

# Lockende Schönheit Erkenntnis und Ästhetik

Hartmann Römer

Physikalisches Institut der Universität Freiburg  
Hermann-Herder-Str. 3, 79104 Freiburg  
hartmann.roemer@physik.uni-freiburg.de  
<http://omnibus.uni-freiburg.de/~hr357>

## 1. Einführung

Die Elementarteilchenphysik versteht sich als die Grundlagendisziplin der gesamten Physik. Wenn die elementaren Bausteine der physikalischen Welt bekannt und ihre Wechselwirkungen verstanden wären, dann sollten sich, wenigstens im Prinzip, alle anderen physikalischen Disziplinen darauf zurückführen lassen.

Nun ist die Elementarteilchentheorie in unseren Tagen von einem seltsamen Problem belastet, das weithin geradezu als Krise angesehen wird: Das so genannte *Standardmodell* der Elementarteilchenphysik, das schon vor mehr als vierzig Jahren formuliert wurde, beschreibt die alten und neuen Messergebnisse an Elementarteilchen viel erfolgreicher und für höhere Energien als man ihm angesichts seiner von Anfang an bemängelten Unvollkommenheiten, auf die noch einzugehen sein wird, zugetraut hätte. Die berechtigte Hoffnung, mit Hilfe des seit dem Jahre 2008 am europäischen Kernforschungszentrum CERN betriebenen Großprojektes „Large Hadron Collider“ „neue Physik“, also experimentelle Hinweise zur Erweiterung und Verbesserung des Standardmodells zu finden, hat sich bisher nicht erfüllt. Dies setzt die theoretischen Physiker in einige Verlegenheit und nötigt sie, sich bei ihrem Bemühen um Weiterentwicklung oder Abänderung des Standardmodells von theoretischen Prinzipien wie Einheitlichkeit, Widerspruchsfreiheit, „Natürlichkeit“, mathematischer Eleganz, und/oder auch von ästhetischen Erwägungen und Ansichten leiten zu lassen.

Hier setzt die Kritik der Frankfurter Physikerin Sabine Hossenfelder an, deren Buch „Das hässliche Universum“<sup>1</sup> für Aufsehen gesorgt hat. Ihre zentrale These besteht in der Behauptung, dass ästhetische Argumente bei der Suche nach erfolgreichen physikalischen Theorien in die Irre führten und dass, im Gegenteil, Mut zur Hässlichkeit zu fordern sei. Sie berichtet von Gesprächen mit führenden Theoretikern, die wie sie zumeist die gegenwärtige Entwicklung der Elementarteilchenphysik mit Skepsis sehen und ihrer Ansicht teils zustimmen, teils in mehr oder weniger konventioneller Weise die Schönheit der Naturgesetze preisen und sich von der Schönheit zeitgenössischer Ansätze wie Stringtheorie und Supersymmetrie beeindruckt zeigen.

Um sich bei der Prüfung der kritischen Thesen Hossenfelders nicht im Ungefähren zu verlieren, kann man zur Vertiefung mindestens zwei Fragestellungen nicht ausweichen:

- Was kann oder sollte man unter Schönheit, insbesondere unter der Schönheit einer physikalischen Theorie, verstehen?
- Welche Erkenntnis leitende Bedeutung kommt ästhetischen Betrachtungen zu? In anderen Worten: Was ist das Verhältnis von Schönheit und Wahrheit?

Unser weiteres Vorgehen wird das folgende sein:

Im nächsten Abschnitt werden wir in aller Kürze, aber hoffentlich hinreichend für unser Anliegen darlegen, was „Schönheit“ bedeuten könnte, insbesondere Schönheit einer physikalischen Theorie. Wir werden uns dabei besonders an Immanuel Kants Forderung des „interesselosen Wohlgefallens“ und an Schillers Definitionsversuch von Schönheit als „Freiheit in der Erscheinung“ orientieren.

---

<sup>1</sup> S. Hossenfelder: *Das hässliche Universum. Warum unsere Suche nach Schönheit die Physik in die Irre führt*, S. Fischer 2018; englisches Original: *Lost in Math. How Beauty Leads Physics Astray*, Hachette Book Group 2018

Anschließend werden wir untersuchen, inwieweit die wichtigsten bestehenden physikalischen Theorien wie Mechanik, Elektrodynamik, Relativitätstheorie und Quantentheorie diesen ästhetischen Kriterien genügen und in welchem Maße ästhetische Motive bei ihrer Aufstellung wirksam waren.

Darauf werden wir uns der zweiten soeben benannten Frage zuwenden und zu beschreiben versuchen, welche Rolle Ästhetik in der Erkenntnistätigkeit des Menschen spielt, wenn er sich Begriffe bildend und modellierend um Weltorientierung und Weltbeherrschung bemüht. Dann erst werden wir in der Lage sein, die zeitgenössische Elementarteilchenphysik einer genaueren Betrachtung zu unterziehen und die Berechtigung der Hossenfelderschen Thesen und Kritik zu prüfen.

Der Schlussabschnitt soll eine Zusammenfassung unserer Ergebnisse enthalten.

## 2. Ästhetik

Wenn Schönheit irgendeinen Erkenntniswert haben soll, dann kann das Urteil über die Schönheit eines Objektes nicht allein von Geschmack, Laune und Willkür eines Betrachters bestimmt sein. Es muss vielmehr ein Zusammenhang zwischen der Schönheit und wesentlichen Eigenschaften eines Objektes bestehen. Die Beschreibung dessen, was ein Objekt schön sein lässt, ist Gegenstand der *Objektästhetik*, der wir uns zunächst zuwenden werden. Damit ist nicht gesagt, dass die Reaktion eines Betrachters ohne Belang und Interesse wäre. Die Art seiner Reaktion ist sehr wohl einer Untersuchung wert und zugänglich und kann von seiner Sozialisierung, Empfänglichkeit und Gestimmtheit abhängen. Auch kann man die Wechselbeziehung zwischen einem schönen Objekt und seinem Betrachter einer ästhetischen Untersuchung unterziehen. Solche Probleme fallen in das Gebiet der *Wirkungsästhetik* und werden uns später beschäftigen.

Vorab sei noch eine weitere Unterscheidung erwähnt: Die *Naturschönheit* einer Landschaft oder einer Blume ist nicht ganz dasselbe wie die *Kunstschönheit* eines Bildnisses oder eines Musikstückes. Allerdings ist Kunstschönheit oft empfundener Naturschönheit auf der Spur, und mancher Gläubige wird in der Schönheit der Natur die Kunst ihres Schöpfers bewundern.

### 2.1 Objektästhetik

Ästhetik tritt als Bezeichnung einer eigenen philosophischen Disziplin erst überraschend spät, nämlich bei A.G. Baumgarten (1714-1762) auf. Eine grundlegende und bis heute maßgebliche Behandlung erfährt sie in Immanuel Kants Kritik der Urteilskraft.

Nach Kant unterscheidet sich das Schöne vom bloß Gefälligen und Angenehmen durch seine vom Betrachter losgelöste Autonomie. Es dient nicht direkt den Interessen und Vorlieben des Betrachters, sondern besteht in sich und weckt in ihm nur ein Gefühl „uninteressierten und freien Wohlgefallens“.

Die Schönheit eines Objektes ist eine innere und ganzheitliche Qualität. Ganzheitlich ist sie insofern, als sie nicht in den Teilen eines Objektes, sondern im Zusammenspiel seiner Teile gründet. Im Zusammenspiel entsteht, liegt und erscheint Vollkommenheit: Ein irgendwie geartetes inneres Anliegen erfüllt sich harmonisch und zwanglos in vollkommener, einfach erscheinender Gestalt. Zwanglosigkeit muss nicht die Abwesenheit innerer Spannungen, sondern kann auch deren gelungene Bändigung bedeuten. An der Wahrnehmung von Schönheit wird gewöhnlich Vernunft ihren wesentlichen Anteil haben, aber es ist nicht nötig und im Allgemeinen auch nicht der Fall, dass das zugrundeliegende Anliegen und seine Erfülltheit in vollem Maße durchsichtig werden. Dies bleibt eine Herausforderung an den Betrachter, und Schönheit ist gewöhnlich zumindest mit einem Rest an Rätselhaftigkeit verbunden. Wie gesagt, handelt es sich bei dem genannten Anliegen um einen inneren Zweck, der sich nicht nach den Bedürfnissen des Betrachters richtet. In Kants Worten geht es um „eine formale Zweckmäßigkeit, d.i. eine Zweckmäßigkeit ohne Zweck“.

Friedrich Schiller hat einen bedeutenden, auch von Kant ausdrücklich anerkannten Beitrag zur theoretischen Ästhetik geleistet. Sein Lebensthema war Freiheit, und Schönheit bedeutet nach Schiller ganz wesentlich „Freiheit in der Erscheinung“. Freiheit besteht hierbei nicht nur in der Wahl des inneren Anliegens oder Zweckes, sondern auch in der Art seiner Erfüllung, die ganz anders hätte ausfallen können, so wie sie ist aber den Stempel der Vollkommenheit trägt. Freiheit liegt auch in der erwähnten Zwanglosigkeit des Schönen, die zugleich so überzeugt, dass eine gelungene Versöhnung von Freiheit und Notwendigkeit aufscheint. In Schillers Worten:

Nicht der Masse qualvoll abgerungen,  
Schank und leicht, wie aus dem Nichts gesprungen  
Steht das Bild vor dem entzückten Blick.<sup>2</sup>

Wer mit der Quantentheorie vertraut ist, dem fällt auf, wie sehr das unerzwungene Miteinander der Elemente eines schönen Objektes im Rahmen eines gestalthaften Ganzen der nicht-kausalen Ordnung eines verschränkten Quantenzustandes ähnelt. Wir wollen dies an dieser Stelle nicht weiter ausführen.<sup>3</sup>

## 2.2 Wirkungsästhetik

Die Wirkungsästhetik untersucht die Beziehung eines ästhetischen Objektes mit seinem Betrachter. Insbesondere kann man das erweiterte System, das aus einem schönen Objekt und seinem Beobachter besteht, einer ästhetischen Analyse unterziehen. „Freiheit in der Erscheinung“ bedeutet hier auch Freiheit in der Beziehung zwischen Objekt und Betrachter, dem in Wahrnehmung, Reaktion und Deutung Spielraum zugestanden werden muss. Ein Element der Rätselhaftigkeit trägt zur Schönheit des Betrachteten bei. Abträglich ist andererseits alles, was berechnend, erzwingend oder propagandistisch auf den Betrachter einwirken möchte und damit auch die Kantsche Forderung nach interesselosem Wohlgefallen verletzt. Damit ist nicht gesagt, dass Schönes keine Gemütsregung bewirken dürfte, aber diese darf nicht von der Art eines manipulativ mechanischen Kitzels sein, sondern muss dem Betrachter selbst in vollem Maße zuzurechnen sein.

Ein ästhetisches Erlebnis ist oft mit einer Empfindung von *Erhabenheit* verbunden, wenn auch keineswegs mit diesem identisch. Erhabenheit ist ein zentraler Begriff in Kants Kritik der Urteilskraft. Ein Gefühl der Erhabenheit weckt der Anblick des Sternhimmels, die Betrachtung des kategorischen Imperativs oder das Hören großer Musik, aber wohl auch das Wirken von Naturgewalten. Es ist ein Gefühl der Ergriffenheit, ja Überwältigung durch Begegnung mit einer Sphäre, die über den Menschen weit hinausgeht und sich nicht nur seiner Kontrolle entzieht, sondern auch sein Verstehen und Wünschen klein erscheinen lässt. Die Reaktion auf Erhabenheit ist Staunen, Verehrung, aber auch Scheu, Überwältigung und Erschrecken. Ein Element von Erhabenheit liegt bereits in der Losgelöstheit eines schönen Objektes von den Bedürfnissen des Betrachters. Das Gefühl der Erhabenheit des Schönen kann in Furcht und Erschrecken übergehen beim Blick auf eine Welt, die so ganz und gar nicht für den Menschen gemacht erscheint. Dies spricht Rilke wunderbar mit den Worten aus<sup>4</sup>:

Denn das Schöne ist nichts als des Schrecklichen Anfang, den wir noch grade ertragen,  
und wir bewundern es so, weil es gelassen verschmäh't, uns zu zerstören.

## 2.3 Schönheit physikalischer Theorien

Wenn wir von physikalischen Theorien sprechen, dann verwenden wir das Wort „Theorie“ nicht im umgangssprachlichen Sinne als „Hypothese“ im Gegensatz zu sicherer Erkenntnis. Die spezielle Relativitätstheorie z. B. ist längst keine Hypothese mehr. „Physikalische Theorie“ meint eine

---

<sup>2</sup> F. Schiller: *Das Ideal und das Leben*

<sup>3</sup> Im Rahmen einer „Verallgemeinerten Quantentheorie“ ist dieser Gedanke ausführlicher in anderen Arbeiten des Autors entwickelt, z. B. H. Römer: *Verschränkung*, in M.Knaup, T.Müller, P. Spät Hrsg: *Post-Physikalismus*, Verlag Karl Alber, (Freiburg /München) 2011, ISBN 978-495-48464-7 sowie H. Römer: *Schöpfermacht und Unverfügbarkeit*, in H. Kick, Th. Sundermeier Hrsg.: *Gewalt und Macht, Psychotherapie, Gesellschaft und Kunst*, Reihe *Affekt, Emotion, Ethik*, Bd 13, S. 61-80, Lit Verlag, Münster 2014

<sup>4</sup> R. M. Rilke: *Erste Duineser Elegie*

wohldefinierte Struktur mit klaren Schlussregeln, wie sie auch in mathematischen Theorien gegeben ist, unabhängig davon, ob sie die physikalische Realität richtig beschreibt oder nicht.

Physikalische Theorien sind gewöhnlich abstrakt, also in Begrifflichkeit und Aufbau weit von dem entfernt, was uns in unserer materiellen Welt der Steine und Bäume unmittelbar anschaulich gegeben ist, und zudem in mathematischer Sprache formuliert. Daher ist ihre immer wieder gepriesene Schönheit nicht sofort und ohne Vorbildung zugänglich. Sie ähnelt der Schönheit mathematischer Objekte, die oft als verwandt zur ebenfalls abstrakten musikalischen Schönheit empfunden wird. In der Tat treten mathematische und musikalische Begabung nicht selten zusammen auf.

Ob die Schönheit physikalischer Theorien als Naturschönheit oder Kunstschönheit anzusehen ist, hängt davon ab, ob man sie eher als gefunden oder als erfunden betrachtet. Sollte man den kreativen Physiker eher als Entdecker oder als Künstler verstehen? An anderer Stelle<sup>5</sup> haben wir unter Berufung auf eine quantentheoretisch inspirierte Ontologie eine vermittelnde Position vorgeschlagen. Im vierten Abschnitt wird noch einiges zum ontologischen Status physikalischer Theorien zu sagen sein.

Die Schönheitskriterien von Kant und Schiller sind auf physikalische Theorien mühelos anwendbar.

Das „Wohlgefallen“ an einer physikalischen Theorie kann nur als „interesselos“ bezeichnet werden, da überdeutlich ist, dass die Naturgesetze nicht für den Menschen gemacht sind, auch wenn sie unter seiner Mitwirkung ausformuliert wurden. Dass Naturgesetze in ihrer technischen Anwendung auch nützlich sein können, steht auf einem anderen Blatt.

Auch die „Zweckmäßigkeit ohne Zweck“ ist ohne weiteres gegeben. Das Anliegen einer physikalischen Theorie ist offensichtlicher als bei den meisten anderen ästhetischen Objekten. Es geht um Beschreibung und Verständnis eines gewissen Bereiches der materiellen Natur. Dieses Anliegen ist umso besser und schöner erfüllt, je umfangreicher dieser Bereich ist und je klarer und vollständiger sein Verständnis. Eine umfassende Theorie ist also tendenziell schöner als eine Theorie mit sehr eingeschränktem Anwendungsbereich. Ein klares und vollständiges Verständnis sollte sich ökonomisch aus möglichst wenigen und möglichst übersichtlichen und folgenreichen Prinzipien und Voraussetzungen ergeben.

Hiermit ist auch schon die „Freiheit in der Erscheinung“ angesprochen. Eine Menge physikalischer Daten legt noch nicht die Form ihrer Beschreibung nahe. Eine riesige Tabelle möglichst vielfältiger Messdaten wäre nicht schön, da sie vollständig von den Daten erzwungen wäre und wenig zu ihrem Verständnis beitrüge. Freiheit in der Erscheinung liegt vor, wenn aus der Vielzahl der möglichen Beschreibungen und Deutungen wie von selbst eine hervorspringt, die sich von den Einzelheiten unzähliger Daten löst und überzeugend und scheinbar mühelos Ordnung und Verständnis stiftet. Dann stellt sich der Eindruck der Einfachheit ein, die, wie gesagt, der Schönheit verwandt ist. Die Zwanglosigkeit, die in der „Freiheit in der Erscheinung“ einer physikalischen Theorie liegt, wird oft auch als *Eleganz* wahrgenommen. Ein umfassendes Verständnis, das von einer Theorie vermittelt wird, führt oft zu ganz unerwarteten Einsichten. In diesem Sinne spricht man auch von der *Tiefe* schöner Theorien, die unlösbar mit dem der Schönheit eigenen Zug der Rätselhaftigkeit verbunden ist.

Durch ihre menschenferne Unverfügbarkeit und ihre Erklärungsmacht, die in der Weite ihres Anwendungsbereiches und in der Tiefe und Vollständigkeit des vermittelten Verständnisses begründet ist, wecken grundlegende physikalische Theorien auch das Empfinden von Erhabenheit mit allem, was sich daraus ergibt.

---

<sup>5</sup> H. Römer, G.E. Jacobi: *Schöpfer, Schöpfung, Schöpfertum*, Zeitschrift für Parapsychologie und Grenzgebiete der Psychologie, Jahrgang 50 (2017), 68-98;

Zum Abschluss dieses Abschnittes wollen wir in auf die beiden Begriffe *Kontingenz* und *Anschaulichkeit* eingehen, die im Zusammenhang mit physikalischen Theorien oft auftauchen.

Kontingenz, im Gegensatz zu notwendig, sind im Rahmen einer Theorie alle Züge in ihrem Anwendungsbereich, die von ihr nicht erklärt werden. In physikalischen Theorien tritt Kontingenz in den Grundgesetzen oft in der Form von *Naturkonstanten* auf, deren Größe nicht von der Theorie bestimmt ist, sondern der Erfahrung entnommen werden muss. Beispielsweise wird die Gravitationskonstante, also die genaue Stärke der Schwerkraft, weder von der Newtonschen Gravitationstheorie noch von einer anderen bekannten physikalischen Theorie vorhergesagt. Solche Kontingenz bedeutet Einschränkung der Reichweite einer Theorie und wird mit einigem Bedauern als Beeinträchtigung ihrer Schönheit angesehen. Die historische Entwicklung der Physik zeigt eine Verminderung von Kontingenz. So sind Hunderte von Größen wie Reibungskonstanten, Zähigkeit, Elastizitätskonstanten und elektrische Leitfähigkeit, die früher sämtlich als elementare Naturkonstanten galten, heute mit Hilfe von wenigen verbliebenen Naturkonstanten berechenbar. Kontingenz in den physikalischen Gesetzen darf sicher nicht überhandnehmen, aber es sieht nach heutigem Wissen so aus, als ob ein geringer Rest von Kontingenz naturgegeben und unvermeidbar wäre.

Naturkonstanten sind, wie gesagt, kontingente Elemente in den Grundgesetzen physikalischer Theorien. Bei den Anwendungen der Theorien auf konkrete physikalische Situationen tritt natürlich Kontingenz in hohem Maße auf, die den Besonderheiten der Situationen Rechnung trägt. Diese Kontingenz ist keineswegs als störend und unschön anzusehen, sondern im Gegenteil als Beweis der großen Reichweite und Erklärungsmacht der Theorien in der Vielfalt ihrer möglichen Anwendungen. Wenn etwa die Newtonsche Gravitationstheorie auf das Sonnensystem angewendet wird, dann sind die Massen der Sonne und der Planeten natürlich nicht durch die Theorie vorgegeben, sondern müssen der Erfahrung entnommen werden. Die Newtonsche Theorie erlaubt die Bestimmung der Orte und Geschwindigkeiten aller Teile des Sonnensystems zu allen beliebigen Zeiten, wenn diese Daten zu einem einzigen Zeitpunkt bekannt sind. Diese so genannten *Anfangsbedingungen* sind kontingent, also nicht durch die Theorie, sondern durch die konkrete Situation ihrer Anwendung bestimmt. Allgemein wünscht man sich für physikalische Theorien wenig Kontingenz in den Grundgesetzen und viel Kontingenz in der Vielfalt der Anwendungen.

Physikalische Theorien sind, da die Naturgesetze nicht für uns gemacht sind, wegen ihrer Abstraktheit, wie erwähnt, nicht unmittelbar anschaulich. Dabei liegt die Newtonsche Mechanik der gewöhnlichen Anschauung, wohl auch durch dreihundertjährige Gewöhnung, näher als die Elektrodynamik und diese wieder näher als die Relativitätstheorie oder gar die Quantentheorie. Unanschaulichkeit wird oft, gerade von Laien, als Defekt, ja sogar als Mangel an Schönheit angesehen. Die Forderung nach Anschaulichkeit im Namen eines „gesunden Menschenverstandes“ wird nicht selten in aggressiver Weise vertreten. Im Gegensatz zur Newtonschen Mechanik, die als einigermaßen anschaulich und ehrlich akzeptiert wird, werden Relativitätstheorie und Quantentheorie als abstrakte Verstiegenheit und entfremdetes Blendwerk geschmäht. Deutlich kommt hierbei ein starkes antiintellektuelles Ressentiment zum Ausdruck. Zu bedenken ist aber, dass mit dem aufdringlichen Ruf nach Anschaulichkeit in der Sprechweise Kants die Forderung nach interesselosem Wohlgefallen missachtet und das Gefällige dem Schönen vorgezogen wird. Das zeigt sich auch in den Theorieansätzen, die als Alternativen zu Relativitätstheorie und Quantentheorie im Namen der Anschaulichkeit vorgeschlagen wurden und werden. Sie sind gewöhnlich zurechtgebogen statt zwanglos, primitiv verschoben, grobschlächtig und simplizistisch statt einfach, schwerfällig bemüht statt elegant. Hinzu kommt, dass sie meist falsch sind, also einer genaueren experimentellen Prüfung nicht standhalten.

Zu beachten ist zudem, dass Anschaulichkeit auch eine Frage von Gewohnheit ist, und sich im Laufe der persönlichen Entwicklung und der Kulturgeschichte allmählich einstellen kann. Für mich persönlich darf ich behaupten, dass mein Zugang zu Relativitätstheorie und Quantentheorie seit langen von Vertrautheit, ja Liebe und Bewunderung gekennzeichnet ist.

### 3. Fallstudien

Wir wollen uns in diesem Absatz an einigen Beispielen vor Augen stellen, wie die Schönheit ausgesuchter Theorien zu beurteilen ist, und welche Bedeutung ästhetische Gesichtspunkte bei ihrer Aufstellung gehabt haben. Wir beginnen mit den grundlegenden etablierten physikalischen Theorien. Es liegt auf der Hand, dass wir inhaltliche Vertrautheit nicht voraussetzen und an dieser Stelle auch unmöglich schaffen können. Zum Glück ist eine solche für unsere ästhetische Fragestellung auch nicht unerlässlich.

#### Newtonsche Mechanik und Gravitationstheorie

Die Newtonsche Mechanik kann man als eine Theorie der Bewegung von *Punktteilchen* auffassen, also von Körpern, deren genaue Gestalt und Ausdehnung im gegebenen Zusammenhang unerheblich ist. Ihre Grundbegriffe sind Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Masse und Kraft. Andere mechanische Begriffe wie Impuls, Drehimpuls oder mechanische Energie lassen sich auf diese Grundbegriffe zurückführen. Aus drei einfachen Axiomen, an die sich viele vielleicht aus ihrer Schulzeit erinnern werden (Trägheitsprinzip, „Kraft gleich Masse mal Beschleunigung“, „*actio* gleich *reactio*“) ergibt sich zwanglos das gesamte Gebäude der Newtonschen Mechanik, mit der man die Bewegung materieller Körper verstehen und berechnen kann. (Körper mit größerer Ausdehnung kann man sich aus Punktteilchen zusammengesetzt denken.) Das Newtonsche Gravitationsgesetz besagt, dass die Schwerkraft, mit der sich zwei Punktteilchen anziehen, proportional zu jeder der beiden Massen ist und mit dem Quadrat ihres Abstandes abnimmt. Zusammen mit dem Newtonschen Gravitationsgesetz führt die Newtonsche Mechanik zu der überwältigenden Einsicht, dass das Fallen eines Apfels und die Bewegung des Mondes und aller Planeten dieselbe Ursache haben und sich mit einer einzigen einfachen Theorie in Einzelheiten berechnen lassen. Newtons Mechanik und Gravitationstheorie ist wohl der größte einzelne Erfolg der Naturwissenschaften. Sie ist mit ganz geringen Abweichungen, die sich erst für extrem schnelle Bewegungen in der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit und für extrem starke Gravitationsfelder bemerkbar machen und durch die Relativitätstheorien erfasst werden, für alle Zeit gültig. In der überraschenden Einfachheit und Übersichtlichkeit ihres Ansatzes und in der gewaltigen Fülle der Erscheinungen, die durch sie erfasst werden, erschien sie bereits den zeitgenössischen Betrachtern kaum noch als Menschenwerk. In Alexander Popes Entwurf einer Grabinschrift für Newton wird sie geradezu in den Rang einer zweiten Schöpfung erhoben:

Nature and Nature's Laws lay hid in Night  
God said: Let Newton be and all was Light.

Was wir als Kennzeichen schöner Theorien aufgezeigt haben, ist jedenfalls in höchstem Maße erfüllt.

Die volle Tiefe der Newtonschen Theorie zeigte sich umso mehr, je weiter man ihr im Laufe der Weiterentwicklung der Physik auf den Grund ging.

Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) gab ihr die bis heute gültige wunderbar elegante Form, die darauf basiert, dass sich die Newtonsche Mechanik aus einem Prinzip minimaler Wirkung herleiten lässt. Dieses „*Lagrangesche Prinzip*“ hat sich auch für andere Bereiche der Physik, etwa für die Feldtheorie als grundlegend und fruchtbar erwiesen und ist mehr und mehr zu einer Leitvorstellung der theoretischen Physik geworden.

Die Erhaltung der mechanischen Energie war ein Ausgangspunkt für die Entdeckung des universellen Prinzips der Energieerhaltung. Es dauerte bis zum Jahre 1918, bis die Mathematikerin Emmy Noether (1882-1935) den tiefen Zusammenhang von Symmetrien und Erhaltungssätzen

erkannte, der aus dem Lagrangeschen Prinzip folgt. Die Erhaltung der Energie erweist sich als Folge der Zeitunabhängigkeit physikalischer Gesetze, die keine Bevorzugung irgendeines Zeitpunktes enthalten. Ebenso folgt die Erhaltung des Impulses aus der Gleichwertigkeit aller Raumpunkte und die Erhaltung des Drehimpulses aus der Gleichwertigkeit aller Richtungen im Raum. „*Noethersches Theorem*“ und Symmetriebetrachtungen sind bis heute eines der mächtigsten Hilfsmittel der theoretischen Physik bei der Aufstellung und Analyse ihrer Theorien.

### **Maxwellsche Elektrodynamik**

Punktteilchen sind räumlich konzentrierte Entitäten. Elektrische und magnetische *Felder* sind über den ganzen Raum ausgedehnt. Die Vorstellung, dass solche Felder und nicht nur Punktteilchen ihren legitimen Platz als materielle physikalische Objekte hätten, konnte sich, gerade unter dem Bann der Newtonschen Mechanik, nur langsam durchsetzen. Bahnbrecher waren Hans Christian Oersted (1777-1851) und Michael Faraday (1791-1867) die beide unter dem Einfluss der romantischen Naturphilosophie des deutschen Idealismus standen. Oersted fand ein Magnetfeld in der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters und Faraday entdeckte, dass ein zeitlich veränderliches Magnetfeld eine elektrische Spannung in einer Leiterschleife hervorruft. In beiden Fällen war also ein Zusammenhang von elektrischen und magnetischen Erscheinungen gegeben, die bisher als getrennte Phänomenbereiche gegolten hatten. Aufbauend auf Faradays Vorarbeiten postulierte James Clark Maxwell (1831-1879), dass auch ein veränderliches elektrisches Feld ein Magnetfeld erzeugen müsste, und gelangte 1864 zur Formulierung der nach ihm benannten *Maxwellschen Gleichungen* der Elektrodynamik. Aus ihnen folgte insbesondere, dass es elektromagnetische Wellen geben müsste, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit sich berechnen ließ und überraschend genau mit der Lichtgeschwindigkeit übereinstimmte. Hiermit eröffnete sich die wahrhaft atemberaubende Perspektive, dass nicht nur die Elektrizität und der Magnetismus, sondern auch noch die Optik in einer einzigen physikalischen Theorie vereinigt wären.

Wie die Newtonsche Mechanik offenbarte auch die Maxwellsche Theorie in ihrer weiteren theoretischen Durchdringung mehr und mehr von ihrer vollen Tiefe und Schönheit. In ihrer ursprünglichen Form waren die Maxwellschen Gleichungen recht unübersichtlich und zudem in ihrer Gültigkeit nicht unumstritten. Erst Heinrich Hertz (1857-1894) gelang im Jahre 1886 der Nachweis elektromagnetischer Wellen mit den von Maxwell vorausgesagten Eigenschaften. Zudem goss er die Maxwellschen Gleichungen in die im Wesentlichen bis heute gültige einfache und elegante mathematische Form, die Ludwig Boltzmann in den Faustschen Ausruf „War es ein Gott, der diese Zeilen schrieb?“ ausbrechen ließ. Einstein sah im Jahre 1905, dass die Maxwellschen Gleichungen bereits ohne Änderung die *Lorentz-Invarianz* der Speziellen Relativitätstheorie aufweisen. In der Tat sind sie in relativistischer Formulierung erst ganz bei sich selbst und nehmen eine noch schönere und einfachere Gestalt an. Es zeigte sich später, dass auch die Maxwellschen Gleichungen aus einem Lagrangeschen Prinzip minimaler Wirkung folgen. Noch bedeutsamer ist, dass sie sich direkt aus einer Symmetrieeigenschaft ergeben, die man als *Eichinvarianz* bezeichnet und als das eigentliche Geheimnis der Elektrodynamik ansehen sollte. Die Erhaltung der elektrischen Ladung ist eine Folge der Eichinvarianz. In verallgemeinerter Form haben Eichtheorien als Kandidaten fundamentaler Feldtheorien heute eine nahezu monopolartige Bedeutung. Das bereits erwähnte Standardmodell der Elementarteilchenphysik ist eine Eichtheorie, und auch die Allgemeine Relativitätstheorie erweist sich in einem recht verstandenen Sinne als Eichtheorie.

### **Spezielle Relativitätstheorie**

Die Spezielle Relativitätstheorie wurde von Einstein im Jahre 1905 aufgestellt. Sie entspringt zwanglos aus dem einfachen aber kühnen Leitgedanken der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes ist unabhängig von der Geschwindigkeit der Quelle und des Beobachters. Dies führt zur Folgerung der Invarianz physikalischer Gesetze unter den so genannten *Lorentz-Transformationen*. Die Maxwellsche Theorie weist, wie gesagt, die Lorentzinvarianz von vornherein auf, während für die die Newtonsche Mechanik eine Änderung der

Ausdrücke für kinetische Energie und Impuls erzwungen wird, die sich aber erst bemerkbar macht, wenn die Geschwindigkeit in die Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit kommt. Die berühmte Formel

$$E = mc^2,$$

ebenfalls schon 1905 von Einstein aufgestellt, folgt aus der Lorentz-Invarianz: Energie ist stets mit Masse verbunden. In der kovarianten Formulierung durch Hermann Minkowski zeigte die Spezielle Relativitätstheorie schon bald auch in ihrer mathematischen Gestalt ihre volle Schönheit und Eleganz.

Für alle fundamentalen physikalischen Theorien ist Lorentz-Invarianz heute eine selbstverständliche und unabdingbare Forderung. Erwähnt sei, dass der Wert der Lichtgeschwindigkeit  $c$  nicht aus der Speziellen oder Allgemeinen Relativitätstheorie folgt, sondern als fundamentale Naturkonstante anzusehen ist.

### **Allgemeine Relativitätstheorie**

Die Allgemeine Relativitätstheorie entstand aus dem Bestreben, die Newtonsche Gravitationstheorie mit der Relativitätstheorie verträglich zu machen. Das erwies sich als unerwartet schwierig und gelang Einstein erst in zehnjähriger angestrenzter Arbeit. Als fruchtbares Leitprinzip erwies sich die in der Newtonschen Gravitationstheorie nicht erklärte, sondern postulierte *Gleichheit von träger und schwerer Masse*. Einstein bezeichnete es als einen der glücklichsten Gedanken seines Lebens, sie ins Zentrum seiner Überlegungen zu stellen. Eine seltsame Rolle spielte *das Prinzip der allgemeinen Kovarianz*, das trotz unscharfer Formulierung bei der Aufstellung der Allgemeinen Relativitätstheorie Pate gestanden hat. Die Allgemeine Relativitätstheorie zeitigte frühe Erfolge mit der Erklärung der Periheldrehung des Merkur, einer kleinen Abweichung von der Newtonschen Mechanik, und besonders mit der Bestätigung der vorausgesagten Ablenkung von Licht durch die Schwerkraft der Sonne, die bei einer totalen Sonnenfinsternis im Jahre 1919 möglich wurde.

Nach einigem Hin und Her wurde immer mehr die ganze Schönheit der Allgemeinen Relativitätstheorie als einer mathematisch eleganten und tiefsinnigen geometrischen Theorie offenbar, in der Raum und Zeit nicht mehr nur die Bühne des physikalischen Geschehens sind, sondern sich als Mitspieler einmischen. Ihre Tragweite übertraf weit die anfangs in sie gesetzten Erwartungen. Sie erklärte nicht nur im Detail die Dynamik des Sonnensystems, sondern erwies sich auch als erfolgreich in der Kosmologie, also der Theorie über Aufbau und Geschichte des Universums im Ganzen. Zunächst nicht wirklich für zuverlässig gehaltenen Vorhersagen wie die Existenz schwarzer Löcher und das Auftreten von Gravitationswellen wurden glänzend bestätigt. Manche halten die Allgemeine Relativitätstheorie für die schönste aller physikalischen Theorien. Leider ist sie wegen ihrer zwar kristallklaren aber subtilen mathematischen Struktur für den Laien besonders schwer zugänglich. Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie sind tausendfach bestätigt, und gibt kein einziges experimentelles Resultat, das im Widerspruch zu einer von ihnen stünde. Das Satellitennavigationssystem GPS berücksichtigt routinemäßig die Gesetze der Relativitätstheorien, um aus der Ankunftszeit von Satellitensignalen die Position des Beobachters zu bestimmen. Ohne Relativitätstheorie würde sich ein Fehler von vielen Kilometern ergeben.

### **Quantentheorie**

Im Vergleich zu den bisher beschriebenen Geschichten war der Weg zur Quantentheorie windungsreich und verworren. Wenn man bedenkt, dass an ihrem Anfang kein klarer Leitgedanke stand, und wie radikal sich das Bild, das sich die Quantentheorie von der physikalischen Realität macht, von dem der Klassischen Physik unterscheidet, dann grenzt es an ein Wunder, dass die sich letztlich ergebende wunderbar einfache und elegante Struktur der Quantenphysik überhaupt gefunden werden konnte. Es ging zunächst um das Verständnis der Spektrallinien des von Atomen abgestrahlten Lichtes. Klar war, dass das Atom ein mechanisches System von negativ geladenen punktförmigen Elektronen war, die von einem positiv geladenen, ebenfalls punktförmigen Kern elektrisch angezogen wurden. *Quantenmechanik* entsprang aus zwei Wurzeln: Unter dem Einfluss des Bohrschen Atommodells entwickelte Werner Heisenberg (1901-1976) eine *Matrizenmechanik*

der Atome, indem er die Zahlgrößen, die Orte, Impulse oder Energien der Elektronen im Atom in der Newtonschen Mechanik beschreiben, durch andere mathematische Objekte, sog Matrizen ersetzte. Wenig später stellte Erwin Schrödinger (1887-1961), angeregt durch das Verhältnis von Wellenoptik zu Strahlenoptik, eine Wellengleichung auf, die später so genannte *Schödingergleichung*, so dass die zu den Wellen gehörigen Strahlen den klassischen Bahnen der Elektronen im Atom entsprachen. Schrödingers ursprüngliche physikalische Deutung der Elektronenwelle erwies sich allerdings als unhaltbar, und erst Max Born (1882-1970) fand die richtige Interpretation. Der wunderbare Formalismus der Quantentheorie erwuchs aus der Erkenntnis, dass die Schrödingergleichung in Bornscher Interpretation und die Heisenbergsche Matrizenmechanik dieselbe Theorie in verschiedenen Gewändern darstellten. Weit über ihren ursprünglich beabsichtigten Anwendungsbereich hinaus hat sich die Quantentheorie in jeder Hinsicht als universelle Theorie auch dort bestätigt, wo ihre Aussagen zunächst bizarr erschienen. Ihre Gültigkeit reicht von makroskopischen Systemen bis zum Bruchteil von einem Millionstel eines Atomdurchmessers. Sie ist millionenfach, auch durch technische Anwendungen, bestätigt. Kein experimentelles Resultat widerspricht ihr, und Grenzen ihrer Anwendbarkeit sind nicht in Sicht.

Die *Quantenmechanik*, die die Physik der Atome beschreibt, ist die Quantentheorie, die zu einem System der Newtonschen Mechanik gehört. Inzwischen kann man auch feldartige physikalische Systeme „quantisieren“ und zu *Quantenfeldtheorien* gelangen. Das begann mit der *Quantenelektrodynamik*, der Quantenversion der Maxwellschen Gleichungen. Interessanterweise treten bei der Quantisierung von Feldtheorien punktartige Teilchen als *Feldquanten* notwendig und automatisch auf. In diesem Sinne erweisen sich Felder als fundamentaler als Teilchen. Die Schwierigkeit, die sich der Quantisierung der Maxwellschen Theorie in den Weg stellte, bestand darin, dass die Berechnung physikalischer Größen zunächst zu unendlichen Zahlenwerten führte. Die Zähmung dieser Unendlichkeiten in der so genannten *Renormierungstheorie* gelang erst allmählich in der Zeit ungefähr zwischen 1930 und 1950. Sie ist technisch so kompliziert und nach allgemeinem Urteil ad hoc, dass man den Eindruck hat, hier sei noch nicht das letzte Wort gesprochen, sondern nur eine Art von Waffenstillstand nach hartem Kampf erreicht. Dennoch ist die Quantenelektrodynamik die experimentell am genauesten bestätigte physikalische Theorie. Heute weiß man, dass sich das *Renormierungsverfahren* auf eine große Klasse von Feldtheorien anwenden lässt, zu denen die Eichtheorien des Standardmodells gehören. Leider widersetzt sich die Allgemeine Relativitätstheorie hartnäckig einer renormierungstheoretischen Quantisierung, geradezu als ob die konträren Genies Bohr und Einstein ihren Kampf miteinander immer noch fortsetzten. Im fünften Kapitel wird mehr dazu zu sagen sein.

### **Schönheit als Leitprinzip physikalischer Theorien?**

Aus den soeben beschriebenen Beispielen ersehen wir, dass Ästhetik für die Aufstellung der fundamentalen etablierten Theorien der Physik nicht im Vordergrund stand, sondern, mit Ausnahme der Quantentheorie, jeweils ein erahntes physikalisches Leitprinzip. Die volle unbestreitbare Schönheit dieser Theorien ergab sich erst bei ihrer weiteren gedanklichen Durchdringung, gewissermaßen als Prämie und als Ausweis ihrer Tiefe. Dass ihre Schönheit mit Erhabenheit verbunden ist, bedarf nach dem Gesagten wohl keiner weiteren Begründung.

Außer den genannten fundamentalen Theorien gibt es speziellere physikalische Theorien wie Festkörpertheorie oder Hydrodynamik, die durch Anwendung der fundamentalen Theorien auf speziellere Klassen physikalischer Systeme entstehen. Da ihr Anwendungsbereich kleiner ist und seine eigenen Kontingenzen mit sich bringt, wird ihnen gewöhnlich weniger Schönheit und Erhabenheit beigemessen. Sie haben aber oft ihren eigenen Reiz durch Eleganz, Effizienz und Originalität in Begriffsbildung, Grundannahmen und Deduktionen. Das gilt zum Beispiel in hohem Maße für die Theorien der Supraleitung und Suprafluidität. In der Tendenz nimmt aber die Schönheit einer Theorie mit dem Grad der Spezialisierung ihres Anwendungsbereiches ab. Um ein Extrem zu nennen: Ein kompliziertes Klimamodell, das durch enge Anpassung an eine große Menge von Wetterdaten entsteht und Vorhersagen erstellt, wird man sicher als wichtig und nützlich, aber wohl kaum als schön bezeichnen.

## Mathematische Schönheit

Die Schönheit und Erhabenheit mathematischer und physikalischer Theorie sind einander ähnlich. Unterschiede bestehen im Wirklichkeitsbezug, der für die Physik auf der Hand liegt, für die Mathematik aber problematischer ist. Immerhin gehen die meisten Mathematiker mindestens in ihrer Einstellung davon aus, dass mathematische Strukturen nicht bloße Erfindungen der menschlichen Phantasie sind, sondern irgendwie zum Bestand der Welt gehören.<sup>6</sup> Das Ideal der Physik, wie es die Elementarteilchenphysik anstrebt, ist eine alle anderen physikalischen Theorien umfassende Universaltheorie. Ein solcher Ehrgeiz ist der Mathematik fremd. Ihr Bau ist nicht hierarchisch gestuft, sondern gleicht eher einem Netzwerk mit vielen Knoten und Verbindungen. Topologie, Analysis und Zahlentheorie, um ein Beispiel zu nennen, stehen gleichberechtigt nebeneinander, ohne einer höheren Ebene untergeordnet zu sein.

## Schönheit anderer Theorien

Schönheit wird auch vielen Theoriebildungen außerhalb von Physik und Mathematik zugeschrieben. Als ein Beispiel sei an verschiedene Theorien der Nationalökonomie oder an den dialektischen oder historischen Materialismus von Karl Marx erinnert. Ihre Bewunderer müssen sich dabei jedenfalls fragen: Wie steht es um die Interessellosigkeit ihres Wohlgefallens? Wie steht es um die Freiheit der Erscheinung? Und damit verbunden: Wie ungezwungen, plausibel und folgenreich sind ihre Grundannahmen? Wie schlüssig sind ihre Deduktionen und wie unbestreitbar deren Ergebnisse?

Ein interessanter Fall ist die Darwinsche Evolutionstheorie. Sie ist in ihren Grundannahmen einfach und elegant, sie ist fruchtbar, folgenreich und vielfach bewährt in einem weiten und vielfältigen Anwendungsbereich. Ihre Tiefe äußert sich in vielen überraschenden Einsichten und sie orientiert sich nicht an menschlichen Interessen. In diesem Sinne sollte man sie als schön und auch als erhaben bezeichnen. Dass dies nicht immer in demselben Maße wie bei physikalischen oder mathematischen Theorien geschieht, könnte an zwei Gründen liegen: Erstens spielt Kontingenz bereits in ihren Grundannahmen eine entscheidende Rolle. Zweitens sind ihre Vertreter, übrigens im Gegensatz zu Darwin selbst, aus einer materialistischen und antimetaphysischen Grundeinstellung heraus oft weniger zu Bewunderung und Verehrung geneigt.

An dieser Stelle seien einige Bemerkungen zur Schönheit parapsychologischer Theorien erlaubt. Die Parapsychologie, oft auch als „Anomalistik“ bezeichnet, befasst sich mit Erscheinungen wie Telepathie, Hellsehen, Präkognition und Telekinese, für die es im akzeptierten naturwissenschaftlichen Denkraum keine Erklärung gibt<sup>7</sup>. Ein großer Teil ihrer Aktivität besteht im zunächst theoriefreien Sammeln und Dokumentieren möglicher paranormaler Ereignisse. Hinzu kommen, gewöhnlich schon theoriegeleitete gezielte Experimente und Beobachtungen. Von einem Konsens auf einen allgemein anerkannten theoretischen Rahmen ist die Parapsychologie weit entfernt. Es besteht vielmehr eine Vielfalt theoretischer Ansätze, die sich meist um die Identifizierung eines kausalen Einwirkungsmechanismus zur Erklärung paranormaler Erscheinungen bemühen. Eine wesentliche Schwierigkeit liegt hierbei darin, dass nach allen Erfahrungen anomalistische Phänomene zu einer koboldartigen Flüchtigkeit neigen, durch die sie sich ihrer verlässlichen Beobachtung oder Erzeugung zu entziehen scheinen. Die angebotenen Theorieansätze zur kausalen Erklärung verfehlen meist alle bisher aufgezeigten Schönheitskriterien. Sie sind gewöhnlich entweder ad hoc auf gewisse Phänomene hin zugeschnitten oder aber so allgemein und vage, dass ihre Erklärungsleistung eher als gering bezeichnet werden muss. Einfachheit und Klarheit als Ausweis theoretischer Schönheit sucht man meist vergebens. Einen Eindruck vermittelt dem interessierten Leser vielleicht die Diskussion um ein seriöses, aufwendiges, langjährig vom Pentagon finanziertes schließlich aber aufgegebenes Projekt, die in einem Themenheft der Zeitschrift für

---

<sup>6</sup> Weiteres dazu bei H. Römer: *Symmetry and Contextuality*, Beitrag zum Workshop *Symmetry and Seriality*, Freiburg Institute of Advanced Studies, FRIAS, May 2016, im Erscheinen; <http://arxiv.org/abs/1802.06557>

<sup>7</sup> Eine Übersicht über den Forschungsstand gibt G. Mayer, M. Schetsche, I. Schmied-Knittel, D. Vaitl Hrsg.: „An den Grenzen der Erkenntnis. Handbuch der wissenschaftlichen Anomalistik“, Schattauer, Stuttgart 2015

Anomalistik wiedergegeben ist<sup>8</sup>. Bei manchen parapsychologischen Theorieansätzen verschwimmen die Grenzen zur Esoterik. Schlimm sind in meinen Augen auch Erklärungsversuche mit Hilfe obskurer angeblich einer „neuen Physik“ zugehöriger physikalischer Wirkmechanismen: Physikalismus mit schlechter und i. A. falscher Physik.

Angesichts der frustrierenden Fehlschläge, paranormale Phänomene durch den Aufweis kausaler Einwirkungsmechanismen dingfest und kontrollierbar zu machen, ist es eine befreiende Botschaft, dass solche Mechanismen für das Verständnis von Paranormalem nicht unentbehrlich sind. Die von C.G. Jung und W. Pauli<sup>9</sup> angeregte Vorstellung der „Synchronizität“ deutet paranormale Phänomene nicht als Resultate kausaler Einwirkungen im Sinne einer „causa efficiens“, sondern als „sinnvolle Zufälle“. Sie sind zufällig, insofern sie keiner Wirkursache entspringen und sinnvoll, insofern sie in ein konstellatives Muster von Sinn und Bedeutung passen. Die Synchronizitätsvorstellung nimmt zur Kenntnis, dass solche Muster in ihrem Erklärungswert kausalen Ordnungsstrukturen ebenbürtig sein können. Die synchronistische Leitvorstellung kann schärfer gefasst und zu einer Theorie paranormaler Phänomene ausgebaut werden, die viele Erfahrungen im Umgang mit Paranormalem verstehen lässt<sup>10</sup>. Auffällig ist die strukturelle Ähnlichkeit synchronistischer Korrelationen mit quantentheoretischen Verschränkungskorrelationen. Experimentelle Strategien wurden auf der Grundlage synchronistischer Theorien zusammen mit ihrer Formulierung vorgeschlagen. Es liegen erfolgreiche Anwendungen vor<sup>11</sup>. Der ontologische Status von Mustern und Sinnkorrespondenzen ist genauer zu würdigen<sup>12</sup>. Theorien vom synchronistischen Typ scheinen, was Klarheit, Einfachheit, Eleganz und Erklärungsleistung betrifft, am ehesten ästhetischen Ansprüchen zu genügen.

#### 4. Schönheit und Wahrheit

Alles, was für uns in irgendeiner Weise der Fall ist, ist uns zunächst nur so und insoweit gegeben, als es uns auf unserer inneren Bühne erscheint. Diese unbestreitbare Tatsache kann man als die „Phänomenalität der Welt“ benennen<sup>13</sup>. Was auf der inneren Bühne erscheint, sind nicht einfach „Dinge“, sondern „Repräsentationen“. Die Beziehung zwischen Repräsentiertem und Repräsentation ist als „Symbolbeziehung“ zu bezeichnen. Symbolisierung liegt in einfacher Form bereits bei der Wahrnehmung eines Baumes oder Steines als Baum oder Stein und schon bei Tieren vor. Es gibt keine völlig symbolfreie, unbenannte Wahrnehmung. Durch den Besitz der Sprache erreicht die Symbolisierungsfähigkeit des Menschen allerdings ganz neue Höhen. Der Mensch ist in der Lage, Symbolisierungen sprachlich-begrifflich zu benennen und Symbolisierungen höherer Ordnung, also

---

<sup>8</sup> S. Bhatt Marwaha, E. C. May: „Informational Psi: Collapsing the Problem Space of Psi Phenomena“, Zeitschrift für Anomalistik 19 (2019) pp.12-52. Diskussionsbeiträge dazu in demselben Heft: H. Grote: „A Brief Commentary on IΨ“, pp.52-54, W. von Lucadou: „Neither Causal nor Information – Psi Always Slips Away and yet is Powerful“, pp. 54-57, M. Nahm: „Assessing the Problem Space of Precognition: Can it be the Only Form of Psi? A Commentary on the multiphasic Model of Informational Psi“, pp. 57-67, D. Radin: „Yes, but What is New?“, pp. 67-70, H. Römer: „Remarks on Informational Psi“, pp. 70-72, S. Bhatt Marwaha, E. C. May: „Signals: A Mechanism to Understand Psi Phenomena“, pp. 73-113

<sup>9</sup> C.G. Jung, W. Pauli: „Naturerklärung und Psyche“ Rascher Verlag Zürich 1952

<sup>10</sup> Vergl. die unter Anm. 8 genannten Beiträge von W. von Lucadou und H. Römer sowie besonders W. von Lucadou, H. Römer, H. Walach: „Synchronistic Phenomena as Entanglement Correlations in Generalized Quantum Theory“, Journal of Consciousness Studies 14 (2007),50-74 sowie W. v. Lucadou, H. Römer, H. Walach: „Synchronistische Phänomene als Verschränkungskorrelationen in der Verallgemeinerten Quantentheorie“, Zeitschrift für Parapsychologie und Grenzgebiete der Psychologie 47/48/49 (2012), 89-110

<sup>11</sup> H. Walach, M. Horan, Th. Hinterberger, W. von Lucadou: „Evidence for Anomalistic Correlations Between Human Behavior and a Random Event Generator – Result of an Independent Replication of a Micro-PK Experiment“, Psychology of Consciousness: Theory, Theory, Research and Practice, © 2019 American Psychological Association, <http://dx.doi.org/10.1037/cns0000199>

<sup>12</sup> H. Römer: „Mythos und Symbol. Zur Ontologie von Ähnlichkeits- und Sinnbeziehungen“, Zeitschrift für Parapsychologie und Grenzgebiete der Psychologie, diese Ausgabe.

<sup>13</sup> Vergl. Anm. 12

Symbole von Symbolen zu bilden<sup>14</sup>. Das gesamte kulturelle Gehäuse, in dem der Mensch lebt, ist ein unendlich komplexes symbolisches Gebilde:

„In Bildern, nichts als Bildern besteht der ganze Schatz menschlicher Erkenntnis und Glückseligkeit“<sup>15</sup>

Am Beispiel komplexer Symbolisierungen, etwa der Begriffe „Kubismus“ oder „Skeptizismus“, wird klar, dass das Symbolisierungsverhältnis nicht einfach so zu verstehen ist, dass ein unproblematisch, schlechthin Vorhandenes lediglich mit einem symbolischen Etikett versehen würde, sondern dass zwischen Symbolisiertem und Symbol eher ein Verhältnis wechselseitiger Konstituierung besteht. Die Symbolbeziehung ist keine Kausalbeziehung im Sinne von Ursache und Wirkung, sondern ganzheitlich-gestalthafter Art. Symbolisierung ist im doppeltem Sinne wahrheits- und wirklichkeitshaltig, nämlich sowohl „wahrnehmend“ rezeptiv als auch ein Wirklichkeit stiftender schöpferischer Akt der menschlichen Einbildungskraft. Die „Freiheit in der Erscheinung“ solcher schöpferischen Akte wird in gelungenen Kunstwerken sichtbar und feiert in ihnen ihre ästhetischen Triumphe.

Der Mensch sucht Weltverständnis und Weltbeherrschung durch *Modellierung*: Elemente eines irgendwie gearteten und als solchen erkannten Bereiches seiner Welt werden symbolisierend benannt und konstituiert und ihre Verhältnisse zueinander durch *Gesetze* beschrieben und verstanden, die in den meisten Fällen nur intuitiv erfasst, manchmal, etwa in den Naturgesetzen der Physik, aber auch explizit formuliert sein können.

Die genaue Beschreibung solcher Modellbildung ist Gegenstand der Erkenntnistheorie, einer philosophischen Grunddisziplin, auf deren schier unendliche Vielfalt wir natürlich nicht einmal ansatzweise eingehen können. Wir wollen uns hier an der Vorstellung einer „*Verallgemeinerten Quantentheorie*“ (VQT)<sup>16</sup> orientieren, an deren Formulierung der Autor beteiligt war. Der eben genannte „Bereich der Welt“ wird in der VQT als „*System*“ bezeichnet, die begrifflich symbolisierten Elemente, auf die sich alle Untersuchungen an dem System beziehen, heißen in der VQT „*Observable*“. *Messergebnis* wird das Resultat einer zu einer Observablen gehörigen Untersuchung oder Beobachtung genannt, dessen Wahrheit in seiner faktischen Gültigkeit liegt. Es ist eine zentrale Eigenschaft der VQT, dass verschiedene Observable A und B zueinander *komplementär* sein können. In diesem Falle ist es i. A. unmöglich, A und B zugleich sichere, faktisch gültige Messergebnisse zuzuschreiben.

*Verschränkung* ist in der VQT über den Bereich der Physik hinaus definiert und anwendbar<sup>17</sup>. So beschreibt die VQT die Symbolbeziehung als eine Verschränkungsbeziehung.

Für das Folgende ist festzuhalten:

---

<sup>14</sup> E. Cassirer: *Philosophie der symbolischen Formen. Erster Teil: Die Sprache*. Meiner, Hamburg 2010, ISBN 978-3-7873-1953-4. *Zweiter Teil: Das mythische Denken*. Meiner, Hamburg 2010, ISBN 978-3-7873-1954-1. *Dritter Teil: Phänomenologie der Erkenntnis*. Meiner, Hamburg 2010, ISBN 978-3-7873-1955-8, vergl. auch H. Römer: Anm.3 und 12..

<sup>15</sup> J. G. Hamann: *Aesthetica in nuce*, S. 83

<sup>16</sup> H. Atmanspacher, H. Römer, H. Walach, Harald: *Weak Quantum Theory: Complementarity and Entanglement in Physics and Beyond*, *Foundations of Physics* **32**, (2002), 379-406, sowie Th. Filk, H. Römer: „*Generalized quantum theory: Overview and latest developments*“, *Axiomathes*, 21,2 (2011), 211--220; DOI 10.1007/s10516--010--9136--6

<sup>17</sup> H. Römer: Vergl. Anm. 3

- Sowohl die Identifizierung eines Systems als auch die Konstituierung seiner Observablen ist ein freier, kreativer Akt der Symbolisierung und Begriffsbildung und der schöpferischen Leistung eines Künstlers wesensverwandt.
- Modellierungen sind zutiefst wahrheitsfähig. Das liegt zunächst am Faktizitätsanspruch der Messergebnisse zu Observablen, mehr aber noch an der Tatsache, dass Modelle scheitern können, indem sich ihre Begriffsbildungen als verfehlt und die aus ihren Gesetzen gezogenen Folgerungen als falsch erweisen können.
- Damit sind die Erkenntnisse, die sich aus Modellierungen ergeben, weder einfach vorgefunden, noch rein konstruiert. Es herrscht vielmehr eine subtile Dialektik von Finden und Erfinden.
- Kein Modell enthält das „Ganze der Welt“ oder auch nur das Ganze des Systems, auf das es sich bezieht. Vielmehr ist die Fülle möglicher Aspekte und Begriffsbildungen unfassbar und unausschöpfbar. Wer das Modellierete mit seiner Modellierung identifiziert, begeht einen fundamentalen systematischen Fehler.

Der erkenntnistheoretische Ansatz des Bonner Philosophen Markus Gabriel, von ihm als *Neutraler Realismus* oder auch als *Neuer Realismus (NR)*<sup>18</sup> bezeichnet, gelangt zu einer ähnlichen Sicht der Dinge. Systeme in der VQT entsprechen *Gegenstandsbereichen* im NR. Ein Gegenstandsbereich erscheint nach Gabriel immer nur in einem *Sinnfeld*. Was Gabriel mit „Sinnfeld“ bezeichnet legt fest, in welchem „Sinne“ der Gegenstandsbereich betrachtet, erfasst und beschrieben wird. Sinnfeld entspricht damit ziemlich genau dem, was in der VQT als Gesamtheit der Observablen eines Systems bezeichnet würde. Die Möglichkeit von Komplementarität und Verschränkung tritt im NR nicht direkt ins Blickfeld.

Der Begriff „Sinnfeld“ enthält einen wertvollen Hinweis. Die menschliche Begriffsbildung und Wahrnehmung im Lichte von Begriffen ist sinnhaftig und sinngebend in dreifacher Weise:

Erstens ist ein „Sinn“ eine Fähigkeit zur Wahrnehmung, wie etwa der Gehörsinn oder der Gesichtssinn. Zweitens wird durch Begriffe festgelegt, in welchem „Sinne“ etwas erscheint. Drittens ist mit „Sinn“ eine Vorstellung von Gerichtetheit und Zielhaftigkeit verbunden, wie es etwa in den Redeweisen „Drehsinn“ oder „Sinn der Geschichte“ zum Ausdruck kommt. Man ist geneigt, von einem dreifachen Sinn des Sinns zu sprechen.

„*Denken*“ bezeichnet die menschliche Tätigkeit des Modellierens und des Wahrnehmens im Lichte von Modellen. Menschliches Denken ist *reflexiv*, indem es sich auf sich selbst richten und sich selbst betrachten und modellieren kann. Denken ist, wie alles Modellieren, wahrheitsfähig und beweist seine Wahrheitsfähigkeit nirgendwo mehr, als in der Möglichkeit des Scheiterns. Man könnte fast sagen: Denken gelingt gerade im ständigen Scheitern. Was ihm „weltartig“ begegnet, ist eine Mischung aus Verweigerung und Verlockung, aus Widerborstigkeit und gutmütiger Fehlertoleranz.

Nach einer in der philosophischen Tradition weit verbreiteten Ansicht, der sich in neuerer Zeit auch M. Gabriel wieder anschließt<sup>19</sup>, ist Denken eine Art von höherer Sinnesqualität, ein „Wahrheitssinn“ für Zusammenhänge den man sich durchaus auch als Ergebnis erfolgreicher evolutionärer Anpassung denken kann. In der Tat ist kein wirklicher qualitativer Unterschied zwischen einfachen, aber nie ganz symbolisierungsfreien Sinneswahrnehmungen einerseits und höheren, komplexe Symbolisierungen heranziehenden Erkenntnisleistungen andererseits auszumachen.

---

<sup>18</sup> M. Gabriel: *Warum es die Welt nicht gibt*, Ullstein Verlag 2013; ders.: *Neutraler Realismus*, Philosophisches Jahrbuch 121/II, 352-372

<sup>19</sup> M. Gabriel: *Der Sinn des Denkens*, Ullstein Verlag 2018

Der Bereich des Symbolisierens und Erkennens ist unauslotbar. Rilke fasst die Aufgabe, die dem gestaltenden und erkennend reflektierenden Menschen gestellt ist, wunderbar in der Aufforderung zusammen<sup>20</sup>:

Sei in dieser Welt aus Übermaß  
Zauberhaft am Kreuzweg deiner Sinne,  
Ihrer seltsamen Begegnung Sinn.

Ein ehrliches Erkenntnisstreben ist immer objektiv und ergebnisoffen, also bereit, das Ergebnis der Suche unabhängig von Wunsch und Erwartung des Erkennenden anzunehmen. Insofern darf man mit Kant dem Wohlgefallen an einer gelungenen Erkenntnis sicher Interessellosigkeit bescheinigen.

Die „Zweckmäßigkeit ohne Zweck“ liegt in der Wahrheit der Erkenntnis, also im Gelingen des Erkenntnisaktes und die „Freiheit in der Erscheinung“ in der ungezwungenen Mühelosigkeit dieses Gelingens angesichts einer unübersehbaren Fülle denkbarer alternativer Zugänge. Wir sehen, dass die Schönheit einer Erkenntnis untrennbar mit ihrer Wahrheit verbunden ist. Auch bei gelungenen Kunstwerken sind Schönheit und Wahrheit untrennbar, wobei Wahrheit im Gelingen des künstlerischen Ausdrucksanliegens besteht.

Der Ästhetizist ist der im Grunde frivole Genüßling, der Schönheit genießen möchte, ohne auf die Wahrheit des Schönen zu schauen. Er bleibt im Gefälligen befangen und verfehlt das Eigentliche der Schönheit.

Uns geht es in dieser Untersuchung um die Schönheit von Erkenntnissen, also gelungener Modellierungen. Schönheit steht, wie wir gesehen haben, nicht am Anfang, sondern als bleibender Gewinn am Ende des Erkenntnisbemühens, sie ist die Prämie für sein Gelingen. Allerdings geht von dieser Prämie eine Verlockung aus, die sich bis zur Unwiderstehlichkeit steigern kann und uns zu Erkenntnis und Wahrheitssuche antreibt.

Wir haben an den Beispielen fundamentaler physikalischer Theorien im vorangegangenen Abschnitt gesehen, wie sich dort als Lohn des Gelingens am Ende ein anhaltendes, sogar wachsendes Schönheitserlebnis einstellt.

Wenn man das Erkenntnisvermögen als ein höheres Sinnesorgan des Menschen ansieht, dann ist Schönheit für Erkenntnis das, was Lust für einfache Sinnenwahrnehmung bedeutet.

Wir haben schon gesagt, dass der Erkenntnisprozess weder ein reines Finden noch ein reines Erfinden ist. Insbesondere besteht zwischen Erkannten und Erkenntnis nicht einfach die Beziehung einer kausalen Einwirkung wie zwischen Stempel und Abdruck. Die Erkenntnisbeziehung ist zur Symbolbeziehung wesensgleich und wie diese nicht-kausal, ganzheitlich und „verschränkungsartig“.

Darin, dass Erkenntnis überhaupt möglich ist, dass der Mensch nicht beziehungslos zur Welt steht, sondern erkennend mit ihr versöhnt und für sein Erkennen mit Schönheit belohnt wird, liegt etwas zutiefst Wohlwollendes und Tröstliches. In einer berühmten Reflexion sagt Kant dazu:

„Die schönen Dinge zeigen an, dass der Mensch in die Welt passe und selbst seine Anschauung der Dinge mit den Gesetzen seiner Anschauung stimme.“<sup>21</sup>

Zum Schluss dieses Abschnittes kommen wir auf physikalische Modelle zurück, über deren Schönheit wir schon viel gesagt haben. Das Projekt der Physik ist wohl das umfassendste und formal am genauesten ausgeführte Modellierungsprojekt. Es war spektakulär erfolgreich und hat zu einer

---

<sup>20</sup> So heißt es an denkbar herausgehobener Stelle im letzten von Rilkes Sonetten an Orpheus. (Sonette an Orpheus 2, XXIX)

<sup>21</sup> I. Kant, Reflexionen, Akademieausgabe XVI, 127. Mit der Konzentration auf Kunstschönheit dazu M. Gabriel: *Wie der Mensch in die Welt passt*. Im Internet zugänglich über [http://www.humboldt.hu/sites/default/files/hn33-17-24-wie\\_der\\_mensch\\_in\\_die\\_welt\\_passt.pdf](http://www.humboldt.hu/sites/default/files/hn33-17-24-wie_der_mensch_in_die_welt_passt.pdf)

Fülle sicherer Erkenntnisse geführt und durch seine Anwendungen unsere Lebenswelt schon längst radikal und unumkehrbar verändert, ohne dass ein Ende davon absehbar wäre.

Das einfache und im Grunde bescheidene Verfahren der Physik besteht darin, sich auf ein relativ kleines Repertoire an grundlegenden Begriffen („Observablen“) zu beschränken, die alle die Eigenschaft haben, dass die zugehörigen Beobachtungen ganz auf innere Erfahrungen verzichten können und durch ein anerkanntes und wohldefiniertes Verfahren zu intersubjektiven und reproduzierbaren „Messergebnissen“ führen. Die Messergebnisse werden mathematisch modelliert und die vorausgesagten Konsequenzen der Modellierung wieder experimentell überprüft und zur Bestätigung oder Verbesserung der Modelle verwendet.

Bei aller Einfachheit ist dieser methodologische Rahmen keineswegs starr, sondern wandlungs- und anpassungsfähig. So hat die Relativitätstheorie im vergangenen Jahrhundert unser Verständnis von Raum und Zeit revolutioniert. Mehr noch hat sich durch die Quantentheorie die Vorstellung dessen, was physikalische Wirklichkeit sei, geradezu umgestürzt. Beides ist nicht aus Gründen der Mode und Laune, sondern unter dem Diktat physikalischer Erfahrungen geschehen, übrigens ohne bereits Gesichertes aus der Vergangenheit ungültig zu machen. Ob die gegenwärtigen Probleme der zeitgenössischen Physik zu Revolutionen ähnlicher Tragweite führen, lässt sich nicht vorhersagen. Jedenfalls besteht hoffentlich Offenheit für ein solches Geschehen, und seine Wahrscheinlichkeit ist, zumindest auf längere Sicht, nicht gering.

Der Anwendungsbereich der physikalischen Modellierung ist riesig. Dennoch ist es sicher derart verfehlt, alles Sein und Geschehen in der Welt als letztlich nur physikalisch verstehen zu wollen, dass man sich wirklich wundern muss, wieso im Namen eines physikalischen Reduktionismus solches immer noch versucht wird<sup>22</sup>. Der Kardinalfehler einer kurzschlüssigen Identifizierung von Modelliertem und Modell wurde ja schon erwähnt. Ein umfassenderes Weltverständnis erscheint nur aus vielfachen Perspektiven möglich. Dagegen strebt die Physik für sich, durchaus zu Recht, einen hierarchischen Aufbau an.

## 5. Zur gegenwärtigen Elementarteilchenphysik

Das Standardmodell der Elementarteilchentheorie ist eine Quantenfeldtheorie, die (mit Ausnahme des sog. Higgs-Sektors) auf der „Quantisierung“ einer Feldtheorie vom Eichtheorietypus beruht. Es beschreibt erfolgreich drei der vier bekannten fundamentalen Wechselwirkungen, nämlich die sog. *Starke Wechselwirkung*, die *Elektromagnetische Wechselwirkung* und die *Schwache Wechselwirkung*. Die beiden letztgenannten sind im Standardmodell zu einer einheitlichen „*Elektroschwachen Wechselwirkung*“ verschmolzen, während die Starke Wechselwirkung von der Elektroschwachen Wechselwirkung getrennt bleibt. Die Gravitationswechselwirkung findet im Standardmodell keinen Platz, was bei den erreichbaren Energien keine experimentellen Konsequenzen für die Teilchenphysik hat. Wie gesagt, ist die Aufstellung einer Quantentheorie zur Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie noch nicht gelungen. Hier liegt das wohl schwierigste und fundamentalste Problem der theoretischen Physik vor, dessen Lösung wahrscheinlich in weiter Ferne liegt, auch wenn Lösungsansätze dazu diskutiert werden.

Wie gesagt, hat sich das Standardmodell über alle Erwartungen hinaus auch in den neuesten Experimenten bewährt, und zwar nicht nur in seinen direkten Auswirkungen, sondern sogar in hoch abgeleiteten Konsequenzen, die von Einzelheiten der zugehörigen renormierten Feldtheorie abhängen. Als ein solcher Triumph ist zu werten, dass das sog. *Higgs-Teilchens*, dessen Existenz vom Standardmodell benötigt wird, im Jahre 2012 am CERN nicht nur gefunden wurde, sondern dass seine Masse auch in den engen Bereich fällt, in den sie aufgrund subtiler den ganzen

---

<sup>22</sup> Vergl hierzu H. Römer: *Emergenz und Evolution*, Zeitschrift für Parapsychologie und Grenzgebiete der Psychologie, Jahrgang 50, (2017), SS 68-98 sowie H. Römer: *Homo Deus, der arme Gott. Menschenbild und Transhumanismus*, erscheint in der Reihe *Affekt, Emotion, Ethik*, H. Kick (Hrsg), Lit Verlag, Münster

Formalismus des Standardmodells heranziehender Konsistenzüberlegungen fallen sollte. Es gibt bis heute kein experimentelles Resultat, das im deutlichen Widerspruch zum Standardmodell stünde. Das Experiment liefert also bis heute keinen klaren Hinweis, wie das Standardmodell zu erweitern oder zu korrigieren wäre.

Das ist erstaunlich und wohl auch bedauerlich angesichts einer ganzen Reihe von wirklichen oder empfundenen Mängeln, von denen einige, keineswegs alle, hier genannt seien:

1. Man ist sich ziemlich sicher, dass nur etwa 5% der Energie des Weltraumes von der Materie stammt, die im Standardmodell beschrieben wird. Rund 20% *dunkler Materie* und 75% *dunkler Energie* scheinen im Standardmodell keinen Platz zu finden und warten zudem auf ihre direkte experimentelle Entdeckung und Identifizierung.
2. Es erscheint wünschenswert, auch die Starke Wechselwirkung mit der Elektroschwachen Wechselwirkung zu vereinigen. Alle Versuche einer solchen „Großen Vereinigung“ sind bisher gescheitert.
3. Das Standardmodell enthält 25 unerklärte Naturkonstanten (12 Massen von Quarks und Leptonen, die Masse des Higgs-Teilchens, 6 „Mischungswinkel“, 2 „Mischungsphasen“ und vier „Kopplungskonstanten“). Das ist für den Geschmack der meisten Theoretiker ein Überschuss an Kontingenz.
4. Das Higgs-Teilchen wird oft als Schönheitsfehler des Standardmodells empfunden, da seine Wechselwirkungen, im Gegensatz zu allen anderen Wechselwirkungen des Standardmodells, nicht aus einem Eichprinzip folgen.
5. Die Gravitationswechselwirkung bleibt ausgeschlossen, ja es ist noch nicht einmal klar, wie sie zu quantisieren wäre.

Während der erste Punkt unbedingt einer Klärung bedarf, betreffen die anderen nur ästhetische Defizite des so überaus erfolgreichen Standardmodells, das sicher nicht allen Wünschen genügt, aber nach allen erwähnten Maßstäben nicht etwa hässlich, sondern immer noch schön und einfach ist.

Im Zusammenhang mit ästhetischen Erwägungen zur Elementarteilchenphysik wird immer wieder die Rolle der sog. *Supersymmetrie* diskutiert. Mit ihr verknüpfen sich u. a. Hoffnungen, zur Klärung der Punkte 1-4 beizutragen. In der Mathematik gehört die Supersymmetrie zur Theorie der sog. *Gaduierten Lie-Algebren*, einer Verallgemeinerung der *Lie-Algebren*, die sonst zur Beschreibung von Symmetrieoperationen herangezogen werden. Ihre genaue Definition tut für unsere Überlegungen nichts zur Sache. Wie jede geschlossene, auf klaren Definitionen und Axiomen beruhende nicht-triviale mathematische Theorie ist die Supersymmetrie als solche schön, allerdings auch nicht schöner als unzählige andere mathematischen Theorien. Sicherlich ist die Supersymmetrie bei Physikern besonders beliebt, weil der Anstoß zu ihrer Entwicklung aus der Physik kam. Von Theoretikern, die Supersymmetrie in Modellbildungen der Elementarteilchenphysik anwenden wollen, sind allerdings Aussagen wie diese zu hören: „Die Supersymmetrie ist so schön, dass die Natur nicht umhinkommt, für ihre fundamentalen Gesetze von ihr Gebrauch zu machen.“ Hier liegt sicher ein ästhetisches Fehlverständnis, verbunden mit einer dogmatischen Voreingenommenheit vor, wie S. Hossenfelder sie völlig zu Recht als gefährliches Erkenntnishindernis tadelt. Die Schönheit einer physikalischen Theorie ist ja, wie wir gesehen haben, von ihrer Wahrheit gar nicht zu trennen und liegt nicht nur in der Schönheit der verwendeten Mathematik. Das Auftreten von Supersymmetrie in physikalischen Gesetzen ist kein a priori, und die Natur ist nicht dafür zu tadeln, dass sich Supersymmetrie in Experimenten zur Teilchenphysik bisher nicht zeigen will. Auch haben wir gesehen, dass sich bei der Aufstellung einer physikalischen Theorie eher ein physikalisches Leitprinzip und nicht ein Bestehen auf einer mathematischen Struktur als fruchtbar erweist. Es lässt sich sogar ein ästhetisches Argument gegen Supersymmetrie in der Teilchenphysik anführen. Supersymmetrie wäre mit Sicherheit nur annähernd und für sehr hohe Energien realisiert, bei niedrigeren Energie aber jedenfalls „gebrochen“. Alle bekannten Mechanismen zur Brechung von Supersymmetrie sind ausgesprochen unelegant und benötigen eine ganze Anzahl unerwünschter und unerklärter freier Parameter, vermehren also ein Defizit des Standardmodells statt es zu vermindern.

Von den vielen vorgeschlagenen Ansätzen für eine Quantentheorie der Gravitation (etwa kanonische Quantisierung, „asymptotic safeness“, „loop gravity“) wollen wir hier nur auf den wissenschaftstheoretisch und wissenschaftssoziologisch besonders interessanten Fall der „Stringtheorie“ eingehen. Die Stringtheorie hat die ehrgeizige Vision, zu allen fünf oben genannten Problemen Entscheidendes beizutragen.

Ihre Ursprünge liegen mehr als fünfzig Jahre zurück. Ausgangspunkt ist die Vorstellung, die fundamentalen Objekte der Physik seien eindimensionale fadenförmige, offene oder zu Kreisen geschlossene „Strings“. In der Quantentheorie zur zunächst klassischen Bewegung der Strings sollten dann die vielfältigen Schwingungsmoden den verschiedenen Elementarteilchen entsprechen.

Ein Aufschwung der Stringtheorie hob Mitte der 1980er Jahre an, als sich die Hoffnung abzeichnete, dass mit der Stringtheorie eine Quantentheorie der Gravitation verbunden sein könnte.

Seitdem ist die Stringtheorie das wahrscheinlich meist bearbeitete Teilgebiet der Elementarteilchenphysik. Supersymmetrie ist tief in ihren Fundamenten eingebettet. Von ihrer ursprünglichen Intuition hat sich die Stringtheorie inzwischen weitgehend emanzipiert. So hat sich etwa herausgestellt, dass in der zugehörigen Quantentheorie nicht nur fadenförmige Objekte, sondern auch höherdimensionale Gebilde, „Membranen“, oder „branes“ genannte Objekte auftreten müssen. Auch hat sich gezeigt, dass aus Gründen der inneren Stimmigkeit die strings und branes in einem neundimensionalen Raum schwingen müssen und nicht etwa in dem für uns sichtbaren dreidimensionalen Raum. Damit die überschüssigen sechs Raumdimensionen für normale Beobachtung bei niedrigeren Energien verborgen bleiben, müssen sie „kompaktifiziert“ sein. Das bedeutet, dass sich der Raum in sechs Dimensionen über winzige Abstände zusammenkrümmt.

Im Gegensatz zu den im dritten Abschnitt genannten Revolutionen der Physik, die sich in wenigen Jahren vollzogen, sind trotz jahrzehntelanger angestrebter Arbeit Erfolge der Stringtheorie für die Beschreibung experimenteller Ergebnisse der Elementarteilchenphysik fast nicht zu verzeichnen. Das ist nicht verwunderlich. Die Stringtheorie ist erst wirklich „zu Hause“ und ihre Effekte werden erst dominant in Energiebereichen, die die höchsten jetzt experimentell erreichbaren um weit mehr als zehn Größenordnungen übertreffen. Allenfalls in der Kosmologie könnten Effekte der Stringtheorie bedeutsam sein, aber auch dort ist es bisher nicht möglich, eindeutige Signaturen der Stringtheorie zu identifizieren.

Als theoretische Erfolge sind vielfältige Konsistenzerlebnisse und Einblicke in höchst überraschende Zusammenhänge in stringtheoretischen Strukturen zu verzeichnen. Auf der Habenseite steht auch ein interessantes Teilresultat zur Entropie schwarzer Löcher. Dem Eindruck erst in Anfängen offenbarer Tiefe kann man sich bei der Stringtheorie kaum entziehen. Was die Schönheit der Stringtheorie angeht, die ihre Anhänger in Bann zieht, ist zu vermerken: Bisher ist die wirkliche der Stringtheorie zugrundeliegende Struktur noch nicht sichtbar. Sie ist keine klar konturierte mathematische Theorie, und die physikalische Bewährungsprobe für ihre Schönheit steht noch aus. Die Lage ist vielleicht mit der Situation der Quantenmechanik zur Zeit des Bohrschen Atommodells vergleichbar. Allerdings liegt diesmal die experimentelle Bestätigung in weiter Ferne. Inzwischen sind Generationen von Theoretikern in der Stringtheorie aufgewachsen. Die beschwörenden Behauptungen mancher Stringtheoretiker, ihre Theorie müsse einfach wahr sein, zeigt einen festgefahrenen Dogmatismus, der sehr berechtigt von S. Hossenfelder angeprangert wird.

Ein sehr seltsamer Zug der Stringtheorie, der in seiner Bedeutung höchst umstritten ist, darf hier nicht unerwähnt bleiben: Die soeben erwähnte notwendige Kompaktifizierung der sechs überschüssigen Raumdimensionen kann auf sehr unterschiedliche Weise erfolgen, und jeder Kompaktifizierung entspricht ihr eigenes Modell der Elementarteilchenphysik. Man schätzt die Anzahl der möglichen Kompaktifizierungen mindestens auf  $10^{500}$  ab. Unglücklicherweise hat man dennoch keine Kompaktifizierung gefunden, die dem erfolgreichen Standardmodell entspricht, noch weiß man, welche spezifisch stringtheoretischen Eigenschaften das Standardmodell auszeichnen sollten.

Wenn wirklich alle Kompaktifizierungen gleichberechtigt wären, dann wäre die Vorhersagekraft der Stringtheorie für die Physik unseres physikalischen Universums praktisch gleich Null. Die Stringtheorie beschreibe nur eine sehr allgemeine Theorie, eine „kosmische Landschaft“ möglicher Universen, von denen jedes eine zulässige Lösung der Theorie wäre. Die physikalischen Gesetze unseres Universums hätten dann nur die Kontingenz von Lösungen und Anfangsbedingungen. Was hier als Not der Stringtheorie erscheint, wird von vielen ihrer Anhänger als ihre besondere Tugend gepriesen. Das Verlangen nach einem Verständnis der Physik unseres Universums habe sich als naiv erwiesen. So habe ja auch die Newtonsche Mechanik gezeigt, dass man darauf verzichten müsse, die Anzahl, Massen und Bahndaten der Bestandteile unseres Sonnensystems zu verstehen. Diese Eigenschaften seien kontingent und nicht erklärungsbedürftig. Andere Planetensysteme hätten andere Daten. Ebenso sollten in anderen „Paralleluniversen“ andere physikalische Gesetze gelten. Hierzu ist zu sagen, dass andere Systeme, die der Newtonschen Gravitationstheorie genügen, jederzeit und in beliebiger Zahl sichtbar sind, während Paralleluniversen sich wohl prinzipiell jeder direkten Beobachtung entziehen. Jedenfalls sollte man m.E. einen solchen radikalen Verzicht auf die Vorhersagekraft fundamentaler Physik für unser Universum nur dann widerwillig akzeptieren, wenn eine bestens bestätigte und bewährte physikalische Theorie keinen anderen Ausweg ließe. Das ist für die Stringtheorie sicher nicht der Fall. Wenn übrigens wirklich die Grundgesetze der Elementarteilchentheorie kontingent wären, dann sollte man sich wundern, dass ein solches Übermaß an Kontingenz sich in unserem Universum nur in 25 unbestimmten Parametern äußerte.

S. Hossenfelders Ermahnung, über der Stringtheorie, die selbst bei optimistischster Betrachtung allenfalls eine Physik von Übermorgen ankündigt, die Physik von heute nicht zu vergessen, ist sicher zu beherzigen. In Abwesenheit massiver und spektakulärer experimenteller Resultate darf man wichtige Aufschlüsse von Präzisionsexperimenten und ihrer genauen theoretischen Analyse erwarten. Solche Aktivitäten sind ja auch wirklich im Gange, auch wenn sie nicht dasselbe Aufsehen erregen wie Spekulationen über Myriaden von Paralleluniversen.

Zwei Argumente werden oft angeführt, warum die Naturgesetze in unserem Universum so und nicht anders sind oder warum wir, in der Sprache der Stringtheoretiker, gerade in unserer Ecke des Multiversums unseren Platz haben:

Im Namen einer Forderung der *Natürlichkeit* wird z. B. dekretiert, dass sehr große oder sehr kleine Zahlenwerte für dimensionslose, also von den gewählten Maßeinheiten unabhängige fundamentale physikalische Größen als „unnatürlich“ auszuschließen seien. S. Hossenfelder weist darauf hin, dass darin Annahmen über eine natürliche Verteilung dieser Größen verborgen sind, die sie als ästhetisch bezeichnet und als Beispiel dafür, dass ästhetische Erwägungen irreleitend seien. Ich sehe hier keine Ästhetik in dem in dieser Arbeit erklärten Sinne, sondern einfach nur Willkür.

Das *Anthropische Prinzip* geht von der Beobachtung aus, dass kleine Änderungen der Naturkonstanten, etwa der Ladung des Elektrons, bei Anwendung der physikalischen Gesetze zu Verhältnissen führen würden, in denen die Bildung von intelligentem Leben in der uns bekannten auf Kohlenstoffverbindungen beruhenden Form unmöglich wäre. Niemand könnte dann noch die Frage nach den Naturgesetzen stellen. Es ist aber ganz unbekannt, welche Alternativen, insbesondere bei größeren Änderungen der Naturkonstanten oder gar ganz anderen Naturgesetzen für Leben und Intelligenz bestehen könnten. Das Anthropische Prinzip scheint mir eher eine Begrenzung unserer Phantasie als der Möglichkeit von Intelligenz anzuzeigen.

Wir schließen diesen Abschnitt mit einigen Bemerkungen zur Zukunft der Physik ab. Die Probleme der dunklen Materie und der dunklen Energie bedürfen dringend der Aufklärung. Für beide oder zumindest für die dunkle Materie darf man wohl für die nähere Zukunft optimistisch sein. Danach könnte das Standardmodell, vielleicht mit kleineren Anpassungen, noch für längere Zeit die beste Theorie der Elementarteilchen sein. Das Problem der Quantengravitation bleibt die größte Herausforderung der fundamentalen theoretischen Physik. Wahrscheinlich wird seine Lösung eine weitere Revolutionierung der Vorstellung von Raum und Zeit und möglicherweise auch von

physikalischer Realität mit sich bringen. Insbesondere zeichnet sich schon ab, dass auf einer tieferen Ebene Raum und Zeit ihren fundamentalen Status einbüßen und aus anderen Konzepten ableitbar sein werden. Ob es überhaupt eine letzte fundamentale Ebene der Physik gibt, bleibt offen.

Allen bisher genannten Ansätzen für eine Quantentheorie aller Wechselwirkungen ist ein unbefriedigender Zug gemeinsam: Sie entstehen alle, unter Einschluss auch der Stringtheorie, durch „Quantisierung“ aus einer zunächst formulierten klassischen Theorie. Das mag für die Quantenmechanik und die Quantenelektrodynamik seine Berechtigung haben, da die zugehörigen klassischen Theorien der Mechanik und der Maxwell'schen Elektrodynamik physikalische Theorien aus eigenem Recht mit eigenem Anwendungsbereich sind. Für die quantisierten Eichtheorien des Standardmodells ist dies aber nicht mehr der Fall. Die physikalische Welt ist in ihrem Wesen quantentheoretisch verfasst, und vorzuziehen wäre eine von vornherein quantenartige Theorie der Elementarteilchen. Bisher weiß niemand genauer, wie diese aussehen könnte. Die sog. *axiomatische Quantenfeldtheorie* gibt einige Hinweise, sie ist aber in ihrer gegenwärtigen Entwicklung noch zu allgemein, um in ihren Rahmen konkretere Modellierungen einzubeziehen. Die genannten Gewaltigkeiten der Renormierungstheorie haben ihren Ursprung darin, dass die renormierbaren Theorien durch Quantisierung lokaler klassischer Feldtheorien entstehen.

Wie auch immer eine Theorie aussieht, die den genannten Desideraten genügt, wird sie immer noch eine physikalische Theorie sein. Es gibt keinerlei Grund, die einfache, auf reproduzierbaren und intersubjektiven Messungen beruhende Erkenntnisstrategie der Physik aufzugeben. Gewiss wirft die Physik philosophische, insbesondere erkenntnistheoretische Probleme auf, wie sie sich z.B. in der Reflexion auf die Bedeutung der Quantentheorie und die Interpretation des quantentheoretischen Messprozesses zeigen. Dies sind aber philosophische Probleme der Physik und keine physikalischen Probleme. Es zeichnet sich nicht ab, dass etwa die Physik mit der Erkenntnistheorie zu einer umfassenderen Theorie verschmelzen müsste. Sie wird ihre Eigenständigkeit behalten, allerdings niemals ein Erklärungsmonopol im Sinne eines reduktionistischen Physikalismus beanspruchen dürfen.

## 6. Fazit

Wir wollen die wichtigsten Ergebnisse unserer Überlegungen in einigen Thesen zusammenfassen.

- Die Schönheit physikalischer Theorien ist von ihrer Wahrheit nicht zu trennen. Sie steht nicht am Anfang, sondern als Lohn am Ende der Theoriebildung. Sie ist ein mächtiger Antrieb für die Arbeit des Forschers.
- Der Versuch, den Lohn der Schönheit vorwegzunehmen, etwa durch Fixierung auf einen als besonders schön bevorzugten mathematischen Formalismus, ist illegitim und führt mit hoher Wahrscheinlichkeit in die Irre.
- Noch weniger als vorweggenommene Schönheit ist vorweggenommene Hässlichkeit ein verlässlicher Leitfad. Insbesondere führt simplizistische Theoriebildung unter dem Anspruch auf Anschaulichkeit und aggressivem Pochen auf „gesunden Menschenverstand“ so gut wie nie zur Wahrheit.
- Das Standardmodell könnte noch für längere Zeit die Theorie der Wahl sein. Die gegenwärtige empfundene Stagnation der Elementarteilchentheorie ist keine Katastrophe, sondern entspricht vielleicht den Wehen vor einem größeren Durchbruch. Ähnliche Verhältnisse herrschten in der Physik in den letzten Jahrzehnten des neunzehnten Jahrhunderts.
- Geduldige, weniger spektakuläre Detailarbeit an der Vertiefung, der verbesserten Formulierung und der genauen Ausarbeitung der Konsequenzen eines Modells sowie ihre Überprüfung durch Präzisionsexperimente ist verdienstvoll und hat in der Vergangenheit schon oft den Boden für wesentliche Fortschritte bereitet.
- Andere Zweige der Physik entwickeln sich kraftvoll und stehen in voller Blüte. Als ein Beispiel sei die Quantenoptik genannt, in der auch für den letzten Zweifler die

Quantentheorie gerade in ihren als bizarr erscheinenden Zügen endgültig Teil des Alltags wird und zu Anwendungen drängt. Ein anderes Beispiel ist die Kosmologie, die viele Verbindungen zur Elementarteilchenphysik aufweist und wichtige Aufschlüsse auch für diese erwarten lässt.

- Angesichts der gegenwärtigen Aporie in der Teilchenphysik ist es angezeigt, ein möglichst vielfältiges Explorationsverhalten zu fördern und die Suche nicht auf die Verfolgung weniger Ansätze zu verengen. In den jahrzehntelangen Bemühungen um die Stringtheorie haben sich Strukturen gebildet, die zu Konformismus und Dogmatismus verleiten können. Diese Entwicklung wird zu Recht von S. Hossenfelder beklagt. Ihr ist durch eine Forschungsförderung gegenzusteuern, die Forschungsmittel und Karrierechancen nicht zu sehr nach der Zahl der Publikationen und Zitate gewährt, sondern auch unkonventionelle Ansätze in angemessener Form zu Wort kommen lässt.
- Das Potential der einfachen und fruchtbaren Erkenntnisstrategie der Physik ist keineswegs erschöpft. Schöne und tiefe Einsichten sind zu erwarten, vorausgesetzt, dass die wissenschaftliche Neugier nicht erlahmt und einem verständnislosen Nützlichkeitsdenken das Feld überlässt.
- Ein reduktionistischer Anspruch auf ein Erklärungsmonopol der Physik ist mit Sicherheit schon deshalb verfehlt, weil hierin eine unzulässige Identifizierung von Modell und Modelliertem vorläge. Auch kann es keine die Physik übersteigende, etwa die Erkenntnistheorie einbeziehende Einheitswissenschaft geben, aus der sich alle Tatsachen ableiten ließen. Es führt kein Weg an der Anerkennung der Wahrheit vorbei, dass umfassenderes Weltverständnis nur multiperspektivisch möglich ist.

### **Danksagung**

Von Herzen danke ich meiner Frau Doris, die meine Arbeit mit Geduld und lebendigem Interesse verfolgt und immer wieder – hoffentlich mit Erfolg - Verständlichkeit der Darstellung angemahnt hat. Fr. Krause gebührt Dank für wertvolle kritische Anregungen. Den Organisatoren des XXXV. WGFP Workshops E. Bauer und W. v. Lucadou danke ich für den Anstoß, meine Gedanken zu diesem Thema zu sammeln und für die Gelegenheit, sie dort vorzutragen.

Kivilahti (Ilomantsi, Finnland) August 2019, Freiburg Oktober 2019