

PHILOSOPHIE

Sein oder Nichtsein?

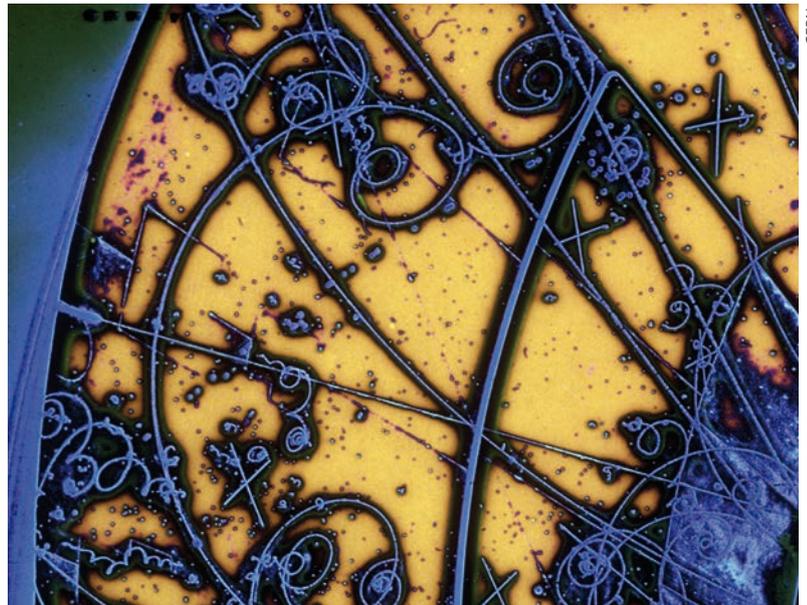
Felder, Teilchen, Tropen – die Quantenfeldtheorie im Dialog zwischen Philosophie und Physik.

Meinard Kuhlmann

Die Quantenfeldtheorie gehört zu den erfolgreichsten Theorien, die es je gab. Sie hat sich bei der Erklärung der verschiedensten Phänomene bewährt, ihre Vorhersagen sind von unübertroffener Genauigkeit. Damit könnte man sich zufrieden geben. Doch wer ein tieferes Verständnis dieser und anderer fundamentaler Theorien sucht, kommt nicht umhin, sich ihr auch mit philosophischen Mitteln zuzuwenden. Gleichzeitig ist die Philosophie damit konfrontiert, dass sie sich auch im Licht der physikalischen Erkenntnisse bewähren sollte. Ein Frage, in der Philosophie und Physik aufeinander treffen, lautet: Was sind eigentlich die fundamentalen „Entitäten“ der Quantenfeldtheorie, und sind sie real?

Die Ontologie befasst sich in der Philosophie mit dem Seienden im allgemeinsten Sinne. Nach traditioneller Auffassung ist sie eine so allgemeine Disziplin, dass für sie keine speziellen wissenschaftlichen Einsichten eine Relevanz haben. Im Rahmen der Ontologie geht es beispielsweise ganz allgemein darum, was Eigenschaften und Dinge sind und wie sie zueinander stehen. Sind Eigenschaften Teile von Dingen? Aber wie könnten dann zwei verschiedene Dinge dieselbe Eigenschaft haben? Und wieso sagen wir manchmal, dass Dinge (wie etwa Menschen) sich verändern und trotzdem ihre Identität beibehalten, und manchmal, dass Dinge durch Veränderung aufhören zu existieren, wie etwa beim Schmelzen eines Eiswürfels? Wie immer man diese Fragen beantworten möge, die Antworten scheinen nicht davon abzuhängen, welche Eigenschaften und Dinge es konkret in der Welt gibt. Denn das sind zufällige Tatsachen, die auf allgemeine Überlegungen keinen Einfluss haben können – so wie es auch für die Arithmetik keine Bedeutung hat, welche Dinge zahlenmäßig erfasst werden.

Doch immer wieder haben Ergebnisse der empirischen Wissenschaften, nicht zuletzt in der modernen Physik, angebliche Denknöten ins Wanken gebracht: Raum und Zeit sind nicht notwendig euklidisch, Kausalität impliziert doch keinen Determinismus, oder zwei Dinge (wie Elektronen) können in allen Eigenschaften übereinstimmen und trotzdem nicht ein und dasselbe Ding sein. Angesichts solcher Erfahrungen ist in der so genannten analytischen Ontologie heute die Ansicht verbreitet, dass eine Berücksichtigung aktueller naturwissenschaftlicher Erkenntnisse



CERN

unverzichtbar ist. Die Ansätze der Ontologie müssen sich im Lichte dieser Erkenntnisse bewähren.

Wenn wir ehrlich sind, erwarten nicht nur Laien, sondern auch viele Physiker von Theorien mehr als präzise Vorhersagen, sie gehen davon aus, dass uns erfolgreiche Theorien auch etwas über die Beschaffenheit der Welt sagen. Oder plakativ und stärker im Sinne eines „Realismus“ formuliert: Unsere Theorien sind keine bloßen Vorhersageinstrumente, sondern sie beschreiben die Welt annähernd so, wie sie unabhängig von unserer Erkenntnis tatsächlich ist.

Wenn wir das so sehen, möchten wir natürlich ein möglichst kohärentes Bild erlangen. Dieses Bild ist

Spuren in einer Blasenkammer scheinen zu zeigen, dass wir es mit Teilchen zu tun haben. Aber ist das wirklich so?

KOMPAKT

- In der modernen Physik, speziell der Quantenfeldtheorie, lassen sich starke Argumente dafür finden, dass Teilchen oder Felder nicht ontologisch primär sind.
- Stattdessen nehmen insbesondere Symmetrie-Strukturen eine zentrale Rolle ein.
- Ontologisch trägt man dem jedoch am besten nicht dadurch Rechnung, dass man Strukturen selbst zu den fundamentalen Elementen erhebt, sondern dadurch, dass uns Symmetrien den Weg zu den fundamentalen Elementen der Ontologie weisen.
- Ein viel versprechender Ansatz ist die „Tropen-Ontologie“, in der Bündel von Eigenschaften („Tropen“) die Dinge konstituieren.

Priv.-Doz. Dr. Meinard Kuhlmann, Philosophisches Seminar, Johannes-Gutenberg-Universität, 55099 Mainz

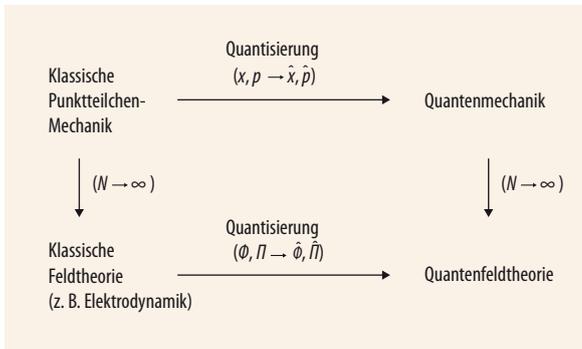


Abb. 1 Zur Quantenfeldtheorie lässt sich auf zwei unabhängige Wege gelangen: direkt von einer klassischen Feldtheorie startend oder von einer Teilchentheorie aus.

aber nicht einfach von unseren Theorien abzulesen. Dies gilt insbesondere für die Quantenfeldtheorie, welche trotz ihres großen Erfolges kein Musterbeispiel einer klar strukturierten Theorie ist. So ist nicht klar, welche „Typen von Seiendem“ („Entitäten“) überhaupt fundamental sind und welche abgeleitet. Dies sieht man unter anderem daran, dass sich die Quantenfeldtheorie in unterschiedlicher Weise formalisieren lässt. Sowohl Teilchen- als auch Feldaspekt scheinen demnach tief in der Quantenfeldtheorie verankert zu sein (Abb. 1). Doch bei genauerer Betrachtung zeigt sich, welche Probleme auftreten, wenn man Teilchen oder Felder als fundamental ansieht. Im Folgenden werde ich daher auch dafür plädieren, sich von alten Vorstellungen zu verabschieden.

No-go für Teilchen

Dass die Quantenfeldtheorie von Teilchen handelt, scheint offensichtlich zu sein [1], schließlich erklärt sie doch offensichtlich die Phänomenologie von Streuexperimenten in Teilchenbeschleunigern. Und was anderes als Teilchen sollte sonst beschleunigt und zur Kollision gebracht werden? Zudem kennt jeder die Teilchenbahnen aus Nebelkammeraufnahmen von der Kollision von Elementarteilchen (Abb. auf S. 29). Doch die vermeintlichen Teilchenbahnen in Nebelkammern sind alles andere als scharf. Das würde auch Heisenbergs Unschärferelation zuwiderlaufen. Bei genauerer Betrachtung haben wir es stattdessen mit einer Ansammlung von voneinander getrennten Bläschen zu tun (Abb. 2), die wir lediglich intuitiv zu einer zusammenhängenden Teilchenspur vervollständigen.

Weitere Überlegungen zeigen sogar, dass man bei einem Quantenobjekt nicht nur davon ausgehen muss, dass es nicht scharf lokalisiert ist, sondern dass es sich in der Regel überhaupt nicht in einem endlichen Bereich befindet. Am klarsten lässt sich dies mit so genannten No-go-Theoremen zeigen, die in philosophischen Debatten zu den stärksten Argumenten zählen [2 – 4]. Das Ziel besteht darin zu zeigen, dass eine bestimmte Menge von Annahmen inakzeptable Konsequenzen hat. Das kann ein logischer Widerspruch sein, oft genug folgt, dass die Annahmen in

Konflikt zu etwas stehen, das wir nicht anzweifeln bzw. aufgeben wollen. Dies können empirische Ergebnisse oder sehr gut bestätigte Sätze unserer Theorien sein. In einem der bekanntesten No-go-Theoreme wird aus der Annahme lokaler verborgener Parameter die Bellsche Ungleichung abgeleitet, die sowohl empirisch verletzt ist als auch in Konflikt zur Quantenmechanik steht.

Im konkreten Fall unseres Nicht-Lokalisierbarkeits-Theorems macht man einige schwache Annahmen für ein relativistisches, quantenmechanisches Teilchen. Der Teilchencharakter wird dabei nicht zuletzt durch die Annahme eingefangen, dass ein Teilchen nicht gleichzeitig in zwei disjunkten, also nichtüberlappenden Gebieten sein kann. Diese Annahme führt zusammen mit weiteren Bedingungen (und nach aufwändiger Argumentation) zu einer inakzeptablen Konsequenz: Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Ortsdetektor in irgendeinem endlichen Gebiet anspricht, ist gleich Null. Inakzeptabel ist diese Konsequenz deswegen, da wir ja wissen, dass endliche Detektoren wie z. B. Nebelkammern oder Photoplatten Ergebnisse für Ortsmessungen liefern. Wenn man dieses No-go-Theorem als stichhaltig ansieht, muss man mindestens eine der gemachten Annahmen fallen lassen. Will man aber nicht an fundamentalen relativistischen und quantenmechanischen Annahmen wackeln, so bleibt als Ausweg nur, sich von einer Teilcheninterpretation zu verabschieden.

Ein weiteres, besonders frappierendes Argument gegen eine Teilcheninterpretation der Quantenfeldtheorie ergibt sich aus dem Unruh-Effekt, benannt nach seinem Entdecker Bill Unruh [5]. Der quantenfeldtheoretische Vakuumzustand ist der Zustand kleinstmöglicher Energie. Außerdem ist das Vakuum der Eigenzustand $|0\rangle$ des Teilchenzahloperators mit dem Eigenwert 0, also ein Zustand mit null Teilchen. Man sollte jetzt denken, im Vakuum gibt es absolut nichts. Doch weit gefehlt. Beschleunigen wir in einem Raumschiff und lassen unseren Teilchendetektor nochmal messen, so misst dieser ein thermisches Bad von Teilchen – so Unruhs Fazit auf Grundlage seiner allgemein akzeptierten Rechnungen im Rahmen der Quantenfeldtheorie auf gekrümmten Hintergründen

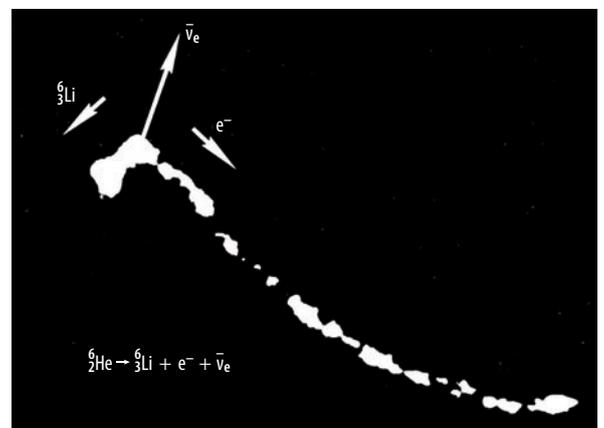


Abb. 2 Nebelkammeraufnahme eines Beta-Minus-Zerfalls von Helium: Wir vervollständigen die getrennten Bläschen intuitiv zu einer Teilchenspur.

(physikalisch: in allgemeinen Gravitationsfeldern). Aus praktischen Gründen ist dieser Effekt bisher allerdings nicht empirisch nachweisbar. Die Theorie sagt uns also, dass wir zahllose Teilchen messen sollten mit einer Verteilung, die von einer Temperatur abhängt, die sich über Unruhs Formel aus unserer Beschleunigung ergibt. Vor dem Hintergrund einer Teilcheninterpretation ist dies ein weiterer sehr verstörender Befund: Wären Teilchen die fundamentalen mikroskopischen Bausteine unserer Welt, so sollte die lokale Messung ihrer Anzahl nicht vom Bewegungszustand des Messgerätes abhängen.¹⁾

Abstrakte Felder

Ein klassisches Feld weist jedem Punkt der Raumzeit eine physikalische Größe zu, beispielsweise die elektrische oder magnetische Feldstärke. Ein elektrisches Feld lässt unsere Haare zu Berge stehen, ein Magnetfeld zwingt Eisenfeilspäne, sich um einen Stabmagneten zu ordnen (Abb. 3). In der Quantenfeldtheorie werden elektrische, magnetische und weitere Felder mit den Mitteln der Quantentheorie behandelt.²⁾ Anders als bei klassischen Feldern geht es bei einem Quantenfeld um abstrakte mathematische Ausdrücke, die nicht bestimmte Messwerte darstellen, sondern mögliche Arten von Messungen. Manche mathematischen Gebilde repräsentieren zwar physikalische Werte, doch diese lassen sich nicht bestimmten Punkten der Raumzeit zuordnen, sondern nur „verschmierten“ Gebieten.

Wie wir oben gesehen haben, entsteht die Quantenfeldtheorie durch „Quantisieren“ aus einer klassischen Feldtheorie. Dabei werden Ausdrücke für definite physikalische Größen durch Operatoren, insbesondere Differentialoperatoren, ersetzt, die für mathematische Vorgänge stehen und erst wieder zu definiten Größen führen, wenn sie auf etwas wie Zahlen oder Vektoren einwirken. Manche Operatoren in der Quantenphysik beschreiben bestimmte physikalische Prozesse wie das Aussenden oder Absorbieren von Licht. Operatoren sind abstrakte Gebilde und erhöhen gewissermaßen den Abstand zwischen Theorie und Realität. Ein klassisches Feld entspricht einer Wetterkarte, welche die Temperatur in verschiedenen Städten anzeigt. Die Quantenversion ähnelt einer Karte, die nicht „40 Grad“ anzeigt, sondern den Differentialoperator „ $\partial/\partial x$ “. Um etwas zu erhalten, das einem bestimmten Temperaturwert entspricht, müsste man den Operator erst auf eine weitere mathematische Größe anwenden, den so genannten Zustandsvektor des betreffenden Systems.

Die Notwendigkeit, das Quantenfeld auf den Zustandsvektor anzuwenden, macht es sehr schwierig, das Quantenfeld als Beschreibung der physischen Welt zu verstehen. Ein klassisches Feld beschreibt beispielsweise ganz anschaulich, wie sich Lichtwellen durch den Raum ausbreiten. Der Zustandsvektor dagegen beschreibt das gesamte System, er ist ganzheitlich („holistisch“) und liefert keine konkreten Angaben für einen bestimmten Ort oder eine Verteilung in der Raumzeit.

Offensichtlich ist das Standardbild von Elementarteilchen, zwischen denen Kraftfelder wirken, keine brauchbare Ontologie – es drückt nicht aus, was in der physikalischen Welt wirklich vorgeht, wenn wir den Theorien glauben [8]. Auch wird nicht klar, was ein Teilchen oder ein Feld eigentlich ist. Dabei hilft es nicht, diese als komplementäre Aspekte der Realität zu betrachten. Beide funktionieren ja selbst dann nicht, wenn wir angeblich nur den einen oder den anderen Aspekt vor uns haben.

Folgenreiche Symmetrien

Für die Quantenfeldtheorie eröffnen sich jedoch ontologische Alternativen zu Teilchen und Feldern, wenn man sich Symmetrien zuwendet. Diese spielen in der Physik eine kaum zu überschätzende Rolle, weil sie mit den Erhaltungssätzen für physikalische Größen verknüpft sind [9]. So ist die Galilei-Invarianz die (Form-) Invarianz der Gesetze der klassischen Mechanik bei räumlichen Translationen. Eine solche Invarianz lässt sich nicht als Symmetrie eines gegebenen Objekts ansehen, sie ist aber insofern anschaulich, als sie mit Invarianzen in Raum und Zeit zu tun hat. Neben Translationen gibt es noch zwei weitere wichtige raumzeitliche Transformationen, nämlich Rotationen und, in relativistischen Theorien, spezielle Lorentz-Transformationen („Boosts“). Die Invarianz unter diesen drei Typen von raumzeitlichen Transformationen ist als „Poincaré-Gruppe“ zusammengefasst, die für unsere ontologischen Überlegungen noch wichtig sein wird.

Neben raumzeitlichen Symmetrien gibt es die grundsätzlich anderen „inneren“ Symmetrien. Darunter findet sich die für die Entwicklung der modernen Physik und insbesondere der QFT entscheidende „Eichsymmetrie“. Sie begegnet uns bereits in der klassischen Elektrodynamik, wo sich die Maxwell-Gleichungen nicht nur mit elektrischen und magnetischen Feldern formulieren lassen, sondern eleganter und kompakter mit Potentialen. Bei der Wahl der Potentiale gibt es einen gewissen Spielraum, solange nur die daraus resultierenden elektrischen und magnetischen Felder gleich bleiben. Mit anderen Worten: Man kann die Potentiale wie einen Maßstab so eichen wie man

1) Wen einige vorsichtige Formulierungen im letzten Absatz wundern, der vertiefe sich in die spannende Kritik von Unruhs Fazit in [6].

2) Es gibt im Folgenden einige Überschneidungen mit [7].

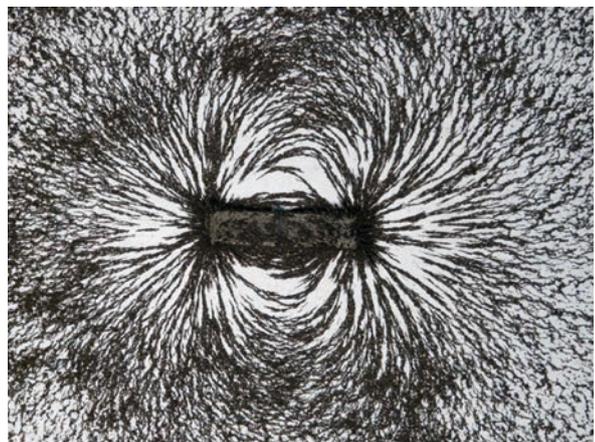


Abb. 3 Ein klassisches Magnetfeld lässt sich mit Hilfe von Eisenfeilspänen sichtbar machen.

will. Wir haben es hier also mit Transformationen zu tun, die bestimmte physikalische Größen invariant lassen, und damit haben wir eine Symmetrie entdeckt. Diese Symmetrie ist allerdings recht abstrakt. Zwar sind die physikalischen Größen, die invariant bleiben, beobachtbar, aber den Transformationen, die diese Größen invariant lassen, entspricht kein Vorgang in der Welt wie etwa Translation, Rotation oder Spiegelung. Eichsymmetrie bezieht sich ausschließlich auf eine Invarianz bezüglich Transformationen in unserer theoretischen Beschreibung.

Bei dem Versuch, verschiedene Wechselwirkungen, nämlich Gravitation und Elektromagnetismus, zu vereinigen, erkannte Hermann Weyl als erster die Bedeutung der schon in der klassischen Elektrodynamik auftretenden Eichinvarianz und prägte 1918 diesen Ausdruck [10]. Einen geradezu explosionsartigen Bedeutungsgewinn erlangte die Eichsymmetrie, als in der Entwicklung der QFT klar wurde, welche Konsequenzen es hat, mit der Forderung nach (lokaler) Eichinvarianz zu starten [11].³⁾ Tatsächlich lässt sich diese Forderung nur erfüllen, wenn man in den dynamischen Grundgleichungen gewisse Terme ergänzt. Wie sich herausstellte, liefern diese Zusatzterme genau die Ausdrücke für die fundamentalen Wechselwirkungen samt den vermittelnden Austauschteilchen – und zwar ohne dass man die Dynamik im Einzelnen analysieren müsste. Das Teilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung ist längst wohlbekannt: das Photon. Für die Entdeckung der Wechselwirkungsteilchen für die schwache und die starke Wechselwirkung – die Eichbosonen und die Gluonen – waren Symmetrieüberlegungen von entscheidender Bedeutung. Die Rolle von Symmetrien in der Physik hat sich damit fundamental geändert. Während diese früher als eine Konsequenz der Dynamik galten, erscheint der Zusammenhang heute genau andersherum: die Dynamik scheint aus den Symmetrien zu resultieren [12].

Symmetrien statt Teilchen

Hier soll es nicht primär darum gehen, die Grundprinzipien der QFT verständlich darzustellen, sondern zu ergründen, worin ihre ontologische Bedeutung besteht. Was sagt uns die zentrale Rolle von Symmetrien in unseren Theorien über die Verfasstheit der physischen Welt, die durch diese Theorien beschrieben werden? Im Folgenden möchte ich eine ziemlich radikale Antwort vorstellen. Beginnen wir mit der Tatsache, dass Elementarteilchen (Abb. 4) in ihrer Bedeutung fast verblassen hinter den Symmetrien, denen sie in der Theorie genügen: Wenn eine Expertin die QED oder die QCD charakterisiert, spricht sie nicht an erster Stelle von irgendwelchen Elementarteilchen oder Wechselwirkungen, sondern von den Symmetrien, genauer: den Eichsymmetrien, die diese Theorien jeweils auszeichnen. Für Experten genügt ein Blick auf den Ausdruck $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ für die zusammengefassten Eichsymmetriegruppen, um zu wissen, dass

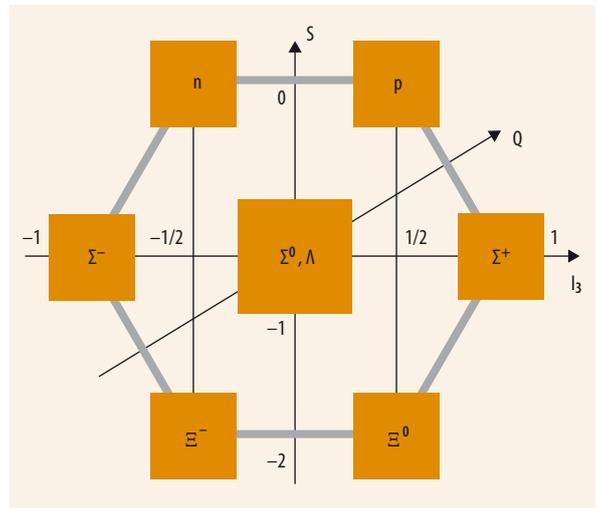


Abb. 4 Die inneren Symmetrien, die eine wesentliche Rolle in der Quantenfeldtheorie spielen, manifestieren sich beispielsweise im Hadronenbild als Baryonen-Oktett.

es um das Standardmodell der Elementarteilchenphysik gehen muss.

Wenn wir davon ausgehen, dass unsere Theorien die Welt in irgendeiner Weise abbilden, liegt der Gedanke nahe, dass dieser theorieinternen Priorität der Symmetrien eine ontologische Priorität entspricht [13]. Das würde heißen, dass die Strukturen, die durch die Symmetrien bestimmt sind, ontologisch primär sind und Elementarteilchen und Wechselwirkungen damit von ihnen abhängen. In den letzten Jahren ist solch eine Sichtweise in der Wissenschaftsphilosophie unter dem Namen „Ontischer Strukturenrealismus“ bekannt geworden [14]. Der behauptet nun, dass sich unser Realismus auf Strukturen richten und sie als das ontologisch Primäre auszeichnen sollte – hier also die mit Hilfe von Symmetriegruppen beschriebene Struktur.⁴⁾

Wenn Symmetriestrukturen ontologisch primär sein sollen und Elementarteilchen und Wechselwirkungen abgeleitet, stellt sich natürlich die Frage, was Primärsein und Abgeleitetsein heißen soll. Schließlich geht es nicht um Sätze, die aus anderen Sätzen abgeleitet werden können, sondern um Entitäten, die unsere Physik beschreibt. Bei Tischen und Stühlen lässt sich klar sagen, dass sie ontologisch nicht primär sind, sondern die Atome, aus denen sie bestehen, sowie die Relationen, in denen diese Atome zueinander stehen. So ist ontologische Priorität von Symmetrien aber offensichtlich nicht zu verstehen, wenn man davon ausgeht, dass Symmetrien die fundamentale Kategorie des Seins bilden: Elementarteilchen bestehen ja nicht aus Symmetrien so wie Tische aus angeordneten Atomen bestehen. Und was soll es überhaupt heißen, dass auf der fundamentalen Ebene der physischen Welt nur Strukturen existieren? Des Weiteren scheinen Strukturen (insbesondere wenn man sie platonisch auffasst) nicht kausal aktiv zu sein, sondern nur Eigenschaften, sodass unklar ist, wie Strukturen alleine in einem ontologischen Sinne Dynamik hervorrufen sollen.

Der Ontische Strukturenrealismus hat also ein ziemlich ernsthaftes Problem: Einerseits soll es sich ja

3) Im Rahmen der QFT ist die Forderung lokaler Eichinvarianz entscheidend, da man zeigen kann, dass nur so die Renormierbarkeit gesichert ist, die uns ermöglicht, die unendlichen Größen loszuwerden, mit denen die früheren Theorien zu kämpfen hatten.

4) Um spezifischer zu machen, auf welche Strukturen genau sich der Realismus bezieht, ist auch die Bezeichnung Gruppenstrukturenrealismus (Group Structural Realism) vorgeschlagen worden [15].

um eine Ontologie für die physische Welt handeln, so dass die Strukturen, die angeblich die Grundelemente der Ontologie bilden, keine mathematischen Objekte sein können. Platonische Strukturen eignen sich kaum als Grundlage der physischen Welt. Andererseits kann es nicht genügen zu behaupten: Es gibt Strukturen bzw. Relationen, in denen konkrete physische Dinge zueinander stehen. Das wäre erstens keine neue Ontologie und zweitens: Wer wollte das bezweifeln? Das Kunststück bestünde also darin, explizit zu machen, in welchem Sinne Strukturen ontologisch primär sein sollen, ohne entweder in eine unhaltbare Position zu verfallen oder gar nicht Neues zu sagen.

Als Zwischenfazit können wir festhalten, dass der Ontische Strukturrealismus zunächst nach einer attraktiven Position klingt, die der zentralen Rolle von Symmetrien in der modernen Physik, insbesondere der QFT, gerecht wird. Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, dass es ausgesprochen schwierig ist auszubuchstabieren, was es heißen soll, dass Symmetriestrukturen das in der Welt Primäre sind und Dinge wie Elektronen bloß abgeleitet und damit sekundär.

Gebündelte Eigenschaften

Die Grundidee des Ontischen Strukturrealismus besteht darin, Probleme traditioneller Ontologien dadurch zu lösen, dass nicht Dinge wie Elektronen als fundamental angenommen werden, sondern etwas anderes, man könnte sagen, etwas weniger Substantielles. Dies trifft soweit auch auf einen zweiten alternativen Interpretationsansatz zu, den ich im Folgenden motivieren möchte.⁵⁾ Während Vertreter des Ontischen Strukturrealismus Strukturen bzw. Relationen als das Fundamentale ansehen, sind die fundamentalen Entitäten nach der so genannten Tropenontologie Eigenschaften, und zwar im Sinne von „Tropen“. Dabei handelt es sich um eine eigenständige ontologische Kategorie, nämlich die einzelnen Vorkommnisse von Eigenschaften. Ein Beispiel: Wenn fünf Erbsen alle die exakt gleiche grüne Farbe besitzen, handelt es sich um fünf Grüntropen, die sich exakt gleichen – und nicht um die fünfmalige Instanz der „Universalie“ Grün. Der Tropenontologe bestreitet also, dass es abstrakte Universalien gibt, die für unsere konkrete Welt eine Rolle spielen. Stattdessen werden Allgemeinbegriffe wie Grün identifiziert mit der Klasse aller Grüntropen. Da sich die Vorstellung, Eigenschaften seien nicht Universalien, sondern Einzeldinge, stark von der traditionellen Auffassung unterscheidet, haben Philosophen für eine partikularisierte Eigenschaft den neuen Ausdruck „Tropen“ eingeführt. Er klingt zwar etwas seltsam und weckt unpassende Assoziationen, hat sich aber unterdessen eingebürgert. Eigenschaften sind danach konkrete Einzeldinge oder „Partikularien“, und was wir gewöhnlich ein Ding nennen, ist ein Bündel von Eigenschaften wie Farbe, Form, Festigkeit und so weiter.

Welche Vorteile bietet eine tropenontologische Interpretation der QFT nun im Vergleich zum Ontischen

Strukturrealismus? In der heutigen Philosophie sind die meisten Anhänger des Ontischen Strukturrealismus dezidiert keine Platonisten. Es geht also nicht um abstrakte, sondern um physisch realisierte Strukturen. Dies scheint aber nicht möglich zu sein, ohne irgendwelche Entitäten, als deren Strukturen sie in Erscheinung treten. Welche könnten das sein? Eine Möglichkeit wäre zu sagen, dass die Entitäten, an/in denen Strukturen sich manifestieren, konkrete Dinge sind, in unserem Kontext also Elementarteilchen. Damit würde der Ontische Strukturrealismus aber in eine klassische Ontologie von Dingen und Eigenschaften (inklusive relationaler Eigenschaften) zurückfallen. Bei der Tropenontologie ist das nicht so, denn Tropen



Abb. 5 Holzstämmen, die sich gegenseitig stützen, bilden ein Tipi. Ähnlich könnten sich Eigenschaften („Tropen“) zu einem stabilen Ganzen bündeln.

konstituieren Dinge. Das heißt Tropen brauchen keine Dinge, um konkret zu existieren, da es ihre Natur ist, als konkrete Partikularien zu existieren.

Eine andere Möglichkeit für den Vertreter des Ontischen Strukturrealismus wäre es zu sagen, dass die Entitäten, an/in denen Strukturen sich manifestieren, selbst wieder Strukturen sind. Dabei bliebe aber unklar, wieso Strukturen sich dadurch konkret manifestieren sollen. Genau das wäre aber für eine Ontologie der physischen Welt nötig. Zunächst scheint die Tropenbündeltheorie dasselbe Problem zu haben. Wie Strukturen können auch Tropen nicht für sich alleine existieren. Ontologen drücken das so aus, dass Tropen existenziell abhängige Entitäten sind, wie auch Zustände und Grenzen es sind: Ein Grenze kann nicht existieren ohne dasjenige, dessen Grenze sie ist. Tropen sind also wie Strukturen existenziell abhängige Entitäten, aber der entscheidende Punkt ist nun, dass sie voneinander abhängen und damit zusammen, d. h. im Bündel, existenziell eigenständige Dinge bilden können.

Zum besseren Verständnis ist ein Vergleich hilfreich. Man denke an ein Tipi, wie er von nordamerikanischen Indianerstämmen als Zuhause verwendet wurde (Abb. 5). In solch einem Indianerzelt stützen sich die am Boden kreisförmig angeordneten unteren Enden der Holzstäbe an der Spitze gegenseitig. Keiner der Stäbe könnte alleine stehen, auch zwei Stäbe nicht. Ein stabiles Ganzes entsteht erst aus allen Stäben zu-

5) Ein ausführliche Darstellung und Verteidigung findet sich in [2].

sammen. Für die kegelförmige Gestalt des Tipis gibt es kein Substrat, das die Stämme zusammenhält. Obwohl keiner der Stämme unabhängig stehen kann, brauchen sie nichts anderes als sich selbst, da die Stämme sich gegenseitig halten. Genauso ist die Behauptung zu verstehen, dass ein Ding wie ein Ball nichts anderes als ein Bündel von Tropen (also partikularisierten Eigenschaften) ist: Jede Trope/Eigenschaft für sich genommen kann nicht selbstständig existieren. Tropen sind in ihrer Existenz existenziell auf andere Tropen angewiesen, aber auf nichts anderes, insbesondere nicht auf Dinge. Die gebündelten Tropen/Eigenschaften sind es, die ein Ding ausmachen und nichts anderes.

Ein Problem dieser einfachen Tropenbündeltheorie ist, dass wirklich jede Eigenschaft essenziell für die Identität des betreffenden Dinges wäre. Das ist keine attraktive Position. Wir wollen sagen können, dass sich ein Ding in der Zeit ändert und trotzdem dasselbe Ding bleibt. Das ist aber nicht mehr möglich, wenn schon die kleinste Änderung zu einem anderen Ding führt. Andererseits soll sich aber nicht alles ändern dürfen: Wenn man einen Gartenzaun anmalt, ist er immer noch derselbe Gartenzaun. Lässt man ihn aber durch eine Holzhäckselsmaschine laufen, hört er auf zu existieren. Wir sehen also nur einige Eigenschaften eines Dinges als essenziell oder permanent an, während sich andere Eigenschaften durchaus in der Zeit ändern können, ohne dass der Gegenstand damit gleich verschwindet.

Essenzielle Eigenschaften

Aber wie können wir unterscheiden, welche Eigenschaften für die Identität eines Dinges essenziell sind und welche sich ändern können? In der modernen Physik gibt es nun einen paradigmatischen Ansatz, der genau dies leistet. Eugene Wigner schlug 1939 vor, die gruppentheoretische Analyse von Symmetrien zu verwenden, um herauszufinden, welche Eigenschaften ein elementares System (wie etwa ein Elementarteilchen) charakterisieren [16]. Die Grundidee besteht darin, dass man in speziell-relativistischen Theorien durch die erlaubten raumzeitlichen Symmetrietransformationen zu allen möglichen Zuständen eines gegebenen elementaren Systems gelangen können muss. Wie wir oben schon gesehen hatten, ist die für speziell-relativistische Theorien relevante raumzeitliche Symmetriegruppe die Poincaré-Gruppe. Das, was bei den durch sie bestimmten Transformationen gleich bleibt, sind genau die gesuchten essenziellen Eigenschaften. Mathematisch muss man hierfür über die verschiedenen Darstellungen der Symmetriegruppe gehen, da sie die abstrakte Symmetriegruppenstruktur im Raum der Zustände konkret realisieren. Von den Darstellungen beschränkt man sich auf die irreduziblen, da wir an elementaren Systemen interessiert sind und sich reduzierbare Darstellungen in invariante Bestandteile zerlegen ließen, welche ihrerseits elementare Systeme beschreiben würden.⁶⁾ Ein Ergebnis von Wigners Analyse ist,

dass sich die irreduziblen Darstellungen der Poincaré-Gruppe mit den Parametern Masse m und Spin s ordnen lassen.

Die für eine verbesserte Tropenbündeltheorie gesuchten essenziellen Eigenschaften liefern uns nun genau die Parameter, nach denen sich die verschiedenen irreduziblen Darstellungen der Poincaré-Gruppe ordnen lassen. Es ist aber nicht angemessen zu sagen, ein Elementarteilchen ist eine irreduzible Darstellung der Poincaré-Gruppe – wie man dies gelegentlich liest. Symmetrien erlauben es uns, Dinge nach bestimmten Kriterien zu ordnen, d. h. in Klassen gleichartiger Dinge einzuteilen. Die gruppentheoretischen Invarianten geben uns aber nur Klassen von Teilchen und keine einzelnen Teilchen. Die Tropenontologie dagegen zeigt uns, wie wir mit dieser Einsicht zu einzelnen Teilchen kommen können.

Ganz fertig sind wir aber noch nicht, da für die Klassifikation von Elementarteilchen nach ihren essenziellen Eigenschaften nicht nur raumzeitliche Symmetrien, sondern auch die oben erwähnten inneren Symmetrien eine entscheidende Rolle spielen. Wegen des Noether-Theorems wissen wir, dass zu Symmetrien bestimmte Erhaltungsgrößen korrespondieren. Translationsinvarianz etwa ist notwendig mit Impulserhaltung verbunden. Auch den (globalen) Eichsymmetrien entsprechen erhaltene Größen, und zwar genau die Ladungen, die entscheidend für die verschiedenen Wechselwirkungen sind. So konnte schon Weyl zeigen, dass aus der Eichsymmetrie der klassischen Elektrodynamik die Erhaltung der elektrischen Ladung folgt. Damit haben wir alle für die verbesserte Tropenbündeltheorie erforderlichen essenziellen Eigenschaften zusammen, und zwar sind dies eine bestimmte Masse, ein bestimmter Spin sowie bestimmte Ladungen. Alle anderen Eigenschaften etwa eines Elektrons, wie sein Lokalisierungsverhalten, sind dagegen keine essenziellen Eigenschaften.

Es passt harmonisch in den Rahmen der Tropenbündelinterpretation der Quantenphysik, dass Elementarteilchen spontan entstehen und vergehen können. Obwohl im Vakuum die mittlere Anzahl der Teilchen null ist, wimmelt es von Aktivität. Unentwegt finden unzählige Prozesse statt, bei denen alle möglichen Teilchen erzeugt und sofort wieder vernichtet werden. In einer Teilchenontologie ist diese Aktivität paradox. Wenn Partikel fundamental sind, wie können sie dann aus dem Nichts entstehen? Woraus gehen sie hervor? In der Tropenontologie ist die Situation unproblematisch: Das Vakuum enthält keine Teilchen, wohl aber (dispositionale) Tropen. Ein Teilchen ist das, was man bekommt, wenn diese Tropen sich auf eine bestimmte Weise bündeln.

Und weiter?

Im Wechselspiel von Philosophie und moderner Physik zeigt sich, wie sich in der Quantenfeldtheorie klassische Vorstellungen von Teilchen und Feldern

⁶⁾ Die Frage der Übertragbarkeit von Wigners Ansatz auf nicht speziell-relativistische Theorien würde den Rahmen dieses Aufsatzes sprengen.

als problematisch und Symmetrie-Strukturen stattdessen als zentral erweisen. Ontologisch lässt sich dem Rechnung tragen, indem man sich ausgehend von den Symmetrien einen Weg zu den fundamentalen Elementen sucht. Nach meinem Vorschlag sind das Vorkommnisse von Eigenschaften, die man in der Philosophie „Tropen“ nennt und die als Bündel z. B. Elektronen konstituieren. Symmetrien erlauben dabei insbesondere, zwischen essenziellen und nicht-essenziellen Tropen zu unterscheiden. Ein Diskurs über diese grundsätzlichen Fragen, nicht zuletzt zwischen Vertretern aus Philosophie und Physik, ist dabei mehr als nur eine nachträgliche Klärung von Begriffen und Methodologien. Gerade in Zeiten, in denen die Physik nicht einmal fünf Prozent des Universums zu beschreiben scheint, während der Rest im Dunklen liegt, kann es lohnen, die Grundlagen einer Wissenschaft auf den Prüfstand zu stellen und zu revidieren.

Literatur

[1] *M. Kuhlmann* und *M. Stöckler*, Beitrag „Quantenfeldtheorie“, in: Friebe et al.: Die Philosophie der Quantenphysik, S. 225 (2015); *M. Kuhlmann*, <http://plato.Stanford.ed/archives/win2012/entries/quantum-field-theory> (2012)

[2] *M. Kuhlmann*, *The Ultimate Constituents of the Material World*, Ontos/De Gruyter, Berlin (2010)

[3] *D. Malament*, in: *R. Clifton* (Hrsg.), *Perspectives on Quantum Reality*, Kluwer, Dordrecht (1996), S. 1

[4] *M. L. G. Redhead*, *Foundations of Physics*, **25**, 123 (1995)

[5] *W. G. Unruh*, *Phys. Rev. D***14**, 870 (1976)

[6] *D. Buchholz* und *R. Verch*, *Class. Quantum Grav.* **32**, 245004 (2015)

[7] *M. Kuhlmann*, *Praxis der Naturwissenschaften* 65/4 (2016), S. 38; *M. Kuhlmann*, *Scientific American*, August 2013; *Spektrum der Wissenschaft*, Juli 2014, S. 46

[8] *D. J. Baker*, *Brit. J. Phil. Sci.* **60**, 585 (2009), <http://bit.ly/1NS6NIF>

[9] *K. Brading* und *E. Castellani* (Hrsg.), *Symmetries in Physics*, Cambridge University Press, Cambridge (2003)

[10] *H. Weyl*, *Sitz. Ber. Akad. Wiss. Berlin*, 465 (1918)

[11] *R. Healey*, *Gauging What’s Real. The Conceptual Foundations of Gauge Theories*, Oxford University Press, Oxford (2007)

[12] *D. J. Gross*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **93**, 14256 (1996)

[13] *H. Lyre*, *Stud. Hist. Philos. Mod. Phys.* **35**, 643 (2004)

[14] *M. Esfeld*, *Euro. J. Philo. Sci.*, **3**, 19 (2013), *S. French*, *The Structure of the World*, Oxford Univ. Press, Oxford (2014)

[15] *B. Roberts*, *Brit. J. Phil. Sci.* **62**, 47 (2011)

[16] *E. P. Wigner*, *Annals of Mathematics* **40**, 149 (1939)

DER AUTOR

Meinard Kuhlmann (Vorsitzender der AG Philosophie der Physik der DPG) studierte Physik und Philosophie in Bochum, München, St. Andrews (Schottland) und Köln. 2000 promovierte er in Philosophie an der Universität Bremen, wo er sich 2008 auch habilitierte. Forschungsaufenthalte führten ihn nach Irvine (Kalifornien), Chicago, Oxford und London. Neben der Ontologie der Quantenfeldtheorie beschäftigen ihn Erklärungen in der Econophysics. Derzeit vertritt Kuhlmann die Professur für Wissenschaftsphilosophie an der Universität Mainz.

