Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
Debatte
Heft 5

Herausgeber: Präsident der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften Redaktion: Freia Hartung Satz: Kathrin Künzel Umschlagentwurf: Carolyn Steinbeck · Gestaltung Druck: Oktoberdruck, Berlin

© Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin 2007 Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Herausgebers gestattet.

ISBN: 978-3-939818-07-6

#### Kausalität

Streitgespräche in den Wissenschaftlichen Sitzungen der Versammlung der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften am 9. Dezember 2005 und 5. Mai 2006

Vorbemerkung
Kausalität, Teil I
Jürgen Mittelstraß
Kausalität – Einführung in ein akademisches Streitgespräch
Harald Fritzsch
Kausalität – Streitgespräch
Siegfried Großmann
Kausalität aus der Sicht eines Physikers
Anton Zeilinger
Die neue Art des Zufalls in der Quantenwelt
Reinhold Kliegl
Zur Wahrnehmung und (Selbst-)Attribution von Kausalität
Advanta Hallista
Martin Hellwig  Zur Kategorie der Kausalität in den Wirtschaftswissenschaften
Christine Windbichler Kausalität im Zivilrecht
Radsamar iii Ziviii ediii
Jürgen Osterhammel
Kausalität: Bemerkungen eines Historikers
Christoph Markschies
Thesen für ein Gespräch über Kausalität

### Kausalität, Teil II

Vorbemerkung	87
Ortwin Renn	
Thesen für ein Gespräch über Kausalität	89
Diskussion	101
Autoren	133

## Vorbemerkung

Im Rahmen der Akademischen Streitgespräche wurde in der Wissenschaftlichen Sitzung der Versammlung am 9. Dezember 2005 eine interdisziplinäre Debatte zum Begriff Kausalität aufgenommen. In der zweieinhalbstündigen Sitzung hielten Mitglieder aller Klassen Kurzvorträge zum Thema. Die abschließende zweistündige Diskussion wurde in der Sitzung am 5. Mai 2006 geführt.

Beide Veranstaltungen waren von Harald Fritzsch, Reinhold Kliegl und Jürgen Mittelstraß vorbereitet und moderiert worden.

Kausalität

Teil I

# Kausalität Einführung in ein akademisches Streitgespräch

Es gibt Begriffe, die in einem bestimmten Sinne sowohl unter extensionalen, die Klasse derjenigen Gegenstände, denen sie zukommen, betreffenden, als auch unter intentionalen, ihren Bedeutungsgehalt betreffenden Gesichtspunkten als universal gelten dürfen. Als universal jedenfalls in dem Sinne, daß ihre Anwendbarkeit universal ist. Zu derartigen Begriffen gehört der Begriff der Kausalität. Wir sprechen von Naturkausalitäten und Handlungskausalitäten und machen damit deutlich, daß Kausalität nicht nur ein Gesichtspunkt ist, unter dem wir das Reich der Natur zu beschreiben und zu erklären versuchen, sondern auch ein Gesichtspunkt, unter dem wir uns, wiederum beschreibend und erklärend, in Handlungskontexten, pointiert und mit dem klassischen Vokabular formuliert: im Reich der Freiheit zu orientieren suchen.

Mit anderen Worten: Auf Kausalitäten stoßen wir sowohl dort, wo es um das Begreifen im Kontext 'natürlicher' Vorgänge geht, zum Beispiel in der Physik, als auch dort, wo es um das Begreifen 'artifizieller' Vorgänge im Handlungskontext geht (z. B. in der Rechtswissenschaft). Nicht allein in dem Sinne, daß Naturkausalitäten unser Handeln bestimmen – das ist immer auch der Fall –, sondern auch in dem Sinne, daß der Handlungsbegriff selbst einen Wirkungsbegriff, nämlich bezogen auf das Resultat der Handlung, einschließt. Das heißt, ein Ursache-Wirkungsschema bestimmt sowohl die Rede von Naturkausalitäten (Kausalität im engeren Sinne) als auch die Rede von Handlungskausalitäten (Kausalität im weiteren, intentionale Aspekte einschließenden Sinne), was eben auch bedeutet, daß Kausalität und Intentionalität zwar ganz unterschiedliche Begriffe, im Handlungskontext aber gemeinsam anwendbare Begriffe sind. Dabei gilt eine Intention als Grund für die Ausführung einer Handlung und als Ursache in einer kausalen Verbindung zwischen Intention und physischem Vollzug einer Handlung. Wo darin ein Gegensatz gesehen wird, trennen sich erkenntnistheoretisch die Wege von Intentionalismus und Kausalismus.

Kein Wunder darum auch, daß der Begriff der Kausalität von alters her ein Kernbegriff aller erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen Reflexionen ist, ganz gleich, ob es um ein Begreifen dessen geht, was ohne uns geschieht, oder um ein Begreifen dessen, was durch uns geschieht. Auch der Naturwissenschaftler wird zum Erkenntnis- und Wissenschaftstheo-

retiker, wenn er sich im Begriffsfeld von Kausalität bewegt, zu dem zum Beispiel die Unterscheidung zwischen einem Kausalgesetz (gleiche Ursachen haben gleiche Wirkungen) und einem Kausalprinzip (dem methodischen Postulat, eingetretene Ereignisse auf vorhergehende Ereignisse zurückzuführen) gehört, desgleichen die Unterscheidung zwischen Determiniertheit und Indeterminiertheit (von Zuständen, Vorgängen und Ereignissen).

Dabei spricht unter Prioritätsgesichtspunkten erkenntnistheoretisch vieles für den Begriff der Handlungskausalität, insofern auch die Rede von Naturkausalitäten erst verständlich wird, wenn wir schon gelernt haben, zwischen Handlungsintention, Handlungsausführung und Handlungsfolgen zu unterscheiden – weshalb im übrigen nicht zufällig frühe Kausalitätstheorien (etwa die Aristotelische) teleologische Aspekte einschlossen. Gemeint ist, daß Ereignisse so verstanden werden können, als wären die 'ursächlichen' Ereignisse Handlungen bzw. Handlungsresultate, die sich einer Zwecksetzung verdanken. Auf diese Konzeption bezieht sich denn auch die so genannte interventionalistische Theorie der Kausalität, wonach sich Kausalität primär nicht in beobachtbaren Regularitäten, sondern in experimentellen Einflußnahmen ausdrückt. Darauf wiederum stützt sich die aus Gründen begrifflicher Kohärenz problematische, unter anderem mit der Geltung bzw. Nicht-Geltung einer kausalen Theorie der Zeit zusammenhängende Retrokausalitätsthese, wonach die Ausführung einer Handlung Ursache des mit ihr verbundenen neurophysiologischen Vorganges ist, obwohl dieser der Handlung zeitlich vorausgeht. Womit wir wieder – was wir aber heute nicht wollen – bei der akademischen Rauferei um den freien Willen angelangt wären.

Harmloser ist da eher die mit dem Stichwort Kausalität ebenfalls verbundene Unterscheidung zwischen Zufall und Notwendigkeit. Modallogisch (und zwar sowohl im logischen als auch im ontischen, auf das Seiende bezogenen und im deontischen, auf das Seinsollende bezogenen Sinne) ist das Zufällige oder Kontingente das nicht Notwendige und das Notwendige das nicht Zufällige und nicht Kontingente. Im Kausalitätszusammenhang hat die Entscheidung für das eine, das Zufällige und Kontingente, oder das andere, das Notwendige, weitreichende, selbst bis ins Anthropologische gehende Folgen. So ist in der Biologie in der bekannten Darstellung Jacques Monods die Morphogenese durch die DNA determiniert, wobei Enzyme, die das Wachstum steuern, als Gleichrichter für Entropieschwankungen (als so genannte 'Monodsche Dämonen') auftreten. Gleichzeitig wird aber auf die wesentliche Rolle zufälliger Störungen (Mutationen) hingewiesen, ohne die es keine Evolution gäbe. Dies

Dazu Gabriel, G., Janich, P. & K. Mainzer: Kausalität. In: Mittelstraß, J. (Hg.), Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie, I-IV, Stuttgart, Weimar 1995–1996, II, S. 372–376; Carrier, M.: Retrokausalität, a. a. O., III, S. 602; ders.: Ursache, a. a. O., IV, S. 442–444.

wiederum führt bei Monod zu geradezu existenzphilosophischen Folgerungen: "Wenn er diese Botschaft in ihrer vollen Bedeutung aufnimmt, dann muß der Mensch [...] seine totale Verlassenheit, seine radikale Fremdheit erkennen. Er weiß nun, daß er seinen Platz wie ein Zigeuner am Rande des Universums hat, das für seine Musik taub ist und gleichgültig gegen seine Hoffnungen, Leiden oder Verbrechen."<sup>2</sup> Der Preis einer durch den Zufall gesteuerten Evolution ist offenbar kosmologische Einsamkeit. Keine Spur mehr von aufklärerischem Optimismus oder Leibnizens bester aller möglichen Welten.

Möglicherweise – das mag hier tröstlich sein – hat der Zufall, von dem Monod spricht, nur damit zu tun, daß sich eine komplexe Situation nicht vollständig erfassen läßt, daß die Gesetze der Biologie also durchaus auch deterministisch sein könnten; in der Physik scheint er, wie heute viele glauben, eine konstitutive Rolle zu spielen. So geht – hier greife ich schon einmal auf physikalische Themen vor – die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik, das heißt der Theorie der mikrophysikalischen Erscheinungen, von der Annahme eines irreduziblen ontologischen Zufalls, das heißt der Existenz eines absoluten Zufalls in der physischen Welt, aus. Doch ist diese Annahme nicht unumstritten. Eine andere Deutung, nämlich die Bohmsche Interpretation der Quantenmechanik, legt nahe, daß sich die Quantenwelt durchaus mit einer kausal-deterministischen Sprache erfassen läßt. Daraus sowie aus der Feststellung, daß die Bohmsche und die Kopenhagener Variante der Quantenmechanik empirisch ununterscheidbar sind<sup>3</sup>, folgt dann, daß sich womöglich nicht herausfinden läßt, ob es tatsächlich den absoluten Zufall in der Welt gibt oder nicht. Alles Für und Wider scheint hier relativ zu einer physikalischen Theorie und deren Interpretation zu sein. Woher sollten wir auch wissen, ob es nicht – Einsteins Mahnung im Sinn, daß Gott nicht würfelt – stets eine tiefere deterministische Beschreibungsmöglichkeit gibt? Nicht nur die Philosophie, auch die Naturwissenschaft hat ihre liebe Not mit Zufall und Notwendigkeit, damit aber auch mit der Kausalität, über die sich im Kontext von Natur und Freiheit, Determiniertheit und Nicht-Determiniertheit, Zufall und Notwendigkeit trefflich streiten läßt.

Im übrigen wird in der Wissenschaftstheorie derzeit auch darüber gestritten, ob unterschiedliche Formen von Naturkausalität überhaupt unter ein und denselben Kausalitätsbegriff fallen. Ausgearbeitete Konzeptionen reichen von kontrafaktischen Erklärungsansätzen (D. Lewis) über, wie schon erwähnt, mechanistisch-interventionistische Ansätze (J. Woodward)

Monod, J.: Le hazard et la nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne, Paris 1970, S. 187f. (dt. Zufall und Notwendigkeit. Philosophische Fragen der modernen Biologie, München 1971, 1973, S. 211).

<sup>3)</sup> Vgl. Mittelstraß, J.: Konstruktion und Deutung. Über Wissenschaft in einer Leonardo- und Leibniz-Welt, Berlin 2001, S. 18.

bis hin zu statistischen Ansätzen (C. Glymour). Die Frage ist dann, ob hier eine Familienähnlichkeit verwandter Ansätze gegeben ist, oder ob es nicht doch möglich ist, diese unter eine einheitliche Theorie der Naturkausalität zu bringen. Es gibt auch wissenschaftstheoretisch in Sachen Kausalität noch viel zu tun.

Auch das heutige Streitgespräch soll dem nun schon erprobten Muster früherer Streitgespräche folgen, wobei eine gewisse Besonderheit darin liegt, daß gleich drei Mitglieder der Akademie – Herr Fritzsch, Herr Kliegl und ich – die Moderation übernommen haben. Das mag ein Zeichen von bemerkenswertem multidisziplinärem Interesse, aber auch von Komplexität (des hier im Mittelpunkt stehenden Begriffes) sein. Nach meiner kleinen philosophischen Einführung spricht jetzt der Physiker Fritzsch, der zugleich zu zwei ersten Statements (aus dem Bereich der Naturwissenschaften) überleitet, dann der Psychologe Kliegl, mit einer Überleitung zu einem rechtswissenschaftlichen und einem wirtschaftswissenschaftlichen Statement, dem sich dann zwei geisteswissenschaftliche Beiträge, aus historischer und aus theologischer Sicht, anschließen. Ein bunter Kranz wäre damit gebunden. Und hoffentlich gibt's Streit.

### Kausalität – Streitgespräch

In reiner Form ist Kausalität realisiert in Newtons Mechanik. Sind die Anfangsbedingungen exakt gegeben, kann man die künftige Entwicklung exakt voraussagen. Der Laplacesche Dämon kommt voll zum Tragen. Im Grunde gibt es auf der Grundlage der Newtonschen Mechanik auch keinen freien Willen mehr, alles ist eindeutig festgelegt. Im Urknall wurde danach bereits festgelegt, daß wir heute am 9. Dezember 2005 hier in Berlin dieses Gespräch führen – eine seltsame Behauptung.

Nach Ernst Mach, der die klassische Kausalität in der Newtonschen Theorie sehr kritisiert hat, gibt es in der Natur weder reale Ursachen noch klare Kausalitätsverhältnisse, sondern nur funktionale Beziehungen.

Tiefgreifende Umwälzungen im Verständnis der Kausalität brachten jedoch erst die Entwicklungen der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik, und zwar durchaus in die Richtung, die Mach vorgegeben hatte. Einstein wurde durch die Lektüre des Buchs von Mach angeregt, über Fragen nachzudenken, die letztlich zur Relativitätstheorie führten.

In der Relativitätstheorie können Ereignisse nur mit Ereignissen aus dem kausal verknüpften Teil des Raum-Zeit-Kontinuums verbunden sein, nicht mit allen ihnen zeitlich vorangehenden, wie das die klassische Physik vorsah. Da sich Wirkungen nur mit maximal Lichtgeschwindigkeit ausbreiten können, ist die absolute Vergangenheit ein Kegel in der Raumzeit, der Vergangenheitslichtkegel; ebenso ist die absolute Zukunft durch den Zukunftslichtkegel gegeben.

Zwischen Raum-Zeit-Gebieten, die raumartig zueinander liegen, gibt es keinerlei ursächliche Beziehungen. Die Kausalität impliziert auch keine absolute Gleichzeitigkeit mehr. Gleichzeitigkeit wird ein relativer Begriff. Was in einem System zur gleichen Zeit stattfindet, ist in einem anderen Bezugssystem nicht mehr gleichzeitig. Die Zeit ist also nicht mehr absolut vorgegeben, wie in der Newtonschen Theorie. Zeit kann beliebig gedehnt werden, sobald die Geschwindigkeiten vergleichbar mit der Lichtgeschwindigkeit sind. Raum und Zeit sind zu einer Einheit geworden. Alle Zeitkoordinaten der Relativitätstheorie haben aber gemeinsam, daß kausal zusammenhängende Ereignisse dieselbe Reihenfolge haben. Die Ursache ist also stets zeitlich vor der Wirkung.

Auch in der Quantenmechanik geht man zwar davon aus, daß Wirkungen Ursachen haben, aber es wird nicht mehr angenommen, daß erstere aufgrund der Beobachtung von letzteren eindeutig vorhersagbar seien. Beispielsweise können wir einen radioaktiven Atomkern beobachten, aber prinzipiell nicht vorhersagen, wann dieser zerfallen wird. Es ist nicht unsere Unkenntnis, daß wir das nicht können, sondern es ist prinzipiell nicht möglich, wie zuerst von Bohr und Heisenberg erkannt wurde. Die Quantenmechanik lehrt, daß wir auf Grund prinzipiell einschränkender Naturgesetze lediglich die Wahrscheinlichkeit von späteren Beobachtungen vorhersagen können.

Die Newtonsche Kausalität wird deswegen aufgehoben, weil es nicht möglich ist, den Anfangszustand eines Systems genau zu kennen. Die Unschärferelation verbietet dies. Die genaue Kenntnis des Ortes eines Teilchens macht es unmöglich, daß man auch eine genaue Kenntnis über die Geschwindiakeit des Teilchens haben kann.

Was im einzelnen Fall nun tatsächlich geschieht, hängt vom objektiven Zufall ab. Die Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik besagt auch, daß das Ergebnis entscheidend vom Beobachter beeinflußt wird. Auch diese Idee hat weitreichende philosophische Konsequenzen: sie stellt das Wesen der physikalischen Realität in Frage. Es gab Versuche, die Kopenhagener Interpretation aufzuheben, etwa durch David Bohm, der verborgene Parameter einführte, die dann ein streng kausales Ablaufen der Naturprozesse garantierten.

1916 leistete Einstein einen wichtigen Beitrag zur Quantentheorie. Er erkannte: Wenn ein angeregtes Atom ein Photon emittiert, dann kann die Theorie weder den genauen Zeitpunkt noch die Richtung, in der das Photon emittiert wird, voraussagen. Einstein stellte fest, daß die Theorie das klassische Kausalitätsgesetz verletzt. Dieses würde besagen: Wenn sich das System in einem Zustand befindet, den wir genau kennen, dann kann sein Verhalten zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt exakt vorausgesagt werden. Dies ist jedoch in der Quantentheorie prinzipiell nicht möglich – ein Problem für die klassische Kausalität. Sie wird aufgeweicht. Es wird unmöglich, die Zukunft eines Systems genau im voraus zu berechnen. Man kann also nur Wahrscheinlichkeiten angeben. Einstein wehrte sich dagegen, indem er behauptete, daß Gott nicht würfelt. Wir müssen heute jedoch davon ausgehen, daß er dies in der Tat macht.

Aus der Sicht der heutigen Physik ist die Kausalität ein vielschichtiges Phänomen, das man zwar von vielen Seiten beleuchten kann, aber nicht eindeutig wirklich beschreiben kann. In diesem Streitgespräch wollen wir diese Beleuchtung von möglichst vielen Seiten vornehmen. Auch wird die Frage aufkommen, ob wir mit Kausalität in der Naturwissenschaft dasselbe meinen wie die Geisteswissenschaftler, wenn sie über Kausalität reden. Ich denke, daß es

hier beträchtliche Unterschiede gibt. Der Begriff der Kausalität, wie er in den Geisteswissenschaften verwendet wird, ist viel weiter gefaßt, als in den Naturwissenschaften.

### Kausalität aus der Sicht eines Physikers

Für einen Physiker ist das Thema gewissermaßen wissenschaftlicher Alltag. Wir versuchen permanent, aus unseren Beobachtungen zu lernen, wie man Ursachen so setzen kann, daß gewollte Wirkungen entstehen. Insoweit ist Physik geradezu instrumentalisierte Kausalität. Nun kann es sehr wohl sein, daß wir durch das erfolgreiche Setzen solcher Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge unsere Vorstellung von Kausalität gegenüber anderen Definitionen dieses Begriffs für uns zurechtbiegen, physikalische Kausalität also durch unser Tun quasi neu definieren. Das würde uns aber nicht einmal betrüben.

Unsere gewonnenen Einsichten schreiben wir als mathematisch formulierte Naturgesetze auf. Da ist einmal die klassische Mechanik der Bewegung von Körpern, idealisiert als Massenpunkte an Stellen  $\vec{x}(t)$  mit Geschwindigkeiten  $\vec{x}(t)$ . Da ist zum anderen die Beschreibung durch Felder wie zum Beispiel das elektrische Feld  $\vec{E}(\vec{x},t)$ , das Schrödinger Feld  $\psi(\vec{x},t)$ , das Feld des metrischen Tensors  $g_{\mu\nu}(x^{\alpha})$  und andere. Für sie alle schreiben wir Differentialgleichungen auf. Deren Lösungen machen Angaben darüber, was aus einem gegebenen Zustand zur Zeit  $t_0$  dann zu späteren Zeiten wird. In diesem Sinne liefern die Bewegungsgleichungen als solche par excellence kausale Beschreibung. Und zwar alle Bewegungsgleichungen, auch die für das Schrödinger Feld  $\psi$  der Quantenmechanik.

Ich möchte mich im Folgenden auf die klassische Mechanik beschränken. Obwohl sie in unserem Bewußtsein wie auch in dem unserer Denker und Philosophen als der Repräsentant einer kausalen Welt gilt, möchte ich Ihnen zeigen, daß sie genauer betrachtet sehr viel bescheidenere Aussagen macht, daß sie Kausalität in der physikalischen Welt keineswegs experimentell sichert.

In Abbildung 1 skizziere ich kurz das mathematische Modell der klassischen Mechanik. Isaak Newton (1643–1727) hat die Bewegungsgleichung  $m\vec{x}=\vec{F}(\vec{x})$  angegeben. Man kann auch andere, scheinbar finale aber äquivalente Formeln verwenden, etwa das Extremalprinzip  $\int_{r_i}^{r_2} L(\vec{x}(t), \vec{x}(t)) dt = Extremum$ , wie es Joseph Lagrange (1736–1813) formulierte oder die Hamiltonschen Gleichungen (William Hamilton, 1805–1865), mit oder ohne Reibungskräfte. In jedem Falle ergeben die Lösungen  $\vec{x}(t; \vec{x}_0, \vec{x}_0, t_0)$  die gesamte Bahnbewegung des Körpers. Man kann seine Lage und Geschwindigkeit zu allen späteren Zeiten t angeben, wenn

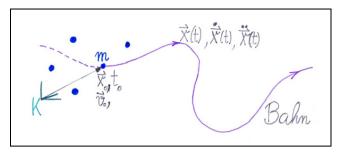


Abbildung 1 Bahn eines (von mehreren) klassischen Massenpunktes; K ist das Bezugssystem

man nur weiß, an welcher Stelle  $\vec{x}_0$  und mit welcher Geschwindigkeit  $\vec{x}_0$  es zur Zeit  $t_0$  losgegangen ist. Und man kann auch Ursachen angeben, indem man einfach nach den Zuständen (also den Lösungen) zu früheren Zeiten  $t_0$  fragt, deren Bahnbewegung dann durch  $t_0$  führt, also  $t_0$  betrachtet, die vor  $t_0$  liegen.

Der ehrwürdige Gründer unserer Akademie, Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716), drückte das in seiner Schrift Von dem Verhängnisse, 1695, so aus: "Daß sich alles durch feststehende, unzweifelhafte Bestimmung weiterentwickelt, ist ebenso sicher wie daß 3 mal 3 gleich 9 ist. [...] Wenn zum Beispiel eine Kugel im freien Raum auf eine andere Kugel trifft und wenn beider Größen und Geschwindigkeiten und Richtungen vor dem Stoß bekannt sind, dann können wir berechnen und vorhersagen, wie sie gestreut und welche Bahnen sie nach dem Stoß machen werden. Das folgt aus sehr einfachen Gesetzen, die auch gelten, wenn beliebig viele andere Kugeln oder Objekte vorhanden sind. Daraus erkennt man, daß alles in der ganzen weiten Welt mathematisch vorangeht, also unfehlbar, so daß, falls jemand hinreichende Kenntnis beziehungsweise Einsicht in die innere Struktur der Dinge und außerdem genug Erinnerungsvermögen und Intelligenz hätte, um alle Umstände in Betracht zu ziehen, er ein Prophet sein würde, der die Zukunft wie in einem Spiegel sähe." Solches wurde also schon lange vor Pierre Simon Marquis de Laplace (1749–1827) gesagt, dessen berühmter Dämon in diesem Zusammenhang gern zitiert wird.

Die praktische Alltagswichtigkeit solcher klassischen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und der Möglichkeit, Wirkungen beziehungsweise Ereignisse vorherzusagen oder ungewünschte Geschehnisse zu vermeiden, ist offenkundig. Wir fahren bedenkenlos Auto, wir steigen in

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Aus einer englischen Version zurückübersetzt.

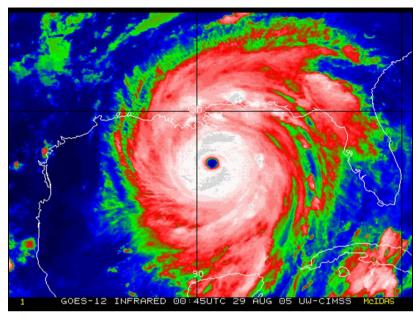


Abbildung 2 Wirbelsturm Katrina (NASA Aufnahme, von Wikipedia, Internet)

Flugzeuge, um zu fliegen, wir verwenden eine Vielzahl von technischem Gerät, starten Raketen, schicken etwa die Cassini-Huyghens Sonde unter subtiler Nutzung der Schwerefelder der zu passierenden Planeten zum Saturnmond Titan, usw. Kausalität bedeutet insoweit Determiniertheit und damit Vorhersagbarkeit. Umgekehrt setzt Vorhersage kausales Geschehen voraus.

Manchmal allerdings scheint es ärgerliche Schwierigkeiten mit Kausalketten oder mit der Vorhersagbarkeit zu geben. Etwa beim Start von Raketen, wenn sie verunglücken, bei deren unerwartetem Verglühen bei der Rückkehr, bei der mangelhaften Vorhersage der zerstörerischen Bahn eines Hurrikans (Abb. 2) oder bei extremen Wetterereignissen wie etwa dem jüngsten Schneechaos im Münsterland. Noch deutlicher sind uns die Probleme bei langfristigen Vorhersagen bewußt, wie etwa bei der Klimaentwicklung (Abb. 3).

Versagt die Kausalität hier also? Das glauben wir natürlich nicht, sonst würden wir ja nicht nach Ursachen suchen. Auch machte es dann keinen Sinn, politische Entscheidungen daraus abzuleiten. Und obwohl es sich herumgesprochen hat, daß die Quantenmechanik

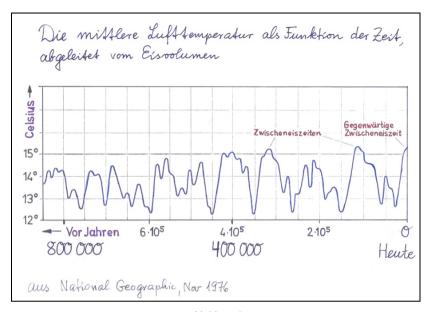


Abbildung 3 Unregelmäßige und für die Zukunft kaum vorhersagbare Entwicklung der mittleren Lufttemperatur während der letzten circa 1 Million Jahre

keine im klassischen Sinne kausale Physik ist: der Quantenmechanik werden wir ja diese genannten und andere makroskopischen Fälle mangelnder Vorhersagbarkeit oder nicht aufzeigbarer Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge kaum in die Schuhe schieben wollen.

Es gibt nun aber bei der als kausal be(vor-)urteilten klassischen Mechanik ein proviso: Wenn(!) man weiß, daß der Massenpunkt m zur Zeit  $t_0$  an der Stelle  $\vec{x}_0$  ist und die Geschwindigkeit  $\vec{x}_0$  hat, dann(!) kann man ausrechnen ... Man weiß es aber eben nicht! Und zwar nicht nur in besonderen Ausnahmefällen nicht, sondern, wie jetzt zu überlegen sein wird, arundsätzlich nicht!

Darf ich Sie beispielsweise fragen: Wo befinden Sie sich jetzt gerade, wie weit etwa von der Eingangstür entfernt? Ich selbst antworte so: Ungefähr 8 m. Na ja, 8 m und 55 cm. Dazu bedarf es dann schon eines Zollstocks. Noch genauer? Es ergibt sich 8 m und 55 cm und 3 mm; statt 3 mm könnten es allerdings auch  $3\frac{1}{2}$  mm oder 4 mm sein. Eine Ungenauigkeit von ungefähr 1 mm bei ungefähr 10 m Entfernung wäre eine relative Genauigkeit von  $\epsilon \approx 10^{-4}$ .

Und so ähnlich geht es uns, geht es dem messenden Physiker, immer, wenn man die Anfangswerte angeben will. Stets gibt es eine mehr oder weniger große Ungenauigkeit, gibt es einen Messfehler  $\epsilon$ , bei der Angabe des Ist-Zustandes.  $\epsilon$  ist echt größer als Null!  $\epsilon>0$  gehört zur klassischen Physik unvermeidlich dazu.

Mit dramatischen Konsequenzen! Wie in Abbildung 4 dargelegt, müssen wir statt von einem Anfangswert  $x_0$  richtiger von einem ganzen  $\epsilon$ -Ball von Anfangswerten ausgehen. Dieser ist nicht einmal genau abzugrenzen, wie es die Zeichnung fälschlicherweise suggeriert. Wir können bestenfalls ausschließen, daß wir außerhalb eines gewissen Gebietes starten. Ansonsten kennen wir die möglichen Anfangszustände nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Der anfängliche  $\epsilon$ -Ball wächst im Laufe der zeitlichen Entwicklung an, verformt sich auch. Er tut das nämlich unvermeidlich immer dann, wenn das Bewegungsgesetz der klassischen Mechanik zwei grundlegende Eigenschaften hat: Es ist erstens nichtlinear und zweitens intern expandierend². Letzteres wird durch einen oder mehrere positive Lyapunov-Exponenten  $\lambda > 0$  gekennzeichnet. Aleksander Lyapunov (1857–1918), schrieb seine grundlegende Arbeit übrigens 1892. Abgesehen von "Spielzeug"-Beispielen wie dem harmonischen Oszillator sind aber die Bewegungsgesetze in der Tat nichtlinear und intern expandierend. Insbesondere ailt das für das Gravitationsgesetz der Massenanziehung.

Je größer der Wachstumsfaktor  $a=e^{\lambda}>1$  ist, desto kleiner ist die Zahl t der Schritte, für die man mit einer bestimmten, gewünschten Genauigkeit Vorhersagen machen kann. Die gewünschte Genauigkeit kennzeichnen wir durch einen zugelassenen, tolerierbaren Fehler  $\epsilon_{tol}$ . Je größer  $\epsilon_{tol}$ , desto länger kann man vorhersagen. Je genauer der Ist-Zustand bekannt, also je kleiner der anfängliche Meßfehler  $\epsilon_{mess}$  ist, desto länger kann man vorhersagen. Grundsätzlich jedoch kann man die reale Ursache und die tatsächliche Wirkung nie genau miteinander verknüpfen, da man ja beide nicht genau kennt, nicht genau kennen kann! Eben wegen der unvermeidlichen Meßfehler!

Die Größe der Vorhersagezeit  $t_{Vorhersage}$  ergibt sich aus zwei Faktoren, siehe noch einmal Abbildung 4: Sie ist zum einen systembedingt,  $t_{Lyap}=1/\log a=1/\lambda$  den Lyapunov-Exponenten  $\lambda$  hat man aus der nichtlinearen Bewegungsgleichung auszurechnen. Sie ist zum anderen aber auch durch unsere begrenzten Meßmöglichkeiten bzw. unsere Genauigkeitsansprüche an die Vorhersage bestimmt. Letztere gehen logarithmisch ein,  $\log(\epsilon_{to}/\epsilon_{mess})$ . Das bedeutet unter anderem, daß selbst eine Verdoppelung der Genauigkeit, was im allgemeinen

Genau genommen sind es drei Eigenschaften; hinzu kommt nämlich, daß der Phasenraum endlich ist.

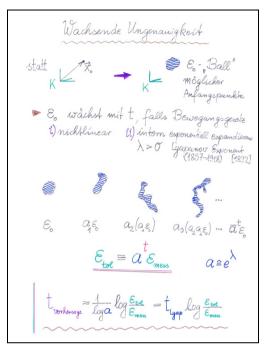


Abbildung 4 Wachsende Ungenauigkeit in der Kenntnis des physikalischen Zustands als (mathematische) Folge der Eigenschaften der klassischen Bewegungsgleichungen

bereits gewaltige Anforderungen (und Kosten) an die Meßapparatur oder die Zahl der Meßstationen usw. stellt, nur relativ schwach wirksam wird, indem sich je nach ursprünglicher Genauigkeit eine um vielleicht 10 % bis 20 % längere Vorhersagezeit ergibt.

Was wir uns auf jeden Fall bewußt zu machen haben ist: Kausalität hat in der klassischen Physik nur eine zeitlich beschränkte Reichweite und ist nur im Rahmen endlicher Fehler verifizierbar. Auch in der klassischen Mechanik sind strenge kausale Zusammenhänge nicht experimentell nachweisbar! Zwar sind die klassischen Bewegungsgesetze im allgemeinen Differentialgleichungen und als solche also deterministisch; wie ja übrigens auch in der Quantenmechanik. Aus  $x_0$  berechnen wir  $x_i$ ; aus  $\psi_0$  berechnen wir  $\psi_i$ . Aber auch in der klassischen Physik ist die Verknüpfung mit der realen physikalischen Welt nur mit unvermeidlichen Meßungenauigkeiten möglich, können die Zustände nur mit Wahrscheinlichkeiten innerhalb von  $\epsilon$ -Bällen angegeben werden, wie eben auch in der Quantenmechanik. In der üblichen Diskussion wird dieser wichtige, unvermeidliche Bestandteil der klassischen Physik

oft ausgeblendet. Man beschränkt sich ganz allein auf die Differentialgleichungen. In der Quantenmechanik hingegen wird gern der Aspekt der auch dort deterministischen Differentialgleichung ausgeblendet und werden allein die probabilistische Interpretation und Verknüpfung mit der realen Welt betont.

Wichtige Züge einer durch eine kausale Bewegungsgleichung determinierten und doch realiter nur begrenzt vorhersagefähigen klassischen Mechanik kann man sich schon an einfachen Modellen klar machen. So wird etwa die in Abbildung 3 gezeigte Kurve der mittleren Lufttemperatur durch folgendes sehr einfache mathematische Modell beschrieben. Die den Zustand zur irgendeiner Zeit t kennzeichnende Zahl  $x_t$  möge stets zwischen 0 und 1 liegen (beschränkter Phasenraum). Das Bewegungsgesetz laute  $x_{t+1} = 2 \cdot x_t$  modulo 1, also man multipliziere den gegebenen Zustandswert  $x_t$  einfach mit 2 und wenn das Ergebnis größer ist als 1, ziehe man einfach die 1 vor dem Komma ab, genannt modulo 1. Startet man zum Beispiel vom Anfangswert 0,278 4, so ergibt sich der in Abbildung 5 gezeigte zeitliche Verlauf. Man kann ihn leicht (im Kopf) nachrechnen.

Nun kann man den Anfangspunkt offensichtlich nicht auf 4 Stellen hinter dem Komma genau einzeichnen. Warum also nicht zum Beispiel mit 0,278 3 beginnen, im Rahmen der Zeichengenauigkeit gar nicht unterscheidbar. Abbildung 6 zeigt, daß sich zunächst derselbe Verlauf ergibt, die beiden Kurven dann aber mehr und mehr voneinander abweichen und sich schließlich völlig unterschiedlich entwickeln. Während zum Beispiel nach 10 Schritten die eine Kurve (rot) eine sehr heiße Phase anzeigt, markiert die andere (braun) nur eine Warm- oder Zwischeneiszeit. Nach 16 Schritten zeigt die rote Kurve eine Warmzeit an, wäh-

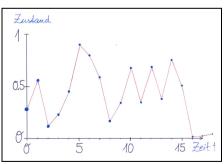


Abbildung 5 Ein einfaches Klimamodell  $x_{t+1} = 2 \cdot x_t \mod 1$ 

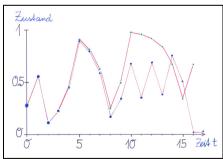


Abbildung 6 Empfindliche Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufs vom Anfangswert. Die rote Kurve startet bei  $x_0=0,278\,3,$  die braune bei  $x_0=0,278\,4$ 

rend die braune eine strenge Eiszeit verkündet. Und wenn Sie eine Vorhersage über das Gezeigte hinaus versuchen: einerseits kann man ja ausrechnen, wie es weitergeht, nämlich nach obigem Gesetz. Wenn Sie es zu sagen versuchen, ohne zu rechnen, werden Sie sich schon nach wenigen Schritten erheblich irren. – Noch schlimmer wäre es, wenn Sie statt der Multiplikation mit 2 etwa mit  $\pi$  malzunehmen hätten. Das könnten Sie immer nur näherungsweise machen, da Sie ja schlecht mit einer unendlichstelligen Zahl exakt multiplizieren können. Dann würde allein durch die Rundungsfehler neue Ungenauigkeit in der Vorhersage entstehen, würde somit Kausalität verloren gehen!

Was gilt nun also? Ist die klassische Mechanik das Musterkind für Kausalität oder ist sie eine statistische Physik ohne Kausalität? Verläßlichkeit versus Wahrscheinlichkeit? Die Beispiele zeigten, daß es offenbar beides gibt, in trauter Eintracht nebeneinander. Worin liegt der Denkfehler, wenn man sagt, die klassische Physik sei kausal? Ein Denkfehler, der offenbar nicht nur historisch ist? Offenbar sind es zwei Aspekte. Erstens: Die (irrige!) Vorstellung, es käme nur auf die Bewegungsgleichungen an; den Ist-Zustand kenne man doch sowieso hinreichend genau. Aber letzteres ist eben nicht so. Es ist nun mal  $\epsilon > 0$ ! Zweitens: Die (ebenfalls irrige) Vorstellung, es gäbe nur eine relevante Zeitskala, nämlich die den untersuchenden Menschen interessierende, genannt  $t_{\rm M}$ . Sie beträgt Sekunden, Tage, Jahre oder ähnliches. Aber: Auch das Naturgeschehen hat seine eigenen Zeitskalen, nämlich die inversen Expansionsraten  $\lambda^{-1}$  oder Lyapunov-Zeiten  $t_{\rm Lyap} = \lambda^{-1}$ . Diese Lyapunov-Zeit beträgt zum Beispiel beim Klein-Planeten Pluto  $\approx 10^{15}\,{\rm s}$  oder  $\approx 30\,{\rm Mio}$ . Jahre. Bei einem Atom in der Luft ist  $t_{\rm Lyap}$  dagegen winzig, gerade mal  $\approx 10^{-10}\,{\rm s}$ . Bei Luftströmungen mißt  $t_{\rm Lyap}$  etwa 1s bis 1d.

Wir haben nun die beiden relevanten Zeitskalen zu vergleichen. Drei Fälle sind möglich. Erstens:  $t_{M} << t_{Lyap}$ . Dann können wir so tun, als ob  $\epsilon_{mess} \to 0$  wäre, weil ja dadurch die sowieso nicht in Anspruch genommene, theoretisch mögliche Vorhersagezeit  $t_{Vorhersage}$  nur noch größer, unendlich, werden würde. Dann also ist das Geschehen im Rahmen der akzeptierten Genauigkeit vorhersagbar, kausal. Zweitens:  $t_{M} >> t_{Lyap}$ . In diesem Falle ist Vorhersage nicht mehr möglich, ist der tatsächliche Verlauf vom erwarteten völlig verschieden. Wir beobachten statistisches, zufälliges Verhalten, da wir den tatsächlichen Anfangszustand eben nicht kennen. Schließlich Drittens:  $t_{M} \approx t_{Layp}$ . Dann sind ungefähre Vorhersagen möglich, wenngleich es auch nicht ganz zufällig, statistisch zugeht. Die Vorhersagen sind sogar durch Meßfortschritte oder durch weniger anspruchsvolle Forderungen an die Vorhersagegenauigkeit zu verbessern. Die Einzelheiten hängen von  $\epsilon_{mess}$  und  $\epsilon_{tol}$  ab. Ein gutes Beispiel hierfür sind die ja nur begrenzt möglichen Wettervorhersagen.

Formal ausgedrückt liegt der Denkfehler darin, daß man nicht beachtet hat, daß die beiden Fälle: erst  $\lim_{t\to\infty}$  und dann  $\lim_{\epsilon\to0}$  beziehungsweise: erst  $\lim_{\epsilon\to0}$  und dann  $\lim_{t\to\infty}$  verschieden sind, daß diese beiden doppelten Limites eben je nach Reihenfolge etwas anderes ergeben. In Worten ausgedrückt ist es für typische mechanische Systeme etwas völlig anderes, ob man ihr Verhalten bei einem endlichen  $\epsilon$ -Ball von Anfangswerten für eine gewählte, auch große Zeit betrachtet und erst nachträglich den Meßfehler verkleinert, oder ob man den Meßfehler von vornherein vernachlässigt, ihn also Null setzt, und nur eine einzige Anfangsbedingung betrachtet, für die man aus der Differentialgleichung den zeitlichen Verlauf bestimmt. Physikalische Realität ist es, erst die interessierende Zeit für unsere Vorhersage zu wählen und dabei die Endlichkeit des Meßfehlers,  $\epsilon > 0$ , zu beachten. Man darf eben nicht so tun, als ob man von vornherein  $\epsilon \to 0$  denken dürfte. Und da notwendigerweise  $\epsilon_{tol} \geq \epsilon_{mess}$ , kann man auch nicht besser als bis auf diesen Meßfehler genau vorhersagen.

Im Kern ist also mit der klassischen Mechanik für eine reale Welt Kausalität nicht nachweisbar. Es kommt auf die interessierende Zeit im Vergleich zu  $t_{Vorhersage}$  an, ob wir ein Phänomen "praktisch" als kausal, als in (manchmal hervorragender Näherung) vorhersagbar ansehen können, oder ob uns das Geschehen nicht vielmehr als völlig statistisch erscheint, oder schließlich als im Übergangsbereich liegend und deshalb durch Vergrößerung der Genauigkeiten als verbesserbar erfahren wird, also als weder kausal noch als statistisch. Die klassische Mechanik ist eben *nicht nur* eine Differentialgleichung; sie ist außerdem durch eine – meßfehlerbehaftete – Vorgabe der Anfangswerte und durch die Rückübersetzung der Endwerte in nachmeßbare Vorhersagen an die reale Welt anzukoppeln. Dadurch verliert sie ihren rein mathematischen, durch die Lösung von Differentialgleichungen bestimmten, kausalen Charakter, genauer, man kann diesen nicht mehr durch Experimente belegen. Und das geht grundsätzlich nicht, eben wegen  $\epsilon > 0$  zusammen mit  $\lambda > 0$ .

Eine nur scheinbar kleine Anmerkung: In der Mathematik kann man sagen, na ja, wenn eine Aussage denn für jedes  $\epsilon>0$  gilt, kann man daraus auf den Grenzfall  $\epsilon=0$  schließen, und so gilt die mathematische Vorhersagbarkeit eben doch für jeden Anfangszustand  $x_0$ . Diesen Schluß zieht man ohne weiteres Nachdenken gerne aber leichtsinnigerweise auch für die klassische Mechanik. Physikalisch geht es aber leider nicht so. Denn wir müssen schon experimentell überprüfen, ob es wirklich für jeden Fehler  $\epsilon\neq0$  klappt. Und in der realen Welt, also in der Physik, kann man das eben grundsätzlich nicht tun. Da kann es immer wieder passieren, daß bei größerer Genauigkeit der Messung, sprich bei Verkleinerung von  $\epsilon_{mess}$ , neue, bisher nicht bemerkbare Einflüsse durchschlagen und die Vorhersage verändern. Zum Beispiel zeigen sich erst bei genauerem Hinsehen Abweichungen, die eine

Erklärung verlangen, etwa daß ein bisher unbekannter Planet, später Pluto genannt, die Bahnen der bis dahin bekannten Planeten zwar nur wenig, aber bei ausreichender Genauigkeit dann doch nachweisbar beeinflußt. Oder sowohl die genaue Form wie auch die Art des Gesteins der Erdoberfläche führen zu kleinen Korrekturen in der lokalen Erdanziehung und beeinflußen dadurch ein wenig die Bewegungen im Schwerefeld. Oder es kommt bei sehr genauem Hinsehen sogar eine ganz neue Physik ins Spiel: Wir wissen seit etwa 80 Jahren, daß die klassische Mechanik für mikroskopisch genaue Messung expressis verbis tatsächlich nicht mehr korrekt ist, sie ihre Gültigkeit verliert.

Vielleicht lohnt der Hinweis, wie perfekt der Wahrscheinlichkeitscharakter auch der klassischen Physik tatsächlich ist. Wenn man zum Beispiel  $\epsilon_{tol}$  in obigem Klimamodell etwa  $\frac{1}{2}$  wählt und immer dann, wenn  $x_i$  kleiner als 0,5 ist, eine 0 notiert und wenn es größer als 0,5 ist, sich eine 1 hinschreibt, erzeugt man Folgen wie 0100110110001..., die man auch erhält, wenn man eine Münze wirft und Kopf als 0 sowie Adler als 1 markiert (oder umgekehrt). Münzwurf gilt bei Spielern als ein statistischer Zufallsprozeß. 0 und 1 sind gleichverteilt und es gibt im statistischen Mittel keinerlei Korrelationen zwischen aufeinanderfolgenden Ziffern. Genau so etwas produziert nun aber, wie wir gesehen haben, bereits eine einfache mathematische Rechenvorschrift (für fast alle Anfangswerte  $x_0$ , um genau zu sein). Also, berechenbar und doch im Ablauf komplett statistisch. Wie reich doch die als so einfach und kausal geltende klassische Mechanik ist! Nur leider, als Nachweis für Kausalität in der physikalischen Welt kann sie nicht dienen.

Aber das wußten unsere Väter im Grunde auch schon. So schreibt etwa James Clark Maxwell (1831–1879) schon auf den ersten Seiten seines Buches Matter and Motion, 1877, Neuauflage 1920, Seiten 13/14: "Es ist ein metaphysischer Grundsatz (doctrine), daß dieselben Vorgänger (same antecedents) stets dieselben Nachfolger (same consequences) haben. Niemand kann dies leugnen. Nur ist das nicht von viel Nutzen in dieser Welt, in der dieselben Vorgänger niemals wieder auftreten und nichts zweimal geschieht.

Ein physikalischer Grundsatz verwandter Art lautet, daß ähnliche (like) Vorgänger stets ähnliche Nachfolger haben. Hier aber sind wir von Gleichheit (sameness) zu Ähnlichkeit (likeness) übergegangen, von absoluter Genauigkeit zu mehr oder weniger guter Näherung.

Es gibt mancherlei Erscheinungen, bei denen ein kleiner Fehler in den Daten ein nur geringes Verschieben im Ergebnis bewirkt. Der Geschehensablauf heißt in diesen Fällen stabil. Es gibt aber auch andere Klassen von Phänomenen, komplizierteren, [...]. In solchen Fällen können Einflüsse, deren physische Größe zu klein ist, um von irgendeinem endlichen Wesen bemerkt zu werden, Ergebnisse von größter Wichtigkeit hervorrufen.

Wenn also diejenigen Förderer der physikalischen Wissenschaften, von denen die intelligente Öffentlichkeit ihre Vorstellung von Physik herleitet, bei der weiteren Aufdeckung der Natur dazu kommen werden, Unstetigkeit und Unstabilität statt Stetigkeit und Stabilität zu untersuchen, so dürfte der Fortschritt in der Naturerkenntnis die Überwindung unserer Vorurteile zugunsten des Determinismus bewirken, [...]."

Immerhin ist das vor der Quantenmechanik gesagt worden und vor unserer heutigen Formulierung vom deterministischen Chaos, das die physikalische klassische Mechanik als das Duo von Bewegungsgleichung und Meßfehler/Expansivität ansieht. Kausalität ist darin nur näherungsweise verifizierbar, wenn auch manchmal in hervorragend guter Approximation. Für das alltägliche Leben reicht es dann meist aus, können wir auf das Paradigma Kausalität als ein höchst brauchbares Modell setzen.

#### Die neue Art des Zufalls in der Quantenwelt

#### Albert Einstein und die Quantenphysik

Das Jahr 2005 war das "World Year of Physics". Ausgerufen wurde es von der Generalversammlung der Vereinten Nationen zur Erinnerung an Albert Einsteins annus mirabilis von 1905. In diesem Jahr hatte der junge Sachbearbeiter am Eidgenössischen Institut für Geistiges Eigentum, dem Schweizerischen Patentamt, fünf Arbeiten veröffentlicht, welche die Welt der Physik veränderten. Darunter gehören die Vorstellung der Speziellen Relativitätstheorie sowie die Arbeit, die die wohl berühmteste Gleichung der Physik,  $E = mc^2$ , enthält. Seine erste in diesem Jahr veröffentlichte Arbeit befaßt sich jedoch mit der Quantenphysik. Einstein schlägt vor, daß Licht aus Teilchen besteht, den Lichtteilchen, später Photonen genannt. Es sei bemerkt, daß Albert Einstein dafür, und nicht für die Relativitätstheorie, 1922 den Nobelpreis verliehen wurde. Daß diese Entscheidung nicht ganz unbegründet ist, kann man vielleicht auch daran erkennen, daß diese Arbeit die einzige war, die Albert Einstein selbst als "sehr revolutionär" bezeichnete<sup>1</sup>.

Kurz darauf begann jedoch Einsteins Kritik an der Quantenphysik, bei der er zeit seines Lebens, jedoch in verschiedensten Variationen, blieb. Diese Kritik begann zumindest bereits 1909 bei der Jahresversammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte in Salzburg. Ein wesentlicher Punkt seiner Kritik war sein, wie er es nannte, "Unbehagen" über die neue Rolle des Zufalls in der Quantenphysik. Es ist äußerst bemerkenswert, daß Einstein bereits vor der Formulierung der Quantenmechanik in den Jahren 1925 und 1926 durch Heisenberg und Schrödinger erkannte, daß der Zufall in der Quantenphysik von einer neuen Natur ist, einer Natur, die qualitativ über den Zufall in der klassischen Physik und auch etwa den Zufall im täglichen Leben hinausgeht.

In der klassischen Physik ist der Zufall immer eine Konsequenz unseres Nichtwissens. Wenn wir etwa konkret daran denken, welche Zahl ein Würfel zeigt, so ist dies wohl zufällig.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Einstein, A.: Brief an C. Habicht, 18. oder 25. Mai 1905.

Würden wir jedoch exakt die Bewegung des Würfels beim Wurf, die Reibung bei der Berührung der Oberfläche, sein Rollen auf dem Tisch und so weiter beschreiben, so könnte man wohl genau erklären, warum bei einem bestimmten Wurf gerade zum Beispiel die "6" kam. Und selbst wenn es aus praktischen Gründen nie möglich wäre, eine solche Beschreibung exakt durchzuführen, ist die Existenz einer solchen kausalen Beschreibung zumindest denkbar.

Anders in der Quantenphysik. Denken wir etwa an eine bestimmte Menge radioaktiver Atome. Diese werden irgendwann zerfallen, dies wird durch die Halbwertszeit beschrieben. Nach einer Halbwertszeit ist genau die Hälfte der Atome zerfallen, nach einer weiteren Halbwertszeit die Hälfte der Übriggebliebenen und so weiter. Wann zerfällt ein einzelnes Atom? Dies ist rein zufällig, und es gibt dafür keine naturgesetzliche Beschreibung. Man nimmt an, daß eine solche Beschreibung nicht nur uns unbekannt ist, sondern daß sie grundsätzlich nicht existiert. Das Verhalten des einzelnen Atoms ist in einer Weise zufällig, die über die Zufälligkeit der klassischen Physik hinausgeht. Etwas vereinfacht ausgedrückt: Nicht nur wir wissen nicht, wann ein bestimmtes Atom zerfällt, auch das Atom selbst weiß es nicht.

Daß diese neue qualitative Natur des Zufalls Albert Einstein nicht behagte, hat er mehrfach ausgedrückt, so zum Beispiel in einem Brief an Max Born vom 4. Dezember 1925: "Die Quantentheorie ist sehr achtungs-gebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, daß das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns nicht näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der nicht würfelt." Niels Bohr soll ihn daraufhin ermahnt haben, aufzuhören, dem Herrgott Vorschriften zu machen<sup>3</sup>.

An anderer Stelle sagte Einstein: "Der Gedanke, daß ein [...] Elektron aus freiem Entschluß den Augenblick [...] wählt, in dem es fortspringen will, ist mir unerträglich. Wenn schon, dann möchte ich lieber Schuster oder gar Angestellter in einer Spielbank sein als Physiker."<sup>4</sup> Das Ironische daran ist, daß man sehr wohl heute, wie wir weiter unten ausführen, daran denkt, Zufallszahlengeneratoren auch für Spielbanken zu bauen, die auf diesem quantenmechanischen Zufall beruhen. Erwin Schrödinger schlug in dieselbe Kerbe, als er sagte, "Wenn es doch bei dieser verdammten Quantenspringerei bleiben soll, so bedaure ich, mich überhaupt jemals mit der Quantentheorie abgegeben zu haben."<sup>5</sup> Interessanter-

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Einstein, A.: Brief an Max Born, 4. Dezember 1925.

Das soll Niels Bohr Albert Einstein erwidert haben, als dieser immer wieder versuchte, mit neuen Gedankenexperimenten die Aussagen der Quantenmechanik zu widerlegen.

Einstein, A. zitiert in: Hedwig und Max Born: Briefwechsel 1916–1955, kommentiert von Max Born. München: Nymphenburger, 1969, S. 118.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Zitat überliefert in: Heisenberg, W., Der Teil und das Ganze, München: Piper, 1969.

weise hat Wolfgang Pauli sehr klar formuliert und in seiner sehr bekannten, manchmal etwas überspitzten Art, festgestellt: "Entgegen allen rückschrittlichen Bemühungen [...] bin ich gewiß, daß der statistische Charakter der Psi-Funktion und damit der Naturgesetze [...] den Stil der Gesetze wenigstens für einige Jahrhunderte bestimmen wird [...]. Von einem Weg zurück zu träumen, zurück zum klassischen Stil von Newton-Maxwell [...] scheint mir hoffnungslos, abwegig [...]."6

In der klassischen Physik haben wir also Determinismus auf der Ebene der Zeitentwicklung individueller Systeme. Beispiele dafür wären die Beschreibung der Planetenbewegungen oder der Bewegung von Billardkugeln. In der Quantenphysik haben wir einen Determinismus lediglich auf der Ebene großer Ensembles. Die quantenphysikalische Psi-Funktion beschreibt, was wir im Mittel von vielen Einzelsystemen erwarten. Das Verhalten individueller Systeme ist im allgemeinen rein zufällig.

#### Der Quantenzufall im Experiment und in der Anwendung

Interessanterweise findet gerade der Zufall der Quantenphysik in neuen Ideen der Informationsübertragung, Informationsverarbeitung und auch Informationserzeugung Anwendungen, die in Richtung auf eine neue Informationstechnologie deuten.

Die einfachste Anwendung ist der Quanten-Zufallszahlengenerator<sup>7</sup> (Abb. 1).

Die Grundidee des Quanten-Zufallszahlengenerators ist es, eine Lichtquelle zu nehmen, die Photonen, also Lichtteilchen, einzeln aussendet, eines nach dem anderen. Ein solches Photon trifft nun auf einen halbreflektierenden Spiegel. Was wird dort geschehen? Für klassisches Licht ist ein halbreflektierender Spiegel leicht zu verstehen. Die Hälfte der Lichtintensität, die auf den Spiegel auftrifft, wird reflektiert. Die andere Hälfte geht durch. Was bedeutet so ein halbreflektierender Spiegel für ein einzelnes Photon, das auf ihn auftrifft? Ein Quantenteilchen selbst ist ja unteilbar, also kann es nur entweder reflektiert werden oder durch den Spiegel durchtreten. Was wird das einzelne Teilchen machen?

Jennewein, T., Achleitner, U., Weihs, G., Weinfurter, H. & A. Zeilinger: A Fast and Compact Quantum Random Number Generator. In: Rev. Sci. Inst. 71 (2000), S. 1675.

Pauli, W. aus einem nur indirekt und als Fragment überlieferten Brief an Max Born, Anfang Dezember 1954, zitiert in: "Wolfgang Pauli – Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a.", Band 4, Teil 2, Heidelberg: Springer, 2005, S. 887.

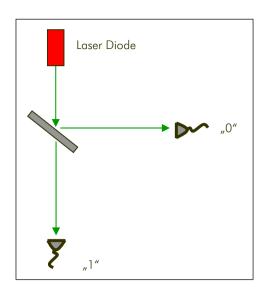


Abbildung 1 Quanten-Zufallszahlengenerator

Eine Lichtquelle erzeugt so schwaches Licht, daß die Photonen praktisch nur einzeln auftreten. Diese treffen auf einen halbreflektierenden Spiegel. Der reflektierte Strahl wird in einem Zähler registriert, der durchgehende im anderen. Je nachdem, wo das Photon registriert wird, erzeugt es die Zufallszahl "O" oder "1".

Die Antwort ist, daß dieses Verhalten rein zufällig ist. Genau genommen befindet sich das Teilchen nach der Wechselwirkung mit dem Spiegel in einer Überlagerung, einer sogenannten quantenmechanischen Superposition von den beiden Möglichkeiten, reflektiert zu sein oder durchgetreten zu sein. Stellen wir dann Detektoren in die beiden Strahlen, so wie es in Abbildung 1 dargestellt ist, so wird einer der beiden das Teilchen registrieren. Welcher, ist zufällig. Senden wir also eine große Folge von Photonen auf den Strahlteiler, bekommen wir zufällig einmal die "0" und einmal die "1", und insgesamt eine große Folge von Zufallszahlen. Diese könnte etwa lauten:

#### 

In der Praxis verwendet man nicht Quellen einzelner Photonen, da diese nur sehr schwer realisierbar sind, sondern schwaches Laserlicht, wo in guter Näherung immer nur ein Photon auftritt.



Abbildung 2 Verschränkung

In einem Meßapparat können zwei verschiedene Größen gemessen werden, die durch die Zeigerstellung symbolisiert werden. Für jede der beiden Zeigerstellungen leuchtet eines der beiden Lämpchen auf, wenn ein Photon in den Apparat tritt.

Solche Zufallszahlengeneratoren haben beachtliche technische Anwendungen. Sie werden etwa für Optimierungsalgorithmen eingesetzt. Um ein praktisches Beispiel zu nennen: Wenn wir ein Navigationssystem verwenden, das uns den kürzesten Weg zwischen zwei Punkten suchen muß, so wäre eine Möglichkeit, daß ein Computer alle denkbaren Wege absucht. Eine andere Möglichkeit ist jedoch, daß man den Computer durch Zufall entscheiden läßt, welcher Weg als nächster untersucht wird. Dadurch kann in gewissen Fällen schneller eine geeignete Lösung gefunden werden. Zufallszahlengeneratoren finden weiters Anwendung etwa in der Verschlüsselung von Paßwörtern, wo man einen kleinen Schlüssel auf einem parallelen Kanal schnell übersendet.

Eine besonders interessante Bedeutung hat der Zufall im Falle verschränkter Teilchen<sup>8</sup>. Die Verschränkung, von Einstein als "spukhafte Fernwirkung" abgetan, kann dann auftreten, wenn zwei Teilchen miteinander in Wechselwirkung traten und zu einem späteren Zeitpunkt an einem der beiden Teilchen eine Messung durchgeführt wird. Diese Messung ändert instantan, das heißt, ohne an die Beschränkung durch die Lichtgeschwindigkeit gebunden zu sein, den Zustand des anderen Teilchens, unabhängig davon, wie weit es entfernt ist.

Der experimentell einfachste Fall der Verschränkung kann wieder mit Photonenpaaren beobachtet werden (Abb. 2).

Eine Quelle erzeugt ein verschränktes Paar an Photonen. Das eine fliegt zum Meßapparat von Alice, das andere zum Meßapparat von Bob. Beide haben die Wahl, durch Änderung der Zeigerstellung an ihrem Apparat zu entscheiden, welche von zwei Meßgrößen – im Fall

\_

Einstein, A., Podolsky, B. & N. Rosen: Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? In: Phys. Rev. 47 (1935), S. 777.

von Photonen ist dies meist deren Polarisation – gemessen wird. Das Meßresultat ist dichotom, kann also nur zwei mögliche Werte annehmen, die durch Aufleuchten zweier Lämpchen charakterisiert werden. Das eine Resultat wird mit "-1" gekennzeichnet, das andere mit "1".

Der experimentelle Befund bei der Verschränkung ist nun der folgende: Wählen Alice und Bob die gleiche Schalterstellung, so erhalten sie – für einen bestimmten verschränkten Zustand – bei jedem Photonenpaar das gleiche Resultat für die beiden Photonen. Das heißt, man hat für die Einzelereignisse perfekte Korrelationen. Entweder zeigen beide Photonen "+1" oder "-1". Es stellt sich jedoch heraus, daß das einzelne Meßergebnis für jedes einzelne Photon rein zufällig ist. Dies zeigt bereits die grundsätzliche konzeptive Schwierigkeit mit der Verschränkung, die Erwin Schrödinger<sup>9</sup> dazu brachte, die Verschränkung als "das wesentliche Charakteristikum" der Quantenphysik zu bezeichnen. Wie ist es grundsätzlich möglich, daß zwei Ereignisse, von denen jedes rein zufällig ist, also keinerlei Ursache, auch keine verborgene, hat, genau das gleiche Resultat liefern, unabhängig davon, wie weit die beiden Systeme voneinander entfernt sind?

Man könnte nun versuchen, verschiedene Erklärungen zu finden. Eine wäre, anzunehmen, daß die individuellen Teilchen bereits mit Eigenschaften "geboren" werden, die festlegen, welches Resultat bei welcher Messung auftritt. Der irische Physiker John Bell<sup>10</sup> hat dieses Modell verborgener Variablen voll durchgezogen und gezeigt, daß die Vorhersagen eines solchen Modells im Widerspruch zur Quantenphysik und damit, wie Experimente gezeigt haben, auch im Widerspruch zur Natur sind. Die Teilchen werden also nicht mit Eigenschaften "geboren", die das Meßresultat bereits festlegen. Bleibt also nur eine zweite Erklärungsmöglichkeit, nämlich die eines Signals zwischen beiden Meßstationen. Verschiedene Experimente haben ausgeschlossen, daß dies ein Signal sein könnte, das sich um die Beschränkung durch die Lichtgeschwindigkeit dreht. Natürlich ist ein instantanes Signal mit Überlichtgeschwindigkeit nie im Prinzip ausschließbar. Es gibt jedoch grundsätzliche Argumente, davon auszugehen, daß es keine Signalübertragung gibt, sondern daß es sich bei Verschränkung um ein genuines Phänomen handelt.

Man könnte nun meinen, daß diese perfekten Korrelationen, die ja instantan, also ohne Zeitverzögerung, auftreten, Einsteins Relativitätstheorie verletzen. Hier stellt sich jedoch heraus, daß es weder Alice noch Bob möglich ist, damit Information zu übertragen. Der Grund

Schrödinger, E.: Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik. In: Die Naturwissenschaften 23 (1935), S. 807, 823, 844.

Bell, J. S.: On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics. In: Rev. Mod. Phys. 38 (1966), S. 447.

ist der, daß sie durch die Wahl ihrer Schalterstellung nicht beeinflussen können, welches spezifische Meßresultat auftritt. Dieses ist rein zufällig. Es schützt also der von Einstein nicht geliebte Zufall seine Relativitätstheorie davor, von der Quantenphysik verletzt zu werden.

Es sei zum Abschluß auf einen interessanten Aspekt der Ideengeschichte verwiesen. Im Jahr 1905 führte Einstein, wie schon erwähnt, das Konzept von Lichtteilchen ein. Ab etwa 1909 begann seine Kritik an der Quantenphysik. Diese seine Kritik war wesentlich dafür verantwortlich, daß seit ca. 1970 Experimente an einzelnen und mit verschränkten Quantenteilchen durchgeführt wurden, die letztlich zeigten, daß diese Kritik nicht haltbar ist. Es ist zu betonen, daß diese Experimente primär philosophisch motiviert waren, also motiviert durch sehr tiefe Fragestellungen an die Natur. Ein weiteres interessantes Phänomen ist jedoch, daß aus diesen Experimenten seit etwa 1990 neue Ideen für eine neue Quanteninformationstechnologie entstanden. Diese Entwicklung wurde von keinem der frühen Experimentatoren in irgendeiner Weise erwartet, geschweige denn vorhergesehen. Heute, hundert Jahre nach Einstein, können wir von Quantenkryptographie sprechen, von Quantencomputern und Quantenteleportation. Bei allen diesen neuen Technologien spielen Anwendungen des Zufalls eine zentrale Rolle.

Ohne Einsteins Kritik wäre die Entwicklung wohl heute noch nicht so weit.

## Zur Wahrnehmung und (Selbst-)Attribution von Kausalität

Über viele Jahre hat David Humes (Hume 1777) Verständnis von Kausalität die Sicht der Psychologie dominiert. Hume hat angenommen, daß Kausalität aus früheren Erfahrungen mit ähnlichen Ereignissen herrührt. Im Gegensatz zu Hume hat der Psychologe Albert Michotte (1946) aus Leuven, in der Nachfolge von Kant (1781), mit zahlreichen Experimenten zu zeigen versucht, daß bestimmte Arten von Ereignissequenzen direkt und spontan als kausal verknüpft wahrgenommen werden. Darüber hinaus hat er argumentiert, daß eine solche direkte Wahrnehmung von Kausalität in einem einzigen Ereignis passieren kann, es also keiner Vermittlung durch vorhergehende Erfahrungen bedarf. Die Wahrnehmung von Kausalität könnte damit, wie von Kant (1781) postuliert, eher Bedingung für Erfahrung als ihr Produkt sein. Alle Philosophen und Psychologen waren sich aber einig, daß ein später auftretendes Ereignis nicht kausal für ein früher auftretendes sein kann.

#### Die Wahrnehmung mechanischer Kausalität

Michottes klassisches Beispiel für Wahrnehmung von Kausalität läßt sich in einem Trickfilm veranschaulichen. <sup>1</sup> Ein roter Kreis bewegt sich auf einen grünen zu. Bei Berührung bewegt sich der grüne Kreis weiter; der rote Kreis bleibt stehen. Kommt es zu keiner Berührung, d.h. bleibt eine räumliche Lücke bestehen, dann ist der Eindruck der Kausalität sehr stark reduziert. Ähnliches gilt auch, wenn zwischen Berührung und Bewegung des grünen Kreises Zeit verstreicht. Die folgenden Bedingungen müssen erfüllt sein, damit Kausalität wahrgenommen wird (vgl. Palmer 1999, S. 513):

- 1. Die Bewegung des zweiten Objekts muß innerhalb eines Bruchteils einer Sekunde (ca. 200 ms) nach der Berührung durch das erste Objekt beginnen.
- 2. Die Bewegungsrichtung des zweiten Objekts muß ungefähr die gleiche sein, wie die des ersten Objekts.

Die Trickfilme können auf der Website der Arbeitsgruppe von Brian Scholl (Yale University) betrachtet werden: http://pantheon.yale.edu/~bs265/bjs-demos.html.

39

3. Die Geschwindigkeit, mit der sich das zweite Objekt bewegt, muß langsamer oder vergleichbar der Geschwindigkeit des ersten Objekts sein.

Wenn eine diese Bedingungen nicht erfüllt ist, kommt es nicht konsistent zu einer Wahrnehmung einer verursachten Bewegung. Mittlerweile sind eine Vielzahl von Stimuluskonfigurationen untersucht worden, um die Voraussetzungen für Kausalitätswahrnehmung einzugrenzen (vgl. Palmer 1999, für eine Übersicht).<sup>2</sup>

Unter bestimmten Bedingungen sehen wir also in der Tat "Kausalität" darin, wie zwei Objekte aufeinander bezogen sind. Es ist aber natürlich sehr schwer zu entscheiden, ob diese wahrgenommene Kausalität direkt und ohne Vermittlung von Erfahrung auskommt. Offensichtlich haben alle Erwachsene viele Ereignisse gesehen, die dem kanonischen Ereignis ähnlich sind. Folglich kann Erfahrung nicht leicht als Erklärung ausgeschlossen werden. Trotzdem ist es auch schwer zu verstehen, wie ein Kleinkind kausale Beziehungen lernen könnte ohne irgendeine Art von a-priori-Wissen über Kausalität.

In den letzten Jahren haben Brian Scholl und seine Kollegen von der Yale University eine Reihe sehr innovativer Experimente berichtet, die auf den Arbeiten Michottes aufbauen, dabei aber eher die Effekte von Kausalitätswahrnehmungen als die Bedingung ihres Auftretens zum Gegenstand haben. Choi und Scholl (2004, 2006) gelang es, eine Reizsituation zu erzeugen, die zu einer zweideutigen Objektwahrnehmung führt, von denen nur eine der Wahrnehmung von Kausalität entspricht. Bewegt sich nämlich ein grüner Kreis erst dann, wenn ein roter Kreis, der am linken Bildrand startet, ihn vollständig überlappt, dann wird von den meisten Betrachtern kein Anstoß des grünen Kreises, sondern ein Farbwechsel des roten Kreises wahrgenommen, der sich als grüner Kreis zum rechten Bildschirmrand bewegt. Der grüne Kreis hat auch die Farbe gewechselt, ist aber am Platz des roten Kreises stehen geblieben.

Dieser Trickfilm zeigt, daß das visuelle System Objektidentität sowohl über Farbe, wie im klassischen Michotte-Beispiel, als auch über Bewegung realisieren kann. Im eben beschriebenen Fall "überlebt" die über Bewegung vermittelte Identität eines Objekts einen Farbwechsel. Es gibt aber für eine Minderheit von Betrachtern für die Reizanordnung überlappender

40

Aus gehirnphysiologischer Perspektive führt die Wahrnehmung kausaler Kollisionen im Vergleich mit der Wahrnehmung nicht-kausaler Kollisionen zu einem größeren BOLD-Signal in den Gebieten V5 und MT, für die enge Bezüge zur relativen Bewegungswahrnehmung belegt sind, aber auch im linken intra-parietal sulcus und im superior temporal sulcus, die besonders bei der Interpretation komplexer visueller Ereignisse involviert sind. Letzteres legt nahe, daß Kausalitätswahrnehmung eine umfassendere Beteiligung kognitiver Prozesse mit sich bringt, als dies bei "einfacheren" Wahrnehmungen der Fall ist (Blakemore et al. 2001).

Kreise auch die bisherige Wahrnehmung eines kausalen Anstoßes des roten Kreises. In der Wahrnehmung dieser Personen bestimmt nicht die Bewegung, sondern die Farbe des Objekts seine Identität. Das Geniale an diesem Versuchsmaterial ist also, (1) daß entweder das Merkmal "Farbe" oder das Merkmal "Bewegung" die Identität der Objekte festlegen und (2) daß die Wahrnehmung eines kausalen Anstoßes nur auftritt, wenn die Identität des Objekts auf der Farbe beruht.

Wird nun ein zweites Objektpaar mit einem linken roten und einem mittleren grünen Kreis unter dem ersten Kreispaar präsentiert und verhält sich das untere Kreispaar gemäß der klassischen Billardkugel-Kausalität, dann kann für alle Probanden die bisher nachgeordnete Wahrnehmung herbeigeführt werden (Choi & Scholl 2004). Ein Grund hierfür ist, daß die beiden roten Kreise, die sich von links auf die beiden grünen zu bewegen, zu einem einzigen Objekt gruppiert werden. Allerdings genügt auch eine Einblendung des unteren Kreispaares von lediglich 50 ms beim Zusammenstoß, um diese Unstrukturierung der Wahrnehmung herbei zu führen. Choi und Scholl (2004, 2006) zeigen also, daß die Wahrnehmung von Kausalität eines Zusammenstoßes von zwei Kugeln über ein Ereignis dieser Art in der Nachbarschaft induziert werden kann. Die Wahrnehmung von Kausalität hängt also nicht nur von lokalen Merkmalen, sondern vom gesamten Wahrnehmungsfeld ab.

Das letzte Experiment ging noch einen sehr bedeutenden Schritt weiter. Bei den bisher gezeigten Trickfilmen war die Überlappung der Kreise des oberen Objektpaares synchronisiert mit dem Zusammenstoß des unteren Objektpaares. Choi and Scholl (2006) haben nun den Zusammenstoß des unteren Objektpaars zeitlich variiert und zwar so, daß dieser vor, gleichzeitig mit oder nach der Überlappung des oberen Kreispaares erfolgte. Wie erwartet, ist die Kausalitätswahrnehmung am höchsten, wenn Überlappung und Zusammenstoß synchronisiert sind. Es ist vermutlich ebenso wenig überraschend, daß auch ein Zusammenstoß vor der Überlappung eine Kausalitätswahrnehmung im anderen Paar induziert. Daß aber auch ein Zusammenstoß nach der Überlappung ebenfalls eine Kausalitätswahrnehmung auslöst, ist sehr erstaunlich. Aus den bereits beschriebenen Ergebnissen wissen wir, daß zum Zeitpunkt der Überlappung der beiden Kreise und bis zum Zusammenstoß des zweiten Kreispaares unser Geist eine Interpretation der Szene als durchgehende Bewegung eines Kreises mit Farbwechsel vorbereitet. Wenn keine weitere Information dazu kommt, wird dies auch zu unserer bewußten Wahrnehmung. Wenn nun aber innerhalb von ca. 200 ms nach der Überlappung Information nachgereicht wird, durch die eine Anstoßinterpretation zu einer einheitlichen Interpretation der gesamten Szene führt, dann wird unser bewußtes Erleben dementsprechend umstrukturiert. Die hier skizzierte Forschung belegt, daß die Wahrnehmung von Kausalität ganz grundlegend mit der Zuweisung von Objektidentität verbunden ist. Erst wenn ein Kreis als ein bewegtes Objekt und ein zweiter Kreis als ruhendes Objekt konfiguriert sind bzw. erst wenn zwei sich gemeinsam bewegende Kreise zu einem Objekt gruppiert werden, das wiederum zwei ruhende Kreise zu gemeinsamer Bewegung veranlaßt, kann mechanische Kausalität beobachtet werden. Bei der Konstruktion dieser bewußten Wahrnehmung genehmigt sich unser Geist eine erstaunliche Toleranz bei der zeitlichen Synchronisation der daran beteiligten Prozesse.

Diese Experimente liefern Belege dafür, daß unser Sehsystem die sensorische Information so interpretiert, daß die Annahme von Koinzidenz möglichst vermieden werden kann (Rock 1983; Scholl 2005). Das Prinzip "Wenn immer möglich, vermeide die Interpretation, daß die Wahrnehmung auf einer Koinzidenz beruht" geht zurück auf die Helmholtzsche (1867) Annahme eines unbewußten Schlusses: Wir nehmen diejenigen dreidimensionalen Objekte und Ereignisse wahr, die unter normalen Umständen am wahrscheinlichsten für das auf der Retina vorliegende zweidimensionale Erregungsmuster sind. Die sich verändernden zweidimensionalen Lichtmuster sind aber für sich nicht hinreichend, um die dreidimensionale Struktur der externen Welt, von der dieses Licht reflektiert wurde, zu fixieren. Es gibt immer eine Vielzahl von Möglichkeiten, die zu dem konkret vorliegenden Muster geführt haben könnten. Das Sehsystem löst also ein sogenanntes "inverses Problem" (Palmer 1999). Für dieses Problem gibt es keine technische deduktive Lösung, sondern es sind implizite Annahmen über die Strukturen der Welt erforderlich und darüber, welche retinalen Erregungsmuster von ihnen produziert werden. Unter diesen Annahmen kann das System raum-zeitliche und kausale Strukturen erkennen – oder eben auch nicht, wie das bei Wahrnehmungstäuschungen manchmal der Fall ist.

## Die Wahrnehmung intentionaler Kausalität

Parallel zu den Arbeiten Michottes (1946) hatte Fritz Heider mit ähnlichen Trickfilmen begonnen, Fragen der Attribution von Kausalität in sozialen Kontexten zu untersuchen (Heider & Simmel 1944). Beispielsweise präsentierte er seinen Probanden verschieden große geometrische Figuren in koordinierten Bewegungsmustern. Die Probanden sollten aufschreiben, was in dem Film geschah, und wählten durchweg anthropomorphe Beschreibungen: "Ein großes Quadrat verfolgt zwei kleine, die sich vor ihm in einem Raum verstecken", usw. Hier geht es also nicht um die Wahrnehmung mechanischer Kausalität, sondern um die Wahrnehmung intentionaler Kausalität, das heißt um kausale Attributionen, die sich daraus ergeben, daß wir eine sehr ausgeprägte Tendenz dazu haben, andere (oder auch uns selbst) als Han-

delnde geleitet von Absichten, Wünschen, Gefühlen, usw. wahrzunehmen. Es ist durchaus verblüffend, daß die Bewegungen offensichtlich unbelebter einfacher physikalischer Objekte zu hoch komplexen sozialen Attributionen führen, wenn und solange nur die raum-zeitliche Koordination der Bewegungen dieser Objekte mit denen belebter Wesen übereinstimmt. Die Frage der Attribution intentionaler Kausalität betrifft uns letztlich natürlich auch selbst. Wenn wir uns als Verursacher unserer Handlungen erleben, dann treffen wir damit auch eine Aussage zum freien oder bewußten Willen. In der Regel trifft das auch zu. Wie im Falle der Wahrnehmung mechanischer Kausalität kann man aber auch für die Wahrnehmung intentionaler Kausalität zeigen, daß physikalische Wirklichkeit und bewußtes Erleben nicht immer übereinstimmen. Beispielsweise zeigten Wegner und Wheatley (1999, vgl. auch Wegner 2002) in einem Experiment, daß Menschen sich bei der Bewegung und beim Anhalten einer zusammen mit einer anderen Person gesteuerten Computermaus als kausal handelnd erleben können, auch wenn sie in Wirklichkeit keine Kontrolle über dieses Gerät hatten. Das Experiment erzeugte also das Gefühl eines bewußten Willens, der aber auf einer illusion of control beruhte.

#### Die Entwicklung der Kausalitätswahrnehmungen: Ein inverses Problem?

Kurz noch zwei Anmerkungen zur Entwicklung der Wahrnehmung von mechanischer und intentionaler Kausalität. Die Wahrnehmung *mechanischer* Kausalität im Michotteschen Sinne läßt sich bereits für Kleinkinder im Alter von ca. 6,5 Monaten belegen (Leslie & Keeble 1987). Die Wahrnehmung *intentionaler* Kausalität scheint sich im Alter von drei bis vier Jahren zu entwickeln, etwa in einer Phase, in der es Kindern gelingt, zwischen eigenen und fremden Bewußtseinszuständen zu unterscheiden (Stichwort: *theory of mind*). Ob bzw. auf welche Weise sich die Wahrnehmung intentionaler Kausalität aus der Wahrnehmung mechanischer Kausalität entwickelt ist ein aktuelles Thema der entwicklungspsychologischen Forschung (z. B. Schlottmann, Allen, Linderoth & Hesketh 2002). Es gibt mittlerweile viele und auch recht überzeugende experimentelle Belege dafür, daß zwei- bis vierjährige Kinder zur Konstruktion kausaler Beziehungen in der Lage sind und daß ihr Lernen von kausalen Zusammenhänge in der Welt analog zur Lösung des "inversen Problems" der Wahrnehmung mit dem Formalismus von Bayes-Netzen beschrieben werden kann (Gopnik, Glymour & Sobel 2004).

Experimentalpsychologische Untersuchungen zeigen, daß die Wahrnehmung von mechanischer Kausalität eine Konstruktion unseres Geistes ist, die sich unter entsprechenden Bedingungen gegen eine alternative nicht-kausale Bewegungswahrnehmung durchsetzen kann

und dafür auch eine zeitliche Rückdatierung von Bewußtseinsinhalten in Kauf nimmt. Für die Wahrnehmung intentionaler Kausalität lassen sich in experimentalpsychologischen Untersuchungen Dissoziationen von gefühlter und objektiver Handlungskontrolle herstellen. Ob bzw. auf welche Weise die Wahrnehmung intentionaler Kausalität sich aus der Wahrnehmung mechanischer Kausalität entwickelt, ist nicht klar. Es ist bemerkenswert, daß für die in diesen Domänen weitgehend unbewußte Informationsverarbeitung eine Bayes'sche Perspektive einen vielversprechenden einheitlichen theoretischen Rahmen bereitstellt und dementsprechend an Bedeutung gewinnt.

#### Literatur

Blakemore, S.-J., Fonlupt, P., Pachot-Clouard, M., Darmon, C., Boyer, P., Meltzoff, A. N. et al.: How the brain perceives causality: An event-related fMRI study. In: Neuroreport 12 (2001), S. 3741–3746.

Choi, H. & B. J. Scholl: Effects of grouping and attention on the perception of causality. In: Perception & Psychophysics 66 (2004), S. 926–942.

Choi, H. & B. J. Scholl: Perceiving causality after the fact: Postdiction in the temporal dynamics of causal perception. In: Perception 35 (2006), S. 385–399.

Gopnik, A., Glymour, C., Sobel, D. M., Schulz, L. E., Kushnir, T. & D. Danks: A theory of causal learning in children: Causal maps and Bayes nets. In: Psychological Review 111 (2004), S. 1–30.

Heider, F. & M. Simmel: An experimental study of apparent behavior. In: American Journal of Psychology 57 (1944), S. 243–259.

Helmholtz, H. von: Handbuch der physiologischen Optik, Leipzig: Voss, 1867.

Hume, D.: An enquiry concerning human understanding, La Salle, IL: Open Court, 1777.

Kant, I.: Kritik der reinen Vernunft, Hamburg: Meiner, 1781.

Leslie, A. M. & S. Keeble: Do six-month-old infants perceive causality? In: Cognition 25 (1987), S. 265–288.

Michotte, A.: La perception de la causalité, Louvain: Institut Supérieur de Philosophie, 1946.

Palmer, S. E.: Vision Science: Photons to Phenomenology, Cambridge, MA: MIT Press, 1999.

Rock, I.: The logic of perception, Cambridge, MA: MIT Press, 1983.

Schlottmann, A., Allen, D., Linderoth, C. & S. Hesketh: Perceptual causality in children. In: Child Development 73 (2002), S. 1656–1677.

Scholl, B. J.: Innateness and (Bayesian) visual perception: Reconciling nativism and development. In: Carruthers, P., Laurence, S. & S. Stich (Hg.), The innate mind: Structure and contents, Oxford University Press, 2005, S. 34–52.

Wegner, D.: The illusion of conscious will, Cambridge: MIT Press, 2002.

Wegner, D. & T. Wheatley: Apparent mental causations: Sources of the experience of will. In: American Psychologist 54 (1999), S. 480–491.

## Zur Kategorie der Kausalität in den Wirtschaftswissenschaften

#### 1 Kausalität als komparative Statik von Systemgleichgewichten

#### 1.1 Kausalität und Systeminterdependenz

Die Kategorie der Kausalität ist für den Ökonomen in zweierlei Hinsicht von Bedeutung, zum einen als Kategorie, in der die Leute, deren Verhalten er untersucht, über Zusammenhänge in ihrem Umfeld nachdenken, etwa bei der Frage, auf welche beobachtbaren Größen ein Anreizsystem abstellen sollte, zum anderen als Kategorie, die er selbst bei der Erklärung ökonomischer Zusammenhänge verwendet. Im Folgenden beschränke ich mich auf letzteres.

In der wirtschaftswissenschaftlichen Analyse wird die Kategorie der Kausalität von der Kategorie der Systeminterdependenz überlagert. Daraus ergibt sich ein anderer Umgang mit Kausalität als im Alltagsdenken oder auch in der klassischen Physik.

Zur Veranschaulichung mag ein Beispiel dienen. Vor über zwanzig Jahren stellte ich in einer Grundstudiumsklausur die folgende Aufgabe: "Die OPEC erhöht den Ölpreis. Das führt zu einem allgemeinen Anstieg der Energiepreise, insbesondere des Benzinpreises. Man braucht Energie, um Autos zu produzieren, und man braucht Benzin, um mit Autos zu fahren. Diskutieren Sie die Auswirkungen der Energiepreiserhöhungen auf (a) die Kosten der Autoproduktion, (b) das Angebot an Autos, (c) die Nachfrage nach Autos, (d) die Autopreise, (e) die Menge an verkauften Autos und (f) die Beschäftigung in der Autobranche."

Eine typische Antwort lautete: "Da der Input Energie teurer geworden ist, erhöhen sich die Kosten der Autoproduktion, und das Angebot geht zurück. Die Autopreise steigen, da die Hersteller versuchen, die Kostenerhöhung weiterzugeben. Die Nachfrage nach Autos geht zurück, erstens, weil aufgrund der Benzinpreiserhöhung das Autofahren teurer geworden ist, und zweitens, weil die Preise gestiegen sind. Die Autopreise gehen zurück, da die Nachfrage gesunken ist."

-

Beitrag zur Diskussion in der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften am 9. Dezember 2005.

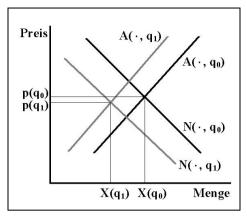


Abbildung 1

An dieser Antwort sind zwei Dinge bemerkenswert: Zum einen die Art und Weise, wie Erklärungsmuster aus einfachen Kausalitätsbeziehungen zusammengesetzt werden. Zum anderen die Widersprüchlichkeit der Antwort zu Frage (c). Den Prüfungsteilnehmern war entgangen, daß sie gleichzeitig einen Anstieg und ein Absinken der Autopreise vorhersagten.

Die – durchaus beabsichtigte – Schwierigkeit der Aufgabenstellung lag in der Formulierung von (b) und (c). Hier wäre anzumerken gewesen, daß man bei den Worten "Angebot" und "Nachfrage" zwischen Angebots- und Nachfragefunktionen einerseits sowie Angebots- und Nachfragemengen andererseits unterscheiden muß. Angebots- und Nachfragefunktion beschreiben die Abhängigkeit der angebotenen bzw. nachgefragten Mengen vom jeweiligen Preis. Der Preis selbst ergibt sich aus der Gleichgewichtsbedingung, daß Angebot und Nachfrage übereinstimmen; die Gleichgewichtsmengen von Angebot und Nachfrage entsprechen dem gemeinsamen Wert von Angebots- und Nachfragefunktion beim Gleichgewichtspreis. Der Zusammenhang ist graphisch in Abbildung 1 dargestellt. Der Energiepreis selbst wird in dieser Abbildung nicht gezeigt; er bestimmt lediglich als exogene Größe die Lage der Angebots- und Nachfragefunktion im Automarkt. Beim Energiepreis  $q_0$  entsprechen Gleichgewichtspreis und Gleichgewichtsmenge im Automarkt dem Schnittpunkt ( $X(q_0)$ ,  $p(q_0)$ ) der Angebotskurve  $X(\cdot, q_0)$  und der Nachfragekurve  $X(\cdot, q_0)$  in der Abbildung.

Die der OPEC-Vereinbarung folgende Erhöhung des Energiepreises auf einen neuen Wert  $q_1$  bewirkt eine Linksverschiebung der Angebotskurve und eine Linksverschiebung der Nachfragekurve. Sowohl die angebotene als auch die nachgefragte Menge an Autos ist bei jedem Preis niedriger als vor der Ölpreiserhöhung, die eine, weil die Produktionskosten höher sind,

die andere, weil der Erwerb eines Autos weniger attraktiv ist, wenn das Fahren hinterher so teuer ist. Der neue Gleichgewichtspreis  $p(q_1)$  und die neue Gleichgewichtsmenge  $X(q_1)$  entsprechen dem Schnittpunkt der so verschobenen Kurven. Die neue Gleichgewichtsmenge ist auf jeden Fall kleiner als die alte, doch kann man ohne eine genaue quantitative Kenntnis der beschriebenen Effekte nicht sagen, ob der neue Gleichgewichtspreis über oder unter dem alten liegt. Fällt die Verringerung der Nachfrage stärker ins Gewicht, so liegt der neue Preis unter dem alten (wie in der Abbildung), fällt die Verringerung des Angebots stärker ins Gewicht, so liegt er darüber.

In dieser Analyse werden für jeden Ölpreis q der Autopreis p(q) und die Menge an verkauften Autos X(q), die sich bei diesem Ölpreis ergeben, simultan bestimmt als Lösung der zwei Gleichungen

$$N(p,q) = A(p,q) \tag{1}$$

und

$$X = N(p,q). (2)$$

Die einfache "Weil …, deshalb …" – Kausalität der von vielen Prüfungsteilnehmern gegebenen Antworten wird ersetzt durch die Vorstellung, daß q als exogener Faktor das durch diese Gleichungen beschriebene System insgesamt beeinflußt, ohne daß die den Einzelgleichungen des Systems zugrunde liegenden Wirkungszusammenhänge detailliert erfaßt würden.

Ganz allgemein gilt: Von Ausnahmefällen abgesehen, verwenden die Wirtschaftswissenschaften die Kategorie der Kausalität bei der Erklärung ökonomischer Zusammenhänge nicht im Sinne einer geordneten Abfolge von "Weil …, deshalb …" – Sätzen. Wir gehen vielmehr davon aus, daß nach Veränderung einer als exogen betrachteten Größe das jeweilige System als Ganzes ein neues Gleichgewicht findet. Dabei spielen neben den direkten Auswirkungen der exogenen Variablen auch die indirekten Auswirkungen eine Rolle, die sich aus den Interaktionen der endogenen Variablen ergeben. Kausalzusammenhänge werden erfaßt durch Aussagen über die komparative Statik der Auswirkungen von Änderungen in den exogenen Variablen auf die Gesamtheit der endogenen Variablen des betrachteten Systems.

#### 1.2 Warum keine Rekursivität der Kausalbeziehungen?

Noch in den fünfziger Jahren war die vorstehend skizzierte Sichtweise umstritten. In der damals laufenden Diskussion um die Frage, inwiefern und auf welche Weise es möglich ist, Angebots- oder Nachfragefunktionen aufgrund von Marktdaten empirisch zu schätzen, vertrat der schwedische Ökonometriker Herman Wold (1954) die Auffassung, daß es simultane

Systeme im eigentlichen Sinn gar nicht gebe, da Verursachungszusammenhänge immer eine sequentielle Struktur hätten. Die Interdependenz der verschiedenen Variablen im Systemzusammenhang sei daher *rekursiv* zu modellieren. Kausalität sei immer in einer geordneten Abfolge von "Weil …, deshalb …" – Sätzen zu erfassen.

Im vorstehenden Beispiel könnte man etwa schreiben

$$N_t = N(p_{t-1}, q), A_t = A(p_{t-1}, q),$$
 (3)

$$X_{t} = \min(N_{t}, A_{t}), \tag{4}$$

$$p_{t} = p_{t,1} + \alpha (N_{t,1} - A_{t,1}), \tag{5}$$

um anzugeben, wie Mengen und Preise sich bei gegebenem q und gegebenen Anfangsbedingungen in einer Folge von Perioden t=1,2,3... entwickeln. Gleichung (3) entspricht der Vorstellung, daß Anbieter und Nachfrager mit einer Verzögerung auf den Preis reagieren, Gleichung (4) der Vorstellung, daß die tatsächlich gehandelte Menge dem Minimum von Angebot und Nachfrage entspricht, da niemand zu einer Transaktion gezwungen werden kann. Gleichung (5) mit  $\alpha>0$  entspricht dem "Gesetz von Angebot und Nachfrage", das heißt der Vorstellung, daß der Preis steigt bzw. sinkt je nachdem, ob die Nachfrage das Angebot oder das Angebot die Nachfrage übersteigt.

Wolds Auffassung hat sich nicht durchgesetzt, in der Wirtschaftstheorie so wenig wie in der empirischen Wirtschaftsforschung. Die Wirtschaftstheorie hat sich von der Beschäftigung mit Ungleichgewichtsprozessen abgewandt. Dafür gibt es einen pragmatischen Grund und einen fundamentalen Grund. Der pragmatische Grund liegt darin, daß die Länge der für Wirtschaftsdaten relevanten Berichtsperioden zumeist deutlich größer ist als die Länge der für die Verursachungszusammenhänge maßgeblichen Zeitspannen. Die etwa von den statistischen Ämtern zur Verfügung gestellten Berichtsdaten sind daher allenfalls als Zeitaggregate oder Zeitdurchschnitte der für die sequentiellen Verursachungszusammenhänge maßgeblichen Größen anzusehen. Als solche weisen sie nicht die von Wold behauptete rekursive Struktur auf. Statt dessen gilt: Ist der Gesamtprozeß stabil und ist die Beobachtungsperiode lang im Verhältnis zu der für die Verursachungszusammenhänge maßgeblichen Zeitspanne, so wird der Zusammenhang zwischen den verfügbaren Berichtsdaten annähernd durch das System simultaner Gleichungen für ein Systemgleichgewicht erfaßt. Im vorstehenden Beispiel etwa erfüllen die Zeitdurchschnitte

$$X = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} X_t$$
 und  $p = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} p_t$ 

von Mengen und Preisen des dynamischen Systems (3) bis (5) über T Perioden annähernd die Gleichgewichtsbedingungen (1) und (2), wenn T groß ist.

Ein tieferer Grund für die Konzentration auf simultane Systeme von Gleichgewichtsbedingungen liegt darin, daß wir zu diesen mehr Zutrauen haben als zu irgendeiner Spezifizierung der Ungleichgewichtsdynamik.<sup>2</sup> So haben wir für die Gleichgewichtsbedingungen (1) und (2) eine Theorie, die uns als halbwegs verläßlich erscheint, für die Ungleichgewichtsdynamik (3) bis (5) dagegen nicht. Im Gegenteil: Warum sollte das Verhalten der Anbieter und Nachfrager in Periode t vom Preis  $p_{t-1}$  in der Vorperiode abhängen, wenn dieser für Transaktionen in Periode t gar nicht maßgeblich ist. Hat es in der Vorperiode einen Nachfrageüberhang gegeben, so wissen die Betroffenen, daß der Preis in Periode t höher sein wird als in Periode t-1. Warum sollten sie diese Information nicht nutzen? Auch die Preisanpassungsgleichung (5) ist zu hinterfragen. Wessen Verhalten wird durch diese Gleichung beschrieben? Warum sollten die Preise bei einem Nachfrageüberhang nicht noch drastischer erhöht werden, als diese Gleichung es angibt?

Das Fehlen einer überzeugenden Ungleichgewichtsdynamik ist lange Zeit als schwerwiegendes Defizit betrachtet worden. Inzwischen schenkt die Wirtschaftstheorie diesem Problem kaum noch Aufmerksamkeit. Das mag an einer gewissen Abstumpfung liegen. Vielleicht aber spiegelt sich darin die Einsicht, daß Ungleichgewichtsdynamik überhaupt wenig theoretisierbare Struktur aufweist.

Geht man etwa den angesprochenen Fragen nach, so muß man sich mit dem Umstand auseinandersetzen, daß die verschiedenen Marktteilnehmer wechselseitig voneinander abhängen. Welche Strategie bzw. welches Verhalten für den einzelnen Marktteilnehmer sinnvoll ist, hängt davon ab, was die anderen Marktteilnehmer tun bzw. vorhaben. Entsprechendes gilt aber auch für diese. Insofern weist die Strategienwahl der verschiedenen Teilnehmer eine gewisse Zirkularität auf.

Diese Zirkularität ist das Grundthema der Spieltheorie als maßgeblicher Grundlagenwissenschaft für die Wirtschaftstheorie.<sup>3</sup> Im Zentrum der Spieltheorie steht der Begriff des Nash-Gleichgewichts, definiert als eine Konstellation von Strategien der verschiedenen Teilnehmer mit der Eigenschaft, daß die für Teilnehmer i angegebene Strategie von diesem auch gewählt wird, wenn er erwartet, daß die übrigen Teilnehmer die für sie angegebenen Strategien verfolgen. Wieder haben wir es mit einem simultanen System von Gleichgewichtsbedingungen zu tun, eines für jeden Teilnehmer.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Zu diesem Problem siehe Arrow (1959).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> So schon von Neumann (1928).

Für dieses System allerdings ist Wolds Programm der rekursiven Modellierung von Interdependenzen von vornherein zum Scheitern verurteilt. Der Begriff der Strategie hat nämlich eine doppelte Funktion. Zum einen erfaßt dieser Begriff das, was der einzelne tut. Zum anderen erfaßt er das, was die übrigen Beteiligten von dieser Person erwarten. Der Begriff des Nash-Gleichgewichts fordert, daß Erwartungen der übrigen Beteiligten der tatsächlich gewählten Strategie entsprechen. Ist diese Konsistenzbedingung erfüllt, so erübrigt es sich, zwischen beiden Aspekten des Strategiebegriffs zu unterscheiden. Ist die Konsistenz aber nicht gegeben, so müßte eine Ungleichgewichtsdynamik genau spezifizieren, wer wann welche Erwartungen hat, wie diese Erwartungen durch die Beobachtung tatsächlichen Verhaltens beeinflußt werden und wie sie ihrerseits das Verhalten beeinflussen. Der Versuch, eine solche Ungleichgewichtsdynamik zu entwerfen, ist müßig. Dies wird spätestens dann klar, wenn man sich fragt, ob die Beteiligten nicht auch die Struktur der Ungleichgewichtsdynamik selbst in ihre Erwägungen einbeziehen sollten. Bei ihrer Strategiewahl müßten sie dann jeweils das Lernen und die durch Lernen verursachten Verhaltensanpassungen der anderen Teilnehmer berücksichtigen. Versuchen diese, dasselbe zu tun, so stellt sich das Problem der Zirkularität in der Strategiewahl auf höherer Ebene erneut.

In Experimenten stellt man zumeist fest, daß die Teilnehmer eine gewisse Lernphase brauchen, bis sie das Spiel, das gespielt wird, verstehen. Danach sind dann stabile Verhaltensmuster zu beobachten. Die Lernphase weist kaum Struktur auf. Daher versuchen die Experimentatoren auch nicht, sie zu interpretieren. Interpretationsversuche beschränken sich auf die stabilen Verhaltensmuster, die nach Abschluß der Lernphase zu beobachten sind.

Besonders deutlich wird dieser Befund in *Marktexperimenten* mit sogenannten "double oral auctions", bei denen alle Teilnehmer öffentlich Kauf- oder Verkaufgebote zu jeweils von ihnen genannten Preisen abgeben können.<sup>4</sup> Gestaltet man das Experiment so, daß jeweils etwa zehn oder mehr potentielle Anbieter und zehn oder mehr potentielle Nachfrager an der Prozedur teilnehmen, so kommt es am Anfang zu zwei oder drei Transaktionen, die theoretisch nicht weiter erklärt werden können. Danach finden alle weiteren Transaktionen im Experiment ungefähr zu dem durch Gleichung (1) bestimmten Gleichgewichtspreis statt; die insgesamt gehandelten Mengen entsprechen dem gemeinsamen Wert von Angebots- und Nachfragefunktion zu diesem Preis. Eine Struktur der Ungleichgewichtsdynamik, die zu diesem Gleichgewicht hinführte, ist in den Experimenten nicht erkennbar.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Siehe Smith (1982).

#### 2 Implikationen für den Umgang mit "Kausalität"

Die hier skizzierte Vorstellung von Kausalitätsaussagen als Aussagen über die komparative Statik der Auswirkungen von Veränderungen in den exogenen Variablen auf Systemgleichgewichte hat erhebliche Konsequenzen für das Denken und Reden über Kausalzusammenhänge. Einige dieser Konsequenzen werden im Folgenden skizziert.

#### 2.1 Indirekte Effekte und das Problem der Kommunikation über Kausalzusammenhänge

Zunächst ist die Bedeutung *indirekter* Effekte zu nennen, das heißt solcher Effekte, die sich erst aus den Interaktionen im System ergeben und die den exogenen Variablen nicht unmittelbar zuzurechnen sind. Intuitiv neigen wir dazu, "indirekt" mit "weniger wichtig" gleichzusetzen und vor allem auf direkte Effekte abzustellen. Dies kann im Einzelfall völlig falsch sein. Als beispielsweise der englische Premierminister Pitt d. J. 1784 die Einfuhrzölle auf Tee drastisch senkte, *erhöhten* sich die staatlichen Einnahmen aus diesem Zoll, weil der Teeschmuggel sich nicht mehr lohnte.

Von besonderer Bedeutung sind indirekte Effekte, die dadurch entstehen, daß Preise sich ändern. Politiker, die bestimmte Fördermaßnahmen beschließen, lassen sich gern von den "offiziellen" Nutznießern feiern. Jedoch wird zumeist übersehen, daß die Fördermaßnahmen auch Preisänderungen induzieren, die die direkten Wirkungen reduzieren, wenn nicht sogar gänzlich aufheben.

Ein einprägsames Beispiel liefert die internationale Schuldenkrise der achtziger Jahre. Da die Schuldtitel hoch verschuldeter Länder auf den Sekundärmärkten zu einem Bruchteil des Nennwerts gehandelt wurden, wurde die Idee lanciert, Unterstützungsgelder der OECD-Länder oder des Internationalen Währungsfonds zum Rückkauf solcher Schuldtitel und zur Entschuldung dieser Länder zu verwenden. Die Probe aufs Exempel machte Bolivien: Für ca. 34 Millionen US-Dollar wurden Schuldtitel mit einem Nennwert von 308 Millionen US-Dollar aufgekauft und gestrichen. Was auf den ersten Blick wie ein Erfolg aussehen mag, wird fragwürdig, sobald man berücksichtigt, daß der Preis der Schuldtitel vor Ankündigung der Rückkaufaktion bei 6 Cents auf den Dollar lag und nach der Rückkaufaktion bei 11 Cents auf den Dollar. Der Marktwert der bolivianischen Schulden betrug vor der Aktion 40,2 Millionen Dollar, nach der Aktion 39,8 Millionen Dollar. Die Banken, die diese Schuldtitel gehalten hatten, erfuhren also einen Vermögenszuwachs um 33,6 Millionen US-Dollar.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Dazu siehe Bulow & Rogoff (1990).

Und Bolivien? Die tatsächliche Belastung eines Schuldners hängt nicht davon ab, was er nominell schuldet, sondern davon, was er de facto als Schuldendienst leistet. Der Umstand, daß der Marktwert der bolivianischen Schulden nach der Rückkaufaktion praktisch derselbe war wie vorher, deutet an, daß zumindest die Banken, die diese Titel hielten, keine große Änderung der tatsächlichen Schuldendienstleistungen erwarteten. Der Schuldenrückkauf und die damit verbundene Minderung des Nennwerts der Schulden hatte den indirekten Effekt, daß der gegebenen, ohnehin unzureichenden Schuldendienstkapazität Boliviens weniger Schuldtitel gegenüberstanden, mithin für jeden einzelnen dieser Titel mehr zu erwarten war. Diese Erwartung spiegelt sich im Preisanstieg von 6 auf 11 Cents für den Dollar, der schon für den Rückkauf selbst galt.6

Die Interdependenz der Variablen im Systemzusammenhang und die Existenz indirekter Effekte erschweren den Umgang mit Kausalzusammenhängen im öffentlichen Diskurs. Die Beteiligten denken zuerst an die direkten Effekte. Selbst wenn die indirekten Effekte ins Gespräch gebracht werden, besteht die Tendenz, die direkten Effekte stärker zu gewichten. Der Politiker, der sich vor seinen Wählern hervortun will, stellt auf die direkten Effekte ab, da diese leicht kommunizierbar sind und unmittelbar wahrgenommen werden. Die indirekten Effekte werden nicht unmittelbar wahrgenommen und dem Politiker zugerechnet; sie sind auch nicht so leicht kommunikativ zu vermitteln. Werden sie gleichwohl ins Gespräch gebracht, so kann man sie leicht als Hirngespinste weltfremder Professoren abtun – kompliziert genug sind sie ja. So machte ich 1991/92 in der Diskussion um die Initiative zur Entschuldung der Länder der Dritten Welt anläßlich der 700-Jahr-Feier der Schweiz die Erfahrung, daß eine interessante Koalition aus Kirchenvertretern und Bankleuten den Hinweis auf die mögliche Unwirksamkeit eines Schuldenrückkaufs als abstrakte Theorie abtat. Die einen hatten die Initiative lanciert, die andern begrüßten die Möglichkeit, Schuldtitel aus ihrem Bestand an den Steuerzahler zu verkaufen. Die Erfahrung von Bolivien wurde als störend empfunden und nicht zur Kenntnis genommen.

Dabei weisen die angesprochenen Preiseffekte noch eine relativ einfache Struktur auf. Die Aussage, daß der Einsatz staatlicher Mittel für Subventionen bestimmte Preise ansteigen läßt, entspricht noch dem Grundmuster einfacher Kausalitätsbeziehungen, wie es in den Antworten zu der eingangs beschriebenen Prüfungsfrage zum Ausdruck kam. Ein Verständnis des Systemzusammenhangs ist nur insofern erforderlich, als man das genaue Ausmaß des Preisanstiegs theoretisch erklären will.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Man kann sich auch fragen, welcher Teil der Bausubventionen beim Aufbau Ost in Immobilienpreiserhöhungen und welcher Teil in tatsächliche Bautätigkeit ging.

Wenn diese einfachen indirekten Effekte schon Probleme aufwerfen, wie schwierig ist dann erst die Kommunikation über Wirkungszusammenhänge, bei denen es noch mehr auf die Details der Systeminterdependenz ankommt? Will man beispielsweise die Wirkungen eines staatlichen Bauprogramms zur Ankurbelung der Beschäftigung prognostizieren, so muß man berücksichtigen, daß der Gesamteffekt durch das Zusammenspiel vieler Märkte und vieler Preise geprägt wird. Neben dem Bausektor selbst wären zu nennen der Finanzsektor und die Reaktion der Zinssätze auf eine etwaige Schuldenfinanzierung, die Gütermärkte und die Reaktion der Güterpreise auf Nachfragesteigerungen, des weiteren die Leistungsbilanz und die Reaktion der Wechselkurse sowie, *last not least*, die Arbeitsmärkte und die Reaktion der Tarifpartner und der Löhne auf die staatliche Beschäftigungspolitik. Selbst wenn man den einen oder anderen Aspekt ausklammert und sich auf die rudimentärste Form der Analyse beschränkt, kommt man nicht mit weniger als drei simultanen Gleichungen aus. In diesen hängt dann alles mit allem zusammen, und es ist praktisch nicht mehr möglich, die komparative Statik des Systemgleichgewichts in intuitiv verständliche – und kommunizierbare – Einzeleffekte zu zerlegen.<sup>7</sup>

Für den Mathematiker ist das hier beschriebene Problem einfach. Mit Hilfe des Satzes über implizite Funktionen läßt sich aus den Gleichungen, die die Bedingungen für ein Systemgleichgewicht angeben, ein Zusammenhang zwischen exogenen und endogenen Variablen herstellen. Die komparative Statik des Systemgleichgewichts ist nach den Vorgaben dieses Satzes zu berechnen. Allerdings ist dazu die Inversion einer Matrix erforderlich; bei dieser Operation geht jegliche Intuition über die jeweiligen Gesamteffekte der Veränderung einer exogenen Variablen auf eine endogene Variable verloren. Der Satz über implizite Funktionen bildet zwar die Grundlage für das Verständnis von Kausalität im Systemzusammenhang; er eignet sich aber nicht als Grundlage für Kommunikation über die Art der Kausalität in einer Welt, in der natürliche Sprech- und Denkvorgänge sich jeweils in einer Abfolge von "Wenn …, dann …"- oder "Weil …, deshalb …"-Sätzen vollziehen.

.

Der Versuch, eine solche Zerlegung gleichwohl vorzunehmen, um den Studierenden das Gefühl zu geben, daß sie die Zusammenhänge verstehen, gehört zu den Wonnen der Lehre im volkswirtschaftlichen Grundstudium.

## 2.2 Multiplizität von Gleichgewichten und Nichtlinearität als Probleme für das Verständnis von Kausalität

Bisher habe ich implizit angenommen, daß die Bedingungen für ein Systemgleichgewicht jeweils eine eindeutige Lösung haben. Diese Annahme ist nur in Ausnahmefällen gerechtfertigt. In vielen Zusammenhängen ist damit zu rechnen, daß das zu untersuchende System für etliche Konstellationen der exogenen Variablen multiple Gleichgewichte aufweist. Dafür gibt es verschiedene Gründe. Zum einen kann es vorkommen, daß Angebot und Nachfrage in einem oder mehreren Märkten sich anders verhalten als in Abbildung 1 unterstellt. So können Einkommenseffekte dazu führen, daß in bestimmten Bereichen das Angebot mit zunehmendem Preis nicht weiter steigt, sondern sinkt. Im Arbeitsmarkt etwa ist mit der Möglichkeit zu rechnen, daß bei hohen Lohnsätzen – und dadurch ermöglichten hohen Realeinkommen viel Wert auf Freizeit gelegt wird, da die wichtigsten Konsumwünsche bereits gedeckt sind. Ferner können Informationseffekte dazu führen, daß die Nachfrage bei zunehmendem Preis nicht sinkt, sondern konstant bleibt, möglicherweise sogar steigt. Mit dieser Möglichkeit ist insbesondere dann zu rechnen, wenn uninformierte Marktteilnehmer aus der Preisentwicklung auf die Information von "Insidern" zurückschließen. Bei hohen Preisen wird dann vermutet, daß die Insider günstige Information erhalten haben. Dies läßt das betreffende Objekt als attraktiv erscheinen.

Auch ohne Einkommens- und Informationseffekte können strategische Interdependenzen dazu führen, daß es multiple Gleichgewichte gibt. Hier ist an das bekannte Phänomen der sich selbst bestätigenden Prognose zu erinnern. Wenn ich erwarte, daß alle anderen Einleger meiner Bank vorhaben, ihre Mittel abzuheben, und daß die Bank deshalb schließen wird, so werde ich zusehen, daß ich möglichst schnell zur Bank laufe, um weit vorn in die Warteschlange zu kommen. Erwarte ich dagegen, daß alle Vertrauen in die Bank haben, und gibt es auch keine objektiven Anhaltspunkte für ein Problem, so habe ich keine Bedenken, meine Mittel ebenfalls bei der Bank zu lassen. Stellen wir uns vor, daß die Einleger der Bank ein strategisches Spiel spielen, bei dem jeder entscheidet, ob er seine Mittel abhebt oder nicht, und die Ergebnisse davon abhängen, wieviel Leute unmittelbar versuchen, ihre Mittel abzuheben, so hat dieses Spiel zwei Gleichgewichte, eines, in dem alle abheben wollen, weil alle erwarten, daß alle anderen abheben wollen, und eines, in dem niemand abheben will, weil niemand erwartet, daß irgend jemand anderes abheben will.

Für den Umgang mit der Kategorie der Kausalität wirft die Möglichkeit multipler Systemgleichgewichte grundlegende Fragen auf. Zunächst: was bedeutet es für unser Verständnis von Kausalität, wenn man nicht über die Aussage hinauskommt, bei einem gegebenen Wert der exogenen Variablen, etwa dem Wert  $x_1$  in Abbildung 2, habe das System drei Gleichgewichte, entsprechend  $y_1$ ,  $y_2$  und  $y_3$ ? In dieser Abbildung bezeichnet die umgekehrt-Sförmige Kurve jeweils die Menge der Gleichgewichte zu verschiedenen Werten der exogenen Variablen. Die Interpretation der Variablen und der Kurve hängt vom Kontext ab; für jeden der vorstehend genannten Gründe für Multiplizität, Einkommenseffekte, Informationseffekte und strategische Interdependenzen lassen sich Modelle konstruieren, für die der Zusammenhang von exogenen und endogenen Variablen durch Abbildung 2 dargestellt wird. Die verfügbare Theorie bietet uns nicht die Möglichkeit, genauer zu sagen, welches der drei Gleichgewichte  $y_1$ ,  $y_2$  und  $y_3$  realisiert wird, wenn die exogene Variable den Wert  $x_1$  annimmt.

Für jemanden mit einem traditionell deterministischen Verständnis von Kausalität muß dieser Zustand der Wirtschaftstheorie als unbefriedigend erscheinen. Ist die Theorie nicht unvollständig? Müßte man nicht weitergehen und versuchen, etwas darüber zu sagen, wie im System bestimmt wird, welches Gleichgewicht sich ergibt? Auf diesem Weg ist man allerdings trotz vieler Bemühungen nicht weitergekommen. Das liegt letztlich wiederum daran, daß wir keine klaren Vorstellungen über Ungleichgewichtsdynamik haben. Daher glaube ich auch nicht, daß dieser Weg uns weiterführt, und meine, wir müssen uns damit abfinden, daß es zu einer gegebenen Konstellation der exogenen Variablen im allgemeinen mehrere mögliche Systemgleichgewichte gibt. Man kann diesen Befund auch als Chance betrachten, läßt er doch Raum für die Vorstellung, daß bei wechselseitigen Abhängigkeiten der Beteiligten das Verhalten des einzelnen in einem sehr tiefen Sinn sozial bedingt ist.

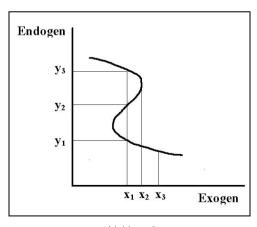


Abbildung 2

Abbildung 2 veranschaulicht noch ein weiteres Problem. Angenommen, das System beginnt bei der Konstellation  $(x_1, y_3)$ . Was passiert, wenn die exogene Variable sich erhöht? Genau genommen wissen wir es nicht. Man kann aber vermuten, daß die Umstände, die in der Ausgangssituation zur Auswahl des Gleichgewichts  $y_3$  geführt haben, bei einer kleinen Veränderung der exogenen Variablen zur Auswahl eines Gleichgewichts in der Nähe von  $y_3$  führen. Das geht so lange, bis die exogene Variable den Wert  $x_2$  erreicht. Steigt sie dann noch weiter, so muß das Gleichgewicht unstetig nach unten "springen", denn für Werte der exogenen Variablen oberhalb von  $x_2$  ist das Gleichgewicht eindeutig. Was bedeutet es für unser Verständnis von Kausalität, wenn eine kleine Veränderung der exogenen Variablen von  $x_2$  nach oben zu einer unstetigen Veränderung im realisierten Gleichgewicht führt, weil die Menge der Gleichgewichte, aus denen das System auswählen kann, sich unstetig verändert? Mit intuitiven Vorstellungen über die Kommensurabilität von Ursache und Wirkung hat das nichts mehr zu tun.

Ehe man meint, das sei doch nur realitätsferne Gedankenspielerei, sei angemerkt, daß ernstzunehmende Untersuchungen des Kurssturzes der amerikanischen Börsen im Oktober 1987 zum Schluß gekommen sind, es habe sich um einen unstetigen Sprung des Gleichgewichts gehandelt, wie er hier thematisiert wird. Am Wochenende vor dem Kurssturz hatte es einige, allerdings eher unerhebliche, ungünstige Nachrichten gegeben. Aufgrund der computerisierten Handelsprogramme von Portfolio – Versicherern und aufgrund von Informationseffekten war das Nachfrageverhalten insgesamt jedoch nicht monoton, so daß zunächst kleine Reaktionen auf die Nachrichten des Wochenendes im Tagesverlauf dramatische Folgen hatten.<sup>9</sup>

Entsprechende Unstetigkeiten in der Beziehung von exogenen und endogenen Variablen finden sich auch bei "Runs", etwa auf Banken oder Währungen. Auch hier steht die Heftigkeit des "Runs" in keinem Verhältnis zur Bedeutung der letztlich den Run auslösenden Nachrichten und ist nur so zu erklären, daß das System von einem Extrem zum anderen springt. Allerdings ist nicht auszuschließen, daß es auch ohne Multiplizität von Gleichgewichten zu einer Inkommensurabilität von Ursache und Wirkung kommt. So ist in Abbildung 3 der Zusammenhang von exogenen und endogenen Variablen zwar eindeutig und auch stetig, doch

Vorsorglich sei angemerkt, daß in den Beispielen, für die Abbildung 2 steht, die Strukturdaten alle Stetigkeitseigenschaften aufweisen können, die man sich nur wünschen kann. Die hier angesprochene Unstetigkeit in der Beziehung zwischen exogenen und endogenen Variablen geht nicht auf eine Unstetigkeit im Modell selbst zurück.

Siehe Genotte & Leland (1990).

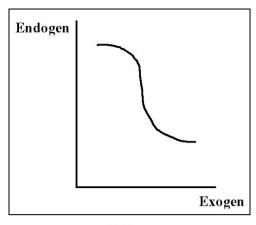


Abbildung 3

gibt es einen kritischen Bereich, in dem eine kleine Veränderung der exogenen Variablen eine absolut betrachtet zwar auch kleine, aber in der Relation gesehen doch ungleich größere Veränderung der endogenen Variablen induziert. Die in Abbildung 3 gezeigte Konstellation kann sich in denselben Modellen ergeben wie die in Abbildung 2 gezeigte. Untersucht man beispielsweise die Bedingungen für einen "Bank Run", so wird man feststellen, daß je nach Spezifizierung der den verschiedenen Beteiligten jeweils einzeln oder allgemein zur Verfügung stehenden Informationen entweder die Konstellation von Abbildung 2 oder die Konstellation von Abbildung 3 herauskommt.<sup>10</sup>

#### 2.3 Probleme der empirischen Erfassung von Kausalzusammenhängen

Die Interdependenz der endogenen Variablen im Systemzusammenhang schafft auch Probleme für die empirische Erfassung von Kausalzusammenhängen. Bei der empirischen Erfassung von Kausalzusammenhängen, bzw. ganz von ökonomischen Zusammenhängen allgemein, gehen wir von beobachteten Korrelationen aus und fragen uns, ob bzw. welche Strukturzusammenhänge hinter diesen Korrelationen stecken könnten. Die Möglichkeit einer Scheinkorrelation ist wohl jedem bewußt, der sich einmal überlegt hat, daß zwischen 1965 und 1985 die Zahl der nistenden Klapperstörche und der Geburtenziffern in Deutschland wohl gleichlaufend zurückgegangen sind. Jedoch – wie schützt man sich vor der Gefahr,

-

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Siehe Morris & Shin (2003).

daß man eine Scheinkorrelation als Strukturzusammenhang interpretiert? Wie können wir wissen, wann wir es mit einer Scheinkorrelation und wann wir es mit einem Strukturzusammenhang zu tun haben?

Dazu ein brisanteres Beispiel: Im Geschichtsunterricht zur Weltwirtschaftskrise haben die meisten von uns gelernt, daß die Brüningsche Politik der Haushaltsdisziplin und der Lohnkürzungen verfehlt war, weil sie die Massenkaufkraft aus der Wirtschaft nahm und diese noch tiefer in die Krise stürzte. Woher wissen wir das eigentlich? Die Daten zeigen ein Nebeneinander von Brüningscher Politik und Vertiefung der Krise. Könnte es sich nicht auch um eine Scheinkorrelation handeln? Woher wissen wir, daß die Vertiefung der Krise im zweiten Halbjahr 1931 der Lohnpolitik und nicht etwa den Währungsturbulenzen und der Bankenkrise zuzurechnen war? Im übrigen, ist es wirklich angemessen, die Brüningsche Politik als exogen zu betrachten? Müßte man nicht irgendwie dem Umstand Rechnung tragen, daß diese Politik selbst aufgrund der haushaltspolitischen Zwänge maßgeblich von der Wirtschaftsentwicklung beeinflußt war?

In beiden Beispielen muß man sich mit dem Umstand auseinandersetzen, daß keine der betrachteten Größen wirklich exogen ist. Wir interpretieren die Daten mit Hilfe von zusätzlichem Wissen und von Theorie, etwa der keynesianischen Theorie der Bedeutung der gesamtwirtschaftlichen Nachfrage für die Konjunktur. Wie aber, wenn diese Theorie selbst kontrovers ist? Inwiefern können wir dann noch von einer eigenständigen empirischen Analyse reden? Müßte man nicht vorab die Theorie selbst empirisch validieren?

Die Frage einer Überprüfung der keynesianischen Theorie stand in den sechziger Jahren im Zentrum der Auseinandersetzung der sogenannten Monetaristen mit dem Keynesianismus. Milton Friedman und andere schätzten die Korrelationen zwischen der Entwicklung des amerikanischen Bruttosozialprodukts und dem Wachstum der Geldmenge sowie verschiedenen "keynesianischen" Variablen, staatlichen Haushaltsdefiziten, Investitionen usw.<sup>11</sup> Sie fanden, daß das nominale Bruttosozialprodukt sehr stark mit den monetären Variablen und so gut wie gar nicht mit den "keynesianischen" Variablen korrelierte, und schlossen daraus, daß die keynesianische Theorie der gesamtwirtschaftlichen Nachfrage von den Daten verworfen wird. Ein gültiger Befund? Oder nur ein Spielen mit Scheinkorrelationen?

Von keynesianischer Seite kam dazu folgendes Argument: <sup>12</sup> Stellen wir uns vor, eine wirtschaftspolitische Instanz versuche, das Bruttosozialprodukt zu stabilisieren. Aufgrund der ihr zur Verfügung stehenden Informationen und Prognosen interveniert sie jeweils aktiv, um an-

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Siehe Friedman & Meiselman (1963).

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Siehe Blinder & Solow (1973).

stehende kurzfristige Schwankungen auszugleichen. Sind ihre Prognosen gut und ist ihre Politik wirksam, so werden die Daten zeigen, daß die Politikvariable hin und her schwankt, das Bruttosozialprodukt aber nicht. Friedman würde aus den Daten schließen, daß die wirtschaftspolitische Intervention nicht wirkt. Tatsächlich aber ist die Intervention nicht nur wirksam, sondern auch erfolgreich. Die Endogenität der zur Wirtschaftsstabilisierung eingesetzten Politik bewirkt, daß die gemessenen empirischen Korrelationen gegenüber den tatsächlichen Wirkungszusammenhängen nach unten hin verzerrt sind. Die Verzerrung ist um so größer, je besser die Prognosen der politischen Instanz sind. Die von Friedman festgestellten Unterschiede in den Korrelationen von fiskalpolitischen und geldpolitischen Variablen mit dem Bruttosozialprodukt könnte man daher auch so deuten, daß die Fiskalpolitik mit besseren Prognosen arbeitet und für eine Stabilisierung der Wirtschaft besser geeignet ist als die Geldpolitik!

Gibt es eine Möglichkeit, zwischen derart verschiedenen Deutungen der Daten zu unterscheiden? Wenn keine weitere Information zur Verfügung steht, ist die Antwort auf diese Frage grundsätzlich "nein". Interdependenz der endogenen Variablen im Systemzusammenhang schließt eine Identifikation der zugrunde liegenden Strukturen nur anhand der Daten weitgehend aus. Dazu sei noch einmal auf das einführende OPEC-Beispiel verwiesen. In diesem Beispiel sind nur zwei Datenpunkte zu beobachten, die Ausgangskonstellation ( $q_0$ ,  $X(q_0)$ ,  $p(q_0)$ ) und die spätere Konstellation ( $q_1$ ,  $X(q_1)$ ,  $p(q_1)$ ). Aus diesen zwei Datenpunkten ist nicht zu erschließen, wie der Energiepreis auf die Angebotsfunktion oder die Nachfragefunktion wirkt. Es ist noch nicht einmal zu erschließen, wie jeweils die Angebotsfunktion oder die Nachfragefunktion selbst aussieht. Natürlich kann man die Parameter der Geraden durch die Punkte ( $X(q_0)$ ,  $p(q_0)$ ) und ( $X(q_1)$ ,  $p(q_1)$ ) bestimmen, doch diese Gerade hätte keinerlei ökonomische Bedeutung – sie spiegelte nur einen "Scheinzusammenhang".

Anders sieht es aus, wenn man auf zusätzliche Information zurückgreifen kann. Stellen wir uns vor, die Änderungen im Automarkt werden nicht durch die OPEC, sondern durch eine Erhöhung der Kfz-Steuer veranlaßt. Es ist zu vermuten, daß die Kfz-Steuer nur die Nachfrageseite des Marktes beeinflußt. Die Angebotsseite des Marktes sollte nicht davon betroffen sein.  $^{14}$  In Abbildung 1 ergäbe sich eine Linksverschiebung der Nachfragekurve, bei unveränderter Angebotskurve. Der neue Gleichgewichtspunkt entspräche etwa dem Schnittpunkt der Kurven  $A(\cdot, q_0)$  und  $N(\cdot, q_0)$ . Wie der alte Gleichgewichtspunkt läge er auf der Angebotskurve  $A(\cdot, q_0)$ . Aus dem Vergleich des alten und des neuen Gleichgewichtspunktes ließe

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Für eine systematische Auseinandersetzung mit dem Problem der Identifikation siehe Manski (1995).

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Es sei denn, die Kfz-Steuer beeinflusse die Lohnverhandlungen.

sich Information über die Gestalt dieser Kurve gewinnen, unterstellt man, daß die Angebotskurve  $A(\cdot, q_0)$  eine Gerade ist, so ließen sich die Koeffizienten dieser Geraden unmittelbar schätzen. Die Identifikation der Angebotskurve wird möglich aufgrund der Annahme, daß die Kfz-Steuer unmittelbar die Nachfrageseite des Marktes betrifft. Eine solche "identifizierende Annahme" beruht selbst auf zusätzlicher Information, Theorie, oder Vorurteil.

Die vorstehende Überlegung veranschaulicht die Methoden des Umgangs mit dem Problem der empirischen Erfassung der Strukturen wirtschaftlicher Zusammenhänge, wenn die endogenen Variablen wechselseitig voneinander abhängen, so daß die einfachen Korrelationen keinerlei Bedeutung haben. Um die Strukturen zu identifizieren, sucht man nach "natürlichen Experimenten", das heißt nach Ereignissen und Entwicklungen, bei denen es auf der Hand liegt, daß bestimmte Einflußkanäle keine Rolle spielen, so im Beispiel der mögliche Einfluß der Kfz-Steuer auf das Angebotsverhalten der Autohersteller. In dem Maße, in dem die verfügbaren Daten diese Möglichkeit der Identifikation hergeben, kann man die durch die Systeminterdependenz der endogenen Variablen begründeten Schwierigkeiten bewältigen, ansonsten nicht.

Für die Kontroverse um Monetarismus und Keynesianismus bleibt das Ergebnis unbefriedigend. Hier ist noch keine wirklich tragfähige Identifikation gelungen. <sup>15</sup> Und für die Vorgänge in der Weltwirtschaftskrise? Hierzu gibt es die Beobachtung, daß Länder mit ähnlichen wirtschaftlichen Strukturen und ähnlichen Modalitäten der Einbettung in das internationale Handels- und Währungssystem bei unterschiedlichen Formen der Lohnpolitik unterschiedliche Erfahrungen gemacht haben; so gingen in der Weltwirtschaftskrise in Belgien die Löhne um ca. 40 % und die Beschäftigung um ca. 10 % zurück, in der Schweiz dagegen die Löhne um ca. 10 % und die Beschäftigung um ca. 40 %. <sup>16</sup> Sind die identifizierenden Annahmen gut genug, um aus diesem und ähnlichen Vergleichen Schlüsse zu ziehen? Diese Frage ist methodisch, als Herausforderung für die empirische Wirtschaftsforschung, mindestens so brisant wie wirtschaftspolitisch.

-

Dieses Identifikationsproblem wird noch erschwert durch das Problem der zeitlichen Zurechnung der Daten, insbesondere aufgrund der eigenständigen Rolle von Erwartungen. So argumentiert Branson (1987), daß die Reagansche Steuersenkung in den USA gewisse Wirkungen hatte, ehe sie überhaupt verabschiedet war: Als die Anleger in den Finanzmärkten im Januar 1981 begriffen, daß Reagan es mit dieser Politik ernst meinte und daß er im Kongreß eine Mehrheit bekommen würde, antizipierten sie die zukünftigen Defizite und deren Wirkungen auf Zinssätze und Wechselkurs und änderten ihre Anlagestrategien; dies bewirkte einen Anstieg von Zinssätzen und Wechselkurs schon zu diesem Zeitpunkt und trug zur Heftigkeit der Rezession von 1982 bei, aus der dann 1983 der direkte Effekt der Steuersenkung herausführte.

Siehe Bernanke (1995).

#### Literatur

Arrow, K. J.: Towards a Theory of Price Adjustment. In: Abramovitz, M. (Hg.), The Allocation of Economic Resources, Stanford, CA: Stanford University Press, 1959, S. 41–51.

Bernanke, B.: The Macroeconomics of the Great Depression: A Comparative Approach. In: Journal of Money, Credit and Banking 27 (1995), S. 1–28.

Blinder, A. S. & R. M. Solow: Does Fiscal Policy Matter? In: Journal of Public Economics (1973), S. 319–337.

Branson, W.: Discussion of "Reaganomics" by O. J. Blanchard. In: Economic Policy 5 (1987), S. 48–52.

Bulow, J. & K. Rogoff: Cleaning up Third-World Debt Without Getting Taken to the Cleaners. In: Journal of Economic Perspectives 4 (1990), S. 31–42.

Friedman, M. & D. Meiselman: The Relative Stability of Monetary Velocity and the Investment Multiplier in the United States. In: Commission on Money and Credit, Stabilization Policies, Prentice Hall, Englewood Cliffs 1963, S. 165–268.

Genotte, G. & H. L. Leland: Market liquidity, hedging and crashes. In: American Economic Review 80 (1990), S. 999–1021.

Manski, C.: Identification Problems in the Social Sciences, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1995.

Morris, S. & H. S. Shin: Global Games – Theory and Applications. In: Dewatripont, M., Hansen, L. & S. Turnovsky (Hg.), Advances in Economics and Econometrics, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003, S. 56–114.

Neumann, J. von: Zur Theorie der Gesellschaftsspiele. In: Math. Annalen 100 (1928), S. 295–320.

Smith, V. L.: Microeconomic Systems as an Experimental Science. In: American Economic Review 72 (1982), S. 923–955.

Wold, H.: Causality and Econometrics. In: Econometrica 22 (1954), S. 162–174 und S. 196–197.

## Kausalität im Zivilrecht

#### 1 Bedeutung "Zivilrecht"

Zivilrecht (Abb. 1) befaßt sich mit den Beziehungen der Bürger untereinander. Auf die feinen begrifflichen Unterschiede zwischen Zivilrecht, bürgerlichem Recht und Privatrecht will ich hier nicht näher eingehen: man findet es jedenfalls im Bürgerlichen Gesetzbuch, im Handelsgesetzbuch und ähnlichen Regelwerken. Das Strafrecht befaßt sich mit dem staatlichen Strafanspruch gegen das Individuum wegen eines im voraus als strafbar festgelegten Verhaltens. Öffentliches Recht, insbesondere Verwaltungsrecht, befaßt sich mit dem Verhältnis zwischen Bürger und Staat. Wirtschaftlich gesehen ist Zivilrecht ein Stück Infrastruktur eines Gemeinwesens wie Energieversorgung und Verkehrswege, das Lebensgestaltung durch Privatpersonen und Unternehmen ermöglicht. Bezeichnet man den Markt als einen Dialog über Werte, dann ist der Vertrag, also ein Produkt des Zivilrechts, die Sprache dieses Dialogs. Auch das ist damit gemeint, wenn von "Privatrechtsgesellschaft" die Rede ist.

## Privatrecht - Zivilrecht - Bürgerliches Recht

- Befasst sich mit den Beziehungen der Bürger untereinander
- Findet sich z.B. im Bürgerlichen Gesetzbuch (BGB), Handelsgesetzbuch (HGB)
- Ermöglicht wirtschaftliche Selbstbestimmung durch Markttransaktionen

Abbildung 1

#### 2 Schadensersatz

Ein wichtiges Instrument im Privatrecht ist der Schadensersatzanspruch (Abb. 2), das heißt das Recht, von einem anderen Ausgleich für eine Einbuße zu verlangen. Im Normalfall muß man Mißgeschicke und Wechselfälle des Lebens hinnehmen. Wenn jemand Aktien der Deutsche Telekom AG zu einem hohen Kurs gekauft hat und mit sinkendem Kurs ein Großteil seiner Investition verliert, erleidet er eine Einbuße. Nur ausnahmsweise kann man einen anderen dafür verantwortlich machen. Für diese Ausnahmen formulieren Gesetze Voraussetzungen, sogenannte Schadensersatztatbestände. Diese enthalten typischerweise einen Verletzungstatbestand sowie Zurechnungsregeln. Zurechnungsregeln sind in erster Linie Kausalität und Verschulden (Vorsatz oder Fahrlässigkeit). Hier beschränke ich mich auf die Kausalität. Beispiele – schon im römischen Recht bekannt – sind der zivilrechtliche Deliktstatbestand der unerlaubten Handlung oder die Gefährdungshaftung des Tierhalters.

Die "Kausalität" im zivilrechtlichen Sinn gehört zu den Zurechnungselementen, die es erlauben, die Einbuße eines Bürgers einem anderen anzulasten. Beispiel: Ihr Hund beißt den Briefträger. Als Hundehalter sind Sie für alle Schäden verantwortlich, die Ihr Hund verursacht (ohne daß es auf ein Verschulden Ihrerseits ankäme). Also müssen Sie für die Folgen des Hundebisses aufkommen.

## Schadensersatz wegen unerlaubter Handlung

## § 823 Abs. 1 BGB:

Wer vorsätzlich oder fahrlässig ... den Körper ... eines anderen widerrechtlich verletzt, ist dem anderen zum Ersatz des daraus entstehenden Schadens verpflichtet.

## § 833 BGB:

Wird durch ein Tier ... der Körper ...eines Menschen verletzt ..., so ist derjenige, welcher das Tier hält, verpflichtet, dem Verletzten den daraus entstehenden Schaden zu ersetzen.

#### 3 Beweis und Beweislast

Der tatsächliche Hergang eines Ereignisses, also was tatsächlich geschehen ist, und das, was bei einer streitigen Auseinandersetzung nachweisbar ist, sind zwei sehr verschiedene Dinge. Sie werden dem Briefträger möglicherweise entgegenhalten: Es war Nachbars Hund (= Bestreiten der Kausalität Ihres Hundes). Solche Probleme werden durch prozeßrechtliche Regeln darüber angegangen, wer etwas im Rechtsstreit vorzutragen und zu beweisen hat. Die Grundregel ist, daß wer etwas verlangt (Kläger), die tatsächlichen Grundlagen für sein Begehren darlegen und beweisen muß. Von dieser Grundregel gibt es Abweichungen, typisiert nach Einflußsphären und Risikobereichen. Wenn in Anwendung eines solchen Verfahrens ein Sachverhalt "fest steht", ändert das nicht die gegebenenfalls doch andere Realität, ist aber maßgebend für eine gerichtliche Entscheidung. Rechtssicherheit und Rechtsgewährung sind hohe Güter, es geht im Prozeß nicht um "Wahrheit" an sich, sondern um Konfliktlösung. Kausalität in diesem Zusammenhang ist also ein soziales Zweck-Konstrukt.

#### 4 Anwendungsbereich: Kapitalmarkt

Um das Beispiel der verlustreichen Investition in Telekom-Aktien aufzugreifen: Hier liegt die Suche nach einem Haftungstatbestand nah, jedenfalls sind derzeit in dieser Angelegenheit ca. 17.000 Verfahren beim Landgericht Frankfurt am Main anhängig. Angenommen, der Aktionär behauptet und beweist, er sei zum Kauf der Aktie durch Studium des Börsenprospekts bewogen worden und der Börsenprospekt habe überhöhte Werte bezüglich Immobilien enthalten. Dann kann er Schadensersatz verlangen.

Daß diese Vorstellung von Kausalität einer Fehlinformation praktisch so nicht funktionieren kann, liegt auf der Hand. Die wenigsten Aktionäre studieren den Börsenprospekt, handeln danach und können das auch noch beweisen. Läuft die Schadensersatzpflicht damit ins Leere? Wie ist die Beweislastverteilung? Wie löst man das Zurechnungsproblem von Einbuße beim Aktionär und falscher Angabe im Prospekt? Welche Zeitfenster sind maßgebend? Welche Rolle spielt überhaupt der individuelle Schadensersatzanspruch im Rahmen der Spielregeln für den Kapitalmarkt?

Die vorhandenen Regeln sind das Produkt von Rechtsprechung, begleitet durch rechtswissenschaftliche und ökonomische Auseinandersetzungen, sowie europäischer und nationaler Gesetzgebung, die ihrerseits von Rechtsprechung und Rechtswissenschaft zehren. Einmal erreichte Ergebnisse werden immer wieder in Frage gestellt, sei es durch Politik, sei es durch

veränderte Umstände oder durch neue Erkenntnisse in den Wissenschaften, zum Beispiel über die Funktionsweise von Kapitalmärkten.

# 5 Kapitalmarkt: Informationsbezug, Funktionsvoraussetzungen, Informationsverarbeitung

Mit dem Kapitalmarkt haben wir ein Beispiel par excellence für den Markt als Dialog über Werte. Ökonomisch gesehen handelt es sich um die Transformation von Informationen in Preise, also um eine Funktion, die sich aus der Vielzahl der einzelnen Transaktionen ergibt. Damit es so etwas geben kann, braucht man rechtliche Rahmenbedingungen, Spielregeln, wenn Sie so wollen. Gegenstand solcher Regeln sind vor allem Informationspflichten. Der Börsenprospekt ist die wesentliche "Startinformation" beim Börsengang. Er dient der individuellen Information ebenso wie der Funktionsfähigkeit des Systems im Ganzen.

#### 6 Free Rider-Problem, Individual- und Institutionenschutz (Abb. 3)

Will man dem Aktionär wegen eines Prospektfehlers helfen, muß man offensichtlich großzügiger sein bei den Anforderungen an die Voraussetzungen für den Ersatzanspruch oder deren Nachweis als beim gebissenen Briefträger. Das schafft aber die Gefahr, daß Personen, die mit der Falschinformation gar nichts zu tun und aus völlig anderen Motiven heraus gehandelt haben (Stammtischtip zu einem viel späteren Zeitpunkt), das ihrer Investition innewohnende Risiko nachträglich abwälzen könnten. Die allgemein menschliche Bereitschaft, etwas, was schlecht gelaufen ist, einem anderen in die Schuhe zu schieben, ist groß. In den USA werden Anwälte deshalb, nur teilweise scherzhaft, als "blame allocation engineers" bezeichnet.

Gesetzgeber und Rechtsprechung nähern sich dem Problem schrittweise, die Gerichte durch die Entscheidung von Einzelfällen, die sie – nota bene – entscheiden müssen, auch wenn die einschlägigen Gesetze noch so unhandlich und der Sachverhalt zwischen den Parteien noch so strittig sind. Wir beobachten hier einen Prozeß der Entfernung von einem common-sense-Kausalitätsbegriff (im Sinne des Hundebiß-Beispiels) zu einer Zurechnung, die bestimmte Funktionen erfüllen soll. Der Schadensersatzanspruch soll einerseits nicht leer laufen, andererseits darf es dem "free rider" nicht zu leicht gemacht werden. Die Sanktion, die dem Einzelnen zugute kommt, dient nicht zuletzt der Steuerung des Informationsverhaltens, damit auch der Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems.

Der so betriebene Institutionenschutz (Kapitalmarkt) kommt dem individuellen Marktteilnehmer zugute, und die Schadensersatzpflicht fördert die allgemeine Einhaltung der Spielregeln.

## Haftung nach Börsengesetz

## § 44 Abs. 1 BörsG:

Der Erwerber von Wertpapieren, die auf Grund eines Prospekts zum Börsenhandel zugelassen sind, in dem für die Beurteilung der Wertpapiere wesentliche Angaben unrichtig oder unvollständig sind, kann ... von denjenigen, von denen der Erlass des Prospekts ausgeht, ... die Übernahme der Wertpapiere gegen Erstattung des Erwerbspreises ... verlangen ..., sofern das Erwerbsgeschäft nach Veröffentlichung des Prospekts und innerhalb von sechs Monaten nach erstmaliger Einführung der Wertpapiere abgeschlossen wurde.

Abbildung 3

## Haftung nach Börsengesetz

## § 44 Abs. 1 BörsG:

Der Erwerber von Wertpapieren, die auf Grund eines Prospekts zum Börsenhandel zugelassen sind, in dem für die Beurteilung der Wertpapiere wesentliche Angaben unrichtig oder unvollständig sind, kann ... von denjenigen, von denen der Erlass des Prospekts ausgeht, ... die Übernahme der Wertpapiere gegen Erstattung des Erwerbspreises ... verlangen ..., sofern das Erwerbsgeschäft nach Veröffentlichung des Prospekts und innerhalb von sechs Monaten nach erstmaliger Einführung der Wertpapiere abgeschlossen wurde.

#### 7 Der Stand der Dinge: Prospekthaftung

Die geltende Beweislastregel (Abb. 4) verlangt vom Anspruchsteller den Nachweis, daß

- ein fehlerhafter Börsenprospekt (klassischer Fall: falsche Bilanz) veröffentlicht wurde,
- der Anleger innerhalb von sechs Monaten danach die Wertpapiere erworben hat.

Das Zeitfenster erspart den Nachweis der Ursächlichkeit zwischen Prospekt und Wertpapiererwerb. (Die Rechtsprechung, die diese Regelung bereits vor der Kodifizierung entwickelt hatte, bediente sich des Konstrukts der durch den Börsenprospekt hervorgerufenen "Anlagestimmung".) Das Zurechnungsmerkmal "Kausalität" ist damit aber nicht aufgegeben. Dem Beklagten (im Beispiel: der Deutschen Telekom AG) stehen nämlich unter anderem folgende Möglichkeiten offen (Abb. 5): Behauptung und Beweis, daß

- ein anderer Hergang vorlag (Erwerb auf Anraten des Stammtischbruders = fehlende haftungsbegründende Kausalität),
- die falsche Angabe einen Sachverhalt betraf, der zum späteren Kursverfall nicht beigetragen hat (fehlende haftungsausfüllende Kausalität),
- es zwischen Prospektveröffentlichung und Erwerb berichtigende Veröffentlichungen gab
   (z. B. in einem Jahresabschluß = Abbruch der Kausalität).

## Haftung nach Börsengesetz - Verteidigung

## § 45 Abs. 2 BörsG:

Der Anspruch nach § 44 BörsG besteht nicht, sofern

- 1. die Wertpapiere nicht auf Grund des Prospekts erworben wurden,
- der Sachverhalt, über den [fehlerhafte] Angaben im Prospekt enthalten sind, nicht zu einer Minderung des Börsenpreises beigetragen hat,
- 3. ...
- 4. vor dem Abschluss des Erwerbsgeschäfts im Rahmen ... einer Bekanntmachung ... des emittenten eine deutlich gestaltete Berichtigung ... veröffentlicht wurde ...

Der letzte Fall erfordert nicht, daß der Anleger von der Berichtigung Kenntnis genommen hat, sondern unterstellt die angemessene Reaktion des Kapitalmarktes (schlechte Nachricht ist "eingepreist"). Sollte die ursprünglich falsche Angabe gleichwohl aus seiner Sicht "kausal" für die Investition gewesen sein, hilft das dem Aktionär nicht.

#### 8 Andere Fehlinformationen

Für die Prospekthaftung ist damit ein Modell entwickelt. Es gibt aber noch eine Reihe anderer Fälle von Fehlinformationen, bei denen die Rechtsfolgen umstritten sind. Bekannte Stichworte sind EM.TV, comroad und andere Unternehmen des Neuen Marktes, die im Gewande der Bekanntmachung kursrelevanter "Tatsachen" (sog. ad-hoc-Mitteilungen, § 15 WpHG, Abb. 6) blumige Erwartungen geschürt haben, die die Kurse in die Höhe schießen und anschließend zusammenbrechen ließen. Hier gibt es ebenfalls Haftungsvorschriften, die jedoch weniger detailliert sind (Abb. 7). Dementsprechend schlagen sich die Gerichte und die Rechtswissenschaft damit herum, ob, wie und warum Elemente der Prospekthaftung auf falsche Einzelfallmitteilungen übertragen werden können, zum Beispiel, ob das Zeitfenster von sechs Monaten paßt.

Noch deutlicher wird die Rolle des Kausalzusammenhangs als Zweck-Konstrukt bei unterlassenen ad-hoc-Mitteilungen (Abb. 8). Wie geht man mit der Kausalität von etwas um, das gar nicht stattgefunden hat? Man muß das pflichtgemäße Handeln hinzu denken.

# Veröffentlichungspflichten nach Wertpapierhandelsgesetz

## § 15 Abs. 1 Satz 1 WpHG:

Der Emittent von Finanzinstrumenten, die zum Handel an einem ... organisierten Markt zugelassen sind ..., muss Insiderinformationen, die ihn unmittelbar betreffen, unverzüglich veröffentlichen. ...

Abbildung 6

## Schadensersatz wegen unwahrer Informationen

## § 37c Abs. 1 WpHG:

Veröffentlicht der Emittent von Finanzinstrumenten ... in einer Mitteilung nach § 15 WpHG eine unwahre Insiderinformation, ...ist er einem Dritten zum Ersatz des Schadens verpflichtet, der dadurch entsteht, dass der Dritte auf die Richtigkeit der Insiderinformation vertraut ...

Abbildung 7

## Schadensersatz wegen unterlassener Informationen

## § 37b Abs. 1 WpHG:

Unterlässt der Emittent von Finanzinstrumenten, ... unverzüglich eine Insiderinformation zu veröffentlichen, ... ist er einem Dritten zum Ersatz des durch die Unterlassung entstandenen Schadens verpflichtet ...

Abbildung 8

#### 9 Rolle der Wissenschaft

Die Bedeutung der Zivilrechtswissenschaft besteht darin, beim Umgang mit solchen Problemen Kohärenz der verschiedenen Lösungen untereinander zu wahren, widerspruchsfreie Argumente zu liefern, Interessenanalysen vorzunehmen, die nicht in der Interessenvertretung von Lobbygruppen bestehen. Anders ausgedrückt: Der Rechtswissenschaftler ist nicht Knecht von Verbänden oder Parteien. Den Gerichten gegenüber genießt er den Luxus, am Stück nachdenken zu dürfen und nicht Einzelfälle scheibchenweise entscheiden zu müssen. Interdisziplinär und vergleichend kann die Wissenschaft zu einer leistungsfähigen Infrastruktur von Wirtschaft und Gesellschaft namens Zivilrecht Erhebliches beitragen.

### 10 Zusammenfassung

"Kausalität" im zivilrechtlichen Sinn dient der Herstellung eines Zurechnungszusammenhanges zwischen einem Tun oder Unterlassen und bestimmten Rechtsfolgen. Was unter "Kausalität" zu verstehen ist, ist hier das Ergebnis eines regelgeleiteten Diskurses, also ein soziales Konstrukt. Erreichte Ergebnisse werden immer wieder in Frage gestellt durch neue Ereignisse, Politik und Erkenntnisse der Wissenschaft.

#### Literatur

Fleischer, H.: Konturen der kapitalmarktrechtlichen Informationsdeliktshaftung. In: Zeitschrift für Wirtschaftsrecht (ZIP) 41 (2005), S. 1805ff.

Hopt, K. J. & H.-C. Voigt (Hg.): Prospekt- und Kapitalmarktinformationshaftung: Recht und Reform in der Europäischen Union, der Schweiz und den USA, Tübingen 2005.

Röckrath, L.: Kausalität, Wahrscheinlichkeit und Haftung, München 2004.

Veil, R.: Die Ad-hoc Publizitätshaftung im System kapitalmarktrechtlicher Informationshaftung. In: Zeitschrift für das gesamte Handels- und Wirtschaftsrecht (ZHR) 167 (2003), S. 365ff.

## Kausalität: Bemerkungen eines Historikers

"History is a social science that seeks to describe what happened and to explain why it happened."

(Murphey 1994, S. 299) Eine Allerwelts-definition: wie weit wäre sie unter Historikerinnen und Historikern unstrittig?

## 1 Historiker-Praxis, Geschichtstheorie, Methodologie der Sozialwissenschaften

Historiker, selbst die theoriebewußten unter ihnen, richten selten ihre Aufmerksamkeit andauernd und systematisch auf die logische Struktur ihrer eigenen Aussagen und die Geltungsgründe ihrer Beweisführungen. "Geschichtstheorie" und Praxis des Erforschens und Darstellens von Geschichte sind weithin selbstgenügsame Welten. "Analytische Geschichtsphilosophie" (C. G. Hempel und die Folgen) hat in Deutschland nie nennenswerte Resonanz gefunden; sie beeinflußt aber auch die historiographische Praxis in den angelsächsischen Ländern wenig. Umgekehrt hält die analytische Geschichtsphilosophie Abstand zur Praxis und verblüfft Historiker oft durch die Enge und Antiquiertheit ihres Beispielspektrums (am beliebtesten: Revolutionen, selten: langsame und stetige Veränderungen, z. B. Martin 1977). Größeren, wenngleich auch nur punktuellen Einfluß dürfte die Methodologie der Sozialwissenschaften (gehabt) haben, vor allem ein eher vages Verständnis von "verstehender Soziologie" und "idealtypischer Methode". Eine explizite Debatte um Kausalität ist unter Historikern nicht aeführt worden, jedenfalls nicht annähernd auf der Höhe der philosophischen Behandlung des Problems. Auch ist deskriptive Methodologie unterentwickelt: Man weiß wenig darüber, was (heutige) Historiker tatsächlich tun – im Gegensatz zur Klassikerexegese (z. B. White 1973).

#### 2 Wo und was Historiker erklären ...

Die Kausalitätsfrage stellt sich für Historiker (nur) in Gestalt spezifischer *Erklärungsprobleme*. Es gibt keine allgemein verbindliche Form eines solchen Problems. Erklärung bedeutet in der Wirtschafts- oder Umweltgeschichte etwas anderes als in der Kultur- oder Ideengeschichte. Erklärungen werden zum Beispiel gesucht für: individuelles Handeln (meist unter Rationalitätsannahmen); "collective action"; komplexe Verkettungen von Handlungen (z. B. politische "Krisen": Juli 1914 usw.); Auftreten und Verbreitung von Innovationen; Spezifika sozialer Organisation; "Pfadabweichungen" und "Sonderwege"; Folgen und Ergebnisse ("Erfolg"/ "Scheitern") usw. – ein heterogenes Gemisch explikativer Fragen. Gemeinsam ist ihnen, daß sie zeitlich und räumlich indiziert sind. Nicht nur: "Warum brach die Französische Revolution aus?", sondern auch: Warum 1789 in Versailles/Paris?

### 3 Einheitswissenschaft und Methodendualismus (dazu Schurz 2004)

Das Verhältnis zwischen der Naturwissenschaften-Geisteswissenschaften-Dichotomie (Dilthey, Rickert und die Folgen) und einheitswissenschaftlichen Ansprüchen (etwa: allgemeine Brauchbarkeit einer "weichen" Fassung des Hempelschen Erklärungsmodells; so zuletzt Roberts 1996) muß grundsätzlich wie im Bewußtsein praktizierender Historiker als ungeklärt gelten. Die meisten Praktiker dürften sich eklektisch zu – selten explizierten – Kombinationen von Erklären und Verstehen bekennen. Der extreme ("poststrukturalistisch" wiederbelebte) Standpunkt, die Historie könne und wolle überhaupt nicht erklären, sondern nur vergangenen "Sinn" zur Anschauung bringen, unterläuft allerdings das Problem.

## 4 Gesetzmäßigkeiten

Welche Typen historischer Erklärung dürfen "kausal" genannt werden? Historiker gehen fast immer mit irgendwelchen "causal beliefs" an ihre Gegenstände heran (mindestens: Alltagspsychologie). Sie stellen immer wieder kausale Fragen. Antworten, die als adäquat empfunden werden, müssen daher irgendwie kausale Qualität haben. Nahezu kein Historiker glaubt an die Möglichkeit, Kausalgesetze und andere "exceptionsless generalizations" (Dupré 1993, S. 185) für die historisch-gesellschaftliche Welt zu finden. Es wäre aber dogmatisch, die Existenz vereinzelter relativ gut bestätigter Regelmäßigkeiten zu leugnen, zum Beispiel der bevölkerungshistorischen "demographic transition". In manchen Bereichen, etwa der histo-

risch-politologischen Kriegsursachenforschung, sind solche Regelmäßigkeiten trotz intensiver Suche nicht entdeckt worden. Regelmäßigkeiten werden freilich bei der Lösung spezifischer Erklärungsprobleme selten herangezogen. Solche Lösungen haben meist die Form von singulären Kausalurteilen (im Sinne von J. L. Mackie), das heißt Aussagen über einfache, konkrete Ursache-Wirkungsbeziehungen. Sie sind oft Kombinationen aus mehreren zueinander in Relation gesetzten Ursachen, die teils als hinreichende, teils als notwendige Bedingungen gesehen werden (Lorenz 1997, S. 190).

Frage: Warum entsteht dennoch unter Historikern – bei transparenter und unstrittiger Empirie – immer wieder Dissens über singuläre Kausalurteile?

### 5 Multikausalität, Wirkungsketten, Kontext

Ursachen können oft in sequentieller Verkettung angeordnet werden. Um den Beginn des Ersten Weltkriegs am 1. August 1914 zu erklären, sind manche Historiker nur bis zum Attentat von Sarajewo (28. Juni 1914), andere aber bis zu (Fehl)-Entwicklungen im internationalen System nach 1815 zurückgegangen. Die "Kunst"(!) des Historikers liegt in der empirisch abgesicherten Konstruktion und Kombination von Wirkungsketten (oder "transitiven" Kausalzusammenhängen) unter einem ständigen Kontingenzvorbehalt (Hoffmann 2005), der eher darstellerisch als analytisch zur Geltung gebracht wird. Jedes "Feld" – Beispiel: die Wirtschaftsgeschichte oder genauer eingegrenzt: die Industrialisierungsforschung – hat als "scientific community" seine eigenen Adäquatheitserwartungen an Erklärungen entwickelt, ein "standard causal pattern" (Miller 1987, S. 87).

Frage: (Wie) kann der unter Historikern heute modisch gewordene Begriff des "Kontexts" integriert werden? Was sind "causally relevant contexts", und wie läßt sich für explanatorische Zwecke "Kontextualisierung" optimieren (zu viel Kontext bewirkt Undeutlichkeit)? Im Hintergrund steht dabei das in der soziologischen Theorie altbekannte agent/structure-Problem: die Verbindung von Handeln mit bio-sozialen Systemen.

### 6 "Mechanismen"

Dieser relativ neue Ansatz von Charles Tilly und anderen (vgl. Norkus 2005) sucht nach repetitiven Wirkungs-Prozessen, die keiner spezifizierbaren "agency" bedürfen und weniger durch Argumentation als durch diagrammatische Visualisierung (flow charts usw.) dargestellt werden. Die Rezeption durch Historiker hat kaum begonnen.

### 7 Vergleich

Dies ist die klassische Methode der historischen Soziologie, die sich mit "comparative history" weitgehend überschneidet: Nie sind sich Geschichtswissenschaft und Soziologie auch methodisch so nah wie hier. Der Vergleich legt Pfade und Varianzen frei. Er läßt Raum für kontrafaktische Erwägungen. Er ist dort am stärksten, wo er kritisch wirkt: Die vergleichende Methode per se generiert keine vollständigen Kausalerklärungen, erlaubt es aber, die Erklärungskraft einzelner Variablen einzuschätzen. Sie kann argumentative Schwächen und Scheinerklärungen identifizieren (val. Schriewer 1999).

### 8 Narratologie: Erklären durch Erzählungen?

Historische Erklärungen haben eine temporale Struktur: Ursachen sind "antecedent circumstances" (Dupré 1993, S. 171). Andererseits zeigt die narratologische Literatur, daß Narrative im allgemeinen nicht linear dem Zeitpfeil folgen, sondern durch "plots", Metaphern, Tropen (usw.) strukturiert sind. Und im übrigen: Historiker "erzählen" viel seltener, als Literaturwissenschaftler sich das vorstellen (kein Projektantrag mit einem deskriptiv-narrativen Programm hätte heute eine Chance auf Bewilligung). Die Lage ist also kompliziert. Die Auffassung, in der Geschichtswissenschaft werde in der Form von Erzählungen erklärt, heute oft vertreten, mag zutreffen, ist aber bisher weder wissenschaftslogisch noch als Beschreibung historiographischer Praxis zureichend ausgearbeitet worden. Vermutlich läßt sich jedes Narrativ, sofern es erklärenden Wert besitzt, auf in ihm verborgene kausale (Theorie-) Annahmen reduzieren. – Unabhängig davon ist das Konzept des "master narrative" (ein wertgebundenes Schema mit Selektionskraft als Voraussetzung besonderer Geschichten) interessant, weil es zu einer Antwort auf die am Ende von (4) gestellte Frage führen könnte.

#### Literatur

Braembussche, A. A. van den: Historical Explanation and Comparative Method: Toward a Theory of the History of Society. In: History & Theory 28 (1989), S. 1–24.

Dupré, J.: The Disorder of Things: Metaphysical Foundations of the Disunity of Science, Cambridge, MA: Harvard Univ. Press, 1993.

Hoffmann, A.: Zufall und Kontingenz in der Geschichtstheorie, Frankfurt a. M.: Klostermann, 2005.

Lloyd, C.: Explanation in Social History, Oxford: Basil Blackwell, 1986.

- Lorenz, C.: Reonstruktion der Vergangenheit. Eine Einführung in die Geschichtstheorie, Köln, Weimar, Wien: Böhlau, 1997.
- Martin, R.: Historical Explanation: Re-enactment and Practical Inference, Ithaca: Cornell University Press, 1977.
  - Mc Cullagh, C. B.: The Truth of History, London: Routledge, 1998.
- Mc Cullagh, C. B.: Historical Explanation, Theories Of: Philosophical Aspects. In: Smelser, N. J. & P. B. Baltes (Hg.), International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences, Bd. 10, Amsterdam: Elsevier, 2001, S. 6731–6737.
- Mc Cullagh, C. B.: The Logic of History: Putting Postmodernism in Perspective, London: Routledge, 2004.
- Miller, R. W.: Fact and Method: Explanation, Confirmation and Reality in the Natural and the Social Sciences, Princeton, NJ: Princeton University Press 1987.
- Murphey, M. G.: Philosophical Foundations of Historical Knowledge, New York: State University of New York Press, 1994.
- Norkus, Z.: Mechanisms as Miracle Makers? The Rise and Inconsistencies of the "Mechanismic Approach" in Social Science and History. In: History & Theory 44 (2005), S. 348–372.
- Roberts, C.: The Logic of Historical Explanation, University Park: Pennsylvania State University Press, 1996.
- Schriewer, J.: Vergleich und Erklärung zwischen Kausalität und Komplexität. In: Kaelble, H. & J. Schriewer (Hg.), Diskurse und Entwicklungspfade. Der Gesellschaftsvergleich in den Geschichts- und Sozialwissenschaften, Frankfurt a. M., New York: Campus, 1999, S. 53–102.
- Schurz, G.: Erklären und Verstehen: Tradition, Transformation und Aktualität einer klassischen Kontroverse. In: Jaeger, F. & J. Straub (Hg.), Handbuch der Kulturwissenschaften, Bd. 2: Paradigmen und Disziplinen, Stuttgart: Metzler, 2004, S. 156–174.
- White, H.: Metahistory: The Historical Imagination in Nineteenth-century Europe, Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1973.

# Thesen für ein Gespräch über Kausalität<sup>1</sup>

Nachdem ich Herrn Mittelstraß vor reichlich zwei Wochen etwas leichtfertig für unser Gespräch zugesagt hatte, überlegte ich, ob Sie eigentlich Thesen eines Kirchenhistorikers hören wollen, der sich hauptberuflich mit der christlichen Antike beschäftigt, oder Thesen eines evangelischen Theologen, der seine Beschäftigung mit der christlichen Antike im Rahmen einer Theologischen Fakultät durchführt. Nach kürzerem Nachdenken ist mir deutlich geworden, daß man das kaum trennen kann, und insofern formuliere ich als Historiker und Theologe. Sie werden auch feststellen, daß man das – jedenfalls wenn man meinen Thesen folgt – gar nicht auseinanderlegen muß, sondern hier ein bestimmter Historiker sein leitendes Rahmenkonzept erläutert. Vielleicht ist das zugleich ein Hinweis darauf, daß die Historiker doch nicht so weit von der Wahrheitsfrage entfernt sind, wie manche meinen. Nun zu den Thesen; ich habe sieben formuliert, drei davon versuchen eine grundsätzliche Vorklärung, zwei sind eher historisch, zwei eher systematisch angelegt.

- 1. Die Fragen danach, (a) was Kausalität an und für sich besagt, (b) wo ihre Grenze liegt und (c) was dies für die Rekonstruktion historischer Zusammenhänge und Ereignisse bedeutet, ist in vielen Teilen der historischen Wissenschaften wie auch in der heutigen systematischen Theologie eher eine vernachlässigte Frage. Im Blick auf die Erforschung des antiken Christentums ist sie eine geradezu verdrängte Frage, was zugleich auch die Vorläufigkeit meiner Ausführungen erklärt. Dabei nötigt bereits die elementare Erfahrung (z. B. von Schuldzusammenhängen²), über Kausalität nachzudenken.
- 2. Nachdenken über Kausalität ist für Historiker und Theologen auch deswegen essentiell, weil beispielsweise die (nicht selten unterlaufende) Verwechslung von Kausalität und Konvergenz in historischen wie theologischen Zusammenhängen fatale Folgen hat, beispielsweise in geistes- und ideengeschichtlichen Zusammenhängen ("Kreislauf der Verfassun-

81

Die mündliche Form der Thesen wurde beibehalten; die Nachweise beschränken sich auf das unmittelbar Notwendige.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> So Gadamer, H.-G.: Art. Kausalität, RGG<sup>3</sup> III, 1231.

- gen"). Konvergenz ist zunächst einmal keine "spukhafte Fernwirkung" (Zeilinger³), aber vielleicht lohnt es sich, allerlei spukhafte Fernwirkungen als Konvergenzen zu erweisen.
- 3. Wird die philosophische Diskussion nicht zureichend beachtet, kommt es in der Theologie zu problematischen Repristinationen traditioneller Modelle ("intelligentes Design") oder zur Reduktion von Kausalität auf die Relation zwischen einzelnen Ereignissen nach dem Vorbild der Stoßgesetze der Mechanik. Wie Kausalität und Freiheit zusammengebracht werden können ("Kausalität aus Freiheit"), sollte mit der Philosophie kritisch diskutiert werden. Der Zusammenhang von Kausalität und Freiheit scheint mir jedenfalls für die Konzeption von Kausalität in der Theologie zentral. Die kausalitätsfreien oder kausalitätsdistanten Modelle der Physik sind für die Theologie mindestens interessant, weil sie die allgemeine Verständlichkeit einer Rede von Gott als Grund von Wirklichkeit zu illustrieren vermögen.
- 4. Grund für Vernachlässigung und Verdrängung im Bereich der Theologie ist letztlich, daß sich die Theologie im Blick auf die theoretische Konzeptionalisierung von Kausalität immer an der jeweiligen philosophischen Diskussion orientiert hat und sich aufgrund von deren spezifischer Entwicklung (empirische Wende, philosophische Probleme der via causationis, Konsequenzen aus der Quantenphysik und der Chaos-Forschung) neu orientieren mußte, aber nie an den Naturwissenschaften, der Physik orientierte. In den historischen Wissenschaften war resp. ist die Frage ohnehin nur für diejenigen interessant, die sich um explizite theoretische Reflexion ihrer historischen Alltagsarbeit bemühten und bemühen. Thetisch knapp: Droysen wiederholt beispielsweise nur sehr knapp das aristotelische Schema der vier causae und erklärt es für suffizient, Cris Lorenz oder Ludolf Herbst explizieren dagegen sehr viel ausführlicher, wie die Rekonstruktion von Kausalitäten historischer Ereignisse funktionieren könnte und welche Probleme dabei entstehen<sup>4</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Zeilinger, A.: Einsteins Spuk. Teleportation und weitere Mysterien der Quantenphysik, München 2005, S. 178–182.

Droysen, J. G.: Historik. Rekonstruktion der ersten vollständigen Fassung der Vorlesungen (1857), Grundriß der Historik in der ersten handschriftlichen (1857/1858) und in der letzten gedruckten Fassung (1882), Textausgabe von P. Leyh, Stuttgart, Bad Cannstatt 1977, S. 49 und S. 392; Lorenz, C.: Konstruktion der Vergangenheit. Eine Einführung in die Geschichtstheorie. In: Beiträge zur Geschichtskultur 13 (1997), Köln u. a., S. 66–69 und S. 189–284; Herbst, L.: Komplexität und Chaos. Grundzüge einer Theorie der Geschichte, bsr 1526, München 2004, S. 71–77 und S. 93–97.

- 5. Die enge Orientierung der Theologie an der Philosophie wird beispielsweise in hochmittelalterlichen Texten deutlich, wenn Gott als causa prima<sup>5</sup>, causa sine causa oder causa sui prädiziert wird; hier sind Elemente der aristotelischen Metaphysik (unbewegter Beweger und vier causae)<sup>6</sup> mit der Vorstellung einer creatio ex nihilo verbunden<sup>7</sup>. Nach der empirischen Wende (also nach Hume) vermieden viele Theologen mindestens beim Reden über Gott Bezüge auf ein Kausalprinzip oder gar ein Kausalgesetz: Für Schleiermacher ist Gott das "Woraufhin meiner schlechthinnigen Abhängigkeit" und nicht mehr das "Woher". Eine Reflexion darüber, ob hier nicht eine (nach Leibniz für die Neuzeit durchaus charakteristische) Ablösung der causa efficiens durch die causa finalis stattfindet, wird bei Schleiermacher nicht angestellt<sup>8</sup>. Wenn sich heute überhaupt noch derartige Reflexionen finden, dann im Modus der Distanzierung: "Gott ist in Bezug auf die Natur und seine Schöpfung nicht vorzustellen als der Architekt [...] oder Baumeister der Welt. Auf die Kategorie der Kausalität hat die Theologie gründlich zu verzichten" (Traugott Koch).
- 6. Im Bereich der Geschichtswissenschaften zielt eine grundlegende historische Frage Warum ist etwas passiert und nicht vielmehr nichts? auf Kausalität und setzt die Gültigkeit eines allgemeinen Kausalprinzips voraus (nihil fit sine causa)<sup>9</sup>, nicht unbedingt die eines strengen Kausalgesetzes (gleiche Ursachen haben immer gleiche Wirkungen)<sup>10</sup>: Kausalität ist Bedingung der Möglichkeit einer historischen Analyse. Gleichwohl ist charakteristisch, daß Ernst Troeltsch das Prinzip der Korrelation (alles hängt mit allem zusammen) als charakteristisch für die historische Methode beschrieben hat, nicht das Prinzip der Kausalität: Ein vollständiges Inventar des kausalen Bedingungsgefüges ist niemals aufzu-

<sup>5</sup> Thomas v. Aquin: STh I q. 5 a. 2.

<sup>6</sup> Arist., met. XII 1072 b 7 (Beweger) und V 1013 a 23ff. (causae-Schema).

Für Thomas gilt: Causalitas causae secundae firmatur per causalitatem causae primae (in sent. Il dist. 1 qu. 1 a 4); keine Zweitursache vermag eine Wirkung zu erzielen, wenn der Kausalnexus zwischen Zweitursache und Wirkung nicht von der Erstursache bekräftigt wird.

Dabei liegt sie in gewisser Weise schon bei Luther vor: Das Werk des Menschen ist non causa, sed fructus iustificationis (WA 6, 94,37; 39/I, 279, 25f.); nach Luther ist causa formalis des Menschen nicht die Seele, sondern Gott, der den Menschen als pura materia zum Ebenbild formt (39/I, 177, 3f, 9f.

So die Formulierung bei Augustinus in ord. 1,11; vgl. auch Leukipp: οὐδὲν χρῆμα μάτην γίνεται, ἀλλὰ πάντα ἐκ λόγου τε καὶ ὑπ² ἀνάγκης/nichts geschieht umsonst, sondern alles mit Grund und Notwendigkeit (Leukipp DK 76 B 2); weitere Belege bei Arndt, H. W., Art. Kausalitätsprinzip, HWPh IV, 1976, (803–806) 803.

Kausalität im Sinne einer Regularitätskonzeption: x ist dann und nur dann Ursache von y, wenn x und y Ereignistypen E und E' dergestalt exemplifizieren, daß auf alle Ereignisse des Typs E eines vom Typ E' zeitlich folgt. Kausalität zwischen den einzelnen Ereignissen x und y besteht demzufolge nur kraft einer durch ein allgemeines Gesetz ausgedrückten Regularität.

- stellen; gelegentlich ist selbst der maßgebliche Grund und verantwortliche Anlaß für ein x nicht zu bestimmen<sup>11</sup>. Strukturell ist das der von Herrn Kollegen Großmann beschriebenen "wachsenden Ungenauigkeit" vergleichbar.
- 7. Im Bereich der systematischen Theologie zielt die grundlegende theologische Frage nach dem Verhältnis von Gott, Mensch und Welt nicht primär auf Kausalität, weil bei schlichter Anwendung des Kausalprinzips Gott zu einem Ding unter den Dingen dieser Welt gemacht wäre, ein krasser Kategorienfehler und schlechte Theologie dazu. Die Jenseitigkeit Gottes jenseits von den causae dieser Welt bringen freilich zumeist etwas hilflose Formulierungen zum Ausdruck ("Gott als Grund der Möglichkeit unseres Lebens" oder – so Karl Barth – Schöpfung als innerer Grund der Weltentstehung). Ein Kategorienfehler wäre es aber auch, die Alternative von Zufall und Notwendigkeit auf ihn anzuwenden, er ist insofern tatsächlich ἐπέκεινα (Platon). Ein interessanter Punkt der Verbindung zwischen Theologie und Geschichtswissenschaft ist die Struktur des Vorgriffs in der Typisierung bzw. Modellierung: Wenn ein vollständiges Inventar des kausalen Bedingungsgefüges ohnehin nicht aufstellbar ist, verwundert es nicht, daß religiöse Aussagen gleichsam im Vorgriff darauf Bekenntnisaussagen sind ("Gott ist der Grund der Möglichkeit meines Lebens). Dem Kirchenhistoriker scheint eine interessante Aufgabe, erstens die verschiedenen theologischen Redeweisen daraufhin zu analysieren, inwiefern sie neben Kausalitätsvorstellungen (wie die der causa finalis) auch kausalitätsfreie Modelle wie in der Quantenphysik in Anspruch nehmen, teilweise unbewußt, zweitens aber verschiedene neuere Theorien daraufhin zu überprüfen, ob sie rezipierbar sind und die schlechthinnige Sonderstellung Gottes doch in einer Großtheorie von Kausalität und Nichtkausalität einholbar ist. Solche Aufgaben reicht der Kirchenhistoriker den Systematikern weiter oder auch der Diskussion seiner verehrten Kolleginnen und Kollegen.

<sup>11</sup> Ζυρ Υντερσχηειδυνγ υον άρχή und αἰτία vgl. schon Polybius.

Kausalität

Teil II

# Vorbemerkung

Das in der Wissenschaftlichen Sitzung der Versammlung am 9. Dezember 2005 begonnene Streitgespräch zur Kausalität wurde in der Sitzung am 5. Mai 2006 mit einer Diskussion abgeschlossen. Diese Sitzung war wieder von Harald Fritzsch, Reinhold Kliegl und Jürgen Mittelstraß vorbereitet worden; die Federführung und Moderation hatte Reinhold Kliegl übernommen.

Günter Stock eröffnet die Wissenschaftliche Sitzung und übergibt Reinhold Kliegl das Wort.

Reinhold Kliegl: Sehr geehrte Damen und Herren, liebe Kolleginnen und Kollegen, ich darf Sie alle ganz herzlich zur zweiten Auflage des Streitgesprächs "Kausalität" begrüßen. Der Ablauf heute gestaltet sich so, daß wir mit einem Statement von Herrn Renn aus der Technikwissenschaftlichen Klasse beginnen, dann werde ich einige Punkte aus der letzten Sitzung in Erinnerung rufen, und der Rest ist dann Diskussion und offene Aussprache. Das wäre alles, was ich im Augenblick zu sagen habe. Herr Renn, darf ich Sie um Ihr Statement bitten.

## Kausalität in den Technikwissenschaften

Meine sehr verehrten Damen und Herren, liebe Kolleginnen und Kollegen, ich bin von der technikwissenschaftlichen Klasse beauftragt worden, hier einige Überlegungen zur Frage der Kausalität vorzutragen und damit hoffentlich dem impressionenreichen Bild der bisherigen Beiträge zum Thema Kausalität einen weiteren Tupfer oder einen weiteren Mosaikstein hinzuzufügen. Dabei wird sich einiges wiederholen, was bereits im letzten Jahr an dieser Stelle diskutiert worden ist. Auf der Basis der verschiedenen (bereits hier früher andiskutierten) Konzepte von Kausalität will ich sukzessiv einen pragmatischen Vorschlag für ein Verständnis von Kausalität entwickeln, das sich vor allem für eine Anwendung in den Technikwissenschaften eignet. Dazu werde ich einige wenige Anwendungsbeispiele aus Beiträgen von Mitgliedern der technikwissenschaftlichen Klasse bringen, die hier aber aus Zeitgründen nur kursorisch aufgeführt werden können.

Zunächst zum Begriff der Kausalität: Unser Sekretar, Herr Lucas, hat in seinem grundlegendem Papier zu Beginn unserer Diskussion in der technikwissenschaftlichen Klasse Kausalität folgendermaßen definiert: "Unter Kausalität versteht man das Vorliegen eines gesetzmäßigen Wirkungszusammenhangs zwischen Phänomenen in der Weise, daß ein als Ursache bezeichnetes Ereignis A unter bestimmten Bedingungen ein bestimmtes anderes als Wirkung bezeichnetes Ereignis B notwendig hervorbringt. Dabei geht die Ursache A der Wirkung B zeitlich voraus und B tritt unter den selben Bedingungen niemals ein, ohne daß vorher A eingetreten ist. Die strenge Ursache-Wirkungs-Beziehung ist das Entscheidende der Kausalität". Von dieser klassischen Definition können wir ausgehen.

Grundsätzlich beschreibt Kausalität einen Zusammenhang zwischen zwei und mehr Phänomenen, wobei dieser Zusammenhang entweder auf eine intentionale Beziehung (Ich bin durstig: deshalb trinke ich ein Glas Wasser) oder auf eine Ursache-Wirkungs-Kette (Der Schlangebiß führt unweigerlich zum Tode) hinweist. Dabei können Ursachen wie Wirkungen von Menschen unabhängige Ereignisse oder durch Menschen ausgelöste Aktivitäten sein. Im Folgenden möchte ich mich ganz auf die Frage der Ursache-Wirkungsketten beziehen.

In diesem Zusammenhang tauchen Aspekte der Unsicherheit unsers Wissens, der Mehrdeutigkeit der Resultate von Messungen und Experimenten, der dadurch entstehenden Undeutlichkeit in den Beziehungsmustern zwischen den Variablen, der nichtlinearen und chaotischen Übergänge in ansonsten eindeutig funktionalen Zusammenhängen und der komplexen, nicht mehr auflösbaren Vielschichtigkeit von interagierenden Ursache-Wirkungsketten auf, die alle in den Natur- und Technikwissenschaften aber auch in den Sozialwissenschaften eine zunehmend bedeutende Rolle spielen. Wie sollen wir damit umgehen?

Folgende drei Probleme sind grundlegend für das Verständnis von Kausalität:

- Sind kausale Strukturen in der Natur der Phänomene selbst angelegt oder sind sie kulturelle Zuschreibungen? Auf diese Frage sind in der letztjährigen Sitzung Herr Mittelstraß, Herr Gethmann und auch Herr Kliegl ausführlich eingegangen.
- Können kausale Strukturen wirklich gemessen werden oder sind es nicht verifizierbare
   Axiome unseres Denkens?
- Können wir Kausalität auch probabilistisch denken oder ist Kausalität notwendigerweise mit Determinismus verbunden?

Wenn man sich diese drei Fragen vornimmt, können wir drei Konzepte von Kausalität differenzieren. Ich gehe die ersten beiden sehr schnell durch, denn sie sind ja hier schon vorgestellt worden.

### Das ontologisches Konzept der Kausalität

Nach diesem Konzept ist die Natur selbst kausal angelegt. Ob Menschen dies erkennen oder nicht, spielt dabei keine Rolle. Dieses Konzept beruht auf einer Reihe von Annahmen:

- Alle Phänomene haben eine Ursache oder mehrere Ursachen.
- Kausale Strukturen sind determiniert.
- Beobachtungen von Regelmäßigkeiten geben Hinweise auf Kausalität.
- Kausale Beziehungen können durch Experimente zumindest vorläufig verifiziert werden:
   Als Ausgangspunkt gilt das Hempel-Oppenheim Schema der deduktiven Ableitung,
   wobei neben einem allgemeinen Gesetz (a führt zu b) eine empirische Randbedingung
   (a liegt vor) erfüllt sein muß.
- Das Konzept differenziert zwischen notwendigen und hinreichenden Bedingungen: Für das Auftreten eines Phänomens A können mehrere Ursachen in Frage kommen. Dabei gilt es herauszufinden, welche Bedingungen B<sub>1</sub>- B<sub>n</sub> für A notwendig sind und welche Bedingungen B<sub>i</sub>- B<sub>in</sub> zusätzlich erfüllt sein müssen, damit A immer als Folge von B auftreten wird.

Diese Annahmen sind alle umstritten. Ob alle Phänomene eine Ursache haben oder nicht, läßt sich nicht zweifelsfrei beweisen. Dies könnte man als ein Axiom aus der unmittelbaren Lebenserfahrung ableiten, aber die Frage, ob die Welt kausal aufgebaut ist, bleibt eine Anschauungssache. Auch unter methodologischen Aspekten ist es klar, daß selbst das ideale Experiment Kausalität nicht nachweisen kann, denn jeder Versuch in Zeit und Ort bleibt einzigartig, selbst wenn man versucht, alle Bedingungen zu kontrollieren und die geltenden Kontextvariablen zwischen experimentellem Design und Kontrolldesign konstant zu halten. Ebenso führt die Annahme von notwendigen und hinreichenden Bedingungen zu einer Einteilung nach Wissensbeständen, die in dieser Form mit der objektiven Realität nicht übereinstimmen muß. Vor allem ist die Frage, wie man aufgrund von Datenanalyse auf der Basis zeitlicher Folgen, statistischer Korrelationen oder experimenteller Versuchsanordnungen (mit Stimulus und ohne Stimulus) auf kausale Beziehungen rückschließen kann, ohne Deutungszuschreibungen kaum zu beantworten. Insofern ist auch die Kritik von Einstein an diesem Konzept nachvollziehbar. Er schreibt: "Die einer Theorie zugrunde liegenden Begriffe und Grundgesetze [...] sind freie Erfindungen des menschlichen Geistes, die sich weder durch die Natur des menschlichen Geistes noch sonst in irgendeiner Weise a priori rechtfertigen lassen. [...] Insofern sich die Sätze der Mathematik auf die Wirklichkeit beziehen, sind sie nicht sicher, und insofern sie sicher sind, beziehen sie sich nicht auf die Wirklichkeit." (Dieses Zitat habe ich dem Beitrag von Herrn Bergmeister entnommen).

## Das konstruktivistisches Konzept der Kausalität

In diesem Konzept ist Kausalität ein mentales Hilfsmittel der Vernunft: Es ist die Bedingung für Erfahrung, aber nicht ihre Voraussetzung. Die menschliche Vernunft hat das Prinzip der Kausalität eingeführt, um die Phänomene der Welt in eine Ordnung zu bringen. Ob diese Ordnung der inneren Struktur der Phänomene entspricht, ist dabei nicht objektiv zu klären. Auch dieses Konzept beruht auf einer Reihe von Annahmen:

- Kausalität ist eine mentale Leistungen der Vernunft zur Ordnung von Phänomenen im Zeitablauf.
- Kausale Strukturen sind Modelle, die Komplexität reduzieren, und auf kulturellen und sozialen Selektionsformen beruhen.

- Beobachtungen sind subjektiv, aber es gibt Möglichkeit intersubjektiver Übereinstimmung, die aber nicht den Grad der Objektivität messen, sondern den Grad der Plausibilität.
- Eine empirische Verifikation von kausalen Beziehungsmustern ist innerhalb eines spezifischen intersubjektiven Kontextes (Vereinbarungen innerhalb der jeweiligen Community) möglich, aber es gibt keine universelle Gültigkeit außerhalb dieser Community.

Diese Annahmen sind ebenso umstritten wie die Annahmen bei dem ontologischen Konzept. Im Vordergrund steht die Kritik an dem Relativismus: Wenn alle analytischen Sätze nur mentale Zuschreibungen sind, dann gibt es letztlich auch keine sinnvolle Qualitätskontrolle für Wahrheit. Dies führt zur Beliebigkeit. Auch kommt es hier zum Problem des infiniten Rückgriffs auf das Subjektive. Es gibt keine Anschlußfähigkeit mehr zwischen den Wahrheitsansprüchen der unterschiedlichen Communities: die Realität wird von inkompatiblen Realitätsbildern überschattet. Innerhalb des konstruktivistischen Lagers gibt es eine Reihe von Schattierungen. Die moderate Schule des Konstruktivismus geht davon aus, daß es zumindest eine isomorphe Beziehung zwischen kausalem Wissen und Phänomenen gibt; die radikal konstruktivistische Schule sieht jedoch in jedem analytischen Ansatz eine mentale Konstruktion, die unabhängig von der realen Welt existiert. Dazu ein Zitat des Soziologen Niklas Luhmann (1989): "Als Medium ist Kausalität die bloße Möglichkeit einer Zurechnung von Wirkungen auf Ursachen. Als Form ist Kausalität vollzogene Zurechnung, die von Situationen, aber auch von Auswahlgepflogenheiten des Beobachters abhängt".

## Deterministische versus probabilistische Vorstellungen von Kausalität

Quer zu dem ontologischen und dem konstruktivistischen Konzept liegt eine weitere Dimension: die Frage von Determinismus versus Probabilismus. Ich führe diese weitere Dimension schon hier ein, bevor ich auf das dritte Konzept zu sprechen komme, weil es zum Verständnis desselben notwendig ist.

Beim deterministischen Konzept wird angenommen, daß jedes beobachtbare Phänomen durch eine und nur eine Kombination von Ursachen "erklärt" werden kann. Im Umkehrschluß heißt das auch: Jede Ursache oder Ursachenkombination führt zu einer bestimmten Folge. Bei dem probabilistischen Konzept werden eine Ursache oder eine Ursachenkombination nicht mehr einer bestimmten Folge gänzlich zugeordnet, sondern nur im Ausmaß oder im Grad der Auswirkungen dieser Folge. Mathematisch gesehen verändert das Auftreten der Ursache die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des zu erklä-

renden Phänomens, ohne dieses zu determinieren. Man spricht hier auch von Kausalbeziehungen unter Unsicherheit. Es gibt eine Reihe von wissenschaftlichen Ansätzen, um Folgen von Handlungen oder Ereignissen unter der Bedingung der Unsicherheit vorherbestimmen zu können. Dazu müssen einerseits Ursache-Wirkungs-Beziehungen in ihrer Grundrichtung bekannt und andererseits mögliche Verteilungsmuster über Zeit oder über Individuen statistisch abschätzbar sein. Kausalität unter Unsicherheiten ist die systematische Kombination von Wissen und Zufall. Mit Hilfe der induktiven Statistik können Streuungen von Folgen zuverlässiger als auf der Basis reiner Intuition prognostiziert werden. Bei allem Fortschritt in der Modellierung von Konsequenzen und Wahrscheinlichkeiten verbleiben aber viele Unsicherheiten, die mit mangelndem Wissen, undeutlichen Systembegrenzungen, Extrapolationsfehlern u.a.m. verbunden sind. Zudem können wissenschaftlich errechnete Kausalbeziehungen nur Durchschnittswerte über (theoretisch unendlich) lange Zeiträume widerspiegeln. Ebenso können durch Nichtlinearitäten vor allem bei Phasenübergängen chaotische Wirkmuster auftreten, die einer Prognose nicht oder nur teilweise zugänglich sind.

Was ist die Ursache für Probabilistik? Hier gibt es drei Erklärungsmöglichkeiten:

- Unzureichendes Wissen (Determinismus bleibt als Grundschema erhalten): Unser Wissen ist unzureichend. Je mehr Wissen wir ansammeln, desto näher kommen wir den deterministischen Gesetzmäßigkeiten, selbst wenn wir komplexe Phänomene untersuchen. Diese Interpretation ist kompatibel mit dem ontologischen Konzept.
- Unerreichbares Wissen (Modell des Determinismus bleibt als Ideal bestehen, kann aber nach menschlichem Ermessen auch bei zusätzlichem Wissen nie erreicht werden): Diese zweite Möglichkeit der Interpretation besteht darin, daß streng kausales Wissen für den Menschen prinzipiell unerreichbar ist. Dabei bleibt der Determinismus als Ideal bestehen, aber unsere Epistemologie erlaubt es nicht, die vielen interagierenden Kausalfaktoren zu übersehen und eindeutig in Ursachen-Wirkungsketten zu ordnen. Unser Wissen ist dieser Komplexität nicht gewachsen. Selbst wenn wir noch so viel forschen würden, würden immer Unschärfen verbleiben. Das Wissen ist also prinzipiell beschränkt, das Phänomen kann dagegen sehr wohl streng kausal geordnet sein.
- Genuin stochastische Prozesse (ein Determinismus liegt auch in der Struktur der Phänomene nicht vor): Diese dritte, weitergehende Möglichkeit besteht darin, daß auch in der Natur probabilistische Gesetzmäßigkeiten herrschen. Danach bestehen neben deterministischen Beziehungen auch genuin stochastische Prozesse, die von Natur aus statistische Verteilungen aufweisen und somit eine strenge deterministisch-kausale Beziehung nicht aufweisen.

In den technischen Wissenschaften spielen probabilistische Konzepte eine immer bedeutsamere Rolle. Sie werden sowohl im Rahmen der Erkennung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen (etwa durch die Anwendung der induktiven Statistik) wie auch im Rahmen der konstruktiven Auslegung von Technik (etwa bei Gebäuden, Kernkraftwerken, Chemieanlagen) angewandt. In unserer Diskussion in der Klasse wurden dazu drei exemplarische Vorgehensweisen genannt:

- die induktive Statistik, also die Berechnung von Konfidenzintervallen; hier kann man den Haupteffekt modellieren, also die undeutlichen Beziehungen auf diejenigen Effekte reduzieren, die man als erklärungswürdig ansieht, und das Hintergrundrauschen in Kauf nehmen;
- die Setzung von System- oder Betrachtungsgrenzen, um eine systematische Reduktion der komplexen Beziehungsmuster zu erreichen; d. h. man kann dadurch komplexe Interaktionen auf ein überschaubares Maß reduzieren;
- Szenarienbildung und weitere Charakterisierung von Nichtwissen; hier werden bestimmte Wirkungsketten über Zeit nach einem bewußten Auswahlschema (Wünschbarkeit, Worst Case, Best Case, Backcasting) ausgewählt und deren Wechselwirkung simuliert, etwa durch den Einsatz von Monte-Carlo Simulationsverfahren.

Damit komme ich zum dritten Konzept, und ich leite das mit einem Zitat eines Nichttechnikers ein, und zwar mit C. G. Jung: "Wirksam ist, was wirkt." Dieses dritte Konzept bedeutet, daß Kausalität den Grad der Wirksamkeit menschlicher Interventionen in Natur und Gesellschaft beschreibt

## Ein funktionales Konzept der Kausalität

Aus der Diskussion der verschiedenen Ansätze dürfte deutlich geworden sein, daß kein Ansatz erkenntnistheoretisch voll überzeugen kann und man am besten auf eine pragmatische Form der Kausalität zurückgreifen sollte. Für die technischen Wissenschaften könnte dies der funktionale Ansatz sein, wie er ansatzweise von einer Reihe von Philosophen (etwa Janisch) vertreten wird. Dieser funktionale Ansatz beruht auf folgender Vorgehensweise:

 Es gibt eine kulturelle Festlegung von Zielen oder Bedürfnissen, die nicht durch die Phänomene selbst, sondern durch Wünsche und Präferenzen von Menschen vorgegeben sind. Diese Wünsche sind mentale Konstrukte (etwa der Wunsch, schnell und bequem lange Strecken zurücklegen zu können).

- Im Rahmen der technischen Wissenschaften werden Interventionen in die Realität vorgenommen mit dem Ziel, die Wünsche und Präferenzen wunschgerecht (effektiv) und mittelsparend (effizient) erreichen zu können (etwa die Konstruktion von Fahrrädern, eines Perpetuum mobile oder eines Wachsflügels).
- Diese Interventionen werden im empirische Versuch oder durch theoretische Simulation gestestet d. h. der Zeilerfüllungsgrad wird gemessen. Wird das Ziel überhaupt nicht erreicht (Beispiel Perpetuum mobile) wird Kausalität nicht angenommen, wird das Ziel vollständig erreicht, wird eine deterministische Kausalität unterstellt, wird es teilweise oder zu einem gewissen Grad erreicht, eine probabilistische Kausalität.

Dieses Konzept beruht auf einer Reihe von Annahmen:

- Kausalität ist der Gradmesser der Erfolgskontrolle von Interventionen durch menschliche Handlungen.
- Kausale Strukturen sind Modelle, die intersubjektive Erfahrungen über die Beziehungen zwischen Interventionen und deren Wirkungen zusammenfassen.
- Ziele sind subjektiv, aber die Möglichkeit der Erfolgskontrolle ist intersubjektiv überprüfbar.
- Eine empirische Verifikation im Rahmen der Zielvorstellung ist möglich und kann auch unter den gegebenen Kontextbedingungen (universelle) Gültigkeit beanspruchen.

Das funktionale Konzept vermeidet sowohl den naiven Naturalismus des ontologischen Konzeptes wie auch den ausufernden Relativismus des konstruktivistischen Konzeptes. Es handelt sich dabei um ein mediatives Konzept. Technik ist die Verbindung zwischen einem intentionalen mentalen Konstrukt (etwa fliegen zu wollen) und der Umsetzung dieses Konstruktes mit Hilfe von Beobachtung und Experiment (real oder simuliert) an der Realität (Wachsflügel sind problematisch und extrem riskant, breite Tragflächen mit geringem Gewicht und großer Oberfläche sind dagegen funktional für den Zweck eines risikoarmen Fluges). Kausalität ist also nur in Verbindung mit einer Zwecksetzung und einer Intervention definiert.

Natürlich hat auch dieses Konzept auch eine Reihe von Problemen:

- Die Anschlußfähigkeit an andere Kausalitätsprinzipen ist begrenzt.
- Die Frage der Universalisierbarkeit von Erfolgskriterien ist zum Teil kulturabhängig.
- Der Grad der Wirksamkeit von Interventionen hängt von kulturellen Definitionen von "Erfolg" ab (Selbsttäuschung, selbst-erfüllende Prophezeiung, etc.).
- Das Problem der Unterscheidbarkeit zwischen Korrelation und Kausalität bleibt erhalten, wird aber abgeschwächt.

Der Vorteil des funktionalen Konzeptes ist seine besondere Eignung für das Verständnis von technischen Wissenschaften und ihrer Vorgehensweise. Es geht nicht um ein Verständnis dessen, was die Natur in ihrem Inneren zusammenhält, sondern um die Erreichung bestimmter Zwecke durch zielgerichtete Nutzung der beobachtbaren Naturkräfte und Regelmäßigkeiten. Diese sind keinesfalls beliebig, aber durchaus durch Veränderungen an Material und Energiefluß beeinflußbar. Mit der Methode der Intervention wird stets eine neue Realität geschaffen, die aber auf dem Beziehungsmuster der vorgegebenen Realität (unabhängig davon ob man diese wirklichkeitsgetreu erkannt hat) aufbaut. Zudem bietet das funktionale Konzept einen passenden Rahmen für probabilistische Ansätze, ohne deterministische Beziehungen auszuschließen (Endpunkt eine Wahrscheinlichkeitsfunktion).

### Illustrationen zum funktionalistischen Konzept der Kausalität

Diese Überlegungen zu einem funktional-pragmatischen Modell der Kausalität waren in der Diskussion in unserer Klasse Ausgangspunkt für einen differenzierten Disput und für die Erörterung verschiedener Anwendungsbeispiele, auf die ich kurz eingehen will.

- Herr Lucas hat sich besonders mit dem Thema Modellbildung und Werkstoffeigenschaften (auch auf Bauwerke bezogen) befaßt und Beispiele für die "begrenzte Kausalität" wie er es genannt hat vermittelt. Im Einklang mit dem dritten hier thematisierten Modell der Kausalität hat er das moderne Verständnis der Technikwissenschaften als "funktional-stochastisch" und "auf eine Zielorientierung hin orientiert" charakterisiert.
- Herr Dössel, der aus dem Blickwinkel des Ingenieurs Diagnose und Therapie von Krankheiten betrachtet, hat sich intensiv mit der Elektrophysiologie des Herzens bei Transplantationen beschäftigt und in seinem Beitrag deutlich gemacht, daß wir eben doch von stochastischen Beziehungsmustern ausgehen müssen und eine reine Determinanz im Bereich des Organischen nicht vorliegt. Eine Stelle aus seinem Papier würde ich gern vorlesen, weil das zur Diskussion anregt. In seinem Hintergrundpapier zitiert er S. Laureys aus Spektrum der Wissenschaft (Februar 2006): "Der Tod ist eine superkritische Hopf-Bifurkation." So hat, glaube ich, noch niemand den Tod charakterisiert. In Bezug auf Probabilistik führt er weiter aus: "Der Übergang zwischen strenger Kausalität und Zufall ist gleitend: er führt über bedingte Wahrscheinlichkeiten. Ein Mensch mit starker erblicher Disposition wird mit größerer Wahrscheinlichkeit erkranken als ein anderer. Die Bayes-Methode ermöglicht bei Kenntnis der einzelnen und verknüpften Wahrscheinlichkeiten eine Schätzung der Ursache aus der Wirkung."

- Herr Bergmeister hat sich dem Bereich Konstruktion und Bauen zugewandt. Er thematisiert operative Versagenswahrscheinlichkeiten als Entscheidungshilfe für die Tragfähigkeit von Bauten. Die Vorstellung, ein Bauwerk sei sicher oder unsicher, ist einer probabilistischen Betrachtungsweise gewichen: in der Konstruktion wird ein Zielwert eingegeben, den man erreichen muß. Beispielsweise könnte dies eine Versagenswahrscheinlichkeit von 10-6 sein. In jedem Falle verbleibt ein Restrisiko. Dazu der Autor selbst: "Auch im Bauwesen, sowie im Konstruktiven Ingenieurbau geht man nicht von der reinen Kausalität, sondern von kausalen Zusammenhängen, basierend auf erkenntnistheoretischen Erfahrungsprozesse aus, die in den sogenannten Elementarsätzen [...], Konstatierungen [...], Beobachtungen [...] oder Basissätzen [...] ihre sprachliche Interpretation finden." Hier also wird Sprache selbst als Gestaltungsmerkmal für die Bezeichnung und Identifizierung kausaler Prozesse eingeführt.
- Ähnliche Überlegungen finden sich im Papier von Herrn Klocke, der uns Kausalität in den Produktionswissenschaften vorgestellt hat. Im Vordergrund seiner Ausführungen steht der Begriff der unscharfen Logik, die wiederum stochastische Modelle der Realitätsbeschreibung bedingt. Ich zitiere aus seiner schriftlichen Fassung des Vortrages: "Die Modellierung von Wertschöpfungsketten erfolgt in der Produktionswissenschaft in erster Linie vorwärtsgerichtet. Aus der Anwendung unserer Modelle und Methoden sowie der wechselseitigen Abhängigkeiten leiten wir ab, daß bestimmte" und jetzt würde ich einsetzen: 'kulturell definierte' "Zielgrößen sicher erreicht werden können. Wir postulieren Kausalitätserwartungen."
- Herr Hüttl hat sich in seinem Beitrag zur Kausalität des Themas "Waldsterben" angenommen. Dort beobachten wir ein Phänomen, das ich häufig als Ambiguität oder Ambivalenz in der Interpretationen kausaler Strukturen bezeichnet habe. Ambivalenz bedeutet Mehrdeutigkeit der Auslegung von Informationen und deren Zusammenhänge. Häufig will man aus den Daten etwas herauslesen, selbst wenn die Resultate der Forschungen andere Interpretationsmöglichkeiten nahe legen. Herr Hüttl schreibt: "Das überraschende Ergebnis häufig stark beschleunigten Waldwachstums, das den Ansatz "Waldsterben" auf den Kopf zu stellen scheint, muß wohl als Hinweis gewertet werden, daß aufgrund der Dominanz bestimmter Arbeitshypothesen bei der kausalanalytischen Untersuchung der neuartigen Waldschäden der Blick zu stark verengt war und damit wichtige Fragen nicht gestellt bzw. untersucht wurden und gelegentlich Ergebnisse, die nicht in den "Waldsterben-Kontext" paßten, zumindest teilweise unberücksichtigt blieben". Dieses Zitat zeigt, daß Ursache und Wirkung oft im Auge des Betrachters liegen, gleichzeitig aber die unabhängige Messung und Beobachtung

- von Phänomenen zumindest Zweifel an einer rein konstruktivistischen Sichtweise von Ursache und Wirkung aufkommen lassen.
- In der heutigen Sitzung erlebten wir dann noch zwei interessante Vorträge: einen von Herrn Schubert aus der Verfahrenstechnik über die Sterilisierung und Pasteurisierung von Lebensmitteln; und einen anderen von Herrn Wagemann über Kausalität in der Halbleitertechnik, wo auch auf atomarer Ebene, also jenseits der subatomaren Quantenphänomene, Unsicherheiten eine bedeutende Rolle spielen.

### Zusammenfassung

Kausalität ist und bleibt ein integraler Bestandteil unseres Denkens, unseres Verständnisses von Vorgängen in der Welt und unserer Sprache. Der Linguist Frances Pinter hat verdeutlicht, daß alle Schriftsprachen, die er untersucht hat, immer kausale Strukturen kennen. Er hat keine Sprache identifizieren können, die Kausalität nicht als Strukturmerkmal aufgewiesen hätte. Das "Warum-Denken" ist also tief in unserer Lebenswelt verankert und ein Teil unserer Lebenswirklichkeit.

Trotz dieses lebensweltlichen Bezuges liegt ein universell akzeptables Konzept von Kausalität nicht vor. Darüber bestand wohl auch bei der Debatte zu diesem Thema im letzten Jahr schon Konsens. Alle Konzepte, die es gibt, haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Besonders problematisch erscheinen die beiden Extreme: der objektive Kausalitätsbegriff mit einem eher naiven Naturalismus, und umgekehrt der rein konstruktivistische Begriff, bei dem Kausalität nichts weiter ist als eine kulturelle Zuschreibung. Parallel dazu verläuft die Debatte über Determinismus versus Probabilismus, die ebenfalls zu einer Vielzahl nebeneinander existierender Positionen geführt hat.

Wir glauben, für den Anwendungsbereich der technologischen Systeme ist ein weniger ambitioniertes Konzept einer interventionistisch-funktionalen Kausalität ausreichend. Damit sind die andere Kausalitätskonzepte nicht ausgeschlossen; sie mögen für andere Bereiche ihre Gültigkeit besitzen. Das Konzept der interventionistisch-funktionalen Kausalität ausreichend vermeidet viele der Probleme, die wir mit den anderen Konzepten haben. In dieses Konzept sind probabilistische Konzepte sehr gut integrierbar. Es gibt viele Anwendungsbeispiele in der Technik, bei denen sich dieses Konzept als grundlegendes Strukturmerkmal nachweisen läßt und es auch explizit das Denken, das Handeln und auch die Tätigkeiten des Ingenieurs sinngebend motiviert hat.

Schließen möchte ich mit einem Zitat aus den Ausführungen von Herr Lucas: "Unsicherheit in den Prozeßbedingungen und -parametern in Verbindung mit nicht-linearen Ursache-Wirkungs-Beziehungen sind verantwortlich für den Zusammenbruch der Kausalität, auch und insbesondere in den Technikwissenschaften. Nichtlinearität innewohnenden Gesetze ist stets der Grund für Grenzen der Kausalität und dann für Unvorhersagbarkeit, Unsicherheit, Risiko und Einfluß des Zufalls. Sie führt unter anderem zu der beobachteten Vielfalt sprunghafter Veränderungen in Systemen."

Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit.

# Eröffnung der Diskussion

Reinhold Kliegl: Vielen Dank, Herr Renn. Ich möchte kurz erwähnen, daß meine beiden Mitkoordinatoren, Herr Mittelstraß und Herr Fritzsch, heute leider nicht an der Sitzung teilnehmen können – ich darf Sie von Ihnen grüßen. Und ich möchte mich bei dieser Gelegenheit auch bei den Mitarbeitern der Akademie bedanken, die die Vorträge der letzten Sitzung in eine schriftliche Form gebracht und Ihnen rechtzeitig zugeschickt haben. Damit nun die Vorträge der letzten Sitzung in der heutigen Diskussion vielleicht noch einmal zur Geltung kommen, habe ich sie entlang von drei Aspekten von Kausalität sortiert, die in den Vorträgen angeklungen sind – nicht alle in jedem Vortrag, aber doch in unterschiedlichen Konstellationen.

Der erste Aspekt, der auch jetzt im Vortrag von Herrn Renn noch mal angesprochen wurde, ist, daß wir beim Verständnis von Kausalität uns zunehmend und vielleicht verstärkt mit der Notwendigkeit oder der Möglichkeit der Abgrenzung von experimentellen und korrelativen Befunden konfrontiert sehen. In meinem Denken war die Inferenz kausaler Zusammenhänge eigentlich immer an Experimente gebunden. Herr Großmann hat seinen Vortrag mit einer Charakterisierung der Physik als "instrumentalisierte Kausalität" eröffnet, um uns dann sehr anschaulich vor Augen zu führen, wie sehr der Kausalitätsbegriff auch schon in der klassischen Mechanik an die Fehlertoleranzen gebunden ist und diese Beschränkung bei der Interpretation der Befunde mitgedacht werden muß.

Natürlich wird das Experiment in der Physik weiterhin grundlegend dafür sein, daß wir zu gesicherten Erkenntnissen und Schlüssen über kausale Zusammenhänge kommen. Auch in anderen Vorträgen ist deutlich geworden, daß das Experiment nicht nur die Methode der Wahl für die Physik ist, sondern z. B. auch die Methode der Wahl für die Psychologie oder für spieltheoretische Ansätze in den Wirtschaftswissenschaften. Interessanterweise sehen wir uns aber offenbar nicht nur in den Sozial- und Humanwissenschaften damit konfrontiert, daß wir in vielen komplexen Situationen auf korrelative Befunde (mit all ihren Beschränkungen hinsichtlich der Identifikation kausaler Zusammenhänge) angewiesen sind, sondern daß eben, wie von Großmann ausgeführt, auch in der Physik Kausalitätsaussagen nur begrenzte Gültigkeit haben.

Dazu paßt auch ein Beispiel aus dem Statement von Herrn Hellwig – also aus den Wirtschaftswissenschaften: Die Kausalzusammenhänge werden durch Aussagen über die komparative Statik der Auswirkungen von Änderungen in exogenen Variablen auf die

Gesamtheit der endogenen Variablen des betrachteten Systems erfaßt. Herr Hellwig wendet sich dagegen, daß man in den Wirtschaftswissenschaften Kausalität in einfache weil/wenn/dann Beziehungen bringen kann. Entscheidend ist die Konfiguration der Variablen – und ich glaube, ähnliche Aussagen haben wir gerade auch im Vortrag von Herrn Renn gehört. Auch den Geschichtswissenschaften, wenn Sie sich an das Statement von Herrn Osterhammel erinnern, kommt es eher darauf an, den Kontext von Ereignissen zu verstehen und wie man den Begriff Kontext in die Erklärungen integrieren kann; der Kausalitätsbegriff selbst scheint eine eher untergeordnete Rolle zu spielen.

Der zweite Aspekt, den ich kurz ansprechen möchte, ist der Grad der Auflösung, für den man kausale Beziehungen betrachtet. Der Vortrag von Herrn Renn hat uns die Komplexität der Phänomene, für die wir versuchen, kausale Aussagen zu treffen, deutlich vor Augen geführt. Aus der letzten Sitzung bietet sich das Beispiel aus dem Zivilrecht an, das uns Frau Windbichler vorgetragen hat. Wenn eine Firma einen falschen Prospekt veröffentlicht und man kauft auf Grund der Lektüre des Prospekts Aktien, die den Erwartungen nicht gerecht werden, dann begründet das einen Schadensanspruch. Es reicht aber nicht für eine Klage, wenn man sich diese falsche Informationen indirekt, z. B. am Stammtisch, erworben hat. Kausalität ist hier also ein soziales Zweckkonstrukt, das an direkte Beziehungen gebunden ist.

Wie paßt dieser Begriff auf die Wirtschaftswissenschaften und Psychologie, bei denen sich viele kausale Effekte erst durch die Interaktion von endogenen, dem System innewohnenden Variablen ergeben? Und, wieder rückgebunden an die Physik, an das Statement von Herrn Großmann, daß die klassischen Mechanik, also das Paradepferd der kausalen Technik, keineswegs Kausalität in der physikalischen Welt sichert; Kausalität immer nur im Rahmen endlicher Fehler verifizierbar ist.

Schließlich wage ich hier auch einen Bezug zur Religion. Herr Markschies hatte in seinem Statement ausgeführt, daß er gerade in der kausalitätsfreien oder kausalitätsdistanten Modellkonzeption der Physik zumindest die Option sieht, aus der Begründung herauszukommen, wie eigentlich Gott sich zu uns Menschen verhält. Er brachte ja das schöne Beispiel: Wenn ich sage, Gott hat das verursacht, dann erkläre ich Gott zu einem Gegenstand dieser Welt, was er per definitionem eigentlich gar nicht sein kann.

Der dritte Aspekt betrifft die Frage, welche Rolle die Zeit für die Betrachtung kausaler Zusammenhänge spielt. Ich selbst hatte ja versucht, Ihnen an einigen aktuellen Experimenten zu illustrieren, daß wir bei der Wahrnehmung von Kausalität nicht unbedingt die zeitliche Abfolge als Gütekriterium nennen können. Vielmehr ist es so, daß es innerhalb eines Zeitfensters von 200 Millisekunden zu einer Rückdatierung unseres Wahrnehmungs-

erlebens kommen kann. Ich war durchaus überrascht, daß die Rolle der Zeit auch aus der Sicht anderer Disziplinen problematisch für den Kausalitätsbegriff ist.

Deutlich wurde, daß man zum Beispiel in der klassischen Physik sich durchaus dessen bewußt ist, daß Kausalität eine zeitlich beschränkte Reichweite hat, wie das Statement von Herrn Großmann vor Augen führte. Herr Fritzsch bringt es für die Relativitätstheorie auf den Begriff, nämlich daß es dort davon abhängt, von welchem System aus ich mir zwei Ereignisse ansehe, das heißt, was ich in einem System als gleichzeitig erlebe, muß in einem anderen System überhaupt nicht der Fall sein. Auf Einsteins Spuk muß ich nun nicht zurückkommen, da in der Quantenphysik selbst der Begriff der Zeit eigentlich nicht mehr notwendig ist oder zumindest große Probleme aufwirft.

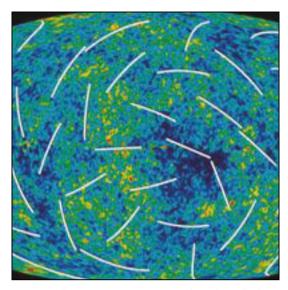
Ähnliche Überlegungen klangen auch im Statement von Herrn Mittelstraß an, der die Unterscheidung zwischen der Interventions-Kausalitätstheorie, die dem experimentellen Ansatz zuzurechnen sei, und dem Begriff der Retro-Kausalität, der sich sehr stark auf die zeitliche Abfolge von Ereignissen bezieht, erläuterte. Auch hier ist es die zeitliche Abfolge von Ereignissen, die in der Philosophie sehr umstritten ist.

Wenn man schließlich den Paragraphen 44, Absatz 1 des Börsengesetzes betrachtet, den uns Frau Windbichler am Beispiel eines falschen Prospekts erläutert hat, dann wird dort explizit gesagt: Kausalität gilt nur für sechs Monate! Natürlich sieht man daran wieder sehr schön die soziale Konstruktion des Kausalitätsbegriffs. Es ist, denke ich, aber auch ein besonders eindrucksvolles Beispiel nichtlinearer Kausalität.

Das wäre also soweit mein Statement, der Versuch, Ihnen vielleicht einige der Punkte in Erinnerung zu rufen, die in der letzten Sitzung zur Sprache gekommen sind. Ich würde mich freuen, wenn Sie sich heute, befreit von den "kurzen" Vorträgen, der Diskussion der Statements zuwenden würden. Herzlichen Dank!

Günther Gustav Hasinger: Herr Fritzsch hatte mich schon letztes Mal gebeten, ein kurzes Statement aus der Astrophysik beizutragen, was aber leider aufgrund der knappen Zeit nicht mehr geschehen konnte. Deswegen habe ich mir heute vorgenommen, Ihnen an zwei Beispielen aus der Astrophysik zu zeigen, wie Kausalität in fundamentalem Zusammenhang mit unserer Existenz steht, wo sowohl die Relativitätstheorie als auch die Quantenmechanik bisher noch unverstandene Voraussagen machen.

Das eine Beispiel zeigt die Tatsache auf, daß das Universum links und rechts genau gleich ausschaut und aufgrund der Kausalität die Einführung der Inflation erfordert. Das heißt, daß wir davon ausgehen, daß sich unser Universum nicht nur linear ausdehnt,



Die von dem NASS-Satellit WMAP gemessene Karte des Mikrowellenhintergrundes. Die Fluktuationen des Himmels sind 100000-fach versträkt. Bis auf die körnigen Schwankungen, welche die Saatkörner der großräumigen kosmische Struktur darstellen, ist die Intensität des Hintergrundes in jede Richtung gleich.



Künstlerische Darstellung des relativistischen Materiestroms um ein schnell rotierendes Schwarzes Loch im Zentrum einer Akkretionsscheibe (orange). Das Licht der Atome, die auf den Beobachter zu fliegen, ist zu kürzeren Wellenlängen (blau) verschoben und wesentlich heller als das Licht auf jener Seite, die sich vom Beobachter entfernt (rot).

sondern daß es am Anfang einen exponentiellen, dramatischen Inflationsprozeß gegeben hat. Sonst wäre es nicht so, daß heute das Universum in alle Richtungen gleich ausschaut.

Das zweite Beispiel befaßt sich mit dem großen Thema Schwarze Löcher. Wir wissen inzwischen, daß es Schwarze Löcher gibt. Schwarze Löcher haben einen gewissen Radius, den sogenannten Schwarzschild-Radius, den Schwarzschild und Einstein zusammen berechnet haben. Nun kann ein Schwarzes Loch auch rotieren. Ein Schwarzes Loch kann also praktisch einen Spin haben, es stellt sich aber heraus, daß es nur einen maximalen Spin haben kann, denn irgendwann würde der Schwarzschildradius schneller rotieren als die Lichtgeschwindigkeit. Und solch ein Schwarzes Loch darf es nicht geben. Das wäre dann kein Schwarzes Loch mehr, sondern eine sogenannte nackte Singularität und die – glauben die Physiker zumindest – darf es aus Kausalitätsbedingungen nicht geben.

Also zunächst kurz zu dem ersten Thema: Das Universum beginnt am Anfang mit einem Urknall, dehnt sich dann im Laufe der Zeit immer weiter aus, und irgendwann erreicht es eine Temperatur, die gerade ungefähr der einer Gasflamme entspricht. Damit entsteht ein heißer Feuerball, von dem wurde das Licht ausgesandt, das wir heute noch am Himmel sehen können. Dieses Licht war damals 3000 Grad heiß und ist heute ungefähr drei Grad über dem absoluten Nullpunkt. Die neuesten Messungen von Satelliten aus – wir haben gerade heute morgen von unserem Akademiepreisträger, Herrn Falcke einen sehr schönen Vortrag gehört über die Radiostrahlung im Universum – zeigen, daß der Himmel in allen Richtungen exakt gleich ausschaut. Und zwar exakt gleich heißt, daß er bis auf Einhunderttausendstel die gleiche Temperatur hat, auf der linken Seite und auf der rechten Seite, obwohl sich diese Fläche, die wir dort sehen, praktisch mit Lichtgeschwindigkeit von uns weg bewegt. Und das heißt, die linke Seite des Universums hatte nie Zeit, sich mit der rechten Seite darüber zu unterhalten: Wie heiß bist denn du? Und was hast du heute für eine Farbe? Und so weiter.

Es gab in diesem Bild nie einen Zeitpunkt, in dem die linke und rechte Seite miteinander hätten reden können. Und deswegen mußte man dieses Inflationsphänomen einführen. Zur Zeit vor der Inflation war das Universum viel, viel kleiner als sein Horizont, und da konnten alle miteinander wechselwirken und zu einer Gleichgewichtstemperatur finden. Das ist der Grund, warum wir glauben, daß unser Universum am Anfang eine Inflation erlebt hat und daß das, was wir heute als Horizont sehen, nur ein winzig kleiner Ausschnitt ist von dem ist, was sich vorher da draußen aufgebläht hat. Das war das erste Beispiel.

Das zweite Beispiel sind Schwarze Löcher. Schwarze Löcher können rotieren. Schwarze Löcher kann man auch beobachten, da sie Materie um sich herum reißen und sehr stark aufheizen, und die Materie dann – bevor sie in das schwarze Loch hineinfällt – quasi ihren letzten Hilfeschrei in Form von Licht aussendet. Deswegen gehören die Schwarzen Löcher zu den hellsten Objekten im Universum, obwohl man das eigentlich gar nicht glauben möchte. Nun hängt es davon ab, ob solch ein Schwarzes Loch rotiert oder nicht rotiert. Wenn ein Schwarzes Loch nicht rotiert, kann die Materie nicht ganz bis zum Schwarzen Loch hinunterreichen, sondern nur bis zu einem Radius, der dreimal dem Schwarzschild-Radius entspricht. Wenn man aber ein Schwarzes Loch hat, das sozusagen exakt am maximalen Kausallimit rotiert, dann kann die Materie bis zum Schwarzschild-Radius hinunterreichen. Und so ein rotierendes schwarzes Loch erscheint dann heller und auch relativistisch noch stärker verzerrt als ein nicht rotierendes schwarzes Loch. Diese Phänomene können wir heute beobachten, wenn wir mit Röntgenteleskopen die Materie um ein schwarzes Loch herum studieren. Dann sehen wir die relativistischen Geschwindigkeiten in Form von solchen charakteristisch verbreiterten Emissionslinien. Das sind die Linien, die Eisenatome in dieser Materie aussenden. Also der Fingerabdruck – sozusagen – der Materie ist durch diese Geschwindigkeiten extrem verschmiert. Diese Verschmierung kann man mit modernen Röntgenteleskopen heute beobachten, die Messungen sind allerdings noch nicht genau genug, um zwischen rotierenden und nicht rotierenden Schwarzen Löchern zu unterscheiden. Aber wir gehen davon aus, daß wir mit der nächsten Generation von Röntgensatelliten unterscheiden können zwischen extrem rotierenden und nicht rotierenden Schwarzen Löchern. Im Moment deuten alle Messungen darauf hin, daß alle Schwarzen Löcher im Universum maximal rotieren, also sozusagen gerade an der Kausalitätsgrenze.

Die beiden Beispiele beziehen sich einerseits auf die Zeit und die Relativitätstheorie, weil die Zeit eben in der Umgebung von Schwarzen Löchern verbogen, verkrümmt ist. Und andererseits aber auch auf die Quantenmechanik, denn sowohl die Inflation als auch die Konsistenz von Schwarzen Löchern sind eigentlich quantenmechanische Prozesse. Wir sind hier an einem Punkt, wo sich eigentlich faktisch die Quantenmechanik und die Relativitätstheorie treffen müßten. Das tun sie aber nicht. Die Theorie der Quantengravitation gibt's ja noch nicht. Da versuchen sich viele Physiker seit vielen Jahren zu tummeln, inklusive Einstein. Ich weiß nicht warum, aber es sieht so aus, als würde dieser Aspekt der Kausalität praktisch auch an dieser Trennlinie zwischen Relativitätstheorie und Quantenmechanik im Moment unser Verständnis limitieren. Dankeschön!

Carl Friedrich Gethmann: Ich möchte auf die Konzeption des Interventionismus eingehen, den Herr Renn uns als dritten Kandidaten ein wenig empfohlen hat. Ob dieser

eine plausible Konzeption ist oder nicht, hängt von der Frage ab, die man sich stellt. Wenn man sich fragt, wie man sich erklären kann, daß wir angesichts des Humeschen Problems – daß man nämlich Kausalität nicht direkt beobachten kann – überhaupt erklären können, daß wir über die Kategorie der Kausalität verfügen, dann ist der Interventionismus nach meiner Meinung eine zufriedenstellende Antwort. Wir verfügen deshalb über sie, weil wir uns eben als interventionsfähige Akteure erfahren, manchmal erfolgreich, manchmal nicht erfolgreich, aber immerhin sind wir überzeugt, in Abläufe zu intervenieren, wie immer diese genauer gebaut sind. Wenn man dagegen ein Ereignispaar E1/E2 vor sich hat und sich fragt, unter welchen Bedingungen es gerechtfertigt ist, eine Kausalbeziehung zwischen diesen Ereignissen zu behaupten, dann ist das Interventionsmodell an einer gewissen Grenze erschöpft. Wenn ich unter dem Eindruck des Vortrags von Herrn Hasinger an astrophysikalische oder Kosmogonietheorien denke, dann ist die Vorstellung, daß man hier interveniert, völlig abwegig. Daß man sozusagen in der Inflationsphase hätte intervenieren können und deswegen etwas über Kausalität weiß – das ist aegen-intuitiv. Das heißt, in solchen Fällen muß man zu anderen, vielleicht zu Hilfshypothesen greifen, um den Interventionismus noch zu halten. Das Korrelationsproblem – um darauf einzugehen – zeigt aber ganz deutlich, daß wir manchmal mit Korrelationsantworten zufrieden sind, wenn wir nach Kausalität fragen. Ich glaube zum Beispiel, daß die Okonomie ein solcher Bereich ist. Manchmal aber nicht; manchmal haben wir die Intuition, daß Kausalität doch irgendwie etwas mehr sein müsse als eine so und so geartete Korrelation. Das bestätigt doch, daß der Erklärungszweck konstitutiv für die Investition des Kausalitätsbegriffs sein muß.

Führt das nicht aber wieder in das Relativismusproblem? Das scheint mir nicht der Fall zu sein. Jedenfalls nicht automatisch, denn Erklärungszwecke müssen nicht zwingend unter der Rubrik der Beliebigkeit gebucht werden. Es gibt ja durchaus so etwas wie intersubjektiv stabile Erklärungszwecke, und ich glaube, daß wir in der Ökonomie so etwas vor uns haben. Die Regeln des wirtschaftlichen Handelns sind ja nicht völlig kulturell vagabundierend, weswegen wir auch in solchen Zusammenhängen nach kausalen Erklärungen suchen. Das heißt, wir haben zwar das Phänomen, daß der Kausalitätsbegriff relational in Bezug auf Erklärungszwecke funktioniert, aber nur unter bestimmten Zusammenhängen heißt das auch Relativismus. Also sollte man zwischen Relationalität und Relativität genau unterscheiden. Dann ist jedenfalls für solche Zusammenhänge das Interventionsmodell noch einigermaßen zufriedenstellend. Aber es bleibt ein gewisser Rest der Unbefriedigtheit in Bezug auf das interventionistische Modell. Das sollte man immerhin festhalten.

Ortwin Renn: Zum ersten Punkt, dem Interventionismus, würde ich Herrn Gethmann voll zustimmen. Ich hatte ja deutlich gesagt, daß sich mein drittes Modell der Kausalität (interventionistisch-funktional) besonders gut für Anwendungen im technischen Bereich eignet, weil technische Formen immer Spielarten von Einwirkungen oder von Interventionen sind, die auf der Basis von erkannten Regelmäßigkeiten zum Zwecke eines bestimmten Zieles realisiert bzw. konstruiert werden. Es sind Artefakte. Das dritte Modell eignet sich nicht für alle zu erklärenden Phänomene, vor allem nicht für solche, auf die wir interventionsmäßig keinen Einfluß haben. Man kann natürlich behaupten, jedes Experiment sei eine Intervention, weil ich ja ein Stück weit etwas Natürliches durch etwas Künstliches ersetze oder zumindest eine künstliche Situation schaffe. Allein die Tatsache, das man im Experiment einmal mit einem Stimulus und ein anderes Mal ohne den Stimulus arbeitet, weist schon auf Intervention hin, wenn man auch damit den Interventionsbegriff sehr weit fassen würde. Bei reiner Beobachtung muß man dagegen auf andere Konzepte der Kausalität zurückgreifen.

Zum zweite Punkt, der Korrelation: Je komplexer die Wechselwirkung und je stärker wir mit intervenierenden Variablen rechnen müssen, desto weniger Freude haben wir an Korrelationen. Unser beliebtes Beispiel in den Einführungsvorlesungen ist immer, daß die Zahl der Störche mit der Zahl der Geburten sehr hoch korreliert. Die hohe Korrelation stimmt empirisch! Natürlich gibt es intervenierende Variablen: ländliche Bevölkerung, Lebensstile, Naturnähe, etc.. Die Frage ist, inwieweit wir Korrelationen noch durch Plausibilität kausal interpretieren können, wenn wir auf strenges Experimentieren nicht zurückgreifen können. Darüber hinaus ist fraglich, ob man tatsächlich experimentelle Designs finden kann, die es erlauben, eine Vielzahl von intervenierenden Variablen zu identifizieren und zu messen. Da ist vielleicht eher ein schrittweiser Prozeß angesagt, bei dem ich sukzessiv verschiedene kausale Hypothesen zu einem Phänomen parallel teste.

Hubert Markl: Ich möchte mich zuerst an Herrn Renn wenden. Das Konzept zwei, das Sie uns vorgestellt haben, das ja in seinem Grundsatz kantianisch ist, das neigt natürlich einerseits zur kulturrelativistischen Degeneration, das haben Sie angemerkt, Sie haben aber auch vor einem naiven Naturalismus gewarnt. Nun, als Biologe glaube ich schon, daß an dieser Stelle ein Wort zur evolutionären Erkenntnistheorie ganz angebracht gewesen wäre, denn naiv mag er manchmal gewesen sein, der gute alte Konrad Lorenz, aber dumm war er nicht, und Gerhard Vollmer schon gleich gar nicht, der sich seit langem intensiv damit auseinandergesetzt hat. Darin steckt schon etwas , was gegen die Degeneration in den Kulturrelativismus des Kausalitätsbegriffes schützt, nämlich daß eben

dieses kantianische, transzendentale Konzept immer wieder, in jeder Kultur, ständig an der Wirklichkeit kontrolliert wird. Nun haben Sie eine bemerkenswerte Aussage gemacht, nämlich daß die drei Hauptsätze in jeder Kultur gelten. Dem stimme ich nicht zu. Es ist nur so, daß die drei Hauptsätze in jeder Naturumwelt gelten, in denen beliebige Kulturen existieren, und natürlich können Kulturen sich ganz anders dazu verhalten, aber dann haben sie die Probleme damit. Also um ein Beispiel zu nehmen: Wenn die rot-grüne Regierung beschlossen hätte, daß sie das deutsche Energieproblem zukünftig mit dem Perpetuum mobile lösen will, dann würde zwar der Bundesumweltminister immer noch lebhaft vertreten, daß dies richtig sei, – denn selbst wenn Politiker immer wieder das lebenslange Lernen fordern, für die Energiepolitik von Rot-Grün gilt dies selbstverständlich nicht, – aber deshalb wird sich dies eben immer an der Wirklichkeit stoßen.

Das zweite, was ich bemerken wollte, ist, was Sie als Interventionismusmodell vorgestellt haben – also was wirkt, ist wahr. Das ist bekanntlich eine alte Mediziner-Epistemologie: wer heilt, hat recht, heißt es dort seit jeher. Darin steckt schon etwas sehr Wichtiges und Wirkungsvolles, aber man muß auch die Grenzen dieses Vorgehens immer ganz klar sehen. Gerade da wir morgen Sigmund Freuds besonders gedenken, ist es vielleicht richtig, darüber in diesem Zusammenhang nachzudenken. Natürlich hat, wer heilt, recht, aber der Wirkungsmechanismus, warum geheilt wird oder warum etwas wirkt, ist eben dadurch überhaupt nicht aufgeklärt, es kann sogar völlig irrigen theoretischen Erklärungen, also selbst psychoanalytischen folgen, aber es kann dennoch wirken. Mit den Heilerfolgen der Psychoanalyse könnte es sich ja wie mit manchen Einreibungen, zum Beispiel gegen Gelenkschmerzen, verhalten. Man meint vielleicht, es liege an den Inhaltsstoffen, die da verrieben werden, dabei könnte sich in Wirklichkeit der Vorgang der Einreibung – also im Vergleichsfall: der besonderen und ausdauernden Zuwendung (notabene gegen gute Bezahlung!) – als heilsam erweisen Also das muß man sauber auseinander halten.

Ein drittes wollte ich noch sagen. Vor kurzem stieß ich auf einen Aphorismus des berühmten kolumbianischen Aphoristikers Nicolás Gómez Dávila, der gesagt hat: "Der Determinismus wird durch jeden Fehler widerlegt" (ähnlich wie Intelligent Design durch schmerzende Weisheitszähne oder durch unsere Neigung, uns wegen der unglücklichen Überkreuzung von Atemwegen und Speiseröhre zu verschlucken, widerlegt wird). Das ist kurz und prägnant gesagt, aber wenn man darüber nachdenkt, ist es wirklich so, daß unsere Fähigkeit, Fehler zu machen, überhaupt die Voraussetzung dafür ist, daß wir Erfahrungen sammeln, also lernen können. Da wir ja nachweislich dazu imstande sind, also – manchmal jedenfalls – aus Schaden klug werden können, wird mit diesem Aphorismus

ein ganz wichtiges Prinzip der Kritik an einem deterministisch durchgeformten, vollkausalen Weltall formuliert.

Und das letzte: das mit den Störchen und den Geburten, das wird zwar oft behauptet, als habe beides nichts miteinander zu tun; aber es tut mir leid, daß ich dies als Biologe richtigstellen muß. Die Zahl der Störche korreliert nämlich absolut und ganz kausal mit der der Geburten – aber eben mit der Zahl der Storchgeburten. Das ist nur immer falsch dargestellt worden, als hätte diese mit der Anzahl an Menschengeburten zu tun – verzeihen Sie diese Sottise.

Ortwin Renn: Vielleicht darf ich mit dem letzten Punkt beginnen: mit den Störchen und den Geburten. Bei den Storchenjungen hätten wir ja eine Kausalität, Herr Markl, bei den Menschenkindern haben wir nur eine Korrelation. Entgegen jeder biologischen Kenntnis korreliert die Zahl der Störche auch mit der Zahl der Menschengeburten, und zwar immerhin in einer Stärke von rund 0,4 – eine für Sozialwissenschaftler durchaus interessante und normalerweise verfolgenswerte Beziehung. Gerade an diesem Beispiel wird ja die Absurdität einer reinen Korrelationsbetrachtung augenfällig.

Das führt mich zum zweiten Punkt, was wahr ist, das wirkt. Mit dieser etwas zurückgenommenen Form des Kausalitätsbezuges befreien wir uns ein Stück weit aus der Problematik, daß das, was wir als Wirkungsmechanismus bezeichnen, theoretisch einem infiniten Regreß unterliegt. Der Wirkungsmechanismus ist ja nur deshalb dem reinen Wirkungsschema überlegen, weil ich die Zwischenschritte zwischen den verursachenden Faktoren und den wirkenden Faktoren besser nachvollziehen kann. Zwischen zwei Zwischenschritten kann ich aber unendlich viele weitere Schritte einfügen, so daß jeder Wirkungsmechanismus durch einen noch ausgefeilteren und detaillierteren Nachvollzug des Geschehens verfeinert werden kann. Ich sehe also keinen Gegensatz zwischen Wirkungsschema und Wirkungsmechanismus, sondern eher einen Grad zunehmender Differenziertheit, die uns natürlich im Sinne des dritten Konzeptes effektivere Interventionen erlaubt (etwa in der Arzneimittelforschung).

Dritter Punkt: Die Frage nach dem Perpetuum mobile und den Hauptsätzen der Thermodynamik: Ich glaube, da haben wir uns mißverstanden. Natürlich kann man Kausalität als Struktur des Wissens ansehen und natürlich gab es und gibt es viele Gesellschaften, Gruppen und Individuen auf dieser Welt, die einfach falsches Wissen besitzen – politisch motiviert oder wie auch immer. Wenn sich aber Wissen in irgendeiner Weise an der Realität messen lassen muß, dann findet man offensichtlich Regelmäßigkeiten, die unabhängig vom eigenen subjektiven Wissen ihre Wirkung entfalten. Das wollte ich mit meiner

Aussage über die Hauptsätze der Thermodynamik aussagen: unabhängig vom subjektiven Wissen sind die Implikationen dieser drei Hauptsätze universell auf der Erde beobachtbar und nachvollziehbar. Insofern widersprechen wir uns da nicht.

Zum letzten Punkt: Die evolutive Erkenntnistheorie: Vielleicht will dazu auch Herr Gethmann, der ja viel Kritisches zu diesem Thema geschrieben hat, etwas sagen. Es ist sicher plausibel anzunehmen, daß die Evolution uns von den Sinneseindrücken, über die wir Signale aus der Umwelt empfangen, auch eine Art von isomorpher oder zumindest homomorpher Abbildung der Wirklichkeit ermöglicht hat. Interessanterweise fehlt uns ja die intuitive Einsicht in den Bereichen, wo unsere Sinneswahrnehmung nicht mehr greift – also im Kleinstbereich und im Großbereich der Realität. Da tun wir uns mental schwer. Die Evolution hat uns in diesen Bereichen weder mit einem organischen Sensorium noch mit einem nachvollziehbaren Verständnis ausgestattet. Diese Überlegungen sind sehr plausibel, aber sie sind natürlich nichts anderes als Annahmen. Wir können das nicht logisch beweisen noch experimentell nachweisen. Man kann natürlich auch behaupten, hier läge ein typischer Analogieschluß vor, der auch verführerisch wirken mag – ich nenne das Extrembeispiel Homöopathie –, aber diese Analogie ist zumindest plausibel und steht nicht im Gegensatz zu anderen wissenschaftlichen Erkenntnissen über uns selbst.

Rudolf G. Wagner: Vielleicht kann man die Frage herumdrehen. Ich würde mich auch gern an Herrn Renn wenden: Innerhalb eines erheblichen Teiles der Wissenschaften gilt auf Grund des falsifizierbaren oder verifizierbaren Charakters von Kausalitäten als wissenschaftsfähig nur das, was in der Tat kausalmäßig in Beziehung gebracht werden kann. Das hat zur Folge, daß die Anordnung von Experimenten auf eine Reduktion von Komplexität auf einfache Faktoren abgestellt ist, deren Korrelation dann präzise und wiederholbar bestimmt werden kann. Innerhalb des Ingenieurbeispiels, das Sie angeführt haben, kommt natürlich nun die Schwierigkeit dazu, da dieses gerade nicht ein reines reduktives Experiment-Arrangement ist. Es handelt sich um komplexe ingenieurwissenschaftliche Lösungen, bei denen Sie unter Umständen Resultate zustande bringen, die mit dem Beabsichtigten herzlich wenig zu tun haben. Das erleben wir jeden Tag. Es kann keine Rede davon sein, daß es bei einem solchen komplexen Arrangement eine Eins-zu-eins-Beziehung zwischen der beabsichtigten Wirkung und dem tatsächlichen Resultat gibt, also daß hier der Ansatz einfach verifiziert oder falsifiziert wird; Sie haben zum Teil Jahrzehnte später Auswirkungen, an die Sie nie gedacht haben, die aber trotzdem auf das ursprüngliche Konstrukt zurückgeführt werden können.

Die Frage ist also die, inwieweit der Beruf, dem wir hier nachgehen – das heißt der Beruf der Wissenschaft – uns im Grunde genommen dazu drängt, eine relativ reduktionistische Form der Kausalität zu privilegieren, da sie uns klare Kommunikation, Verifikation, Falsifikation, Nachweisbarkeit etc. erlaubt, uns aber gleichzeitig dazu bringt, komplexere Phänomene zu vernachlässigen. Es ist ja eine Erfahrung mit vielen wissenschaftlichen Ergebnissen, daß eine hochgradige Form der kausalen Verknüpfung in abstrakten Modellen hergestellt wird, die sich in dem Augenblick, in dem sie in irgendeinen lebensweltlichen Zusammenhang zum Beispiel der Anwendung geraten, sich als erstaunlich unfähig zur Erfassung dieser Realitäten erweisen, beziehungsweise Konsequenzen haben, die vollkommen ungeahnt waren. Insofern muß man wohl darüber nachdenken, inwieweit diese Kausalität nicht einfach ein objektives Ding ist, was da ist, sondern ob wir nicht, die wir hier sitzen, sozusagen ein kulturelles commitment zugunsten einer reduktionistischen Kausalität haben. Das ist ja unser Terrain und unsere Spielwiese. Insofern überprivilegieren wir diesen partikularen, unter Umständen sehr reduktionistischen Kausalitätszusammenhang etwas.

Ortwin Renn: Vielen Dank für diesen Beitrag, der aus meiner Sicht noch einmal unterstreicht, daß das Experiment, auch wenn es Kausalität im Sinne einer Gegenüberstellung von einer Intervention mit einem Stimulus und einer ohne Stimulus bei Konstanz aller anderen Faktoren nachweist, in vielen Bereichen relativ lebensfremd ist. Diese Lebensfremdheit hat natürlich zur Folge, daß ein bestimmter Ursache-Wirkungs-Effekt mit relativ großer Vorhersagekraft bestimmt werden kann, dessen lebensweltliche Relevanz aber ungeklärt bleibt, und weitere unbeabsichtigte Nebenwirkungen ausgeblendet werden. Auf der Basis dieser Erkenntnis hat meines Erachtens ein Paradigmenwechsel von einer strengen Kausalität hin zu einer eher weichen Kausalität stattgefunden. In diesem Verständnis wird das Hintergrundrauschen als eigenes Phänomen anerkannt, Unsicherheiten werden charakterisiert und nicht ausgeblendet, Interpretationsspielräume eröffnet und nicht geschlossen, alternative Erklärungen werden mit einbezogen: Diese Pluralisierung von wissenschaftlicher Erkenntnis löst die strenge Determinanz auf, ohne aber beliebig zu werden. Die Gütekriterien der Erkenntnisfindung bleiben dabei erhalten, möglicherweise sogar noch in verstärktem Maße. Dieser Paradigmenwechsel zeigt sich auch im technischen Bereich, weil es hier weniger um abstrakte Erkenntnis sondern um Problemlösungen aeht.

In vielen anderen Bereichen der Wissenschaft steht dagegen weiterhin der Erkenntnisfortschritt im Vordergrund. Da ist ein partikulärer Ansatz mit einer strengen Kausalitätsanforderung durchaus sinnvoll, aber Sie haben recht, dies kann dazu führen, daß man all die Dinge ausblendet, die nicht in diese Art von strenger kausal-experimenteller Nachweisführung hineinpassen. Den Schluß, den man daraus ziehen kann, ist, darauf zu achten, daß vieles von dem, was wir als Problem oder Phänomen wahrnehmen, eine weniger strenge Form kausaler Beweisführung benötigt, um mit dem Problem zielgerecht umzugehen. Gleichzeitig benötigen wir im Sinne der Aufrechterhaltung von "awareness" eine Art von Radar, der uns darüber informiert und uns warnt, daß das, was wir als Zweck mit einer Intervention verbinden, auch immer wieder Nebenwirkungen zeitigt, die in diesem Zweck nicht aufgehoben sind, die aber prinzipiell beobachtbar und häufig auch vorhersehbar sind. Ein solches Radar einzurichten, wäre Aufgabe einer vorausschauenden Wissenschaftspolitik, auch eine Aufgabe der wissenschaftlichen Akademien.

Klaus Lucas: Wenn man über Kausalität in den Technikwissenschaften spricht, so ist es ja eigentlich nicht so, daß man ständig beobachtet, daß es nicht kausal ist, daß es nicht funktioniert, wie das vorhin anklang, sondern man beobachtet in der großen Menge der Phänomene doch, daß es funktioniert. Das Erstaunliche ist ja eigentlich, daß es so ist, daß also trotz der Komplexität der Phänomene so vieles funktioniert, was offensichtlich nicht im strengen Sinn kausal ist. Denken Sie an Ihren heutigen Tagesablauf. Wieviel technische Artefakte haben Sie benutzt und wie oft ist etwas schief gegangen. Sie werden feststellen, daß praktisch alles nach Plan abgelaufen ist.

Wenn man sich fragt, wie das zustande kommt, dann wird man auf folgende Antwort geführt: Das, was wir in den Artefakten wirklich testen – ob es funktioniert oder nicht funktioniert – sind Mittelwerte. Herr Großmann hat damals in seinem Vortrag sehr eindrücklich klar gemacht, daß die Vorhersagbarkeit der Mittelwerte etwas ganz anderes ist als die Vorhersagbarkeit im Detail. In den Technikwissenschaften nutzen wir im wesentlichen Mittelwerte der Artefakte über begrenzte Zeiträume. Sobald man das auflöst, das heißt, sobald man in Details geht und in sehr lange Zeiträume, wird deutlich, daß die Kausalität tatsächlich nicht existiert. Das heißt, wir bewegen uns mit den Technikwissenschaften – das ist sehr wichtig – in einem begrenzten Zeit- und einem begrenzten Genauigkeitsbereich. Dafür werden wir auch zur Verantwortung gezogen. Deswegen spreche ich von begrenzter Kausalität in den Technikwissenschaften, um deutlich zu machen, daß wir im Grunde genommen nur einen Teilbereich kausal erfassen können, und die Dinge, die darüber zeitlich und im Detail hinausgehen, einfach ausblenden.

Henning Scheich: Ich möchte noch eine kleine Bemerkung machen zum Isomorphie-Problem zwischen dem kognitiven Begriff Kausalität und Hirnmechanismen, die diesen Begriff ermöglichen. Herr Markl hat die evolutive Erkenntnistheorie schon erwähnt. Ich darf darauf aufmerksam machen, daß assoziative Lernmechanismen des Hirns, über die wir wahrscheinlich zu einer Annahme von Kausalität zwischen Ereignissen kommen, eine typische Asymmetrie haben, die auch im Kausalitätsbegriff fundamental ist. Eine neuronale Assoziationsbildung zwischen Ereignissen A und B hat keine Beliebigkeit hinsichtlich der Reihenfolge. Ein gelerntes AB kann nicht durch BA ersetzt werden und auch das zeitliche Intervall zwischen A und B darf nicht stark variieren, um dieselben neuronalen Prozesse auszulösen, das heißt denselben Zusammenhang darzustellen. Auch Tiere erwarten B, wenn A erfolgt, nachdem sie diesen Zusammenhang multipel erfahren haben. Es ist wahrscheinlich, daß solche zeitlichen Regularitäten von vorher/nachher bei erlernten Ereignissen die Basis für einen Kausalitätsbegriff im Sinne eines verläßlichen (gesetzmäßigen) Zusammenhanges bilden.

Im wissenschaftlichen Sinne müssen dann allerdings noch andere Kriterien und insbesondere eine spezifische experimentelle Voraussagbarkeit des Zusammenhanges hinzukommen. Aber auch Letzteres ist nicht auf den Menschen beschränkt, wenn man statt Außenereignissen eigene Handlungen betrachtet. Tiere können leicht lernen, durch bestimmte Handlungen gezielt Folgeereignisse auszulösen und tun dies auch natürlicherweise. Es sind inzwischen ganze Hirnsysteme entdeckt worden, die solchen spezifischen Prädiktionen dienen.

Reinhold Kliegl: Ich habe über die Wahrnehmung von Kausalität, nicht über Kausalität in diesem Experiment gesprochen. Insofern würde ich da keinen Widerspruch sehen.

Wolfgang Klein: Als Sprachwissenschaftler wäre ich wahrscheinlich gut beraten, nur etwas über den Ausdruck der Kausalität in den verschiedenen Sprachen der Welt zu sagen. Sie haben, Herr Renn, kurz erwähnt, daß man in allen Sprachen der Welt Kausalität ausdrücken kann. Ich bin nicht so sicher, daß das so ist, weil allenfalls zehn Prozent aller Sprachen von den ungefähr 6.000, die man hat, einigermaßen gut beschrieben worden sind. Allerdings in denen, die man kennt, ist das so. Man muß jetzt aber zwei Dinge hinzufügen. Erstens: Die Mittel, die man dazu wählt, sind außerordentlich verschieden. Und zweitens: Es ist ganz und gar unklar, ob in verschiedenen Sprachen damit dasselbe ausgedrückt wird, also ob es übergreifende Kausalitätsbegriffe gibt. Jetzt will ich die Sache aber vereinfachen und nur vom Deutschen reden, also einer Sprache, die wir einiger-

maßen kennen, und eine harte These wagen, die ich gleich wieder etwas zurücknehme: Ursache ist alles, was durch einen weil-Satz ausgedrückt werden kann. Das ist ein sehr elegantes und handliches Kriterium. Nun wird man natürlich sagen, das ist nicht gerade präzise. Ich will an zwei Beispielen erläutern, welche unterschiedlichen Dinge man dadurch ausdrücken kann. Wenn ich zum Beispiel die Frage stelle: "Wieso ist es denn so hell im Keller?" dann kann ich sagen, "weil Wolframdraht, wenn er erhitzt wird, Photonen ausstrahlt" und so weiter. Ich kann auch sagen, "weil ich das Licht angeschaltet habe". Dieses sind beides Ursachen, die durch einen weil-Satz eingeleitet werden. Es sind beides Ursachen, aber es sind offenkundig ganz verschiedene Dinge, bei denen man nur noch schwer sieht, was sie überhaupt miteinander zu tun haben.

Und jetzt kommt mein erster eigentlicher Punkt: Ist es nicht vielleicht ganz generell so mit der Kausalität, daß wir einfach ein gemeinsames Wort für vollkommen verschiedene Dinge haben, die eigentlich nur noch sehr wenig gemeinsam haben, ungefähr genauso viel wie die beiden Dinge, die ich hier durch weil-Sätze ausgedrückt habe? Sie können sich weitere Beispiele dieser Art ausdenken. Das war mein erster Punkt.

Der zweite Punkt ist der folgende, daß oft ein ganz enger Zusammenhang zwischen zwei Begriffen gesehen wird, die zwar oft zusammengehen, aber nicht zwingend etwas miteinander zu tun haben, nämlich Kausalität und Determinismus. Kausalität – zumindest in einem der verschiedenen Sinne – heißt ganz einfach, ein Sachverhalt A ist die Ursache eines Sachverhaltes B, wenn ich mir B nicht denken kann, ohne mir A zu denken; das ist die Humesche Definition. Das ist also ein relativ klarer Begriff von Kausalität. Dieser Begriff von Kausalität besagt überhaupt nicht, daß zwangsläufig ein anderer Sachverhalt eintritt, wenn eine bestimmte Konstellation von Sachverhalten gegeben ist. Das versteht man im allgemeinen unter Determinismus. Dies sind zwei vollkommen verschiedene Dinge, die in der Praxis oft zusammengehen, die man aber ganz klar auseinanderhalten muß. Man sieht es übrigens daran, daß der Begriff der Kausalität schon in der griechischen Philosophie eine eminente Rolle gespielt hat, während der Determinismus zwar auch schon bekannt war, aber so richtig Aufwind erst zu Beginn der Neuzeit bekommen hat. Man muß diese Dinge einfach auseinander halten.

Jetzt komme ich zu meinem dritten Punkt, und der betrifft eine Frage, die ich mir auch schon verschiedentlich vorgelegt habe. Welche – ich will es mal so sagen – innerdisziplinäre Evidenz hat man für einen Determinismus? Wenn sich die einzelnen Vertreter der einzelnen Wissenschaften fragen, nicht was uns die Physik vielleicht sagen kann, sondern welche Hinweise ihre eigenen Phänomene, also jene, die sie beobachten, zu beschreiben versuchen, auf einen Determinismus geben – dann werde ich zunehmend skeptisch. Ich

denke, als Geschichtswissenschaftler würde keiner sagen, daß die Dinge deterministisch ablaufen. Vielleicht Spengler, aber das war ein Philosoph – in der Geschichtswissenschaft wird man das im allgemeinen nicht sagen. Gut, Herr Gethmann sagt das, aber Sie sind ja auch ein Philosoph und kein Historiker.

Oder wenn ich mein eigenes Fach betrachte, die Sprachwissenschaft: Es ist beispielsweise so, daß im Deutschen das Akkusativobjekt nach dem Verb steht, aber auch vor ihm stehen kann. Muß das so sein? Vielleicht muß es so sein, aber die Evidenz, die ich aus meinem eigenen Fach heraus habe, die ist nicht so. Wie ist es in der Biologie? Ist es so, daß die biologischen Befunde als solche zwangsläufig auf einen Determinismus deuten? Aber da wage ich nichts dazu zu sagen, vor allem, weil mir Herr Markl direkt gegenüber sitzt. Ich sehe eigentlich da nur begrenzte Evidenz aus der Biologie selbst. Wie ist es mit der Chemie? Natürlich könnte ich selbst als Nichtexperte sagen, die Experimente zeigen eigentlich nicht immer das gleiche, dann würden alle Chemiker sagen, na ja das sind Meßfehler oder variierende Bedingungen und so weiter. Aber ist es so? Gibt es chemische Evidenz, daß die Dinge eigentlich immer zwangsläufig in gleicher Weise ablaufen müssen?

Kommen wir letztendlich zur Physik. Das ist sozusagen die pièce de résistance des Determinismus. Nun wissen wir, daß er im subatomaren und im atomaren Bereich nicht zwingend gegeben ist. Vielleicht ist es in der Makrophysik der Fall, aber dann stellt man sich dann die Frage: "Nach welchen Prinzipien ergibt sich ein deterministisches Verhalten aus Erscheinungen, die nicht deterministisch sind? Wenn man sich all die tatsächliche Evidenz der verschiedenen Disziplinen vor Augen hält, dann hat man den Eindruck, daß es sich mit dem Determinismus eher so verhält wie mit der klassischen Annahme der Naturforscher vor Kepler, daß sich die Planeten auf Kreisbahnen bewegen? Der Determinismus ist ein sehr vernünftiges methodisches Prinzip, das aber nicht durch die Phänomene diktiert wird, sondern eine methodische Annahme darstellt.

Horst Bredekamp: Mir drängt sich ein Eindruck auf, der sich schon in der letzten Sitzung eingestellt hat, nämlich daß wir in einer Platonschen Höhle sitzen, in der sich vor allem Geisteswissenschaftler befinden; an der Wand erscheint ihnen als Idol die Schrift: "Kausalität ist die Bedingung für Wissenschaft." Naturwissenschaftler haben uns mehr oder minder entschieden vorgeführt, daß diese Formel zwar geglaubt, aber nicht realisiert werden kann.

Die Frage ist jedoch, ob die Lichtbringer nicht auch ihrerseits vor den Idolen der Kausalität erstarren; insofern sitzen wir gemeinsam in der Höhle. Dies, Herr Klein, klang in Ihrem Nachsatz darin an, daß alle naturwissenschaftlichen Beiträge zwar betont hätten, daß eine strenge Kausalität nicht beobachtbar sei, aber dennoch das kausale Prinzip funktioniere. Diesen Widerspruch hätte ich gerne aufgelöst. Meine Frage wäre, ob nicht wirkliche Lichtbringer den Begriff der Kausalität selbst angreifen müßten. Er staucht uns immer wieder gegen unsere Erkenntnis zurück in eine Erwartungshaltung, die in uns angelegt ist, ohne erfüllt werden zu können. Schließlich: Sie hatten Herrn Markschies interpretiert, daß er die Theologie einbringen wolle. Aber darum ging es ihm nicht. Sein Punkt war vielmehr, darauf hinzuweisen, daß die Theologie genau das Problem, das auch Naturwissenschaftler nicht zu lösen vermögen, abgebildet hat und permanent abbildet. Wie gesagt, meine Frage wäre, ob man in einer Rettung der Ambivalenz des Kausalprinzips nicht über einen Ersatz dieses Begriffes nachdenken sollte. In ihrem gegenwärtigen Gebrauch hat die "Kausalität" den Charakter eines platonschen Idols: Sie bedient einen Wunsch nach Sicherheit, der nicht zu erfüllen ist.

Siegfried Großmann: Die Diskussion hat sich schon ein Stückchen in die Richtung bewegt, die mir am Herzen lag. Es scheint mir nämlich auf Grund dessen, was wir beim letzten Mal aneinandergereiht gehört haben und was uns auch heute noch einmal in der Zusammenfassung deutlich geworden ist, daß offenkundig in den verschiedenen Wissensbereichen, in den verschiedenen Disziplinen, in den verschiedenen Seinsbereichen vielleicht, unterschiedliche Arten der Ausprägung dessen vorhanden sind, was man als Kausalität im Hinterkopf hat. Die Frage, der wir uns überhaupt noch nicht intensiv zugewendet haben, ist: Steht dahinter wirklich etwas Einheitliches mit unterschiedlichen Ausprägungen in bestimmten Bereichen, oder belegen wir vielmehr nur die Summe dessen, was uns in den verschiedenen Bereichen so bereichsspezifisch unterschiedlich begegnet, mit einem Oberbegriff Kausalität. Die Analyse, ob es einen begrifflich gemeinsamen Hintergrund überhaupt gibt, oder ob es sich um jeweils in einzelnen Bereichen spezifische neue Begriffsbildungen handelt, - diese Analyse haben wir bisher noch nicht so richtig leisten können. Ich glaube, gerade der letzte Beitrag machte das ja deutlich, indem nämlich gefragt wird, ob man den Begriff Kausalität nicht eventuell aufgeben sollte. Ich plädiere nicht dafür, den Begriff aufzulösen oder wegzulassen, weil er offensichtlich eine gewisse ordnende und systematisierende Bedeutung hat, aber immer nur in einzelnen Bereichen. Viele der heutigen Beiträge laufen darauf hinaus, den Begriff Kausalität in einem Bereich zu kommentieren, zu beleuchten oder gar zu widerlegen mit Beispielen aus anderen Bereichen. Dadurch entsteht dieses merkwürdig changierende Element im Kausalitätsbegriff. Also: Gibt es ein gemeinsames, dahinter stehendes Gedankengebäude, oder ist das gar nicht vorhanden, existiert Kausalität nur als Summenbegriff spezifischer Einzelbegriffe der verschiedenen Bereiche? Die Analyse dieser Frage halte ich für wichtig.

Julian Nida-Rümelin: Ich will den Versuch machen, ganz kurz eine Brücke zu schlagen zwischen zwei Debatten, die wir hatten, nämlich einmal die Freiheitsdebatte und jetzt die Kausalitätsdebatte – das hat ja erkennbar etwas miteinander zu tun –, will aber ganz kurz vorausschicken zu in der Synopse von Herrn Renn: Es liegt in der Natur der Sache, in den paar Minuten mußten Sie natürlich vergröbern, aber ein Mißverständnis darf bei aller Vereinfachung nicht aufkommen, nämlich als ob es bei den drei Modelle oder Sichtweisen, die Sie genannt haben, um drei Paradigmen geht, die nebeneinander und in Konkurrenz zueinander stehen. Das ist so nicht richtig. Das beginnt schon mal damit, daß man diese, die Sie als funktional-interventionistische Sichtweise bezeichnet haben, auch so interpretieren kann als Realist: man sagt, die Vorstellung von Kausalität entsteht in unseren Köpfen auf Grund der Erfahrungen, die wir machen mit unserem Handeln und Wirken auf die Welt, und irgendwas passiert anders, als wenn ich nicht eingewirkt hätte. Das heißt aber nicht, daß Kausalität nur in unseren Köpfen ist, sondern dadurch bekommen wir den Zugang zu diesem Phänomen. Das kann so sein, es kann auch anders sein. Und das gleiche gilt für die Zuschreibungsmechanismen. Frau Windbichler hatte diesen interessanten rechtstheoretischen Vortrag gehalten, auch dort kann man sagen: Na ja, die Begriffe sind da etwas vage, präziser müßte die Juristerei davon sprechen, daß wir Verantwortung zuschreiben. Deswegen legen wir einen Sechs-Monats-Zeitraum fest, was immer die kausalen Prozesse im Detail sind. Dann hätte man diese Konfusion auch behoben.

Diese Vorbemerkung ist – glaube ich – wichtig, um sich kurz Gedanken zu machen: Wie fügt sich denn menschliches Handeln hier ein? Also diese interventionistische Herangehensweise – es ist wichtig, daß man das sieht – nimmt gewissermaßen menschliches Handeln aus dem Naturzusammenhang heraus. Sie sagt: Wir intervenieren, so oder so! Dann sind das aber nicht selber Gegenstände der kausalen Beschreibung. Sondern das wird herausgenommen. Also die entscheidende Frage ist jetzt: Läßt sich das wieder einfügen? Und jetzt wird's – wir können das nicht ausdiskutieren – sehr differenziert. Es hängt jetzt sehr genau davon ab, wie dieser Kausalitätsbegriff gefaßt ist. Wenn er zum Beispiel so definiert ist, wie Sie am Anfang zitiert haben und wie es ja häufig in den Lehrbüchern steht, nämlich daß ein naturnotwendiger Zusammenhang zwischen A und B bestehen muß, also beschreibbar durch naturwissenschaftliche Gesetze, dann taucht folgendes

Problem auf: Entweder das, was wir tun, ist genau von dieser Art, also ein Ereignis in der Welt, und da gibt es einen naturwissenschaftlich beschreibbaren Zusammenhang, fertig. Dann ist das, was wir dem Handeln meistens vorausgehen lassen – nämlich Deliberationen, Abwägungen, soll ich dies tun oder jenes tun, das subjektive Gefühl von Freiheit –, möglicherweise nichts anderes (wie manche Neurophysiologen meinen) als eine Ex-post-Rationalisierung. In Wirklichkeit sind diese Prozesse auch schon determiniert und zwar im Sinne von Verlaufsgesetzen, die festlegen, was auf das andere folgt. Das ist die eine Möglichkeit.

Die zweite Möglichkeit ist, daß zwar sehr viel determiniert ist, aber nicht alles determiniert ist, so daß die Deliberation eine kausale Rolle spielt. Das heißt, ob wir diese oder jene Gründe haben, kann relevant sein für das, was tatsächlich dann am Ende von uns entschieden wird. Dann haben wir natürlich ein Problem, ein philosophisches Problem, aber das schließt nicht aus, daß wir dann nicht am Ende auch wieder den Kausalitätsbegriff anwenden, wenn wir ihn entsprechend weit verstehen. Nämlich wenn wir sagen, Kausalität ist dann gegeben, wenn irgendein Ereignis plausibel erklärt werden kann – wahrscheinlicher wird, wenn man hinweist auf ein Ereignis zuvor, zum Beispiel das Ereignis, daß ich das und das erfahren habe, die und die Deliberation vollzogen habe oder so. Man kann den Kausalitätsbegriff so fassen, daß er mit dieser radikalen Vorstellung von Freiheit nicht in Konflikt gerät.

Christoph Markschies: Ich wollte zunächst anknüpfen an das, was Herr Bredekamp und Herr Großmann gesagt haben. Ich finde die Beschreibung des Kausalitätsbegriffs als eines "Begriffs aus der platonischen Höhle" vorzüglich. Er ist in der Tat ein reduzierter "Schattenbegriff", der die Wirklichkeit außerordentlich stark reduziert, positiver formuliert: die Komplexität der Wirklichkeit reduziert. Eben das aber macht seine Brauchbarkeit aus, deswegen kann er im Alltag und in verschiedenen wissenschaftlichen Zusammenhängen verwendet werden, in letzteren Zusammenhängen vor allem als heuristischer Begriff. Ein Beispiel dafür aus meiner alltäglichen Arbeit: Ich kann als Historiker versuchen, die Erklärung historischer Zusammenhänge nicht als tausendfaches Zwar-aber anzulegen, sondern die eigentlich bestimmenden Faktoren zu suchen, die zu einem bestimmten Ereignis der Vergangenheit geführt haben. Wenn ich so frage, reduziere ich die Komplexität der Wirklichkeit, aber verhindere auch, daß eine völlig unübersichtliche Darstellung der Vergangenheit entsteht. Mit anderen Worten: Wenn ich die heuristische Frage nach der Kausalität eines historischen Ereignisses stelle, obwohl ich weiß, daß ich so die komplexe Wirklichkeit reduziere, kann ich im Ergebnis eine spannende Geschichtserzählung schrei-

ben, in der Menschen nachvollziehen können, warum ich so erzähle, wie ich erzähle. Das ist die eine Seite.

Die andere Seite ist: Natürlich ist – das haben wir ja in unserer Diskussion über Modelle gesehen – die Reduktion von Komplexität in der Wissenschaft ein problematisches Verfahren; sind wir doch in gewisser Weise Anwälte der Komplexität gegen die unwissenschaftliche Vereinfachung. Wenn ein Begriff wie der der Kausalität gar zu einem Idol gemacht wird (Bredekamp), dann ist das allzumal in den Geschichtswissenschaften eigentlich ganz fürchterlich. Dieser Zusammenhang hat aber gewisse Konsequenzen für eine Antwort auf die Frage, ob wir einen engen oder weiten Kausalitätsbegriff verwenden sollten. Man muß, so denke ich, aufpassen, daß man den Kausalitätsbegriff nicht so weit definiert, daß er den beschriebenen anstößigen Charakter verliert. Wenn wir ihn so weit anlegen, daß er bruchlos mit jeder Konzeption von "Freiheit" zusammenpaßt, dann reduziert er keine Komplexität von Wirklichkeit mehr, weil er auch praktisch nichts mehr erklärt. Heuristische Funktion hat er nur, wenn er im beschriebenen Sinne reduziert.

Ein letzter Punkt: Ich mußte bei dem, was Herr Lucas sagte, an mein morgendliches Rasieren denken. Natürlich gibt es sehr viele Faktoren, die kausal dafür verantwortlich sind, daß der Rasierer funktioniert, obwohl sie mir nicht bewußt sind und wahrscheinlich auch nie zu Bewußtsein kommen werden. Möglicherweise auch irgendwelche plötzlichen elekrostatischen Aufladungen und der spontane Zusammenbruch von bestimmten physikalischen Gesetzen – das weiß ich natürlich nicht, aber dieses mein Nichtwissen ist für den Kausalitätsbegriff und ein Konzept von Kausalität nicht unerheblich oder trivial. Nichtwissen ist eines der vermeidbaren Gründe für die Reduktion von Komplexität und sollte mich dazu anhalten, bei meinen eigenen Rekonstruktionen von Kausalitäten immer auch andere Wissenschaftsbereiche in den Blick zu nehmen und Experten für diese zu fragen.

Abschließend noch einmal: Wir brauchen einerseits einen relativ engen Begriff von Kausalität, damit diese ihre heuristische, alltagsorientierende und wissenschaftspraktische Funktion behalten kann, müssen uns andererseits aber immer – wie Bredekamp richtig sagt – ihres Charakters als Idol bewußt sein.

Randolf Menzel: Mir ist beim Nachdenken über die drei Beschreibungsweisen des Kausalitätsbegriffs, wie sie Herr Renn vorgetragen hat, ein Zusammenhang aufgefallen, der vielleicht schrecklich trivial ist, aber möglicherweise eine tiefere Bedeutung haben könnte. Die erste Beschreibungsweise in Herrn Renn's Begriffsbestimmungen, die des naiven Nativismus, erfaßt möglicherweise die neuronalen Vorgänge, von denen Herr Scheich gesprochen hat: Das Nervensystem schließt aus dem zeitlichen Ablauf der Ereignisse auf

Ursache-Wirkungszusammenhänge, verknüpft also Zeitabfolgen auf Grund eines evolutiven biologischen Hintergrunds so, daß daraus auf kausale Zusammenhänge geschlossen werden könnte. Daraus erwachsen dann Hypothesen hinsichtlich der Zusammenhänge von Ereignissen in der äußeren Welt, und das Nervensystem probiert diese Hypothesen aus, indem es sie anwendet. Dieser nächste Schritt im Umgang des Nervensystems mit den Umweltereignissen spiegelt das wider, was Sie als die kulturelle Konvention des Kausalitätsbegriffs dargestellt haben: das Nervensystem macht Prädiktionen auf der Basis seiner Hypothesen und steuert damit die Körperaktionen. Damit werden die Annahmen von kausalen Verknüpfungen überprüft, von denen sich manche als zutreffend, andere als falsch herausstellen, Vorgänge, die wir deklarativ und bewußtwerdend beschreiben (und das meint ja die Beschreibungsform "kulturelle Konvention des Kausalbegriffs"), die aber natürlich im Nervensystem weit unterhalb dieser Ebenen ablaufen. Ein dritter Schritt erfaßt das, was Sie mit dem technischen Kausalbegriff beschrieben haben: Hier wird durch Intervention die Welt manipuliert, etwas, was die Tiere und der Mensch in allen ihren Phasen des Umgangs mit der Umwelt ständig tun, meist ohne daß ihnen das bewußt wird. Was ich damit andeuten möchte, ist, daß möglicherweise hinter den drei Betrachtungsweisen des Kausalitätsbegriffs sich mehr als ein Versuch zur definitorischen Erfassung dieses Beariffs verbirat, nämlich die stufenweise Strategie des Nervensystems mit der Regelhaftigkeit der Umwelt umzugehen.

Ortwin Renn: Ich finde die letzten Beiträge ausgesprochen anregend. Ich kann in der Kürze der Zeit nur einige Punkte aufgreifen. Erste Anregung: Sollte man den Begriff der Kausalität ganz aus unserem Sprachgebrauch verbannen? Ich würde diesem Vorschlag zustimmen, sofern man Kausalität gleichsetzt mit Determinismus. Aber genau das ist nicht zwingend.

Kausalität beschreibt im Prinzip eine Einflußnahme eines Phänomens A auf ein Phänomen B im Sinne eines Kontinuums von vollständiger Determinanz bis vollständiger Unabhängigkeit. Die Einflußnahme bedeutet auf einem Pol des Kontinuums, daß A in der Tat B determiniert. Auf der anderen Seite haben wir den Pol der vollständigen Unabhängigkeit, wo Gleichzeitigkeit oder sequentielle Zuordnung als Zufälle erscheinen. Wir können nur erkennen, daß A und B nebeneinender existieren.

Von besonderem wissenschaftlichem Interesse sind die Phänomene, die zwischen beiden Extremen liegen; das heißt, wo wir eine Kombination von Zufallsschwankungen und erkennbaren Regelmäßigkeiten vorfinden. Beide Aspekte zu erkennen, voneinander zu trennen und vailde zu interpretieren, ist in der Tat eine kulturelle Selektionsleistung. Das

beste Beispie dafür ist die Risikoforschung, in die ich besonders eingebunden bin. In der Frühzeit der Risikoforschung hat man die Risiken herausgesucht, die man besonders gut berechnen konnte. Das heißt, der Selektionsmechanismus war darauf hin ausgerichtet, die Phänomene zu betrachten, bei denen wir viele Regelmäßigkeiten erkennen können und Zufallsschwankungen eine geringe Rolle spielen. Inzwischen haben wir gelernt, daß diejenigen Phänomene, bei denen Zufallsschwankungen eine große Rolle spielen, viel interessanter und für die Bewältigung von Problemen viel zielführender sind als die aut kalkulierbaren Risiken. Das gilt für physische ebenso wie für ökonomische oder soziale Risiken. Aber es muß ein bestimmter Grad an Regelmäßigkeit zu beobachten sein, ansonsten ist nämlich unsere Aussagekraft der postulierten Zusammenhänge zu gering, um handlungsrelevant werden zu können. Kurzum: Wenn man Kausalität als Einflußnahme von A auf B ansieht, ohne dabei der Fiktion anzuhängen, der Einfluß müsse deterministisch sein, dann kann man aus meiner Sicht den Begriff der Kausalität retten. Aber er ist dann eben – wie Herr Nida-Rümelin angemerkt hat- nicht mehr mit der Annahme oder sogar Zumutung verbunden, die Welt und damit auch unser Leben und Denken seien determiniert.

Der zweite Aspekt betrifft die Erklärung von menschlichen Verhaltensweisen, bei denen ja Herr Klein eine andere Form von kausaler Einflußnahme postuliert hat. Da ich aus den Sozialwissenschaften komme, ist mir natürlich bewußt, daß wir hier den – von mir im Referat nur angeschnittenen – Gebrauch des Wortes "Kausalität" im Sinne von Intension oder Motivation vor uns haben. Um Motive und Zwecke einer Handlung zu erkennen, benötige ich in der Regel Empathie, also das Vermögen, mich in den anderen hineinversetzen zu können. Den subjektiven Sinn verstehen, ist seit Max Weber einer der vordringlichen Aufgaben der Sozialwissenschaften. Verstehen ist auch ein wichtiges Element einer Erklärung. Ich sehe dieses Nachspüren von Sinn aber nicht als Gegensatz zur Kausalität. Auch die Sozialwissenschaften bedienen sich analytischer Methoden, um über das Verstehen, Deuten und Zuordnen typische Verhaltensmuster in Beziehung zu setzen. Dabei sind die dann beobachteten Gesetzmäßigkeiten weniger übertragbar auf andere Situationen als in den meisten Naturwissenschaften, aber ihr idiosynkratischer Charakter ist nicht gleichzusetzen mit geringer Erklärungskraft. Im Gegenteil: die Handlung eines Individuums kann oft mit großer Präzision erklärt und oft vorhergesagt werden, auch wenn dieser Zusammenhang nicht auf andere Individuen zu übertragen ist. Insofern würde ich gerne an einer Einheitlichkeit des analytischen Denkens in der Wissenschaft insgesamt festhalten wollen. Aber es sind oft unterschiedliche methodische Zugänge und Interpretationsspielräume.

Letzter Punkt: Ist es sinnvoll, die drei Konzepte der Kausalität getrennt gegenüberzustellen, als ob sie miteinander inkompatibel seien? Dies hat ja Herr Nida-Rümelin bezweifelt. Meiner Erachtens gibt es Grabenkämpfe zwischen den Vertretern dieser drei Konzepte, die auch öffentlich ausgetragen werden. Aber wenn man diese drei Konzepte als eine mentale Vorwegannahme einer existierenden Kausalstruktur betrachtet und man darüber hinaus den Versuch unternimmt, die Elemente dieser Struktur zu erfassen, zu selektieren und sie dann zu überprüfen, um daraus wieder Rückschlüsse zu ziehen, dann sind alle drei Konzepte relativ ähnlich. Allerdings scheiden sie sich an dem Schritt der Überprüfung: Wenn ich von einem stark konstruktivistischen Ansatz ausgehe, dann heißt überprüfen letztendlich, daß ich ein kulturalistisch definiertes System mit einem anderen in Beziehung setze. Prüfmaßstab ist die Kompatibilität von Aussagesystemen untereinander und nicht die Übereinstimmung mit einer wie auch immer definierten Realität. Mit einem solchem Ansatz kann ich mich nicht einverstanden erklären. Ich bin der festen Überzeugung: Es aibt Interaktionen zwischen der Nichtwahrnehmungswelt und der Wahrnehmungswelt, die auch so etwas wie (vorläufige) Verifizierung ermöglichen. Beweisen kann ich diese Überzeugung nicht und niemand anders wahrscheinlich auch nicht, aber irgendwo ist unsere Lebenswirklichkeit in die Richtung einer Erkenntnismöglichkeit der Welt um uns herum geprägt, und deshalb würde ich an diesem Anspruch an Wissen und Wissenschaft festhalten.

Frank Rösler: Herr Bredekamp, Sie hatten ja nachgefragt, ob man den Begriff der Kausalität nicht eigentlich aufgeben sollte, weil er zu unscharf ist. Herr Großmann hat auch danach gefragt, wo das Gemeinsame denn eigentlich liegt. Wenn ich das jetzt Revue passieren lasse, auch die Vorträge vom letzten Mal, dann tritt doch ein gemeinsamer Punkt hervor, nämlich, daß bestimmte raum-zeitliche Muster gegeben sein müssen, wenn jemand über Kausalität spricht.

Das gilt in der Strafgesetzgebung, das gilt in der Psychologie – man denke an die Beispiele, die Herr Kliegl gegeben hat –, das gilt in der Physik, nur ist der zeitliche Auflösungsgrad in all diesen Bereichen sehr, sehr unterschiedlich. In der Jurisprudenz mögen es Jahre sein, in der Physik nur wenige Millisekunden, die uns eine raum-zeitlich Kontingenz zwischen zwei Ereignissen als "kausal" erscheinen lassen. Das gemeinsame wäre – man müßte wohl da ansetzen, wo Herr Menzel und Herr Scheich angesetzt haben –, ob es nicht bestimmte Randbedingungen unseres Nervensystems sind, aus denen sich dann natürlich die gesamte Psychologie unserer Wahrnehmung ableitet, die uns dazu bringen, bestimmte raum-zeitliche Bedingungen als kausal zu interpretieren. Herr Kliegl hat sehr schöne Beispiele aus Experimenten gebracht, die aufzeigen, wie beeinflußbar unserer

Wahrnehmung ist, und daß wir sogar manchmal noch rückwirkend in unserer Wahrnehmung die raumzeitlichen Gegebenheiten umkehren. Die Interpretation der raum-zeitlichen Kontiguität bezieht sich in den verschiedenen Disziplinen auf ganz unterschiedliche Variablen und Analyseebenen.

Aber trotz dieser Unterschiede in den betrachteten Variablen machen wir solche Zuschreibungen raum-zeitlicher Zusammenhänge in gleicher Weise. Das scheint eine wesentliche Eigenschaft der Funktionsweise unseres Nervensystems zu sein. Herr Scheich hat darauf hingewiesen, daß bestimmte Kopplungen überwahrscheinlich gegeben sind. Wenn-dann-Beziehungen sind bereits im Nervensystem angelegt, wenn es etwa um ganz elementare Konditionierungsphänomene geht. Rückwärts-Konditionierung gibt es eigentlich gar nicht. Es gibt nur eine Vorwärtskonditionierung im Sinne einer möglichen Prädiktion, wie Herr Menzel das bereits angesprochen hat. Das ist aus Sicht der Biologie auch sehr einleuchtend. Alles andere macht wenig Sinn. Ein Organismus muß Vorhersagen treffen können, was als nächstes passieren wird. Und da ist Kausalität ein sehr, sehr nützliches Konstrukt. Vorhersagen sind zwar in den Wirtschaftswissenschaften von ganz anderer Qualität als in der Atomphysik – wenn sie da denn überhaupt möglich sind –, aber in allen Fällen beruhen sie auf dem gleichen Prinzip: man macht kausale Zuschreibungen, wenn raum-zeitliche Kontiguitäten und Kontingenzen überzufällig gegeben sind.

Wir müssen mehr darüber nachdenken und mehr erforschen, welches eigentlich die Voraussetzungen unseres kognitiven oder auch zentralnervösen Apparates sind, um zu verstehen, was wir mit Kausalität bezeichnen.

Mitchell Ash: Nur ganz kurz, als Reaktion auf Herrn Bredekamp, zum Teil aber auch jetzt daran anknüpfend, was Herr Rösler gerade gesagt hat. Worte wie sicher, gesichertes Wissen, Schärfe, Unschärfe geistern durch diese Diskussion und manchmal drohen – so mein Eindruck – die ontologische und die methodologische Begriffsebene sich miteinander zu vermischen. Und das ist sehr problematisch, das wurde schon ein paar Mal gesagt. Ich bin dafür, sie wirklich auseinander zu halten, und weise auf eine Aussage von Ernst Mach in diesem Zusammenhang hin, der vor hundert Jahren schon festgehalten hat, daß die Spezifizierung der Reichweite einer Aussage geradezu ihre Sicherheit erhöht und nicht reduziert – methodologisch gesehen. Diese Aussage hat er für die Physik getroffen und nicht für irgend eine andere Wissenschaft. Wenn wir darüber nachdenken, dann könnten wir uns ein bißchen davor schützen, von solchen Begriffen wie dem der Kausalität zuviel zu erwarten.

Wilhelm Voßkamp: Je länger die Diskussion über den Begriff der Kausalität im Bereich unserer Wissenschaften dauert, desto mehr ist man geneigt, den Blick einmal von der Wissenschaft weg zu lenken auf die Kunst, speziell auf die literarische Erzählung. Es ist auffallend, daß man seit dem 18. Jahrhundert auch mittels Erzählen im Roman versucht, Kausalität herzustellen. Reinhart Koselleck hat dies die "Rationalisierung des Zufalls" genannt. Im 18. Jahrhundert ist dies vor allem eine Diskussion über das notwendig "Pragmatische" im Roman und in der Geschichtsschreibung (Kausalität und Finalität). Und dann stellt sich relativ schnell heraus, vorzugsweise in der Goethe-Zeit und in der Romantik, daß kausales Erzählen zur Herstellung von Ordnung in einer begrenzten Zeit, die literarisch erzählt wird, langweilig werden kann.

Dies erinnert mich an das, was Herr Markl sehr früh in der Diskussion sagte und an Hand des Aphorismus über den Erkenntnisgewinn von Fehlern erläuterte. Das Bemerkenswerte ist, daß es zwar immer noch eine Erwartungshaltung gegenüber dem Kausalen gibt – und das ist durchgehend bis heute so im Blick auf das Erzählen, gerade im Kriminalroman –, daß das eigentlich Interessante des Erzählens aber im Überraschenden liegt, also im Durchbrechen von Kausalität, also auch im Darstellen von Fehlern und Irrtümern. Insofern liefert der Roman schöne Beispiele, um wissenschaftliche Kausalität mit der Herstellung von künstlerischer Kausalität zu vergleichen. Man würde sehr schnell feststellen, wo die Grenzen des Kausalitätskonzeptes liegen, nicht nur im Blick auf ihre Erklärungskraft, sondern auch im Blick auf das Spannungsreiche oder das bloß "Langweilige".

Carl Friedrich Gethmann: Ich möchte auf den Hinweis von Herrn Markl auf die evolutionäre Erkenntnistheorie eingehen. Ich glaube, daß die evolutionäre Erkenntnistheorie alternativlos ist, wenn es um die Frage geht, wie man sich erklärt, daß der kognitive Apparat des Homo sapiens gerade so ist, wie er ist. Nämlich in diesem Falle: wieso er über die Kategorie der Kausalität verfügt. Gäbe es eine Spezies oder hätte es in naturhistorischer Frühzeit eine solche gegeben, die ceteris paribus unsere ist, aber gerade über den Begriff der Kausalität nicht verfügte —ein homo sapiens insapiens —, hätte er erhebliche Wettbewerbsnachteile uns gegenüber gehabt und wäre wohl untergegangen. Das ist eine gute Erklärung, und ich kenne keine bessere. Aber so wie der Mensch jetzt einmal da ist, indem er über die Kategorie der Kausalität verfügt, kann er trotzdem noch richtige oder falsche Kausalurteile fällen. Vor dem Irrtum hat ihn die Evolution also nicht geschützt. Irren kann sich der Mensch auf zwei Ebenen Einmal kann die Kategorie uneinschlägig sein, denn nicht jede zwei Ereignisse müssen kausal verknüpft sein, — ich werde gleich noch ein Beispiel in Bezug auf die Weil-Sätze bringen.

Zum zweiten kann die Kategorie einschlägig sein, aber es kann zu Fehlverknüpfungen kommen nach dem Muster der Storchen- und der Menschenkinder. Solche Fehlkorrelationen oder Fehlinterpretationen gibt es ja nun zuhauf. In Bezug auf die Frage nach den evaluativen Kriterien, die uns berechtigen, eine kausale Behauptung als wahr oder falsch einzustufen, gibt uns die evolutionäre Erkenntnistheorie keine Hinweise. Wenn ich das jetzt auf die Ontogenese herunterbreche und auf den neuronalen Apparat des Individuums schaue, wiederholt sich diese Struktur des Problems. Ich bin überzeugt, daß uns die neurowissenschaftlichen Erklärungen in Bezug auf das Phänomen "Kausalität" sagen, wieso es die Kausalität beim Individuum gibt. Aber unter welchen Bedingungen ich denn Kausalurteile ausspreche und damit recht habe, und unter welchen Bedingungen nicht, das beschäftigt ja einen großen Teil naturwissenschaftlicher Erkenntnispraxis. Auch diese Fehlurteile sind ja im neuronalen Apparat angelegt. Es hätte ja auch sein können, daß durch die Evolution ein infallibles Wesen zustande gekommen wäre, durch was auch immer, dann hätten wir das Problem des Irrtums nicht.

Was die weil-Sätze anbetrifft, Herr Klein, so sind sie ja nur manchmal gute Indizien dafür, daß wir Kausalurteile fällen, und in der Wissenschaftstheorie haben wir ja alle Mühe,
erst einmal die weil-Sätze, die nicht auf Kausalität hinauswollen, auszuschließen. Zum
Beispiel sagen wir bei analytisch wahren Sätzen auch "weil". Das Kind fragt die Oma:
Warum haben Junggesellen keine Ehefrauen? Und die Oma sagt: Weil sie unverheiratet
sind. Da sagen wir als Wissenschaftstheoretiker: Das ist keine gute Antwort. In der Mathematik wird im Falle von Gleichungen – da haben wir es immer mit analytische Wahrheiten
zu tun – "weil" gesagt, und das sind sicher keine kausalen Erklärungen. Solche analytischen Einstiege aus der umgangssprachlichen Praxis sind häufig sehr unzuverlässig, wie
das Beispiel der Verwendung von "weil"-Verknüpfungen zeigt.

Joachim Sauer: Ich wollte uns noch einmal vor Augen halten, wie wir von den Gesetzen der Physik mit bekannten Wirkprinzipien zu Unschärfen beim Ablauf chemischer Experimente oder zu Überraschungen in technischen Abläufen kommen. Daraus können wir vielleicht etwas lernen, wie wir Kausalität verstehen sollten. Zunächst ist wichtig, daß zwar mechanische Gesetze auch für derart komplexe Systeme gelten, daß wir aber wissen, daß diese Systeme aus einer großen Zahl von Objekten atomarer Dimension bestehen und deshalb die Gesetze der Statistik und der Quantenmechanik zu beachten sind. Ich kann dann allerdings eine Mittelung über die Objekte und deren Quantenzustände durchführen und diese zum Beispiel durch eine Dichtematrix darstellen, deren zeitliche Entwicklung ich wieder durch Gleichungen beschreiben kann. Auch für die zeitliche Entwicklung auf

makroskopischer Ebene kann ich Gleichungen angeben, das Ergebnis hängt aber vom (unscharfen) Anfangszustand ab. Ist der zeitliche Ablauf nichtlinear, können wir zu Punkten gelangen, an denen ganz kleine Störungen Riesenwirkungen haben, was die Voraussagbarkeit begrenzt, aber nicht die Kausalität eliminiert.

Ein drittes, ganz wesentliches Element ist die Separierbarkeit von Systemen. Diese Gleichung wenden wir immer auf Teilsysteme an, die notwendig vom Rest der Welt entkoppelt sind. Solange ich wesentliche Wechselwirkungen von unwesentlichen unterscheiden und benutzen kann, um diese Teilsysteme zu definieren, kann ich in ziemlich zuverlässige Vorraussagen treffen. Wenn aber Wechselwirkungen mit der Umgebung, die normalerweise ganz klein und deshalb in meinem Modell nicht enthalten sind, groß werden, dann kann es zu überraschenden Ereignissen kommen, die Ingenieure gern vermeiden wollen. Alle drei Aspekte sind essentiell. Es ist weder möglich, ein Teilsystem vollständig zu isolieren, noch ist es möglich, die Statistik der großen Teilchenzahl oder die quantenmechanische Unbestimmtheit zu eliminieren. Aber sie sind der Beschreibung zugänglich und gehören zur Kausalität.

Henning Scheich: Herr Gethmann hat vorhin ein bißchen bezweifelt, daß das Nervensystem oder das, was wir vom Nervensystem wissen, intelligent genug ist, um mit dem Kausalbegriff umzugehen oder mit den Konstrukten, die sich daran knüpfen. Im Hinblick auf die globale Frage der Kausalität als Konzept für uns, für die Menschheit, hat er ja selbst die Antwort gegeben. Die Menschheit wäre ohne Hirnmechanismen, die Kausalitätsverständnis ermöglichen, schon ausgestorben. Also evolutiv hat es auf jeden Fall funktioniert, dies als ein vernünftiges Prinzip im Nervensystem zu etablieren und auszubauen. Weil alle, die nicht daran geglaubt haben, in der Konkurrenz eben ausgestorben sind.

Zweitens: Hinsichtlich der individuellen Evidenz dieses Kausalkonzeptes oder der individuellen Erprobung dieses begrifflichen Konzeptes muß man natürlich erkennen, daß wir hier von kindlichen Lernprozessen ausgehen können. Also ist auch die Ontogenese und nicht nur die Evolution ins Spiel zu bringen. Kinder probieren ständig alles Mögliche zur Erreichung von Zielen und machen dabei zunächst viele Fehler, aus denen sie blitzschnell lernen. Fehlervermeidung gehört zu den schnellsten und dauerhaftesten Lernprozessen überhaupt, insbesondere wenn sofort unangenehme Konsequenzen auf Handlungen folgen. Insofern tragen nicht nur Handlungserfolge, sondern insbesondere Fehler zur Etablierung eines solchen Gerüsts von intuitivem Kausalverständnis in der Ontogenese bei.

Zum Dritten: Das Nervensystem ist möglicherweise viel intelligenter als wir glauben, aber in jedem Fall intelligenter als Herr Gethmann dies dargestellt hat. Denn wir wissen inzwischen aus einer ganz neuen Richtung von Hirnforschung – Herr Menzel hat es schon aufgeführt – der Prädiktionsforschung bei Affen, dass es Mechanismen gibt, die Voraussagen machen aufgrund von angenommen Kausalitäten. Das Interessante ist, dass diese Hirnmechanismen mit probabilistischen Zusammenhängen umgehen können. Das heißt, sie können durch Lernen ziemlich genaue Einschätzungen machen, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Zielhandlung einen Erfolg hat. Daß probabilistische Systeme durchaus kausal sein können, wie wir heute diskutiert haben, ist also unmittelbar im Gehirn reflektiert. Daß bestimmte und nicht andere Ereignisfolgen möglich sind, auch wenn sie nicht immer auftreten, wird neuronal genutzt.

Hubert Markl: Ich weiß nicht, ob ich nicht das, was Herr Scheich eben sagte, nur noch einmal mit anderen Worten sage. Ich habe mich von Herrn Gethmann an der Stelle etwas provoziert gefühlt, wo er zwar zugestand, daß uns das Konzept der Kausalität – evolutionär – über unser Denksystem mitgegeben ist, aber daß es aber eben nichts leistet bzw. daß die evolutionäre Erkenntnistheorie nichts leistet in der wahr/falsch-Unterscheidung im Einzelfall.

Ich glaube, das ist insofern zu kurz gedacht, als eben diese Offenheit, gerade aus Fehlern zu lernen, also erst aus der Erfahrung heraus zu entscheiden, was zutrifft oder nicht zutrifft, den ganzen Wert der evolutionären Erkenntnisgewinnung ausmacht. Das heißt, wenn wir sagen würden, so weit reicht sie, aber das andere muß durch andere Prinzipien erklärt werden, würden wir unterschätzen, wie sehr die Optimierung eigentlich gerade durch das Zulassen von Fehlern erfolgt – so wie in der genetischen Evolution erst Fehler – dort Mutationen genannt – die Optimierung der Gene auf Fitness ermöglichen. Herr Scheich hat das gerade schon erklärt. Es gab – Jahrzehnte ist das her – eine sehr interessante Publikation, wohl eine der letzten Veröffentlichung des berühmter Behavioristen und Harvard-Psychologen Burrhus Frederik Skinner, die unter dem (ungefähren) Titel "Learning by Consequences" in Science veröffentlicht wurde und in der er die evolutionären Aspekte des Phänomens mit den ontogenetischen Lern-Aspekten zusammenbetrachtete – wie lange vor ihm eben schon Konrad Lorenz. Er hat darin sehr deutlich gemacht, daß die große Leistung eigentlich darin besteht, daß erst die Offenheit für das Erproben verschiedener Hypothesen tatsächlich eine Fixierung des Zutreffenden – also der Kausalerfahrung – erlaubt. Konrad Lorenz hat das übrigens ganz unnachahmlich ausgedrückt, indem er feststellte, daß ein Affe, der beim Sprung von Baum zu Baum die Schwerkraft nicht berücksichtigte, nicht zu unseren Vorfahren gehörte.

Reinhold Kliegl: Sehr geehrte Damen und Herren, liebe Kolleginnen und Kolleginnen, das war fast ein Schlußwort, ich bedanke mich ganz herzlich bei Ihnen für die Diskussion.



Ash, Mitchell, Prof. Dr., geb. 1948; Ordentlicher Professor für Geschichte der Neuzeit; Hauptfachrichtung: Wissenschaftsgeschichte; dienstlich: Universität Wien, Institut für Geschichte, Dr. Karl-Lueger-Ring 1, 1010 Wien, Austria, Tel.: 00 43/1/4 27 74 08 37, Fax: 00 43/1/42 77 94 08, e-mail: mitchell.ash@univie.ac.at

Bredekamp, Horst, Prof. Dr., geb. 1947; Professor für Kunstgeschichte an der HU Berlin und Permanent Fellow am Wissenschaftskolleg zu Berlin; Hauptfachrichtung: Kunstgeschichte als historische Bildwissenschaft; dienstlich: Humboldt-Universität zu Berlin, Philosophische Fakultät III, Kunstgeschichtliches Seminar, Dorotheenstraße 28, 10117 Berlin, Tel.: 0 30/20 93 44 98, Fax: 0 30/20 93 42 09, e-mail: horst.bredekamp@culture.hu-berlin.de

Fritzsch, Harald, Prof. Dr. rer. nat., geb. 1943; Ordinarius für Theoretische Physik; Hauptfachrichtung: Theoretische Teilchenphysik; dienstlich: Ludwig-Maximilians-Universität München, Sektion Physik, Theresienstraße 37/III, 80333 München, Tel.: 0 89/21 80 45 50, Fax: 0 89/21 80 40 31, e-mail: fritzsch@mppmu.mpg.de

Gethmann, Carl Friedrich, Prof. Dr., geb. 1944; Professor für Philosophie an der Universität Duisburg-Essen und Direktor der Europäischen Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH; Hauptfachrichtung: Philosophie; dienstlich: Universität Duisburg-Essen, FB 1 – Institut für Philosophie, Universitätsstraße 12, 45117 Essen, Tel.: 02 01/1 83 34 86, Fax: 02 01/1 83 34 85, e-mail: gethmann@uni-essen.de, Europäische Akademie Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH, Wilhelmstraße 56, 53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler, Tel.: 0 26 41/97 33 00, Fax: 0 26 41/97 33 20, e-mail: europaeische.akademie@dlr.de

Großmann, Siegfried, Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c., geb. 1930; Universitätsprofessor emeritus für Theoretische Physik; Hauptfachrichtung: Statistische Physik, Nichtlineare Dynamik komplexer Systeme, Turbulenz; dienstlich: Philipps-Universität Marburg, FB Physik, Renthof 6, 35032 Marburg, Tel.: 0 64 21/2 82 20 49, Fax: 0 64 21/2 82 41 10, e-mail: grossmann@physik.uni-marburg.de

Hasinger, Günther Gustav, Prof. Dr., geb. 1954; Geschäftsführender Direktor am MPI für extraterrestrische Physik, Garching; Hauptfachrichtung: Astrophysik; dienstlich: Max-

Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Gießenbachstraße, 85748 Garching, Tel.: 0 89/3 00 00 34 01, Fax: 0 89/3 00 00 34 04, e-mail: ghasinger@mpe.mpg.de

Hellwig, Martin, Prof. Dr., PhD, Dr. rer. pol. h. c. mult., geb. 1949; Direktor am MPI zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern; Hauptfachrichtung: Wirtschaftstheorie; dienstlich: Max-Planck-Institut zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern, Kurt-Schumacher-Straße 10, 53113 Bonn, Tel.: 02 28/9 14 16 22, Fax: 02 28/9 14 16 21, e-mail: hellwig@coll.mpq.de

Klein, Wolfgang, Prof. Dr., geb. 1946; Direktor am MPI für Psycholinguistik; Hauptfachrichtung: Linguistik; dienstlich: Max-Planck-Institut für Psycholinguistik, Wundtlaan 1, NL-6525 XD Nijmegen, Tel.: 00 31/24/3 52 14 53, Fax: 00 31/24/3 52 12 13, e-mail: klein@mpi.nl

Kliegl, Reinhold, Prof. Dr., geb. 1953; Professor für Psychologie (Schwerpunkt: Kognition); Hauptfachrichtung: Psychologie; dienstlich: Universität Potsdam, Institut für Psychologie, Karl-Liebknecht-Straße 24/25, 14467 Potsdam OT Golm, Tel.: 03 31/9 77 28 68, Fax: 03 31/9 77 27 93, e-mail: kliegl@rz.uni-potsdam.de

Lucas, Klaus, Prof. Dr.-Ing., geb. 1943; Universitätsprofessor; Hauptfachrichtung: Thermodynamik; dienstlich: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, Schinkelstraße 8, 52062 Aachen, Tel.: 02 41/8 09 53 80, Fax: 02 41/8 09 22 55, e-mail: lucas@ltt-rwth-aachen.de

Markl, Hubert, Prof. Dr. Dr. h. c. mult., geb. 1938; Professor i. R.; Hauptfachrichtung: Biologie; dienstlich: Universität Konstanz, FB Biologie, Universitätsstraße 10, Fach M 612, 78457 Konstanz, Tel.: 0 75 31/88 27 25, Fax: 0 75 31/88 43 45, e-mail: hubert. markl@uni-konstanz.de

Markschies, Christoph, Prof. Dr., geb. 1962; Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin und Ordinarius für Ältere Kirchengeschichte; Hauptfachrichtung: Kirchengeschichte; dienstlich: Humboldt-Universität zu Berlin, Unter den Linden 6, 10099 Berlin, Tel.: 0 30/20 93 21 00, Fax: 0 30/20 93 27 29, e-mail: praesident@uv.hu-berlin.de und Humboldt-Universität zu Berlin, Theologische Fakultät, Lehrstuhl für Ältere Kirchengeschichte, Hausvogteiplatz 5–7, 10117 Berlin, Tel.: 0 30/20 93 47 35, Fax: 0 30/20 93 47 36, e-mail: christoph.markschies@rz.hu-berlin.de

Menzel, Randolf, Prof. Dr. rer. nat., geb. 1940; Professor für Neurobiologie, Leiter des Instituts für Neurobiologie; Hauptfachrichtung: Zoologie, Neurobiologie, Verhaltensbiologie; dienstlich: Freie Universität Berlin, FB Biologie, Chemie, Pharmazie, Institut für Biologie – Neurobiologie, Königin-Luise-Straße 28–30, 14195 Berlin, Tel.: 0 30/83 85 39 30, Fax: 0 30/83 85 54 55, e-mail: menzel@zedat.fu-berlin.de

Mittelstraß, Jürgen, Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. E. h., geb. 1936; Ordinarius der Philosophie (1970–2005), Direktor des Zentrums Philosophie und Wissenschaftstheorie, Präsident der Academia Europaea, der Europäischen Akademie der Wissenschaften (mit Sitz in London) und Vorsitzender des Österreichischen Wissenschaftsrates; Hauptfachrichtung: Philosophie; dienstlich: Universität Konstanz, Zentrum Philosophie und Wissenschaftstheorie, 78457 Konstanz, Tel.: 0 75 31/88 24 98/-25 11, Fax: 0 75 31/88 25 02, e-mail: juergen.mittelstrass@uni-konstanz.de

Nida-Rümelin, Julian, Prof. Dr. phil., geb. 1954; Universitätsprofessor für Politische Theorie und Philosophie; Hauptfachrichtung: Philosophie; dienstlich: Ludwig-Maximilians-Universität München, Lehrstuhl für Politische Theorie und Philosophie, Oettingenstraße 67, 80538 München, Tel.: 0 89/21 80 90 20, Fax: 0 89/21 80 90 22, e-mail: sekretariat. nida-ruemelin@lrz.uni-muenchen.de

Osterhammel, Jürgen, Prof. Dr. phil., geb. 1952; ordentlicher Professor für Neuere Geschichte (Schwerpunkt 19. und 20. Jahrhundert); Hauptfachrichtung: Neuere und neueste Geschichte; dienstlich: Universität Konstanz, FB Geschichte und Soziologie, Neuere und Neueste Geschichte, 78459 Konstanz, Tel.: 0 75 31/88 37 45, Fax: 0 75 31/88 21 34, e-mail: juergen.osterhammel@uni-konstanz.de

Renn, Ortwin, Prof. Dr. rer. pol., geb. 1951; Ordinarius für Technik- und Umweltsoziologe an der Universität Stuttgart, Direktor des Interdisziplinären Forschungsschwerpunktes Risiko und Nachhaltige Technikentwicklung am Internationalen Zentrum für Kultur- und Technikforschung (ZIRN) und Geschäftsführer des gemeinnützigen Forschungsinstituts "DIALOGIK gGmbH"; Hauptfachrichtung: Risiko- und Umweltsoziologie, Technikfolgenabschätzung; dienstlich: Universität Stuttgart, Institut für Sozialwissenschaften V, Seidenstraße 36, 70174 Stuttgart, Tel.: 07 11/68 58 39 70, e-mail: ortwin.renn@soz.unistuttgart.de

Rösler, Frank, Prof. Dr., geb. 1945; Professor für Allgemeine und Biologische Psychologie; Hauptfachrichtung: Psychologie; dienstlich: Philipps-Universität Marburg, FB Psychologie, Gutenbergstraße 18, 35037 Marburg, Tel.: 0 64 21/2 82 36 67/-55 37, Fax: 0 64 21/2 82 89 48, e-mail: roesler@mailer.uni-marburg.de

Sauer, Joachim, Prof. Dr., geb. 1949; Professor für Physikalische und Theoretische Chemie; Hauptfachrichtung: Theoretische Chemie; dienstlich: Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät I, Institut für Chemie, Unter den Linden 6, 10099 Berlin, Tel.: 0 30/20 93 71 35/-4, Fax: 0 30/20 93 71 36, e-mail: sek.qc@chemie.hu-berlin.de

Scheich, Henning, Prof. Dr., geb. 1942; Direktor des Leibniz-Instituts für Neurobiologie; Hauptfachrichtung: Hirnforschung; dienstlich: Leibniz-Institut für Neurobiologie, Zentrum für Lern- und Gedächtnisforschung, Brenneckestraße 6, 39118 Magdeburg, Tel.: 03 91/6 26 32 19, Fax: 03 91/61 61 60, e-mail: scheich@ifn-magdeburg.de

Voßkamp, Wilhelm, Prof. Dr., geb. 1936; ordentlicher Professor für Neuere deutsche Literatur und Allgemeine Literaturwissenschaft; Hauptfachrichtung: Literaturwissenschaft, Neuere deutsche Philologie; dienstlich: Universität zu Köln, Kulturwissenschaftliches Forschungskolleg Medien und kulturelle Kommunikation, Bernhard-Feilchenfeldstraße 11, 50969 Köln, Tel.: 02 21/4 70 67 60, Fax: 02 21/4 70 67 73, e-mail: w.vosskamp@uni-koeln.de

Wagner, Rudolf G., Prof. Dr. phil., geb. 1941; Universitätsprofessor für Sinologie; Hauptfachrichtung: Sinologie; dienstlich: Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Sinologisches Seminar, Akademiestraße 4–8, 69117 Heidelberg, Tel.: 0 62 21/54 76 40/-77 65/-74 87, Fax: 0 62 21/54 76 39, e-mail: wagner@gw.sino.uni-heidelberg.de

Windbichler, Christine, Prof. Dr., LL.M. (Berkeley), geb. 1950; Professorin für Handels-, Wirtschafts- und Arbeitsrecht; Hauptfachrichtung: Zivilrecht; dienstlich: Humboldt-Universität zu Berlin, Juristische Fakultät, Unter den Linden 6, 10099 Berlin, Tel.: 0 30/20 93 35 28, Fax: 0 30/20 93 37 33, e-mail: christine.windbichler@rewi.hu-berlin.de

Zeilinger, Anton, Prof. Dr. Dr. h. c., geb. 1945; ordentlicher Professor für Experimentalphysik; Hauptfachrichtung: Experimentalphysik; dienstlich: Universität Wien, Institut für Experimentalphysik, Boltzmanngasse 5, und IQOQI Institut für Quantum Optics and

Quantum Information, Austrian Academy of Sciences, Boltzmanngasse 3, A-1090 Wien, Tel.: 00 43/1/4 27 75 12 01, Fax: 00 43/1/42 77 95 12, e-mail: anton.zeilinger@univie.ac.at