalischen Wirklichkeit? In: Reichel - Prat (1992).
- Thomas von Aquin (STh): *Summa Theologica. Die Deutsche Thomas Ausgabe (deutsch-lateinisch)*. Pustet, Salzburg 1934-39; Graz-Wien-Salzburg 1950-.
- Weingartner, P. (1983): The Ideal of Mathematization of All Sciences and of 'More Geometrico' in Descartes and Leibniz. In: Shea, W.R. (ed.): *Nature Mathematized*. Reidel, Dordrecht, pp. 151-195.

- Weingartner, P. (1988): Remarks on the Consequence-Class of Theories. In: Scheibe, E. (ed.): *The Role of Experience in Science. Proceedings of the 1986 Conference of the Académie Internationale de Philosophie des Sciences*. deGruyter, Berlin, pp. 161-180.
- Weingartner, P. (1992): Philosophische Probleme und ihre Verwurzelung in der Mathematik. In: Reichel - Prat (1992), pp. 147-176.
- Weingartner, P. (1993): A Logic for QM Based on Classical Logic. In: Maria de la Luiz Garcia Alonso - Moutsopoulos, E. - Seel, G. (eds.): *L'art, la science et la metaphysique. (Festschrift für André Mercier)*. Peter Lang, Bern.
- Weingartner, P. (1996): Some Critical Remarks on Definitions and on Philosophical and Logical Ideals. In: Odifreddi, G. (ed.): *Kreiseliana: about and around Georg Kreisel*. Peters, Wellesley, Massachusetts, pp. 417-438.
- Zeilinger, A. (1992): Physik und Wirklichkeit. Neuere Entwicklungen zum Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon. In: Reichel - Prat (1992), pp. 99-121.