

Rico Gutschmidt
Einheit ohne Fundament
Eine Studie zum Reduktionsproblem in der Physik

EPISTEMISCHE STUDIEN
Schriften zur Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie

Herausgegeben von / Edited by

Michael Esfeld • Stephan Hartmann • Albert Newen

Band 16 / Volume 16

Rico Gutschmidt

Einheit ohne Fundament

Eine Studie zum Reduktionsproblem in der Physik



ontos

verlag

Frankfurt | Paris | Lancaster | New Brunswick

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie;
detailed bibliographic data is available in the Internet at <http://dnb.ddb.de>

Dissertation Universität Bonn



North and South America by
Transaction Books
Rutgers University
Piscataway, NJ 08854-8042
trans@transactionpub.com



United Kingdom, Ire, Iceland, Turkey, Malta, Portugal by
Gazelle Books Services Limited
White Cross Mills
Hightown
LANCASTER, LA1 4XS
sales@gazellebooks.co.uk



Livraison pour la France et la Belgique:
Librairie Philosophique J. Vrin
6, place de la Sorbonne ; F-75005 PARIS
Tel. +33 (0)1 43 54 03 47 ; Fax +33 (0)1 43 54 48 18
www.vrin.fr

©2009 ontos verlag
P.O. Box 15 41, D-63133 Heusenstamm
www.ontosverlag.com

ISBN 978-3-86838-056-9

2009

No part of this book may be reproduced, stored in retrieval systems or transmitted
in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise
without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the
purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the purchaser of the work

Printed on acid-free paper
ISO-Norm 970-6
FSC-certified (Forest Stewardship Council)
This hardcover binding meets the International Library standard

Printed in Germany
by buch bücher **dd ag**

„[...] die Natur weiß ganz allein, was sie
will, was sie gewollt hat.“

Goethe, Maximen und Reflexionen

Vorwort

Diese Arbeit untersucht die Möglichkeiten und Grenzen eliminativer Reduktionen in der Physik, die Frage also, ob es physikalische Theorien gibt, die auf andere zurückgeführt werden können und damit zur Beschreibung der Welt nicht mehr benötigt werden. Dabei wird ein besonderer Akzent auf der Frage nach der prinzipiellen Möglichkeit solcher Reduktionen liegen: Es kann schließlich sein, dass eine bestimmte Theorie aus praktischen Gründen nach wie vor verwendet wird, obwohl sie *im Prinzip* eliminativ auf eine andere reduziert ist.

Zunächst wird allerdings geklärt, was genau unter eliminativer Reduktion zu verstehen ist. Im Anschluss an das einführende erste Kapitel zeigt die Untersuchung im zweiten Kapitel, dass es sich dabei nicht um eine *direkte* Beziehung zwischen Theorien handeln kann, in der die Gesetze einer Theorie mit Hilfe von Grenzübergängen aus den Gesetzen einer anderen Theorie abgeleitet werden: Solche Beziehungen allein machen eine Theorie noch nicht überflüssig und können höchstens zeigen, dass zwei Theorien in einem bestimmten Sinn *benachbart* zueinander sind. Dieses Vergleichsverhältnis zwischen Theorien wird im zweiten Kapitel als *Theoriennachbarschaft* genau definiert. Eine eliminative Reduktion einer physikalischen Theorie auf eine andere liegt dagegen nur dann vor, wenn nicht nur Nachbarschaftsbedingungen erfüllt sind, sondern man auch in einem *indirekten* Anteil der Reduktion mit der reduzierenden Theorie alle Phänomene erklären kann, die von der zu reduzierenden Theorie erklärt werden. Im zweiten Kapitel wird schließlich ein *Reduktionskonzept* aus einer Mischung aus direkter und indirekter Reduktion definiert, so dass eine reduzierte Theorie eliminativ reduziert und mithin überflüssig ist.

Unter Zugrundelegung dieser Definitionen werden dann in den Kapiteln 3, 4 und 5 drei Fallbeispiele untersucht, wobei sich zeigen wird, dass moderne physikalische Theorien zwar oft benachbart zueinander sind, aber meist nicht eliminativ aufeinander reduzierbar: Solche Reduktionen gibt es nur in historischen Fällen und für einzelne Phänomenerklärungen. Als Beispiel seien hier die Verhältnisse zwischen den verschiedenen Theorien der Gravitation herausgegriffen: Während das Galileische Fallgesetz und die Keplerschen Gesetze auf das Newtonsche Gravitationsgesetz und die Newtonsche Beschreibung der Planetenbahnen auf die Schwarzschildlösung der Allgemeinen Relativitätstheorie reduzierbar sind, ist die Newtonsche Gravitationstheorie als Ganze zu der ART lediglich benachbart. Dies und Entsprechendes in den anderen in dieser Arbeit diskutierten Beispielen (das Verhältnis zwischen Newtonscher Mechanik und Quantenmechanik und das zwischen Thermodynamik und statistischer Mechanik) gilt nun nicht nur aus pragmatischen Gründen, wie etwa rechentechnischer Beschränktheit,

sondern es werden Gründe selbst gegen die prinzipielle Möglichkeit solcher Reduktionen angegeben. Die Unmöglichkeit eliminativer Reduktionen lässt sich zwar nicht endgültig beweisen, aber die Beweislast in dieser Frage wird der reduktionistischen Position überantwortet, die zu zeigen hat, wie angesichts der hier angegebenen Argumente solche Reduktionen dennoch möglich sein sollen.

Laut dieses Ergebnisses gibt es in der Physik viele eigenständige Theorien, die bei der Erklärung konkreter Phänomene fruchtbar zusammenarbeiten können, aber meist nicht eliminativ aufeinander und erst recht nicht sämtlich auf eine fundamentale *Theorie von Allem* reduzierbar sind. Dies lässt sich plausibilisieren mit der Vorstellung verschiedener Beschreibungsebenen. So könnte man zum Beispiel sagen, dass zur Beschreibung grober Phänomene auch grobe Theorien benötigt werden und feinere Theorien in diesem Bereich Zusammenhänge übersehen bzw. sogar übersehen müssen.

Dass dieses Ergebnis nun trotz allem nicht gegen eine *Einheit der Physik* sprechen muss, wird im abschließenden sechsten Kapitel kurz ausgeführt: Die besagte Nachbarschaftsrelation ist in der Lage, in gewissem Sinne Einheit zu stiften, und zeigt insbesondere, dass die Inkommensurabilitätsthese Feyerabends zu weit geht. Die verschiedenen physikalischen Theorien sind zwar eigenständig und in den meisten Fällen nicht eliminativ aufeinander reduzierbar, stehen aber gleichwohl nicht isoliert nebeneinander, sondern können trotz widersprechender Aussagen über die Welt benachbart zueinander sein.

Insgesamt zeigt diese Arbeit, dass die meisten physikalischen Theorien lediglich untereinander benachbart sind und es nur wenige Beispiele echter, eliminativer Reduktionen gibt, wobei durch die Nachbarschaft dennoch eine einheitliche Physik gewährleistet bleibt. Für eine vollständige Beschreibung der Welt werden viele verschiedene und jeweils eigenständige Theorien benötigt, die zwar benachbart, aber nicht durch Reduktion auf fundamentale Theorien überflüssig sind, auch nicht *im Prinzip*.

Ich bedanke mich bei Andreas Bartels für die hervorragende Betreuung der Arbeit, bei Cord Friebe und Holger Lyre für anregende Diskussionen und wertvolle Hinweise, bei Stefanie Kiermaier, Konstantin Ziegler und Stefan Heidl für das Korrekturlesen des Manuskripts und bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die zweijährige Finanzierung dieses Projekts.

Dresden, im September 2009
Rico Gutschmidt

Inhaltsverzeichnis

1	Das Reduktionsproblem	7
1.1	Die Fragestellung	7
1.2	Positionen zum Reduktionsproblem	11
1.3	Theorien der Reduktion	22
2	Die Reduktion physikalischer Theorien	41
2.1	Das Reduktionsproblem in der Physik	41
2.2	Der begriffliche Aspekt	52
2.3	Der mathematische Aspekt	66
2.4	Reduktion und Theoriennachbarschaft	85
2.5	Zusammenfassung und Vorbereitung der Fallbeispiele	106
3	Newtonsche Gravitationstheorie und Allgemeine Relativitätstheorie	121
3.1	Die Gesetze der Allgemeinen Relativitätstheorie	122
3.2	Ist die Newtonsche Gravitationstheorie als Grenzfall in der Allgemeinen Relativitätstheorie enthalten?	126
3.3	Die linearisierte Allgemeine Relativitätstheorie und die Post-Newtonsche Näherung	138
3.4	Erklärungen mit den Einsteinschen Feldgleichungen	145
3.5	Erklärungsgrenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie	150
3.6	Ausblick und Zusammenfassung	162
4	Newtonsche Mechanik und Quantenmechanik	167
4.1	Die Gesetze der Quantenmechanik	170
4.2	Ist die Newtonsche Mechanik als Grenzfall in der Quantenmechanik enthalten?	180
4.3	Erklärungen mit der Quantenmechanik	192
4.4	Erklärungsgrenzen der Quantenmechanik	201
4.5	Ausblick und Zusammenfassung	217
5	Thermodynamik und statistische Mechanik	225
5.1	Statistische Thermodynamik	228

5.2	Ist die Thermodynamik als Grenzfall in der statistischen Mechanik enthalten?	234
5.3	Erklärungsgrenzen der statistischen Mechanik	251
5.4	Das Problem der makroskopischen Irreversibilität	263
5.5	Das Gibbsche Paradoxon	273
5.6	Zusammenfassung	281
6	Schlussbemerkungen	283
6.1	Zusammenfassung	283
6.2	Einheit der Physik, Theorie von Allem und pluralistische Ontologie	286
	Literaturverzeichnis	295

Kapitel 1

Das Reduktionsproblem

1.1 Die Fragestellung

Innerhalb der Naturwissenschaften gibt es viele verschiedene Zugänge zu und Theorien über die Natur, und die als *Reduktionsproblem* bezeichnete Frage lautet, ob und wie diese Zugänge bzw. Theorien miteinander zusammenhängen. Gehen sie ineinander über und gibt es vielleicht sogar eine Theorie von Allem, die sämtliche naturwissenschaftliche Theorien in einem bestimmten Sinn enthält? Oder sind sie wenig oder gar nicht miteinander vereinbar und bilden autonome Einzelwissenschaften?

In Anlehnung an Oppenheim/Putnam 1958 kann man etwas genauer sagen, dass die verschiedenen naturwissenschaftlichen Zugänge zur Welt verschiedenen Beschreibungsebenen entsprechen. Die Physik beschäftigt sich mit den grundlegenden Gesetzen unbelebter Materie, die Chemie mit komplexen Verbindungen solcher Materieteilchen, die Biologie mit lebendigen Organismen, die Psychologie mit dem Bewusstsein höherer Lebewesen und schließlich die Soziologie mit dem Aufeinandertreffen vieler einzelner Lebewesen mit Bewusstsein.

Aber selbst innerhalb der Physik, um die es in dieser Arbeit ausschließlich gehen wird, gibt es verschiedene Gebiete und Theorien, die verschiedenen Ebenen entsprechen: die Elementarteilchenphysik, Quantenfeldtheorie und Quantenmechanik, die klassische Newtonsche Mechanik, Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie, aber auch Gebiete wie die Thermodynamik, geometrische Optik, Strömungslehre oder Elektrodynamik. Dabei hat jede Theorie, innerhalb der Physik und auch allgemein, ihre eigene Art und Methodik, an die Welt heranzugehen, ihr eigenes Vokabular zur Beschreibung der Welt und eigene Annahmen über die Welt, was Sklar 2003 wie folgt auf den Punkt bringt: „The ‚special sciences‘, even the very general special sciences as chemistry, biology, or the real physics of the macroscopic world, each have their own explanatory structures, invoking their own explanatory general principles or laws, to account for the phenomena within their

domain“ (a.a.O., S.427).

In der Wissenschaftsgeschichte hat sich nun ein *reduktionistisches Vorgehen* insofern als heuristische Maxime bewährt, als man neue Erkenntnisse über eine Beschreibungsebene dadurch gewinnen kann, dass bei Erklärungen bestimmter Phänomene eine andere Beschreibungsebene mit ihren Theorien hinzugezogen wird. Die Theorie der chemischen Bindungen etwa hat erheblich von der quantenmechanischen Beschreibung der Elementarteilchen profitiert und die phänomenologische Thermodynamik von der statistischen Mechanik, in der mit statistischen Methoden die Moleküle beschrieben werden, aus denen Gasmengen zusammengesetzt sind. Aber auch das Verwenden verschiedener Theorien innerhalb derselben Beschreibungsebene kann als reduktionistisches Vorgehen befruchtend wirken, wenn etwa Lichtstrahlen der geometrischen Optik als elektromagnetische Wellen aufgefasst werden oder die Gravitationskraft der Newtonschen Theorie mit der Raumkrümmung der Allgemeinen Relativitätstheorie in Verbindung gebracht wird. Die Untersuchung der Teile eines zu erklärenden Phänomens wie auch dessen Beschreibung aus der Perspektive einer anderen Theorie kann also als reduktionistisches Vorgehen produktiv sein.

Allerdings gibt es in der Wissenschaftsgeschichte ebenso Beispiele für das Scheitern solcher reduktionistischer Ansätze. Dazu zählt insbesondere die auf dem antiken Atomismus beruhende und schließlich aus dem 17. Jahrhundert stammende Newton-Laplacesche Auffassung, alle Physik sei auf die Mechanik der Atome zurückführbar, eine Auffassung, die bis zu ihrem Ende das physikalische Weltbild geprägt hat. Während es im Fall der Wärmelehre als (mehr oder weniger, vgl. Kapitel 5) gelungen gilt, sie mechanisch zu rekonstruieren, zeigte sich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, dass dies etwa für die Optik und schließlich für elektromagnetische Phänomene nicht möglich ist. Der Versuch, letztere mit Ätherhypothesen an die Mechanik anzuschließen, scheiterte bekanntlich und es hat sich für die Elektrodynamik mit den Gleichungen Maxwells eine eigenständige, von der Mechanik unabhängige Theorie etabliert. Auch die Gravitation wurde und wird mit Theorien erklärt, die nicht von mechanischen Wechselwirkungen ausgehen.

Angesichts dieser Befunde soll nun die obige Frage, inwiefern die zunächst als eigenständig charakterisierten verschiedenen Theorien miteinander zusammenhängen, wieder aufgenommen werden: Einerseits gibt es offenbar fruchtbares Zusammenarbeiten verschiedener Theorien, andererseits Fälle weitgehender Eigenständigkeit, und die Frage, mit der sich die vorliegende Arbeit befasst, lautet, ob zur Beschreibung der Welt tatsächlich viele verschiedene Theorien notwendig sind. Es steht nämlich die Möglichkeit im Raum, dass es sich nur um scheinbare Eigenständigkeiten handelt und die *prima facie* verschiedenen Theorien aufeinander und am Ende vielleicht

sogar alle auf *eine* fundamentale Theorie *reduziert*, das heißt zurückgeführt werden können. Es wird natürlich zu klären sein, in welchem Sinne das genau gemeint sein kann, aber die Fragestellung der vorliegenden Arbeit ist, ob es zunächst eigenständig erscheinende Theorien gibt, die durch die *Reduktion* auf eine andere Theorie streng genommen überflüssig sind. Dabei kann sich etwa herausstellen, dass diese Überflüssigkeit nur *im Prinzip* gilt, da die reduzierende Theorie zwar prinzipiell die Rolle der reduzierten übernehmen kann, letztere aber aus pragmatischen Gründen für ihre Beschreibungsebene besser geeignet ist und daher eine gewisse Existenzberechtigung behält. Die Position des *eliminativen Reduktionismus* jedenfalls, nach der eine reduzierte Theorie im Prinzip überflüssig ist, ist der Gegenstand dieser Arbeit.

Solche eliminativen Reduktionen können dabei natürlich auch in den Fällen möglich sein, in denen sie *bisher* nicht gelungen sind, was für das angeführte historische Beispiel des mechanistischen Programms etwa Hoyningen-Huene 2007 hervorhebt:

„So setzte sich in der Physik die Überzeugung von der Irreduzibilität von Gravitationsphänomenen und von elektrischen Phänomenen auf mechanische Phänomene dadurch durch, dass Theorien eingeführt wurden, die jene Phänomene auf der Grundlage nicht-mechanisch angesetzter Wechselwirkungen hervorragend erklären konnten. Das Motiv für die Einführung solcher Theorien war das Scheitern aller vorangegangenen Versuche, mechanische Erklärungen für jene Phänomene zu finden – was die Unmöglichkeit solcher reduktiven Erklärungen aber natürlich nicht beweist.“ (a.a.O., S.190)

Gleichwohl sollen in dieser Arbeit die Verhältnisse zwischen physikalischen Theorien untersucht werden, wie sie sich zur Zeit darstellen – und dabei wird sich zeigen, dass in der Tat Fälle echter eliminativer Reduktionen innerhalb der Physik nach dem derzeitigen Stand der Dinge selten sind. Natürlich lässt sich die Möglichkeit solcher Reduktionen weiterhin behaupten und deren Unmöglichkeit nicht *beweisen*, es werden aber Argumente vorgebracht, die in vielen Fällen gegen diese Möglichkeit sprechen.

Da nun oft von Vertretern einer antireduktionistischen These über solche Argumente hinaus der Nachweis der Unmöglichkeitsbehauptung erwartet wird, gilt diese Position als schwierig: Die reduktionistische Gegenposition kann schließlich immer optimistisch auf zukünftige Entwicklungen verweisen, die nur im Moment nicht vorliegende Reduktionen eines Tages werden leisten können. Daher sieht sich etwa Hoyningen-Huene 1992 zu der Forderung veranlasst, eine eigene Theorie antireduktionistischer Argumente zu entwickeln. Allerdings ist ein eliminativer Reduktionismus, der behauptet, bestimmte Theorien seien überflüssig, sobald es einmal Reduktionen auf eine grundlegendere Theorie gibt, eine mindestens ebenso

schwierige Behauptung, eine Existenzbehauptung nämlich, die geeignete fundamentale Theorien und entsprechende reduktive Erklärungen fordert, und dies angesichts der offenbaren Tatsache, dass es viele verschiedene Beschreibungsebenen *gibt* und ein Zusammenhang zwischen den Theorien dieser Ebenen alles andere als selbstverständlich ist. Die Wissenschaft arbeitet in verschiedenen Ebenen, die zunächst nicht viel miteinander gemein haben, weshalb der Reduktionist Zusammenhänge konstruiert, die die Wissenschaft nicht nahelegt, und weshalb die Behauptung, man könne im Prinzip alle Theorien sogar auf *eine* fundamentale Theorie zurückführen, abwegig erscheint. In Sklar 2003 heißt es dazu: „The world initially appears to us diverse in content and in the regularity of its phenomena. It is a bold and striking claim that some one scientific scheme of concepts and laws is universal in its application“ (S.431).

Daher ist eine reduktionistische Auffassung zunächst viel wunderlicher als die Gegenposition: Der Reduktionist behauptet etwas gegen den offenbaren Anschein, während der Antireduktionist versucht, die Erfahrungstatsache der unterschiedlichen Beschreibungsebenen zu begründen. Und wenn man auch in der stark mathematisierten Physik aufgrund eben dieser Mathematisierung leicht zu reduktionistischen Gedanken verführt wird, gilt dennoch, dass zum Beispiel die Quantenmechanik etwas anderes ist als die Newtonsche Mechanik, Zusammenhänge nicht offensichtlich sind und Versuche, solche in obigem reduktionistischen Sinn zu gewinnen, bisher erfolglos waren (vgl. für diesen Fall Kapitel 4). Die Behauptung der Möglichkeit einer solchen Reduktion mit Verweis auf die Zukunft bleibt natürlich bestehen, aber angesichts der Argumente, die im Laufe der Arbeit vorgebracht werden, trägt die reduktionistische Position die Beweislast: Solange nämlich nicht klar ist, wie genau eine solche Reduktion aussehen soll, und sogar Gründe gegen deren Möglichkeit vorgebracht werden, ist die Existenzbehauptung weniger plausibel als die Unmöglichkeitsbehauptung.

In diesem Zusammenhang ist auch zu bedenken, dass reduktionistische Vorstellungen keineswegs empirische Wurzeln haben: Wenn auch nichtempirische Annahmen, gerade Forderungen nach Vereinfachung und Vereinheitlichung, in der Wissenschaftsgeschichte, besonders im 20. Jahrhundert, oft sehr fruchtbar waren, ja wenn solches Einheitsstreben auch als heuristisches Prinzip oft zu besseren, stärkeren Theorien führt, können derartige Forderungen nichtsdestotrotz nur durch bisherige Erfolge begründet werden – dass die Natur ausgerechnet mit wenigen einfachen Theorien zu beschreiben ist (wie zum Beispiel mit den geradezu schönen Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie), ist eine ziemlich starke Annahme. Diese wird offenbar auch aus einem Glauben an eine einheitliche Welt, an einen Zusammenhang aller Dinge gespeist, der eine starke menschliche Intuition zu sein scheint und wohl gerade daher rührt, dass eine solche

Einheit nicht offensichtlich ist. Ein solches Bedürfnis nach Ordnung in einer kontingenten Welt kommt zum Beispiel in folgendem Zitat von Max Planck zum Ausdruck:

„Welches ist nun der Sinn dieser wissenschaftlichen Arbeit? Er liegt kurz gesagt in der Aufgabe, in die bunte Fülle der uns durch die verschiedenen Gebiete der Sinnenwelt übermittelten Erlebnisse Ordnung und Gesetzmäßigkeit hineinzubringen – eine Aufgabe, die sich bei näherer Betrachtung als völlig übereinstimmend erweist mit derjenigen Aufgabe, die wir in unserem Leben von frühester Jugend auf gewohnheitsmäßig tagtäglich üben, um uns in unserer Umgebung zurechtzufinden, und an der die Menschen von jeher gearbeitet haben, seitdem sie überhaupt zu denken anfangen, schon um sich im Kampf ums Dasein zu behaupten.“ (aus einem Vortrag von 1941, wiedergegeben in Planck 1975, S.366)

Dieses Ordnungsbedürfnis scheint bei reduktionistischen Vorstellungen im Hintergrund immer präsent zu sein, da diese, von bisherigen Erfolgen abgesehen, jedenfalls keine empirische Begründung haben – es gab schließlich auch die angeführten Fehlschläge.

Zunächst spricht also angesichts der vielen verschiedenen Beschreibungsebenen und entsprechenden Theorien nicht viel dafür, die Welt der Naturwissenschaft mit wenigen oder nur einer Theorie erfassen zu können – und nicht zuletzt wird es auch innerhalb einer *nichtreduktiven Physik*, wie man die antireduktionistische Position der vorliegenden Arbeit nennen könnte, mit dem Konzept der *Theoriennachbarschaft* eine Art Einheit geben, ähnlich der, die von Reduktionen gestiftet würde, und die ebenfalls das angesprochene Ordnungsbedürfnis befriedigen kann.

1.2 Positionen zum Reduktionsproblem

Auch wenn erst im zweiten Kapitel geklärt wird, mit welchem Konzept von Theorienreduktion eliminative Reduktionen etabliert werden können, seien an dieser Stelle gängige Vorstellungen davon aufgeführt, was solche Reduktionen leisten können sollen. Und während sich der Rest der Arbeit auf physikalische Theorien beschränkt, sei hier auch ein Blick über die Physik hinaus gestattet, der nach der Diskussion des Reduktionsproblems innerhalb der Physik dann im Abschlusskapitel wieder aufgegriffen wird.

So ist es nun etwa vorstellbar, dass sämtliche naturwissenschaftliche Theorien im Sinne eines eliminativen Reduktionismus im Prinzip auf Theorien der Elementarteilchenphysik zurückgeführt werden können, wobei die dafür notwendigen Reduktionen nicht explizit ausgeführt sein müssen, wenn dies aus pragmatischen, also etwa rechnerischen Gründen nicht möglich ist. Dennoch könnte sich die Möglichkeit solcher Reduktionen zeigen lassen,

so dass einzelne Theorien zwar als praktikables Handwerkszeug weiterhin benötigt werden, aber dennoch im Prinzip überflüssig sind.

Dabei ist es sogar denkbar, eine solche reduktionistische Position über die Naturwissenschaften hinaus zu vertreten und also zu behaupten, man könne eines Tages wirklich *alles*, was sich über die Welt wissen lässt, also etwa auch Forschungsergebnisse der Wissenschaftsgeschichte, aus elementaren Theorien der Physik ableiten. Es soll hier schließlich nicht bezweifelt werden, dass *alles* im Rahmen physikalischer Gesetze stattfindet, und so könnte es möglich sein, dass sich, analog zu der mechanistischen Vorstellung des Laplaceschen Dämons, auch alles aus physikalischen Gesetzen ableiten lässt. Auf derartige Spekulationen soll hier allerdings nicht weiter eingegangen werden, da auch mit der Einschränkung auf die Naturwissenschaft eine solche reduktionistische Vorstellung herausfordernd genug ist – nicht nur, wenn man die Psychologie hinzuzählt, auch Fächer wie zum Beispiel Paläobotanik werden sich schwerlich mit Methoden der Quantenmechanik behandeln lassen.

Insbesondere fällt es nicht leicht, sich vorzustellen, wie Naturwissenschaft, die sich mit Lebewesen beschäftigt, von elementarphysikalischen Theorien erfasst werden soll. Schrödingers Vorstoß in eine solche Richtung in seinem Buch *Was ist Leben?* (1946) muss sich damit bescheiden, spontane Mutationen bei Vererbungsvorgängen auf spontane Quantensprünge zurückführen und die Langlebigkeit der beteiligten Gene mit einer quantenmechanischen Molekültheorie erklären zu können. Und auch wenn er sich optimistisch gibt und eine diesbezügliche reduktionistische Vorstellung vertritt – „Wenn die heutige Physik und Chemie diese Vorgänge [Vorgänge „innerhalb [...] eines lebenden Organismus“] offenbar nicht zu erklären vermögen, so ist das durchaus kein Grund, die Möglichkeit ihrer Erklärung durch die Wissenschaft zu bezweifeln“ (zitiert aus Schrödinger 1951, S. 10) –, muss er doch einräumen: „Aus einer so allgemeinen Darstellung einer Struktur, wie sie oben vorgetragen worden ist [über Mutationen und Quantensprünge], kann keine Detailauskunft über das Funktionieren des Vererbungsvorganges hervorgehen. Das ist offensichtlich“ (a.a.O., S.96).¹

Zunächst sei aber die reduktionistische Position, nach der alle naturwissenschaftlichen Theorien in der Elementarteilchenphysik enthalten sind, unabhängig von dem konkreten Fall der Biologie kurz allgemein diskutiert. So war eingangs nicht umsonst von verschiedenen *Beschreibungsebenen* die Rede und es ist nicht ohne weiteres einzusehen, wie eine Theorie, die sich mit Elementarteilchen befasst, Aussagen über Phänomene höherer

¹Neben Schrödinger befassten sich mit Bohr 1933 und Delbrück 1949 noch weitere theoretische Physiker mit der Biologie, die allerdings eher deren Eigenständigkeit herausarbeiteten.

Ebenen machen kann. Dieser Einwand geht über bloße Komplexitätsfragen hinaus: Objekte höherer Ebenen sind natürlich aus Elementarteilchen zusammengesetzt und so lässt sich behaupten, dass es nur eine Frage von Rechnerkapazitäten ist, auch makroskopische Objekte mit mikroskopischen Theorien zu beschreiben. Aber es treten in höheren Beschreibungsebenen gewissermaßen „grobe“ Eigenschaften auf, die von den „feinen“ Theorien der Elementarteilchenebene möglicherweise nicht erfasst werden *können*. Dies veranschaulicht Sklar 1993 an dem Beispiel des Stuhls als das eines makroskopischen Objekts, dessen funktionale Eigenschaften als Möbelstück von elementaren Theorien trivialerweise nicht erfasst werden:

„A standard example of a trivial sort is frequently given by referring to the way we sort objects into household goods. Surely a chair is nothing but a complex array of the micro-components of the world described by physics. But any hope of defining ‚chair‘ in the standard fundamental vocabulary of physics founders on the complex, vague nature of that concept, a concept that takes its meaning from the place furniture plays in the complicated world of everyday life.“ (a.a.O., S.342)

Wenn es also um Erklärungen typischer Phänomene in höheren Beschreibungsebenen geht, kann es Beschränkungen des reduktionistischen Ansatzes dadurch geben, dass die Konzepte der dafür geeigneten makroskopischen Theorien in den mikroskopischen Theorien nicht vorkommen. Dieser Punkt wird im Laufe der Arbeit immer an den Stellen auftreten, an denen die prinzipielle Möglichkeit reduktionistischer Erklärungen mit numerischen Methoden diskutiert wird: Es wird sich zeigen, dass zur Deutung numerischer Ergebnisse oft Wissen von zu reduzierenden Theorien benötigt wird, wie es sich zum Beispiel in dem Wissen um die funktionale Rolle des Stuhls² zeigt, und das bei aller Kenntnis seiner mikroskopischen Bestandteile aus mikroskopischen Theorien allein nicht gewonnen werden kann.

Es scheint also nicht ohne Grund für jede Beschreibungsebene jeweils geeignete Theorien zu geben und insbesondere scheinen die Theorien der elementaren Ebene kaum Aussagen über höhere Ebenen machen zu können: „In fact, the more the elementary particle physicists tell us about the nature of the fundamental laws, the less relevance they seem to have to the very real problems of the rest of science, much less to those of society“ (Anderson 1972, S.393). Dieser allgemeine Punkt der mangelnden Relevanz fundamentaler Beschreibungsebenen für höhere Ebenen wird gleich bei der

²Nicht verstanden als Einzelexemplar (*token*), sondern als eine Klasse bestimmter Möbelstücke (*type*). Das Konzept der *funktionalen Reduktion*, nach dem solche funktionale Rollen von reduzierenden Theorien beschrieben werden, wird am Ende von Abschnitt 1.3 kurz besprochen.

Diskussion des Reduktionsproblems innerhalb der Physik noch einmal besprochen, zunächst sei aber das Beispiel der Biologie wieder aufgenommen. Auch in diesem Beispiel ist es natürlich so, dass Organismen letztlich aus elementaren Bestandteilen bestehen, weshalb sich behaupten lässt, man könne im Prinzip biologische Vorgänge mit Elementarteilchentheorien erklären – auch wenn dabei auf numerische Verfahren und erst zukünftige große Rechnerkapazitäten verwiesen werden muss. In diese Richtung äußert sich etwa Weinberg 1993: „[...] no one doubts that with a large enough computer we could in principle explain all the properties of DNA by solving the equations of quantum mechanics for electrons and the nuclei of a few common elements“ (a.a.O., S.24). Gegen diese zunächst denkbare Möglichkeit spricht aber andererseits, was Schrödinger mit der Unfähigkeit des physikalischen Ansatzes, Detailauskünfte über den Vererbungsvorgang zu liefern, meinte: Bei Erklärungen biologischer Vorgänge werden wesentlich Konzepte verwendet, die es in der Quantenmechanik nicht gibt. Dazu führt Sklar 1993 im Anschluss an sein Beispiel des Stuhls weiter aus:

„A much more interesting case might be that of evolutionary biology. Notions like that of genotype, phenotype, species, fitness, environmental stress, natural selection, and so on, form the fundamental vocabulary of this theory. The theory has its own explanatory principles that function well to offer us a coherent account of such phenomena as species diversification, extinction, modification, and so on. Any simple hope of defining these terms in terms of the concepts of fundamental physics seems out of question.“ (a.a.O, S.342)

Überhaupt beruhen Erklärungen der Biologie weniger auf Gesetzen, wie sie bei physikalischen Erklärungen verwendet werden, sondern beschreiben etwa das komplexe Zusammenspiel vieler Teile innerhalb eines größeren Mechanismus, wie zum Beispiel des Herzschlags, und müssen im Rahmen der Evolutionsbiologie auch kontingente historische Tatsachen berücksichtigen.

Wenn daher allein schon die Biologie nicht auf Elementarteilchenphysik zurückführbar zu sein scheint, gilt dies um so mehr für Theorien noch höherer Beschreibungsebenen: „Surely there are more levels of organization between human ethology and DNA than there are between DNA and quantum electrodynamics, and each level can require a whole new conceptual structure“ (Anderson 1972, S.396). Aber selbst schon in einer Beschreibungsebene darunter, innerhalb der Chemie nämlich, werden Konzepte verwendet, die es in der Elementarteilchen*physik* nicht gibt. Zwar wird die Diskretheit des Periodensystems der Chemie durch die Quantentheorie des Atoms erklärt und überhaupt profitiert die Chemie erheblich von der Quantenmechanik, aber ihre typischen Konzepte können von letzterer nicht ersetzt werden: „Andererseits ist es nicht möglich, den Begriff der Gestalt einer Molekel

lediglich aus ersten Prinzipien der Quantenmechanik herzuleiten“ (Primas 1985, S.113).

Kurzum, während die hier diskutierte reduktionistische Vorstellung der Zurückführbarkeit aller naturwissenschaftlichen Theorien auf solche der Physik zunächst denkbar erscheint und es nicht von der Hand zu weisen ist, dass elementarphysikalische Gesetze in gewissem Sinne für höhere Systeme *gelten*, löst sich diese Vorstellung, die ja über die bloße Geltung der Gesetze hinaus den Anspruch auf *Erklärungen* durch diese erhebt, bei näherem Hinsehen von allein auf, und selbst die prinzipielle Möglichkeit solcher Reduktionen muss aufgrund der in Theorien höherer Beschreibungsebenen verwendeten Konzepte, die in der Elementarteilchenphysik nicht vorkommen, bezweifelt werden.

Vertreten wurde und wird eine solche Position freilich dennoch, wobei aber üblicherweise nicht gefordert wird, dass die Theorien höherer Beschreibungsebenen direkt auf solche der Elementarteilchenphysik reduziert werden können, sondern dass Reduktionen hintereinander ausführbar sind, womit die Reduktionsbeziehung also transitiv wäre und dann im Prinzip, wenn auch nicht direkt, alle naturwissenschaftlichen Theorien auf elementare Theorien zurückgeführt werden könnten. Natürlich gelten die angeführten Einwände auch für solche kleinschrittigen Reduktionen – nichtsdestotrotz handelt es sich wieder um eine zunächst denkbare Vorstellung, deren exemplarische Formulierung in Oppenheim/Putnam 1958 hier zitiert sei:

„It is not absurd to suppose that psychological laws may eventually be explained in terms of individual neurons in the brain; that the behavior of individual cells – including neurons – may eventually be explained in terms of their biochemical constitution; and that the behavior of molecules – including the macro-molecules that make up living cells – may eventually be explained in terms of atomic physics. If this is achieved, then psychological laws will have, in *principle*, been reduced to laws of atomic physics, although it would nevertheless be hopelessly impractical to try to derive the behavior of a single human being directly from his constitution in terms of elementary particles.“ (a.a.O., S.7)

Diese Sätze wurden in einer Zeit formuliert, in der zahlreiche reduktionistische Erfolge der Naturwissenschaften, wie etwa die Entdeckung der DNA-Struktur, in dieser Hinsicht optimistisch stimmten, und es sei insbesondere herausgehoben, dass zwar die praktische Unmöglichkeit elementarteilchenphysikalisch betriebener Psychologie eingeräumt, deren *prinzipielle Möglichkeit* aber in den Raum gestellt wird.

Diese Position wird erst zum Abschluss dieser Arbeit diskutiert, wobei dann über die schon besprochenen Einwände hinaus untersucht wird, inwiefern sich die bis dahin erhaltenen Ergebnisse über das *Reduktionsproblem innerhalb der Physik* auf sie übertragen lassen. Zunächst sei hier aber auch

dieses speziellere Thema – das gerade auch im Hinblick auf die prinzipielle Fragestellung untersucht werden wird – einleitend in den Blick genommen. Die letztgenannte Fassung der reduktionistischen Position, die auf der Verkettung von Reduktionen beruht, beinhaltet nämlich etliche Teilaspekte. Unter anderem enthält sie *die* Frage der Philosophie des Geistes,³ ob nämlich Bewusstsein auf biologische Prozesse reduzierbar ist bzw. ob Bewusstseinstheorien der Psychologie auf neurobiologische Theorien zurückgeführt werden können. Allerdings sei die Leib-Seele-Debatte mit ihrer verwickelten Diskussion hier nur erwähnt – zwar wird auch in dieser der Reduktionsbegriff verwendet, sie kann aber im Rahmen der vorliegenden Arbeit bei weitem nicht angemessen behandelt werden. Weitere Teilaspekte sind nun etwa Fragen der Vereinheitlichung innerhalb der Biologie, zum Beispiel Versuche, Biologie als molekulare Biologie zu betreiben und die klassische Mendelsche Vererbungslehre auf molekulare Genetik zurückzuführen, oder die schon angesprochene Frage, ob die Chemie auf Physik reduzierbar ist.

Während aber diese Teilaspekte bis zum Schlusskapitel der Arbeit auf sich beruhen mögen, soll hier nun das Problem vorgestellt werden, von dem diese Arbeit im Folgenden ausschließlich handeln wird, die Ansicht einer Einheit der Physik in dem Sinne nämlich, dass alle physikalischen Theorien auf Theorien einer elementaren Ebene zurückführbar und dadurch im Sinne eines eliminativen Reduktionismus, wenn auch nur im Prinzip, überflüssig sind. Dabei wird neben dieser globalen Position zu untersuchen sein, ob es innerhalb der Physik überhaupt eliminative Reduktionen gibt, wobei insbesondere zu bedenken ist, dass es nicht nur Reduktionen zwischen verschiedenen Beschreibungsebenen geben kann, sondern auch innerhalb einer Beschreibungsebene.

Als prominenter Vertreter der Einheit der Physik sei zunächst Carl Friedrich von Weizsäcker genannt, der allerdings eine solche Einheit nicht mit der Vorstellung eines eliminativen Reduktionismus, sondern außerphysikalisch und an Kant anlehnd mit den Bedingungen unserer Erkenntnis selbst begründet (vgl. Weizsäcker 1985). In der vorliegenden Arbeit ist dagegen eher die Vorstellung gemeint, dass die Quantentheorie eines Tages mit der Allgemeinen Relativitätstheorie vereinigt werden kann, und damit als eine *Theorie von Allem* die ganze Physik enthielte. Dies braucht natürlich auch wieder nur *im Prinzip* zu gelten und einzelne Theorien können für ihre jeweilige Ebene als angemessenes Handwerkszeug dennoch benötigt werden

³Sofern man die Psychologie zu den Naturwissenschaften zählt, was übrigens auch bei der in Abschnitt 1.1 erwähnten Soziologie fraglich ist: Wenn auch ihr Begründer Auguste Comte sie explizit als Naturwissenschaft verstand und sie sich teilweise entsprechender Methoden bedient, geht sie mit ihrer Untersuchung menschlicher Gesellschaft doch über den Rahmen der klassischen Naturwissenschaften hinaus.

– sie wären prinzipiell aber überflüssig. Weiterhin kann sich eine solche globale Behauptung wiederum auf die Verkettung von Reduktionen stützen, so dass Theorien etwa über Raumakustik nicht direkt mit Elementarteilchenphysik in Verbindung gebracht werden müssen. Ein dezidierter Verfechter einer solchen Einheit der Physik durch verkettete Reduktionen, durch die Theorien im Prinzip überflüssig werden, ist Erhard Scheibe, dessen diesbezügliche Arbeiten in dieser Untersuchung oft herangezogen werden. In der Einleitung zu Scheibe 1997, einem Buch, das sich im Untertitel als ein „Beitrag zur Einheit der Physik“ versteht, wird explizit als „Leitidee“ formuliert, „[...]“, dass eine physikalische Theorie durch Reduktion im Prinzip entbehrlich oder überflüssig oder redundant gemacht wird durch eben die Theorie, auf die sie reduziert wird“ (a.a.O., S.4).

Während im weiteren Verlauf der Arbeit eher das Verhältnis zwischen einzelnen physikalischen Theorien im Mittelpunkt stehen wird, seien im Rahmen dieser Einleitung noch einige Worte zu der globalen Position einer Einheit der Physik durch verkettete, eliminative Reduktionen auf Elementarteilchenphysik verloren. Dazu ist zu sagen, dass es in der Physik derzeit zwar danach aussieht, als sei eine *Theorie von Allem* (*Theory of Everything*, *TOE*), die eine ebenfalls erst noch zu findende *große vereinheitlichte Theorie* (*Grand Unified Theory*, *GUT*) der starken und schwachen Wechselwirkung und der elektromagnetischen Kraft mit der Allgemeinen Relativitätstheorie verbindet, in Reichweite,⁴ dass es sie aber noch nicht gibt und dass es selbst, wenn sie gefunden ist, angesichts der historisch immer wieder aufgetretenen Umwälzungen in der Physik fraglich bleibt, ob es sich um eine endgültige, letzte Theorie handeln wird. Damit einhergehend kann sich eine Reduktion auf Theorien einer untersten Ebene auch nicht sicher sein, dass es eine solche unterste Ebene überhaupt gibt. Und schließlich zeigt sich in der Quantenfeldtheorie schon jetzt, dass man auf der Elementarteilchenebene von *Teilchen* gar nicht mehr sprechen kann: Der klassische Substanzbegriff wird überhaupt in Frage gestellt und unter anderem versucht, die Ontologie der Elementarteilchen als *Prozesse* zu verstehen. Kurzum, es ist gar nicht ausgemacht, auf welche grundlegende Theorie reduziert werden soll, und es ist außerdem nicht klar, wie etwa die klassische Physik makroskopischer Objekte auf eine Theorie reduziert werden kann, die von Prozessen handelt. Abgesehen davon stellt sich auch innerhalb der Physik die oben schon allgemein angesprochene Frage, inwiefern Theorien einer fundamentalen Ebene für Theorien höherer Beschreibungsebenen relevant sein können.

⁴So malt etwa Steven Weinberg, der in der Tat einen großen Beitrag zur Theorie der Vereinigung schwacher und elektromagnetischer Wechselwirkung leistete, in Weinberg 1993 die *final theory* optimistisch aus. Als Kandidaten für die Theorie von Allem gelten die verschiedenen Ansätze der *Stringtheorie*.

Dazu gibt Steven Weinberg einige Hinweise innerhalb einer Diskussion mit Ernst Mayr, die sich an dem Rechtfertigungsproblem der Investition von vier Milliarden Dollar in einen Teilchenbeschleuniger entzündete, und die in Mayr/Weinberg 1988 dokumentiert ist. Mayr ist Biologe, hält eine solche Investition in die Elementarteilchenphysik für nicht gerechtfertigt und begründet dies mit der Autonomie seiner Wissenschaft der „middle world“ (zwischen der mikroskopischen Welt und der kosmologischen der Astrophysik, a.a.O., S.475): „It is my contention that advances in our understanding of the microworld of subatomic particles are not going to make any explanatory contributions to our understanding of the middle world. [...] But it is the middle world that poses all the problems man will have to solve if he is to survive.“ (ebd.). Weinberg dagegen beruft sich zunächst auf die schon besprochene Vorstellung, Reduktionen seien transitiv, womit durch Verkettungen von Reduktionen Wissen über die fundamentale Ebene relevant für höhere Ebenen sein kann: „[...] I am taking for granted a kind of transitivity“ (ebd.).

Interessanter sind aber seine weiteren Hinweise. So macht er zunächst an einem Beispiel der Reduktion innerhalb *einer* Beschreibungsebene klar, welche Fortschritte die Perspektive einer anderen Theorie mit sich bringen kann. Die Allgemeine Relativitätstheorie scheint zwar im Vergleich zur Newtonschen Gravitationstheorie keine großen *Erklärungsvorsprünge* zu liefern: „In a narrow sense, general relativity contributed very little to our understanding of the Solar System or the tides. We already knew enough to calculate planetary orbits with great precision, and general relativity did not help us with the major puzzles still outstanding (long-term stability, tidal dissipation), only with one tiny anomaly in the orbit of Mercury“ (a.a.O., S.475f., diese Punkte werden im dritten Kapitel noch ausführlich diskutiert). Zwei Punkte zeigen aber dennoch die Bedeutung dieser neuen Gravitationstheorie. Zum Ersten liefert sie ein besseres Verständnis der Gravitation, indem sie die Newtonsche Theorie in einem neuen Licht erscheinen lässt: „Nevertheless, the development of general relativity *was* important, at least in part, because it explained the theories of Newton that had earlier explained so much else“ (S.476, auch dies wird im dritten Kapitel besprochen). Und zum Zweiten macht die Allgemeine Relativitätstheorie Vorhersagen, die der Newtonschen Theorie fremd sind: „Of course, general relativity is important also because it predicts new phenomena, such as black holes and gravitational lenses. This is our historical experience: a theory that provides a more satisfying explanation of what we already knew is likely also to predict things of which we had not yet dreamed“ (ebd.).

Diese beiden Vorzüge bringt er schließlich gegen Mayr ins Feld, wenn es um mögliche wissenschaftliche Fortschritte mit Hilfe des besagten Teilchenbeschleunigers in der Entwicklung der Elementarteilchenphysik geht: Wenn

innerhalb *einer* Beschreibungsebene neue Theorien ältere voranbringen, gilt dies nicht minder für das Verhältnis von Theorien tieferer zu solchen höherer Beschreibungsebenen. Dazu erinnert Weinberg zunächst an das Beispiel der Quantenmechanik – „[...] after all, everyone knows that the discovery of the electron and the atomic nucleus and the quantum mechanical description of their interaction made an enormous contribution to our understanding of matter at the scale of ordinary life“ (ebd.)⁵ –, um dann die Möglichkeit ähnlicher Fortschritte mit Hilfe einer neuen Theorie der Elementarteilchen zu plausibilisieren:

„It may be that such a theory would not make life any easier for the fluid dynamicist or the evolutionary biologist, just as general relativity did not help very much in the actual work of celestial mechanics and planetary physics. Yet I think it fair to say that, like general relativity, the sort of theory that we are aiming at in particle physics would, if only by explaining our previous theories, contribute fundamentally to our understanding of the ‚middle world‘. And if history is any guide, it would predict exciting new phenomena as well.“ (ebd.)

Theorien fundamentaler Beschreibungsebenen sind also insofern für diejenigen höherer Ebenen relevant, als sie zum einen zu deren Verständnis beitragen und zum anderen neue Phänomene vorhersagen können, die auch in höheren Ebenen eine Rolle spielen. Aus der Perspektive des Problems des eliminativen Reduktionismus wiederum ist dies nun allerdings nicht viel, der Blick richtet sich dann vor allem auf die Einschränkungen, die Weinberg einräumt. Zu dem Nachweis der Behauptung, bestimmte Theorien seien überflüssig, tragen ein besseres Verständnis dieser Theorien und die Vorhersage neuer Phänomene nicht viel bei und Weinberg macht im Gegenteil darauf aufmerksam, dass „celestial mechanics and planetary physics“ von der Allgemeinen Relativitätstheorie und der „fluid dynamicist or the evolutionary biologist“ von der Teilchenphysik nicht viel zu erwarten haben.⁶

⁵Außerdem ist etwa mit der Lasertechnologie eine reine Anwendung der Quantenmechanik inzwischen fest im Alltag der „middle world“ verwurzelt: Man denke nur an CD-Player oder Laserscanner an der Supermarktkasse.

⁶Der unter dem Namen *Superconducting Super Collider (SSC)* geplante Teilchenbeschleuniger übrigens, dessen Bau Weinberg rechtfertigte, wurde schließlich *nicht* gebaut (obwohl bereits für zwei Milliarden Dollar mit dem Bau von entsprechenden Tunneln im Süden von Texas begonnen wurde) – allerdings eher aus politischen Gründen (unter anderem Ende des Kalten Kriegs) und wegen Anstieg des Kostenplans auf über 12 Milliarden Dollar. Am Europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf ging dagegen im September 2008 mit dem *Large Hadron Collider (LHC)* der leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger der Welt an den Start, dessen Kosten sich auf über drei Milliarden Euro belaufen haben.

Er weist also darauf hin, dass, wie oben schon allgemein gesehen, auch innerhalb der Physik Theorien fundamentaler Ebenen in höheren Ebenen nicht ohne weiteres anwendbar sind. Wie sich weiterhin im Laufe der Arbeit zeigen wird, verwendet die Physik zur Erklärung von Phänomenen in der Tat typischerweise verschiedene Theorien und schenkt der Frage, ob einzelne davon im Prinzip überflüssig sind, keine große Beachtung – gerade dies spricht sich in den einschränkenden Bemerkungen Weinbergs aus: Selbst ein Teilchenphysiker, der die enormen finanziellen Ansprüche seines Spezialgebiets rechtfertigt, räumt ohne Umstände ein, dass die Teilchenphysik zu den meisten anderen physikalischen Disziplinen kaum etwas beizusteuern hat. Auch innerhalb der Physik gilt also, was in Abschnitt 1.1 allgemein festgehalten wurde: Die Welt wird in vielen Beschreibungsebenen mit jeweils angemessenen Theorien beschrieben. Dazu kommt, dass in Vorlesungen und Lehrbüchern der Physik nach wie vor geometrische Optik, phänomenologische Thermodynamik, Maxwellsche Elektrodynamik und klassische Mechanik behandelt werden und ein Kuhnscher Paradigmenwechsel zu den modernen Theorien des 20. Jahrhunderts nicht stattgefunden hat: Konzepte wie Wärme, Temperatur und Lichtstrahlen werden weiterhin verwendet und niemand lebt und denkt außerhalb der Physik in Begriffen der Relativitätstheorie oder der Quantenmechanik.

Dennoch will sich diese Arbeit der Herausforderung des trotz allem denkbaren eliminativen Reduktionismus stellen. Und in dieser Hinsicht zeigte zunächst der Exkurs zu der Mayr-Weinberg-Debatte die beschränkte Anwendbarkeit fundamentaler Theorien auf Phänomene höherer Beschreibungsebenen. Etwas allgemeiner bringt dies Anderson 1972 auf den Punkt. Demnach ist zwar ein reduktionistisches Vorgehen insofern möglich, als man zu immer fundamentaleren Ebenen vorstoßen kann, was aber nicht die Möglichkeit einschließt, von diesen fundamentalen Ebenen aus wiederum die Phänomene der höheren zu erklären: „The main fallacy in this kind of thinking is that the reductionist hypothesis does by no means imply a ‚constructionist‘ one: The ability to reduce everything to simple fundamental laws does not imply the ability to start from those laws and reconstruct the universe“ (a.a.O., S.393).

Diese pauschale Feststellung wird nun in den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit etwas differenzierter betrachtet: Es ist natürlich trivial, dass man mit fundamentalen Gesetzen allein nicht viel anfangen kann. Bei Erklärungen ist selbstverständlich das Explanandum bekannt,⁷ das etwa ein Phänomen einer höheren Beschreibungsebene sein kann und sich durchaus zu fundamentalen Gesetzen in Beziehung setzen lässt. Wenn aber die prin-

⁷Weshalb es irreführend ist, von einer „konstruktionistischen“ Hypothese zu sprechen: Konstruiert werden müssen die Phänomene mit fundamentalen Theorien nicht.

zipielle Überflüssigkeit bestimmter *Theorien* gezeigt werden soll, müssen diese entweder selbst erklärt werden, oder dürfen eben in solche Erklärungen von Phänomenen *nicht* einfließen. Damit wird diese Fragestellung aber zu einer Angelegenheit des konkreten Einzelfalls und als solche auch im weiteren Verlauf dieser Arbeit behandelt: Es wird in jedem Einzelfall zu klären sein, inwiefern Theorien höherer Beschreibungsebenen mit fundamentalen Theorien erklärt werden können bzw. ob man Phänomene höherer Beschreibungsebenen mit fundamentalen Theorien *ohne Zuhilfenahme zu reduzierender Theorien höherer Beschreibungsebenen* erklären kann.⁸ Auch Sklar 1999 weist jedenfalls darauf hin, dass man sich selbst bei Beschränkung auf die Physik vor pauschalen Aussagen zur Reduzierbarkeit zu hüten hat, und dass stattdessen eine sorgfältige Einzelfallprüfung notwendig ist:

„But even within physics itself, the more we probe into intertheoretical relations the harder we find it to characterize them in all but the most general terms if we want analyses of these relations that will hold across numerous important cases. Instead we find that the individual cases each present a complex of subtle details and that it is in these details that much of the most interesting results lie in trying to understand just how one theory is related to the other.“ (a.a.O., S.188)

Pauschale Antworten zum Reduktionsproblem gibt es nicht und auch in dieser Arbeit werden in den Kapiteln 3, 4 und 5 drei konkrete Fallbeispiele ausführlich in dieser Hinsicht untersucht.

Dazu wird nun zunächst im zweiten Kapitel Klarheit darüber geschaffen, was für ein Reduktionsbegriff zugrunde gelegt werden muss, damit sich sagen lässt, dass eine reduzierte physikalische Theorie im Sinne des eliminativen Reduktionismus, wenn auch nur im Prinzip, überflüssig ist. In den darauf folgenden drei Kapiteln wird dann jeweils ein Fallbeispiel daraufhin untersucht, wobei diese Betrachtungen gegen die hier präsentierten Reduktionsvorstellungen zeigen werden, dass in den meisten Fällen die Theorien der speziellen Beschreibungsebenen einen eigenständigen Status haben, wobei auch Argumente dafür angegeben werden, dass dies nicht nur aus pragmatischen Gründen, sondern sogar prinzipiell gilt: Eine endgültige Entscheidung kann, wie in Abschnitt 1.1 schon besprochen, in dieser Sache zwar nicht getroffen werden, aber die Beweislast wird immerhin an die reduktionistische Position weitergereicht.

Die Sichtweise auf die Physik, die damit nahegelegt wird, besagt nun, dass ein vollständiges Bild der Welt nicht von einer einzigen fundamentalen Theorie geliefert werden kann, sondern dass im Gegenteil viele verschiedene

⁸Diese Unterscheidung zwischen *direkter Reduktion* (Erklärung von Theorien) und *indirekter Reduktion* (Erklärung von Phänomenen) wird in Abschnitt 1.3 ausführlich erläutert.

Zugänge und Theorien notwendig sind. Dies führt zwar nicht unbedingt zu der Vorstellung einer *dappled world*, die in Cartwright 1999 vertreten wird,⁹ aber es handelt sich gewissermaßen um *dappled theories*: Für die vollständige Beschreibung der Welt werden viele verschiedene Theorien benötigt. Allerdings stehen diese wiederum nicht gänzlich isoliert nebeneinander – es gibt auch bei dieser Position im Rahmen des schon genannten Konzepts der *Nachbarschaft* gewisse Zusammenhänge zwischen den Theorien. Aber es wird gezeigt, dass die aufgeführten Vorstellungen von den Möglichkeiten, Theorien zu reduzieren, zu optimistisch sind. Die Konsequenzen dieser Position für die Frage nach der Einheit der Wissenschaft werden unter Berücksichtigung der Ergebnisse dieser Arbeit abschließend im sechsten Kapitel diskutiert.

Nun macht es der hohe Grad der Mathematisierung in der Physik zwar scheinbar leicht, Reduktionsbehauptungen aufzustellen (anders als zum Beispiel beim Leib-Seele-Problem, bei dem die Schwierigkeiten offensichtlicher sind), aber aus dem gleichen Grund kann man gerade in der Physik gut verfolgen, was genau bei Reduktionen vor sich geht. Und wenn diese Untersuchungen in der Physik natürlich nicht direkt auf das hier besprochene globale Problem übertragbar sind, soll dennoch im abschließenden Kapitel abgeschätzt werden, inwieweit die Argumente aus der Physik auf dieses anwendbar sind.

Zunächst geht es aber darum, Klarheit über den Reduktionsbegriff zu schaffen.

1.3 Theorien der Reduktion

Das genaue Verhältnis zwischen verschiedenen wissenschaftlichen Theorien auszuloten, ist Fragestellung des Reduktionsproblems: Angesichts des in Abschnitt 1.1 beschriebenen und in vielen Fällen erfolgreichen reduktionistischen Vorgehens versuchen *Theorien der Reduktion* zu klären, wie genau das Verhältnis zwischen Theorien beschaffen ist, die sich gegenseitig unterstützen können. Dagegen stellen die *Positionen des Reduktionismus* Behauptungen darüber auf, welche Theorien aufeinander reduzierbar sind. Was es für eine konkrete Theorie bedeutet, auf eine andere reduzierbar zu sein, hängt wiederum davon ab, in welchem Sinne eine Reduktion möglich ist. So unterscheidet etwa Hoyningen-Huene 2007 einerseits zwischen *eliminativer* und *retentiver* Reduktion und andererseits zwischen *tatsächlich durchführbaren*, *im Prinzip möglichen* und *heuristischen* Reduktionen (vgl.

⁹Demnach entsprechen den verschiedenen Theorien der (epistemischen) Beschreibung auch verschiedene (ontologische) Abschnitte der Welt, die man sich also „gestückelt“, *dappled* vorzustellen hat.

a.a.O, S.186): Während eine eliminativ reduzierte Theorie durch diese Reduktion entbehrlich geworden ist, spielt eine retentiv reduzierte weiterhin eine Rolle in der Wissenschaft. Der Unterschied zwischen tatsächlich durchführbar und prinzipiell möglich wurde in Abschnitt 1.1 schon diskutiert, und mit dem Konzept der heuristischen Reduktion ist gemeint, dass es trotz prinzipiell nicht durchführbarer Reduktion einer Theorie auf eine andere fruchtbar sein kann, eine reduktionistische Forschungsstrategie zu verfolgen, wofür a.a.O. als Beispiel angeführt wird, dass Max Delbrück zwar die Biologie für prinzipiell nicht auf die Physik zurückführbar hielt, aber dennoch für das Aufspüren spezifisch biologischer Gesetzmäßigkeiten ein reduktionistisches Vorgehen verfolgte (vgl. S.187).

Der vorliegenden Arbeit geht es nun um die Fragestellung, inwiefern es innerhalb der Physik *im Prinzip mögliche eliminative* Reduktionen gibt, und um eine reduktionistische Position, die für eine so reduzierte Theorie behauptet, diese sei im Prinzip überflüssig und würde nur aus praktischen Gründen noch verwendet werden. Daher sollen Bedingungen für das Vorliegen einer *Reduktion* erarbeitet werden, so dass bei deren Erfülltsein solche Behauptungen gerechtfertigt sind und wofür es auch Beispiele gibt – zu starke Forderungen sind leicht unerfüllbar, womit es dann gar keine solche Fälle geben würde. Von diesen „echten“ Reduktionen wird dann ein Theorienverhältnis abgegrenzt, das bei Hoyningen-Huene *tatsächlich durchführbare retentive* Reduktion hieße, hier aber *Theoriennachbarschaft* genannt werden soll, da das Vorliegen dieser Relation keine eliminativ-reduktionistischen Positionen stützt und die Bezeichnung als Reduktion mithin irreführend sein kann: Der Name „Reduktion“ soll der genannten im Prinzip möglichen eliminativen Reduktion vorbehalten bleiben. In dieser Sprechweise wird dann die Untersuchung der Fallbeispiele in den Kapiteln 3, 4 und 5 zeigen, dass es zwar historische Fälle „echter“ Reduktionen gibt (die dann sogar tatsächlich durchführbare statt nur im Prinzip mögliche eliminative Reduktionen bilden), die Theorien der modernen Physik aber eher *benachbart* zueinander sind (wobei es sich zum Teil wiederum nur um im Prinzip durchführbare retentive Reduktionen handelt, die *auch* unter das Konzept der Theoriennachbarschaft fallen sollen).

Die genauen Bedingungen für diese Reduktionskonzepte für physikalische Theorien werden erst im zweiten Kapitel erarbeitet, hier sei zunächst ein kurzer Überblick über diejenigen Theorien der Reduktion gegeben, die für physikalische Theorien relevant sind. Dazu seien zwei kurze Begriffsklärungen vorangestellt. So sind zum Ersten für die an einem Reduktionsverhältnis beteiligten Theorien die Bezeichnungen *höhere* und *tiefere*, *größere* und *feinere* Theorie oder etwa *Ziel-* und *Basistheorie* gebräuchlich, und Ernest Nagel, einer der Hauptprotagonisten der Reduktionsdebatte, verwendet *secondary* und *primary theory*. Da es aber neben Reduktionen zwischen

Beschreibungsebenen (*interlevel reduction* – mit dem Spezialfall der me-reologischen Reduktion eines Ganzen auf die Eigenschaften seiner Teile als sogenannte *Mikroreduktion*) auch solche innerhalb einer Beschreibungsebene gibt (*intralevel reduction*), soll in dieser Arbeit immer neutral von *zu reduzierender* bzw. *reduzierter* und *reduzierender* Theorie die Rede sein.

Auf die zweite notwendige Begriffsklärung macht Nickles 1973 aufmerksam: In den Wissenschaften wird die Reduktionsrelation nämlich oft gerade andersherum bezeichnet als in der Wissenschaftstheorie – reduzierend und reduziert wird vertauscht. Dies geht auf eine etymologische Besonderheit des Wortes „reduzieren“ zurück: Bedeutet es ursprünglich „zurückführen“ (von lat. *reducere*), wird es heute auch im Sinne von „verringern, vermindern“ gebraucht. An diese zweite Bedeutung denkt man in der Physik, wenn es dort heißt, dass sich zum Beispiel die relativistische Mechanik im Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten auf die klassische Mechanik reduziert, also gewissermaßen „einschränkt“. Diese Arbeit hält sich aber an die Tradition der philosophischen Reduktionsdebatte und damit an die ebenso gebräuchliche lateinische Bedeutung des Wortes. Daher soll in diesem Fall davon die Rede sein, dass die klassische Mechanik auf die relativistische reduziert wird (so es sich denn um eine Reduktion handelt).

Damit seien nun die Theorien der Reduktion besprochen. Wie schon in Abschnitt 1.1 angesprochen, gibt es reduktionistische Vorstellungen seit dem Atomismus der Antike, wobei die mechanistische Philosophie des 17. Jahrhunderts, die sich, motiviert durch die Erfolge der Newtonschen Physik, auf diesen Atomismus stützt, schon eine konkrete Theorie darüber liefert, wie Reduktionsbehauptungen erfüllt werden könnten: Durch mechanistische Erklärungen von Phänomenen höherer Beschreibungsebenen, die davon ausgehen, dass die entsprechenden Objekte aus Atomen zusammengesetzt sind. Denkbar ist damit sogar die globale Reduktionsbehauptung des Laplaceschen Dämons, der alle Vorgänge der Welt aus dem Wissen über Ort und Impuls ihrer Elementarteilchen vorhersagen könnte. Diese mechanistische Vorstellung fand zwar schon im 19. Jahrhundert ihr Ende, reduktionistische Vorstellungen spielten aber dennoch in der weiteren Entwicklung der Physik eine bedeutende Rolle. Während die Rückführung der Thermodynamik auf die statistische Mechanik noch unter das mechanistische Programm fällt, geht etwa die der physikalischen Optik auf die elektromagnetische Theorie darüber hinaus. Beide Probleme wurden im 19. Jahrhundert bearbeitet und wichtige Namen in diesem Zusammenhang sind etwa Boltzmann und Maxwell, wobei sich letzterer, vor allem bekannt für seine Entwicklung des Elektromagnetismus, ebenso wie ersterer mit der Thermodynamik der Gase beschäftigt hat. Und auch im 20. Jahrhundert spielten reduktionistische Vorstellungen eine große Rolle, etwa in der Ansicht, die klassischen Theorien sollten in den modernen als Grenzfall enthalten sein – eine Bedingung, deren

Erfülltsein der jeweils neuen Theorie immer zusätzliche Glaubwürdigkeit verliehen hat. Und nicht zuletzt wird die in Abschnitt 1.2 erwähnte Suche nach einer *Theorie von Allem* in jüngster Zeit ebenso von der Vorstellung angetrieben, dass diese Theorie alle Physik enthalten würde.¹⁰

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts begann man nun innerhalb der Wissenschaftstheorie, die wichtige Rolle von Reduktionen für die Entwicklung der Wissenschaft wahrzunehmen. Die erste gründliche Untersuchung des Reduktionsbegriffs lieferte schließlich Ernest Nagel 1949, laut dem im Wesentlichen eine Theorie auf eine andere reduziert wird, wenn sich ihre Gesetze aus denen der reduzierenden Theorie logisch ableiten lassen. Mit der ein Jahr vorher, nämlich von Hempel/Oppenheim 1948 entwickelten Theorie des deduktiv-nomologischen Schemas der wissenschaftlichen Erklärung, nach dem ein Explanandum aus Gesetzen und entsprechenden Randbedingungen logisch abgeleitet und *dadurch* erklärt wird (vgl. Abschnitt 2.5), lässt sich auch einfach sagen, dass die reduzierende Theorie die reduzierte *erklärt*. In den Worten von Nagel 1961: „Reduction, in the sense in which the word is here employed, is the explanation of a theory or a set of experimental laws established in one area of inquiry, by a theory usually though not invariably formulated for some other domain“ (S.338). Es sei dabei an dieser Stelle schon erwähnt, dass Nagel die für die logische Ableitbarkeit notwendigen semantischen Verbindungen zwischen dem Vokabular verschiedener Theorien behandelt und diese in Form von Bikonditionalen, den später sogenannten *Brückengesetzen*, als zusätzliche Forderungen bzw. Postulate einführt – das Problem der Sprache bei Reduktionen wird in Abschnitt 2.2 noch ausführlich behandelt. Nagels Reduktionsbegriff jedenfalls, besonders in der Fassung von Nagel 1961, wurde zu *der* Referenztheorie der Theorienreduktion und wird im ganzen zweiten Kapitel präsent sein.

Zwei Punkte verdienen es noch, hervorgehoben zu werden. Zum Ersten ist eine in Nagels Sinn reduzierte Theorie tatsächlich überflüssig: Eine Theorie, die logisch in einer anderen enthalten ist, wird streng genommen zur Beschreibung der Welt nicht mehr benötigt, womit in den Begriffen von Hoyningen-Huene 2007 eine Reduktion im Sinne Nagels eine tatsächlich durchführbare eliminative Reduktion wäre. Zum Zweiten handelt es sich innerhalb einer Unterscheidung zwischen *direkter* und *indirekter* Reduktion um eine direkte Reduktion, bei der die reduzierte Theorie nämlich direkt erklärt wird und die keinen Umweg über die Erklärung von Phänomenen (indirekte Reduktion) einschlägt – diese Unterscheidung ergibt sich aus der nun zu besprechenden Arbeit von Kemeny/Oppenheim 1956, die die Gedanken von Nagel aufgreift, kritisiert und vor allem in einen größeren

¹⁰Einen ausführlichen Überblick über reduktionistische Vorstellungen innerhalb der Physik gibt Scheibe 1997, S.13-23.

Rahmen stellt, der diese Unterscheidung nahelegt.

Zunächst gehören Kemeny und Oppenheim zu den ersten, die in der Reduktionsdebatte den Einwand geltend machen, dass Erklärungen in der Physik oft keine streng logischen Ableitungen sind, sondern in den meisten Fällen approximativen Charakter haben – dies ist als typisches physikalisches Vorgehen natürlich schon lange bekannt, wird hier aber zum ersten Mal mit Nagels strenger Reduktionstheorie konfrontiert. Auf die grobe Vereinfachung, die entsteht, wenn man diesen Umstand außer Acht lässt, und die allerdings auch das Hempel-Oppenheim-Schema selbst betrifft und noch in Nagel 1961 steckt, machen später etwa Popper 1957 und vor allem und mit großer Wirkung Feyerabend 1962 aufmerksam. Und während Kemeny und Oppenheim lediglich auf das Problem hinweisen und es aus Sorge, der Reduktionsbegriff würde durch Berücksichtigung des approximativen Charakters von Erklärungen zu kompliziert, bewusst ignorieren – „Hence we will go along with the previous authors in their first oversimplification“ (a.a.O., S.13) –, wird diese Kritik in Hempel 1965a und Nagel 1970 verarbeitet – diese ganze Problematik wird aber in Abschnitt 2.3 noch ausführlich diskutiert und sei daher hier nur erwähnt.

Was nun den angekündigten größeren Rahmen betrifft, so wird in Nagels Reduktionskonzept eine reduzierte Theorie mit Hilfe der verbindenden Brückengesetze von einer reduzierenden erklärt, während Reduktion bei Kemeny/Oppenheim 1956 etwas allgemeiner bedeutet, dass die reduzierende Theorie alle Phänomene erklären kann, die von der dadurch reduzierten Theorie behandelt werden: „[...] we must certainly require that the new theory [die reduzierende] should fulfill the role of the old one, i.e., that it can explain (or predict) all those facts that the old theory [die zu reduzierende] could handle“ (S.7). Man beachte den Unterschied: Hier werden nicht ganze Theorien erklärt, sondern direkt mit der reduzierenden Theorie einzelne Phänomene (Kemeny und Oppenheim sprechen von Beobachtungsdaten – *observational knowledge* auf S.8 bzw. *observational data* auf S.13), die vorher der zu reduzierenden Theorie vorbehalten waren.

Die Nagelsche Theorienreduktion ist nun ein *Spezialfall* dieser weiteren Fassung, der nach Kemeny/Oppenheim zunächst dann eintritt, wenn das Vokabular der zu reduzierenden Theorie in der reduzierenden enthalten ist. Dann nämlich folgen die Gesetze ersterer aus denen letzterer, ohne dass zusätzliche Brückengesetze nötig wären, und sie sprechen in diesem Fall von einer *internal reduction* (S.9), bei der also die in ihrem Reduktionskonzept geforderte Phänomenerklärung dadurch gesichert ist, dass die zu dieser Erklärung nötigen Gesetze auch in der reduzierenden Theorie enthalten sind. Der Spezialfall einer Nagelreduktion kann aber auch dann vorliegen, wenn die zur Phänomenerklärung notwendigen Gesetze zwar in der reduzierenden Theorie enthalten sind, aber nur mittels Brückengesetzen mit denen der zu

reduzierenden Theorie in Verbindung gebracht werden können. Diese zweite Möglichkeit fassen sie als eine indirekte Verbindung zwischen Theorien auf, während in ihrer Sprechweise Nagel direkte Verbindungen anstrebte (S.16): Bei ihnen erklärt eine reduzierende Theorie, die die Beobachtungsdaten einer zu reduzierenden Theorie wiedergibt, gegebenenfalls *zusätzlich* noch – unter Zuhilfenahme von Brückengesetzen – die zu reduzierende Theorie selbst, während Nagel darauf hinaus will, dass die zu reduzierende Theorie unmittelbar mit der reduzierenden erklärt wird.

Dagegen sollen nun in dieser Arbeit als *indirekte Reduktionen* auch solche Fälle bezeichnet werden, in denen die Erklärung von Phänomenen mit einer dadurch reduzierenden Theorie möglich ist, ohne dass in einem zweiten Schritt auch die Gesetze der reduzierten Theorie abgeleitet werden. Der Reduktionsbegriff von Kemeny/Oppenheim ist nämlich durchaus in diesem Sinne weiter gefasst als der von Nagel:

„If one theory is to follow from another [wie bei Nagel], it must be translatable into the vocabulary of the latter. But it is entirely possible that a theory should be able to explain all the facts that another can, without there being any method of translation. [...] Naturally, we do not exclude the possibility that reduction may be accomplished by means of translation. That is why the previous definitions [hier nicht wiedergegebene Modifikationen der Nageldefinition] [...] are special cases of our corresponding definition. But we maintain that they cover what is an extremely special case.“ (a.a.O., S.16)

Nagels Theorienreduktion wäre damit als *direkte Reduktion* dieser „special case“, in dem Theorien selbst erklärt werden, während eine Theorie auch indirekt dadurch reduziert sein kann, dass die Phänomene, die sie typischerweise erklärt, von der reduzierenden Theorie erklärt werden, ohne dass es eine weitere Verbindung zwischen den beiden Theorien geben muss. Diese Unterscheidung zwischen direkten und indirekten Reduktionen, zwischen Reduktionen durch Erklärung von Theorien und Reduktionen durch Erklärung von Phänomenen also, und vor allem das mögliche Zusammenspiel beider Konzepte, wird im Laufe der Arbeit eine erhebliche Rolle spielen. So wird das in Abschnitt 2.4 vorgeschlagene Reduktionskonzept aus einer Mischung dieser beiden Reduktionsarten bestehen. In der Reduktionsdebatte jedenfalls wird diese Unterscheidung in den Worten von Mayr 1982 oft auch als *explanatorische Reduktion* (indirekte Reduktion) und *Theorienreduktion* (direkte Reduktion) bezeichnet.¹¹

¹¹Mayrs dritter Reduktionstyp, die *konstitutive Reduktion*, bei der es um ontologische Fragestellungen im Zusammenhang mit Reduktionen geht, wird erst im Schlusskapitel kurz aufgegriffen und sonst nur in dem Sinne eine Rolle spielen, dass makroskopische Objekte aus mikroskopischen Teilen zusammengesetzt sind, was etwa für die Zusammensetzung einer Gasmenge aus zahllosen Molekülen im Beispiel von Thermodynamik