

Arianna Borrelli

Die Genesis des Gottesteilchens

Erzählung als konstitutives Element der theoretischen Hochenergiephysik

1. Einleitung

Im Vorwort zur *Luchsgeschichte* (Lévi-Strauss 1993, frz. 1991) bemerkte Claude Lévi-Strauss die Ähnlichkeit zwischen Mythen und jenen Erzählungen, mit denen Naturwissenschaftler versuchen, ihr Wissen einem breiteren Publikum zugänglich zu machen:

»Hat der Mythos die Partie nicht bereits seit langem verloren? Das ist gar nicht so sicher oder wenigstens nicht mehr so sicher. Denn es läßt sich bezweifeln, daß wirklich eine unüberschreitbare Distanz die Formen des mythischen Denkens von den berühmten Paradoxien trennt, die die Großmeister der modernen Naturwissenschaft, ohne jede Hoffnung, sich anders verständlich machen zu können, Ignoranten wie uns vorlegen: die ›Katze‹ von Schrödinger, der ›Freund‹ von Wigner [...]. Anders ausgedrückt, das mythische Denken wird erneut zum Mittler zwischen dem Gelehrten, der durch Berechnungen Zugang zu einer unvorstellbaren Realität findet, und dem Laienpublikum, das darauf brennt, etwas von dieser Realität zu erfassen, deren mathematischer Nachweis alle Befunde der sinnlich-anschaulichen Intuition Lügen straft [...], ein ›Urknall‹, ein in Ausdehnung begriffenes Universum usw., haben sämtlich den Charakter von Mythen.« (Lévi-Strauss 1993, S. 10–12)

Lévi-Strauss stellte hier die »Mythen« von Urknall und ›Schrödingers Katze‹ dem »mathematischen Nachweis« (»évidence mathématique«) einer »unvorstellbaren Realität« (»réalité inimaginable«) gegenüber, die nur den Naturwissenschaftlern zugänglich sei. Er meint, Wissenschaftler würden diese neuen Mythen erst im Nachhinein und ausschließlich für die Nicht-eingeweihten entwerfen, hätten es aber selbst nicht nötig, technische Ausdrücke und Formeln in die normale Sprache zu übersetzen. Auch der Mythenforscher Gregory Schrempp, der eine umfangreiche Analyse der Popularisierungsliteratur (»popular science writing«) durchgeführt hat, stellte fest, dass darin ähnliche Strategien wie bei Mythopoiesis eingesetzt werden (Schrempp 2002). Allerdings vertritt Schrempp nicht die Meinung, dass narrative Elemente ausschließlich zur Wissenschaftspopularisierung gehören würden, sondern er unterstreicht, dass sich seine Untersuchung

nur mit populären Texten beschäftige und daher keine Aussagen über Fachliteratur treffen könne (ebd., S. 4–5). Auf den folgenden Seiten werde ich anhand des Beispiels des »Gottesteilchens« argumentieren, dass Erzählungen auch in der Fachliteratur eine prominente Rolle haben können, und zwar nicht nur als rhetorische Strategien, sondern auch als konstitutive Elemente der Forschungspraxis. Erzählungen, so meine These, sind in der Hochenergiephysik Träger theoretischen Wissens. Dabei handelt es sich im Allgemeinen um narrative Konstrukte transmedialen Charakters, die sowohl verbale Aussagen als auch mathematische Formeln, Diagramme oder Verweise auf etabliertes Wissen in anderen Bereichen der Naturwissenschaft umfassen können.¹ Es ist nicht meine Absicht, zu behaupten, dass dies die einzige Funktion sei, die Erzählungen in den Naturwissenschaften ausüben können. Neben der bereits erwähnten Rolle bei der Popularisierung haben Historiker und Philosophen gezeigt, dass die Beziehung zwischen Erzählungen einerseits und den exakten Naturwissenschaften und der Mathematik andererseits sehr vielfältig sein kann (Doxiadis/Mazur 2012; Hartmann 1999; Plotnitsky 2005). Jedoch werde ich mich in diesem Beitrag auf den narrativen Charakter theoretischer Konstrukte konzentrieren und zeigen, wie in der heutigen Teilchenphysik die Komponenten von Theorien nicht immer logisch-mathematisch miteinander verbunden sind, sondern wie die Erzählelemente eines übergreifenden Narrativs locker nebeneinanderstehen und aufeinander verweisen, um ein überzeugendes, jedoch nicht immer streng logisch aufgebautes Gesamtbild zu erzeugen.² Die einzelnen Erzählelemente werden mittels unterschiedlicher medialer Strategien ausgedrückt, und so können Formeln, die mathematisch nicht miteinander verbunden sind, durch verbale Aussagen oder Verweise auf empirische Ergebnisse in Beziehung gesetzt werden. Der besondere epistemische Wert solcher Narrative liegt in einer Flexibilität und Offenheit, die das tentative Entfalten von Hypothesen fördert und die gegenseitige Befruchtung verschiedener Disziplinen ermöglicht.

Philosophen und Wissenschaftler geben zu, dass narrative Strukturen bei der Konstruktion von Theorien helfen können, meinen aber zumeist, dass sie im Endprodukt nichts mehr zu suchen hätten (siehe bspw. Lyre 2008). Im Gegenteil werde ich zeigen, wie ein Konstrukt narrativen Charakters den Kern der heutigen theoretischen Hochenergiephysik ausmacht und eine ebenso hohe Geltung wie exakte mathematische Theorien beansprucht. Es handelt sich um die Theorie der Massenerzeugung durch spon-

¹ Ich werde im Folgenden die Terme »Erzählung« und »Narrativ« als gleichbedeutend anwenden und deren Komponenten als »Erzählelemente« bezeichnen. Zu transmedialen Narrativen siehe Ryan (2005).

² Diese Arbeit schließt an frühere Arbeiten an, in denen ich mich mit Narrativen in der Konstruktion von spekulativen Modellen der »neuen Physik« beschäftigt habe (Borrelli 2012, i.E.).

tane Symmetriebrechung seitens des Higgs-Teilchens, das sogenannte »Gottesteilchen«, dessen Entdeckung am 4. Juli 2012 am CERN (Genf) mit medienwirksamer Inszenierung bekannt gemacht wurde und 2013 zur Verleihung des Nobelpreises für Physik an François Englert und Peter Higgs führte. Im nächsten Abschnitt werde ich das heutige Higgs-Narrativ erläutern, dessen Grundaussage ist, dass das Higgs-Teilchen die Masse aller Teilchen erzeugt. In Abschnitt 3 werde ich dann die Beziehung zwischen Mathematik und Erzählung in den exakten Naturwissenschaften besprechen und die These aufstellen, dass sich mit der zunehmenden Mathematisierung der Quantenphysik auch eine wachsende Narrativierung der Disziplin beobachten lässt, weil oft keine kohärenten mathematischen Strukturen für die Beschreibung der Phänomene gefunden werden können. In diesem Kontext können narrative Konstrukte an der Autorität teilhaben, die prinzipiell nur den strengen mathematischen Theorien gebührt. Um diese These am Beispiel des Higgs-Narratifs zu erläutern, findet in den Kapiteln 4 bis 6 die Analyse einiger ausgewählter Aufsätze aus den 1950er und 1960er Jahren statt, in denen Forscher zur Erklärung von neu entdeckten Teilchenphänomenen unterschiedliche Theorien narrativen Charakters entwarfen, deren Erzählelemente zum Teil in das heutige Higgs-Narrativ einglossen. Meine Analyse wird sich hauptsächlich auf die Art und Weise konzentrieren, wie verbale Erzählelemente die Verbindung unterschiedlicher mathematischer Ausdrücke und empirischer Daten ermöglichten und inwiefern Übernahme, Aneignung und Veränderung dieser Elemente eine zentrale Funktion beim Zustandekommen eines kollektiven kreativen Prozesses der Wissenskonstruktion hatten.

2. Das Higgs-Narrativ heute: Massenerzeugung und spontane Symmetriebrechung

Das heutige Higgs-Narrativ ist ein komplexes Gebilde, dem man sich am besten erst in seiner einfachsten, populären Form nähert. Eine minimale, rein verbale Version der Erzählung besagt, dass das Higgs-Teilchen die Masse aller Teilchen erzeugt. Zentrales Erzählelement ist daher ein Akt des »Erzeugens«, und das, was entsteht, ist die Masse; ein Term, der auch für Laien unmittelbar verständlich ist, obwohl er in physikalischer Hinsicht unterschiedlich definiert werden kann. Wegen dieser massenerzeugenden Funktion ist das Higgs-Boson ein physikalisch wichtiges Teilchen. Der Physiker Rolf Landua schreibt in einem an ein breites Publikum gerichteten Text:

»Ohne das Higgs-Feld hätten die Teilchen keine Massen [...]. Es gäbe dann keine stabile Materie, wie zum Beispiel Atome oder Moleküle, und auch keine Sterne oder Planeten – und uns auch nicht. [...] Mit Gott hat aber das Higgs-Teilchen nichts zu tun.« (Landua 2008, S. 75)

Die »Massenerzeugung« ist inhärent zeitbasiert, aber sie wird zugleich als eine kontinuierliche Tätigkeit gedacht: Die Masse der Teilchen entsteht in jedem Moment durch ihre Wechselwirkung mit dem Higgs-Teilchen bzw. Higgs-Feld. Rolf Landua schreibt:

»Stellen wir uns das ›Higgs-Feld‹ wie eine Art Velcro-Material im leeren Raum vor. Teilchen mit einer kleinen Masse wären in dieser Analogie solche mit einer ziemlich glatten Oberfläche. Teilchen mit einer rauen Oberfläche ließen sich nur mit Schwierigkeiten über die Velcro-Substanz schieben – also hätten sie eine größere Massenträgheit. [...] Das Higgs-Feld ist immer da [...]. Wenn man jetzt aber genügend Energie zur Verfügung stellt, dann kann man das Higgs-Teilchen in voller Pracht produzieren.« (ebd., S. 73 f.)

So füllt das Higgs-Feld, das »immer da« ist, auch den leeren Raum und gibt allen Teilchen ihre Massen. Gelegentlich manifestiert es sich auch in Form des Higgs-Teilchens.³ Die Wechselwirkung zwischen dem Higgs-Boson und den anderen Teilchen besteht allerdings nicht ›seit immer‹, sondern hat erst kurz nach dem Urknall seinen Anfang genommen. Auf der Public-Outreach-Webseite des CERN liest man folgende ausführlichere verbale Version des Narrativs:

»Just after the big bang, the Higgs field was zero, but as the universe cooled and the temperature fell below a critical value, the field grew spontaneously so that any particle interacting with it acquired a mass. The more a particle interacts with this field, the heavier it is. Particles like the photon that do not interact with it are left with no mass at all. Like all fundamental fields, the Higgs field has an associated particle – the Higgs boson.«⁴

Diese Passage hat wie die vorige einen klaren mythenähnlichen Charakter, der den Namen »Gottesteilchen« nicht unpassend erscheinen lässt. Nun wäre es denkbar, dass diese Erzählung die verbale Wiedergabe einer exakten mathematischen Theorie ist: ein Mythos, den Physiker nur erfanden, um mit »Ignoranten« zu kommunizieren. Jedoch gibt es bis heute keine strenge mathematische Formulierung der »Massenerzeugung«. Diese Theorie bleibt auch in der Fachliteratur ein hybrides narratives Konstrukt, obwohl sie dort natürlich viel mehr mathematische und empirische Erzählelemente enthält als die populäre Version (Earman 2003; Liu/Emch 2005; Lyre 2008). Insbesondere erscheint in der wissenschaftlichen Version der Higgs-

³ Hierbei handelt es sich um die »Welle-Teilchen-Dualität«, die für alle Quantenteilchen gilt. Beim Higgs- Boson tritt aber die Besonderheit auf, dass das Higgs-Feld (d. h. die Higgs-Welle) im leeren Raum nicht verschwindet. Wir werden weiter unten sehen, ob und wie diese verbale Aussage mathematisch ausgedrückt werden kann.

⁴ Webpage des CERN: <http://public.web.cern.ch/public/en/Science/Higgs-en.html> [Zugriff am 14.04.2013].

Erzählung ein Element, das als selbständiges Narrativ auch in anderen Bereichen der Physik eine wichtige Rolle spielt: die »spontane Symmetriebrechung«. Eine »Symmetriebrechung« ist an sich relativ einfach zu verstehen, aber die »Spontaneität« ist rein negativ definiert: Eine Symmetrie bricht von sich aus ohne eine externe Ursache. Diese eher vage verbale Bestimmung wird in der Fachliteratur durch einfache alltägliche Beispiele veranschaulicht. Zum Beispiel schreibt der Nobelpreisträger Steven Weinberg in seinem höchst anspruchsvollen Lehrbuch *The Quantum Theory of Fields* (1996):

»We do not have to look far for examples of spontaneous symmetry breaking. Consider a chair. The equations governing the atoms of the chair are rotationally symmetric, but a solution of these equations, the actual chair, has a definite orientation in space.« (Weinberg 1996, S. 163)

Hier sehen wir, wie mathematische Elemente (Atomgleichungen, ihre Symmetrie und ihre Lösungen) mit empirischen Gegebenheiten (die offensichtliche Asymmetrie des Stuhls) in einem hybriden Narrativ kombiniert werden: Die »Atomgleichungen des Stuhls« können weder geschrieben noch gelöst werden und so gibt es für die spontane Symmetriebrechung keine kohärente mathematische Formulierung. Dennoch ist die Erzählung überzeugend: Der Stuhl erscheint als anschaulicher Beleg dafür, dass eine »spontane Symmetriebrechung« stattgefunden haben muss, obwohl unklar bleibt, wie dies passiert ist.⁵ In der Higgs-Erzählung heißt es, dass dieses Teilchen bzw. Feld die »spontane Brechung« einer bestimmten Symmetrie (»elektroschwache Symmetrie«) verursacht. Die spontane Symmetriebrechung erzeugt dann die Massen. Dieser (hypothetische) physikalische Prozess wird als »Higgs-Mechanismus« bezeichnet. Als Beispiel, wie das Higgs-Narrativ in der Fachliteratur verbal ausgedrückt wird, lesen wir in dem oft verwendeten Lehrbuch der Quantenfeldtheorie von Michael Peskin und Daniel Schroeder (1995):

»This mechanism, by which spontaneous symmetry breaking generates a mass for a gauge boson [...] is now known as the *Higgs mechanism*. [...] [T]he scalar field that causes spontaneous breaking of the gauge symmetry is an important ingredient in the structure of the [electro-weak; Anm. AB] theory. [...] The quantum of the scalar field $h(x)$ is a scalar particle [...] known as the *Higgs boson*.« (Peskin/Schroeder 1995, S. 692 u. 715 f.)⁶

⁵ In der Physik werden heute verschiedene Erscheinungen und mathematische Modelle als Beispiele von spontaner Symmetriebrechung angesehen, z.B. die Entstehung der Magnetisation in einem Ferromagnet oder das Auftreten der Supraleitung bei niedriger Temperatur.

⁶ Obwohl man verbal zwischen Massenerzeugung und Symmetriebrechung unterscheidet, sind die beiden in mathematischer Hinsicht kaum auseinanderzuhalten, weil die Massenterme die Symmetrie brechen.

Physiker meinen oft, die Rede von »Ursache«, »Erzeugung« und »Spontaneität« sei nur eine unpräzise, entbehrliche Redewendung. Ich werde im Folgenden hingegen zeigen, dass diese Terminologie für das Aufrechterhalten des übergreifenden Narratifs des Higgs-Mechanismus unabdingbar ist.

3. Mathematische Praktiken zwischen Autorität und Autorschaft

Im Mittelpunkt der Physik steht heute eine Reihe von Theorien mathematischer Form, deren Voraussagen sich mit großer Präzision experimentell bestätigen lassen. Für Naturwissenschaftler – und für viele Wissenschaftsphilosophen – stellen diese Theorien die epistemisch bevorzugte Form des Wissens über die Natur dar. In der Physik wird nur Theorien mathematischer Form die Autorität zugesprochen, etwas über die »Gesetze der Natur« aussagen zu dürfen, obwohl unter Philosophen heiß umstritten bleibt, was genau diese Formeln über die Natur aussagen können. Naturwissenschaftler nehmen meist eine agnostische Haltung an, äußern jedoch kaum Zweifel daran, dass die Regelmäßigkeiten der Phänomene prinzipiell mathematisch ausgedrückt werden können. Diese Annahme kann mit einer stark reduktionistischen Einstellung verbunden sein, nach der alle Erscheinungen prinzipiell auf die gleiche »Theory of Everything« zurückzuführen sind; häufiger jedoch trifft man unter Naturwissenschaftlern auf die nicht derart extreme Überzeugung, wonach für unterschiedliche Phänomenbereiche verschiedene mathematische Gesetze gelten, die eventuell ähnliche formale Merkmale aufweisen (Cat 1998). Obwohl der hohe epistemische Wert der mathematischen Form keine moderne Erfindung ist, haben mathematische Theorien ab dem frühen 20. Jahrhundert langsam epistemischen Vorrang vor ihrer möglichen physikalischen Deutung errungen: Während z.B. die Gesetze des Elektromagnetismus im 19. Jahrhundert als mathematische Beschreibung der Eigenschaften eines physikalischen Äthers gedacht waren, gelten sie heute als Definition der messbaren Eigenschaften eines »elektromagnetischen Feldes«, über deren physikalische Natur kaum spekuliert wird. Diese Einstellung hat sich durch das Aufkommen der Quantentheorie verstärkt. In den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts ist in der Hochenergiephysik die epistemische Relevanz rein mathematischer Theoriemerkmale so sehr gestiegen, dass die explorative Zusammenstellung von mathematischen Modellen nach bestimmten formellen Richtlinien, wie z.B. Symmetrien, auch dann als fruchtbare Forschungspraxis angesehen wird, wenn eine empirische Prüfung der Voraussagen der Modelle sehr problematisch oder gar unmöglich erscheint, wie im Fall der Stringtheorie (Galison 2004). Die Mathematik gilt in der fundamentalen physikalischen Forschung als einzige autoritative Sprache der Natur.

Die Entstehung der Theorien, die heute die höchste epistemische Stellung innehaben, war allerdings keine lineare Entwicklung wohldefinierter Kon-

strukte, sondern ergab sich aus der Ansammlung explorativer Schritte, in denen nichtrigorose mathematische Praktiken eine zentrale Rolle spielten.⁷ Natürlich waren die Vorstellungen von mathematischer Strenge sehr unterschiedlich: Im 18. Jahrhundert stellte sich die Frage der mathematischen Strenge in einem modernen Sinne nicht; aber auch Autoren des 19. und 20. Jahrhundert hielten sich oft nicht an die in ihrer Zeit geltenden Richtlinien. Die nichtrigorose Konstruktion mathematischer Theorien von physikalischen Erscheinungen wurde im 19. und frühen 20. Jahrhundert oft durch Hypothesen über die experimentell (noch) nicht zugänglichen Aspekte physikalischer Systeme geleitet, wie z.B. die sehr unterschiedlichen, oft nur qualitativen Atom- und Äthermodelle, die zur Erklärung chemischer und spektroskopischer Phänomene vorgeschlagen wurden (Kragh 2012, S. 1–38). Bei der Entwicklung der Quantenmechanik ließen sich aber einige Autoren immer häufiger durch Überlegungen leiten, die keine klare physikalische Bedeutung hatten und sich eher an formellen Eigenschaften der jeweiligen mathematischen Modelle orientierten, wie z.B. Heisenbergs Idee, dass Naturgrößen durch unendliche Matrizen dargestellt werden sollten (vgl. Borrelli 2010). Es ist nicht meine Absicht, die mathematischen Praktiken der 1920er und 1930er Jahre zu besprechen, sondern ich möchte nur darauf hinweisen, dass spätestens ab jenen Jahren die mehr oder weniger rigorose Konstruktion und Manipulation von mathematischen Gebilden immer häufiger ohne Rückgriff auf explizite physikalische Annahmen geschah. So stieg der epistemische Wert der Mathematik, weil physikalische Begriffe grundsätzlich als mathematische Strukturen gedacht wurden. Meines Erachtens erfolgte es genau in diesem Kontext, dass narrative Strukturen eine zunehmend leitende Stellung bei der Entwicklung formeller Hypothesen annahmen. Der Grund war, dass Erzählstrukturen dabei helfen konnten, Hypothesen über die Eigenschaften physikalisch-mathematischer Theorien in dem Moment zu formulieren, als weder rigorose mathematische Richtlinien noch physikalische Deutungen vorhanden waren. Diese transmedialen Narrative kombinieren mathematische und nichtmathematische, verbale und nichtverbale Elemente zu einer bedeutungsvollen Einheit. Die Charakterisierung dieser hybriden Konstrukte als Narrative, und nicht z.B. als naturphilosophische Annahmen, hat mehrere Gründe. Zum einen haben sie keinen definitorischen, statischen Charakter, sondern beschreiben Ereignisse, die sich in einer mehr oder weniger fiktiven Zeit abspielen, wie die »Erzeugung« von Massen oder die »Brechung« einer Symmetrie. Zum anderen sind sie nicht systematisch ausgedrückt und werden nicht strikt logisch reflektiert, sodass die »gleiche« Erzählung in mehreren Varianten vorkommen kann, die als äquivalent angesehen werden können.

⁷ Für einen knappen Überblick mit weiteren bibliografischen Referenzen siehe Borrelli 2012.

In vielen Fällen können diese Konstrukte eventuell in rigorose Gebilde umgewandelt werden, und so neigen Physiker heute oft dazu, rigorose Beweise als unnötig zu erachten. Allerdings ließen sich einige der wichtigsten Methoden der heutigen Teilchenphysik bisher nicht mathematisch exakt formulieren, wie z.B. die Renormierungsprozeduren der relativistischen Quantenfeldtheorie, von denen später die Rede sein wird. Bei der Entwicklung spekulativer Modelle in der Hochenergiephysik sind nichtrigorose Konstrukte heute die Regel (Borrelli 2012; Galison 2004). Diese theoretischen Strukturen, in denen Narrative eine zentrale Rolle spielen, werden als ungenaue, jedoch im Kern zuverlässige Darstellungen hypothetischer mathematischer Theorien betrachtet, und ihnen kann die Geltung zugesprochen werden, die den exakten Theorien zukommen würde. Diese Haltung seitens der Physiker hat zu Spannungen mit den Mathematikern geführt. Im Kontext einer Debatte über Wert und Rechtfertigung nicht-rigoroser mathematischer Praktiken versuchte der Topologe Morris W. Hirsch zu erklären, wie Physiker und Ingenieure die Mathematik für »narrative Zwecke« anwenden:

»The nonrigorous use of mathematics by scientists, engineers, applied mathematicians and others, out of which rigorous mathematics sometimes develops, is in fact more complex than simple speculation. While sloppy proofs are all too common, deliberate presentation of unproven results as correct is fortunately rare. Much more frequent is the use of mathematics for *narrative purposes*. An author with a story to tell feels it can be expressed most clearly in mathematical language. In order to tell it coherently without the possible infinite delay rigor might require, the author introduces certain assumptions, speculations and leaps of faith, e.g. ›In order to proceed further we assume the series converges—the random variables are independent—the equilibrium is stable—the determinant is nonzero—.‹ In such cases it is often irrelevant whether the mathematics can be rigorized, because the author’s goal is to persuade the reader of the plausibility or relevance of a certain view about how some real world system behaves. The mathematics is a language filled with subtle and useful metaphors. The validation is to come from experiment—very possibly on a computer. The goal in fact may be to suggest a particular experiment. The result of the narrative will be not new mathematics, but a new description of ›reality‹ (*real reality!*).« (Atiyah et al. 1994, S. 186f.)⁸

In dieser Passage findet ein Versuch des Austarierens und Balancierens der Autorschaft der Menschen und der Autorschaft »der Natur« statt: Ein Mensch will eine Geschichte erzählen, die prinzipiell mathematische Form haben sollte – kaum überraschenderweise, da aus diesem Narrativ eine

⁸ Für eine breitere Diskussion des Kontexts dieser Äußerung siehe: Borrelli 2012; Galison 2004.

Beschreibung der »echten Realität« (»real reality«) entstehen soll, für die nur die Sprache der Natur passend ist. Aus technischen Gründen ist der menschliche Autor aber nicht imstande, sein Narrativ rein mathematisch auszudrücken, und er kann die Erzählung nur in hybrider Form wiedergeben, indem er sie mit Elementen verbindet, die nicht-mathematische Form haben (»assumptions, speculations, leaps of faith«). Jedoch ist dieses hybride Narrativ für Hirsch die gleiche Erzählung wie die hypothetische mathematische Konstruktion. Dies ist der entscheidende Punkt: Sollten Experimente die Voraussagen des Hybrids bestätigen, wäre dies für Hirsch ein Beleg der Existenz der – nach wie vor hypothetischen – exakten Theorie. Gegen eine solche Auffassung wenden Mathematiker ein, dass nur ein strenger Beweis die Existenz einer exakten Theorie belegen kann. Gleichzeitig könnte man hinzufügen, dass die hybride Theorie, falls empirisch bestätigt, auch dann physikalische Geltung beanspruchen könnte, wenn sie keinem klaren Konstrukt entspricht. Es ist aber gerade das ideelle Zusammenfallen der hybriden menschlichen Erzählung mit den exakten mathematischen Narrativen der Natur, das den Kern der epistemischen Haltung ausmacht, die für die heutige theoretische Forschungspraxis grundlegend ist und die Entstehung von dem erlaubt, was Peter Galison als neue »conceptual objects« bezeichnet hat, die »not quite mathematical and not quite physical« sind (Galison 2004, S. 60). Ich werde im Folgenden die Entstehung eines solchen konzeptuellen Gegenstandes skizzieren.

4. Frühe Narrative von Massenerzeugung und Symmetrieverlust: Julian Schwinger, Werner Heisenberg und Yoichiro Nambu

Die frühen 1950er Jahre brachten Entwicklungen in der theoretischen und der experimentellen Teilchenphysik, die das Panorama der Grundlageforschung radikal änderten und zur Entstehung einer neuen Disziplin führten: der Hochenergiephysik.⁹ Theoretische und experimentelle Ergebnisse waren zunächst voneinander getrennt. Auf der theoretischen Seite wurde eine quantenmechanische Version des Elektromagnetismus formuliert (»Quantenfeldtheorie«), die zu experimentell bestätigten Voraussagen

⁹ Für einen Überblick über die frühe Geschichte der Teilchenphysik siehe: Brown/Hoddeson 1986. Für eine ausführliche Diskussion der physikalisch-mathematischen Entwicklung des Higgs-Mechanismus siehe: Borrelli i.E.

führte.¹⁰ Gleichzeitig hatte im experimentellen Bereich die Entwicklung neuer Techniken der Teilchenbeschleunigung und Detektion die Erzeugung einer Vielfalt neuer Erscheinungen ermöglicht, die als neue Teilchen mit neuen Wechselwirkungen gedeutet wurden. Die Frage stellte sich, ob die Quantenfeldtheorie auch auf die neuen Erscheinungen angewandt werden konnte. Diese Aufgabe stellte sich schnell als problematisch heraus, sowohl wegen der verwirrenden Vielfalt neuer Teilchenphänomene als auch wegen grundlegender mathematischer Schwierigkeiten. Diese Schwierigkeiten werde ich im Folgenden grob skizzieren, weil sie eine wichtige Motivation für die zunehmende Narrativierung der Teilchenphysik lieferten.

In der Quantenfeldtheorie wird jedes System durch eine spezifische mathematische Formel namens »Lagrange-Dichte« definiert, aus der prinzipiell alle beobachtbaren Eigenschaften abgeleitet werden können (Wilczek 2009). Eine zentrale Rolle spielt in diesem Kontext ein mathematisches Konstrukt namens »Vakuum«, das den Zustand minimaler Energie des Systems beschreibt und aus dem die Eigenschaften aller anderen möglichen Zustände prinzipiell abgeleitet werden können. Wie sein Name suggeriert, wird dieser »Vakuum-Zustand« oft als ein leerer Raum gedacht und bietet – obwohl diese physikalische Deutung nicht völlig korrekt ist – ein anschauliches Bild, das als fruchtbare Anknüpfung für narrative Verbindungen dienen kann. Nun kommen wir aber zu den oben erwähnten mathematischen Schwierigkeiten: Berechnungen aufgrund der Lagrange-Dichte und des Vakuums sind in praktischer Hinsicht fast nur unter Anwendung eines vereinfachenden mathematischen Ansatzes möglich: der »Störungstheorie«. Physikalisch ist diese Vereinfachung nur dann zulässig, wenn die Wechselwirkungen zwischen Teilchen lediglich als kleine Störung (»Perturbation«) ihrer Zustände angesehen werden dürfen. Allerdings – wie die Physiker der Nachkriegszeit sehr gut wussten – waren die neu entdeckten Interaktionen zu stark, um als kleine Perturbation betrachtet zu werden. Ohne Störungstheorie waren aber kaum Berechnungen möglich, auch wenn eine Lagrange-Dichte für die neuen Wechselwirkungen zu finden gewesen wäre.¹¹ In dieser Situation fingen die Theoretiker an, mit Symmetrie-Überlegungen zu arbeiten, weil von den Symmetrien (z.B. Rotationsinvarianz) einer Lagrange-Dichte auch ohne genaue Berechnungen

¹⁰ Die Entwicklung der Quantenfeldtheorie um 1950 hing mit der Lösung eines Problems zusammen, das lange im Wege gestanden hatte: den formell divergiierenden Termen, die in quantenfeldtheoretischen Berechnungen oft vorkamen. 1950 war es möglich, diese Divergenzen durch eine formale, nichtrigorose Prozedur (»Renormierung«) zu beseitigen.

¹¹ Perturbative Berechnungen aufgrund einer Lagrange-Dichte sind in den meisten Fällen mathematisch möglich; wenn aber die Störungstheorie für ein System nicht physikalisch zulässig ist, liefern perturbative Berechnungen keine brauchbaren Informationen über dessen Verhalten.

zumindest einige Schlüsse auf das Verhalten der Teilchen gezogen werden durften. Zugleich konnten die neuen Teilchen aufgrund approximatischer Symmetrien in ihren Eigenschaften tentativ in Gruppen klassifiziert werden, um so die Komplexität der experimentellen Ergebnisse zu reduzieren. In diesem Kontext veröffentlichte im Jahre 1957 der US-Theoretiker Julian Schwinger einen Aufsatz, dessen Ziel er so beschrieb: »This note is an account of some developments in an effort to find a description of the present stock of elementary particles within the framework of the theory of quantized fields.« (Schwinger 1957, S. 407)

Schwingers Idee war, dass die Lagrange-Dichte der neuen Interaktionen nur masselose, hochsymmetrische, fundamentale Teilchen enthalten würde, aus deren Wechselwirkungen die weniger symmetrische Vielfalt der Teilchenphänomene entstand, darunter insbesondere alle Massen. Die Beziehung zwischen den Eigenschaften der fundamentalen Teilchen einerseits und der beobachteten Teilchen andererseits bezeichnete er mit dem Wort »dynamical«, jedoch war er aufgrund der oben erwähnten Berechnungsschwierigkeiten nicht imstande, diese »dynamische« Beziehung mathematisch darzustellen. In Worten beschrieb er sein Modell folgendermaßen:

»We shall attempt to describe the massive, strongly interacting particles by means of fields with the smallest spin appropriate to the statistics [...]. [T]he origin of the diversity of known particles must be sought in internal degrees of freedom [d.h. in den Eigenschaften der fundamentalen Teilchen; Anm. AB]. We suppose that the internal degrees of freedom are dynamically exhibited by specific interactions, each with its characteristic symmetry properties, and that the final effect of interactions with successively lower symmetry is to produce a spectrum of physically distinct particles from initially degenerate states. Thus we attempt to relate the observed masses to the same couplings responsible for the production and interaction of these particles.« (ebd., S. 407)

Diese Beschreibung enthielt Ausdrücke, die in Schwingers Aufsatz mit mathematischen Strukturen in Verbindung standen: die (hohe) Symmetrie der Lagrange-Dichte und die (niedrigere) Symmetrie der beobachteten Teilchenwelt. Der dynamische Übergang von der hohen zur niedrigen Symmetrie war aber nicht mathematisch dargestellt. Schwinger untermauerte seine Überlegungen durch das Argument, dass sich die Massen aus der Wirkung einer »unbekannten physikalischen Ursache« (»unknown physical agency«) ergaben, die mit der Raum-Zeit-Struktur verbunden war:

»The mass constants of the individual fields are regarded as phenomenological manifestations of the unknown physical agency that produces the failure in the conventional space-time description and establishes the absolute scale of length and of mass.« (ebd., S. 411)

Auch in diesem Fall gab Schwinger keine mathematische Darstellung; sein theoretisches Konstrukt war ein Hybrid aus mathematischen Elementen

(Lagrange-Dichte, Symmetrien), empirischen Daten (Massen, Ladungen), physikalischen Hypothesen (Existenz einer minimalen Länge) und wirkungsvollen, jedoch eher unbestimmten verbalen Aussagen (»dynamischer« Symmetrieverlust und Entstehung der Teilchenvielfalt, »unknown physical agency«). Zusammengehalten wurde die ganze Struktur durch ein übergreifendes Narrativ, in dem sich aus einer masselosen, symmetrischen Grundlage eine komplexe, massive Realität ergab. Die Zeit, in der sich diese Massenerzeugung abspielte, war aber nicht unsere gelebte Zeit.

Um das Narrativ mathematisch zu untermauern, fügte Schwinger ein weiteres Erzählelement ein: ein »Skalarteilchen« – wie das spätere Higgs-Teilchen –, das weder Masse noch Ladung hatte und einen »nicht-verschwindenden Vakuumerwartungswert« besaß.¹² Diese formelle Eigenschaft stellte Schwinger nur in sehr vereinfachter mathematischer Art dar, um eine nichtrigorose Demonstration des »dynamischen Ursprungs der Masse« (»dynamical origin of mass«; ebd., S. 415) zu geben.¹³ So erschienen bereits in Schwingers Narrativ ein »Vakuum«, das nicht als leerer Raum zu verstehen war, und ein Skalarfeld, das auch im Vakuum vorhanden war. Schwinger wusste, dass er nur einen sehr groben, nichtrigoroseren Rahmen für künftige Forschung skizziert hatte, und er beendete den Aufsatz mit den Worten:

»What has been presented here is an attempt to elaborate a complete dynamical theory of the elementary particles from a few general concepts. Such a connected series of speculations can be of value if it provides a convenient frame of reference in seeking a more coherent account of natural phenomena.« (ebd., S. 433)

Während Schwinger seine Theorie entwickelte, arbeitete auch Werner Heisenberg an einer Quantenfeldtheorie, in der aus einer einfachen, symmetrischen Lagrange-Dichte die beobachtete Vielfalt der Teilchenphänomene abgeleitet werden sollte. Das Besondere an Heisenbergs Theorie war, dass ihre mathematische Form die Anwendung der Störungstheorie nicht gestattete, und so arbeiteten Heisenberg und seine Mitarbeiter mit einem alternativen »nichtperturbativen« Ansatz, der aber nur qualitative Aussagen ermöglichte. In einem langen Aufsatz aus dem Jahr 1959 gaben sie eine verbale Beschreibung der hypothetischen mathematischen Gründe, warum sich aus symmetrischen Gleichungen asymmetrische Erscheinungen

¹² Der Vakuumerwartungswert eines Teilchens ist der Wert, den das entsprechende Feld im Vakuumzustand annimmt. Massive oder geladene Teilchen müssen einen Vakuumerwartungswert gleich null haben, weil das Vakuum weder Masse noch Ladung hat.

¹³ Schwinger ersetzte das Feld Φ der Skalarteilchen in der Lagrange-Dichte durch $\Phi + V$ ($V =$ Vakuumerwartungswert). Aus dieser Transformation entstanden neue Terme, die die Form von Massentermen für verschiedene Teilchen hatten (Schwinger 1957, S. 416 u. 423).

ergeben würden (Dürr et al. 1959). Wie bei Schwinger spielten auch hier Vakuum und Symmetrieverlust eine zentrale Rolle: In der Quantenfeldtheorie wurde bis dahin angenommen, dass das Vakuum alle Symmetrien der Lagrange-Dichte besitzen würde. Heisenberg wies hingegen darauf hin, dass dies nicht immer der Fall sei:

»Es ist keineswegs von vornherein sicher, daß es auch einen Zustand ‚Vakuum‘ geben muß, der alle Symmetrieeigenschaften der Ausgangsgleichung besitzt. [...] Wenn es sich als unmöglich erweist, einen voll symmetrischen Zustand ‚Vakuum‘ zu konstruieren, so kann dies anschaulich wohl nur so gedeutet werden, daß es sich bei dem unsymmetrischen Grundzustand nicht eigentlich um ein Vakuum, sondern um einen Zustand ‚Welt‘ handelt, der die Grundlage für die Existenz der Elementarteilchen bildet.« (ebd., S. 446)

Die Autoren konnten das »unsymmetrische« Vakuum mathematisch nicht genau beschreiben, suggerierten aber in Worten, dass es nicht als ein leerer, eigenschaftsloser Raum zu denken sei, sondern als ein aktives, überall anwesendes Medium (»Welt«), das die Eigenschaften der in ihm enthaltenen Teilchen verändern konnte. So würden z.B. identische Teilchen unterschiedliche Massen erhalten (ebd., S. 446f.). Wie Schwingers Modell bestand auch Heisenbergs Theorie aus verschiedenen mathematischen Fragmenten (nichtlineare Lagrange-Dichte, Symmetrien, tentative, nicht-perturbative Berechnungen), die durch verbale Aussagen (nichtsymmetrisches Vakuum als »Welt«) zu einem überzeugenden Narrativ verbunden wurden, um empirische Daten (Massen, Ladungen) zu erklären. Die übergreifenden Erzählungen von Schwinger und Heisenberg waren nicht identisch, aber ähnlich, und sie wurden von anderen Autoren übernommen, verändert und vermischt. Ein entscheidender Sprung in ihrer Plausibilität kam aber erst zustande, als ein neues Erzählelement empirischer Art in das Bild eingeführt wurde: eine Analogie mit dem Phänomen der Supraleitung. Dies geschah in einer Arbeit von Yoichiro Nambu und Giovanni Jona-Lasinio (1961). Um das Werk von Nambu und Jona-Lasinio zu verstehen, müssen wir uns kurz der Festkörperphysik zuwenden: Beim Phänomen der Supraleitung erreicht der elektrische Widerstand eines Materials unter bestimmten Umständen (z.B. niedrige Temperatur) einen Wert fast gleich null.¹⁴ Diese Erscheinung war seit dem frühen 20. Jahrhundert bekannt und, obwohl klar war, dass sie sich aus den elektromagnetischen Wechselwirkungen von Elektronen und Atomkernen ergab, war es niemandem gelungen, das Phänomen aus den Gesetzen des Elektromagnetismus abzuleiten. Im Jahre 1957 legten John Bardeen, Leo Neil Cooper und John Robert Schrieffer ein empirisch erfolgreiches Modell für die Supraleitung vor

¹⁴ Die folgende Darstellung der Geschichte der Supraleitung basiert auf Hoddeson et al. 1992.

(»BCS-Theorie«), das in den Jahren 1957 bis 1960 durch viele Autoren ausgebaut wurde, insbesondere durch Nikolay Bogoliubov. Die BCS-Bogoliubov-Theorie der Supraleitung war im Formalismus der Quantenfeldtheorie ausgedrückt, den Festkörperphysiker seit einigen Jahren übernommen und zu ihren Zwecken verändert hatten. In diesem Formalismus war der supraleitende Zustand eines Materials als ein »Vakuum« beschrieben, in dem sich »Quasiteilchen« bewegten.¹⁵ Die BCS-Bogoliubov-Theorie konnte nicht aus dem Elektromagnetismus streng abgeleitet werden und die Beziehung zwischen den beiden Theorien erschien in einiger Hinsicht rätselhaft, weil die Quasiteilchen jene Symmetrie (»Eichsymmetrie«) nicht besaßen, die für den Elektromagnetismus grundlegend war.

Im Jahr 1960 gab der japanische Physiker Yoichiro Nambu, der zu jenem Zeitpunkt in den USA arbeitete, eine neue Deutung dieses anscheinenden Symmetrieverlusts (Nambu 1960). Mithilfe nichtrigoroser Berechnungen zeigte er, dass die Gleichungen des Elektromagnetismus zwei Arten von Lösungen hatten: symmetrische Lösungen, die unter der Annahme der Gültigkeit der Störungstheorie mit perturbativen Methoden berechnet werden konnten, und nichtsymmetrische Lösungen, die nur durch Anwendung nichtperturbativer Methoden zu finden waren. Nur die nichtsymmetrischen Lösungen entsprachen dem supraleitenden Zustand. Der anscheinende Verlust der (Eich)Symmetrie war daher mit nichtperturbativen Effekten zu erklären. Diese Idee bot Ähnlichkeiten zu den Narrativen von Schwinger und Heisenberg, und so überrascht es nicht, dass kurze Zeit später Nambu und Giovanni Jona-Lasinio (1961) Nambus Idee auf die Teilchenphysik übertrugen. Unter explizitem Hinweis auf die Arbeit Heisenbergs schlugen die Autoren vor, dass die Massen zumindest einiger Teilchen durch nichtperturbative Effekte aus einer fundamentalen Theorie »dynamisch« entstehen würden (Nambu/Jona-Lasinio 1961, für »dynamical« siehe z.B. S. 345). Wie Heisenberg konnten auch Nambu und Jona-Lasinio keine exakten nichtperturbativen Berechnungen zur Unterstützung ihrer Auffassung anbieten, jedoch konnte sich ihre Theorie auf die formelle und empirische Analogie zur Supraleitung stützen. Diese Analogie demonstrierte, wie auch nichtrigore Berechnungen zu empirisch erfolgreichen Voraussagen führen konnten. Die beiden Autoren verbanden so Heisenbergs Narrativ mit Nambus früheren Ergebnissen: Berechne man aus der Lagrange-Dichte der Teilchenwechselwirkungen das Vakuum, erklärten sie, fände man zwei unterschiedliche Ausdrücke, je nachdem, ob man perturbative oder nichtperturbative Methoden anwende. So existierten ein symmetrisches, perturbatives Vakuum und ein nichtsymmetrisches, nicht-perturbatives Vakuum:

¹⁵ Quasiteilchen sind weder Elektronen noch Atomkerne, sondern mathematische Konstrukte, die keine unmittelbare physikalische Deutung zulassen.

»[T]he two worlds based on $\Omega(o)$ and $\Omega(m)$ [d.h. die beiden Vakua; Anm. AB] are physically distinct and outside of each other. No interaction or measurement, in the usual sense, can bridge them in finite steps.« (ebd., S. 350)

Nambu und Jona-Lasinio gaben zu, dass sie keine mathematisch strenge und physikalisch realistische Theorie zu bieten hätten, jedoch drückten sie zugleich die Überzeugung aus, dass ihre Arbeit auf die Existenz einer möglichen, mathematisch exakten Theorie hinweisen würde:

»We already remarked before that the model treated here is not realistic enough to be compared with the actual nucleon problem. Our purpose was to show that a new possibility exists for field theory to be richer and more complex than has been hitherto envisaged, even though the mathematics is marred by the unresolved divergence problem.« (ebd., S. 358)

5. Die »spontane« Symmetriebrechung

Die übergreifenden Narrative der Theorien von Schwinger, Heisenberg sowie Nambu und Jona-Lasinio waren nicht identisch, hatten jedoch viel gemeinsam. In allen existierten zwei Ebenen der Teilchenwelt: eine einfache, symmetrische, masselose Welt fundamentaler Teilchen und eine komplexe, nichtsymmetrische Vielfalt an massiven Teilchen. In beiden Welten herrschten die gleichen (mathematischen) Naturgesetze: Die erste Ebene war zwar fundamental, aber nur die zweite experimentell zugänglich. Der Übergang zwischen den beiden Ebenen entsprach prinzipiell einer »nichtperturbativen« mathematischen Prozedur, die allerdings niemand exakt beschreiben konnte. Dieser mathematisch noch unfassbare Übergang galt als Beschreibung eines physikalischen Prozesses des »Symmetrieverlustes« und der »Massenerzeugung«. Die physikalische (und nicht rein abstrakt-mathematische) Natur des Symmetrieverlustes war bereits bei Schwinger und Heisenberg angedeutet, wurde aber bei Nambu und Jona-Lasinio durch die Analogie zum Übergang eines Materials in den supraleitenden Zustand deutlich verstärkt. So galt die symmetrische, unbeobachtbare Lagrange-Dichte nicht als ein rein formelles Konstrukt, sondern als Beschreibung einer fundamentalen Teilchenrealität, deren Eigenschaften in den Phänomenen verloren oder zumindest versteckt waren. Dies war das in narrativer Hinsicht wichtigste gemeinsame Merkmal der drei Theorien. In anderer Hinsicht unterschieden sich die Theorien jedoch: Das »Vakuum« spielte in allen drei Erzählungen zwar eine zentrale Rolle, allerdings nicht immer dieselbe; und die mathematischen Fragmente und empirischen Verweise, die die Autoren mit ihren Überlegungen verbanden, waren sehr verschieden. Am Ende war keine vollständige mathematische

Theorie entstanden, aber die Ähnlichkeit und Flexibilität der verschiedenen Narrative erlaubte es späteren Forschern, die Erzählelemente neu zu kombinieren. Besonders wichtig war der Beitrag von Jeffrey Goldstone (1961), der auf eine grundlegende Schwierigkeit des Nambu-Jona-Lasinio-Modells hinwies: In der nichtsymmetrischen, massiven Welt waren immer auch masselose, ladungslose Teilchen (später »Goldstone-Bosonen« genannt) anwesend, die in der Wirklichkeit keine Entsprechung fanden: »A method for losing symmetry is of course highly desirable in elementary particle theory but these theories will not do this without introducing non-existent massless bosons.« (Goldstone 1961, S. 164)

Goldstone übernahm das Narrativ von Nambu und Jona-Lasinio, versuchte aber nicht, ein mathematisches Modell der fundamentalen symmetrischen Wechselwirkungen zu entwerfen, sondern wählte seinen Ausgangspunkt direkt bei einer Lagrange-Dichte, die die massive, nichtsymmetrische Welt beschreiben sollte. Sein Modell war nicht als realistischer Vorschlag gedacht (»this model has no direct physical application«), sondern als exploratives Werkzeug (ebd., S. 154). Die Tatsache, dass diese Lagrange-Dichte den nichtfundamentalen, nichtsymmetrischen Teilchen entsprach, wurde durch ein Skalarteilchen dargestellt, das einen nichtverschwindenden Vakuumerwartungswert hatte und als nichtfundamental anzusehen war (ebd., S. 154). Dieses Skalarteilchen war eine Art »Blackbox«, das die nichtperturbativen Effekte, die man nicht berechnen konnte, darstellte. Goldstones Modell war in mathematischer Hinsicht eine Vermischung aller drei im vorigen Abschnitt behandelten Theorien: Sie enthielt mehrere Vakua (wie bei Heisenberg sowie Nambu und Jona-Lasinio), aber auch ein Skalarteilchen, das in einem Vakuum nicht völlig verschwand (wie bei Schwinger).

Nach Goldstones Ergebnissen versuchten zahlreiche Autoren, zu zeigen, dass die unerwünschten masselosen Bosonen nicht immer auftauchen würden. Daraus ergaben sich insbesondere die Arbeiten jener Forscher, die den »Higgs-Mechanismus« formulierten: Philip Anderson, Robert Brout, François Englert, Gerald Guralnik, Carl Hagen, Peter Higgs, Thomas Kibble, Julian Schwinger.¹⁶ Ich werde diese Arbeiten weiter unten kurz besprechen, zunächst möchte ich aber den Aufsatz von Marshall Baker und Sheldon Glashow (1962) diskutieren, in dem der prägende Ausdruck »spontane Symmetriebrechung« eingeführt wurde. Anders als Goldstone versuchten die beiden Autoren, durch nichtperturbative Überlegungen zu zeigen, wie eine dynamische Erzeugung aller Teilchenmassen und -ladungen aus einer fundamentalen, einfachen Theorie prinzipiell möglich war. Der Aufsatz trug den Titel »Spontaneous Breakdown of Elementary Particle Symmetries« und die Autoren schrieben:

¹⁶ Für eine detaillierte Darstellung dieser Ereignisse mit weiterführender Literatur siehe Karaca 2013.

»Should not the complexities of the phenomena of elementary particle physics [...] arise from a ›simple‹ fundamental theory? [...] Since non-perturbative solutions to nonlinear equations do not in general possess the symmetry of the equations themselves, it is conceivable that the field equations may be highly symmetric expressions, while their solutions may reflect the asymmetries of nature. This is the philosophy we adopt in this paper. [...] We propose that a nonperturbative behaviour characterizes all the interactions to which elementary particles are subject. Mass is completely dynamical; mass splittings and ›approximate symmetries‹ result from nonsymmetric solutions to a fully symmetric Lagrangian theory.« (Baker/Glashow 1962, S. 2462–2463)

Baker und Glashow gaben von Anfang an zu, nur für die »Plausibilität« ihrer Hypothese zu argumentieren und keine strengen Beweise anbieten zu können. Ihre Theorie war durch ein hybrides Narrativ getragen, das mehrere Erzählelemente früherer Autoren übernahm. Die wichtigste neue Komponente – und diejenige, die sich als am nachhaltigsten erwies – war aber die Bezeichnung der Symmetriebrechung als »spontan«. Diese verbale Charakterisierung verbanden die Autoren mit verbalen und mathematischen Erzählelementen, die hier kurz betrachtet werden sollen. Baker und Glashow nahmen an, dass die fundamentalen Wechselwirkungen durch einfache, symmetrische Gleichungen bestimmt waren, die keine Massen oder Ladungen enthielten und sowohl perturbative und symmetrische als auch nichtperturbative und nichtsymmetrische Lösungen besaßen. Die physikalisch relevanten Lösungen waren nur diejenigen, die nichtperturbativ und nichtsymmetrisch waren, und in diesen Lösungen kamen genau jene Teilchen vor, die in der Realität beobachtet wurden. Baker und Glashow meinten, dass die Werte der Massen und Ladungen dieser Teilchen die einzige möglichen Werte waren, die sich aus einer masse- und ladungslosen fundamentalen Theorie dynamisch ergeben konnten. Auch hier entsprach ihre Aussage keiner strengen Berechnung, aber die Beschreibung war suggestiv: Wenn in einer Gleichung keine Massen und Ladungen als Input eingegeben wurden, aber sich daraus als Lösung massive, geladene Teilchen ergaben, dürfte diese Entstehung von Eigenschaften als »spontan« und die Werte als »selbst-erzeugt« (»self-generated«) erscheinen. Die Gleichung für die Teilchenwechselwirkungen

»[...] imposes the condition that the allowable interactions are just those that can arise spontaneously without the introduction of the arbitrary parameters f_0 and g_0 [d.h. die Ladungen der fundamentalen Theorie; Anm. AB]. [...] We have explored the possibility that the complex of fundamental interactions can be understood in terms of the stable self-generated solutions of the [...] equations of the field theory.« (ebd., S. 2470f.)

So war der Übergang von der fundamentalen auf die beobachtbare Ebene der Teilchenwelt eine »spontane Selbsterzeugung« der beobachteten Massen und Wechselwirkungen. Diese Spontaneität wurde später zu einem zentralen Element der Higgs-Erzählung.

6. Der Higgs-Mechanismus entsteht

Die Autoren, die in den Jahren 1964 bis 1966 den »Higgs-Mechanismus« entwickelten, folgten einer anderen Forschungsstrategie als Baker und Glashow. Wie Goldstone arbeiteten sie mit einer Lagrange-Dichte, in der ein Skalarteilchen mit Vakuumerwartungswert von Anfang an vorkam – ein Skalarteilchen, das heute als »Higgs-Teilchen« bekannt ist. Wie bei Goldstone stellte dieses Teilchen das Ergebnis von noch nicht berechenbaren, nichtperturbativen Effekten der fundamentalen Wechselwirkungen dar und wirkte daher als eine Art ›Platzhalter‹ für ein komplexes, physikalisch höchst bedeutendes mathematisches Konstrukt, das (noch?) nicht formuliert werden konnte. So schrieb Peter Higgs 1966:

»The idea that the apparently approximate nature of the internal symmetries of elementary particle physics is the result of asymmetries in the stable solutions of exactly symmetric dynamical equations, rather than an indication of asymmetry in the dynamical equations themselves, is an attractive one. Within the framework of quantum field theory such as a ›spontaneous‹ breakdown of symmetry occurs if a Lagrangian, fully invariant under the internal symmetry group, has such a structure that the physical vacuum is a member of a set of (physically equivalent) states which transform according to a nontrivial representation of the group. [...] That vacuum expectation values of scalar fields, or ›vacuons‹, might play such a role in the breaking of symmetries was first noted by Schwinger and by Salam and Ward.« (Higgs 1966, S. 1156)

Higgs verbale Beschreibung mag wie ein Hinweis auf eine mathematische Theorie klingen, aber er konnte eine solche Theorie genauso wenig formulieren wie seine Vorgänger. In diesem Aufsatz bot er nur eine Diskussion der »simplest possible relativistic field theory«, in der das Skalarteilchen mit Vakuumerwartungswert von Anfang an vorhanden war (ebd., S. 1158). Interessanterweise übernahm Higgs die suggestive Bezeichnung »spontan« von Baker und Glashow, obwohl er nichts über nichtperturbative Effekte sagte; der oben zitierte Aufsatz hieß: »Spontaneous Symmetry Breakdown Without Massless Bosons«. Zwischen 1964 und 1966 zeigten Anderson, Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Higgs, Kibble und Schwinger, dass es im Fall einer bestimmten Art von Symmetrie (lokale Eichsymmetrie) möglich war, eine Lagrange-Dichte wie jene Goldstones zu schreiben, in der zwar Massen und ein massives Skalarteilchen mit Vakuumerwartungswert,

aber keine unerwünschten masselosen Goldstone-Bosonen vorkamen. Diese Lagrange-Dichte galt dann als Endprodukt einer »Massenerzeugung« durch »spontane Symmetriebrechung«, für die allerdings keine belastbare mathematische Formulierung vorlag. Dass dieses hybride Narrativ einen physikalischen Prozess beschrieb, wurde dennoch durch die verbale Bezeichnung »Mechanismus« ausgedrückt.¹⁷

Diese Erzählung war so suggestiv, dass sie Steven Weinberg und Abdus Salam dazu motivierte, die Hypothese aufzustellen, dass Theorien, in denen sich Massen »spontan« ergaben, auch die formelle Eigenschaft der »Renormierbarkeit« besitzen würden.¹⁸ Salam und Weinberg veröffentlichten in den Jahren 1967 bis 1968 unabhängig voneinander zwei Aufsätze, in denen die Lagrange-Dichte erschien, die heute die Weinberg-Salam-Theorie der elektroschwachen Wechselwirkungen definiert (Salam 1968; Weinberg 1967). Es war eine Lagrange-Dichte, die Massen und ein Skalarteilchen enthielt und als Resultat einer spontanen Symmetriebrechung gedacht wurde. Üblicherweise würden Massen die Renormierbarkeit zerstören, jedoch meinten Weinberg und Salam, dass die spontane Massenerzeugung die Renormierbarkeit garantieren konnte. Keiner der beiden Autoren versuchte, mathematische Argumente zur Unterstützung dieser Hypothese vorzubringen, sondern beide stützten sich ausschließlich auf die Autorität des Narrativs der Massenerzeugung durch spontane Symmetriebrechung. Salam meinte, dass die spontane Symmetriebrechung »sanfter« (»more gently«) erfolgen würde als eine »gewalttätige« (»brutal«) Einführung von Massetermen per Hand (Salam 1968, S. 369). Weinberg fragte in seiner Theorie: »Is this model renormalizable?«, und suggerierte, dass dies der Fall sein könnte, weil die Vektorbosonen »get their mass from the spontaneous breaking of the symmetry, not from a mass term put in at the beginning« (Weinberg 1967, S. 1266).

Erst 1971 legte Gerhard 't Hooft einen ersten, noch unvollständigen Beweis der Renormierbarkeit des Weinberg-Salam-Modells vor, der kurze Zeit später durch andere Autoren ergänzt wurde, und bald zur Entstehung der empirisch erfolgreichen Theorie der elektroschwachen Wechselwirkungen führte ('t Hooft 1997). Dieser Erfolg wurde als Bestätigung der Geltung des gesamten Narrativs der Massenerzeugung durch Symmetriebrechung aufgenommen. In den frühen 1970er Jahren mehrten sich die Versuche, das hybride narrative Konstrukt der spontanen Symmetriebrechung zu verwenden, um die Entstehung aller Teilcheneigenschaften dynamisch zu erklären. Jedoch interessierten sich die Theoretiker immer weni-

¹⁷ Zum Beispiel »mechanism of symmetry breakdown« (Higgs 1966, S. 45).

¹⁸ Wie in Abschnitt 3 erklärt, müssen in quantenfeldtheoretischen Berechnungen die divergierenden Terme formell »subtrahiert« werden. Diese Prozedur der »Renormierung« lässt sich aber nicht mit allen Lagrange-Dichten durchführen, und es war damals unklar, ob die Weinberg-Salam-Theorie renormierbar ist.

ger für die Frage, wie die fundamentale, symmetrische Ebene der Teilchenwelt aussieht, und bis heute gibt es keine mathematische Theorie, die dem Übergang von Symmetrie zu Asymmetrie entsprechen würde.¹⁹

Mit der Zeit wurde die Lagrange-Dichte mit dem Higgs-Teilchen nicht mehr als Ergebnis von unbekannten nichtperturbativen Effekten angesehen, sondern als Beschreibung fundamentaler Wechselwirkungen. Dies bedeutete aber nicht, dass das Narrativ eines spontanen Übergangs von Symmetrie zu Asymmetrie und einer damit verbundenen Massenerzeugung seine Glaubwürdigkeit verloren hatte: ganz im Gegenteil, wie wir in Abschnitt 2 gesehen haben. Mit dem Wegfallen der Ebene der Teilchenwelt ist das Higgs-Teilchen, das ursprünglich nur eine Blackbox für nichtperturbative Effekte war, zum »Gottesteilchen« geworden: zur »Ursache« einer »spontanen« Symmetriebrechung, die Massen erzeugt. Die Entstehung der Massen ist in der heutigen Kosmologie sogar als eine reale Episode der Frühgeschichte des Universums etabliert. Diese Idee entstand erst in den 1970er Jahren, als Teilchenphysik und Kosmologie näher aneinanderrückten (Kaiser 2006). Einige Autoren äußerten die Vermutung, dass die Analogie zwischen Supraleitung und Teilchenphysik an ihre Grenzen geführt werden konnte: Ebenso wie ein Material durch Kühlung vom normalen in den supraleitenden Zustand übergehen konnte, war das Universum bei der Abkühlung nach dem Urknall von einem symmetrischen Zustand, in dem alle Teilchen masselos waren, in den heutigen, nichtsymmetrischen Zustand übergegangen, in dem die meisten Teilchen Masse besitzen. Diese Idee wurde zuerst durch Wissenschaftler aus dem ›Ostblock‹ am Anfang der 1970er Jahre geäußert; in der westlichen Wissenschaftswelt wurde sie erst durch Steven Weinberg (1974) bekannt, der sie auch in seinem populären Werk »The First Three Minutes« (1977) erwähnte – ein Buch, das eine wissenschaftliche Alternative zur Genesis anbieten wollte (Weinberg 1974, 1977, S. 142–146). Dies war der erste Auftritt des symmetriebrechenden Skalarfeldes auf einer populärwissenschaftlichen Bühne, und wir sehen, dass es sich hier keinesfalls um eine Erfindung zwecks Popularisierung handelte, sondern um eine vereinfachte Version einer echten wissenschaftlichen Erzählung. Der Theoretiker Anthony Zee hat über die approximiativen Gleichungen, die das kosmologische Higgs-Narrativ stützen, geschrieben: »Some physicists, myself included, feel that there may be something profound here that we have not quite understood.« (Zee 2010, S. 289)

¹⁹ Heute gibt es zwar Vorschläge für eine streng mathematische Definition der spontanen Symmetriebrechung, aber autoritative Stimmen meinen, dass nach einer solchen rigorosen Bestimmung der »Higgs-Mechanismus« keine spontane Symmetriebrechung wäre. Dazu siehe z.B. 't Hooft 1997, S. 196, Anmerkung 15; Strocchi 2008, S. 193–195. Für eine philosophische Kritik der »Massenerzeugung« durch spontane Symmetriebrechung siehe z.B. Earman 2003; Liu/Emch 2005; Lyre 2008.

7. Schlusswort

In der heutigen Hochenergiephysik haben Theorien oft einen hybriden Charakter und bestehen aus einer Kombination von mathematischen Elementen, verbalen Äußerungen, Analogien mit anderen Physikbereichen etc. Diese inhomogenen Komposita finden ihre Einheit nicht in einem logischen Aufbau, sondern dank Erzählstrukturen, die die vielfältigen Elemente des Konstruktums umfassen und das Ganze als einheitliche, wenn auch provisorische Theorie erscheinen lassen. Diese Narrative finden oft in vereinfachter Form in der Wissenschaftspopularisierung Anwendung, dennoch werden sie nicht zu diesem Zweck erfunden. Ich habe in meinem historischen Überblick über die Entstehung des Narratifs der Massenerzeugung durch spontane Symmetriebrechung gezeigt, wie ein solches hybrides Konstrukt zustande kam. Trotz ihrer sehr fragmentarischen Natur beansprucht heute diese Erzählung hohe wissenschaftliche Geltung als Leitfaden für die Erforschung des »Ursprungs der Masse«. Wissenschaftsphilosophen analytischer Prägung, die besonderen Wert auf mathematische Strenge legen, kritisieren oft die Kluft zwischen der beanspruchten Autorität und der tatsächlichen Tragweite des Mechanismus der Massenerzeugung (Earmann 2003; Liu/Emch 2005; Lyre 2008). Physiker ignorieren aber zumeist diese Kritiken oder reagieren darauf mit Unverständnis und meinen, Philosophen würden in Worten wie »Massenerzeugung« zu viel lesen wollen. Dennoch ist der Higgs-Mechanismus eine Erzählung ohne mathematischen Nachweis. Physiker empfinden sie als Platzhalter für eine noch nicht vorhandene mathematische Theorie, und nur aus diesem Grunde darf das hybride Narrativ bei ihnen die gleiche Geltung beanspruchen wie die unbekannten Gleichungen, die es vertritt. Das epistemische Zusammenfallen des hybriden Gebildes und der ideellen Theorie ist für die Physiker sehr wichtig, und sie reagieren möglicherweise deswegen sehr empfindlich auf Arbeiten von Historikern, Philosophen und Soziologen, in denen die Frage der menschlichen Autorschaft wissenschaftlichen Wissens von der Frage seiner Geltung systematisch getrennt und Wissen als ein »Konstrukt« betrachtet wird. Aus Sicht der Physiker ist bereits eine solche prinzipielle Trennung eine Bedrohung der epistemischen Geltung von Theorien narrativen Charakters, weil diese für sie nur als vorläufiger Ersatz für exakte mathematische Modelle in die Wissenschaft Eingang finden dürfen.

Literaturverzeichnis

- Atiyah, Michael et al. (1994): »Responses to ›Theoretical Mathematics: Towards a Cultural Synthesis of Mathematics and Theoretical Physics‹, by A. Jaffe and F. Quinn«, in: *Bulletin (New Series) of the American Mathematical Society*, 30, S. 178–207.
- Baker, Marshall/Glashow, Sheldon (1962): »Spontaneous Breakdown of Elementary Particle Symmetries«, in: *Physical Review* 128, S. 2462–2471.
- Borrelli, Arianna (2010): »Dirac's bra-ket notation and the notion of a quantum state«, in: Hermann Hunger (Hg.): *Styles of Thinking in Science and Technology. Proceedings of the 3rd International Conference of the European Society for the History of Science, Vienna, September 10–12, 2008*, Wien: VÖAW, S. 361–371.
- Borrelli, Arianna (2012): »The Case of the Composite Higgs: The Model as a ›Rosetta Stone‹ in Contemporary High-Energy Physics«, in: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 43, S. 195–214.
- Borrelli, Arianna (i.E.): »From Logos to Mythos: ›Naturalness in High-Energy Physics«, in: Hermann Blume und Christoph Leitgeb (Hg.): *Narrated Communities – Narrated Realities*, Amsterdam: Rodopi.
- Borrelli, Arianna (i.E.): The story of the Higgs boson: the origin of mass in early particle physics, in: *European Physical Journal H*.
- Brown, Laurie/Cao, Tian Yu (1991): »Spontaneous Breakdown of Symmetry: Its Rediscovery and Integration into Quantum Field Theory«, in: *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 21, S. 211–235.
- Brown, Laurie/Hoddeson, Lillian (Hg.) (1986): *The Birth of Particle Physics*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Cat, Jordi (1998): »The Physicists' Debates on Unification in Physics at the End of the 20th Century«, in: *Historical Studies in the Physical Sciences* 28, S. 254–299.
- Chew, Geoffrey F. (1989): »Particles as S-Matrix Poles: Hadron Democracy«, in: Laurie M. Brown, Max Dresden und Lillian Hoddeson (Hg.), *Pions to Quarks*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 600–607.
- Doxiadis, Anton/Mazur, Barry (Hg.) (2012): *Circles Disturbed. The Interplay of Mathematics and Narrative*, Princeton: Princeton University Press.
- Dürr, Hans-Peter/Heisenberg, Werner/Mitter, Heinrich/Schlieder, Siegfried/Yamazuki, Kazuo (1959): »Zur Theorie der Elementarteilchen«, in: *Zeitschrift für Naturforschung* 14a(5/6), S. 441–485.
- Earman, John (2003): »Rough Guide to Spontaneous Symmetry Breaking«, in: Elena Castellani und Katherine Brading (Hg.): *Symmetries in Physics*, Cambridge: Cambridge University Press, S. 335–346.
- Galison, Peter (2004): »Mirror Symmetry: Persons, Values, and Objects«, in: M. Norton Wise (Hg.), *Growing Explanations. Historical Perspectives on Recent Science*, Durham: Duke University Press, S. 23–63.
- Goldstone, Jeffrey (1961): »Field Theories with ›Superconductor‹ Solutions«, in: *Nuovo Cimento* 19, S. 154–164.

- Hartmann, Stephan (1999): »Models and Stories in Hadron Physics«, in: Mary S. Morgan und Margaret Morrison (Hg.), *Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science*, Cambridge: Cambridge University Press, S. 326–346.
- Higgs, Peter W. (1966): »Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons«, in: *Physical Review* 145, S. 1156–1163.
- Hoddeson, Lillian/Schubert, Helmut/Heims, Steve J./Baym, Gordon (1992): »Collective Phenomena«, in: Lillian Hoddeson, Jürgen Teichmann, Spencer Weart und Ernest Brown (Hg.): *Out of the Crystal Maze*, Oxford: Oxford University Press, S. 489–616.
- Kaiser, David (2006): »Whose Mass is it anyway? Particle Cosmology and the Objects of Theory«, in: *Social Studies of Science* 36, S. 533–564.
- Karaca, Koray (2013): »The Construction of the Higgs Mechanism and the Emergence of the Electroweak Theory«, in: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 44, S. 1–16.
- Kragh, Helge (2012): *Niels Bohr and the Quantum Atom. The Bohr Model of Atomic Structure 1913–1925*, Oxford: Oxford University Press.
- Landua, Rolf (2008): *Am Rand der Dimensionen. Gespräche über die Physik am CERN*, Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Lévi-Strauss, Claude (1993): *Die Luchsgeschichte*, München: Carl Hanser (frz. Orig. 1991).
- Liu, Chuang/Emch, Gérard G. (2005) : »Explaining Quantum Spontaneous Symmetry Breaking«, in: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 36, S. 137–163.
- Lyre, Holger (2008): »Does the Higgs Mechanism Exist?«, in: *International Studies in the Philosophy of Science* 22, S. 119–133.
- Nambu, Yoichiro (1960): »Quasi-Particles and Gauge Invariance in the Theory of Superconductivity«, in: *Physical Review* 117, S. 648–663.
- Nambu, Yoichiro/Jona-Lasinio, Giovanni (1961): »Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity I«, in: *Physical Review* 122, S. 345–358.
- Peskin, Michael E./Schroeder, Daniel V. (1995): *An Introduction to Quantum Field Theory*, Boulder: Westview.
- Plotnitsky, Andrey (2005): »Science and Narrative«, in: David Herman, Manfred Jahn und Marie-Laure Ryan (Hg.): *Routledge Encyclopedia of Narrative Theory*, London: Routledge, S. 514–518.
- Ryan, Marie-Laure (2005): »Media and Narrative«, in: David Herman, Manfred Jahn und Marie-Laure Ryan (Hg.): *Routledge Encyclopedia of Narrative Theory*, London: Routledge, S. 288–293.
- Salam, Abdus (1968): »Weak and Electromagnetic Interactions«, in: Nils Svartholm (Hg.): *Elementary Particle Theory*, Stockholm: Almqvist and Wiksell, S. 367–377.
- Schrempp, Gregory (2002): *Ancient Mythology and Modern Science*, Bloomington: Indiana University Press.
- Schwinger, Julian (1957): »A Theory of the Fundamental Interaction«, in: *Annals of Physics* 2, S. 407–434.

- Strocchi, Franco (2008): *Symmetry Breaking*, Berlin: Springer.
- 'tHooft, Gerhard (1997): »Renormalization of gauge theories«, in: Lillian Hoddeson, Laurie Brown, Max Dresden und Michael Riordan (Hg.): *The Rise of the Standard Model*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 179–198.
- Weinberg, Steven (1967): »A Model of Leptons«, in: *Physical Review Letters* 19, S. 1264–1266.
- Weinberg, Steven (1974): »Gauge and Global Symmetries at High Temperature«, in: *Physical Review D* 9, S. 3357–3378.
- Weinberg, Steven (1977): *The First Three Minutes*, New York: Basic Books.
- Weinberg, Steven (1996): *The Quantum Theory of Fields. Bd. 2: Modern Applications*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Wilczek, Frank (2009): »Quantum field theory«, in: Daniel Greenberger, Klaus Hentschel und Friedel Weinert (Hg.): *Compendium of Quantum Physics*, Berlin: Springer, S. 549–564.
- Zee, Anthony (2010): *Quantum Field Theory in a Nutshell*, Princeton: Princeton University Press.