

Über die heuristische Funktion des Korrespondenzprinzips

Stephan Hartmann*

Die Frage nach dem Verhältnis aufeinanderfolgender Theorien rückte spätestens mit der Publikation von T. S. Kuhns einflußreicher Schrift *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* im Jahre 1961 in den Brennpunkt wissenschaftsphilosophischer Untersuchungen. Dabei gibt es im wesentlichen zwei große Lager. Auf der einen Seite stehen Philosophen wie P. Feyerabend und T. S. Kuhn selbst, die den Aspekt der Diskontinuität in der Theoriengeschichte betonen. In diesem Zusammenhang ist dann die Rede von Paradigmen, dem Phänomen der Inkommensurabilität und eben wissenschaftlichen Revolutionen. Der Begriff 'Revolution' spielt hier gerade auf den radikalen Bruch der Nachfolgertheorie mit der Vorgängertheorie an.

Auf der anderen Seite stehen diejenigen Philosophen, die die traditionelle Auffassung eines mehr oder weniger kumulativen Fortschritts der Wissenschaft gegen die Einwände von Kuhn und Feyerabend und deren Anhängern zu verteidigen suchen. Dieser konservativen Auffassung zufolge wächst unser wissenschaftliches Wissen gleichsam wie ein Balon, der immer weiter aufgeblasen wird. Die Debatte zwischen den beiden Lagern wird z. T. recht heftig geführt; offenbar steht viel auf dem Spiel - für manche sogar die Rationalität der Wissenschaft.

Hier gilt es zwischen zwei extremen Positionen zu vermitteln. Tatsächlich ist es in der wissenschaftlichen Praxis oftmals so, daß eine Nachfolgertheorie gewisse Elemente der Vorgängertheorie übernimmt. Das spricht für die kumulative Auffassung. Andererseits gibt es auch zahlreiche überzeugende Beispiele aus der Wissenschaftsgeschichte, die auf radikale Brüche in der Theorieentwicklung hinweisen. Es ist jedoch schwer, genau zu begründen, warum bestimmte Elemente der Vorgängertheorie von ihrer Nachfolgerin übernommen wurden, während andere aufgegeben werden mußten. Von einer Heuristik der wissenschaftlicher Theoriebildung würde man erwarten, daß sie Kriterien bereitstellt, welche es uns gestatten, genau diejenigen Elemente der Vorgängertheorie herauszufinden, die es zu übernehmen gilt, und diejenigen, die aufgegeben und durch andere ersetzt werden müssen. Ist dies möglich?

Während es schwierig zu sein scheint, genaue Kriterien der genannten Art anzugeben, so sind doch eine Reihe von Rahmenbedingungen formuliert worden, die sich auf das Verhältnis von Vorgänger- und Nachfolgertheorie beziehen. In diesem Zusammenhang

*Eine leicht erweiterte Version dieses Aufsatzes erschien in J. Mittelstraß (ed.), *Die Zukunft des Wissens*, Konstanz: Universitätsverlag Konstanz 1999, 500–506.

spielen insbesondere Korrespondenzüberlegungen eine herausgehobene Rolle. Das zeigt etwa die Geschichte der Physik, wie man am Beispiel des *Bohrschen Korrespondenzprinzips* sieht. Dieses heuristische Prinzip förderte die Entwicklung der Quantenmechanik, indem es den Raum möglicher Theorien stark einschränkte. Von der zu entwickelnden Theorie wurde gefordert, daß sie in einem bestimmten Grenzfall in die Physik Newtons und Maxwells übergeht. Später wurde das Bohrsche Korrespondenzprinzip von dem englischen Wissenschaftsphilosophen Heinz Post zum *Allgemeinen Korrespondenzprinzip* erweitert, welches von einer jeden Nachfolgertheorie verlangt, den empirischen Erfolg ihrer Vorgängerin zu reproduzieren und zu erklären.

Im folgenden soll der Frage nachgegangen werden, welche Rolle das Allgemeine Korrespondenzprinzip bei der Konstruktion von modernen physikalischen Theorien tatsächlich spielt. Dies geschieht in den folgenden drei Abschnitten. Abschnitt 1 stellt zunächst das Allgemeine Korrespondenzprinzip vor und versucht zu präzisieren, wie und auf was genau es überhaupt anwendbar ist. Im Zentrum von Abschnitt 2 steht dann eine Fallstudie, die skizziert, welche Rolle Korrespondenzüberlegungen bei der Lösung eines noch offenen physikalischen Problems spielen. Abschnitt 3 zieht schließlich einige Folgerungen aus der Fallstudie und faßt die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zusammen.

1 Das Allgemeine Korrespondenzprinzip

Wenn soeben von der Quantenmechanik und dem Bohrschen Korrespondenzprinzip die Rede war, so soll damit nicht gesagt sein, daß die Quantenmechanik dieses Prinzip (und damit auch das nun zu besprechende Allgemeine Korrespondenzprinzip) tatsächlich erfüllt. Tatsächlich hat sich gezeigt, daß das Verhältnis von Klassischer Physik und Quantenphysik weitaus komplizierter ist, als man es dem Bohrschen Korrespondenzprinzip zufolge erwarten würde.

Insofern stellt die Quantenmechanik also gerade eine Ausnahme für das Allgemeine Korrespondenzprinzip dar. Dies ist insofern bedenklich, als die Quantenmechanik als eine der besten vorliegenden wissenschaftlichen Theorien gilt. Man mag daher geneigt sein, das Allgemeine Korrespondenzprinzip zu verwerfen. Heinz Post (1971), dem wir das Allgemeine Korrespondenzprinzip verdanken, beschritt jedoch einen anderen Weg. Seiner Meinung nach spricht es gerade gegen die Quantenmechanik, daß sie das Prinzip nicht erfüllt. Das Scheitern des Korrespondenzprinzips verweist also auf die Unvollständigkeit und Vorläufigkeit der Theorie.

Wie dem auch sei, eine eingehende Beschäftigung mit dem Prinzip und seinem Wert bei der Theorieentwicklung setzt jedenfalls eine genaue Bestimmung der Aussage des Prinzips voraus. Post definiert das Allgemeine Korrespondenzprinzip wie folgt:

[A]ny acceptable new theory L should account for the success of its predecessor S by degenerating into that theory under those conditions under which S has been well confirmed by tests.¹

¹Post (1971), S. 228.

Dabei ist zu beachten, daß das Prinzip sowohl deskriptiv als auch normativ zu verstehen ist. Post begründet sein Prinzip mit einer Fülle von Beispielen, die selbst Paul Feyerabend beeindruckt zu haben scheint. Das Prinzip reflektiert eine gewisse konservative Grundhaltung, die Post zufolge allen guten Wissenschaftlern zueigen ist (zumindest dann, wenn es um Theoriebildung geht). Neben dem Allgemeinen Korrespondenzprinzip formuliert Post eine Reihe weiterer heuristischer Regeln, die bei der Theorieentwicklung verwendet werden können. Einer dieser Regeln zufolge sind es weniger experimentelle Anomalien, die den Theoriebildungsprozeß in Gang setzen, als vielmehr formale Fehler in einer bereits bestehenden Theorie. Es gilt nun, die fehlerhaften Elemente zu eliminieren und unter Beachtung des Allgemeinen Korrespondenzprinzips durch andere zu ersetzen.

Es bleibt allerdings bei diesen Betrachtungen offen, welche Elemente der Vorgängertheorie unter welchen Bedingungen in der Nachfolgertheorie weiterhin vorhanden sein sollen. Sind dies einzelne Terme, Gesetze, Modelle oder gar allgemeine Strukturen? Eine Antwort auf diese Frage kann zunächst nur unter Rückgriff auf Fallstudien erhalten werden. Zahlreiche detaillierte Fallstudien dieser Art finden sich u. a. in der Publikation von Post sowie in einem von S. French u. H. Kamminga (1993) herausgegebenen Band versammelt.² Das Spektrum reicht von abstrakten mathematischen Strukturen bis hin zu sehr konkreten Modellannahmen, einzelnen Gesetzen oder bloß bestimmten Termen oder operationalen Vorschriften. Mal scheint ein strikter Reduktionismus mit dem Allgemeinen Korrespondenzprinzip verknüpft zu sein, in anderen Fällen sind aufeinanderfolgende Theorien nur sehr lose verknüpft.

Dies scheint darauf hinzudeuten, daß das Allgemeine Korrespondenzprinzip mit einem weiten Spektrum von Fallbeispielen vereinbar ist. Und doch stellt sich gerade daher die Frage nach dem wirklich interessanten Kern des Prinzips. Darüber hinaus ist zu klären, welche Rolle das Prinzip tatsächlich spielt, wenn es um die Konstruktion neuer Theorien geht.

2 Fallstudie: Hochtemperatur-Supraleitung

Diesen Fragen soll nun anhand einer Fallstudie aus der zeitgenössischen Physik ein wenig nachgegangen werden.³ Das Thema der Fallstudie ist mit Absicht so gewählt, daß zur Zeit noch alles offen ist. Es gibt noch keinen Konsens über die gesuchte Theorie, sondern allein eine Vielzahl rivalisierender Forschungsstrategien. Damit wird vermieden, durch *post hoc* Rekonstruktion eine bestimmte wissenschaftstheoretische Position oder Methodologie zu verteidigen. Mir geht es im folgenden vielmehr darum, die diversen von Wissenschaftlern verwendeten Strategien aufzuzeigen, wenn sie ein hartnäckiges Problem lösen möchten. Besondere Beachtung wird dabei natürlich der Frage geschenkt, welche Rolle das Allgemeine Korrespondenzprinzip in diesem Prozeß spielt.

²Eine ausführliche Besprechung des Allgemeinen Korrespondenzprinzips vor dem Hintergrund der Studien dieses Bandes wird in (Hartmann 1999a) gegeben.

³Eine ausführliche Version dieser Arbeit ist (Hartmann 1999b).

In der Fallstudie geht es um das theoretische Verständnis des Phänomens der Hochtemperatur-Supraleitung. Gewöhnliche Supraleitung ist ein seit langem bekanntes Phänomen, das sich jedoch nur bei extrem niedrigen Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt zeigt. Es galt für lange Zeit als unmöglich, Substanzen zu finden, die noch bei Temperaturen über 30 K supraleitend sind. Erst 1986 gelang K. Bednorz und A. Müller ein Durchbruch und inzwischen gibt es Materialien, die sogar bis Temperaturen von 160 K elektrischen Strom ohne Widerstand leiten und zugleich Magnetfelder aus ihrem Inneren verdrängen. Diese Materialien zeichnen sich durch einen schichtenartigen räumlichen Aufbau aus, wobei die für die Supraleitung bedeutsamen Schichten insbesondere aus Kupfer-Ionen aufgebaut sind. Ein theoretisches Verständnis dieses Phänomens ist jedoch noch nicht gelungen.⁴

Es gibt jedoch eine gut bestätigte Theorie gewöhnlicher Supraleiter. Diese 1958 von J. Bardeen, L. Cooper und R. Schrieffer (nach wichtigen Vorarbeiten von F. London und H. London, V. Ginzburg und L. Landau sowie O. Fröhlich) vorgeschlagene sog. BCS-Theorie ist eine mikroskopische Theorie, die alle bis 1986 bekannten Supraleitungs-Phänomene gut beschreibt und darüber hinaus eine Erklärung für das Auftreten von Supraleitung liefert. Dieser Theorie zufolge existieren unterhalb der kritischen Temperatur im Supraleiter schwach gebundene Paare aus Elektronen mit entgegengesetztem Spin und Impuls. Obwohl die ein Paar bildenden fermionischen Elektronen einen großen räumlichen Abstand voneinander haben können, verhalten sie sich effektiv wie Bosonen. Dadurch wird es möglich, daß eine große Zahl dieser Paare den niedrigsten möglichen Energiezustand einnimmt, was wiederum das Verschwinden des Widerstandes zur Folge hat.⁵

Heute ist es unumstritten, daß die BCS-Theorie in der ursprünglichen Form nicht in der Lage ist, das Phänomen der Hochtemperatur-Supraleitung zu erklären. Es gilt also, eine neue und adäquate Theorie zu entwickeln. Dabei werden im wesentlichen zwei konträre Strategien verfolgt. Die eine ('konservative') Gruppe von Physikern versucht soviel wie möglich von der mathematischen Struktur und den konkreten Modellannahmen der BCS-Theorie gewöhnlicher Supraleiter zu übernehmen. Die andere ('revolutionäre') Gruppe verfolgt hingegen das Ziel, zu einer Theorie der Hochtemperatur-Supraleitung zu gelangen, die strikt mit der BCS-Theorie bricht. Die Debatte zwischen diesen beiden Lagern wurde öffentlich und mit einer Reihe von wissenschaftstheoretischen Argumenten angereichert geführt und soll im folgenden nachgezeichnet werden.

Dazu soll zunächst ein kurzer Abriß der beiden gegenläufigen Strategien gegeben werden. Tatsächlich gibt es mehr als zwei Strategien. Im weiteren sollen jedoch nur die extremen Gegenpole vorgestellt werden.

1. Die konservative Strategie

Diejenigen Wissenschaftler (wie D. Pines und D. Scalapino), die eine konservative Lösung des Problems der Hochtemperatur-Supraleitung favorisieren, versuchen, durch möglichst minimale Veränderung oder Ergänzung der BCS-Theorie zu einem

⁴Für einen Überblick vgl. Tinkham 1996 und Waldram 1996.

⁵Vgl. Tinkham 1996, Kap. 3.

Verständnis des Phänomens zu gelangen. Im Einzelnen wird die Fermiflüssigkeitstheorie als theoretischer Rahmen beibehalten. Auch die zentrale Idee der BCS-Theorie, daß Supraleitung durch Paarung von Elektronen bewirkt wird, wird übernommen. Verändert wird lediglich der betreffende Paarungsmechanismus. Anstatt diesen auf eine *s*-Wellen Wechselwirkung zurückzuführen, wird nun mit einer *d*-Wellen Wechselwirkung (+ Spin-Fluktuationen) gearbeitet. Dies wird insbesondere durch die räumliche Struktur der in Frage stehenden Materialien nahegelegt. Die Vertreter dieser Strategie verweisen auf die Erfolge bei der Beschreibung von Experimenten und die Minimalität der vorgenommenen Abänderungen der BCS-Theorie. Kritiker dieses Ansatzes, insbesondere P. Anderson, werfen der Spin-Fluktuationstheorie hingegen vor, keine richtige Theorie zu sein. Es handle sich allein um ein heuristisches Hilfsmittel mit einer Vielzahl unreflektierter Annahmen. Auserdem zählt es nach Anderson gegen diese Theorie, daß sie nur mit Hilfe aufwendiger und nicht unabhängig kontrollierbarer Computersimulationen angewendet werden kann. Darauf erwidern die Vertreter des kritisierten Ansatzes natürlich, daß dies gerade durch die Komplexität des Problems nahegelegt werde.⁶

2. Die revolutionäre Strategie

P. Anderson vertritt hingegen eine wahrhaft revolutionäre Strategie. Seiner Ansicht nach läßt sich das Problem der Hochtemperatur-Supraleitung nicht durch eine möglichst minimale Modifikation der BCS-Theorie lösen. Er schlägt deshalb vor, mit einer grundlegenden Annahme der dieser Theorie (und im übrigen nahezu der gesamten Festkörperphysik) zu brechen: der Annahme, daß es sich bei dem betrachteten System um eine Fermiflüssigkeit handelt. Stattdessen entwickelt er die Theorie sog. Luttinger-Flüssigkeiten, die auch auf die normale Phase der betrachteten Materialien anzuwenden ist. Diese Theorie ist höchst spekulativ und wird nicht zuletzt aus diesem Grund von vielen Physikern abgelehnt.⁷

Eine abschließende Bewertung der verschiedenen Strategien ist derzeit noch nicht möglich. Es gibt keinen generellen Konsens, welches Vorgehen das Richtige ist. Eine gewisse Mehrheit der beteiligten Physiker scheint jedoch einen konservativen Ansatz zu bevorzugen und damit das Postsche Diktum zu bestätigen. Darauf antwortet P. Anderson mit der Phrase 'if it is time for a revolution, enjoy it and relax!'⁸ Alles ist zur Zeit offen.

3 Einige wissenschaftsphilosophische Folgerungen

Was folgt nun aus dieser Fallstudie für das Allgemeine Korrespondenzprinzip? Zunächst muß festgestellt werden, daß der Ausgangspunkt für die Entwicklung von Theorien zur Hochtemperatur-Supraleitung nicht in einer internen Anomalie der Vorgängertheorie, also

⁶Vgl. Anderson 1995, 1996, 1997 sowie Ford and Saunders 1997.

⁷Vgl. Anderson 1997 und Leggett 1997.

⁸Anderson 1995, S. 38.

der BCS-Theorie gewöhnlicher Supraleiter, lag. Im Gegenteil, die BCS-Theorie hat sich über die Jahre hinweg als ein ausgezeichnetes Werkzeug zum Verständnis gewöhnlicher Supraleiter erwiesen. Ihre Konsistenz stand außer Frage. Und dennoch trat irgendwann ein neues und unerwartetes Phänomen im Experiment auf, das sich nicht mit Hilfe des BCS-Schemas erklären ließ. Beachtenswert ist weiterhin, daß keine der vorgeschlagenen Theorien zur Hochtemperatur-Supraleitung die BCS-Theorie als Grenzfall enthält und es somit ebenfalls vermag, das Verhalten gewöhnlicher Supraleiter zu beschreiben und damit den empirischen Erfolg der BCS-Theorie zu reproduzieren und zu erklären. Das Allgemeine Korrespondenzprinzip scheint also verletzt zu sein. Aber ist es überhaupt auf den Fall der Hochtemperatur-Supraleitung anwendbar?

Dazu muß die Frage geklärt werden, ob es sich bei der Hochtemperatur-Supraleitung und der gewöhnlichen Supraleitung überhaupt um ein und dasselbe Phänomen handelt, oder ob es nicht vielmehr zwei vollkommen verschiedene Phänomene sind, mit dem es die Wissenschaftler hier zu tun haben. Diese Frage kann sicher nicht a priori beantwortet werden, sondern muß durch die Wissenschaft selbst entschieden werden. Dennoch ist es aufgrund der Phänomenologie (verschwindender Widerstand unterhalb der Sprungtemperatur etc.) plausibel anzunehmen, daß es sich zumindest um sehr ähnliche Phänomene handelt. In gewisser Weise wurde durch die Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleiter also nur der Phänomenbereich erweitert. Und daher sollte das Allgemeine Korrespondenzprinzip auch im Theoriebildungsprozeß von Bedeutung sein.

Nun kann man feststellen, daß alle vorgeschlagenen Theorien gewisse Aspekte der BCS-Theorie übernehmen. Manche beschränken sich auf die Idee der Elektronenpaarung und verwerfen bedeutende Teile des theoretischen Rahmens, andere hingegen begnügen sich mit einer leichten Modifikation des Paarungsmechanismus innerhalb der Theorie der Fermiflüssigkeiten. Dadurch wird in jedem Fall eine gewisse Kontinuität auf der theoretischen Ebene gewährleistet. Wie weit diese Kontinuität jedoch reichen soll ist eine Frage, die sehr umstritten ist. Vermeidlich universelle und allgemeine (methodologische und wissenschaftliche) Prinzipien werden auch hier in Frage gestellt und haben deshalb allein den Status eines *Werkzeuges*, das man probeweise für bestimmte Zwecke verwendet. Ob es sich letztendlich als gutes Werkzeug erweisen wird, läßt sich wiederum nicht a priori entscheiden.

Das Allgemeine Korrespondenzprinzip ist also ein Werkzeug unter vielen, welches die Wissenschaftler bei der Theorienkonstruktion probeweise verwenden. In vielen Fällen ist es sehr umstritten, inwieweit sich die Nachfolgertheorie an der Vorgängertheorie orientieren soll. Die in diesem Zusammenhang vorgebrachten Überlegungen sind zum Teil recht subtil und überaus verschränkt mit der konkreten Problemsituation, so daß allgemeine Aussagen sehr schwierig zu machen sind. Methodologische Prinzipien - wie das Allgemeine Korrespondenzprinzip - entfalten ihre Wirksamkeit erst, wenn sie an die konkrete Situation adaptiert werden.

Dies macht das Geschäft des Wissenschaftsphilosophen schwer, insbesondere dann, wenn er daran interessiert ist, allgemeine methodologische Prinzipien zu entwickeln und herauszuarbeiten. Vielleicht ist es sinnvoll, sich stattdessen darauf zu beschränken, eine Art

Werkzeugkasten zusammenzustellen, auf den die Wissenschaftler je nach Bedarf zurückgreifen können. In einem solchen Werkzeugkasten gibt es etwa Hämmer von vielen verschiedenen Größen, die für diverse Zwecke eingesetzt werden können. Auch dies erscheint mir eine herausfordernde Aufgabe für Wissenschaftsphilosophen zu sein. Und im Gegensatz zum Programm der rationalen Heuristik erscheint es durchführbar.

Referenzen

- P. Anderson and R. Schrieffer, A Dialog on the Theory of High- T_c . *Physics Today*, June, 55-61 (1991).
- P. Anderson, Condensed Matter: The Continuous Revolution. *Physics World* **8**, December 37-40 (1995).
- P. Anderson and N. Mott, High-Temperature Superconductivity Debate Heats Up. *Physics World* **9**, January 16 (1996).
- P. Anderson, *The Theory of Superconductivity in the High- T_c Cuprates*. Princeton University Press, Princeton 1997.
- P. Ford and G. Saunders, High Temperature Superconductivity – Ten Years On. *Contemporary Physics* **38**, 63-81 (1997).
- S. French and H. Kamminga (eds.), *Correspondence, Invariance and Heuristics. Essays in Honour of Heinz Post*. Kluwer, Dordrecht 1993.
- S. Hartmann, On Correspondence. To appear in *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* (1999a).
- S. Hartmann, Modelling High-Temperature Superconductors: Correspondence at Bay? (Preprint 1999b)
- T. Leggett, Superconducting Thoughts Meet Sceptical Resistance. *Physics World* **10**, October 51-52 (1997).
- N. Mott, High-Temperature Superconductivity: The Spin Polaron Theory. *Contemporary Physics* **31**, 373-385 (1990).
- H. Post, Correspondence, Invariance and Heuristics. *Studies in History and Philosophy of Science* **2**, 213 (1971). Reprinted in (French and Kamminga 1993), 1-44.
- M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*. McGraw-Hill, New York 1996.
- J. Waldram, *Superconductivity of Metals and Cuprates*. Institut of Physics Publishing, Bristol 1996.