

Was bewirken Neutrinos? Eine Fallstudie zu Kausalität und Realismus in der Teilchenphysik

Matthias Egg

Erschienen in: M. Esfeld (Hg.), *Philosophie der Physik*. Berlin: Suhrkamp, 2012, S. 185-202.

1 Einleitung: Vom Entitätenrealismus zum kausalen Realismus

Der wissenschaftliche Realismus behauptet, dass uns die Wissenschaften wahre Erkenntnisse über eine von uns unabhängig existierende Welt liefern. Nun ist für die Gewinnung und Überprüfung dieser Erkenntnisse das Experimentieren, das heißt unser systematisches kausales Interagieren mit speziell präparierten Teilen der Welt, von zentraler Bedeutung. Hätten wir nicht die Möglichkeit, die Natur in dieser Weise zu untersuchen, so wäre moderne Naturwissenschaft undenkbar. Aus dem engen Zusammenhang von Einwirken auf die Welt und Wissen über die Welt speist sich die Motivation für den *Entitätenrealismus* (oder *experimentellen Realismus*), eine Position, die in den 1980er Jahren aufgekommen ist und von Ian Hacking (1996, S. 47) auf die knappe Formel gebracht wurde: „Wenn man [Elektronen] versprühen kann, sind sie real.“ Der Entitätenrealist hält also Elektronen und dergleichen nicht deshalb für real, weil unsere besten Theorien von ihnen handeln, sondern weil wir sie im Experiment benutzen können, um andere Entitäten zu manipulieren.

Ausgehend von dieser Position soll im vorliegenden Artikel untersucht werden, wie im Bereich der Teilchenphysik für einen wissenschaftlichen Realismus argumentiert werden kann. Zunächst diskutiere ich aber einige Probleme des Entitätenrealismus, die seine Transformation in einen moderateren *kausalen Realismus* erforderlich machen.

So ist etwa Hackings Behauptung, dank seines manipulationistischen Zugangs nicht auf einen *Schluss auf die beste Erklärung* angewiesen zu sein (S. 95-97, 447), nur schwer zu verteidigen. Um nämlich festzustellen, ob in einem Experiment eine erfolgreiche Manipulation stattgefunden hat, reichen die bloßen Messdaten nicht aus, es ist dazu immer auch eine Hypothese darüber erforderlich, wie die Daten zustande gekommen sind, und das Akzeptieren einer solchen Hypothese scheint auf einem Schluss auf die beste Erklärung zu beruhen (vgl. Resnik 1994).

Insofern stellt Nancy Cartwrights (1983) Fassung des Entitätenrealismus den besseren Ausgangspunkt dar, da sie zumindest den Versuch einer präzisen Differenzierung unternimmt, die angeben soll, in welchen Fällen der Schluss auf die beste Erklärung zulässig

ist und in welchen nicht:

Was ist es, das bei einer Erklärung die Wahrheit garantiert? Ich denke, dass es auf diese Frage keine plausible Antwort gibt, wenn ein Gesetz ein anderes erklärt. Aber wenn wir über theoretische Entitäten nachdenken, ist die Situation eine andere. Die Argumentation ist kausal, und die Erklärung zu akzeptieren ist gleichbedeutend damit, die Ursache anzuerkennen. (S. 99, Übersetzung M. E.)

Nun ist selbstverständlich auch diese Unterscheidung problembehaftet. Dass eine strikte Trennung zwischen theoretischen Erklärungen (bei denen „ein Gesetz ein anderes erklärt“) und kausalen Erklärungen (bei denen „wir über theoretische Entitäten nachdenken“) nicht haltbar ist, wird schon durch den Ausdruck „theoretische Entität“ nahegelegt: Diese Entitäten erklären die Phänomene nicht durch ihre bloße Existenz, sondern kraft ihrer kausalen Eigenschaften, was wiederum heißt, dass sie gewissen gesetzesartigen Aussagen genügen. Auch kausale Erklärungen haben somit einen gewissen theoretischen Gehalt.

Ein Entitätenrealismus, der theoretischen Erklärungen jeden Wahrheitsgehalt abspricht und gleichzeitig kausale Erklärungen über alle Zweifel erhebt, ist deshalb abzulehnen. Trotzdem werde ich im Folgenden dafür argumentieren, dass der Entitätenrealismus für die aktuelle Realismusdebatte eine wichtige Lektion bereithält. Die Trennung zwischen theoretischen und kausalen Erklärungen mag unscharf sein, bedeutungslos ist sie deswegen nicht, im Gegenteil: Je mehr sich in der Debatte die Erkenntnis durchsetzt, dass der wissenschaftliche Realismus nicht unter dem Motto „Alles oder nichts“ betrachtet werden sollte, desto wichtiger wird es, über Kriterien zu verfügen, die uns sagen, wo in der Wissenschaft wie viel Realismus berechtigt ist. Der *kausale Realismus*, den ich vertrete, schlägt ein solches Kriterium vor, indem er die Berechtigung zur realistischen Interpretation einer Erklärung an ihren kausalen Charakter bindet.

Um diesem Kriterium Gehalt zu verleihen, muss nun expliziert werden, worin der kausale Charakter einer Erklärung genau besteht. Dazu wird in diesem Artikel exemplarisch die Geschichte der Neutrino-Hypothese von 1930 bis 1956 beleuchtet. Insbesondere ist zu untersuchen, welche *kausalen Rollen* diesem (zunächst rein hypothetischen) Teilchen zugesprochen wurden und wie die Behauptung zu verstehen ist, dass 1956 der „direkte Nachweis“ des Neutrinos gelungen sei. Dabei wird sich zeigen, dass es einem kausalen Realismus besser als den anderen Positionen der Realismusdebatte gelingt, einem solchen Befund Sinn zu geben. Der Artikel schließt mit einigen Bemerkungen zur Frage, ob die Rede von Neutrinos und anderen Teilchen nicht auf einer Metaphysik beruht, die im Licht der

modernen Physik als überholt gelten muss.

2 Das Neutrino in Theorie und Experiment 1930-1956¹

Am Ursprung der Neutrino-Hypothese steht ein Problem, das um 1914 auftauchte und sich gegen Ende der 1920er Jahre mit zunehmender Dringlichkeit stellte: Das kontinuierliche Energiespektrum der Elektronen im β -Zerfall. Lange hatte man versucht, dieses Phänomen auf sekundäre Prozesse in der Atomhülle zurückzuführen, um so an einem diskreten Spektrum der primär emittierten Elektronen festzuhalten, in Analogie mit dem α -Zerfall. Spätestens 1929 musste diese Option aber fallengelassen werden, nachdem kalorimetrische Messungen zum β -Zerfall gezeigt hatten, dass die mutmaßlich in den Sekundärprozessen abgegebene Energie nicht vorhanden war. Man musste also davon ausgehen, dass das kontinuierliche Spektrum ein Charakteristikum des Zerfalls selber war, und es stellte sich die Frage, wie dies mit der Annahme diskreter Energieniveaus der Kerne vor und nach dem Zerfall kompatibel ist.

Die zwei meistdiskutierten Vorschläge zur Beantwortung dieser Frage stammten von Niels Bohr und von Wolfgang Pauli. Bohr schlug als Erklärung für das kontinuierliche β -Spektrum ein Versagen des Energieerhaltungssatzes im subatomaren Bereich vor. Ich werde diesen Vorschlag im Folgenden die „Bohr-Hypothese“ nennen. Pauli hatte für solche Ideen wenig übrig und fand 1930 einen – wie er sich ausdrückte – „verzweifelten Ausweg“ (Pauli 1984, S. 159): Er postulierte die Existenz eines neutralen Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchens sehr kleiner Masse, das im β -Zerfall einen Teil der Energie aufnimmt, ohne in einem Kalorimeter oder sonstigen Messgerät nachgewiesen zu werden. Pauli nannte dieses Teilchen „Neutron“, später führte Enrico Fermi den Begriff „Neutrino“ dafür ein.

Zu beachten ist, dass Pauli mit seiner Hypothese neben dem erwähnten Energieproblem auch noch ein zweites Problem zu lösen hoffte, nämlich die „falsche“ Statistik des Stickstoff- und des Lithium-6-Kerns. Messungen hatten gezeigt, dass diese Kerne ganzzahligen Spin haben mussten, was im Widerspruch zur damaligen Annahme stand, dass sie jeweils aus einer ungeraden Anzahl Fermionen bestehen. Den Schlüssel zur Lösung *dieses* Problems lieferte 1932 die Entdeckung des Neutrons.

Philosophisch lässt sich die Situation bis zu diesem Zeitpunkt wie folgt charakterisieren: Pauli wies in seiner Hypothese dem Neutrino in zweifacher Hinsicht eine kausale Rolle zu: Erstens

¹Für wissenschaftshistorische Darstellungen dieser Periode siehe Pauli (1984), Sutton (1992) sowie Franklin (2004). Speziell für die frühe Phase (bis ca. 1934) siehe Pais (1986, Abschn. 14d) und Jensen (2000, Kap. 6).

trägt es im β -Zerfall einen Teil der Energie (und des Impulses²) weg, zweitens trägt es mit seinem Spin zum Gesamtspin gewisser Atomkerne bei. Die erste dieser Rollen liefert die auch heute noch akzeptierte Erklärung für das kontinuierliche β -Spektrum, die zweite Rolle wurde mit der soeben erwähnten Entdeckung des Neutrons obsolet. Sie wurde aber später durch eine ähnliche Rolle ersetzt: Durch seinen Spin stellt das Neutrino sicher, dass zum Beispiel im β -Zerfall der Drehimpuls erhalten bleibt. Würde nämlich im Zerfall nur ein Elektron emittiert, so müsste der Kern seinen Spin um $\frac{1}{2}$ ändern, also von halbzahlig zu ganzzahlig werden oder umgekehrt, was nicht beobachtet wurde.

Dass Paulis Neutrino-Hypothese nach 1934 rasant an Akzeptanz gewann, während die Bohr-Hypothese ihre Anhängerschaft verlor, lag aber nicht in erster Linie an neuen empirischen Resultaten, sondern an Fermis Theorie des β -Zerfalls. In seinem *Versuch einer Theorie der β -Strahlen* beschrieb Fermi (1934) die Emission eines Elektrons und eines Neutrons aus einem Kern in enger Analogie zur Emission von Photonen aus einem Atom. Damit ersetzte er die Vorstellung, dass beim β -Zerfall Elektronen frei werden, die sich zuvor im Atomkern befunden haben, durch das quantenfeldtheoretische Modell der Erzeugung und Vernichtung von Teilchen. Außerdem integrierte er Paulis eher unspezifische und qualitative Neutrino-Hypothese in einen theoretisch-quantitativen Rahmen. Das Neutrino wurde damit zu einer im eigentlichen Sinn *theoretischen Entität*, und die eindruckliche Bewährung der Fermi-Theorie in den darauf folgenden Jahren wurde von den meisten, wenn auch nicht von allen Physikern als Bestätigung der Existenz des Neutrons aufgefasst. Als Illustration sei hier der Anfangssatz eines Review-Artikels zum β -Zerfall aus dem Jahr 1948 zitiert:

Nicht jeder wäre bereit zu sagen, dass er an die Existenz des Neutrons glaubt, aber man kann mit Sicherheit sagen, dass kaum einem von uns die Neutrino-Hypothese nicht beim Nachdenken über den Beta-Zerfallsprozess behilflich ist. (Crane 1948, S. 278, Übersetzung M. E.)

Trotzdem fehlte dem Neutrino noch das, was man gewöhnlich den „direkten Nachweis“ nennt, wobei noch zu diskutieren sein wird, was „direkt“ in diesem Zusammenhang genau heißt. Im Rückblick fasst Frederick Reines, einer der Hauptbeteiligten beim späteren Gelingen dieses Nachweises, die Situation zu Beginn der 1950er Jahre wie folgt zusammen:

²Obwohl zu dieser Zeit noch keine Messungen zur Impulsbilanz des β -Zerfalls vorlagen, lag die Annahme nahe, dass die Neutrino-Hypothese nicht nur für die Energie-, sondern auch für die Impulsbilanz relevant war. Diese Annahme bestätigte sich in den ab 1936 durchgeführten Rückstoß-Messungen. (Für einen Überblick über die wichtigsten Experimente siehe Crane 1948.)

Wie attraktiv das Neutrino auch war als Erklärung für den Beta-Zerfall, der Beweis seiner Existenz musste von einer Beobachtung abgeleitet werden, die an einem andern Ort stattfand als der Zerfallsprozess – das Neutrino musste beobachtet werden, wie es im freien Zustand mit Materie an einer entfernten Stelle interagiert.

Es ist aber anzuerkennen, dass, unabhängig von der Beobachtung einer Interaktion eines freien Neutrinos mit Materie, die Theorie in ihrer Erklärung des Beta-Zerfalls so attraktiv war, dass der Glaube an das Neutrino als eine „reale“ Entität die Regel war. (Reines 1996, S. 317, Übersetzung M. E.)

Zusammen mit Clyde Cowan führte Reines zwischen 1953 und 1956 eine Serie von Experimenten durch, in denen es schließlich gelang, das Neutrino zu detektieren. Für die nachfolgende Diskussion ist es nötig, kurz die Grundzüge dieser Experimente zu erläutern.

Da das Neutrino kaum mit Materie interagiert, gibt es nicht viele Möglichkeiten, es im freien Zustand zu beobachten. Die vielversprechendste ist der so genannte *inverse β -Zerfall* $\bar{\nu} + p \rightarrow \beta^+ + n$, bei dem ein Proton ein Antineutrino absorbiert, sich dabei in ein Neutron umwandelt und ein Positron emittiert. (Oft wird übrigens die Unterscheidung zwischen Neutrino und Antineutrino vernachlässigt und in beiden Fällen von „Neutrino“ gesprochen. Ich schließe mich im Folgenden diesem Sprachgebrauch an.) Der extrem kleine Wirkungsquerschnitt für diese Reaktion (Größenordnung 10^{-43} cm^2) macht eine große Anzahl Neutrinos nötig. Neutrinos entstehen in β -Zerfällen, und diese wiederum sind besonders zahlreich in den Produkten von Kernspaltungen. Reines und Cowan stellten deshalb ihren Detektor in der Nähe eines Kernreaktors auf.

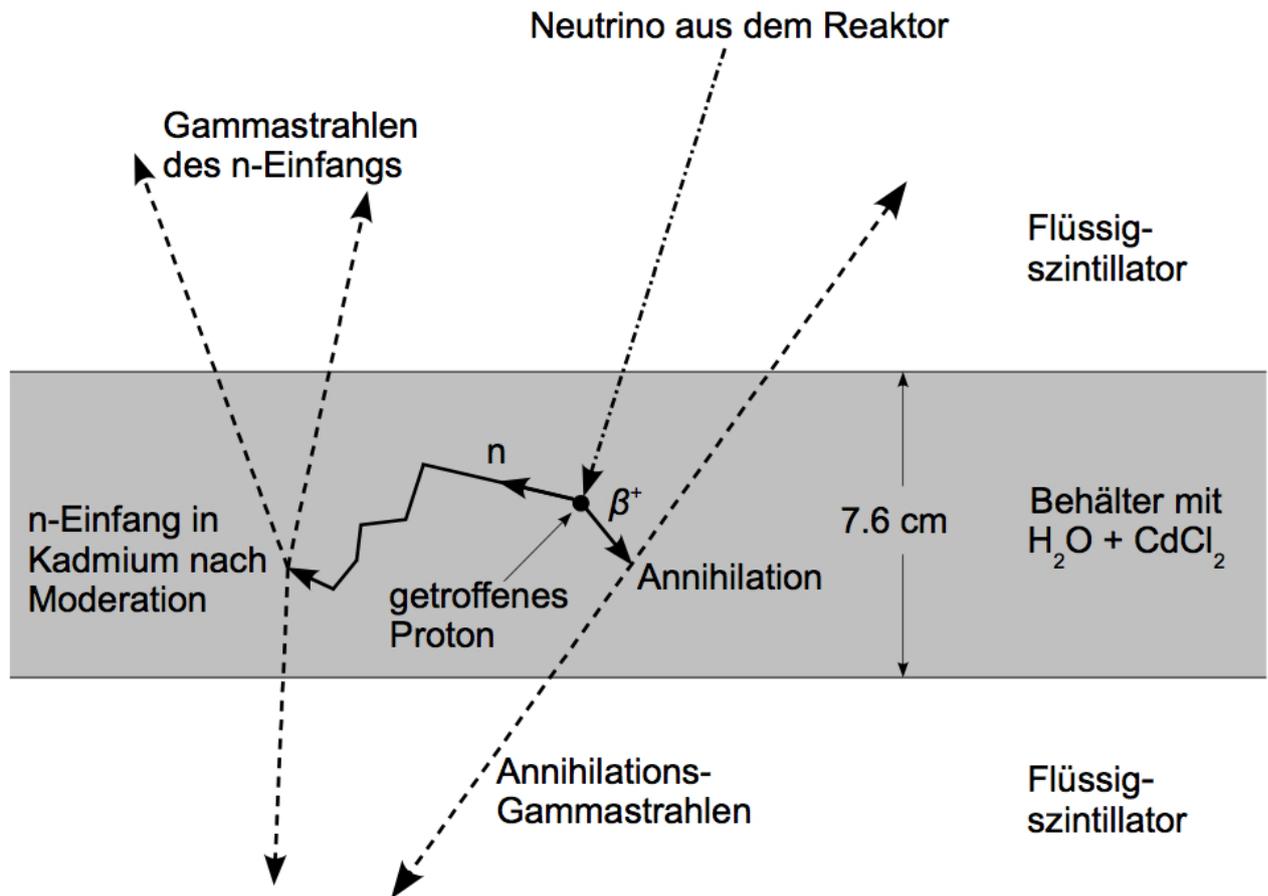


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Detektion eines inversen β -Zerfalls im Experiment von Reines und Cowan. (nach Reines et al. 1960)

Der Detektor weist eine Sandwich-Struktur auf (vgl. Abbildung 1): Ein mit Cadmium-Chlorid in wässriger Lösung gefüllter Behälter dient zum Stoppen der Neutrinos, darüber und darunter sind Flüssig-Szintillationszähler (mit Photomultipliern) angebracht. Löst nun ein vom Reaktor herkommendes Neutrino im Wassertank einen inversen β -Zerfall aus, so wird das entstehende Positron in kurzer Zeit annihiliert, und die dabei erzeugten zwei γ -Strahlen werden in den Szintillatoren als promptes Signal nachgewiesen. Das Neutron verliert seine Energie durch Stöße mit den Wasserstoffkernen des H_2O und wird dann von einem Cadmium-Kern eingefangen, wobei wieder γ -Strahlen entstehen, die in den Szintillatoren als verzögertes Signal registriert werden. Damit ist die Signatur für ein Neutrino-Ereignis gegeben durch zwei γ -Signale, die zeitlich um einige Mikrosekunden voneinander getrennt sind (vgl. Abbildung 2).

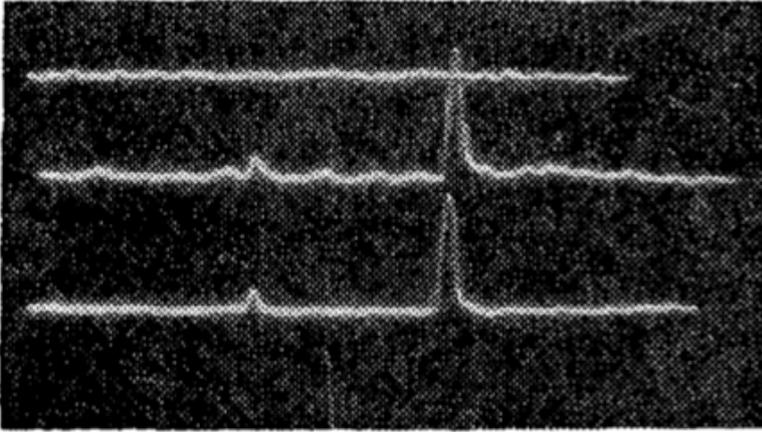


Abbildung 2: Kandidat für ein Neutrino-Ereignis. Die zwei kleineren Peaks links stammen von den Photonen der Positron-Annihilation (gleichzeitig registriert im oberen und im unteren Flüssig-Szintillator), die deutlich größeren Peaks rechts zeigen den Neutron-Einfang an. (Reines et al. 1960)

Die Zählraten für Ereignisse dieser Signatur lagen bei etwa 4,6 pro Stunde. Nun stammen aber nicht alle diese Ereignisse von Neutrinos, denn es gibt immer auch andere Prozesse, die Signale der gesuchten Art hervorrufen können. Die Größe dieses sogenannten „Untergrundes“ wurde bestimmt, indem man beobachtete, wie die Zählrate auf die Änderung diverser Parameter reagierte, insbesondere das Abschalten des Reaktors, die Änderung des Zeitfensters für die γ -Koinzidenz oder das Anbringen zusätzlicher Abschirmungen. Bestehen blieb ein Neutrino-Signal von $2,9 \pm 0,3$ Ereignissen pro Stunde.

3 Ein „direkter Nachweis“?

In welchem Sinn handelt es sich hier nun um einen „direkten“ Nachweis des Neutrinos? Sicher nicht in einem umgangssprachlichen Sinn von „direkt“, denn vom Neutrino zum Signal auf dem Bildschirm führt ein mehrstufiger Prozess via Positron und Neutron, γ -Strahlen, Szintillatoren, Photomultiplier und Verstärker.

Ebenfalls unzutreffend ist die Vorstellung, dieser Nachweis sei deshalb *direkt*, weil hier erstmals Neutrino-Effekte auf der individuellen Ebene beobachtet wurden und nicht bloß auf der Ensemble-Ebene wie bei Messungen des β -Spektrums (vgl. Falkenburg 2007, S. 104). Rückstoß-Messungen bei *einzelnen* β -Prozessen waren nämlich schon früher durchgeführt worden, mit dem Ergebnis, dass auch auf der individuellen Ebene das Neutrino erforderlich ist, um die beobachtete Energie-Impulsbilanz zu erklären (vgl. Crane 1948). Zudem ist zu bemerken, dass im Experiment von Reines und Cowan auf der Ebene der individuellen

Ereignisse keine eindeutige Zuordnung stattfindet, welche der Ereignisse nun Neutrino-induziert sind und welche nicht. Stattdessen wird, wie oben erwähnt, angenommen, dass sich die gesamte Zählrate aus Signal und Untergrund zusammensetzt, aber es wird keine Aussage darüber gemacht, welche Ereignisse in welche Gruppe gehören.

Kehren wir, um zu sehen, was wirklich neu ist am beschriebenen Experiment, nochmals zur im letzten Abschnitt zitierten Bemerkung von Reines zurück. Er spricht davon, dass das Neutrino an einem anderen Ort als dem Ort seiner Entstehung beobachtet werden muss. Warum ist dies wichtig? Alle bis dahin durchgeführten Experimente hatten das Neutrino im Kontext des β -Prozesses seiner Entstehung untersucht und dabei die Gültigkeit des Energieerhaltungssatzes vorausgesetzt. Nun war aber eine mögliche Verletzung dieses Satzes gerade Gegenstand der Bohr-Hypothese (siehe Abschn. 9.2), die eine alternative Erklärung für die Phänomene des β -Spektrums bot. (Bohr hatte sich allerdings in der Zwischenzeit von dieser Idee distanziert, und auch sonst finden sich in der Literatur nach 1936 keine Hinweise darauf, dass jemand sie noch ernsthaft weiterverfolgt hätte.) Somit konnten die bisherigen Experimente keine Entscheidung zwischen den folgenden zwei Hypothesen herbeiführen:

- (1) Im β -Zerfall ist der Energieerhaltungssatz verletzt.
- (2) Im β -Zerfall wird ein Neutrino freigesetzt, das einen Teil der Energie wegträgt.

Erst die Reines-Cowan-Messungen erlaubten es, die Entscheidung zugunsten von (2) und gegen (1) zu fällen.

Es wäre allerdings etwas irreführend, ein Experiment als direkten Nachweis einer Hypothese zu bezeichnen, *weil* es die Elimination der einzig ernstzunehmenden Alternativhypothese (in diesem Fall die Elimination der Bohr-Hypothese) erlaubt. Die Implikation läuft vielmehr in die umgekehrte Richtung: *Weil* der direkte Nachweis des Neutrinos gelungen ist, kann Bohrs Hypothese (1) ausgeschlossen werden.³ Zumindest ist dies das Verständnis der beteiligten Forscher, wie das folgende Zitat zeigt:

Einige dieser Kommentare können formal so ausgedrückt werden, dass, wer die Existenz des Neutrinos im freien Zustand (das heißt durch Beobachtung an einer entfernten Stelle) nachweist, den Anwendungsbereich dieser fundamentalen Erhaltungssätze auf den nuklearen Bereich ausdehnt. (Reines 1996, S. 318, Übersetzung M. E.)

Trotzdem ist Hypothese (1) relevant für die Frage, worin die Direktheit des Neutrino-

³Im nächsten Abschnitt wird außerdem zu sehen sein, dass es auch im Kontext der aktuellen Debatte um den wissenschaftlichen Realismus problematisch ist, den Nachweis einer hypothetischen Entität von der Elimination konkurrierender Hypothesen abhängig zu machen.

Nachweises im Reines-Cowan Experiment besteht. Jedoch geht es nicht primär darum, dass das Experiment die auf (1) basierende alternative Erklärung ausschließt, sondern darum, dass hier erstmals experimentelle Hinweise zugunsten der Neutrino-Hypothese (2) vorliegen, die *nicht ihrerseits schon die Negation von (1) voraussetzen*. Denn wie bereits erwähnt, konnten alle vorherigen Experimente nur dann als Hinweise auf Neutrinos interpretiert werden, wenn man davon ausging, dass die Energie im β -Zerfall erhalten ist, mit anderen Worten, dass (1) nicht gilt.

Diese Explikation des Begriffs „direkt“ ist zweifellos die angemessenste der bisher betrachteten. Und sofern in physikalischen Artikeln zum Neutrino-Nachweis auf die Bedeutung von „direkt“ reflektiert wird, scheint dieses Verständnis im Vordergrund zu stehen. Am deutlichsten wird dies in einem Artikel von Bruno Pontecorvo (1946), der nach einem Überblick über bis dahin durchgeführte Neutrino-Experimente zum Schluss kommt:

Ein direkter Existenzbeweis des Neutrinos muss somit auf Experimenten basieren, deren Interpretation den Energieerhaltungssatz nicht voraussetzt, das heißt auf Experimenten, in denen ein charakteristischer von *freien Neutrinos* erzeugter Prozess (ein Prozess, den Neutrinos erzeugen, nachdem sie in einem β -Zerfall emittiert wurden) beobachtet wird. (Pontecorvo 1946 (2000), S. 24, Übersetzung M. E., Hervorhebung im Original)

Aber hängt die Interpretation des Reines-Cowan-Experiments wirklich nicht mehr von der Gültigkeit des Energieerhaltungssatzes ab? Ein unverbesserlicher Bohr-Anhänger könnte dies bestreiten, indem er darauf hinweist, dass die Interpretation zwar nicht mehr auf der Negation von (1) beruht, aber doch auf der Negation einer ganz ähnlichen Hypothese, nämlich:

(1') Im inversen β -Zerfall ist der Energieerhaltungssatz verletzt.

Um diesen Einwand verständlich zu machen, sei daran erinnert, dass ein Verfechter von (1) davon ausgehen muss, dass im (gewöhnlichen) β -Zerfall ein Neutron in ein Proton und ein Elektron übergeht, bei gleichzeitiger *Vernichtung* eines Teils der Energie. Aus Symmetriegründen ist es dann aber ebenso plausibel anzunehmen, dass im inversen β -Zerfall spontan Energie *erzeugt wird*, während aus einem Proton ein Neutron und ein Positron entstehen (ohne Mitwirken eines Neutrinos). Wenn dies aber möglich ist, dann lassen die von Reines und Cowan beobachteten inversen β -Prozesse nicht ohne weiteres auf die Präsenz von Neutrinos schließen. Mit anderen Worten: Das Experiment belegt die Existenz des Neutrinos nur unter der Voraussetzung, dass (1') nicht gilt.

Sind wir also wieder in derselben Situation wie vor 1956, als kein Experiment zwischen den

Hypothesen (1) und (2) entscheiden konnte, mit dem einzigen Unterschied, dass die Alternative nun zwischen (1') und (2) besteht? Nein, die beiden Situationen unterscheiden sich grundlegend, wie der folgende Gedankengang zeigt: Ein zentrales Resultat des Reines-Cowan-Experiments besteht darin, dass die Zählrate für Ereignisse mit der Signatur eines inversen β -Zerfalls signifikant höher ist, wenn der benachbarte Kernreaktor eingeschaltet ist, als wenn er ausgeschaltet ist. Dies ist zunächst nur eine Aussage über eine Korrelation zwischen den zwei Variablen R (Reaktorstatus) und Z (Zählrate), und eine solche reicht bekanntlich noch nicht aus, um einen kausalen Zusammenhang zwischen R und Z zu postulieren. Entscheidend ist jedoch, dass der Betriebszustand des Reaktors nicht nur *passiv beobachtet* sondern *aktiv verändert* werden kann und dass das Einschalten des Reaktors ein wirksames Mittel ist, um die Zählrate zu erhöhen. In der Terminologie von James Woodward (2003, S. 45, 98) ist das Einschalten des Reaktors eine *Intervention* an R, die den Wert von Z verändert, was hinreichend ist für einen kausalen Zusammenhang zwischen R und Z. Dieser Zusammenhang lässt sich mit Hypothese (2) problemlos erklären, indem man sagt, dass die gemessenen Ereignisse durch Neutrinos ausgelöst werden, die vom Reaktor stammen. Hypothese (1') erlaubt hingegen keine solche Erklärung, denn es ist nicht einzusehen, weshalb die Nähe eines aktiven Kernreaktors die Wahrscheinlichkeit des laut (1') *spontanen* Auftretens von inversen β -Prozessen beeinflussen sollte.

Um die Bedeutung des Experiments von Reines und Cowan weiter zu verdeutlichen, untersuche ich nun noch die Frage, inwiefern dem Neutrino in diesem Experiment eine neue kausale Rolle zufällt. Wie im letzten Abschnitt erwähnt, beschränkte sich die kausale Rolle des Neutrinos in den Experimenten vor 1956 auf das Wegtragen von Energie, Impuls und Drehimpuls im β -Zerfall. Dies genügte nicht, um zwingend für die Existenz des Neutrinos zu argumentieren, denn es konnte bestritten werden, dass diese drei Größen im β -Zerfall erhalten sind und es somit überhaupt nötig ist, eine Entität zu postulieren, die Teile davon „wegträgt“. Nun aber taucht ein entscheidender neuer Aspekt auf: Das Neutrino trägt Energie, Impuls und Drehimpuls nicht mehr nur vom Ort des β -Zerfalls *weg*, sondern es trägt sie *an einen andern Ort* (in diesem Fall vom Reaktor zum Detektor) und bewirkt dort einen inversen β -Zerfall. Es ist dieses *Vermitteln* eines kausalen Zusammenhangs zwischen zwei verschiedenen Kontexten, das uns das entscheidende Argument für die Existenz des Neutrinos liefert. Denn, wie oben beschrieben, können zwar die Phänomene *in jedem Kontext für sich* auch ohne Neutrinos erklärt werden (mit Hilfe der Hypothesen (1) und (1')), nicht jedoch der kausale Zusammenhang zwischen ihnen, der sich im Reines-Cowan-Experiment als kausaler Zusammenhang zwischen R und Z zeigt. *Irgend etwas* muss zwischen Reaktor und Detektor

unterwegs sein, und dieses Etwas nennen wir Neutrino.

4 Neutrino-Nachweis und Realismusdebatte

Ein Realismus, der sich in der hier beschriebenen Weise an kausalen Erklärungen orientiert (und deshalb *kausaler Realismus* genannt werden kann), verfügt also über einen konzeptuellen Rahmen, der die Bedeutung eines Experiments wie desjenigen von Reines und Cowan verständlich macht. Wie stehen die wichtigsten Konkurrenten in der aktuellen Realismusdebatte diesbezüglich da?

Der konstruktive Empirist im Sinn von Bas van Fraassen (1980) wird der hier verwendeten kausalen Redeweise natürlich wenig abgewinnen können. Für ihn zeigt das Experiment nichts weiter, als dass die Neutrino-Hypothese gute Chancen hat, empirisch adäquat zu sein.⁴ Insofern dies schon zuvor bekannt war, liefert der so genannte Neutrino-Nachweis keine neue Erkenntnis. Seine Bedeutung liegt höchstens darin, eine bis dahin empirisch äquivalente alternative Hypothese (den Vorschlag von Bohr) als empirisch inadäquat erwiesen zu haben. Hier trifft sich der konstruktive Empirismus mit dem aktuell von Kyle Stanford (2006) vertretenen Antirealismus, der bestreitet, dass wissenschaftliche Hypothesen durch das Eliminieren konkurrierender Hypothesen als wahr erwiesen werden können. Gemäß dem von Stanford postulierten „Problem der unerfassten Alternativen“ (engl. „problem of unconceived alternatives“) gibt es nämlich noch unzählige weitere mögliche Hypothesen, die nicht ausgeschlossen sind, da wir noch gar nicht an sie gedacht haben. Dass die Neutrino-Hypothese momentan die einzige ist, die allen verfügbaren Daten Rechnung trägt, beweist somit für Stanford nichts bezüglich der Existenz von Neutrinos.⁵

Dass antirealistische Positionen tendenziell die Bedeutung eines Experiments geringschätzen, das von den Physikern als Existenznachweis eines unbeobachtbaren Teilchens bejubelt wird, erstaunt nicht weiter. Doch auch auf der Seite des wissenschaftlichen Realismus stellt sich ein

⁴Man mag versucht sein, diese Formulierung für allzu vorsichtig zu halten und stattdessen einfach zu sagen, dass die Hypothese empirisch adäquat *ist*. Dabei ist aber zu beachten, dass eine empirisch adäquate Hypothese nicht nur mit allen *beobachteten* Phänomenen kompatibel sein muss, sondern mit *allen* Phänomenen (van Fraassen 1980, S. 12). Es zeigt sich hier eine oft zu wenig beachtete Parallele zwischen dem wissenschaftlichen Realismus und dem konstruktiven Empirismus: Wenn uns die Möglichkeit einer zukünftigen Falsifikation einer bisher bewährten Theorie davon abhält, diese Theorie als wahr zu bezeichnen, so muss sie uns genauso davon abhalten, die Theorie als empirisch adäquat zu bezeichnen. Aufgrund dieser Parallele wird sich weiter unten noch zeigen, dass ein nicht kausal orientierter wissenschaftlicher Realismus die Bedeutung des Neutrino-Nachweises genauso wenig erfassen kann wie der konstruktive Empirismus.

⁵Ich betrachte hier die Auseinandersetzung zwischen dem kausalen Realismus und den beiden genannten antirealistischen Positionen nur im Hinblick auf die Bedeutung, die diese Positionen einem Ereignis wie der Neutrino-Detektion zusprechen können. Für die Verteidigung des kausalen Realismus gegen antirealistische Einwände siehe Cartwright (1983, Kap. 5; 1989, Kap. 4), Suárez (2008) und Chakravartty (2007, Kap. 2; 2008).

Problem, wenn man diesen (wie aktuell Psillos 1999, 2002) auf dem *Schluss auf die beste Erklärung* aufbaut. Dass die Neutrino-Hypothese die beste Erklärung für die beobachteten Phänomene darstellte, war schon vor dem Experiment von Reines und Cowan unbestritten. Die Annahme, dass Energie, Impuls und Drehimpuls im β -Zerfall nicht erhalten sein könnten, wurde vielleicht noch vereinzelt als entfernte Möglichkeit in Betracht gezogen, aber da sie nicht mit Fermis Theorie kompatibel war und auch sonst keine brauchbaren Voraussagen machte, war völlig ausgeschlossen, dass sie in irgendeiner Weise eine ähnlich gute Erklärung der Daten sein könnte wie die Neutrino-Hypothese. Dann ist aber auch für den Realisten die epistemische Bedeutung des Reines-Cowan-Experiments fragwürdig, denn gemäß dem Schluss auf die beste Erklärung stand die Existenz des Neutrinos schon vorher außer Zweifel. Ich sehe zwei mögliche Reaktionen auf diesen Befund: Auf der einen Seite kann der Realist die Konsequenz akzeptieren, dass die Detektion des Neutrinos von geringer wissenschaftlicher Bedeutung war. Obwohl viele Physiker (sowie das Nobelpreiskomitee, das Frederick Reines 1995 „für die Detektion des Neutrinos“ auszeichnete) diese Meinung nicht teilen, ist dies durchaus ein gangbarer Weg (siehe zum Beispiel Post 1975, S. 25), denn die Intuitionen von Physikern sind keineswegs eine unfehlbare epistemologische Instanz. Man muss sich aber bewusst sein, dass, wer diesen Weg beschreitet, auch für grundlegende Änderungen der gegenwärtigen und zukünftigen Prioritäten in der Teilchenphysik plädieren müsste, und dies tun wissenschaftliche Realisten im Allgemeinen nicht.

Die zweite mögliche Reaktion des Realisten besteht darin, zu sagen, dass der Neutrino-Nachweis ein wichtiger Test war, obwohl man schon zuvor ein hohes Vertrauen in die Korrektheit der Hypothese gehabt hatte. Überraschungen seien schließlich immer möglich. Damit relativiert der Realist aber die Gültigkeit des Schlusses auf die beste Erklärung und setzt sich dem Einwand von Stanford aus: Wenn es vor 1956 ungewiss war, dass die beste Erklärung auch gut genug ist, warum sollte dies danach anders sein, bloß weil eine konkurrierende Hypothese eliminiert wurde? Um darauf zu antworten, muss der Realist plausibel machen, dass der Test von 1956 von größerer Aussagekraft ist als frühere Tests der Neutrino-Hypothese.

Ich habe im vorherigen Abschnitt verschiedene Wege untersucht, die besondere Signifikanz des Reines-Cowan-Experiments zu charakterisieren und bin zum Schluss gekommen, dass dies nur dann vollständig gelingt, wenn man auf Überlegungen zur kausalen Rolle des Neutrinos zurückgreift. Damit ist aber klar, dass ein wissenschaftlicher Realismus, der den Entwicklungen der Teilchenphysik gerecht werden will, sich an einem kausalen Realismus, wie er hier dargelegt wurde, orientieren muss.

5 Zur Problematik des Teilchenbegriffs

Wer vom Neutrino als einem Objekt der *Teilchenphysik* spricht, könnte den Anschein erwecken, er hänge einer klassisch-atomistischen Metaphysik an, die mit der modernen Physik nicht mehr kompatibel ist. Die Quantenmechanik hat bekanntlich die Vorstellung von klassischen Teilchen, die sich auf eindeutig festgelegten Trajektorien bewegen und via lokalen Prozessen miteinander interagieren, als unhaltbar erwiesen. Darüber hinaus zeigt etwa das Phänomen der Neutrino-Oszillation, dass auch innere Freiheitsgrade wie der Neutrino-Flavour nicht-klassisches Verhalten aufweisen können. Neutrinos sind also keine Teilchen im klassischen Sinn.⁶

Trotzdem ist die kausale Rolle, die in der vorherigen Diskussion so sehr betont wurde, unübersehbar teilchenartig: Das Neutrino verursacht einen lokalen Effekt in einem Detektor. Entspricht dies nicht genau wieder der überholten Vorstellung lokal interagierender klassischer Teilchen? Nicht ganz. Während die klassische Vorstellung von einer durchgängig *lokalisierten* Entität ausgeht, ist hier bloß *Lokalisierbarkeit* erforderlich. Auf eine Aussage über die Lokalisiertheit des Zustandes *vor* der lokalen Manifestation wird verzichtet.

Neben dem raumzeitlichen Aspekt hat der Begriff der Lokalisierbarkeit auch einen kausalen Aspekt. Dieser stand beim besprochenen Neutrino-Experiment sogar eindeutig im Vordergrund: Entscheidend war nicht, *wo* genau innerhalb des Detektors sich das Neutrino lokalisierte und den inversen β -Zerfall bewirkte, entscheidend war, *dass* es dies tat. Diese Hervorhebung der kausalen Rolle des Neutrinos gegenüber seinen raumzeitlichen Eigenschaften erlaubt es, dem Neutrino Realität zuzusprechen, auch wenn man es nicht als Teilchen bezeichnen will.

Eine solche konzeptuelle Trennung von Lokalität und Kausalität bringt natürlich ihre eigenen Probleme mit sich. Die Frage, wie es zu verstehen ist, dass eine nicht-lokalisierte Entität eine lokale Wirkung hat, erfordert noch weitere Arbeit in der Theorie der Kausalität. Insofern die oben präsentierte Fallstudie gezeigt hat, dass die kausale Rolle des Neutrinos unabhängig von seiner Lokalisiertheit eine zentrale Bedeutung hat, mag sie als Motivation dienen, diese Richtung weiter zu verfolgen.

Beim Übergang von der Quantenmechanik zur Quantenfeldtheorie sind weitere Abstriche am

⁶Neben den in Abschnitt 1 diskutierten Problemen liegt hier der Hauptgrund für das Ersetzen der Bezeichnung „Entitätenrealismus“ durch „kausaler Realismus“. Der Entitätenrealismus wird nämlich oft mit einer überholten atomistischen Metaphysik assoziiert, besonders wenn man ihn als Gegenposition zum Strukturenrealismus auffasst. Wie in diesem Abschnitt gezeigt wird, ist der kausale Realismus durchaus mit nicht-klassischen Ontologien kompatibel und steht somit auch nicht in Opposition zum Strukturenrealismus.

klassisch-teilchenartigen Modell des Neutrinos (und ähnlicher Entitäten) vorzunehmen. Verschiedene theoretische Resultate sprechen gegen eine Teilchen-Interpretation der QFT, und es ist kaum anzunehmen, dass in einer fundamentalen Theorie der Materie noch in *irgendeiner* Weise von Teilchen die Rede sein wird (zu den Problemen einer Teilcheninterpretation der QFT vgl. den Beitrag von Kuhlmann Abschn. 4; zu den diversen Teilchenbegriffen der heutigen Physik vgl. den Beitrag von Falkenburg sowie Falkenburg 2007, Kap. 6).

Sollte uns dies nicht daran hindern, Neutrinos und andere teilchenartige Objekte als real zu klassifizieren? Zur Beantwortung dieses Einwands ist zunächst auf ein allgemeines Charakteristikum der aktuellen Realismusdebatte hinzuweisen: Insofern die Diskussion sich um den *wissenschaftlichen* Realismus dreht, wird ein Realismus bezüglich der Gegenstände unserer Alltagserfahrung als unproblematisch angesehen. Richard Boyd veranschaulicht diese Grundannahme folgendermaßen:

Betrachten wir beispielsweise den Tropenfischrealismus – die Lehre, dass es wirklich tropische Fische gibt; dass die kleinen Bücher, die man dazu in Zoohandlungen kauft, ihr Aussehen, ihr Verhalten, ihre Nahrungs- und Temperaturbedürfnisse usw. einigermaßen zutreffend beschreiben; und dass die Fische diese Eigenschaften weitgehend unabhängig von unseren Theorien über sie haben. Dies ist eine ziemlich eindeutige Lehre, aber sie entspricht so sehr dem gesunden Menschenverstand, dass sie philosophisch nicht besonders wichtig erscheint. Warum ist die analoge Lehre über die Wissenschaft eine philosophische Lehre?

Die Antwort ist, dass es – abgesehen vom Skeptizismus bezüglich der Außenwelt – keine philosophischen Argumente gegen den Tropenfischrealismus gibt, während gegen den wissenschaftlichen Realismus wichtige philosophische Einwände erhoben wurden. (Boyd 2002, Abschn. 1, Übersetzung M. E.)

Nun sind aber die Objekte, bezüglich derer ein Realismus als unproblematisch angesehen wird (Tropenfische und dergleichen), gerade *nicht* fundamental in dem Sinn, dass sie Gegenstände einer fundamentalen Theorie der Materie wären. Wenn man diese weitgehend unkontroverse Grundannahme der Realismusdebatte akzeptiert, dann ist klar, dass aus der bloßen Tatsache, dass Neutrinos keine fundamentalen Entitäten sind, noch nicht folgt, dass es sie nicht gibt.

Noch ein weiterer Aspekt der aktuellen Debatte spricht dafür, auch Entitäten als real anzuerkennen, die wahrscheinlich in zukünftigen Theorien nicht mehr explizit auftreten werden. Die von Psillos (1999, Kap. 5 und 6) ausgearbeitete „*divide-et-impera*-Strategie“ hält

fest, dass, wenn eine alte Theorie verworfen und durch eine neuere ersetzt wird, nicht zwingend alle Aussagen der alten Theorie ungültig werden, sondern dass, insofern die alte Theorie empirisch erfolgreich war, gewisse ihrer Bestandteile in die neue Theorie übernommen werden, nämlich diejenigen, die für den Erfolg der alten Theorie wesentlich waren:

Wenn die *divide-et-impera*-Strategie korrekt ist, dann sind die spezifischen theoretischen Bestandteile, die zum empirischen Erfolg der verdrängten Theorie beigetragen haben, typischerweise diejenigen, die in die nachfolgende Theorie übernommen werden (freilich manchmal nur als Grenzfälle der relevanten Bestandteile der verdrängenden Theorie). (Psillos 1999, S. 110, Übersetzung M. E.)

Sollte also dereinst das Standardmodell der Teilchenphysik durch eine grundlegendere Theorie ersetzt werden, so ist anzunehmen, dass die hier besprochenen Aussagen über Neutrinos diesen Übergang in irgendeiner Form überdauern werden, da sie wesentlich zum empirischen Erfolg des Standardmodells beigetragen haben.

Nun ist freilich Psillos' Strategie nicht unumstritten. Zum einen scheint oft erst *nach* einem Theorienwechsel erkennbar zu sein, welche Teile der alten Theorie wirklich zum Erzielen ihres empirischen Erfolgs nötig waren und welche entbehrlich sind. Dabei besteht die Gefahr, dass man rückblickend gerade diejenigen Bestandteile der alten Theorie als wesentlich bezeichnet, die in der neuen Theorie erhalten bleiben, wodurch die *divide-et-impera*-Strategie zirkulär würde (Stanford 2006, Kap. 7). Zum anderen birgt die abschließende Klammerbemerkung im obigen Zitat von Psillos einiges an Diskussionsstoff. Es ist in vielen Fällen alles andere als trivial, die den Theorienwechsel überdauernden Teile der alten Theorie als Grenzfall der neuen Theorie wiederzugewinnen (vgl. Scheibe 1997 und 1999). Die Behauptung, dass dies, wenn schon nicht in der Praxis, so doch *im Prinzip* immer möglich sei, ist schwer zu belegen. Deshalb kann bezweifelt werden, dass die von Psillos postulierte Kontinuität tatsächlich besteht.

Aus diesen beiden Problemen, denen sich Psillos' Strategie gegenüberstellt, lassen sich zusätzliche Argumente für den kausalen Realismus gewinnen, die hier nur ganz kurz angedeutet werden können: Was das erste Problem betrifft, so liefern die in diesem Kapitel ausgeführten Überlegungen zu den kausalen Rollen theoretischer Entitäten einen vielversprechenden Kandidaten für ein Kriterium, das die Unterscheidung zwischen notwendigen und entbehrlichen Bestandteilen einer Theorie erlaubt, schon bevor die nachfolgende Theorie bekannt ist.

Die Debatte rund um das zweite Problem kann der kausale Realist mit Gelassenheit verfolgen: Falls tatsächlich die wesentlichen Teile einer alten Theorie als Grenzfall in der neuen Theorie enthalten sind, so ist, wie oben beschrieben, die Realität der betreffenden Entitäten gesichert. Sollte sich hingegen die Grenzfall-Relation zwischen alter und neuer Theorie als illusorisch erweisen, so fällt der in diesem Abschnitt thematisierte Einwand gegen den kausalen Realismus ohnehin in sich zusammen, da dann nicht mehr behauptet werden kann, eine Theorie sei fundamentaler als eine andere. Während sich also in einem solchen Rahmen die Frage nach der *Fundamentalität* von Theorien oder theoretischen Entitäten nicht mehr stellt, ist die Frage nach der *Realität* solcher Entitäten immer noch virulent, und der kausale Realismus ist ein erfolgversprechender Ansatz zu ihrer Beantwortung.

Literatur

- Boyd, Richard (2002): „Scientific realism“. In: E. N. Zalta (Hg.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2002 Edition).
 <<http://plato.stanford.edu/archives/sum2002/entries/scientific-realism/>>.
- Cartwright, Nancy (1983): *How the laws of physics lie*. Oxford: Oxford University Press.
- Cartwright, Nancy (1989): *Nature's capacities and their measurement*. Oxford: Oxford University Press.
- Chakravartty, Anjan (2007): *A metaphysics for scientific realism: knowing the unobservable*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Chakravartty, Anjan (2008): „What you don't know can't hurt you: realism and the unconceived“. *Philosophical Studies* 137, S. 149-158.
- Crane, H. Richard (1948): „The energy and momentum relations in the beta-decay, and the search for the neutrino“. *Reviews of Modern Physics* 20, S. 278-295.
- Falkenburg, Brigitte (2007): *Particle metaphysics: a critical account of subatomic reality*. Berlin: Springer.
- Fermi, Enrico (1934): „Versuch einer Theorie der β -Strahlen. I“. *Zeitschrift für Physik* 88, S. 161-177.
- Franklin, Allan (2004): *Are there really neutrinos? An evidential history*. Boulder (Colorado): Westview Press.
- Hacking, Ian (1996): *Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaften*. Übersetzt von Joachim Schulte. Stuttgart: Reclam. (Originalausgabe: *Representing and intervening: introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge University Press, 1983.)

- Jensen, Carsten (2000): *Controversy and consensus: nuclear beta decay 1911-1934*. Basel: Birkhäuser.
- Pais, Abraham (1986): *Inward bound: of matter and forces in the physical world*. New York: Oxford University Press.
- Pauli, Wolfgang (1984): „Zur älteren und neueren Geschichte des Neutrinos“. In: W. Pauli: *Physik und Erkenntnistheorie*. Braunschweig: Vieweg. S. 156-180.
- Pontecorvo, Bruno (1946): „Inverse β process“. Report PD-205 (National Research Council of Canada, Division of Atomic Energy). Wieder abgedruckt in K. Winter (Hg.) (2000): *Neutrino physics*. Zweite Auflage. Cambridge: Cambridge University Press. S. 23-28.
- Post, Heinz (1975): „The problem of atomism“. *The British Journal for the Philosophy of Science* 26, S. 19-26.
- Psillos, Stathis (1999): *Scientific realism: how science tracks truth*. New York: Routledge.
- Psillos, Stathis (2002): „Simply the best: a case for abduction“. In: A. Kakas u. F. Sadri (Hgg.): *Computational logic: logic programming and beyond. Essays in honour of Robert A. Kowalski. Part II*. Berlin: Springer. S. 605-625.
- Reines, Frederick et al. (1960): „Detection of the free antineutrino“. *Physical Review* 117, S. 159-174.
- Reines, Frederick (1996): „The neutrino: from poltergeist to particle“. *Reviews of Modern Physics* 68, S. 317-327.
- Resnik, David B. (1994): „Hacking’s experimental realism“. *Canadian Journal of Philosophy* 24, S. 395-412.
- Scheibe, Erhard (1997): *Die Reduktion physikalischer Theorien: ein Beitrag zur Einheit der Physik. Teil I: Grundlagen und elementare Theorie*. Berlin: Springer.
- Scheibe, Erhard (1999): *Die Reduktion physikalischer Theorien: ein Beitrag zur Einheit der Physik. Teil II: Inkommensurabilität und Grenzfallreduktion*. Berlin: Springer.
- Stanford, P. Kyle (2006): *Exceeding our grasp: science, history, and the problem of unconceived alternatives*. New York: Oxford University Press.
- Suárez, Mauricio (2008): „Experimental realism reconsidered: how inference to the most likely cause might be sound“. In: S. Hartmann, C. Hofer u. L. Bovens (Hgg.): *Nancy Cartwright’s philosophy of science*. New York: Routledge. S. 137-163.
- Sutton, Christine (1992): *Spaceship neutrino*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Van Fraassen, Bas C. (1980): *The scientific image*. Oxford: Clarendon Press.
- Woodward, James (2003): *Making things happen: a theory of causal explanation*. Oxford: Oxford University Press.