

Kausalität in der Physik

Mathias Frisch

1. Einleitung

Sowohl in unserer Alltagsvorstellung der Welt als auch in den sogenannten Spezialwissenschaften, wie der Biologie oder den Sozialwissenschaften, scheint der Begriff der Ursache eine wichtige Rolle zu spielen. Gibt es aber auch in der Physik, unserer anscheinend fundamentalsten Naturwissenschaft, einen legitimen Platz für kausales Denken? Viele Wissenschaftstheoretiker und Philosophen der Physik der Gegenwart verneinen diese Frage und berufen sich hierbei häufig auf Bertrand Russells berühmte Kritik kausalen Denkens in dessen Aufsatz „On the Notion of Cause“ (Russell 1918). Der englische Philosoph argumentiert dort mit rhetorischer Brillanz, dass der Begriff der Ursache in der modernen Physik durch den der funktionalen Abhängigkeit ersetzt worden sei, und schließt daraus, dass kausale Begriffe allgemein nicht Bestandteil einer wissenschaftlich fundierten philosophischen Weltsicht sein dürften. „Das Kausalgesetz,“ behauptet Russell in einer häufig zitierten Bemerkung, „ist, wie so vieles, das unter Philosophen allgemein akzeptiert wird, ein Relikt aus einer vergangenen Zeit, das, wie auch die Monarchie, nur überlebt, weil irrtümlich von ihm angenommen wird, dass es keinen Schaden anrichte.“ (Russell 1918, ???)

Während Russells Schlussfolgerung, dass der Begriff der Ursache als solches suspekt ist, heute wohl wesentlich weniger Anhänger hat als während der Blütezeit des logischen Empirismus in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts, werden seine speziell die Physik betreffenden Argumente auch in jüngster Zeit noch vielfach aufgegriffen und sind von Wissenschaftstheoretikern der Gegenwart weiterentwickelt worden. Selbst wenn kausales Denken eine legitime Funktion in anderen Bereichen spiele, hätten Kausalbegriffe in der Physik nichts zu suchen, wird vielfach behauptet. Nun sind aber die diese Ansicht stützenden Argumente weit weniger überzeugend als es auf den ersten Blick erscheinen mag. In den folgenden zwei Abschnitten dieses Aufsatzes möchte ich einige dieser neo-Russellschen Argumente kritisch untersuchen und zeigen, dass sie nicht schlüssig sind.

Aus der Tatsache, dass anti-kausale Argumente scheitern, folgt jedoch natürlich noch nicht, dass kausales Denken tatsächlich in der Physik von Bedeutung ist. Diese zweite, positive These kann man meines Erachtens nur mit Hilfe von konkreten Fallbeispielen beurteilen, und so werde ich im vierten Teil dieses Aufsatzes ein Beispiel kausalen Denkens in der Physik beschrieben, die sogenannte „Theorie der linearen Antwort“, in der eine zeitasymmetrische Kausalannahme eine wichtige Rolle spielt. Im fünften Abschnitt, schließlich, werde ich Erwägungen vorstellen, die nahe

legen, dass eine zeitasymmetrische Ursachenrelation ein integraler Bestandteil unseres physikalischen Weltbildes ist und in der fundamentalen Unterscheidung zwischen Naturgesetzen und kontingenten Anfangsbedingungen bereits implizit gegeben ist.

Russell behauptete unter anderem, dass das Wort „Ursache“ in der modernen Physik schlicht nicht mehr verwendet wird, aber selbst eine kurze Stichwortsuche in einer Datenbank für physikalische Fachaufsätze kann zeigen, dass diese Behauptung falsch ist. Das Wort „Ursache“ und verwandte Wörter werden sehr wohl nach wie vor häufig von Physikern benutzt. Der Physiker David Griffiths bezeichnet das Kausalprinzip sogar als „den heiligsten Grundsatz der gesamten Physik.“ (Griffiths, 1999) Die Beobachtung, dass ein explizit kausales Vokabular nicht aus der physikalischen Fachliteratur verschwunden ist, lässt aber die Frage unbeantwortet, was für einen methodologischen Zweck Kausalbegriffe in der Physik erfüllen. Griffiths Aussage deutet auf eine zentrale Funktion hin, aber vielleicht handelt es sich ja hier auch nur um eine hyperbolisch überspitzt formulierte Bemerkung, und es könnte sein, dass Physiker das Wort „Ursache“ zwar benutzen, dieses aber nur in meta-theoretischen Kommentaren zur Anwendung kommt, nicht aber als integraler Bestandteil physikalischer Theorien.

Es stellt sich auch die Frage, was Physiker unter dem Wort „Ursache“ und verwandten Begriffen verstehen. Nach vielen wohl als gescheitert anzusehenden Versuchen, den Begriff der Ursache philosophisch zu analysieren und ihm eine einheitliche, auf nicht-kausale Begriffe zurückführende Definition zu geben, setzt sich unter Philosophen zunehmend die Ansicht durch, dass es sich hier um einen Familienbegriff handelt und dass es zwar möglich ist, verschiedene Aspekte oder Dimensionen des Kausalbegriffs voneinander zu unterscheiden, nicht aber notwendige und hinreichende Bedingungen anzugeben, die alle Anwendungen einheitlich beschreiben. Einige zentrale Aspekte des Alltagsbegriffs der Ursache scheinen die folgenden zu sein (siehe z.B. Norton 2007a, Hüttemann 2010):

- i) *Asymmetrie*: Wenn a eine Ursache von b ist, dann ist b keine Ursache von a .
- ii) *Zeitasymmetrie*: Wirkungen gehen ihren Ursachen nicht zeitlich voraus.
- iii) *Lokalität* (in verschiedenen zu unterscheidenden Hinsichten): Ursachen und Wirkungen lassen sich räumlich und zeitlich lokalisieren; Ursachen sind mit ihren räumlich oder zeitlich entfernten Wirkungen durch kontinuierliche Kausalketten verbunden; und Wirkungen pflanzen sich nicht beliebig schnell fort.
- iv) *Determinismus*: Ursachen bestimmen ihre Wirkungen.

- v) *Vagheit*: Die Relata der Kausalbeziehung sind vage und nicht präzise bestimmt. Dies steht im Gegensatz zu den präzisen Größen, die physikalische Gesetze in Beziehung setzen.
- vi) *Hervorbringung*: Ursachen haben die "Kraft", ihre Wirkungen hervorzubringen und sind somit "verantwortlich" für das Eintreten ihrer Wirkungen.

Diese Aspekte sind begrifflich unabhängig voneinander und, vielleicht mit Ausnahme der Asymmetrie, scheint keiner der Aspekte notwendig für den Kausalbegriff zu sein. Insbesondere ist es wichtig, die Asymmetrie der Kausalrelation von dem Merkmal der Hervorbringung oder der produktiven "Kraft" von Ursachen sorgfältig zu unterscheiden. Ein Grund für die unter Philosophen der Physik weitverbreitete Skepsis gegenüber Kausalrelationen scheint mir die Auffassung zu sein, dass sich die Idee einer *produktiven Kraft* nicht in ein physikalisches Weltbild integrieren lässt. Aber es folgt daraus noch nicht, dass überhaupt kein asymmetrischer Ursachenbegriff eine legitime, empirisch untermauerte Funktion in der Physik haben kann.

Auch in der Physik selbst findet man keinen einheitlichen Kausalitätsbegriff. Der Physiker und Wissenschaftstheoretiker Fritz Rohrlich beispielsweise unterscheidet drei verschiedene Ursachenbegriffe: „(a) Vorhersagbarkeit oder Newtonsche Kausalität, (b) die Beschränkung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Signalen auf Geschwindigkeiten unterhalb der Lichtgeschwindigkeit. (c) die Abwesenheit von so genannten 'avancierten' Wirkungen [denen zufolge Feldimpulse zeitlich *vor* dem mit ihnen assoziiertem Zustand der Feldquelle auftreten]“ (Rohrlich 2007, 50). Vor allem in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts wurde der Kausalbegriff von Physikern häufig mit dem Begriff des Determinismus gleichgesetzt, was Rohrlich "Newtonsche Kausalität" nennt.¹ So haben Hermann Weyl, Nils Bohr und Erwin Schrödinger jeweils "ursächliche Beschreibungen" oder "Kausalitätsprinzipien" dem Indeterminismus der neuen Quantenmechanik gegenübergestellt. Die moderne Physik schien ihnen mit einem kausalen Weltbild inkompatibel, gerade weil sie indeterministisch war. In dem Maße jedoch, in dem wir gelernt haben mit dem Indeterminismus zu leben, hat sich der Begriff der Ursache dahingehend erweitert, dass er auch nicht-deterministische, probabilistische Verursachungen erlaubt. Somit scheint der Begriff des Determinismus heute weitaus weniger eng mit dem der Ursache verknüpft zu sein als es vielleicht noch vor hundert Jahren der Fall war.

¹ Rohrlichs Gleichsetzung von Newtonscher Kausalität oder Determinismus mit Vorhersagbarkeit ist jedoch irreführend. Probabilistische Theorien könne Vorhersagen erlauben, wenn auch nicht mit Gewissheit, und chaotische Theorien sind deterministisch, erlauben jedoch nur sehr eingeschränkt Vorhersagen.

Der zweite Kausalbegriff, den Rohrlich unterscheidet, ist ein Lokalitätsbegriff. Häufig werden Theorien, die Fernwirkungen verbieten und im Sinne der Relativitätstheorie eine Lichtkegelstruktur, der zufolge die Lichtgeschwindigkeit bezugssystemunabhängig ist, postulieren, als kausale Theorien bezeichnet. Zusätzlich zur Invarianz der Lichtgeschwindigkeit und davon logisch unabhängig wird im allgemeinen noch postuliert, dass es keine Signale gibt, die sich mit Überlichtgeschwindigkeit fortpflanzen. Letzteres ist Rohrlichs zweites Kausalprinzip. Insofern der relativistische Kausalitätsbegriff nur einer Klassifizierung der durch die dynamischen Grundgleichungen einer Theorie definierten mathematischen Strukturen, nicht aber einer Einschränkung des physikalisch Möglichen dient, erscheint ein solcher Begriff selbst vielen Anhängern von Russells These als unproblematisch (siehe z.B. Norton 2007b).

Rohrlichs drittes Kausalprinzip ist die zeitasymmetrische Beschränkung, dass Wirkungen nie vor den mit ihnen assoziierten Wirkungen auftreten. Rohrlichs Formulierung dieses Prinzips bezieht sich auf den Kontext der Wellen- oder Strahlungsasymmetrie, wo man kausale, divergierende, oder 'retardierte' Wellen von akausalen, auf eine Strahlungsquelle konvergierenden, oder 'avancierte' Wellen unterscheidet, aber das Prinzip kommt auch in anderen Zusammenhängen zu Anwendung. Dass ein solcher zeitasymmetrischer Ursachenbegriff tatsächlich eine Rolle in der Physik spielt, wird jedoch von neo-Russellianern bestritten.

2. Theorienstruktur und Asymmetrie

Ein erstes anti-kausales Argument, das durch seine Kürze und Einfachheit besticht, appelliert an die Tatsache, dass Kausalrelationen nicht Teil der formalen Strukturen sind, aus denen physikalische Theorien bestehen. So sagt Russell mit Hinblick auf das Newtonsche Gravitationsgesetz folgendes: "in the motion of mutually gravitating bodies, there is nothing that can be called a cause and nothing that can be called an effect; *there is merely a formula.*" (141, meine Hervorhebung) Ganz ähnlich äußert sich van Fraassen in seiner Antwort auf Nancy Cartwrights Frage, warum wir denn nicht Ursachen als Teil physikalischer Modelle erlauben könnten:

Der Grund ist, dass, soweit ich sehen kann, die Modelle, die Naturwissenschaftler uns anbieten, keine Strukturen enthalten, die wir als mutmaßlich Verursachungen repräsentierend beschreiben können [...] Einige gruppentheoretische Modelle enthalten Teile, die Schubser von kleinen Brüdern durch große Schwestern repräsentieren, aber die Gruppentheorie stellt uns nicht die Mittel zur Verfügung die nötig wären um diese von Schubsern von großen Schwestern durch kleine Brüder zu unterscheiden. Diese Unterscheidung wird außerhalb der Theorie gefällt. (van Fraassen, 1993, 437-438)

Russell versteht eine Theorie syntaktisch, als aus einer Menge von Sätzen, den mathematischen Grundgleichungen der Theorie, bestehend, während van Fraassen ein Anhänger der semantischen Theorienauffassung ist, die eine Theorie als Menge von Modellen versteht. Aber dieser Unterschied ist für unsere gegenwärtige Problematik unbedeutend. Wichtig für uns ist, dass sowohl Russell als auch van Fraassen glauben, dass asymmetrische Kausalannahmen nicht Teil einer physikalischen Theorie sein könnten, da sie nicht ein Bestandteil der entweder syntaktisch oder semantisch aufgefassten formalen Strukturen der Theorie seien.

Als einen ersten Einwand gegen dieses Argument kann man anführen, dass Theorien nicht nur aus einer Menge von Formeln oder von mathematischen Modellen bestehen können, sondern diese ja auch interpretiert werden müssen, um mit der Wirklichkeit in Bezug gebracht werden zu können. Kausale Annahmen könnten also möglicherweise als Teil der Interpretation des Formalismus eine Rolle spielen und somit doch ein integraler Bestandteil einer Theorie sein. Van Fraassen besteht jedoch darauf, dass jeder wissenschaftlich legitime Teil einer Interpretation auch in der formalen Struktur der Theorie widerspiegelt werden muss, und diese Bedingung können seiner Ansicht nach Kausalannahmen nicht erfüllen. "Die Modelle, die uns Naturwissenschaftler bereitstellen," behauptet er, "enthalten keine Strukturen, die wir als mutmaßlich Verursachungen repräsentierend beschreiben können." (Van Fraassen, Ibid.)

Doch auch zu diesem Argument gibt es eine Entgegnung, da asymmetrische Kausalrelationen sehr wohl formal dargestellt werden können. Formal entsprechen Kausalrelationen einer partialen Ordnungsrelation – das heißt einer asymmetrischen, irreflexiven und transitiven Relation – definiert über die Zustände eines Systems. Man könnte sich also die rein dynamischen Modelle, auf die sich van Fraassen beruft, als in größere Strukturen eingebettet denken, die zusätzlich zu den in den dynamischen Gleichungen postulierten Relationen auch eine asymmetrische, als Kausalrelation interpretierte Ordnungsrelation beinhalten. Van Fraassen würde vermutlich erwidern, dass selbst wenn es prinzipiell Strukturen gäbe, die wir "als Verursachungen repräsentierend beschreiben *könnten*," solche Strukturen aber nicht tatsächlich ein Teil der Modelle seien, die Wissenschaftler benutzen. Physiker präsentieren Theorien seiner Ansicht nach als Klassen von Zustandsraum- oder Phasenraum-Modellen, definiert durch die dynamischen Gleichungen, und diese Strukturen beinhalten eben keine asymmetrischen, kausal interpretierbaren Ordnungsrelationen.

Trotzdem berufen sich Physiker manchmal auf kausale Prinzipien. Wie wir bereits gesehen haben, wird zum Beispiel in der klassischen Elektrodynamik allgemein die Annahme gemacht, dass die Beschleunigung von geladenen Teilchen die Ursache eines elektromagnetischen Feldimpulses

Michael Esfeld 7/29/10 2:43 PM

Deleted:

ist. Diese Annahme soll erklären, warum wir in der Natur von Ladungen kohärent divergierende Felder beobachten, aber keine kohärent auf Ladungen konvergierenden Felder (siehe Frisch 2005, 2006). Wo finden wir solche Annahmen in den Modellen, auf die van Fraassen sich beruft? Es scheint mir plausibel, dass solche Annahmen ein integraler Bestandteil einer Theorie sein können, selbst wenn sie nicht in den Phasenraummodellen einer Theorie einen formalen Widerpart haben. Ein Grund, warum Physiker auf eine formale Darstellung kausaler Annahmen verzichten, könnte sein, dass die den Annahmen entsprechenden formalen Strukturen relativ einfach sind, und daher eine explizit formale Darstellung gegenüber einer informellen Charakterisierung keinen Gewinn bringen würde. Es reicht Physikern, so scheint es, die funktionale Abhängigkeit zwischen Ladungsverteilungen r und Feldern F kausal zu interpretieren, ohne zusätzlich explizit eine asymmetrische Relation $\langle r; F \rangle$ zu definieren. In einer philosophischen Rekonstruktion der Theorie wie der van Fraassens oder der Strukturalisten müssten etwaige Kausalrelationen natürlich explizit dargestellt werden.

Ich möchte betonen, dass nur detaillierte Analysen von Fallbeispielen zeigen können, ob ausdrückliche Appelle von Physikern an Kausalannahmen tatsächlich als eine Verpflichtung, kausalen Strukturen anzuerkennen, verstanden werden müssen. Hier möchte ich lediglich feststellen, dass man nicht einfach aus der Tatsache, dass die Modelle einer Menge von physikalischen *Gleichungen* keine Strukturen enthalten, die asymmetrische Kausalbeziehungen repräsentieren, schließen kann, dass physikalische *Theorien* keine Kausalannahmen enthalten.

Häufig wird behauptet, dass gerade die Tatsache, dass die Kausalrelation asymmetrisch ist, während die dynamischen Grundgleichungen unserer fundamentalen physikalischen Theorien symmetrisch sind, zur Folge hat, dass Kausalrelationen mit den dynamischen Grundgleichungen unvereinbar sind. So bemerkt zum Beispiel Erhard Scheibe, dass schon mit dem Kontrast zwischen irreversiblen Kausalrelationen und reversiblen physikalischen Grundgleichungen "das Schicksal der Ereigniskausalität als fundamentaler Gesetzmäßigkeit besiegelt zu sein" scheint (Scheibe 2007, 213). Meist wird jedoch die Unvereinbarkeit von reversiblen dynamischen Grundgleichungen und asymmetrischen Kausalrelationen konstatiert, ohne dass ein Argument hierfür angeführt wird. Eine Ausnahme bildet John Norton (2009, 481-482), der das folgende Argument skizziert.

Nehmen wir an, es gäbe ein zeit-asymmetrisches Kausalitätsprinzip K als zusätzliche Beschränkung des physikalisch Möglichen, das nur eine echte Teilmenge T der Modelle der dynamischen Bewegungsgleichungen erfüllt. Das heißt, K zufolge repräsentiert nur die Menge T von zeit-asymmetrischen Modellen physikalisch mögliche Zustände. Weil die physikalischen Grundgleichungen der Theorie zeit-symmetrisch sind, gibt es zu jedem zeit-asymmetrischen Modell

A in T ein zeitlich invertiertes Modell B , das auch die dynamischen Gleichungen erfüllt, nicht jedoch die Kausalannahme K . Da jedoch das zeitumgekehrte Modell B auch ein Modell der dynamischen Gleichungen ist, kann es, so Norton, zwischen A und seinem zeitumgekehrten Korrelat B keinen physikalischen Unterschied geben. Somit ist auch B physikalisch möglich, im Gegensatz zu unserer ursprünglichen Annahme, dass nur die K erfüllenden Modelle physikalisch möglich sind. Dass nur A K erfüllt, obwohl sowohl A als auch B die reversiblen dynamischen Grundgleichungen erfüllen, ist, so Norton, eine *reductio ad absurdum* des Kausalprinzips K .

Aber Nortons Argument identifiziert die Menge der physikalischen Eigenschaften mit den in den dynamischen Gleichungen postulierten Eigenschaften und setzt den Begriff des physikalisch Möglichen gleich mit dem der Erfüllung einer dynamischen Gleichung. Gerade diese Gleichsetzung wird jedoch von einem Verfechter des Kausalprinzips bestritten, der darauf bestehen würde, dass die Zeitumkehrungen kausaler Modelle zwar *dynamisch* nicht aber *kausal* und daher auch nicht *physikalisch* möglich sind. Der entscheidende physikalische Unterschied zwischen A und B besteht für den Verfechter eines Kausalprinzips ja gerade darin, dass nur A nicht aber B die Kausalannahme erfüllt. Nortons Argument beruht also auf einer *petitio principii*.

Ein schwächeres und daher vielleicht plausibleres Argument behauptet nicht, dass asymmetrische Kausalannahmen strikt inkompatibel sind mit zeit-symmetrischen dynamischen Grundgleichungen, sondern lediglich, dass wir keine wissenschaftlich legitimen Gründe haben können, solche Annahmen zu machen. Unsere empirischen Beobachtungen liefern uns Evidenz für zeit-symmetrische Naturgesetze und daher nicht für zeit-asymmetrische Kausalannahmen. Es ist jedoch unklar, warum unsere Beobachtungen nicht sowohl zeit-symmetrische Grundgleichungen als auch zeit-asymmetrische Kausalannahmen unterstützen können. Unsere empirische Evidenz deutet auf ein zeitlich stark asymmetrisches Universum hin, und vielfach sind empirische Systeme durch zeit-asymmetrische Anfangsbedingungen gekennzeichnet. So ist es zum Beispiel charakteristisch für die Anfangsbedingungen empirisch adäquater Modelle elektromagnetischer Strahlungsphänomene, dass die einfallenden, nicht aber die ausgehenden Felder gleich null sind, obwohl die elektromagnetischen Grundgleichungen, die Maxwell-Gleichungen, zeitsymmetrisch sind. Diese Asymmetrie wird dann, wie wir bereits gesehen haben, vielfach mit Verweis auf das Kausalprinzip, dass elektromagnetische Strahlung durch Ladungsquellen verursacht wird und Ursachen ihren Wirkungen vorausgehen, erklärt.

3. Vage Relata

Eine zweite Klasse von Argumenten behauptet, dass Kausalannahmen keine Rolle in der Physik spielen können, da die Relata der Kausalrelation inhärent vage und nur grob bestimmt sind, wohingegen physikalische Gleichungen präzise definierte Zustände miteinander in Beziehung setzen. James Woodward verweist auf diesen vorgeblichen Kontrast (Woodward 2007) und auch Scheibe behauptet, dass mit der Ereigniskausalität "ein im allgemeinen nur grob analysierter gesetzlicher Zusammenhang bezeichnet [wird], dessen genauere Analyse allgemein noch nicht durchgeführt wurde." (Scheibe 2007, 213) Im Falle der Asymmetrie habe ich argumentiert, dass man aus dem Kontrast zwischen zeitsymmetrischen Grundgleichungen und asymmetrischen Kausalbeziehungen auf keine Inkompatibilität schließen kann. Im gegenwärtigen Fall scheint mir der vorgebliche Kontrast nicht wirklich zu existieren.

Die Physik beschreibt ein Phänomen, indem sie ein mathematisches Modell des Phänomens liefert. Ganz ähnlich jedoch können Kausalaussagen über ein System als Postulat eines das System kausal repräsentierenden Modells aufgefasst werden. Die These, dass Kausalaussagen im Gegensatz zu der Präzision rein dynamischer Modelle vage sind, erscheint nur plausibel, wenn man nicht sorgfältig zwischen den innerhalb eines Modells bestehenden Beziehungen und den zwischen Modell und Wirklichkeit bestehenden Beziehungen unterscheidet.

Die Behauptung, dass dynamische oder kausale Relationen vage sind, kann auf (mindestens) vier verschiedene Weisen aufgefasst werden. Erstens könnte sie sich auf die Beziehungen innerhalb eines Modells beziehen. Zweitens könnte man behaupten, dass die Beziehung zwischen einem Modell und der Wirklichkeit vage ist. Drittens könnte man die Beziehung zwischen den Aussagen einer bestimmten Theorie und einer weiteren, fundamentaleren Theorie als vage auffassen. Viertens schließlich könnte man der Ansicht sein, dass selbst wenn ein bestimmtes kausales Modell gegeben ist, es in gewisser Hinsicht vage bleibt, welche Kausalaussagen das Modell impliziert.

Kausale Modelle unterscheiden sich nicht von rein dynamischen Modellen in den ersten drei Hinsichten. Beide Arten von Modellen sind präzise in der ersten, nicht aber in der zweiten und dritten Hinsicht. Einerseits sind die Beziehungen zwischen Variablen in einem kausalen Modell genauso präzise definiert wie diejenigen zwischen dynamischen Variablen. Man denke hier zum Beispiel an den kausalen Bayes-Netz-Formalismus. Andererseits sind auch die Beziehungen zwischen dynamischen Modellen und den von ihnen repräsentierten Systemen von Idealisierungen und Abstraktionen geprägt und sind genauso unpräzise wie die entsprechenden Beziehungen im Falle von kausalen Modellen. Jim Woodward stellt fest, dass kausale „grobkörnige Variable unter Umständen den Möglichkeitsraums einer zugrunde liegenden feinkörnigen Mikrotheorie nicht

vollständig partitionieren.“ (2007, 81). Aber dasselbe gilt auch für alle Variablen aller außer unserer fundamentalsten physikalischen Theorien.

Die vierte Auffassung weist tatsächlich auf eine kausalen Aussagen eigene Vagheit hin. Wie die umfangreiche Literatur zu kontrafaktischen Theorien der Kausalität belegt, gibt es eine Vielzahl von Situationen, in denen ein eindeutig bestimmtes kausales Modell vorliegt, gegeben etwa durch kausale Strukturgleichungen, ein Pfeildiagramm oder ein Lewissches “Neuronendiagramm”, und es dennoch unklar ist, ob wir bestimmten, dem Modell anscheinend entsprechenden Kausalannahmen zustimmen sollen. Zum Beispiel kann dies in Situationen der kausalen Überdeterminiertheit der Fall sein. Diese Vagheit kann aber damit erklärt werden, dass unser Alltagsbegriff der Kausalität eine starke pragmatische und kontextabhängige Komponente enthält. Die Vagheit betrifft also die Frage, wie wir kausale Modelle in Alltagsaussagen übersetzen. Den Physiker müssen aber nur die kausalen Modelle selbst interessieren, und hier gibt es, wie ich argumentiert habe, weder mehr noch weniger Vagheit als im Fall von rein dynamischen Modellen.

Schließlich wird in Verbindung mit der Vagheitsthese häufig behauptet, dass Kausalannahmen in der Physik nur als vorläufiger Wegweiser für zukünftige Forschung dienen können, die jedoch, sobald eine endgültige Theorie eines Phänomens zur Verfügung steht, eliminiert werden (siehe z.B. Suppes 1970, 6; Hitchcock 2007, 56). Hitchcock behauptet sogar, dass die Verwendung von Kausalbegriffen ein Zeichen dafür ist, dass sich ein Gebiet der Physik zurückentwickelt habe, wobei sich bei der Einschätzung dieser These – wie leider sooft bei Behandlungen der Frage, was für eine Rolle Kausalität in der Physik spielt – das Problem ergibt, dass Hitchcock auch nicht einmal ansatzweise ein Argument für seine Behauptung anführt.

Man kann den Kontrast zwischen vorläufigen und endgültigen Theorien auf zweierlei Weise verstehen. Entweder bezeichnet man als endgültige Theorie keine außer einer hypothetischen fundamentalsten ‘letzten’ Physik, die vermutlich eine Quantentheorie der Gravitation wäre. Oder aber man versteht unter den nicht lediglich vorläufigen Theorien all jene Theorien, die sich als fester Bestandteil der Physikausbildung etabliert haben, zu denen unter anderem auch die klassische Mechanik und die klassische Elektrodynamik gehören. Wie plausibel ist Hitchcocks These nach diesen beiden Auffassungen? Quantengravitationstheorien stellen gegenwärtig ein äußerst spekulatives Gebiet der Physik dar, und man kann noch unmöglich wissen, welche Form eine letztendlich allgemein akzeptierte Theorie haben könnte. Es ist aber bemerkenswert, dass einer der gegenwärtig wichtigsten Ansätze, die ‘causal set’ Theorie, als fundamentalste Relation eine asymmetrische, azyklische sogenannte “Kausalrelation” postuliert, aus der raumzeitliche Relationen zwischen Ereignissen emergent hervorgehen. Beim Stand der gegenwärtigen Forschung

ist es schwer zu erkennen, warum gerade dieser Ansatz Zeichen eines Rückschritts der Physik sein soll, oder warum die Tatsache, dass er sich auf asymmetrische Kausalrelationen stützt, ihn als mögliche Fundamentaltheorie disqualifiziert.

Was nun die gegenwärtig etablierten Theorien der Physik betrifft, so möchte ich im Gegensatz zu Hitchcock behaupten, dass sich die Frage nach der möglichen Funktion von Kausalannahmen nur durch eine detaillierte Analysen von Theorien, in denen an vorgebliche Kausalprinzipien appelliert wird, beantworten lässt. Ich habe bereits auf die Rolle von Kausalannahmen in Erklärungen der Strahlungsasymmetrie verwiesen. Jedoch besteht in diesem Fall zwar eine Erklärungsasymmetrie, nicht aber eine Asymmetrie der Determiniertheit, da die Maxwellgleichungen zeitsymmetrisch sind. Außerdem benötigt man die Kausalannahme nicht für die Herleitung der dynamischen Entwicklung eines Strahlungssystems, falls der vollständige Anfangszustand des Systems gegeben ist. Inwieweit eine Kausalannahme tatsächlich eine Rolle in der klassischen Elektrodynamik spielt, bleibt daher umstritten.

Die Lage erscheint mir eindeutiger im Falle eines zweiten Beispiels, der Theorie der linearen Antwort, die ich im folgenden Abschnitt vorstellen möchte und in der eine zeitasymmetrische Kausalannahme eine essentielle Rolle in mathematischen Herleitungen spielt. Gegen meine Verwendung dieses Beispiels könnte man anführen, dass diese Theorie genau in dem von Woodward und Hitchcock beschriebenen Sinne vage ist, da sie, wie wir gleich sehen werden, kein präzises mikrophysikalisches Modell der von ihr behandelten Systeme anbietet. Aber in dieser Hinsicht sind ja, wie schon gesagt, *alle* außer unserer fundamentalsten Theorien vage.

4. Theorie der linearen Antwort

Die Theorie der linearen Antwort erlaubt, die Reaktion eines Systems auf ein externes Feld oder eine externe Kraft zu beschreiben. Der allgemeine theoretische Rahmen, auf den die Theorie sich stützt, kommt in einer Reihe verschiedener Spezialgebiete zur Anwendung, zum Beispiel in der Herleitung von Dispersionsgleichungen in der Streutheorie, der Theorie elektrischer Schaltkreise, der Beschreibung von Transportkoeffizienten in der Flüssigkeitsdynamik und in der S-Matrixtheorie in der Quantenfeldtheorie. Die Theorie beruht auf der Annahme, dass die Antwort des Systems linear und zeittranslationsinvariant ist. Das heißt, dass die Antwort $dB(t)$ auf eine Kraft F zum Zeitpunkt t_1 die folgende Form annimmt:

$$dB(t) = L(t-t_1)F(t_1)dt_1,$$

wo die lineare Antwortfunktion L nur von der Zeitdifferenz $t-t_1$ abhängig ist.

Die gesamte Antwort zur Zeit t_1 ergibt sich, wenn man die Beiträge der Kraft zu verschiedenen Zeiten addiert (das heißt, im Falle einer kontinuierlichen Kraft integriert):

$$B(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} L_C(t-t_1)F(t_1)dt_1$$

Diesem Integral zufolge hängt die Antwort $B(t)$ nicht nur von der auf das System einwirkenden Kraft zu früheren Zeiten, sondern auch von der Kraft zu auf die Antwort nachfolgenden Zeiten ab. An dieser Stelle nun wird an das Kausalitätsprinzip appelliert, gemäß dem in unserer Welt Ursachen Wirkungen vorhergehen. Dem zufolge ist die "Gedächtnisfunktion" L gleich null für alle Zeiten $t_1 > t$ und die Antwort zur Zeit t hängt nur von dem Feld zu den der Antwort vorhergegangenen Zeiten ab:

$$B_C(t) = \int_{-\infty}^t L_C(t-t_1)F(t_1)dt_1$$

Aus der Kausalannahme und der Beziehung für die kausalen Antwortfunktion lassen sich nun weitere Eigenschaften der jeweiligen Systeme herleiten, wie zum Beispiel die Dispersionsgleichungen in der Streutheorie, die den Zusammenhang zwischen absorptiven Eigenschaften und den frequenzverschiebenden Eigenschaften eines Mediums beschreiben. In diesen Herleitungen spielt die asymmetrische Kausalannahme eine entscheidende Rolle.

Was ist der methodologische Stellenwert der Kausalannahme in der Theorie? Die Theorie der linearen Antwort beschreibt Systeme ohne detaillierte Annahmen über deren mikroskopische Konstitution. Aufgrund dieser Tatsache hat Norton (2009) behauptet, dass die Kausalannahme zumindest im Falle der Herleitung von Dispersionsgleichungen aus einer nichtkausalen und zeitsymmetrischen mikroskopischen Elektrodynamik herleitbar sein müsste, bleibt es aber schuldig zu zeigen, wie denn eine solche Herleitung konkret aussehen soll.² In einschlägigen Präsentationen der Theorie in der Fachliteratur wird die Frage einer etwaigen mikrophysikalischen Herleitung der Theorie überhaupt nicht aufgeworfen. Vielmehr scheint für Physiker der Wert der Theorie der linearen Antwort gerade darin zu bestehen, dass sie es erlaubt, ohne detaillierte mikroskopische Annahmen und auf der Basis weniger äußerst allgemeiner Bedingungen Vorhersagen über das Verhalten eines Systems zu machen. So wird auch die Kausalannahme als eine solche allgemeine Bedingung eingeführt, ohne sich über eine mögliche nicht-kausale Reduktion der Bedingung Gedanken zu machen. Die Behauptung "wir leben in einem Universum in dem Ursache der Wirkung vorangeht", mit der (Evans und Searles 1996, 5808) ihre Behandlung der Theorie der linearen Antwort in der Flüssigkeitsmechanik beginnen, mag da als typisches Beispiel

² Norton beruft sich auf eine Herleitung der Dispersionsgleichungen für in einem Spezialfall, die in (Jackson 1999) präsentiert wird. Im Gegensatz zu Nortons Behauptung stützt sich doch Jacksons Herleitung bereits auf explizit zeitasymmetrische Beziehungen auf der Mikroebene.

dienen. Diesem Umstand scheint man besser gerecht zu werden, wenn man die Kausalannahme ähnlich dem Energieerhaltungssatz als eine allgemeine, jedoch anfechtbare Beschränkung auffasst – das heißt, als eine Beschränkung, der unsere Erfahrung der Welt genügen zu scheint und die wir daher solange berechtigterweise machen dürfen, wie sie sich als physikalisch fruchtbar erweist.

In diesem Zusammenhang erscheint es mir wichtig, die Frage, ob ein bestimmter Begriff eine legitime Rolle in der Physik spielen kann, sorgfältig von der Frage zu unterscheiden, ob ein Begriff wissenschaftlich fundamental oder reduzierbar ist. Der Gebrauch von Kausalannahmen in Fällen wie der Theorie der linearen Antwort zeigt, dass Nortons These, der zufolge der Begriff der Kausalität lediglich Bestandteil einer volkstümlichen Alltagswissenschaft (einer ‚folk science‘) nicht aber einer rigorosen Physik sein kann, falsch ist (siehe Norton 2007a). Dies schließt noch nicht aus, dass ein asymmetrischer Kausalbegriff letztendlich auf nicht-kausale Begriffe reduzierbar sein könnte. Da jedoch Physiker, die sich auf asymmetrische Kausalprinzipien berufen, wenig Interesse an der Frage der Reduzierbarkeit zu haben scheinen, liegt die Beweislast bei Philosophen wie Norton, die zeigen müssten, dass asymmetrische Kausalbegriffe und -prinzipien tatsächlich, ähnlich dem phänomenologischen Begriff der Temperatur, mikrophysikalisch reduzierbar sind, und nicht wie etwa der Energieerhaltungssatz eine allgemeine Beschränkung darstellen.

5. Kohärenz und Asymmetrie

Die These, dass asymmetrische Kausalannahmen eine fundamentalere Rolle in der Physik spielen als ihnen der Reduktionismus zugestehen will, gewinnt auch durch die Beobachtung an Plausibilität, dass für einige Physiker zeitasymmetrische Überlegungen konzeptionell ganz am Anfang physikalischer Theorienbildung zu stehen scheinen. So ist beispielsweise Eugene Wigner der Auffassung, dass die Unterscheidung zwischen dynamischen Gesetzen und Anfangsbedingungen ein menschliches Artefakt und eine Abstraktion ist, die dazu dient, in komplexen Naturvorgängen zwischen einer Domäne der komplizierten Zufälle, den Anfangsbedingungen, und einer Domäne der Regularitäten, den Naturgesetzen zu unterscheiden (Wigner 1979, 3). Wigner sagt ferner, dass die Anfangsbedingungen „so ungeordnet wie möglich“ sein sollten und dass wenn man mit scheinbarer Ordnung oder Regularitäten in den Anfangsbedingungen konfrontiert wird, „man zu zeigen versuchen sollte, dass diesem geordneten Zustand ein solcher vorausging, in dem die Anfangsbedingungen ungeordnet waren,“ so dass der geordnete aus dem ungeordneten Zustand den Naturgesetzen gemäß hervorging (1979, 41). Geordnete Anfangszustände bedürfen also nach Wigners Auffassung einer Erklärung und eine adäquate Erklärung bezieht sich auf dem geordneten Zustand *vorausgehende* Zustände.

Wigners Gedanke lässt sich erneut anhand der Strahlungsasymmetrie illustrieren. Obwohl die Maxwellgleichungen zeitsymmetrisch sind, können wir in der Natur vorkommende Strahlungsvorgänge durch ungeordnete Anfangsbedingungen, nicht aber durch ungeordnete Endzustände beschreiben. Charakteristisch für Anfangszustände sind Feldstärken, deren Werte annähernd null betragen, und die Abwesenheit kohärenter Strahlungsfelder. Endzustände hingegen weisen in der Gegenwart von Strahlungsquellen kohärente Felder auf, die durch den Zustand von Strahlungsquellen in ihrer Vergangenheit erklärt werden können. Sollte man doch kohärente Felder als Anfangsbedingungen vorfinden, so würde man versuchen, diese Felder durch vorhergehende Zustände etwaiger Strahlungsquellen zu erklären, selbst dann wenn diese Felder auf Strahlungsquellen in der Zukunft fokussiert wären.

Die Vorstellung, dass kohärente oder geordnete Anfangszustände wenn möglich erklärt werden sollten und dass mögliche Erklärungen sich asymmetrisch auf dem fraglichen Zustand zeitlich vorausgegangene und nicht nachfolgende Zustände berufen, ist ein zentrales Kennzeichen kausalen Denkens. Kausalerklärungen sind asymmetrisch auch in Fällen symmetrischer Determiniertheit. Man kann auf Ursachen als Erklärung ihrer Wirkungen verweisen, nicht aber auf Wirkungen als Erklärung ihrer vorangegangenen Ursachen, selbst wenn eine Ursache durch ihre Wirkungen nomologisch determiniert ist und wir daher von den Wirkungen auf das Auftreten der Ursachen rückschließen können.

Bezeichnend an Wigners Auffassung scheint mir, dass für ihn die Erklärungsasymmetrie begrifflich ganz am Anfang einer physikalischen Weltbeschreibung steht. Die Unterscheidung zwischen dynamischen Gesetzen und Anfangszuständen, die ja laut Wigner zumindest teilweise ein menschliches Konstrukt ist, wird so getroffen, dass Anfangszustände entweder ungeordnet sind oder, sollten sie geordnet sein, möglichst gesetzlichen Regelmäßigkeiten zufolge aus früheren ungeordneten Zuständen hervorgehen. Somit könnte Wigners Auffassung eine Antwort auf das anti-kausale Argument anbieten, dass sobald wir die dynamischen Gesetze und den Anfangszustand eines Systems kennen, kausale Prinzipien keine zusätzlichen empirischen Aussagen über ein System ermöglichen und daher prinzipiell eliminierbar sind. Wenn Wigner mit seinen Überlegungen Recht hat, dann ist die Kausal- oder Erklärungsasymmetrie schon bereits implizit in unserer Unterscheidung zwischen kontingenten Anfangsbedingungen und Naturgesetzen gegeben.

5. Zusammenfassung

Ich habe in diesem Aufsatz einige Argumente analysiert, die beweisen sollten, dass ein asymmetrischer Ursachenbegriff in der Physik keine Rolle spielen kann, und habe gezeigt, dass diese Argumente scheitern. Danach habe ich anhand der Theorie der linearen Antwort als

Fallbeispiel argumentiert, dass asymmetrische Kausalprinzipien sehr wohl auch in der Physik eine Funktion haben, und habe auf Überlegungen verwiesen, denen zufolge der Begriff einer zeitasymmetrischen Erklärungs- oder Kausalasymmetrie ein Grundbestandteil einer physikalischen Weltbeschreibung mit Hilfe von Anfangsbedingungen und dynamischen Naturgesetzen ist. All dies lässt jedoch die Frage nach dem metaphysischen Stellenwert der Kausalität unbeantwortet. Insbesondere folgt aus der Tatsache, dass Physiker die Welt mit Hilfe von Strukturen abbilden, die asymmetrischer Kausalrelationen enthalten, nicht, dass wir verpflichtet sind, die Idee einer produktiven Kraft in unser Weltbild aufzunehmen. Gerade diese Tatsache sollte es Empiristen erleichtern, Kausalprinzipien einen Platz in der Physik zuzugestehen, sofern diese Prinzipien empirisch fundiert werden können.

Literatur

- Evans, Denis J. und Debra J. Searles. 1996. "Causality, response theory, and the second law of thermodynamics," *Physical Review E* 53 (6): 5808-15
- Fraassen, Bas van. 1993. "Armstrong, Cartwright, and Earman on Laws and Symmetry," *Philosophy and Phenomenological Research* 53 (2): 431-444.
- Frisch, Mathias. 2005. *Inconsistency, Asymmetry, and Non-Locality: A Philosophical Investigation of Classical Electrodynamics*, Oxford University Press.
- _____. 2006. "A Tale of Two Arrows," *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 37. 542-558.
- _____. "The most Sacred Tenet? Causal Reasoning in Physics," *British Journal for the Philosophy of Science* 60 (September 2009) 459-474.
- _____. "Causality and dispersion: a reply to John Norton," *British Journal for the Philosophy of Science* 60 (September 2009) 487-495.
- _____. "Causal Models and the Asymmetry of State Preparation" in *EPSA Philosophical Issues in the Sciences. Launch of the European Philosophy of Science Association*, eds. M. Suárez, M. Dorato and M. Rédei. Springer Verlag (2010).
- Hitchcock, Christopher. 2007. "What Russell Got Right," erschienen in *Causality, Physics, and the Constitution of Reality: Russell's Republic Revisited*, edited by H. Price and R. Corry. Oxford: Oxford University Press.
- Hüttemann, Andreas. 2010. "Eine dispositionale Theorie der Kausalität," erscheint in: *Deutsches Jahrbuch Philosophie* 2, hrsg. von C.F. Gethmann, Meiner, Hamburg.
- Jackson, John D. 1999. *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, New York: Wiley.

- Norton, John D. "Causation as Folk Science". In *Causality, Physics, and the Constitution of Reality: Russell's Republic Revisited*, edited by H. Price and R. Corry. Oxford: Oxford University Press.
- _____. 2007b. "Do the Causal Principles of Modern Physics Contradict Causal Anti-Fundamentalism?" In P. K. Machamer and G. Wolters (eds.), 2007, *Thinking about Causes: From Greek Philosophy to Modern Physics*, Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- _____. 2009. "Is There an Independent Principle of Causality in Physics?" *British Journal for the Philosophy of Science*. pp. 475-86.
- Rohrlich, Fritz. 1990. *Classical Charged Particles*. Reading, MA: Perseus Books.
- Russell, Bertrand. 1918. On the Notion of Cause. In *Mysticism and Logic and other Essays*. New York: Longmans, Green and Co.
- Scheibe, Erhard. *Die Philosophie der Physiker*. München: Verlag C. H. Beck.
- Suppes, Patrick. 1970. *A Probabilistic Theory of Causality*. Amsterdam: North-Holland.
- Wigner, Eugene. 1979. *Symmetries and Reflections*. Woodbridge, CT: Ox Bow Press.
- Woodward, James. 2007. Causation with a Human Face. In *Causality, Physics, and the Constitution of Reality: Russell's Republic Revisited*, edited by H. Price and R. Corry. Oxford: Oxford University Press.