

Verfolgt die Elementarteilchenphysik ein reduktionistisches Programm?

Stephan Hartmann*

Die Elementarteilchenphysik gilt weithin als eine Teildisziplin der Physik, die ein reduktionistisches Programm *par excellence* verfolgt. In dieser Arbeit soll versucht werden, unter Berücksichtigung einer Analyse neuerer Methoden der Elementarteilchenphysik, die Berechtigung dieser Behauptung zu klären. Die Reduktionismusproblematik läßt sich in ontologische, epistemologische und methodologische Aspekte untergliedern¹.

Die *ontologische* Behauptung des Reduktionismus besteht darin, daß es in der Natur ein ontisches Substrat gibt, aus dem alle anderen Systeme beliebigen Komplexitätsgrades aufgebaut sind. Das Vorgehen der Elementarteilchenphysiker scheint im Einklang mit dieser metaphysischen Behauptung zu stehen; immer tieferliegende Konstituenten der Materie werden dingfest gemacht: Moleküle, Atome, Atomkerne, Nukleonen, Quarks, ...(?).

Die *epistemologische* Annahme des Reduktionismus besteht in der Behauptung, daß es eine fundamentale Theorie gibt, die eine vollständige und einheitliche Beschreibung der Welt ermöglicht. Für eine derartige Theorie gibt es aus dem Bereich der Elementarteilchenphysik Kandidaten; man denke etwa an die Super-Gravity- und Superstring-Projekte².

Die *methodologische* Maxime des Reduktionismus besteht in einer konsequenten Verfolgung des Ziels, diese Fundamentaltheorie zu finden. Lange Zeit gab es zu einem solchen Vorgehen keine Alternative, die sich theoretisch recht-

*Ich danke P. Hoyningen-Huene und M. Stöckler für hilfreiche Bemerkungen. Eine leicht erweiterte Fassung dieses Aufsatzes erschien in G. Meggle et al. (eds.), *Perspectives in Analytical Philosophy*, Berlin: de Gruyter 1997, 374–380.

¹Diese sinnvolle Unterscheidung wurde erstmals von F. Ayala verwendet (cf. Ayala 1974, viii).

²R. Hedrich diskutiert in (Hedrich 1990, 47ff.), ob diese Theorien als Kandidat für die Fundamentaltheorie im Sinne des Reduktionismus in Frage kommen.

fertigen ließ. So nimmt es nicht wunder, daß viele Elementarteilchenphysiker überzeugte Reduktionisten sind.³

Ein derartiger, vom Programm der Elementarteilchenphysik motivierter Reduktionismus wurde in der Vergangenheit – nicht nur von Philosophen – stark kritisiert. Zu erwähnen sind an dieser Stelle die herausfordernden Ausführungen N. Cartwrights (Cartwright 1983), sowie die z.T. emotional gefärbten Einwände von Physikern mit anderem Arbeitsgebiet, wie etwa den Festkörperphysikern P. Anderson (Anderson 1972) und A. Leggett (Leggett 1992).

N. Cartwright versucht zu zeigen, daß die fundamentalen Gesetze der Physik lügen. Deshalb plädiert sie dafür, physikalische Untersuchungen auf phänomenologische Gesetze und Modelle zu gründen: „For Phenomenological Laws“ lautet ihr einschlägiger Wahlspruch⁴. In der Welt von N. Cartwright gibt es keine im Sinne des Reduktionismus fundamentalen Entitäten, die die Welt konstituieren, sondern eine Vielfalt von nicht reduzierbaren Entitäten.

P. Anderson und A. Leggett behaupten – sicher im Einklang mit Biologen wie E. Mayr – die Existenz von grundlegend neuen Gesetzen auf einer höheren Systemebene. S. Weinberg kritisiert diese Äußerungen mit dem Hinweis auf die erfolgreiche Reduktion der Thermodynamik auf die statistische Mechanik.⁵ Außerdem ist, so Weinberg, bislang (noch?) kein einziges Gesetz bekannt, welches sich *nachweislich* nicht reduzieren läßt. In diesem Zusammenhang ist es interessant, zu untersuchen, welche Struktur derartige Gesetze, bzw. allgemeiner, welche Struktur anti-reduktionistische Argumente im allgemeinen haben (cf. Hoyningen-Huene 1992).

Waren es in der Vergangenheit vornehmlich Festkörperphysiker, die sich an dem an der gängigen Elementarteilchenphysik orientierten Reduktionismus rieben, so kommt die Kritik nun auch aus dem eigenen Lager. Ausgelöst wurde diese Kritik durch neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Quantenfeldtheorie, die zu einer Neubewertung der Renormierungsproblematik geführt haben. Die allgemeine Quantenfeldtheorie liefert den begrifflichen und formalen Rahmen der Elementarteilchenphysik.⁶ Als „Nebenprodukt“ dieser Neubewertung ergeben sich Argumente, die einen methodologischen Antire-

³Ein Kapitel in S. Weinbergs bislang letztem Buch trägt den bezeichnenden Titel „Lob des Reduktionismus“ (cf. Weinberg 1993, 59ff.).

⁴(Cartwright 1983, 100f.)

⁵(Weinberg 1993, 47f.)

⁶Eine für Philosophen geschriebene Einführung in die Quantenfeldtheorie findet sich in (Redhead 1983).

duktionismus zu stützen scheinen. T. Cao und S. Schweber (Cao/Schweber 1993) fordern sogar den epistemischen Reduktionismus heraus, konzedieren jedoch, daß der ontologische Reduktionismus noch vertretbar ist⁷. Im folgenden möchte ich mich mit den von Cao und Schweber vorgebrachten Argumenten kritisch auseinandersetzen.

Zunächst muß jedoch auf den physikalischen Hintergrund des Gedankenganges von Cao und Schweber eingegangen werden. Die Forschung der letzten Jahre hat gezeigt, daß auch nichtrenormierbare Quantenfeldtheorien physikalisch sinnvoll sind. Lange Zeit galt die Forderung nach Renormierbarkeit als ein wesentliches Auswahlkriterium einer physikalischen Theorie (cf. Weinberg 1980); zuweilen wurden nichtrenormierbare Theorien gar als inkonsistent verdächtigt.⁸

Das Problem der Renormierung trat erstmals im Rahmen der störungstheoretischen Behandlung der Quantenelektrodynamik auf; bestimmte Integrale hatten einen unendlichen Wert, obwohl die zu berechnenden physikalischen Größen offenbar endliche Werte besaßen. Mit Hilfe von trickreichen Renormierungsprozeduren gelang es Ende der 40er Jahre, diese Integrale durch Subtraktion anderer unendlicher Größen „endlich zu machen“. Viele der beteiligten Physiker hatten ein schlechtes Gewissen bei diesem Vorgehen und so wollte die Physik-interne Kritik am Renormierungsprogramm nicht enden. Eine Neubewertung dessen, was Renormierung ist, ergab sich im Zusammenhang mit der durch Erkenntnisse aus der Festkörperphysik motivierten Entwicklung der Renormierungsgruppen-Gleichungen (K. Wilson u.a.). Es zeigte sich, daß Renormierung etwas mit Energieskalen zu tun. Sieht man einmal von der noch nicht gefundenen fundamentalen Theorie ab, so haben unsere physikalischen Theorien immer einen begrenzten Anwendungsbereich. Diese Begrenzung ist in der Hochenergiephysik eine Begrenzung der Energie, bis zu der die Theorie anwendbar ist. Die im störungstheoretischen Formalismus der Quantenfeldtheorie auftretenden Integrale laufen aber gerade über alle Energien, also auch über Energiebereiche, über die die Theorie nicht mehr sinnvoll sprechen kann. Das Programm der *effektiven Quantenfeldtheorien* berücksichtigt diesen Sachverhalt⁹.

Effektive Quantenfeldtheorien sind nichtrenormierbare Theorien, die physikalische Phänomene auf einer bestimmten Energieskala durch effektive Frei-

⁷Vgl. auch die Arbeiten (Cao 1993) und (Schweber 1993).

⁸Eine ausführliche Diskussion findet sich in (Stöckler 1995), vgl. auch (Falkenburg 1994, 250f.).

⁹Technische Details finden sich in (Hartmann 2001).

heitsgrade (und deren Wechselwirkung) beschreiben. Diese Freiheitsgrade sind oftmals nicht fundamental in dem Sinne, in dem wir heute etwa das Elektron als fundamental ansehen. Beispiele sind etwa die in der Kernphysik gebräuchlichen Theorien zur Pion-Kern-Streuung oder die diversen Theorien zur Hadronenstruktur. Die mangelnde Renormierbarkeit äußert sich in dem Auftreten eines (realistisch interpretierten) Abschneideparameters Λ , der angibt, ab welcher Energie die Theorie unbrauchbar wird. Es zeigt sich, daß Prozesse, deren Energie Λ übersteigt, den Niederenergiebereich der Theorie, also den Bereich, der durch Energien kleiner als Λ gekennzeichnet ist, nicht beeinflussen; der Niederenergiebereich ist also vom Hochenergiebereich vollständig entkoppelt („decoupling-theorem“)¹⁰. Es ist möglich, von einer gegebenen effektiven Theorie (mit Abschneideparameter Λ_0) zu einer neuen zu kommen, die die Physik auf einer etwas höheren Energieskala beschreibt. Der neue Abschneideparameter sei $\Lambda_1 \geq \Lambda_0$. Dies geschieht auf zweifache Weise: Zum einen werden die zwischen Λ_0 und Λ_1 neu auftretende Teilchen effektiv modelliert und zum anderen werden die auftretenden Kopplungskonstanten unter Berücksichtigung der Renormierungsgruppen-Gleichungen verändert („reskaliert“). Was sich so letztlich ergibt, ist eine Hierarchie von aufeinanderfolgenden effektiven Quantenfeldtheorien, die – so ist die Hoffnung – immer weniger „nicht-renormierbar“ werden.

Diese neuen Theorien haben verschiedene philosophische Implikationen. Neben den im folgenden zu klärenden Konsequenzen für die Reduktionismus-Debatte sei hier zunächst noch auf eine Frage der Forschungsstrategie eingegangen. Das bislang übliche Vorgehen in der Elementarteilchenphysik bestand – etwas vereinfacht – in einem *top-down* Verfahren: Symmetrien oder ähnlich allgemeine Prinzipien werden – teilweise theoretisch motiviert – postuliert und die deduktiven Konsequenzen – wenn möglich – mit der Phänomenologie konfrontiert¹¹. In diesem Prozess wird die Eigendynamik mathematischer Spekulation sehr deutlich. Gleichzeitig tritt die Bedeutung des Experimentes zurück. Oftmals ist es sogar unmöglich, bestimmte Theorien zu testen, man denke nur an die supersymmetrischen Theorien, die Aussagen über einen Energiebereich machen, der weit jenseits des experimentell Zugänglichen liegt.

Verfolgt man jedoch das Programm der effektiven Quantenfeldtheorien, so

¹⁰Vgl. (Cao/Schweber 1993, 63f.), (Huggett/Weingard 1994) sowie (Robinson 1992, 395).

¹¹Diese Darstellung ist etwas vereinfacht. Zu einer genauen Analyse des Wechselspiels von Experiment, Phänomenologie und Theorie in der Elementarteilchenphysik vgl. die detaillierten Ausführungen in (Falkenburg 1994).

braucht man nicht in der „Glashow-Wüste“ nach Neuem zu suchen. Indes wird durch ein schrittweises Erhöhen der Energie (experimentell und theoretisch!) die jeweils passende Beschreibung angestrebt. Dieses betont *empiristische* Vorgehen hat eine stärkere Wechselwirkung von Experiment und Theorie zur Folge. Es ist weiterhin klar, daß effektive Quantenfeldtheorien große pragmatische Vorteile haben. Die Handhabung effektiver Quantenfeldtheorien ist i.a. sehr viel einfacher als die einer renormierbaren „Fundamentaltheorie“ ; ja, oftmals sind Berechnungen überhaupt nur für effektive Quantenfeldtheorien möglich. Es muß jedoch betont werden, daß effektive Quantenfeldtheorien grundsätzlich nur einen bestimmten (Energie-) Ausschnitt der Welt beschreiben. Sie stellen somit ein typisches Element vorläufiger Physik (J. Audretsch) dar¹².

Was bedeutet dies alles für die Reduktionismus-Debatte? Legen die neuen Erkenntnisse dessen, was Renormierung ist und die Praktikabilität effektiver Quantenfeldtheorien wirklich einen methodologischen Antireduktionismus nahe, wie dies T. Cao und S. Schweber behaupten? Zunächst einmal kann man feststellen, daß die Verwendung effektiver Quantenfeldtheorien und die theoretische Begründung, daß dies sinnvoll möglich ist, einen entscheidenden Vorteil für die Forschungspraxis darstellt. Durch schrittweises Erhöhen der Energie bleibt die Verbindung zum Experiment immer erhalten; Hochenergiephysik ist somit mehr als „reine Philosophie“.

Müssen wir aber deshalb den „Traum von der Einheit des Universums“ (S. Weinberg) aufgeben? Ich denke: Nein! Zunächst einmal ist klar, daß eine Analyse der Forschungspraxis kaum eine metaphysische Position wie den Reduktionismus erschüttern kann. Es mag sich heute herausstellen, daß man in der Forschung am besten Fortschritte erzielen kann, wenn man den durch effektive Theorien vorgezeichneten Weg geht. So mag die Welt als ein hierarchisch aufgebautes Ganzes erscheinen, dessen Teile in der Tat eine gewisse Unabhängigkeit haben.

Auf der anderen Seite bringen vereinheitlichte Theorien¹³ wie GUTs, Supergravity- und Superstring-Ansätze erhebliche Erklärungsvorteile mit sich. So kann man etwa verstehen, warum Elektronen und Protonen (betragsmäßig) die gleiche Ladung haben und vieles mehr¹⁴. Es scheint deshalb naheliegend zu sein, eine „friedliche Koexistenz“ von Vereinheitlichungsversuchen und ef-

¹²Vgl. (Audretsch 1989) sowie (Hartmann 1995a).

¹³Zum Verhältnis von Reduktionismusproblematik und Einheit der Wissenschaft vgl. (Vollmer 1984).

¹⁴Vgl. dazu auch (Kanitscheider 1988).

fektiven Quantenfeldtheorien zu propagieren. Es ist vorstellbar, daß aus einer Analyse bestimmter effektiver Quantenfeldtheorien eine neue Symmetrie extrahiert werden kann, die anschließend bei der Konstruktion einer verbesserten vereinheitlichten Theorie Verwendung finden kann. Andererseits treten in vereinheitlichten Theorien gewöhnlich Phasenübergänge auf. Die nach einem Phasenübergang entstehenden neuen kollektiven Felder¹⁵ können meist leicht mit einer effektiven Quantenfeldtheorie modelliert werden. Auf diese Weise kann man hoffen, genauere Einsichten in das Verhalten der vereinheitlichten Theorie zu gewinnen.

Abschließend kann gesagt werden, daß es in der Elementarteilchenphysik in jüngster Zeit neben dem bekannten reduktionistischen Programm auch ein antireduktionistisch orientiertes gibt. Durch die neue Sichtweise der Renormierung konnte ein derartiges Vorgehen theoretisch gestützt werden. Aufgrund der metatheoretischen Vorteile sollte jedoch das reduktionistische Programm nicht aufgegeben werden, zumal aus einer methodologischen Analyse ohnehin keine ontologischen Folgerungen gezogen werden können. All dies läßt schließlich ein pluralistisches Verwenden beider Methoden als vernünftig erscheinen.

Literatur

Anderson, Philip: More is Different. *Science*, 177 (1972), 393-396.

Anderson, Philip: *Basic Notions of Condensed Matter Physics*, London 1984.

Audretsch, Jürgen: Vorläufige Physik und andere pragmatische Elemente physikalischer Naturerkenntnis. In: *Handbuch pragmatischen Denkens*, Bd. 3, hrsg. v. H. Stachowiak, Hamburg 1989, 373-392.

Ayala, Francisco: Introduction. In: *Studies in the Philosophy of Biology. Reduction and Related Problems*, hrsg. v. F. Ayala & T. Dobzhansky, Berkeley 1974, vii-xvi.

¹⁵Physikalische Details zur „Emergenz“ neuer Felder findet sich in (Anderson 1984, 262 ff.)

- Cao, Tian: New Philosophy of Renormalization: From the Renormalization Group Equations to Effective Field Theories. In: *Renormalization: From Lorentz to Landau (and Beyond)*, hrsg. v. L. Brown, New York 1993, 87-134.
- Cao, Tian & Schweber, Silvan: The Conceptual Foundations and the Philosophical Aspects of Renormalization Theory. *Synthese* 97 (1993), 33-108.
- Cartwright, Nancy: *How the Laws of Physics Lie*. Oxford 1983.
- Falkenburg, Brigitte: *Teilchenmetaphysik*. Mannheim 1994.
- Hartmann, Stephan: Models as a Tool for Theory Construction: Some Strategies of Preliminary Physics, in: W. Herfel et al. (eds.), *Theories and Models in Scientific Processes* (= Poznań Studies in the Philosophy of Science and the Humanities 44). Amsterdam: Rodopi 1995, 49-67.
- Hartmann, Stephan: Effective Field Theories, Reduction and Scientific Explanation, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 32B, 267-304 (2001).
- Hedrich, Reiner: *Komplexe und fundamentale Strukturen: Grenzen des Reduktionismus*. Mannheim 1990.
- Hoyningen-Huene, Paul: On the Way to a Theory of Antireductionist Arguments. In: *Emergence or Reduction?*, hrsg. v. A. Beckermann, H. Flohr & J. Kim, Berlin 1992, 289-301.
- Huggett, Nick & Weingard, Robert: The Renormalization Group and Effective Field Theories. *Synthese* (1994): In Press
- Kanitscheider, Bernulf: Reduction and Emergence in the Unified Theories of Physics. In: *Centripetal Forces in the Sciences, Vol. II*, hrsg. v. G. Radnitzky, New York 1988, 89-110.
- Leggett, Anthony.: On the Nature of Research in Condensed-State Physics. *Foundations of Physics* 22 (1992), 221-233.
- Redhead, Michael: Quantum Field Theory for Philosophers. In: *PSA 1982 Vol. 2*, hrsg. v. P. Asquith & T. Nickles, East Lansing 1983, 57-99.

- Robinson, Don: Renormalization and the Effective Field Theory Programme. In: *PSA 1992 Vol. 1*, hrsg. v. D. Hull, M. Forbes & K. Okruhlik, East Lansing 1992, 393-403.
- Schweber, Silvan: Changing Conceptualization of Renormalization Theory. In: *Renormalization: From Lorentz to Landau (and Beyond)*, hrsg. v. L. Brown, New York 1993, 135-166.
- Stöckler, Manfred: *Philosophische Probleme der Elementarteilchenphysik*. München 1995.
- Vollmer, Gerhard: Reduction and Evolution - Arguments and Examples. In: *Reduction in Science*, hrsg. v. W. Balzer, Dordrecht 1984, 131-151.
- Weinberg, Steven: *Der Traum von der Einheit des Universums*. München 1993.
- Weinberg, Steven: Conceptual Foundations of the Unified Theory of Weak and Electromagnetic Interactions. *Reviews of Modern Physics* 52 (1980), 515-523.