

**Philosophisches Seminar der Universität Hamburg
Prof. Dr. Ulrich Gähde
Hauptseminar WS 2004/5: Modelle in der modernen
Wissenschaftstheorie**

Seminararbeit

Eckehard Seidl

**Nancy Cartwright:
Models and the limits of theory**

Eine Rekonstruktion und Kritik

Zusammenfassung

Cartwrights empiristische Sicht der Wissenschaft wird rekonstruiert. Ihre These der *dappled world* erweist sich am Beispiel ihrer Fallstudie der BCS-Theorie als Hindernis für die vollständige Erfassung der Erklärungswirkung komplexer Theorien.

Inhalt

Einleitung	1
Modelle	4
Arten von Modellen	4
Interpretative Modelle	6
Repräsentative Modelle	9
Modelle und Theorien	12
Theorien	14
Gegen die übliche Sichtweise	14
Nomologische Maschinen und <i>Capacities</i>	17
Abstraktion und Empirismus	22
Grundsätzliche Beschränkung	25
Fallstudie Supraleitung	30
Übersicht	30
Modelle der Quantenmechanik	34
Bloch-Modell	40
BCS-Modell	44
Schlussfolgerungen	51
Abbildungen	54
Literatur	54

Einleitung

Der Aufsatz *Models and the limits of theory: quantum Hamiltonians and the BCS model of superconductivity* [Cartwright 1999a]¹ ist in einem Sammelband mit dem Titel *Models as Mediators* [Morgan / Morrison 1999] erschienen. Dass Modelle weder Teil von Theorien noch Teil der Erfahrungswelt, sondern Vermittler sind, entspricht Cartwrights wissenschaftstheoretischer Sicht.² Sie hat Modelle schon 1983 in ihrem Buch *How the laws of physics lie* als das eigentliche Mittel der Wissenschaft beschrieben. Nach ihrer Meinung gelten wissenschaftliche Gesetze nicht in der Wirklichkeit, sondern nur für Modelle:

When we present a model of a phenomenon, we prepare the description³ of the phenomenon in just the right way to make a law apply to it. [1983, 157]

Ein Phänomen wird durch eine Theorie erklärt, wenn ein Modell des Phänomens zu der Theorie passt:

To explain a phenomenon is to find a model that fits it into the basic framework of the theory ... [1983, 152]

Wie Modelle bei wissenschaftlichen Erklärungen die Welt repräsentieren und die Theorie interpretieren, wird in ihrem Aufsatz genauer behandelt.

Auf Cartwrights Darstellung der Weiterentwicklung des Modellbegriffs in der Wissenschaftstheorie und in ihrer eigenen Anschauung soll hier nicht weiter eingegangen werden.⁴ Wichtig ist, dass sie sich nicht nur von der syntaktischen sondern auch von der semantischen Sicht von Theorien abgrenzt. Im Gegensatz

¹ Referenzen werden in eckigen Klammern angegeben und verweisen auf das Literaturverzeichnis ab S. 54. Bei Referenzen auf Cartwright wird im Folgenden der Name weggelassen, bei Referenzen auf den bezogenen Aufsatz steht nur die Seitennummer.

² Der Sammelband enthält auch Aufsätze, die Cartwrights Position kritisieren. Z. B. schreibt Morrison [1999, 44]:

... claims to descriptive accuracy cannot be drawn along the axis that supposedly distinguishes theoretical from phenomenological models ...

³ Cartwright [1983, 15 u. a.] unterscheidet in *How the laws of Physics lie* zwischen *unprepared description* und *prepared description* von Phänomenen, wobei der Übergang von *unprepared* zu *prepared* von einer Theorievorstellung geleitet ist und sich unvermeidlich von einer wahren Beschreibung entfernt:

To get from a detailed factual knowledge of a situation to an equation, we must prepare the description of the situation to meet the mathematical needs of the theory. Generally the result will no longer be a true description.

Diese Sicht ist im vorliegenden Aufsatz durch die Unterscheidung von *ad hoc* und *erklärenden* Theorien [263] und das Bild der *nomological machine* [253] ersetzt.

⁴ Über Cartwrights veränderte Sichtweise schreibt Gähde [2005, 11-12] u. a.:

The crucial point in this modified view is that modelling does not necessarily have to be theory-driven.

Weitere Literatur hierzu laut Gähde [2005, 1, Anm. 2]: Bailer-Jones [2005].

zur semantischen Sicht betrachtet sie Modelle nicht als Teil von Theorien, sondern als Vermittler zwischen Theorien und Welt:

I want to defend Morrison's view of models not as constituting these theories but as mediating between them and the world. [242]

Modelle sind dabei nicht eine Veranschaulichung und sie sind auch nicht etwa realistischer als Theorien. Für Cartwright sind sie spezifischer Teil eines *simulacrum account* wissenschaftlicher Erklärung:

In order to stress this 'anti-realistic' aspect of models, I call my view of explanation a 'simulacrum' account. The second definition of 'simulacrum' in the Oxford English Dictionary says that a simulacrum is 'something having merely the form or appearance of a certain thing, without possessing its substance or proper qualities'. This is just what I have been urging that models in physics are like. [1983, 152-3]

Zum leichteren Verständnis des Aufsatzes ist es nützlich, Cartwrights Zielsetzung und Grundeinstellung zu bedenken. Sie macht sehr grundsätzliche Aussagen:

My own research right now is not primarily concerned with economics or with physics or with any other single discipline from within. It is concerned rather with how to get the most out of our scientific knowledge as a whole. [1999b, 18]

Sie sieht die Welt als sehr vielgestaltig an:

The metaphysical picture ... is an Aristotelean belief in the richness and variety of the concrete and particular. Things are made to look the same only when we fail to examine them too closely. [1983, 19]

Sie sieht sich selbst unter Verweis auf Duhem als eher „englische“ Denkerin:

The English mind ... holds thousand different details all at once, without imposing much abstract order or organization. [1983, 19]

Und sie warnt mit Neurath⁵ vor der Illusion eines umfassenden Systems der Wissenschaft.

Sie geht aus von den naiven Begriffen von Phänomen, Modell und Theorie, wobei Probleme, wie etwa die Theoriebeladenheit von Beobachtungen, zunächst nicht wichtig sind. Phänomene sind Beobachtungstatsachen, Theorien sind abstrakte Behauptungen mit Wahrheitsanspruch und Modelle stehen dazwischen als Abstraktionen von Phänomenen und Konkretisierungen von Theorien. In der Folge entwickelt sie daraus dann völlig eigene Vorstellungen.

Cartwright ist Empiristin:

Ideas come immediately from experience. [1989, 3]

Sie grenzt sich von anderen Empirismen ab:

I reject the conventional categories of British empiricism and turn instead to more ancient ones. A concept like Aristotle's notion of *nature* is far more suitable than the concepts of *law*, *regularity* and *occurent property*⁶ to describe the kind of know-

⁵ Siehe S. 14 Cartwright [1996b, 6] über Neurath.

⁶ Siehe dazu Anm. 35, S. 21

ledge we have in modern science: knowledge that provides us the understanding and the power to change the regularities around us and produce the laws we want. [1999b, 78]

Diese Sicht wird von ihr [1989, 3 u. 5] auch als operationalistisch⁷ bezeichnet. Sie lehnt Theorien nicht ab, versteht sie aber anders als die herkömmliche Sicht. Die in Anlehnung an Aristoteles so bezeichnete *Natur* von Dingen, die uns Erklärungen und gezielte Veränderungen ermöglicht, bezeichnet sie als *capacities*. Diese sind der Gegenstand von Theorien.

Die Hauptthese des Aufsatzes ist, dass Theorien grundsätzlich in ihrer Reichweite begrenzt sind:

My principal thesis is ... that the way our fundamental theories get applied ... puts serious limits on what we can expect them to do. [245]

Die Welt sei eine *dappled world*⁸, in der es nur unter bestimmten Umständen Bereiche gesetzmäßigen Verhaltens gebe.

Die These der *dappled world* muss prinzipiell empirisch prüfbar sein, so dass der anschließenden Fallstudie besondere Bedeutung zukommt. Cartwright untersucht *quantum Hamiltonians*⁹ and the BCS model of superconductivity. Sie bezieht sich dabei auf die Erklärung der Supraleitung durch Bardeen, Cooper und Schrieffer [1957].

Es zeigt sich dabei nach meiner Meinung, dass Cartwright die Erklärungswirkung der BCS-Theorie nicht vollständig erfassen kann. Um die dafür verantwortlichen inneren Probleme von Cartwrights Sicht zeigen zu können, soll zunächst versucht werden, die Rolle von Modellen und Theorien in dieser Sichtweise zu rekonstruieren. Dies soll nur der Analyse ihrer Vorstellungen dienen, wobei klar ist, dass Cartwright selbst ihre Ansichten wohl nicht derart formalisieren würde. Es geht mir nicht darum, Cartwrights empiristische Sicht mit einer anderen zu konfrontieren, sondern eine immanente Kritik zu versuchen.

Der Aufsatz wurde von Cartwright in ihr Buch *The dappled world* [1999b] eingearbeitet und in einen weiteren erläuternden Rahmen gestellt. Im Folgenden werden deshalb mehrfach Zitate aus diesem Buch verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit konnte aber kein wesentlich umfassenderes Literaturstudium stattfinden. Manche Ausführungen müssen deshalb einen hypothetischen Charakter haben, auch wenn das im Interesse einer leichteren Lesbarkeit nicht immer in der grammatikalischen Form zum Ausdruck gebracht worden ist.

Die angesprochenen physikalischen Theorien werden nur soweit zusätzlich erläutert, wie es für die wissenschaftstheoretische Argumentation erforderlich ist.

⁷ Siehe dazu Anm. 38, S. 25.

⁸ Siehe Anm. 41, S. 27.

⁹ *Hamiltonian* – Hamiltonoperator, Grundform einer physikalischen Theorie, siehe dazu „Modelle der Quantenmechanik“, S. 34.

Es sollen nun zuerst Modelle behandelt werden, dann Theorien und schließlich die Fallstudie über das BCS-Modell.

Modelle

Arten von Modellen

Cartwright beschäftigt sich in ihrem Aufsatz mit zwei Arten von Modellen:

- *Interpretative Modelle* interpretieren eine Theorie, indem sie deren abstrakte Terme in konkreter Form vermitteln.
- *Repräsentative Modelle* repräsentieren mögliche reale Situationen und Vorgänge.

Als Beispiel für ein interpretatives Modell nennt Cartwright u. a. die Gravitationskraft zwischen zwei großen Massen im leeren Raum als interpretatives Modell der Kraft für die Theorie des zweiten Newtonschen Gesetzes. Darauf werde ich bei der genaueren Behandlung der interpretativen Modelle noch näher eingehen. Ein Beispiel für ein repräsentatives Modell ist das BCS-Modell für das Phänomen der Supraleitung.

Beide Modellarten sind bei Cartwright im Allgemeinen mit Theorien verbunden:

- Ein interpretatives Modell interpretiert eine Theorie, indem es ein *Brückenprinzip* der Theorie demonstriert.
- Ein repräsentatives Modell einer realen Situation dient meist dazu, diese mit einer *phänomenologischen Theorie* zu belegen.

Über die Verbindung von Modell und Theorie wird unten noch mehr zu sagen sein. Cartwright ist der Meinung, dass Theorien nur mittels ihrer – interpretativen – Modelle zur Anwendung kommen können. Und auch eine theoretische Beschreibung von Phänomenen kann nur über ein – repräsentatives – Modell erfolgen. Im Idealfall leitet sich das repräsentative Modell aus fundamentalen Theorien her, indem es aus den interpretativen Modellen dieser Theorien aufgebaut ist. Dann ist das Ziel erreicht: Die fundamentalen Theorien werden bestätigt und die Phänomene werden erklärt.

Betrachten wir das am Beispiel des BCS-Modells für das Phänomen der Supraleitung¹⁰. BCS [1957] modellieren den supraleitenden Stoff als Festkörper, in dem sich die Elektronen, die den elektrischen Stromfluss tragen, unter der besonderen Bedingung tiefer Temperatur zu Paaren verbinden, so dass der Strom ohne Widerstand fließen kann. Weiter unten werden einige der vielfältigen Abstraktionen erläutert, die ausgehend von den realen Phänomenen für dieses Modell vorgenommen worden sind. Das folgende Schema zeigt den Zusammenhang zwischen diesem Modell und den verschiedenen Theorien:

¹⁰ Siehe dazu die Besprechung des Fallbeispiels ab S. 30.

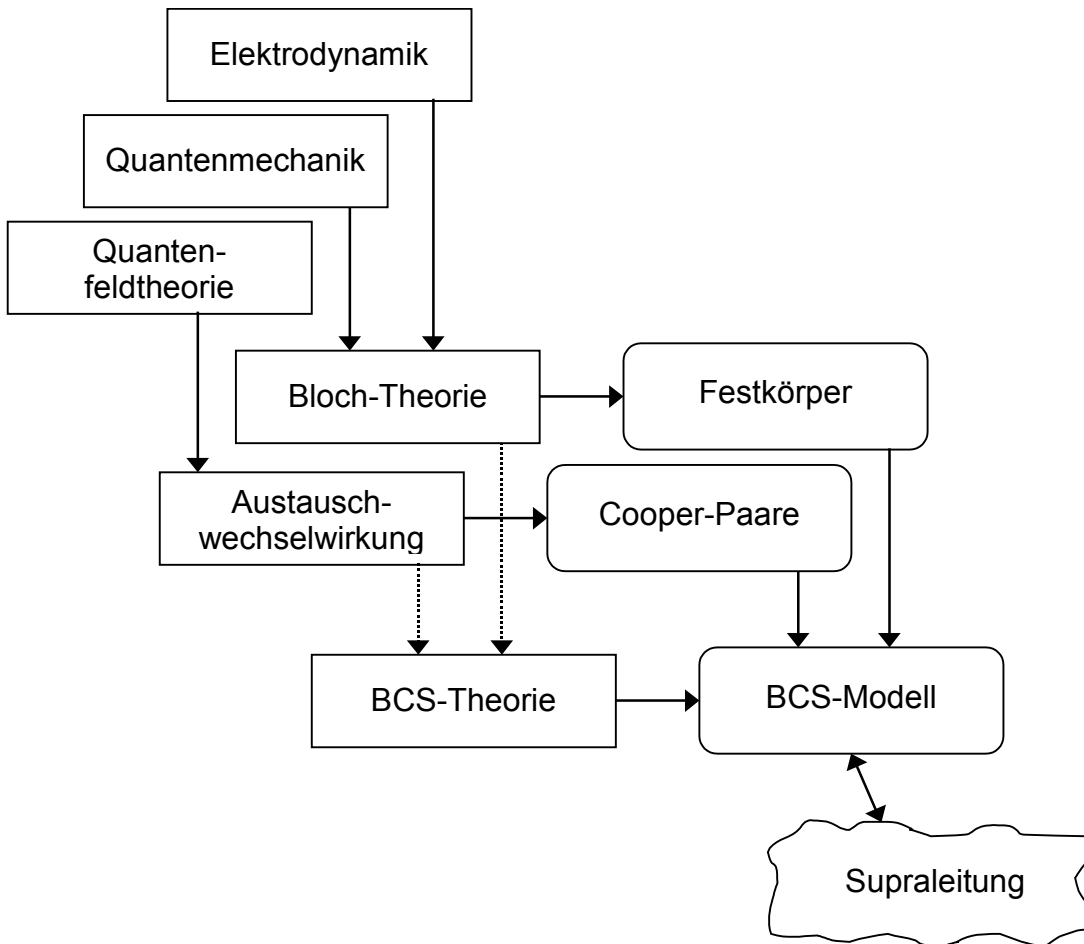


Abbildung 1: Schema des BCS-Modells und beteiligter Theorien

Dieses Schema¹¹ soll wie folgt verstanden werden: Das repräsentative BCS-Modell ermöglicht die Beschreibung der Supraleitung durch die BCS-Theorie. Es wird konstruiert aufgrund zweier interpretativer Modelle: Das Modell des Festkörpers ist ein interpretatives Modell der fundamentalen Theorien der Quantenmechanik und der Elektrodynamik und wird durch die Bloch-Theorie¹² beschrieben, die nach Cartwright [270] als Brückenprinzip der Quantenmechanik betrachtet werden kann. Das Modell der Cooper-Paare ist ein interpretatives Modell der fundamentalen Theorie der Quantenfeldtheorie und wird durch das Brückenprinzip der Austauschwechselwirkung beschrieben. Folgerichtig wird die BCS-Theorie, die das BCS-Modell beschreibt, von diesen Brückenprinzipien Gebrauch machen.

Hier soll zur Verdeutlichung schon erklärt werden, dass es nicht eine feste Eigenschaft eines Modells ist, interpretativ oder repräsentativ zu sein, sondern seine Rolle in einem betrachteten Zusammenhang. Ein Modell ist interpretativ

¹¹ Es kommt hier nur auf die grundsätzlichen Beziehungen an. Das BCS-Modell und seine Theorie werden unten ab S. 30 genauer besprochen.

¹² Siehe dazu unten, S. 40.

für eine fundamentalere Theorie und repräsentativ für einen konkreteren Sachverhalt. Ein ideales interpretatives Modell wird gleichzeitig repräsentatives Modell für mindestens ein Phänomen sein. Z. B. stellt das Brückenprinzip *Coulomb-Wechselwirkung* ein einfaches Modell des Wasserstoffatoms dar¹³.

Es gibt bei Cartwright noch andere Arten von Modellen für andere Zwecke, z. B. erwähnt sie „models as contextual tools for explanation and prediction“ [242] nach Margaret Morrison. Ferner gibt es außer Modellen und Theorien weitere Elemente des formalen Apparats. Dazu zählen Regeln für die Anwendung von abstrakten Begriffen, z. B. wie Kräfte zu kombinieren sind [1999b, 56]. Wissenschaftliche Methoden, wie die in diesem Aufsatz besonders wichtige Störungsrechnung¹⁴, betrachtet sie als rein mathematische Hilfsmittel ohne empirische Bedeutung.

Da es um die Reichweite von Theorien geht, die durch die interpretativen Modelle gegeben sein soll, stehen diese im Fokus des Aufsatzes [261].

Interpretative Modelle

Die abstrakten Begriffe einer Theorie müssen *konkret ausgestattet* werden, um sie auf reale Situationen anwenden zu können. Die herkömmliche Ansicht über Theorien bezeichnete diesen Vorgang als Interpretation und die interpretierenden Regeln als Brückenprinzipien¹⁵:

Bridge principles, according to Hempel, interpret our theoretical concepts in terms of concepts of which we have an antecedent grasp. [245]

Cartwright übernimmt diese Bezeichnungen, aber die Interpretation geschieht bei ihr durch Modelle, eben durch interpretative Modelle. Diese stellen Brückenprinzipien der Theorie dar, die abstrakte Begriffe der Theorie interpretieren:

... theories use abstract concepts: concepts that need fitting out in more concrete form. The models that do this are laid out within the theory itself, in its bridge principles. The received view¹⁶ called these *interpretative* models and I shall retain the name even though it is not an entirely accurate description of the function I think they serve. [243]

¹³ Siehe Wachter / Hoerber [2005, 318-322]: „Naives Wasserstoffatom“.

¹⁴ Siehe dazu S. 11.

¹⁵ In der üblichen Sicht sind Brückenprinzipien Aussagen, die Begriffe, die im Rahmen der betreffenden Theorie abstrakt sind, verbinden mit Begriffen, die im Rahmen der betreffenden Theorie Beobachtungsvokabular sind. Cartwright weist auf weitere Formen der Interpretation mittels Brückenprinzipien hin: Z. B. benutzen Operationalisten den Begriff für Regeln, wie Größen zu messen sind [264/5]. Laut Cartwright gibt es keine Auffassung von Theorie, die nicht Brückenprinzipien benötigt.

¹⁶ received view - im Folgenden mit „herkömmliche Ansicht“ oder „übliche Sicht“ übersetzt.

Als Beispiel dient ihr [246, 249-50, 256] das zweite Newtonsche Gesetz¹⁷. Es kann mathematisch auch als $F = m d^2x/dt^2$ geschrieben werden und verknüpft die Grundgrößen Ort x , Zeit t , Masse m und Kraft F . Der abstrakte Begriff der Kraft¹⁸ benötigt dann eine Interpretation. Bei Cartwright kann das nicht eine Interpretation für allemal sein, sondern es wird ein jeweils anwendungsspezifisches interpretatives Modell verwendet:

... the more concrete descriptions are the ones that use traditional mechanical concepts, such as ‚position‘, ‚extension‘, ‚mass‘ and ‚motion‘. ‚Force‘, then, is abstract relative to mechanics; and being abstract, it can only exist in particular mechanical models. [257]

Als ein solches interpretatives Modell für die Kraft im zweiten Newtonschen Gesetz kann ein Modell des Sonnensystems angesehen werden: Zwei Massen M (der Sonne) und m (z. B. der Erde) im Abstand r in einem sonst völlig leeren Raum, zwischen denen eine anziehende Kraft nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz $F = G m M / r^2$ wirkt. G ist die sogenannte Gravitationskonstante, die für unsere Welt universell ist. Dies ist ein Modell, denn es wird abgesehen von anderen vorhandenen Massen, von Form und Materialverteilung der beiden Körper, von im Raum vorkommendem Staub und Gas usw. Das zweite Newtonsche Gesetz besagt dann in der Folgerung, dass sich die beiden Massen auf Bahnen bewegen werden, deren geometrische Form man Kegelschnitt nennt, wozu insbesondere Ellipsen gehören. Mit Hilfe dieses interpretativen Modells bekommen wir also ein repräsentatives Modell des Sonnensystems, in dem die Massen auf Ellipsenbahnen einander umkreisen. Das ist ebenfalls „nur“ ein Modell, denn wir vernachlässigen dabei, dass die Bahnen bei Vorhandensein von mehr als zwei Massen von Ellipsen abweichen. Das können wir, wenn wir wollen, in einem genaueren repräsentativen Modell berücksichtigen, indem wir u. U. weitere interpretative Modelle heranziehen.

Zwei kompakte Massen in einem gewissen Abstand sind also ein interpretatives Modell für die Kraft im zweiten Newtonschen Gesetz. Das Brückenprinzip, für das dieses interpretative Modell steht, besteht im Newtonschen Gravitationsgesetz $F = G m M / r^2$. Wenn die Kraft zwischen den Massen diesem Gesetz folgt, dann besagt das zweite Newtonsche Gesetz, dass die Massen sich auf Ellipsenbahnen bewegen werden. Die empirisch bestimmte Größe dieser Bahnen im Verhältnis zu der empirisch bestimmten Größe der Massen ergibt die Konstante G .

Ein anderes interpretatives Modell für Kraft ist z. B. die Rückstellkraft einer Feder nach dem Hookeschen Gesetz $F = -k x$. Die Federkonstante k charakterisiert die Stärke der betreffenden Feder. Das zweite Newtonsche Gesetz

¹⁷ Ein von Isaak Newton ca. 1679 aufgestelltes Grundgesetz der klassischen Mechanik: Die Bewegungsänderung (Beschleunigung a) eines Körpers der Masse m ist der einwirkenden Kraft F proportional und ihr gleichgerichtet: $F = m a$ (dynamisches Grundgesetz bzw. Definition der Kraft). Nach: Wachter / Hoerber [2005, 6-8].

¹⁸ Zur Frage, warum Kraft hier der abstrakte Begriff ist, siehe unten Cartwrights Definition von Abstraktion, S. 22.

beschreibt dann, dass eine Masse an einer Feder harmonische Schwingungen ausführen wird. Das interpretative Modell ist also ein Körper an einer ideal federnden Befestigung. Dies ist ein Modell, weil abstrahiert wird von z. B. Reibungskräften und weil bei einer realen Feder bei größeren Auslenkungen dieses einfache Gesetz nicht mehr gilt. Das Brückenprinzip besteht dann in dem Hooke'schen Gesetz.¹⁹

Man erkennt, dass Cartwrights Brückenprinzipien viel gemeinsam haben mit den Spezialisierungen in der strukturalistischen Sicht. Es soll hier aber nicht an der Frage von Theoriestrukturen die Auseinandersetzung mit Cartwright gesucht werden. Aus ihrer Sicht sind Theoriestrukturen ein unwichtiges Detail, das von ihrem Hauptanliegen, die grundsätzliche Begrenztheit von Theorien überhaupt zu zeigen, nur ablenken würde. Auf diesem Gedankenweg will ich Cartwright bis in die Fallstudie hinein zunächst folgen.

Weitere interpretative Modelle für Kraft im zweiten Newtonschen Gesetz, wie z. B. ein Pendel, sind gebräuchlich. Für Cartwright ist es wichtig, dass das Gesetz nur über solche interpretativen Modelle zur Anwendung kommen kann. Abstrakte Begriffe können nur auf die Welt angewendet werden, wenn bestimmte konkrete Beschreibungen auch zutreffen:

... bridge principles ... attach physics concepts to the world. [255]

Cartwrights Brückenprinzipien sind ein Mittel unter anderen, um mit Hilfe von Theorien auf die Welt einzuwirken:

Practically, bridge principles are a first step in what I emphasize as a sine qua non of good theory – the use of theory to effect changes in the world. [255]

D. h. bei Cartwright kann eine Theorie nur durch Brückenprinzipien und interpretative Modelle ihre Aufgabe erfüllen.

Umso naheliegender wäre es, diese interpretativen Modelle als Teil der Theorie zu betrachten. Eine klare Trennung von Modellen und Theorie tritt nur ein, wenn interpretative Modelle prinzipiell verschiedenen Theorien zur Verfügung stehen. Das ist dann möglich, wenn die interpretativen Modelle nicht die Theorien, sondern die abstrakten Begriffe in Theorien interpretieren, und so will Cartwright verstanden werden.

¹⁹ Genau genommen ist bei Cartwright weder das interpretative Modell, noch das damit verbundene Spezialgesetz, sondern die Verbindung zwischen ihnen als Brückenprinzip zu verstehen [273-4]. Um die Darstellung nicht unnötig zu komplizieren, wird im Folgenden jedoch das einem interpretativen Modell zugeordnete Spezialgesetz als Brückenprinzip angesprochen. Unter einem Brückenprinzip ist dann bei Cartwright im Allgemeinen ein formaler Ausdruck zu verstehen, der einen abstrakten Begriff durch relativ konkretere Begriffe ersetzt. Es ist typisch für ein Brückenprinzip, dass dabei eine nur empirisch zu bestimmende Konstante auftritt.

Repräsentative Modelle

Die repräsentativen Modelle stellen reale Vorgänge dar, es sind

... models that we construct with the aid of theory to represent real arrangements and affairs that take place in the world – or could do so under the right circumstances. [242]

In dieser Formulierung werden die beiden Seiten der repräsentativen Modelle genannt, zur Theorie hin und zur Welt hin:

- Sie werden *mit Hilfe von Theorien* konstruiert.
- Sie *repräsentieren mögliche reale Vorgänge*.

Repräsentative Modelle werden mit dem Ziel aufgestellt, Voraussagen zu ermöglichen. Sie sind nicht Modelle irgendeiner der Theorien, die zu ihrem Bau beitragen:

... these (representative) models are not models of any of the theories that contribute to their construction. [244, Anm]

Cartwright geht davon aus, dass sich im typischen Fall ein repräsentatives Modell auf mehrere Theorien beruft. Das folgende Schema zeigt die vermittelnde Rolle der interpretativen und repräsentativen Modelle:

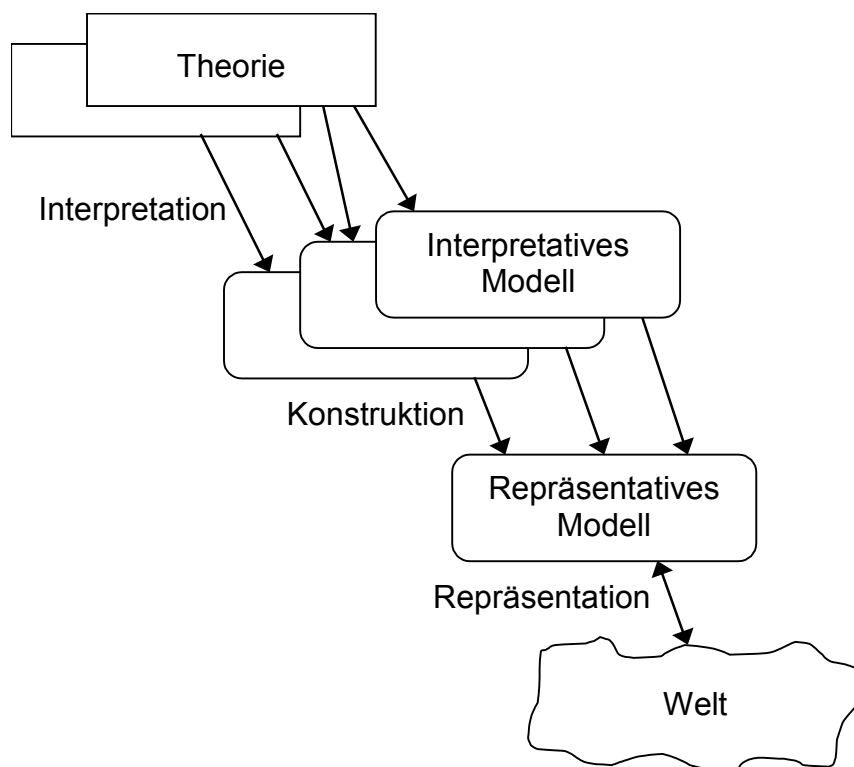


Abbildung 2: Schema der vermittelnden Rolle von Modellen

Das Schema zeigt den hypothetischen Idealfall²⁰, die konkreten Anwendungsfälle können jeweils ihre eigene Form haben, dazu mehr u. a. bei Behandlung des BCS-Modells. Für Cartwright ist jeder Einzelfall anders und eine Verallgemeinerung ist nur auf Kosten der Wirklichkeitsnähe möglich. Prinzipiell kann man sich eine Theorie aber vorstellen als eine Rezeptsammlung für erfolgreiche Repräsentationen der Welt.

Dieses Schema geht davon aus, dass passende Theorien vorhanden sind. Eine Wissenschaftstheorie wird aber vor allem den Prozess beschreiben wollen, wie solche Theorien entwickelt bzw. in Wechselwirkung mit der Erklärung von Phänomenen weiterentwickelt werden. Der typische Forschungsprozess verläuft nach Cartwright so, dass zuerst ein repräsentatives Modell der Phänomene entworfen wird, das zumindest teilweise noch seine Theorien sucht. Diese liefern über ihre Brückenprinzipien interpretative Modelle, aus denen das repräsentative Modell aufgebaut sein soll.

Man erkennt hier, dass Cartwright voraussetzt, dass Brückenprinzipien zwischen Theorien austauschbar sind und dass die verschiedenen Brückenprinzipien, die aufgrund des Modells herangezogen werden, miteinander vereinbar sind. Auf diese Probleme des Cartwrightschen Standpunktes wird später²¹ noch eingegangen.

Repräsentative Modelle werden zwar mit Hilfe von Theorien konstruiert, aber das heißt nicht, dass sie aus Theorien ableitbar sind. Wie wird die Verbindung zu den in Aussicht genommenen erklärenden Theorien hergestellt? Woher wissen wir, welche Theorie welches System beschreibt? Wie nehmen wir die richtigen Modelle für unser Phänomen aus dem Vorrat der interpretativen Modelle? Das kann nach Cartwright nur ein kreatives Verfahren sein, das sich in einer erfolgreichen Beschreibung der Phänomene rechtfertigt. Bei einer Theorie ist die Konkretisierung ihrer abstrakten Begriffe schon angelegt in Form der Brückenprinzipien. Die entsprechenden interpretativen Modelle sind deshalb die Bauelemente repräsentativer Modelle. Die Auswahl der passenden interpretativen Modelle aber ist ein kreativer Prozess:

Physics is hard. Putting it to use – even at the most abstract level of description – is a great creative achievement. [243]

Cartwright meint hiermit z. B. den langwierigen Forschungsprozess, der für die Supraleitung rund 50 Jahre bis zu einem repräsentativen Modell mit der erklärenden BCS-Theorie dauerte, obwohl es sich nur um die passende Verwendung von Modellen aus dem Vorrat der nach Cartwrights Sicht vorhandenen interpretativen Modelle handelt.

Repräsentative Modelle erfordern und ermöglichen die kooperative Verwendung verschiedenster Theorien [243]:

This kind of creative and cooperative treatment is not unusual in physics, and the possibility of producing models that go beyond the principles of any of the theories

²⁰ Nicht dargestellt sind die mit den Modellen verbundenen speziellen Theorien.

²¹ Zur Persistenz siehe S. 19 und zur Additivität siehe S. 35.

involved in their construction is part of the reason that modern physics is so powerful. [244]

Man muss Wissen aller Art versammeln, über alle Theorien hinweg und auch Vermutungen außerhalb von Theorien [243-4]:

... the knowledge contained in the fundamental theories of physics can go [far] towards producing accurate predictive models when they are set to work cooperatively with what else we know or are willing for the occasion to guess. [245]

Dabei spielt der *Ansatz* eine große Rolle. Als *Ansatz* bezeichnet Cartwright mit dem deutschen Sprachgebrauch der Physik theoretische Annahmen, die nur durch empirische Daten gerechtfertigt werden:

... assumptions are imposed as an Ansatz, motivated but not justified, to be tried out and ultimately judged by the success of the theory ... [269]

Bei Erfolg in Form von zutreffenden Voraussagen wird zugleich die Theorie bestätigt, aber das ist nicht gleichbedeutend mit einer Erklärung des Phänomens. Eine Erklärung erfordert den Anschluss der Theorie des repräsentativen Modells an fundamentale Theorien.

Die fundamentalen Theorien können andererseits nicht direkt auf die Phänomene angewendet werden. Auch die einzelnen Elemente eines repräsentativen Modells, die aus interpretativen Modellen stammen, bezeichnen nicht getrennte physikalische Mechanismen:

Throughout quantum theory we regularly find bridge principles ... that do not describe physical mechanisms in this way. ... often the break into separable pieces is purely conceptual. [261]

Als Beispiel führt sie die Bloch-Theorie²² an, bei der eine hypothetische Zerlegung nach perfektem Kristall und Störungen erfolgt:

This is purely a division of the terms in a mathematical representation and does not match up with a separation of the causes into two distinct mechanisms. [262]

Das gilt allgemein bei Anwendung eines störungstheoretischen Ansatzes, wenn dieser nicht einer Analyse tatsächlicher Störungen folgt [262].

Die repräsentativen Modelle sind unverzichtbar, sie müssen eine echte Kooperation der theoretischen Prinzipien bewerkstelligen:

... it is not enough to count a description as a correct representation of the causes that it predicts the right effects; independent ways of identifying the representation as correct are required. [262]

Es liegt also nur dann eine richtige Repräsentation vor, wenn noch anders als nur mit dem empirischen Erfolg begründet werden kann, warum das repräsentative Modell eines Phänomens aus den betreffenden Elementen aufgebaut ist und warum die Theorie dieses Modells die entsprechenden Terme enthält. Nur dann betrachten wir die Theorie als Erklärung des Phänomens. Für Cartwright ist das nur dann gerechtfertigt, wenn die Theorie auf eine bestimmte Weise aufgestellt worden ist. Dieser *principled way* soll nun beschrieben werden.

²² Siehe Das Unterkapitel „Bloch-Modell“, S. 40.

Modelle und Theorien

Modelle als Vermittler müssen eine mindestens partielle Selbständigkeit gegenüber Theorien und Phänomenen haben, um vermitteln zu können. Wenn die Modelle als selbständig betrachtet werden, dann beeinflusst das auch die Auffassung von ihren Theorien. Cartwright verändert die herkömmliche Aufgabenteilung zwischen Theorie und Modell:

I want to argue for a different kind of separation. [242]

Cartwrights Standpunkt lautet in Kürze:

... the theory gives purely abstract relations between abstract concepts: it tells us the 'capacities' or 'tendencies' of systems that fall under these concepts. [242]

... theories ... do not generally represent what happens in the world; only models represent in this way, and the models that do so are not already part of any theory. [242]

... theories in physics ... provide help in making the world predictable ... [243]

The knowledge expressed in physics' fundamental principles provides a very powerful tool for building models of phenomena that we have never yet understood and for predicting aspects of their behaviour that we have never foreseen. [243]

Die entscheidende Formulierung scheint mir dabei zu sein:

... generally represent what happens in the world.

Das können Theorien nicht, sie sind zu abstrakt dafür, und Modelle, die das tun, können nach Cartwright nicht Teil einer Theorie sein, sonst könnten sie nicht repräsentieren. Auf welche Weise Modelle die Repräsentation leisten, wird unten²³ noch näher gezeigt werden. Durch die Aufstellung eines Modells ist aber der wesentliche Teil der Arbeit schon geleistet.

Im Allgemeinen haben die betrachteten interpretativen und repräsentativen Modelle eine zugeordnete Theorie. Gibt es Modelle ohne Theorien? Als ein solches Modell könnte man die *unprepared description* [Cartwright 1983, 15 u. a.] eines Vorgangs oder einer Situation ansehen, die noch nicht auf die Erstellung einer Theorie ausgerichtet ist. Der Einwand, dass es keine theoriefreien Beobachtungen gibt, würde insofern nicht treffen, als es nicht darum geht, dass überhaupt keine Theorie im Gebrauch ist, sondern nur darum, dass noch keine Theorie für das Modell in Aussicht genommen wäre. Aber diese Frage braucht hier nicht weiter diskutiert werden, weil Cartwright später und zumindest in diesem Aufsatz diese Vorstellung von *unprepared descriptions* nicht verwendet. Ihre repräsentativen Modelle haben alle eine Theorie, die allerdings nicht notwendigerweise erklärend oder *principled* ist.

Im Unterschied zu fundamentalen Theorien ist es üblich, eine Theorie wie die BCS-Theorie der Supraleitung, die einem repräsentativen Modell zugeordnet ist, das bestimmte reale Vorgänge beschreibt, als „phänomenologisch“ zu bezeichnen. Dabei werden aber die großen Unterschiede innerhalb dieser Klasse von Theorien nicht deutlich, wobei die Bezeichnung als phänomenologisch nur für

²³ Siehe das Kapitel „Abstraktion und Empirismus“ S. 22.

einen Teil dieser Theorien zutreffend erscheint. Cartwright [242] hat auch deshalb für die betreffenden Modelle statt „phänomenologisch“ den Begriff „repräsentativ“ gewählt.

Dabei geht es um zwei unterschiedliche Bedeutungen von „phänomenologisch“:

Hamiltonians that pick out the putative physical mechanisms are called ‚explanatory‘ as opposed to the ‚phenomenological‘ Hamiltonians, that merely produce quantum states with the right kinds of features. The principled-*ad hoc* distinction, by contrast, depends on having an established bridge principle that links a given Hamiltonian with a specific model that licenses the use of that Hamiltonian. [270-1]

Eine Theorie kann also

- *phänomenologisch* sein, wenn sie keinen Erklärungsanspruch erhebt, oder
- *erklärend*, wenn sie sich auf vermutete Erklärungen bezieht. Sie ist dann entweder
 - *ad hoc*, wenn sie sich nicht auf Brückenprinzipien beruft²⁴, oder
 - *principled*²⁵, wenn sie sich auf anerkannte Brückenprinzipien stützt.

wobei mit Erklärung gemeint ist:

... physical accounts of why certain kinds of situations have certain kinds of effects. [270]

Auf dieser Grundlage ordnet Cartwright einen Fall als phänomenologisch ein, den sie in dem als Ginzburg-Landau-Theorie²⁶ bekannten Vorläufer der BCS-Theorie vorliegen sieht:

A Hamiltonian can be admissible under a model – and indeed under a model that gives good predictions – without being explanatory if the model itself does not purport to pick out basic explanatory mechanisms. [271]²⁷

Damit ist Cartwright in Übereinstimmung mit der üblichen Einordnung solcher Theorien als phänomenologisch in der Physik. Interessant ist in diesem Fall, dass nach der Aufstellung der BCS-Theorie klar wurde, dass die Ginzburg-Landau-Theorie nur einen Spezialfall der BCS-Theorie darstellt. Die vorher phänomenologische Theorie wurde zu einer *principled* erklärenden Theorie. Das heißt, *phänomenologisch* zu sein ist nicht eine feste Eigenschaft einer Theorie, sondern bezeichnet ihren aktuellen Status. In Cartwrights Sicht haben Theorien keinen über ihren aktuellen Status hinausgehenden Anspruch.

²⁴ Nicht jedes repräsentative Modell ist aus interpretativen Modellen zusammengesetzt. Es kann auch repräsentative Modelle geben, die eine Theorie haben, die sich nicht auf Brückenprinzipien beruft. Siehe dazu im Kapitel „Grundsätzliche Beschränkung“, S. 25.

²⁵ *principled* - grundsätzlich. Im Folgenden wird der englische Wortlaut verwendet, um Cartwrights spezifische Ansicht zu kennzeichnen.

²⁶ Siehe S. 33.

²⁷ Dieses Zitat wird auf S. 44 in einem erklärenden Umfeld wiederholt.

Theorien müssen nicht einmal einen einheitlichen Status haben. Cartwright [269] stellt fest, dass die BCS-Theorie aus phänomenologischen, ad hoc und *principled* erklärenden Anteilen gemischt ist. Das ist der Grund, sie als Fallbeispiel zu untersuchen, sie ist eine „rich illustration“.

Aber zunächst geht es nun darum, Cartwrights Ansichten über Theorien an sich darzustellen.

Theorien

Gegen die übliche Sichtweise

Was nach Cartwrights Meinung unter einer Theorie zu verstehen ist, unterscheidet sich nicht so dramatisch von der üblichen Sichtweise, wie man es aufgrund ihres Buchtitels *How the laws of physics lie* [1983] vielleicht vermuten würde. Eine Theorie ist auch nach ihrer Meinung ein abstraktes Gebilde:

In the usual case it includes ‚principles‘ but not techniques, mathematical relations but little about the real materials ...[264]

Das Ziel bei der Aufstellung von Theorien ist auch nach Cartwright, empirische Vorhersagen zu machen, aber nach ihrer Meinung sind die Theorien dazu selbst nicht in der Lage:

Theory, as we generally reconstruct it, leaves out most of what we need to produce a genuine empirical prediction. [270]

Dazu brauche man Modelle und diese seien noch nicht in einer Theorie enthalten. Eine Theorie sei

... an abstract description for situations that are modelled concretely ... [270]

Eine Theorie ist nach Cartwright nicht, wie man vermuten könnte, eine Konstruktion, sondern eine Rekonstruktion:

Theory, after all, is a reconstruction. [264]

Der Unterschied besteht darin, dass der Aufstellung einer Theorie eine Modellbildung vorausgeht.

Auch bei Cartwright [265] sollen Theorien *wahr* sein. In der üblichen Sicht geschieht das durch *Gesetze*, die grundlegende Eigenschaften der Welt formulieren. Aber nach Cartwrights Meinung sind Gesetze nur ein *patchwork*, sie *lügen*, wenn sie irgendeine allgemeine Gültigkeit behaupten. Sie bezieht sich dabei auf Otto Neurath:

Neurath worked hard to get us to give up our belief in the system. ‚The system‘ for Neurath is the one great scientific theory into which all the intelligible phenomena of nature can be fitted, a unique, complete and deductively closed set of precise statements. Neurath taught: „The‘ system is the great scientific lie.“²⁸ [1999b, 6]

²⁸ Neurath [1935, 116].

Es gibt in diesem Sinne keine Gesetze zu entdecken, wir kommen über eine *conceptual contingency* nicht hinaus:

... we are not only condemned to conceptual contingency, but should be encouraged by the sober recognition of this fact consciously to refashion our concepts and our self-image as epistemic agents. [1995, 94]

Der Begriff *epistemic agents* soll betonen, dass Erkenntnisgewinn eine Tätigkeit ist. Bei dieser können wir bedingte Regelmäßigkeiten mit Hilfe von *nomologischen Maschinen* herstellen, was gleich noch ausführlich erläutert werden soll.

Die so begründeten Theorien sind *wahr* nur in dem Sinne, dass sie Erklärungen liefern, d. h. dass sie es ermöglichen, Modelle der Welt aufzustellen, die mehr oder minder sichere Voraussagen erlauben:

... at most a shared core of equations, concepts, and stories to be used by different physicists and different engineers in different ways to produce models that are of use in some way or another in manipulating the world. [255]

Cartwright stellt dies der üblichen Sicht gegenüber, zu der sie sowohl die syntaktische wie die semantische Sicht rechnet. Für beide sind nach ihrer Meinung Theorien wie *vending machines*, Automaten, die schon alles enthalten, was man über die Welt wissen kann. Man füttere sie nur noch mit den Randbedingungen einer konkreten Situation und schon werfen sie eine vollständige Beschreibung aus [245]. Die Theorie gelte universell, für den Einzelfall müsse man nach Giere die Theorie nur deidealisieren und Korrekturen anbringen [250]. Man brauche nur den intendierten Anwendungsbereich spezifizieren, wenn es sich um die (deutschen) Strukturalisten handelt. [252]

Aber Cartwright meint, dass weder die Herstellung der Theorie eine Idealisierung, noch ihre Anwendung eine Deidealisierung ist. Die Universalität von Theorien sei eine unbegründete Behauptung, denn wenn die Theorie ein solcher universeller Automat wäre, müssten die Anpassungen zu den Modellen hin aus der Theorie (oder anderen Theorien) folgen:

... the corrections needed to turn the models that are provided by theory into models that can fairly accurately represent phenomena in the physical world are seldom, if ever, consistent with theory, let alone suggested by it. [251]

Diese Frage ist für Cartwright zentral, weil sie eben gerade die Universalität der Theorie bestreitet:

I want to consider real systems as we encounter them. And as we encounter them they are usually subject to all sorts of perturbing influences that do not appear in any way whatsoever to fit the models for perturbing influences available in ... theory. ... We observe a large number of ... systems, for which we have never found sufficient similarities to any theoretical model. [252]

Sie bestreitet das also nicht aus ideologischen, sondern aus empirischen Gründen: Die Wissenschaft sei nicht so. Zwar verfolgen viele Wissenschaftler selbst tatsächlich imperialistische Bestrebungen, aber ohne Erfolg:

Physics and economics, both disciplines with imperialist tendencies, ... (fail) to succeed in these aspirations. [1999b, 1]

Daher auch die Bedeutung der Fallstudie. So gehe Wissenschaft nicht vor, sie leite nicht aus Theorien ab, sondern sie sei kreativ. Das ist der entscheidende

Punkt: die übliche Wissenschaftstheorie sowohl der syntaktischen wie auch der semantischen Sicht eliminiere die tatsächliche Kreativität der Wissenschaften:

... the whole point of the tradition that generates these two views is the elimination of creativity – or whim – in the use of theory to treat the world. That was part of the concept of objectivity and warrant that this tradition embraced. [247]

Cartwright wirft dieser Wissenschaftstheorie vor, dass sie fundamentalistisch voreingenommen sei:

It would be wrong to say, as a first easy description might have it, that these philosophers are not interested in what the world is like. Rather they are interested in a world that is not our world, a world of appearances, but rather a purer, more orderly world, a world which is thought to be represented ‚directly‘ by the theory’s fundamental equations. [255]

Sie bezeichnet sogar den ebenfalls empiristischen van Fraassen als verkappten Realisten [247]. Die erstaunliche Heftigkeit dieses Angriffs erscheint inhaltlich nicht berechtigt. Ein Vertreter der üblichen Sicht würde sicherlich nachweisen können, dass er die Kreativität der Wissenschaft beschreibt und allenfalls anders bewertet. Aber Cartwright sucht hier auch gar nicht nach Belegen, sondern argumentiert nach ihrer Ansicht immanent, man müsse die übliche Sichtweise nur bei ihrem Wort nehmen: Die beanspruchte erklärende Wirkung der Theorie trete nur dann ein, wenn ihre Anwendung, also das was Giere ihre Deidealisierung nennt, in der Theorie begründet sei. Das könne die Theorie aber nicht leisten. Die kritisierte Seite würde dem entgegenhalten können, dass eine Deidealisierung keine deduktive Ableitung ist und sein soll. Eben dadurch bestehe Raum für eine kreative Anwendung der Theorie.

Cartwright vertritt diese Sache mit einem solchen Nachdruck, weil es für ihre Sicht zwischen deduktivem Determinismus und *dappled world* keinen Mittelweg geben kann. Sie zitiert Giere [1984, 87] mit dem Beispiel des Pendelgesetzes²⁹ [252]:

(Giere) concludes: „The generalization, ‚all real pendulums satisfy Galileo’s law‘, is surely false. But the hypothesis that most real pendulums approximately satisfy the law might be true. This is really all that science requires.“

Sie weist dies zurück:

To the contrary, this hypothesis seems to me extremely unlikely. Only pendulums in really nice environments satisfy the law, even approximately ...

Und sie zieht den Schluss, um den es ihr in dem Aufsatz und in ihrem Buch geht:

... if the theory (on Giere’s own terms this means its collection of theoretical hypotheses) can be (even approximately) true only of real systems that resemble its models, the theory will be severely limited in its domain.

In Wahrheit handele es sich bei den Anwendungen einer Theorie gar nicht um Deidealisierungen, sondern um einzelne günstige geschickt hergestellte oder

²⁹ Galileis Pendelgesetz besagt, dass die Schwingungsdauer eines Pendels proportional zu seiner Länge und unabhängig von seiner Masse ist.

vorgefundene Konstellationen. Man habe dann eine nomologische Maschine, die sich so verhält, dass die Theorie zutrifft, und diese sei dann genau in dem einzig möglichen Sinn wahr, nämlich dass sich eine nomologische Maschine entsprechend verhält. [253]

Nomologische Maschinen und *Capacities*

Will man Cartwrights Begriff der nomologischen Maschine zuerst einmal umgangssprachlich erläutern, so kann man wohl sagen: Eine nomologische Maschine ist irgendeine reale Anordnung, die sich gesetzmäßig verhält. Am Beispiel von Galileis Pendelgesetz³⁰ [253] ist das ein (nicht zu kleines) Gewicht, das (von einer festen Aufhängung) an einem (dünnen) Faden herabhängt und (mit nicht zu großer Auslenkung in einer Richtung hin und her) schwingt.

Der Ausdruck *nomologisch* soll schlicht besagen, dass die Anordnung sich gesetzmäßig verhält. Nimmt man es genauer, dann ist *nomos* eine von Menschen gesetzte oder entdeckte Regel. Erst wenn man eine Regel installiert oder erkennt, kann man sie nutzen und eventuell in einer Theorie repräsentieren. Eine *nomologische* Maschine erfordert ein Subjekt, aber bei Cartwright fehlt eine Theorie des Erkenntnissubjekts³¹.

Der Ausdruck *Maschine* soll zwei Aspekte bezeichnen: erstens ist das Verhalten regelhaft und wiederholbar, zweitens ist die Anordnung in den meisten Fällen künstlich hergestellt oder zumindest aufrechterhalten. Soll z. B. eine Uhr aufgrund von Galileis Pendelgesetz als Zeitmessgerät dienen, ist ein ziemlich großer Aufwand notwendig: das Pendel muss dauernd in Gang gehalten werden, Längenänderungen wegen Temperaturschwankungen müssen kompensiert werden, das Gerät muss vor Erschütterungen und Luftströmungen geschützt werden usw.

Wenn man alle notwendigen Bedingungen erfüllt hat, dann hat man nicht mehr die Welt, sondern ein Modell. Die Beschreibung eines repräsentativen Modells ist ein Bauplan für eine nomologische Maschine:

... if what happens in the situation modelled is regular and repeatable, these representative models will look very much like blueprints for nomological machines. [1999b, 180]

Cartwrights Hauptthese kann auch so gefasst werden, dass der Lauf einer entsprechenden nomologischen Maschine die einzige Art ist, wie überhaupt ein Gesetz gelten kann:

All laws, whether causal or associational, probabilistic or deterministic, are transitory and epiphenomenal. They arise from – and exist only relative to – a nomological machine. [1999b, 121]

³⁰ Siehe Fußnote 29, S. 16.

³¹ Es scheint mir, dass es eine der Existenzgrundlagen des Empirismus ist, dass er durch die scheinbare Objektivität der Empirie die Probleme des Subjekts verschwinden lässt.

Cartwright definiert nomologische Maschinen in ihrem Buch *The Dappled World*:

What is a nomological machine? It is a fixed (enough) arrangement of components, or factors, with stable (enough) capacities that in the right sort of stable (enough) environment will, with repeated operation, give rise to the kind of regular behaviour that we represent in our scientific laws. [1999b, 50]

Die Welt ist von sich aus nur ausnahmsweise gesetzmäßig:

Sometimes God supplies the arrangements – as in the planetary systems – but very often we must supply them ourselves ... [1999b, 122]

Wir bauen nomologische Maschinen, wenn wir Situationen schaffen, in denen verlässliche Regeln gelten:

No matter how much knowledge we might come to have about particular situations, predictability in the world as it comes is not the norm but the exception. ... If we want situations to be predictable, we had better engineer them carefully. [1999b, 73]

Und andererseits gilt jedes Gesetz nur unter bestimmten Bedingungen:

... the laws of our exact sciences must all be understood with implicit *ceteris paribus* clauses in front. [254]

Cartwright weist besonders auf den Begriff der *Abschirmung* hin. Damit die nicht beherrschten Umstände überhaupt in den Stand von *ceteris paribus* Bedingungen zurückgedrängt werden können, muss man die betreffende Anordnung gegen sie abschirmen, denn die Theorie ist meist nicht in der Lage, die von ihr nicht ausdrücklich einbezogenen Faktoren zu berücksichtigen [254]:

The situation must not have extraneous factors that we have not got in the model. ... this is seldom achieved. For the theories we know, their descriptive capacities give out.

Die Abschirmung, das immer notwendige Herstellen der äußeren Bedingungen, verschwindet leicht aus der Aufmerksamkeit, wenn diese sich auf das Ziel fixiert, eine sich gesetzmäßig verhaltende Anordnung zu schaffen. Da gibt es ein Umfeld von Gebäuden, Kühlaggregaten, Vakuumpumpen, Stromversorgung usw., das oft das realisierte Modell weit an Umfang und Vielgestaltigkeit übertrifft. Diese Vorrichtungen beruhen auf unserem anderweitigen Wissen, sind also wiederum nomologische Maschinen. Letztendlich sind auch Grundprinzipien wie die Kausalität so begründet:

The causal laws we live under are a consequence – conscious or not – of the socio-economic machine that we have constructed. [1999b, 124]

Cartwright wendet sich gegen den Verdacht, dass es sich hierbei um eine mechanistische Sicht handelt:

Regular behaviour derives from the repeated triggering of determinate systems whose natures stay fixed long enough to manifest themselves in the resulting regularity. This feature does not point particularly to a machine analogy, though, in opposition to an organic one ... [1999b, 149]

Das heißt, wenn wir eine nomologische Maschine bauen, dann ist das eher die Herstellung einer günstigen Umgebung, quasi eines Biotops, in dem sich ein bestimmtes natürliches Verhalten entfalten kann.

Was aber ist nun gewonnen? Cartwright bemerkt selbst, dass sich die Frage stellt, ob sie nicht nur für die kausalen Ursachen von gesetzmäßigen Vorgängen den Begriff getauscht hat. Sie antwortet darauf mit einer *two-tiered ontology* [1999b, 124]. Offenbar haben nomologische Maschinen *reliability* und *persistence*, d. h. Verlässlichkeit und eine Fortdauer dieser Verlässlichkeit, beides Grundlagen von Kausalität. Die nomologische Maschine repräsentiere nun nicht die Ursachen selbst, sondern nur die Persistenz der Kausalstruktur:

I propose ... a distinction between questions about what reliably causes what in a given context and questions about the persistence of this reliability. ... the distinction between the causal structure and the nomological machine that gives rise to it ... [1999b, 124]

The machine that is responsible for the causal laws is not part of the cause of the laws' effects: it is the causes cited in those laws that ... ,bring about' or ,produce' the effects. [1999b, 130]

Damit ist das Problem aber nur halb behoben, es fehlt nun noch unausweichlich die Frage nach der Herkunft dieser Persistenz. Cartwright antwortet darauf mit einem an Aristoteles³² erinnernden Begriff, es sind die *capacities*, es ist die Natur der Dinge, die in einer nomologischen Maschine genutzt werden:

... we must learn about the basic capacities of the components; then we can arrange them to elicit³³ the regularities we want to see. [1999b, 124]

Für Cartwright sind es im Bereich der Wissenschaften nicht die Theorien, sondern die *capacities*, die man am ehesten als *real* bezeichnen könnte:

... when we associate a particular principle of change with a given structure or characteristic, we expect that association to be permanent, to last so long as the structure is what it is. Indeed it is this permanence of association that I underline by claiming that modern science still studies Aristotelian-style natures. [1999b, 81]

Cartwright hat den Begriff *capacity* mit ihrem Buch *Nature's Capacities and their Measurement* [1989] eingeführt, um die Aussagen von *How the Laws of Physics Lie* [1983] zu erweitern:

Science is measurement; capacities can be measured; and science cannot be understood without them. These are the three major theses of this book. The third thesis could be more simply put: capacities are real. But I do not want to become involved in general issues of realism, instrumentalism, or idealism. Rather, I want to focus on the special case of causes and capacities, and why we need them. [1989, 1]

Es geht tatsächlich nicht um allgemeine Aussagen. *Capacities* kann man nur einzelnen Konstellationen in Bezug auf einzelne Vorgänge zuschreiben. Sie verdeutlicht das zuerst an einem einfachen Beispiel. Man nehme an, man habe eine Theorie, die besagt, „Aspirin hilft gegen Kopfschmerzen“:

„Aspirins relieve headaches.“ This does not say that aspirins always relieve headaches, or always do so if the rest of the world is arranged in a particularly felicitous way, or that they relieve headaches most of the time, or more often than not.

³² Siehe dazu auch das Zitat [1999b, 78] auf S. 21.

³³ *elicit* - entlocken, herausbekommen

Rather it says that aspirins have the capacity to relieve headaches, a relatively enduring and stable capacity that they carry with them from situation to situation; a capacity which may if circumstances are right reveal itself by producing a regularity, but which is just as surely seen in one good single case. The best sign that aspirins can relieve headaches is that on occasion some of them do. [1989, 3]

Cartwright behandelt hier ziemlich systematisch die verschiedenen möglichen Geltungsansprüche von Theorien:

- always
- always, if the rest of the world is arranged in a particular way
- most of the time
- more often than not

Alle diese sind nach ihrer Meinung überzogen. Sie will damit nicht sagen, dass es nicht sinnvolle deterministische oder auch statistische Theorien geben kann, sie befasst sich in ihrem Buch ausführlich mit verschiedenen Formen theoretischer Aussagen, sondern sie will jeden Anspruch direkter kausaler Begründung durch eine Theorie zurückweisen.

Bei Cartwright können Theorien nur einen Beitrag zu einer Begründung leisten, den sie aus der Empirie gewonnen haben. Aus der Erfahrung, dass etwas auf eine bestimmte Weise geschehen ist, können wir aber nur ableiten, dass es vielleicht unter ähnlichen Umständen wieder geschehen wird, nicht dass es wieder geschehen muss. Das wird durch den Begriff *capacity* ausgedrückt. Theorien sind organisierte Sammlungen solcher Erfahrungen.

Die *capacities* erscheinen, wenn wir ein Phänomen beobachten und wenn wir es erfolgreich voraussagen. Schon die Beobachtung braucht ein Konzept, wenn sie überhaupt zu einer Voraussage beitragen können soll. Kann man dann etwas erfolgreich voraussagen, dann war dieses Konzept die Beschreibung einer *capacity*. In Cartwrights Sicht stehen *capacities* an der Stelle, an der sich in der herkömmlichen Sicht empirische Eigenschaften befinden:

For modern science what something really is – how it is defined and identified – and what it is in its nature to do are separate things. [1999b, 81]

Wenn man einem Einzelding eine *capacity* zuschreibt, dann wird es zum Vertreter einer Klasse:

... we assign natures not to substances but rather to collections or configurations of properties, or to structures. [1999b, 81]

Die Quantenmechanik mit ihren Unbestimmtheitsrelationen legt es nahe, in *capacities* zu denken. Bekanntlich gibt diese Theorie für viele Vorhersagen nur Wahrscheinlichkeiten an, die auch nicht durch hypothetische „verdeckte Variable“ ersetzt werden dürfen. Diese Wahrscheinlichkeitsaussage ist grundsätzlich und unauflösbar. Was tatsächlich geschieht, kann nur empirisch festgestellt werden. Cartwright bezieht wie auch andere Wissenschaftstheorien einen guten

Teil ihres Antriebs aus den philosophischen Herausforderungen durch die Quantentheorie.³⁴

Capacities sind für Cartwright nicht Eigenschaften oder einfach Tendenzen der Dinge, sondern Tendenzen, etwas zu verursachen:

Properties may carry a variety of different kinds of tendency - tendencies to behave in certain ways, to bear certain fixed relations to other properties, to evolve in a particular manner, or to produce certain kinds of effects. For all of these I use the general word 'tendency'; 'capacity' is reserved for a special subset of these - those tendencies to cause or to bring about something. [1989, 226]

Wichtig ist, dass Cartwright einzelnen Konstellationen *capacities* zuschreibt und nicht der Welt allgemein, denn sonst hätte man nur für Gesetzmäßigkeit die Bezeichnung ausgetauscht.

Capacities sind keine Möglichkeiten, denn möglich ist mit entsprechendem Aufwand alles:

After all, anything *can* cause anything else. In fact, it seems to me not implausible to think that, with the right kind of nomological machine, almost anything can *necessitate* anything else. [1999b, 72]

Die eine solche nomologische Spezialmaschine beschreibende Spezialtheorie wäre allerdings für andere Anwendungen nutzlos. Theorien, die einmal gemachte Erfahrungen in neuen Anwendungen nutzbar machen sollen, müssen sich auf die Natur der Dinge im Sinne von Aristoteles stützen:

Capacity claims, about charge, say, are made true by facts about what it is in the nature of an object to do by virtue of being charged. To take this stance of course is to make a radical departure from the usual empiricist view about what kinds of facts there are. [1999b, 72]

Capacities erfassen die Welt besser:

... a reconstruction of scientific claims using capacity language will go very much farther in capturing our empirical successes than will a reconstruction that uses only the language of occurrent properties³⁵. [1999b, 73, Anm. 36]

Nur so wird eine Anwendung in ähnlichen Situationen möglich:

... we adopt a category of Aristotle's. The knowledge we have of the capacity of a feature is not knowledge of what things with that feature do but rather knowledge of the *nature* of the feature. [1999b, 78]

³⁴ Bekanntlich enthält die Quantenmechanik statistische Gesetze. Es ist deshalb zur Klärung notwendig zu betonen, dass nach Cartwrights Meinung *capacities* keine Wahrscheinlichkeitsaussagen ersetzen. Es ist andersherum: Sowohl statistische Aussagen der Quantentheorie wie deterministische kausale Aussagen der makroskopischen Physik handeln von *capacities*.

³⁵ *Occurrent properties* ist eine Kategorie der klassischen englischen Empiristen, die nicht von *powers* oder *dispositions* sprechen wollen. Siehe [1999b, 78].

Man versteht nun, dass es für Cartwright entscheidend wichtig ist, was stattfindet, wenn *capacities* benannt und für die Voraussage von Vorgängen genutzt werden. Nach ihrer Meinung ist das eine Abstraktion und keine Idealisierung.

Abstraktion und Empirismus

Sie betrachtet dies am Beispiel des Begriffs der Kraft in der Mechanik. Kraft sei abstrakt in Bezug auf die Mechanik [257], während Masse, Beschleunigung, Entfernung nicht abstrakt seien. [255-6] Man erkenne das daran, dass Kraft immer nur in einem konkreten Zusammenhang von nicht abstrakten Begriffen auftreten kann:

A compact mass, m , can be described as *subject to a force of GMm/r^2* when it is *located a distance r from a second mass M* . The first is an abstract description; the second is the more concrete description which must also apply whenever the abstract description is true. [256]

The point is that some description or other formed in the right way from the appropriate set of concrete descriptions must be true as well if a description assigning force is to obtain. [256, Anm. 9].

Für diese konkreten Beschreibungen stehen die Brückenprinzipien zur Verfügung:

Abstract terms are fitted out by the concrete descriptions provided by interpretative models. And it is the bridge principles that assign concrete interpretative models to the abstract concepts of physics theories. [257]

Einem abstrakten Begriff wie „Kraft“ sind also normalerweise mehrere mögliche interpretative Modelle zugeordnet. Es gibt keine Kraft ohne oder zusätzlich zu einem solchen konkreten Zusammenhang:

(*Force*) is not a new, separate property, different from any of the arrangements which exhibit it. ... Being located at a distance r from another massive body is what it is to be subject to the appropriate force. ... The world does not contain two-body systems with a distance r between them ... plus forces as well. [1999b, 44/5]

Die konkreteren Begriffe selbst beruhen wieder auf anderen oder noch konkreteren Beschreibungen [257].

Dies führt zu der allgemeinen Definition von *abstrakt* durch zwei notwendige Bedingungen:

First, a concept that is abstract relative to another more concrete set of descriptions never applies unless one of the more concrete descriptions also applies. Secondly, satisfying the associated concrete description that applies on a particular occasion is what satisfying the abstract description consists in on that occasion. [259]

Cartwright vergleicht dies mit der Art und Weise, wie ein abstraktes moralisches Prinzip in einer Fabel dargestellt wird:

What we need to understand, in order to understand the way scientific laws fit the world, is the relationship of the abstract to the concrete; and to understand that, it will help to think about fables and their morals. Fables transform the abstract into the concrete, and in so doing, I claim, they function like models in physics. [1999b, 36]

Sie zitiert [1999b, 38] die Theorie der Fabel bei Lessing:

Das Allgemeine existiert nur in dem Besondern, und kann nur in dem Besondern anschauend erkannt werden. [Lessing 1759, 42]

Cartwright [259] legt großen Wert darauf, ihre Sicht der Bildung von Begriffen durch Abstraktion abzugrenzen von anderen Vorstellungen, wie z. B. der Supervenienz³⁶. Hier soll nur ihre wichtige Unterscheidung zwischen Abstraktion und Idealisierung behandelt werden. Man kann als erste Annäherung, wie oft bei Cartwright, die Begriffe naiv wörtlich auffassen. Dann ist Idealisierung eine Umformung in Richtung eines Ideals und Abstraktion das Weglassen von Bestimmungsstücken:

... in idealization we start with a concrete object and we mentally rearrange some of its inconvenient features – some of its specific properties – before we try to write down a law for it. ... By contrast, ... (abstraction) is not a matter of *changing* any particular features or properties, but rather of *subtracting*, not only the concrete circumstances but even the material in which the cause is embedded and all that follows from that. [1989, 187]

Das Ergebnis ist ein Unterschied in den gewonnenen Gesetzen:

This means that the law we get by abstracting functions very differently from idealized laws. [1989, 187-8]

Man kann die dahinterstehende Idee wohl wie folgt verdeutlichen: Bei jedem Vorgang in der Welt sind es die *capacities* der beteiligten Dinge, nicht irgendwelche ihnen äußerlichen idealen Gesetze, die sein mögliches Ergebnis bestimmen. Zu gesetzmäßigen Beziehungen kommt man, indem man die große Menge der Einflüsse reduziert, auf der praktischen Ebene durch Abschirmung, auf den Ebenen der Modelle und Theorien durch Abstraktion. Es geht darum, unter Ausnutzung der *capacities* der Dinge, das Geflecht der *capacities* so zu manipulieren, dass es zu vorhersagbaren Abläufen kommt. Das heißt, nomologische Maschinen zu konstruieren.

Mittels Abstraktion erhalte man Gesetze über *capacities*. Dies zeige sich besonders deutlich in der Mikrophysik:

Thus the laws in microphysics are results of extreme abstraction, not merely approximating idealizations, and therefore are best seen as laws about capacities ... [1989, 188]

Sie will nicht bestreiten, dass die herkömmliche Sicht mehr oder minder erfolgreich mit Idealisierungen arbeitet. Aber Idealisierungen sind nach ihrer Meinung keine Alternative, sondern eine idealistische Überhöhung tatsächlicher Abstraktionen. Wäre in einer Situation nicht eine Abstraktion möglich, dann auch keine Idealisierung:

... idealization would be useless if abstraction were not already possible [1989, 188]

³⁶ Cartwrights Definition der Abstraktion erinnert oberflächlich an eine Definition der Supervenienz, nämlich dass sich zwei Objekte in ihren supervenienten Eigenschaften nur dann unterscheiden, wenn sie sich auch in ihren Basiseigenschaften unterscheiden.

Die Herstellung einer passenden Abstraktion ist in Cartwrights Sinne ein kreativer Vorgang, in dem entschieden werden muss, welche Faktoren unterschieden werden und welche davon relevant sind. Es gibt kein Idealbild, an dem man sich dabei orientieren könnte.

Auch grundlegende Begriffe wie der der Kausalität müssen in diesem Sinne als Abstraktion angesehen werden. Es gibt nach Cartwright auch Kausalität nur in verschiedensten konkreten Ausprägungen:

The term ‚cause‘ is abstract. ... There will always be some further more concrete description that the causing consists in. [1999b, 120]

Wenn wir eine Theorie anwenden, wählen wir deshalb auch ein spezifisches interpretatives Modell der Kausalität:

We may be told that X causes Y . But what is to be done with that information is quite different if, for example, X is a precipitating cause from what we do if it is a standing cause, or an active cause versus the absence of an impediment. [1999b, 120]

Es ist nun möglich, über Cartwrights Vorstellungen von Theorien ein Resümee zu ziehen. Theorien handeln nicht von Gesetzmäßigkeiten oder auch nur von Regelmäßigkeiten, sondern von *capacities*, die es möglich machen, dass bestimmte einzelne Dinge geschehen:

It is the singular fact that matters to the causal law because that is what causal laws are about. The generic causal claims of science are not reports of regularities but rather ascriptions of capacities, capacities to make things happen, case by case. [1989, 2-3]

Die Aufgabe einer Theorie ist es, die Phänomene so aufzuheben, dass möglichst genaue Vorhersagen möglich sind:

What is needed is a powerful mathematical representation that will work to save the phenomena and to produce very precise predictions. [1989, 5]

Dabei ist jede Hypothese eine eigenständige Beschreibung der Wirklichkeit:

Each scientific hypothesis should be able to stand on its own as a description of reality. [1989, 5]

Die Theorie ist also nur ein Durchgangsobjekt zwischen den Beobachtungen und den daraus folgenden Vorhersagen. Sie beinhaltet Annahmen über *capacities*, die sich aus Beobachtungen speisen und die sich durch den Test der Vorhersagen rechtfertigen. So rechtfertigt sich jeder solche erfolgreiche Zyklus selbst (bootstrap):

... bootstrap theory of confirmation: the evidence plus the background assumptions deductively imply the hypothesis under test. [1989, 5]

In diesem Prozess von Abstraktion und Konkretisierung ist kein Platz für umfassende Gesetze:

Abstraction is the key to the construction of scientific theory; and the converse process of concretization, to its application. Covering laws seem irrelevant to either enterprise. [1989, 8]

Cartwright äußert sich kaum zu Theorienetzen. Treten Beziehungen zwischen *capacities* auf, und ohne solche Beziehungen würde Cartwrights Methode über die Phase immer neuer Beobachtungen nicht hinauskommen, müsste sie diese

als empirische Ergebnisse zur Kenntnis nehmen. *Capacities* von *capacities* lassen sich nicht ausschließen und wären von *covering laws* kaum zu unterscheiden. Für Cartwright ist dies irrelevant für die eigentliche Unternehmung. Diese besteht darin, die wichtigsten Phänomene und die besten Modelle aufzufinden:

Our job is to find methods of modelling the phenomena of immediate concern that will provide us with as much predictive power as possible. [1999b, 110]

Cartwright sieht sich selbst als Empiristin, die sich aber deutlich von Hume abhebt³⁷:

My claims, then, are doubly anti-Humean. I take singular causes to be primary, and I endorse capacities. ... I presuppose a strong practical empiricism, which for better or for worse wants to make a difference to how science carries on ... [1989, 3]

Dieser Empirismus wendet sich gleichzeitig gegen Holismus und die hypothetisch-deduktive Methode:

This, then, is an empiricism opposed at once to wholism and to the hypothetico-deductive method. [1989, 5]

Cartwright nennt ihren Empirismus eine Art von Operationalismus³⁸ [1989, 3 u. 5] und betont die Rolle der Messung, also der ständigen Bewährung der Hypothesen in der Praxis. Sie sei nicht fundamentalistisch, sie lehne Theorien nicht ab, sondern benötige sie als Mittel, um den Beobachtungsdaten Hypothesen zu entlocken. Sinneserfahrungen allein können uns keine Vorhersagen liefern:

My emphasis on measurement and on the bootstrap methodology should make clear that this empiricism is no kind of foundationalism. It will take a rich background both of individual facts and of general assumptions about nature before one can ever deduce a hypothesis from the data; the thin texture of pure sense experience will never provide sufficient support. [1989, 6]

Man kann nun zusammenfassen, wie Cartwright sich den *principled way* vorstellt von Erfahrungen über Modelle, Theorien und wieder Modelle zu neuen Erfahrungen, und wie daraus nach ihrer Meinung eine Beschränkung der Reichweite von Theorien folgt.

Grundsätzliche Beschränkung

Der *principled way* ist nicht deshalb grundsätzlich, weil er bestimmten formalen Regeln folgt, sondern weil so die bestmögliche Erklärungsleistung zustande kommt. Erklärung³⁹ ist bei Cartwright operationalistisch aufzufassen, nämlich dass „capacities to make things happen“ [1989, 3] erfasst worden sind. In diesem

³⁷ Siehe auch [Hacking 1983, 37-8] S. 52.

³⁸ Wissenschaftstheoretische Position, derzufolge die Begriffe ihre Bedeutung durch Handlungen erhalten. Cartwright stellt jedoch klar, dass es ihr nicht um eine Theorie der Bedeutung geht:

It is a kind of operationalism, but without the theory of meaning. [1989, 3]

³⁹ Zum Begriff der Erklärung siehe auch das Zitat [270] auf S. 13.

Fall wird durch die erfolgreiche Erklärung, also die Vorhersage der Dinge, die geschehen, gleichzeitig die Theorie bestätigt.

Das „proper theoretical treatment“ [264] beinhaltet, dass das repräsentative Modell nicht ad hoc erfunden worden ist, sondern aus dem Modellvorrat der Brückenprinzipien von Theorien erstellt worden ist. Das wird nicht immer erreicht:

... when there is no bridge principle that licenses (the) application to the situation described in the model, then (the) introduction is *ad hoc* and the power of the derived prediction to confirm the theory is much reduced. [264]

Dann bewirkt selbst eine erfolgreiche Vorhersage nur eine geringere Bestätigung der Theorie und ebenso eine geringer zu bewertende Erklärung der Phänomene.

Andererseits bedeutet die Einhaltung des *principled way* nicht, dass die betreffende Theorie bestmöglich oder universell gültig ist. Sie kann dann *wahr* sein, aber das bedeutet nur, dass die von ihr gestützten Modelle erfolgreich sind:

... laws are true in the models, perhaps literally and precisely true, just as morals are true in their corresponding fables. [1999b, 48]

Am Beispiel der Newtonschen Mechanik bedeutet das:

... laws of physics are general claims, like the morals of fables, and the concepts they employ are abstract and symbolic ... Newton's law, for instance, can be true of exactly those systems that it treats successfully; for we have seen how we can take it to be true of any situation that can be simulated by one of the models where the force puts on a concrete dress. That does not mean that we have to assume that Newton has discovered a fundamental structure that governs all of nature. That is part of the point of seeing force as an abstract concept ... and not a more concrete one, like extension. [1999b, 47]

Theorien können für Cartwright, anders als Modelle, wahr sein, wenn sie auf diese Weise *capacities* beschreiben, aber das bedeutet nicht, dass sie tatsächliche Vorgänge beschreiben. Theorien können unserem Wunsch, unsere Voraussagen zu garantieren, nicht entsprechen:

... there can be no such simple transfer of warrant. [248]

Es ist nach Cartwright ein anderes Bild von Theorien als in der üblichen Sicht nötig. Dieses Bild ist der *simulacrum account*⁴⁰.

Die erste Frage war also, wie wahr die Theorie ist. Die zweite Frage, davon zu trennen, ist die Universalität der Theorie:

But how much of the world are fables true of? [1999b, 48]

Nur zusammen mit der ersten Frage, was Wahrheit von Theorie ist, gibt das ein konsistentes Bild. Der Zusammenhang besteht über die Beziehung von abstrakt und konkret. Von einem abstrakten Begriff kann man nicht seinen Anwendungsbereich ableiten. Das heißt, dass der Anwendungsbereich von seinen Brückenprinzipien bestimmt wird:

⁴⁰ Siehe dazu [1983, 152-3] S. 2.

... the bridge principles provide natural boundaries on the domain the theory can command. [255]

Die Hauptthese von Cartwright ist also *the limits of theory*, wie es im Titel heißt. Das betrifft zunächst die Physik:

It is primarily on the basis of studies like these that I conclude that even our best theories are severely limited in their scope. For, to all appearances, not many of the situations that occur naturally in our world fall under the concepts of these theories. That is why physics, though a powerful tool for predicting and changing the world, is a tool of limited utility. [1999b, 9]

Zu *our best theories* gehört insbesondere die Quantentheorie. Die Menge der Brückenprinzipien und ihrer korrespondierenden interpretativen Modelle auch dieser Theorie ist begrenzt und damit auch die Reichweite der Theorie:

The point of my discussion here is that if we wish to represent a situation within quantum theory - within the very quantum theory that we prize for its empirical success - we must construct our models from the small stock of features that quantum theory can treat in a principled way. And this will fix the extent of our theory. [279]

Die *stock models* sind es, mit deren Hilfe man *principled* vorgehen kann, das heißt, dass man diese Einfachsituationen exakt darstellt und dann letztlich nur diese hat, um etwas in der Welt zu erklären und die Theorie zu bestätigen:

We are used to thinking of the domain of a theory in terms of a set of objects and a set of properties on those objects that the theory governs, wheresoever those objects and properties are deemed to appear. I have argued instead that the domain is determined by the set of stock models for which the theory provides principled mathematical descriptions. We may have all the confidence in the world in the predictions of our theory about situations to which our models clearly apply - such as the carefully controlled laboratory experiment which we build to fit our models as closely as possible. But that says nothing one way or another about how much of the world our stock models can represent. [279]

Cartwright sagt damit nicht etwa nur, dass Theorien auf ihre tatsächlichen Anwendungen beschränkt sind, was eine ziemlich triviale Aussage wäre, sondern vor allem, dass es falsch ist zu denken, alles in der Welt sei prinzipiell voraussagbar. Das ist der wesentliche Inhalt der These, diese Theorien sind nicht als universell anzusehen:

... it is a long distance from hope that all situations lend themselves to exact and precise prediction. [254]

Auch wenn wir kreativ neue Modelle und neue Theorien entwickeln, so sind dies doch immer nur wenige einzelne bestimmte Anordnungen, in denen Gesetze gelten. Die Vorstellung, dass es nur einzelne relativ kleine Bereiche der Erklärung in der ansonsten ungeordneten Welt gibt, nennt Cartwright mit ihrem Buchtitel *the dappled world*⁴¹. Die Leitsätze darin sind [1999b, 1, 2, 4]:

The disorder of nature is apparent.

⁴¹ *dappled* - buntscheckig. Cartwright [1999b, 19] ließ sich durch ein Gedicht von Gerald Manley Hopkins inspirieren.

Physics and economics, ... both disciplines with imperialist tendencies, ... (fail) to succeed in these aspirations.

Physics ... works primarily inside walls, ... within which the conditions can be arranged *just so*, to fit the well-confirmed and well-established models of the theory.

Economics ... is confined to those very special situations that its models can represent, whether by good fortune or by good management.

The laws that describe this world are a patchwork, not a pyramid.

Den letzten Satz illustriert Cartwright mit Karikaturen von Rachel Hacking:

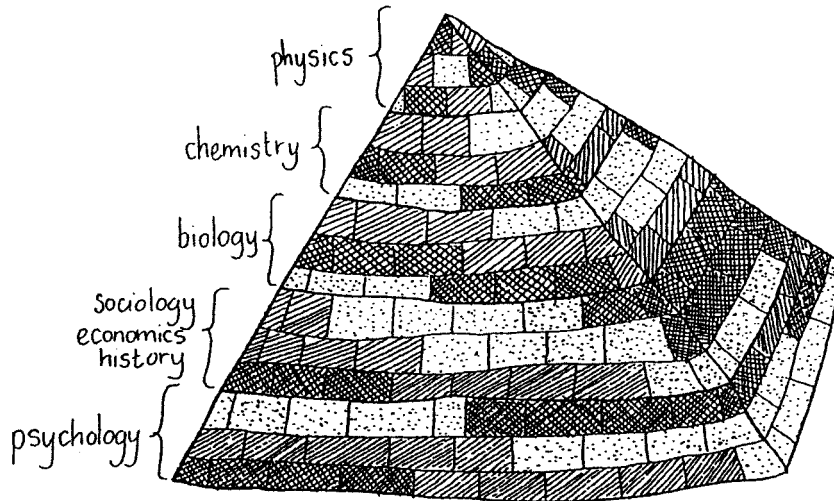


Abbildung 3: Pyramide der alles erklärenden Wissenschaften

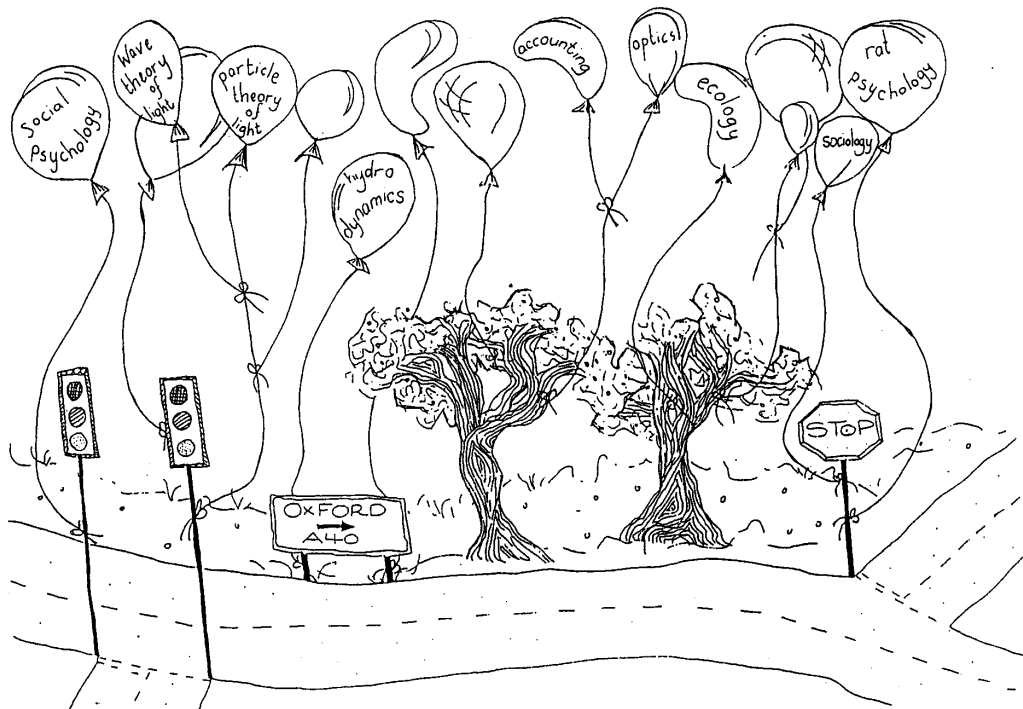


Abbildung 4: The dappled world

Da ist einmal das Wunschbild, „the mastery of the whole world of experience, by subsuming it ultimately under one unified theoretical structure“⁴², die Pyramide der alles erklärenden Wissenschaften [1999b, 7], und andererseits das Bild der *dappled world* [1999b, 8].

Cartwright erläutert dieses Bild wie folgt [1999b, 6]:

The sciences are each tied, both in application and confirmation, to the same material world; their language is the shared language of space-time events. But beyond that there is no system, no fixed relations among them. The balloons can be tied together to co-operate in different ways and in different bundles when we need them to solve different problems. Their boundaries are flexible: they can be expanded or contracted; they can even come to cover some of the same territory. But they undoubtedly have boundaries. There is no universal cover of law.

Die Welt ist nicht deshalb *dappled*, weil die Reichweite von Theorien auf die interpretativen Modelle beschränkt ist, sondern weil sie auf die Ausarbeitung repräsentativer Modelle aus dem Vorrat der interpretativen Modelle beschränkt ist. Jede nomologische Maschine schafft nur eine kleine Lichtung im Dschungel. Aber es ist nicht jede Hoffnung verboten: Die Spekulation, dass eine Theorie auch gilt, wo es noch nicht nachgewiesen worden ist, muss selbstverständlich erlaubt bleiben, so baut Cartwright ja ihre nomologischen Maschinen.

Nach meiner Meinung ist es vor allem der erste Satz der oben genannten Zitate, der in Frage gestellt werden muss: „The disorder of nature is apparent.“ [1999b, 1] Dem würde man zunächst zustimmen mögen, aber was ist damit genau gemeint? Welche Ordnung wurde erwartet, der gegenüber die Unordnung konstatiert wird? Nur die Möglichkeit, nomologische Maschinen zu konstruieren, zeigt schon eine erstaunliche Regelungsfreundlichkeit der Natur. Dass von *capacities* gesprochen werden kann, d. h. dass es persistente verallgemeinerbare Tendenzen der Natur überhaupt gibt, ist eine Ordnung, die Cartwrights Empirismus dankbar zur Kenntnis nehmen kann. Man könnte deshalb ebensogut formulieren: „The order of nature is amazing.“

Es ist diese Ordnung, die es möglich macht, dass die herkömmliche Sicht die Geltung universaler Gesetze behaupten kann. Nun hat die Wissenschaftstheorie inzwischen gezeigt, dass diese Behauptung nur eine Hypothese bleibt und dass, wie Cartwright richtig herausstellt, die angenommenen Gesetze immer nur mit *ceteris-paribus*-Klausel gelten. Aber dann ist doch gerade aus der Sicht des Empirismus die erstaunliche Ordnung der Natur eine empirische Tatsache und als solche von besonderem Gewicht. Die Fallstudie zur Supraleitung, die für Cartwright die *dappled world* demonstriert, kann nach meiner Meinung auch ganz anders, nämlich als Bestätigung der empirischen Tatsache einer erstaunlich geordneten Welt gewertet werden.

⁴² Ein Zitat von Gerald Holton, siehe [1999b, 18-9 u. Anm. 21-2].

Fallstudie Supraleitung

Übersicht

Man kann den Titel des vorliegenden Aufsatzes, *Models and the limits of theory: quantum Hamiltonians and the BCS model of superconductivity* [1999a], auch als Gliederung des Textes in zwei Teile sehen. Während es im ersten Teil mit *models and the limits of theory* um Cartwrights Ansichten über Modelle und die prinzipielle Beschränkung von Theorien geht, stellt der zweite Teil ein Fallbeispiel vor. Mit *quantum Hamiltonians* ist, wie gleich noch näher erläutert werden soll, die spezielle grundsätzliche Form der Quantentheorie gemeint, während *the BCS model of superconductivity* die erfolgreiche erklärende Anwendung dieser Theorie durch Bardeen, Cooper und Schrieffer [BCS 1957] auf das Phänomen der Supraleitung bezeichnet.

Die Supraleitung ist ein Problem der Festkörperphysik. Festkörper⁴³ nennt man Stoffe, in denen die Atome eng miteinander verbunden und nach einem festen regelmäßigen Schema eines Kristalls angeordnet sind. Die enge Kopplung der Atome ermöglicht besondere quantenmechanische Effekte und macht es andererseits unmöglich, einen Festkörper exakt physikalisch zu beschreiben, weil immer prinzipiell alle Atome des Kristalls zum Ergebnis wesentlich beitragen. Mit Hilfe spezieller Modelle und Näherungsverfahren, insbesondere des Bloch-Theorems, sind jedoch mehr oder minder genaue Beschreibungen möglich, die als Erklärungen dieser Effekte wirken. Typischerweise ist für jede Eigenschaft des Festkörpers ein eigenes Modell und eine eigene Näherung notwendig. Die Festkörperphysik ist deshalb ein Eldorado der verschiedensten Modelle.

Als Ziel der Fallstudie gibt Cartwright an, sie wolle untersuchen,

how we use the interpretative models of our theories to justify the abstract descriptions we apply when we try to represent the world. [262]

Es geht also um eine Anwendbarkeitsstudie, die kritischen Fragen muss gegebenenfalls der Leser stellen. Dabei ist erstens zu prüfen, ob die allgemeinen Elemente von Cartwrights Sicht, d. h. das Verhältnis von Empirie, Modellen und Theorie und insbesondere die Rolle der Brückenprinzipien eine zutreffende Beschreibung erlauben. Zweitens geht es um Cartwrights spezielle These der Grenzen der Reichweite von Theorien.

Cartwrights Argumentation beinhaltet im wesentlichen die folgenden Stränge:

- Theorienvergleich Ginzburg-Landau und BCS

Beide Theorien beschreiben gleich befriedigend einen Großteil der Phänomene der Supraleitung. Trotzdem gilt die ältere Ginzburg-Landau-Theorie

⁴³ Festkörper in diesem Sinne sind fast alle Stoffe in ihrem festen Zustand, insbesondere Metalle, ausgenommen nur Stoffe wie z. B. Glas, organische Stoffe oder Kunststoffe, bei denen es sich physikalisch um sehr zähe Schmelzen handelt.

als phänomenologisch und erst die BCS-Theorie als erklärend. Damit zeigt sich nach Cartwright, dass die Erklärungswirkung nicht nur von der empirischen Adäquatheit abhängt. Die BCS-Theorie ist auf die von ihr postulierte Weise *principled* aus interpretativen Modellen der Quantentheorie aufgebaut.⁴⁴ Dieser Punkt ist besonders interessant, weil sich nach Aufstellung der BCS-Theorie zeigte, dass die Ginzburg-Landau-Theorie aus der BCS-Theorie hergeleitet werden kann, also prinzipiell gleichwertig ist.

Hierzu soll gezeigt werden, dass nach meiner Meinung eine Herleitung nach dem *principled way* nicht ausreicht, um die tatsächlich starke Erklärungswirkung der BCS-Theorie zu begründen.

- Fundamentale Theorien hinter der BCS-Theorie

Die BCS-Theorie greift auf Modelle der Elektrodynamik, Quantentheorie und Quantenfeldtheorie zurück. Das zeigt für Cartwright den Baukastencharakter der fundamentalen Theorien.

Hierzu soll ausgeführt werden, dass BCS in jedem Fall begründen, warum genau die verwendeten Modelle die Supraleitung erklären. In der üblichen Sicht beanspruchen Theorien eine Domäne potentieller Anwendungen. Cartwright kann nicht nachvollziehen, warum die Erklärungswirkung größer ist, wenn sie ein Phänomen, das in diese Domäne fällt, tatsächlich erklären.

- Katalog der Brückenprinzipien

Nach Cartwright wird irgendeine Auswahl aus dem Katalog getroffen, bis die empirischen Daten erklärt werden.

Dieser Punkt ähnelt dem vorhergehenden. BCS leiten aus den empirischen Daten her, dass genau diese Modelle verwendet werden müssen. Es gibt keine Auswahlmöglichkeit, sondern es ist im Gegenteil überraschend, dass überhaupt eine Erklärung der einzigartigen Phänomene gefunden werden kann. Dazu wurden 50 Jahre Forschung benötigt und es musste vor allem der Katalog der interpretativen Modelle erweitert werden. D. h. die Empirie stellt wesentlich mehr und spezifischere Anforderungen an die zu verwendende Theorie als in Cartwrights Sicht verständlich ist.

- *Dappled World*

Nach Cartwrights Meinung stützen die vorhergenannten Einzelargumentationen ihre These von der *dappled world*. Sie stellt das unter die Zwischenüberschrift „How far does quantum theory stretch?“ [263], d. h. das Beispiel soll letztlich gegen den fundamentalen Anspruch der Quantentheorie selbst argumentieren.

Nach meiner Meinung werden die vorhergenannten Kritiken zeigen, dass die Welt wesentlich mehr Erklärungsanspruch unserer Theorien zulässt, als es im Bild der *dappled world* zu erwarten wäre. Dies ist mit der Fallstudie eine empirische Tatsache, die von einer Empiristin als solche anerkannt werden sollte.

⁴⁴ Cartwright sieht letztlich nicht alle Teile der BCS-Theorie als *principled* an. Siehe [269] S. 50.

Ergänzend ist noch zu bemerken, dass es für eine Behauptung über die Beschaffenheit der Welt unerheblich ist, ob die Physiker, wie es Cartwright an der Fallstudie zeigen will, in ihrer Arbeit willkürlich vorgehen, zumal sie selbst davon spricht, dass die Anwendung der Physik Kreativität erfordert. Nach meiner Meinung sieht sie auch nur deshalb Willkür darin, weil sie das von BCS angewandte Näherungsverfahren nicht akzeptieren will. Das wird anhand der Bloch-Theorie unten noch näher ausgeführt. Davon unabhängig gilt: Wenn die Aussage der *dappled world* keine metaphysische sein soll, dann muss sie empirisch an der Welt selbst belegt werden. Dabei ergibt sich nach meiner Meinung, dass die Welt sich als weniger *dappled* erweist, als Cartwright es aus ihrer empiristischen Sicht erwartet.

Im Folgenden will ich nicht dem Aufbau von Cartwrights Aufsatz folgen, sondern systematischer vorgehen. Es soll zuerst ein Eindruck von den Schwierigkeiten vermittelt werden, die von den empirischen Daten für eine Theorie der Supraleitung ausgehen. Danach sollen die Modelle der Festkörperphysik für die elektrische Leitung und insbesondere die Bloch-Theorie des Festkörpers vorgestellt werden. Es folgen die interpretativen Modelle der Quantenmechanik, so wie sie nach Cartwrights Meinung für eine Theorie der Supraleitung zur Verfügung stehen. Es wird dann das BCS-Modell und die Begründung seiner Theorie in Auseinandersetzung mit Cartwrights Sicht behandelt.

Die Supraleitung wurde 1911 von Heike Kamerlingh-Onnes (Nobelpreis 1913) entdeckt. Zu dieser Zeit war es die anerkannte Theorie, dass der elektrische Strom in Metallen aus Elektronen besteht, die sich im Gitter der Metallatome bewegen. Unregelmäßigkeiten des Gitters und die Wärmebewegung der Gitteratome, die Gitterschwingungen, stören den Fluss der Elektronen und bewirken dadurch den elektrischen Widerstand. Man erwartete deshalb, dass der elektrische Widerstand von Metallen mit sinkender Temperatur, also Abnahme der Gitterschwingungen, zurückgeht und sich einem Restwert R_0 nähert:

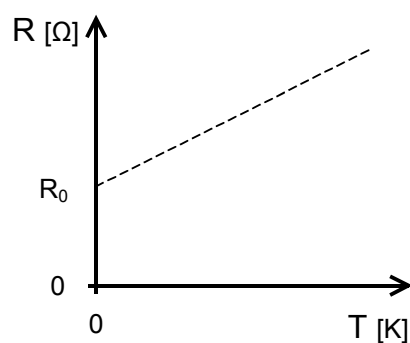


Abbildung 5: Erwartete Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes

Mit zunehmenden Möglichkeiten, Proben bis in die Nähe des absoluten Nullpunkts abzukühlen, wurde diese Annahme für immer tiefere Temperaturen geprüft. Kamerlingh-Onnes erhielt das folgende Ergebnis für Quecksilber [reproduziert nach: Buckel / Kleiner 2004, 3]:

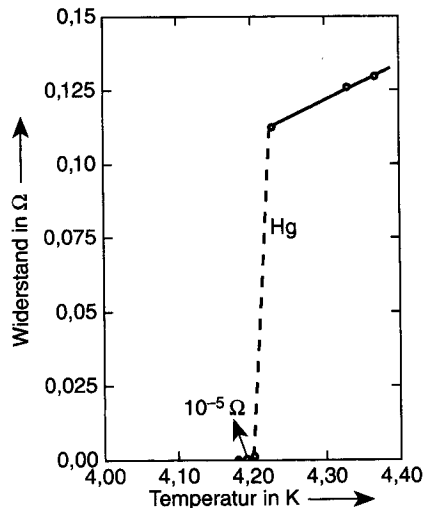


Abbildung 6: Entdeckung der Supraleitung

Kamerlingh-Onnes folgerte aus dem abrupten Verlauf, dass es sich um einen Phasenübergang handelte, und nannte den neuen Zustand, den Quecksilber unterhalb der Sprungtemperatur von 4,2 K annimmt, den supraleitenden Zustand:

At this point within some hundredths of a degree came a sudden fall not foreseen by the vibrator theory of resistance, that had framed⁴⁵, bringing the resistance at once less than a millionth of its original value at the melting point... Mercury has passed into a new state, which on account of its extraordinary electrical properties may be called the superconductive state. [zitiert nach: Buckel / Kleiner 2004, 3]

Die Ladungsträger bewegen sich in diesem Zustand offenbar ohne „Reibung“. Dies war ein beispielloser Effekt, für den es zur Zeit der Entdeckung keine Erklärung gab. Dass in der Quantenmechanik Bewegungen ohne Energieverlust denkbar sind, wurde erstmals zwei Jahre später im Bohrschen Atommodell angenommen. Ein weiterer der Supraleitung vergleichbarer Effekt, die Superfluidität von Helium, wurde erst 1937 entdeckt.

Da die widerstandslose Leitung von elektrischem Strom ein technisches Schlaraffenland versprach, wurden große Anstrengungen unternommen, eine Theorie der Supraleitung zu entwickeln. Insbesondere brauchte man eine Theorie, um gezielt nach Stoffen suchen zu können, die schon bei höherer Temperatur supraleitend sind.

Dass es sich hier um einen makroskopischen Quantenzustand nach Art der 1924 theoretisch vorausgesagten Bose-Einstein-Kondensation handelt, wurde erst 1950 zur Grundlage einer Theorie, als V. L. Ginzburg und Lew D. Landau eine „phänomenologische“ Theorie der Supraleitung veröffentlichten (Nobelpreis 2003). Diese beschrieb richtig die Eigenschaften der Supraleitung, ohne

⁴⁵ *the vibrator theory of resistance, that had framed* - die (Gitter-)schwingungstheorie des Widerstands, die (bisher) den Rahmen gebildet hatte.

vollständig aus der Quantenmechanik abgeleitet zu sein. In diesem Modell wurde angenommen, dass die Träger der Supraleitung das supraleitende Material mit einer makroskopischen Wellenfunktion erfüllen. [Buckel / Kleiner 2004, 209] Es gab aber immer noch keine Vorstellung davon, was die Objekte dieser Wellenfunktion sein sollten. Erst mit dem Modell der Cooper-Paare und der auf dieser Grundlage beruhenden BCS-Theorie stellte sich heraus, dass die Ginzburg-Landau-Theorie aus ihr folgt⁴⁶, also auch „physikalisch korrekt“ war.

Die Ginzburg-Landau-Theorie ist für Temperaturen in der Nähe der Sprungtemperatur leichter zu handhaben als die BCS-Theorie. Dieser Temperaturbereich ist für viele Fragen besonders interessant, weshalb die Ginzburg-Landau-Theorie auch weiterhin viel benutzt wird.⁴⁷ Es entsteht die Frage, warum diese Theorie weiterhin als phänomenologisch gilt. Cartwright [244, 263-4] betrachtet dies als Beleg für ihre Sicht, sie sieht darin einerseits ein Beispiel für die beliebige Verwendbarkeit von Theorieelementen und andererseits ein Beispiel für die mangelnde Erklärungswirkung eines nicht *principled* Vorgehens:

... they impose constraints on the class of Hamiltonians that can be used to represent superconducting materials. But this is not the procedure I have described as the correct, principled way for arriving at Hamiltonians in quantum theory ... [263]

Für Cartwright gleichen sich die Ginzburg-Landau-Theorie und die BCS-Theorie in ihrer Entwicklung, sie kommen aus einem Ansatz, aus einem Modell, aus einem Vorrat von Brückenprinzipien, und darin, dass sie die Beobachtungen vorhersagen können, aber nicht in ihrer Erklärungsleistung. Diese werde erst erreicht, wenn die Theorie bei BCS durch Brückenprinzipien in fundamentalere eingebettet sei.

Modelle der Quantenmechanik

In Cartwrights Aufsatz ist in Bezug auf die BCS-Theorie ständig von Hamiltonians die Rede. Es handelt sich um Hamiltonfunktionen, benannt nach dem irischen Mathematiker und Physiker Sir William Hamilton (1805-1865). Eine Hamiltonfunktion ist die Grundform einer physikalischen Theorie. Ihre grundlegende Bedeutung rührt daher, dass sie die Energie eines Systems darstellt und dass das Gesetz von der Erhaltung der Energie in der Physik allgemein gültig ist.

In der klassischen Mechanik kann jedes System durch seine Hamiltonfunktion beschrieben werden. Die Hamiltonfunktion gibt an, wie die Energie des Systems von Ort und Geschwindigkeit seiner Komponenten abhängt. Aus der Hamiltonfunktion kann vollständig abgeleitet werden, wie das System sich aus irgendeinem Anfangszustand weiter entwickeln wird.

⁴⁶ Für Temperaturen in der Umgebung der Sprungtemperatur.

⁴⁷ Z. B. behandeln Ketterson und Song [1999] auf der Hälfte der ca. 500 Seiten ihres Buches alle wesentlichen Effekte der Supraleitung mittels der Ginzburg-Landau-Theorie, und zwar unter der Bezeichnung „phenomenologic theory“.

Dies gilt noch mehr für die Quantenmechanik⁴⁸, in der die Hamiltonfunktion als Hamiltonoperator auftritt. Cartwright betont, dass in der Quantenmechanik der Zustand des Systems aus einem Hamiltonoperator abgeleitet werden muss:

... the quantum state ... according to proper quantum theory must derive from a quantum Hamiltonian [263]

und dass es ein grundlegendes Verfahren gibt, wie man den Hamiltonoperator eines Systems aufstellt:

... the correct, principled way for arriving at Hamiltonians in quantum theory ... [263]

Cartwright meint also, dass ihr *principled way* zur theoretischen Beschreibung eines repräsentativen Modells im Bereich der Quantenmechanik eine ganz bestimmte Form annimmt, er beinhaltet immer die Aufstellung eines Hamiltonoperators. Dieser ist der grundsätzliche abstrakte Begriff der Quantentheorie:

The quantum Hamiltonian is abstract in the sense of ‚abstract‘ I have been describing: we apply it to a situation only when that situation is deemed to satisfy certain other more concrete descriptions. These are the descriptions provided by the interpretative models of quantum mechanics. [264]

Deshalb muss es in jedem Einzelfall ein Brückenprinzip zur Konkretisierung des Hamiltonoperators geben:

... The quantum bridge principles give the corresponding Hamiltonians for each of the concrete interpretative models available in quantum mechanics. They provide an abstract Hamiltonian description for situations otherwise described more concretely. [264]

Die Brückenprinzipien der Quantentheorie verknüpfen bestimmte Hamiltonians mit interpretativen Modellen. Offenbar meint Cartwright, dass der Hamiltonoperator dabei für alle etwaigen anderen abstrakten Begriffe einer speziellen Theorie einsteht, ähnlich wie es nach ihrer Meinung der Begriff der Kraft in der klassischen Mechanik leistet:

The behaviour of the quantum state ϕ is governed by the Schroedinger equation:

$$H\phi = -i\hbar\partial\phi/\partial t$$

H is called the Hamiltonian. It is supposed to describe the possible energy configurations of the system, which can be thought of as the modern-day equivalent of Newton's forces. [1989, 205]

Es ist vermutlich kein Zufall, dass die von Cartwright identifizierten zentralen abstrakten Begriffe Kraft in der klassischen Mechanik und Hamiltonoperator in der Quantenmechanik additiv sind. Dadurch kann das untersuchte Gesamtsystem in Teilsysteme zerlegt werden, deren Teilkräfte sich zu einer Gesamtkraft bzw. deren Teiloperatoren sich zu einem Gesamtoperator addieren. Nur so kann überhaupt der Aufbau einer Theorie bzw. eines repräsentativen

⁴⁸ Zur Bedeutung der Hamiltonfunktion in der Quantenmechanik siehe [Wachter / Hoerber 2005, 49 u. 62].

Modells aus Brückenprinzipien bzw. interpretativen Modellen funktionieren. Nur auf der Grundlage einer Teilbarkeit und Zusammensetzbarkeit kann auch von *capacities* gesprochen werden:

When we want to set quantum mechanics to describe the actual behaviour of some concrete system, where will the H come from? Essentially it is built up by pieces. At the start in quantum mechanics one learns a series of model Hamiltonians: e.g. the Hamiltonian for the hydrogen atom, for the square-well potential, for the harmonic oscillator, and so forth. Later, more and more sophisticated systems are included. These Hamiltonians are not literally true to their names: they are certainly not the Hamiltonians for any real hydrogen atoms, or real harmonic oscillators. Instead, they tell what contribution is made to the total Hamiltonian by the fact that the system is a simple proton-electron pair, or a certain kind of simple spring. That is, they report what energy configurations hydrogen atoms, harmonic oscillators, and so on *tend* to have, that is, what their capacities are. If one wants to talk in terms of what energy potentials they do reveal in a concrete situation, then something like the following is necessary: the Hamiltonian (H) for any real hydrogen atom will be the sum of a principal function (call it H_0) for the abstract model of a hydrogen atom and then a separate, ‚correction‘ term (H') which is motivated by the particular circumstances. This is usually written $H = H_0 + H'$. [1989, 205]

Cartwright weiß, dass diese Additivität eine schwerwiegende notwendige Bedingung für ihr Bild der *stock models* darstellt:

Calling the last term ‚a correction‘ is an important reservation. For of course any Hamiltonian function H can be written as a sum of some given Hamiltonian plus a remainder ($H = H_0 + [H - H_0]$). What is necessary for the claim ‚ H_0 is the Hamiltonian for the hydrogen atom‘ to have the intended sense is that the remainder, H' , should be the appropriate Hamiltonian to describe the capacities of the remaining relevant factors. Given the theory, it is not too hard to say what one means by that: the remainder should also come from one of these long lists of Hamiltonians prescribed by the theory. [1989, 205-206]

Dies kann offensichtlich zur Folge haben, dass jede neue Theorie neue Brückenprinzipien erfordert. Dadurch ist das Argument, dass die erklärende Wirkung des *principled way* auf der Verwendung von Brückenprinzipien aus einer vorhandenen Menge beruht, auf natürliche Weise eingeschränkt:

This of course conceals the essential and interesting question of what justifies including a particular Hamiltonian on the list. The answer involves studying the detailed methodology of capacity ascriptions, case by case ... [1989, 206]

Auf der anderen Seite werden die Physiker für bestimmte Probleme bestimmte interpretative Modelle vorzugsweise verwenden. Dahinter steht eine angenommene Vernetzung, die sich in einem Beitrag zur Erklärungswirkung zeigt, wenn sich das Problem tatsächlich so aufspalten lässt, dass ein solches Modell verwendet werden kann. Diesen Beitrag kann Cartwright nicht anerkennen.

Man kann diese Frage noch weiter zuspitzen. Die Additivität ihrer abstrakten Begriffe beruht nach der üblichen Sicht auf den sogenannten Erhaltungssätzen, im Falle der Kraft auf der Erhaltung des Impulses und im Falle des Hamiltonoperators auf der Erhaltung der Energie. Diese wiederum beruhen im üblichen Bild der Physik bekanntlich auf grundlegenden Symmetrien von Raum und Zeit. Allgemein ausgedrückt bedeutet das, dass wir in der üblichen Sichtweise empirisch Gesetzmäßigkeiten zwischen Gesetzmäßigkeiten vorfinden, was in

Cartwrights Sicht als *capacities* von *capacities* zu betrachten wäre. Diese Möglichkeit weist Cartwright ausdrücklich zurück, *capacities* können bzw. sollen nicht reduktiv betrachtet werden, ihre Vielfalt gehört zu ihrem Begriff:

The discussion has now clearly returned to one of my recurring themes, that the account of what capacities are cannot be reductive, but instead requires the whole paraphernalia of other capacities, preventatives, correctives, and so forth. [1989, 206]

Nach der üblichen Sicht sind es aber gerade diese Beziehungen zwischen Theorien, die aus einer Theorie eine Erklärung machen. Nach Cartwrights Meinung ist demgegenüber eine Theorie im Bereich der Quantenmechanik nur dann als Erklärung wirksam, wenn sich ihr Hamiltonoperator auf Brückenprinzipien der Quantenmechanik berufen kann:

My claim about bridge principles and the limits of quantum physics is straightforward. Some theoretical treatments of empirical phenomena use *ad hoc* Hamiltonians. But these are not the nice cases that give us really good reasons to believe in the truth of the theory. For this we need Hamiltonians assigned in a principled way; and for quantum mechanics as it is practised that means ones that are licensed by principles of the theory – by bridge principles [265]

Es ist spezifisch für die Quantenmechanik, dass ein Hamiltonoperator gefordert wird, für andere fundamentale Theorien könnte es ein anderer Grundbegriff sein, aber für alle gelte, dass Erklärungen sich auf die fundamentale Theorie berufen müssen, und das könne nicht anders als durch Brückenprinzipien geschehen, denn es gehe ja um die Brücke von abstrakten Begriffen zur Welt der Phänomene.

Die Wahrheit einer Theorie liegt für Cartwright nicht in unserer Überzeugung, sondern in ihren möglichen richtigen Voraussagen⁴⁹. Der *principled way* ist dafür wichtig, weil die fundamentale Theorie Erfahrungen transportiert und auf neue Erfahrungen anwendbar macht. Cartwright kann dann aber nicht darstellen, wie einzigartige Modelle wie Cooper-Paare oder Spezialtheorien wie die Bloch-Theorie erklärend wirken. Dies ist nach meiner Meinung die eigentliche Schwäche ihrer Sichtweise.

Cartwright [264] zählt auf, welches nach ihrer Meinung Brückenprinzipien der Quantenmechanik sein können, die interpretative Modelle für den Hamiltonoperator liefern. Sie stützt sich dabei auf Messiah [1958], ein Standardlehrbuch der Quantenmechanik. Der abstrakte allgemeine Hamiltonoperator der Quantenmechanik lautet demnach

$$H = p^2/2m + V(q)$$

und besteht aus den Anteilen der kinetischen und der potentiellen Energie. Cartwright betrachtet offenbar schon dies als Interpretation und nennt als erstes Brückenprinzip die

⁴⁹ Zum Begriff der Erklärung bei Cartwright siehe S. 25.

- Kinetische Energie

$$H = p^2 / 2m$$

In Messiah werden unter der Hauptüberschrift „Simple Systems“ dann verschiedene Potentialtypen für $V(q)$ angegeben, die Cartwright als „grundlegende Brückenprinzipien“ [265] übernimmt. Wenn man weiter die betreffende Formel und eine eventuell genauere Kapitelüberschrift aus Messiah beifügt, ergibt sich die folgende Liste:

- Zentralpotential

$$V(r)$$

Separation von Variablen: Zentralpotential

- Streuung

$$V(r) = e^2 / r$$

Zentralpotential und Phasenverschiebungs-Methode: Streuung

- Coulomb-Wechselwirkung

$$V(r) = e^2 / r$$

- Harmonischer Oszillator

$$V(q) = m\omega^2 q^2 / 2$$

Die offensichtliche Willkür dieses Vorgehens ist für Cartwright offenbar nicht problematisch. Man muss zum Verständnis immer bedenken, dass es sich für sie bei Formen und Strukturen von Theorie nur um Details der Beschreibung handelt, die nichts mit den *capacities* der Natur selbst zu tun hat, die sie darstellt. Jede gute Formalisierung ist gleichwertig:

So far I have mentioned four basic bridge principles from Messiah. We may expect more to be added as we move through the theory net from fundamental quantum theory to more specific theories for specific topics. Any good formalisation of the theory as it is practised at some specific time will settle the matter for itself. [265]

Die in jeder Modellmenge auftretenden Beziehungen zwischen den Modellen bleiben unbeachtet. So entsteht die Fiktion, dass die *stock models* wie lose Bauklötzchen auf einem Haufen liegen. Festzuhalten bleibt aber ihre Aussage, dass spezifische Theorien zusätzliche Brückenprinzipien kennen, d. h. dass neue Theorien u. U. auch neue Brückenprinzipien mitbringen. Darauf wird gleich noch zurückzukommen sein.

In Cartwrights Liste fehlen grundsätzlich wichtige Modelle, die für die Theorie der Supraleitung benötigt werden, wie die Austauschwechselwirkung und der Phasenübergang. Das Modell der Cooper-Paare, ein Beispiel für eine Austauschwechselwirkung, will Cartwright offenbar als Coulomb-Wechselwirkung ansehen.

Ferner ist es fraglich, ob diese Modelle überhaupt Brückenprinzipien in ihrem Sinne sind. Sie werden von Messiah deutlich als einfache Systeme gekennzeichnet, die man mit bestimmten werkzeugartigen Methoden – Separation von Variablen, Phasenverschiebungs-Methode – mathematisch exakt bearbeiten kann. Das kann identisch mit Brückenprinzipien sein, muss es aber nicht. Vor allem würde ein repräsentatives Modell, das sich aus leicht handhabbaren

Modellen zusammensetzt, seine Erklärungskraft anders beziehen müssen, als Cartwright es sich vorstellt, also nicht aus den Brücken zur Erfahrung, sondern z. B. aus Vernetzung, Einbettung, Kohärenz o. ä.

Schließlich muss man fragen, warum Cartwright bei einer Betrachtung der Supraleitung von vornherein die Modelle der Quantenmechanik vorlegt. Zwar bezieht sich die erfolgreiche BCS-Theorie auf die Quantenmechanik, aber sie tut dies auf die übliche Weise, begründet eben durch den Anspruch der Quantenmechanik, dass ein Effekt dieser Art in ihr Anwendungsgebiet gehört. Eine solche Begründung gibt es aber in Cartwrights Sicht nicht, es ist eine immer wieder neue empirische Frage, ob eine bestimmte Theorie ein bestimmtes Phänomen erklären kann:

Superconductivity is a quantum phenomenon precisely because superconducting materials can be represented by the special models that quantum theory supplies. How much of the world altogether can be represented by these models is an open question. Not much, as the world presents itself, looks on the face of it like harmonic oscillators and Coulomb interactions between separated chunks of charge. Superconductivity is a case where, we shall see, a highly successful representation can be constructed from just the models quantum theory has to offer. My point is that with each new case it is an empirical question whether these models, or models from some other theory, or no models from any theory at all will fit. Quantum theory will apply only to phenomena that these models can represent, and nothing in the theory, nor anything else we know about the structure of matter, tells us whether they can be forced to fit in a new case where they do not apparently do so. [266]

Immerhin gesteht sie damit zu, dass es sein kann, dass eine Theorie *apparently* zutrifft. Wenn also ein Physiker das sichere Gefühl hat, dass die Erklärung der Supraleitung in der Quantentheorie zu suchen ist, dann nach Cartwright deshalb, weil der Physiker die Modelle der Quantenmechanik kennt und weil es zum naiven Begriff des Modells gehört, dass es seinen Zuständigkeitsbereich gewissermaßen mit sich führt. Sie verlagert also den Anspruch der Theorie auf ihren Anwendungsbereich, den sie nicht anerkennt, in einen Anspruch des Modells. Indem sie das Modell aus der Theorie heraus in die Selbständigkeit verschiebt, nimmt es die intendierte Anwendung mit sich. Sie wertet dies ausdrücklich als Unterschied zur *German structuralist school* [252], obwohl es sich eher als Gemeinsamkeit darstellt.

Entsprechend Cartwrights Zugeständnis, dass spezielle Probleme spezielle Brückenprinzipien erfordern können, behandelt sie bei der Theorie der Supraleitung das Bloch-Modell des Festkörpers. Im Sinne der Schaffung neuer Brückenprinzipien zur Lösung neuer Probleme können wir für die Theorie der Supraleitung die Cooper-Paare als solches betrachten. Diese beiden zusätzlichen Modelle sollen nun betrachtet werden.⁵⁰

⁵⁰ Abbildung 1, S. 5, zeigt ein grobes Schema des BCS-Modells und der beteiligten Theorien.

Bloch-Modell

Mit Bloch-Theorie bezeichne ich hier nicht ganz orthodox, aber in Übereinstimmung mit Cartwright [269-271], die Theorie des Elektronengases im periodischen Potential des Festkörpers.⁵¹ Der modelltheoretisch interessante Aspekt ist dabei die problemorientierte gedankliche Aufspaltung der wechselwirkenden Teilchen in feste Atomrümpfe und freie Valenzelektronen. Diese bilden relativ weit ausgedehnte Wolken, die sich im engen Gitter des Kristalls überlappen. Dies führt zu einer Bindung durch Austauschwechselwirkung. Das Modell nimmt also eine künstliche Trennung vor in

- Ionengitter:
Atomrümpfe, gebunden und gegeneinander elektrisch abgeschirmt durch das Elektronengas
- Elektronengas:
Valenzelektronen, frei beweglich und gegeneinander elektrisch abgeschirmt durch die Rümpfe

Die folgende Grafik mag diese Aufspaltung veranschaulichen [Ziman 1972, 147]:

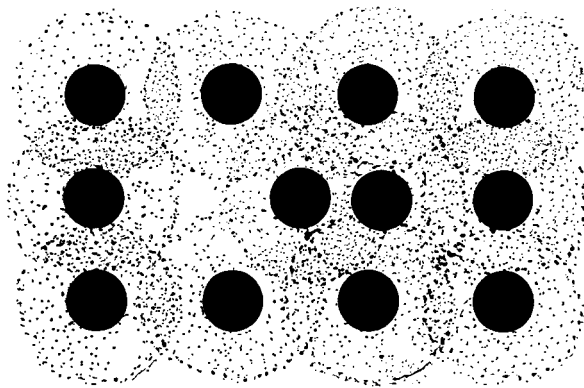


Abbildung 7: Elektronengas und Atomrümpfe

Das Ziel der Modellierung, die Beschreibung der elektrischen Leitung, ist mit dem Modell kompatibel, denn es nimmt nur ein kleiner Teil der Elektronen am Stromfluss teil. Der zu beschreibende Effekt stellt also nicht das Modell selbst in Frage, eine wesentliche Voraussetzung solcher Modelle.

Das dahinter stehende allgemeine Verfahren ist die Störungsrechnung. Sie wird angewendet, wenn eine exakte Berechnung eines Systems wegen seiner Komplexität nicht möglich ist. Sie besteht aus drei Schritten, Aufspaltung, Rechtfertigung

⁵¹ Es handelt sich genauer um eine Kombination von Bloch-Theorem und Fermi-Sommerfeld-Theorie des freien Elektronengases. Siehe z. B. Hellwege [1988, 353-4]. Das Bloch-Theorem besagt, dass die Wellenfunktion von Elektronen im Festkörper nur bis auf einen Phasenfaktor bestimmt ist, der die räumliche Periodizität des Potentials widerspiegelt. Siehe z. B. Ziman [1972, 14-18]

tigung und Erklärung. Das System wird nach Bedarf in einen Grundzustand und eine Störung aufgespalten gedacht. Die Aufspaltung muss dadurch gerechtfertigt werden, dass die Störung in Bezug auf den betrachteten Effekt klein ist. Auf dieser Grundlage kann der Effekt vereinfacht berechnet werden. Wenn das Ergebnis der Beobachtung entspricht, so hat man den Effekt erklärt. Sowohl das Bloch-Modell als auch die BCS-Theorie machen von diesem Verfahren Gebrauch.

Beide Teile der künstlichen Aufspaltung verändern sich in ihren Eigenschaften, wenn das Modell den betreffenden Ausschnitt der Wirklichkeit, in diesem Fall die elektrische Leitung, richtig wiedergeben soll:

Der Begriff des Quasiteilchens taucht bei vielen Mehrkörperproblemen auf. Für Systeme aus mehr als zwei wechselwirkenden Teilchen gibt es weder in der klassischen Mechanik noch in der Quantenmechanik exakte Lösungen. Man ist daher auf geeignete Näherungsmethoden angewiesen. Da sich für ein System aus nichtwechselwirkenden Teilchen leicht Lösungen finden lassen ... , versucht man normalerweise, Mehrkörperprobleme zu reduzieren auf die Behandlung von Systemen unabhängiger oder nur sehr schwach wechselwirkender Teilchen, bei denen die restliche Wechselwirkung als kleine Störung behandelt werden darf. Die nahezu unabhängigen Teilchen, die bei diesem Verfahren rechnerisch eingeführt werden, haben aber häufig andere Eigenschaften als die wirklichen Teilchen. Sie führen daher den Namen *Quasiteilchen*. Man ersetzt also die realen wechselwirkenden Teilchen im Lösungsmodell durch nahezu unabhängige Quasiteilchen. Ein Beispiel hierfür ist die Behandlung von Leitungselektronen in einem Kristallgitter. Man kann dabei die wirklichen Elektronen der Masse m , die sowohl untereinander als auch mit den Gitterionen wechselwirken, durch ein System praktisch freier Quasiteilchen der Masse μ ersetzen. Die Differenz der Massen kommt durch die Wechselwirkungen zustande, die bewirken, daß das Quasiteilchen auf ein beschleunigendes Feld anders reagiert als das wirkliche Teilchen. [Mayer-Kuckuk 1974, 178]

Nach Cartwright [261/2] ist dies eine rein mathematische Überlegung. Man dürfe die Aufspaltung nicht als Trennung von Ursachen ansehen.⁵²

Betrachten wir zuerst die Elektronen. Nicht nur ihre sogenannte effektive Masse weicht von der normalen Masse der Elektronen ab, sie kann größer, kleiner und sogar negativ⁵³ sein [Hellwege 1988, 405], es gilt auch eine sehr merkwürdige Impulserhaltung [Hellwege 1988, 358]. Cartwright kommentiert dies wie folgt:

The right way to think about modelling in these kinds of cases seems to me to be to say that the particles in the model have just the properties used in the model. [268]

Damit will sie sagen, dass wir nicht urteilen sollen, dass es sich um Elektronen mit ihrer normalen Masse handelt, die nur unter den Bedingungen des Modells eine andere scheinbare Masse annehmen, sondern dass es sich um Teilchen des Modells handelt, die wir nur als Elektronen benennen mögen, wenn wir ihnen

⁵² Siehe dazu auch [262] S. 11.

⁵³ Wir können negativ geladene Elektronen mit negativer effektiver Masse auch betrachten als positiv geladene Löcher mit positiver effektiver Masse [Hellwege 1988, 421-2].

zum Nutzen des Modells vielleicht weitere Elektroneneigenschaften zuweisen wollen [268].

Wie sollen wir aber dann die Tatsache werten, dass die effektive Masse dieser Teilchen aus der normalen Masse eines Elektrons und den Bedingungen des Modells berechnet werden kann und dass sie experimentell erfolgreich nachweisbar entsprechend mit den Bedingungen variiert? Aus dem gedanklichen und experimentellen Übergang zu tatsächlich freien Teilchen könnten wir schließen, dass diese Teilchen Elektronen sind. Offenbar hängen unsere Modelle und Theorien für diese Teilchen nicht nur mit denen für Elektronen, sondern auch noch mit denen für Festkörper zusammen. Es ist also genau diese Vernetzung der Theorien, die dem Bloch-Modell in der üblichen Sichtweise eine hohe Erklärungswirkung verleiht.

Es ist deshalb unabweisbar, dass die Experimente einen Zusammenhang zwischen *capacities* zeigen. Das müssen wir uns nach Cartwright so erklären, dass unsere Theorien nomologischen Maschinen zu verdanken sind, die aus vorhandenen Teilen aufgebaut werden. Aber die erfolgreiche Anwendung eines Näherungsverfahrens, wie es diese Bloch-Theorie typisch darstellt, beruht darauf, dass wir wissen, inwiefern das Modell vom Idealfall abweicht. Der Idealfall hat also empirisches Gewicht. Es geschieht genau das, was Cartwright an der üblichen Sicht als Idealismus kritisiert hat.

Hier ist es angebracht, auf Cartwrights Unterscheidung von Abstraktion und Idealisierung⁵⁴ zurückzukommen. Das Bild der *capacities* ist verknüpft mit der Ablehnung von Idealisierungen. Näherungsverfahren sind dann allenfalls mathematische Hilfsmittel ohne physikalische Bedeutung:

... it is typical in talking about idealizations to say ... : the 'departure from truth' is often 'imperceptibly small', or 'if appreciably large' then often 'its effect on the associated model can be estimated and allowed for'. But where relevant factors have been genuinely subtracted, it makes no sense to talk about the departure of the remaining law from truth, about whether this departure is small or not, or about how to calculate it. These questions, which are so important when treating of idealizations, are nonsense when it comes to abstractions. [1989, 188]

Wenden wir uns nun noch der anderen Komponente der Aufspaltung, den Atomrümpfen zu. Während die Valenzelektronen im Modell des Elektronengases alle freie Beweglichkeit bei sich vereinen, stehen die Rümpfe für die gesamte Bindung der Atome zum festen Körper ein. Man beachte aber in Abbildung 7 die abweichend gezeichnete Position eines der Rümpfe, die andeuten soll, dass die Bindungen nicht völlig starr sind. Es gibt in der Physik überhaupt keine starren Bindungen, sondern diese schwingen immer und werden in erster Näherung durch elastische ideale Federn modelliert [274]:

⁵⁴ Siehe S. 22.

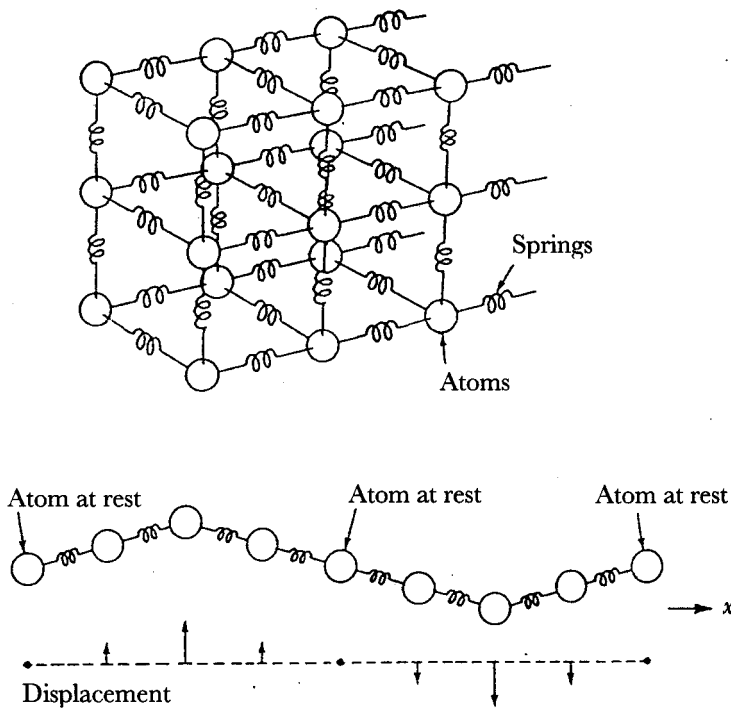


Abbildung 8: Gitterschwingungen

Das ist eines der interpretativen Modelle aus Cartwrights Katalog:

... a collection of coupled springs. ... this is one of the fundamental models of quantum mechanics and the bridge rule that links it with the well-known harmonic oscillator Hamiltonian is one of the basic (i.e., non-derivative) principles of the theory. [273-4]⁵⁵

Der harmonische Oszillator ist nur eine Näherung der tatsächlich möglichen Gitterschwingungen [274/5]. Diese Näherung wird vor allem auf Grund ihrer mathematischen Bequemlichkeit gewählt.

Die Abbildung 8 zeigt unten eine einzelne Eigenschwingung des Kristalls. Die gesamte Bewegung aller Atomrümpfe kann betrachtet werden als Überlagerung aller möglichen Eigenschwingungen mit unterschiedlicher Stärke, wobei die Gesamtenergiedichte der Schwingungen die Temperatur repräsentiert. Der elektrische Widerstand des Festkörpers kommt daher, dass die bewegten Elektronen ihre Energie abgeben, indem sie Gitterschwingungen anregen. Um diesen Vorgang mit zu modellieren, müssen auch anharmonische Anteile der Schwingungen berücksichtigt werden [275]. Das Gitter kann dann Energie in Gitterschwingungsquanten aufnehmen und abgeben, die man als weitere Quasiteilchen ansehen kann und Phononen nennt. Das Bloch-Modell wird dadurch komplizierter und kann zusätzliche Effekte darstellen, insbesondere die Bildung der Cooper-Paare im BCS-Modell. Wenn das Bloch-Modell in der Festkör-

⁵⁵ Man beachte, dass Cartwright hier von grundlegenden und abgeleiteten Prinzipien spricht. Das Bloch-Modell ist ein solches abgeleitetes Prinzip.

perphysik verwendet wird, verknüpft es also die Erklärung verschiedener Effekte.

Cartwright fügt das Bloch-Modell als neues Brückenprinzip für eine spezielle Umgebung zu den vorhandenen interpretativen Modellen hinzu:

The introduction of the Bloch Hamiltonian in the quantum theory of conductivity is a good example of the development of a new bridge principle to deal with a specific subject. [270]

Da es auf einer Näherung beruht, muss es phänomenologisch sein:

... this term appears as a phenomenological Hamiltonian. It is not assigned by mapping out the details of the interaction between the (fictitious) noninteracting electrons and the ions that make up the (fictitious) perfect lattice, but rather represents the net effect of these interactions. [270]

Sie nimmt folgerichtig an, dass diese Verwendung nicht erklärend ist:

A Hamiltonian can be admissible under a model - and indeed under a model that gives good predictions - without being explanatory if the model itself does not purport to pick out basic explanatory mechanisms. [271]

Damit hat sie im Gegensatz zur üblichen Sicht die Bloch-Theorie als nicht bestätigend für die Quantentheorie und als nicht erklärend für die Supraleitung eingeordnet. Auch das zweite Modell zur Erklärung der Supraleitung, das Cooper-Paar, wird aus ähnlichen Gründen ebenso abgewertet, wie wir nun sehen werden.

BCS-Modell

Bei sehr tiefen Temperaturen gehen einige Festkörper in den Zustand der Supraleitung über, es zeigt sich ein widerstandsloser Stromfluss, d. h. dass offenbar die Wechselwirkung der Ladungsträger mit dem Gitter wegfällt. Die Grundidee zur Erklärung war, dass irgendeine komplexe Wechselwirkung im Festkörper es einigen Ladungsträgern erlaubt, gemeinsam in einen Zustand niedrigerer Energie überzugehen, also eine Art innerer Kondensation in den supraleitenden Zustand.

Ginzburg und Landau⁵⁶ stellten einen entsprechenden Hamiltonoperator auf und passten ihn an die experimentellen Daten an. Sie hatten keine genaue Vorstellung davon, welche Wechselwirkung dieser inneren Kondensation zugrundeliegt. Cartwright [263] bezeichnet diesen Ansatz also zu Recht und in Übereinstimmung mit der üblichen Physik als phänomenologisch.

Betrachten wir nun die Lösung des Problems durch das BCS-Modell. BCS ist die Abkürzung für John Bardeen, Leon N. Cooper und John R. Schrieffer (Nobelpreis 1972), die 1957 die bis heute anerkannte Theorie der Supraleitung veröffentlichten [Bardeen, Cooper, Schrieffer 1957].

⁵⁶ Siehe dazu auch S. 33.

Zu diesem Zeitpunkt waren eine Reihe von hoch signifikanten empirischen Daten bekannt, u. a.:

- Magnetische Flussquanten⁵⁷, London-London-Gleichungen⁵⁸: Die verantwortlichen Ladungsträger haben die doppelte Ladung von Elektronen.
- Magnetische Eigenschaften, Meißner-Ochsenfeld-Effekt⁵⁹: Hinweis auf Diamagnetismus, d. h. auf ganzzahligen Spin der Ladungsträger, also auf Bosonen.
- Isotopen-Effekt⁶⁰: Die Gitterschwingungen spielen eine wichtige Rolle.
- Makroskopische Wellenfunktion: Hinweis auf Bose-Einstein-Kondensation, d. h. auf Bosonen⁶¹.

Die BCS-Theorie baut auf dem Bloch-Modell auf. Die Supraleitung wird durch die Bildung von Elektronenpaaren, sogenannten Cooper-Paaren, erklärt, die sich in einem entsprechenden Umfeld, nämlich dem Elektronengas im Gitter der Atomrümpfe, bilden können. Nur in diesem Umfeld und bei tiefer Temperatur können Elektronenpaare, die virtuell auch bei höherer Temperatur vorhanden sind, in einen Zustand niedrigerer Energie kondensieren [Buckel / Kleiner 2004, 119]:

Dieses Elektronenpaar hat den Gesamtimpuls null. Solche Paare nennt man „Cooper-Paare“, weil Cooper als Erster zeigen konnte, dass eine derartige Korrelation zu einer Absenkung der Gesamtenergie führt. Wenn wir auch noch den Eigendrehimpuls (Spin) der Elektronen berücksichtigen, was für das statistische Verhalten des neuen Teilchens wichtig ist, so besteht ein Cooper-Paar aus zwei Elektronen mit entgegengesetzten, gleich großen Impulsen und entgegengesetzten Spins:

⁵⁷ *flux quantisation* [244]: (Magnetische) Fluss-Quantisierung: Das durch einen Supraström erzeugte Magnetfeld nimmt nur feste Werte an, die ein Vielfaches eines Flussquants sind. Aus der Größe dieses Flussquants konnte vermutet werden, dass die Ladungsträger Elektronenpaare sind [Buckel / Kleiner 2004, 29 f].

⁵⁸ Von den Brüdern Fritz und Heinrich London 1935 mittels der Elektrodynamik aufgestellte Formeln für die Supraleitung, die erfolgreich einen Teil der Phänomene beschreiben [Hellwege 1988, 514].

⁵⁹ Ein bestehendes Magnetfeld sollte nach London-London eingefroren werden, es wird aber, wie Meißner und Ochsenfeld 1933 feststellten, verdrängt [Buckel / Kleiner 2004, 23].

⁶⁰ Die Sprungtemperatur hängt vom Isotop, also der Atommasse des Elements ab, das den Festkörper bildet. Da die Elektronenkonfiguration und das Gitter vom Isotop unabhängig sind, die Schwingungsfrequenzen des Gitters aber natürlich von der Masse der schwingenden Atome abhängen, muss die Sprungtemperatur mit den Gitterschwingungen zusammenhängen [Buckel / Kleiner 2004, 129].

⁶¹ Teilchen werden nach ihrem statistischen Verhalten in Bosonen und Fermionen unterschieden. Teilchen mit halbzahligem Spin sind Fermionen und haben die Eigenschaft, dass gleiche Teilchen sich auf verschiedenen Energieniveaus befinden müssen. Teilchen mit ganzzahligem Spin sind Bosonen und können gemeinsam ein einziges – im Allgemeinen das unterste – Energieniveau auffüllen [Wachter / Hoerber 2005, 367-70].

Cooper-Paar: $\{\vec{k} \uparrow, -\vec{k} \downarrow\}$

Die Korrelation zu Cooper-Paaren wird durch die Polarisation des positiven Gitters energetisch günstig.

Die Elektronen können sich normalerweise nicht so nahe kommen, weil sie sich aufgrund ihrer gleichen Ladung abstoßen. Erst bei großer Entfernung zwischen zwei Elektronen wird die Abstoßung durch die Abschirmung im Gitter aufgehoben und eine Anziehung durch Vermittlung des Gitters überwiegt. Ein Cooper-Paar hat eine Ausdehnung von 10^2 bis 10^3 nm [Buckel / Kleiner 2004, 122], entsprechend dem Abstand von etwa 1000 Gitteratomen. Deshalb nennt man die gemeinsame Wellenfunktion der Paare „makroskopisch“

Die Wechselwirkung der beiden Elektronen eines Paares wird über das Gitter vermittelt. Man kann dies durch den Austausch eines Quants der Gitterschwingungen, eines Phonons, darstellen [273]:

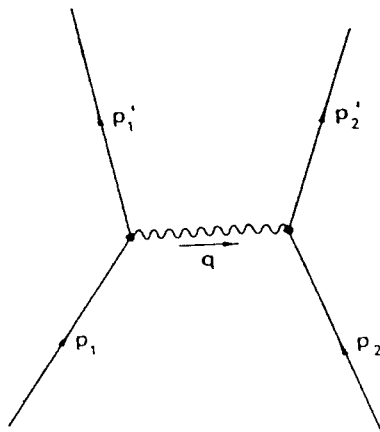


Abbildung 9: Phononaustauschwechselwirkung

Das Elektron mit dem Impuls p_1 streut am Gitter (neuer Impuls p_1') und regt eine Gitterschwingung an (erzeugt ein Phonon mit dem Impuls $q = p_1' - p_1$). Das Elektron mit dem Impuls p_2 streut (neuer Impuls $p_2' = p_2 + q$) am schwingenden Gitter (vernichtet das Phonon mit dem Differenzimpuls q). Dadurch entsteht eine Bindung zwischen den Elektronen, d. h. die Gesamtenergie des Paares ist erniedrigt (Austauschwechselwirkung). Die Bindung der Gitteratome vermittelt also die Bindung der Elektronen. Da für die Paarbildung eine passende zweifache Streuung notwendig ist, hat der Vorgang eine relativ geringe Wahrscheinlichkeit, d. h. nur wenige der Leitungselektronen des Elektronengases befinden sich jeweils im Paarzustand. Wenn diese jedoch unterhalb der Sprungtemperatur kondensieren und dann widerstandslos fließen, machen sie sich überwältigend bemerkbar.

Das BCS-Modell setzt das Bloch-Modell voraus. Wir können hier denselben Näherungsmechanismus verwenden wie beim Bloch-Modell der Normal-

leitung⁶², allerdings mit anderen Komponenten: Der ungestörte Zustand ist der Gesamtzustand der Normalleitung im Bloch-Modell. Die zusätzliche Komponente ist die in einer makroskopischen Wellenfunktion kondensierte kleine Menge der Cooper-Paare. Damit ist wieder die Voraussetzung erfüllt, dass die im Näherungsverfahren abgespaltene Komponente nur einen geringen Anteil des Gesamtsystems ausmachen darf.

Warum fällt für Cooper-Paare der elektrische Widerstand weg? Die Streuung einzelner Elektronen am Gitter der Atomrümpfe steht bei Paaren nicht zur Verfügung, eine Streuung eines Paares am Gitter erfordert sehr viel höhere Energie, die einzige verbleibende mögliche Wechselwirkung ist das Aufbrechen des Paares, wozu eine passende Streuung stattfinden muss und beide Partner auf ihre Normalenergie angehoben werden müssen. Im Resultat entsteht eine Energielücke [Buckel / Kleiner 2004, 126], die wesentlich breiter ist als die vorhandenen Anregungsenergien. Cooper-Paare werden also nicht gestreut, ihr Stromfluss nimmt nicht ab, es besteht Supraleitung.

Wir können nun vergleichen, wie Bardeen, Cooper und Schrieffer ihren Ansatz erläutern und wie Cartwright ihn bewertet. Laut Cartwright [263] ist die BCS-Theorie ein *more principled treatment* als die Theorie von Ginzburg und Landau. Wie sie referiert, kann aus der BCS-Theorie die vorhergehende phänomenologische Theorie von Ginzburg und Landau hergeleitet werden. Eine Gegenüberstellung dieser beiden Theorien kann also Inhalt und Wirkung eines *principled treatment* zeigen und ist deshalb der eigentliche Inhalt der Fallstudie. Cartwright konzentriert sich dabei auf eine Analyse des von BCS angegebenen Hamiltonoperators.

Der Unterschied zwischen beiden Theorien besteht im Modell der Cooper-Paare. Offensichtlich ist also in Cartwrights Sicht der Katalog der interpretativen Modelle um dieses Modell erweitert worden. Inzwischen gibt es für die Hochtemperatursupraleiter weitere kompliziertere Korrelationen von Elektronen, für die wiederum das Modell Cooper-Paar das interpretative Grundmodell sein könnte. Die Menge der Brückenprinzipien ist nicht so statisch, wie man bei Cartwrights These der *dappled world* vielleicht vermuten würde. Dies ist noch kein Argument gegen die *dappled world*, denn auch eine wachsende Menge von Brückenprinzipien kann nicht garantieren, dass mit ihnen die ganze Welt erklärbar wird.

Cartwright [1999b, 200]⁶³ gibt für das BCS-Modell den folgenden Hamiltonoperator [BCS 1957, 1179 (2.4)] an:

⁶² Siehe zur Störungsrechnung S. 40.

⁶³ Im bezogenen Aufsatz fehlte diese Formel, vermutlich durch einen redaktionellen Fehler.

$$\begin{aligned}\mathcal{H} &= \mathcal{H}_{\text{Bloch}} + \mathcal{H}_{\text{Coul.}} + \mathcal{H}_{\text{electron-phonon}} \\ \mathcal{H}_{\text{Bloch}} &= \sum_{k > k_F} \varepsilon_{\mathbf{k}} n_{\mathbf{k}\sigma} + \sum_{k < k_F} |\varepsilon_{\mathbf{k}}| (1 - n_{\mathbf{k}\sigma}) \\ \mathcal{H}_{\text{Coul.}} &= (1/2) \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N (e^2 / 4\pi\epsilon_0 |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) 1/e^{k_F \cdot |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \\ \mathcal{H}_{\text{electron-phonon}} &= \frac{1}{2} \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{k}', \sigma, \sigma', \boldsymbol{\kappa}} \frac{2\hbar\omega_{\boldsymbol{\kappa}} |M_{\boldsymbol{\kappa}}|^2 c^*(\mathbf{k}' - \boldsymbol{\kappa}, \sigma') c(\mathbf{k}', \sigma') c^*(\mathbf{k} + \boldsymbol{\kappa}, \sigma) c(\mathbf{k}, \sigma)}{(\varepsilon_{\mathbf{k}} - \varepsilon_{\mathbf{k} + \boldsymbol{\kappa}})^2 - (\hbar\omega_{\boldsymbol{\kappa}})^2}\end{aligned}$$

Abbildung 10: Formel des BCS Hamiltonoperators

H_{Bloch} : Bloch-Potential: Freie Elektronen paarweise im Kristallgitter

$H_{\text{Coul.}}$: Direkte Wechselwirkung der Elektronen miteinander (abgeschirmt durch die Rumpfe)

$H_{\text{electron-phonon}}$: Wechselwirkung der Elektronen mittels der Gitterschwingungen

Sie meint, dass BCS anschließend diesen Operator willkürlich vereinfachen. Für BCS ist dies in der Tat erst der Ausgangspunkt ihrer Darstellung. Sie haben hier die Elektronen schon paarweise sortiert, aber die spezielle Wirkung der Cooper-Paare ist noch nicht erkennbar. Sie schildern ihren Ansatz:

Most of the relatively large energy associated with correlation effects occurs in both normal and superconducting phases and cancels out in the difference. One of the problems in constructing a satisfactory microscopic theory of superconductivity has been to isolate that part of the interaction which is responsible for the transition. [BCS 1957, 1176]

D. h. sie wollen einen Teil des Gesamtzustands isolieren, der für die Supraleitung verantwortlich ist und den man erst einmal finden muss. Für BCS geht es darum, den Gesamtzustand zu zerlegen in einen Teil, der im Bereich der Sprungtemperatur beim Übergang zur Supraleitung konstant bleibt und den man infolgedessen als Grundzustand betrachten kann, und einen Teil, der sich dabei verändert und deshalb die Störung bildet.

Es handelt sich um eine Näherungsrechnung höherer Ordnung auf der Basis des Bloch-Modells:

In second order, there is one term which gives a renormalization of the phonon frequencies, and another, ... which gives a true interaction between electrons, independent of the vibrational amplitudes. [BCS 1957, 1176]

Sowohl die Elektronen als auch ihr Untergrund müssen richtig bestimmt werden:

Particularly for the longwavelength part of the interaction, it is important to take into account the screening of the Coulomb field of any one electron by other conduction electrons. [BCS 1957, 1176]

Dann kann die richtige Wechselwirkung identifiziert werden:

We shall call the interaction ... between electrons resulting from the electron-phonon interaction the "phonon interaction." This interaction is attractive when the energy difference ... between the electron states involved is less than $\hbar\omega$. [BCS 1957, 1176]

Man nimmt nun ein Bloch-Modell, das aus Paaren besteht:

In the theory, the normal state is described by the Bloch individual-particle model. The ground-state wave function of a superconductor is formed by taking a linear combination of many low-lying normal state configurations in which the Bloch states are virtually occupied in pairs of opposite spin and momentum. [BCS 1957, 1176]

Damit erhält man die notwendige Energielücke, so dass keine Streuung der Paare mehr stattfinden kann:

The theory yields an energy gap for excitation of individual electrons from the superconducting ground state of about the observed order of magnitude. [BCS 1957, 1177]

Die Erwähnung der richtigen Größenordnung der Effekte bedeutet nicht, wie Cartwright meint, dass die Theorie ad hoc ist, sondern dass sie sich an der Empirie bewährt.

Es wird die Differenz von Normal- zu Suprazustand dargestellt:

The interaction which produces the energy difference between the normal and superconducting phases in our theory arises from the virtual exchange of phonons and the screened Coulomb repulsion between electrons. Other interactions, such as those giving rise to the single-particle self-energies, are thought to be essentially the same in both states, their effects thus cancelling in the energy difference. [BCS 1957, 1178]

Supraleitung kann dann unterhalb der Temperatur stattfinden, bei der die Anziehung überwiegend wird:

Our criterion for superconductivity is that the attractive phonon interaction dominate the Coulomb interaction for those matrix elements which are of importance in the superconducting wave function. [BCS 1957, 1179]

Man kann dann den obigen schon gegebenen Hamiltonoperator, der bereits auf das Problem angepasst war, weiter reduzieren:

We start then by considering a reduced problem in which we include only configurations in which the states are occupied in pairs ... [BCS 1957, 1180]

Es ergibt sich der nach Cartwright [266] ‚reduced‘ Hamiltonian [BCS 1957, 1180 (2.14)]:

$$H_{\text{red}} = 2 \sum_{k > k_F} \epsilon_k b_k^* b_k + 2 \sum_{k < k_F} |\epsilon_k| b_k b_k^* - \sum_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} V_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} b_{\mathbf{k}'}^* b_{\mathbf{k}}$$

Abbildung 11: Reduzierte Formel des Hamiltonoperators

BCS erläutern, dass es sich dabei um die Aufspaltung der Störungsrechnung handelt:

Our theory may be regarded as an extension of the Bloch theory to superconductors in which we introduce only those interactions responsible for the transition. [BCS 1957, 1198]

Cartwright wertet dies dagegen wiederum als ad hoc:

This ... model is chosen with a look in two directions: to the theory on the one hand and to the real superconducting material on the other. The model aims to be explanatory. That means both that it should represent basic factors that will be

taken as responsible for the superconductivity phenomena derived and that it must bring these factors under the umbrella of the theory, that is, it must use representations which we have a principled way of treating in the theory. It is significant for my central point about the limits of theory that the only kind of Hamiltonian used to describe this underlying model is the one for the Coulomb potential. [276]

Sie behandelt am Beispiel der Theorie der Supraleitung die Frage, wie man einen Fortschritt erzielen kann. Das Neue sei dann im repräsentativen Modell, das eine neue Kombination aus dem Modellvorrat darstelle. Die Hamiltonoperatoren dazu kennt man schon alle. Sie wiederholt noch einmal ihre Grundthesen:

We do not keep inventing new Hamiltonians for each new phenomenon, as we might produce new quantum states. Rather the Hamiltonians function as abstract concepts introduced only in conjunction with an appropriate choice of a concrete description from among our set stock of interpretative models. [278]

Es ist nur die Frage, ob sie damit die Entwicklung der Theorie der Supraleitung richtig beschreibt.

Für BCS ist ihre Theorie eine Erklärung, weil sie ein zutreffendes Modell aus der richtigen Domain bringen. Das ist ein Argument, das es für Cartwright nicht gibt. Nach ihrer Meinung kommt die Coulomb-Wechselwirkung nicht deshalb in Frage, weil sie zur Anwendungsmenge gehört, sondern weil im Modell ein bekanntes Element auftritt, das mit der Coulomb-Wechselwirkung erklärt worden ist.

Nach Cartwrights Meinung hat die Verwendung interpretativer Modelle der Theorie die beste Erklärungswirkung [268]. Zusätzliche Brückenprinzipien für spezielle Situationen, wie das Bloch-Modell des Elektronengases im Gitter kommen nur unter Verzicht auf eigene Erklärungswirkung dazu [270-1]. Sie behauptet, die spezielle Theorie von BCS verwende einerseits zwar bekannte interpretative Modelle der Coulomb-Wechselwirkung, mache dann aber einen Ansatz mit Vernachlässigung unwichtigerer Wechselwirkungen [269]. Dieser sei gerechtfertigt durch den Erfolg, aber habe nur schwache Erklärungswirkung. Diese weiteren Beschränkungen des Hamiltonians seien nicht Eigenschaften des Modells, sondern ein *Ansatz*, so dass gelte:

The BCS Hamiltonian is not assigned in as principled a way as I may seem to be suggesting though. For a crucial assumption in the end is a restriction on which states will interact with each other in a significant way. [269]

Deshalb erfüllt die BCS-Theorie nicht vollständig ihre Ansprüche:

... the BCS Hamiltonian is at once both theoretically principled and phenomenological or *ad hoc*. [269]

Die begründeten Argumente von BCS über die Auswahl der relevanten Wechselwirkung kann sie in ihrem Bild nicht akzeptieren:

Because of these *ad hoc* features it makes sense to talk both of the BCS theory and separately of the BCS model since the assumptions made in the theory go beyond what can be justified using acceptable quantum principles from the model that BCS offer to represent superconducting phenomena. [269, Anm. 20]

Dass die Cooper-Paare eine komplexe Konstellation von Experimentaldaten schlüssig erklären und damit eine hohe Erklärungswirkung haben, ist in ihrer Sicht nicht vorhanden.

Schlussfolgerungen

Cartwrights Sicht kann eine Reihe positiver Leistungen für sich beanspruchen:

- Sie macht die Vielfalt plausibel, die der Wissenschaftler vorfindet, weswegen bei fast jeder Frage experimentelle Forschung notwendig ist.
- Sie betont die eigenständige Bedeutung der Empirie.
- Sie macht deutlich, dass es darauf ankommt, den Transfer der Erklärungskraft von einer Anwendung zu einer anderen zu verstehen.
- Das Umfeld, die Abschirmung wird in das Blickfeld geholt und bekommt ihre gleichberechtigte Bedeutung.
- Die erforderliche kreative Anstrengung, die notwendig ist, um Regelmäßigkeiten zu finden und den Bereich zu etablieren, wo sie gelten, wird deutlich.
- Es wird betont, dass es letztlich auf die Anwendung in Handlungen zur Veränderung der Welt ankommt.
- Die unumgängliche Notwendigkeit interpretativer Modelle für abstrakte Begriffe wird gezeigt.
- Die relative Selbständigkeit der Modelle gegenüber der Theorie wird deutlich. Dies leistet allerdings auch eine semantische strukturalistische Betrachtung.
- Die *capacities* passen zur Quantenmechanik.
- Gegen metaphysische Anwandlungen, wie z. B. dass die Gesetze so unerklärlich einfach seien, ist sie immun.
- Die Kritik des Theorienimperialismus.

Aber alles dies macht einen Empirismus nur möglich, nicht notwendig, und es impliziert nicht Cartwrights spezifische These der *dappled world*.

Als negativ erscheint zunächst eine prinzipielle Naivität:

- Persistenz und Additivität der *capacities* werden nicht problematisiert.
- Mathematische Methoden, z. B. die Störungsrechnung, haben einen ungeklärten Status, so dass ihre Erklärungsleistung nicht erfasst wird.

Vor allem aber fehlt die Erklärungsleistung aus Vernetzung:

- Beziehungen zwischen *capacities* sind ohne erklärende Relevanz.

Die These der *dappled world* ist nicht nebensächlich. Für Cartwright sind Strukturen Artefakte und fallen damit für Erklärungen aus. Das ist das Kennzeichen

und die Schwäche ihrer Position. Hacking⁶⁴ stellt dies als die besondere Eigenheit von Cartwrights Empirismus heraus:

This is a striking reversal of the empiricist tradition going back to Hume. In that doctrine it is only the regularities that are real. Cartwright is saying that in nature there are no deep and completely uniform regularities. The regularities are features of the ways in which we construct theories in order to think about things. [Hacking 1983, 37-8]⁶⁵

Für diese Position gibt Cartwright nachvollziehbare Gründe an. Die Welt müsse als *dappled* betrachtet werden, denn ihre „offensichtliche Unordnung“ stehe im Widerspruch zu einer vorausgesetzten universellen Gesetzmäßigkeit.

Die übliche Sicht würde dazu sagen: Die scheinbare Unordnung liegt daran, dass die Welt zu vielfältig gekoppelt ist. Unsere Maschinen müssen deshalb in der Tat die Phänomene isolieren. Wo sie sich isolieren lassen, da spaltet sich auch der Hamiltonoperator. Wo sie sich isolieren lassen, kann man mit Näherungsverfahren arbeiten. Wenn wir etwas nicht isolieren und nicht rechnen können, dann heißt das nicht, dass es sich nicht nach unseren Gesetzen richtet, aber wir können das dann nicht feststellen und wir können es nicht nutzen. Das ist praktisch gleichwertig damit, als würde es sich nicht nach Gesetzen richten. Wie wir das dann sehen wollen, ist in erster Linie irrelevant, allenfalls Impuls für die weitere Forschung.

Das ist in aller empirisch relevanten Hinsicht identisch mit Cartwrights Standpunkt. Sie besteht nur darauf, dass wir nicht vorgeben sollen, dass Gesetze gelten.

Stattdessen wäre mehr empiristisches Selbstbewusstsein angebracht. Wir finden auch Ordnung und das impliziert nicht, dass Gesetze gelten. Ein Gesetz ist eine gesonderte Hypothese. Wenn Cartwright mit der *dappled world* dagegen argumentiert, verhält sie sich, als gäbe es Induktion. Die Welt ist nur *dappled* für jemand, der Theorien im klassischen Sinne erwartet.

Für einen korrekt vorgehenden Physiker ist klar, dass die Theorie nur so weit reicht wie ihre Spezialisierungen. Die Aufstellung eines Hamiltonoperators ist für ihn vielleicht sogar nur eine Pflichtübung, sowieso immer möglich, weil sie nur Symmetrien voraussetzt, die klassisch und quantenmechanisch gegeben sind. Cartwright kann nur *dappled* denen entgegenhalten, die eine *theory of everything* propagieren, und die gibt es natürlich. Wenn aber die Physiker das in der Praxis nicht ernst nehmen, dann handelt es sich um ein Scheingefecht. Dies sieht Cartwright selbst, wenn sie zur Darstellung Buckels⁶⁶ ausführt:

It is often claimed, that the Ginzburg-Landau model was not treated seriously until after we could see ... how it followed from the more principled treatment of the BCS theory. It remains an interesting question whether this account is really histo-

⁶⁴ Hacking gibt nicht in jedem Fall Cartwrights Position richtig wieder.

⁶⁵ Siehe auch [1989, 3] S. 25.

⁶⁶ Das bezieht sich auf Buckel / Kleiner [2004, 209]. Cartwright benutzt die englische Übersetzung einer früheren Auflage.

rically accurate or rather reflects a preference in the authors for principled treatments. [263 und Anm. 17]

Auch nach Cartwright werden wir in allen Fällen mit Recht bei jeder gefundenen *capacity* versuchen, sie auf weitere Situationen zu verwenden. Eine Welt, die geordnet genug ist für nomologische Maschinen ist auch geordnet genug für Gesetzhypothesen. Ein Empirismus, der etwas gegen Gesetzhypothesen hat, kann sich dagegen nur durchsetzen, wenn er eine andere Erklärung für die Ordnung liefert.

Nach Cartwrights Meinung ist die BCS-Theorie verglichen mit der Ginzburg-Landau-Theorie erklärend, weil sie nach dem *principled way* vorgeht. Es ist aber nicht alles erledigt, wenn die Herleitung *principled* ist, man bedenke nur, was zu tun wäre, wenn es anders als in diesem Fall davon mehrere Möglichkeiten gäbe. Nun ist aber eine Theorie durch die Empirie meist unterbestimmt. Der *principled way* gibt also nur notwendige Bedingungen für eine Erklärung an, nicht ihr volles Gewicht. Gesichtspunkte wie z. B.

- es muss ein neuer Effekt sein, es passt nicht zu bekannten,
- es muss eine Symmetriebrechung sein, es ist ein Phasenübergang,

stehen nicht im Hamiltonoperator, aber gehören zu seiner Begründung und zu seiner Erklärungsleistung. Insbesondere Gesichtspunkte der Einbettung, z. B. dass es eine Austauschwechselwirkung sein muss, werden von BCS im begleitenden Text der Veröffentlichung erklärt. Für die Kopplung der Elektronen zum Paar kommen noch andere Mechanismen in Frage. Der vorliegende wird von der Empirie gefordert. Was Cartwright für Willkür halten muss, welche Faktoren als relevant angesehen werden, ist in der Empirie begründet.

Die BCS-Theorie ist für Cartwright nur eine eingeschränkte Erklärung. Die Physiker aber sind mehr als zufrieden. Alles Nötige kann mit dieser Theorie erfolgreich getan werden. Auch Cartwright müsste dann als Empiristin zufrieden sein. Woher kommt diese Differenz zwischen Empirie und Empirismus? Sie hat sich im Namen der *dappled world* selbst der Möglichkeit beraubt, die BCS-Theorie als Erklärung anzunehmen.

Es reicht auch nicht, das Bloch-Modell unter die interpretativen Modelle aufzunehmen, sozusagen zur freien Auswahl bei Bedarf. Man wird es immer wählen bei einem Festkörper. D. h. es steht nicht nur zur Verfügung, sondern es ist eine Beziehung zwischen den Modellen vorhanden, die „Festkörper impliziert Bloch-Modell“ sagt. Eine Wissenschaftstheorie sollte eine solche Beziehung abbilden können. Das ist bei Cartwrights Sicht nicht grundsätzlich unmöglich. Für Empirismus ist erforderlich, dass die Theorien sich nur aus der Erfahrung herleiten. Wie das geschieht, beschreibt Cartwright. Um diesen Vorgang zu ermöglichen, müssen wir *capacities* annehmen. Diese haben nun schon die Grundeigenschaft, überhaupt Verallgemeinerungen zu erlauben, sonst wären es akzidentelle Eigenschaften und nicht eben *capacities*. Es ist übertrieben, nun zu verlangen, dass die Beziehungen zwischen *capacities* nicht empirisch relevant sein sollen. Die Welt ist dann immer noch *dappled* genug.

Abbildungen{ INHALT Abbildungen}

Schema des BCS-Modells und beteiligter Theorien	5
Schema der vermittelnden Rolle von Modellen	9
Pyramide der alles erklärenden Wissenschaften	28
The dappled world	28
Erwartete Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes	32
Entdeckung der Supraleitung	33
Elektronengas und Atomrümpfe	40
Gitterschwingungen	43
Phononaustauschwechselwirkung	46
Formel des BCS Hamiltonoperators	48
Reduzierte Formel des Hamiltonoperators	49

Literatur{ INHALT Literatur}

Literaturhinweise stehen im Text in eckigen Klammern in der Form [Autor Jahr, Seite]. Angaben ohne Autor beziehen sich auf Cartwright, Seitenangaben ohne Autor und Jahr auf den behandelten Aufsatz von Cartwright [1999a].

Bailer-Jones, Daniela [2005]: *Standing up against traditions: Models and theories in Nancy Cartwright's philosophy of science*. Soll erscheinen in: Bovens, Luc / Hartmann, Stephan (Hg.): (*unbek. Titel*). (Vorauss.) 2005.

Bardeen, J. / Cooper, L. N. / Schrieffer J. R. [1957]: *Theory of Superconductivity*. In: *Physical Review* 108 (1957), 1175-1204.

BCS [1957] siehe Bardeen / Cooper / Schrieffer [1957].

Buckel, Werner / Kleiner, Reinhold [2004]: *Supraleitung. Grundlagen und Anwendungen*. 6. A., Wiley-VCH, Weinheim 2004.

Cartwright, Nancy [1983]: *How the Laws of Physics Lie*. Oxford UP 1983.

Cartwright, Nancy [1989]: *Nature's Capacities and their Measurement*. Clarendon P, Oxford 1989.

Cartwright, Nancy [1995]: *Otto Neurath: Philosophy between Science and Politics*. Cambridge UP 1995.

Cartwright, Nancy [1999a]: *Models and the limits of theory: quantum Hamiltonians and the BCS model of superconductivity*. In: Morgan / Morrison [1999], 241-281.

Cartwright, Nancy [1999b]: *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science*. Cambridge UP, Reprint 2001.

Gähde, Ulrich [2005]: *Nancy Cartwright on Theories, Models, and their Application to Reality: A Case Study*. Preprint 2004 zum Erscheinen in: Bovens, Luc / Hartmann, Stephan (Hg.): (unbek. Titel). (Vorauss.) 2005.

Hacking, Ian [1983]: *Representing and Intervening*. Cambridge UP 1983.

Hellwege, Karl-Heinz [1988]: *Einführung in die Festkörperphysik*. 3. A, Springer-V, Berlin u. a. 1988.

Hughes, R. I. G. [1999]: *The Ising model, computer simulation, and universal physics*. In: Morgan / Morrison [1999], 97-145.

Ketterson, J. B. / Song, S. N. [1999]: *Superconductivity*. Cambridge UP, 1999.

Lessing, Gotthold Ephraim [1759]: *Abhandlungen ueber die Fabel*. In: *Gesammelte Werke*, Band 4. Aufbau Verlag, Berlin 1955.

Mayer-Kuckuk, Theo [1974]: *Physik der Atomkerne. Eine Einführung*. Teubner, 2. A, Stuttgart 1974.

Messiah, Albert [1958]: *Quantum Mechanics*. North-Holland, Amsterdam 1961. Ursprünglich französisch: *Mecanique quantique*. 1958.

Morgan, Mary S. / Morrison, Margaret (Hg.) [1999]: *Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science*. Cambridge UP 1999.

Morrison, Margaret [1999]: *Models as autonomous agents*. In: Morgan / Morrison [1999], 38-65.

Neurath, Otto [1935]: *Einheit der Wissenschaft als Aufgabe*. In: *Erkenntnis* 5 (1935), 16-22. Übers.: *The Unity of Science as Task*. In: Neurath: *Philosophical Papers 1913-46*. Reidel, Dordrecht 1983.

Wachter, Armin / Hoerber, Henning [2005]: *Repetitorium Theoretische Physik*. 2. A, Springer V, Berlin u. a. 2005.

Ziman, John M. [1972]: *Prinzipien der Festkörpertheorie*. 2. A, V Harry Deutsch, Frankfurt/Main 1992. Übers. von: *Principles of the Theory of Solids*. 2nd ed., Cambridge UP, London 1972.

Ich danke Professor Gähde, den Teilnehmern des Seminars und Marianne v. Ilten für hilfreiche Hinweise und Diskussionen.

Datei: Philosophie/Seminararbeiten/Cartwright/Cartwright.doc

Version: 3.94

Druckdatum: 13.04.08

Schlüssel: Cartwright, Empirismus, Modell, Wissenschaftstheorie, Supraleitung

Kommentar: Rekonstruktion und Kritik des Empirismus Cartwrights

© Eckehard Seidl, 2005
