

Was ist real?

Die Welt der klassischen Physik besteht aus Teilchen, die unter dem Einfluss von Kraftfeldern bestimmte Bahnen ziehen. Doch in der Quantenfeldtheorie ist nicht mehr klar, was Teilchen und Felder überhaupt sind. Die fundamentalsten Objekte lassen sich nicht wie Alltagsdinge beschreiben, sondern als Bündel von Eigenschaften wie Form und Farbe, Masse und Ladung.

Von Meinard Kuhlmann

Physiker beschreiben das Universum für gewöhnlich als eine Menge von subatomaren Teilchen, die einander mittels Kraftfeldern anziehen und abstoßen. Sie arbeiten mit einer Art Lego-Modell der Natur. Doch dieses Weltbild kehrt eine wenig bekannte Tatsache unter den Teppich: Sowohl in der Teilchen- wie in der Feldinterpretation der Quantenphysik werden die vertrauten Begriffe »Teilchen« und »Feld« derart weit gefasst, dass sich allmählich die Meinung durchsetzt, die Welt könnte aus etwas ganz anderem bestehen.

Das Problem ist nicht etwa, dass die Physiker keine gültige Theorie über die Mikrowelt besäßen. Die gibt es durchaus. Sie heißt Quantenfeldtheorie und entstand ab dem Ende der 1920er Jahre durch Vereinigung der frühen Quantenmechanik mit Einsteins spezieller Relativitätstheorie. Die Quantenfeldtheorie liefert die begriffliche Grundlage für das Standardmodell der Teilchenphysik, das die fundamentalen Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkungen in einen gemeinsamen Rahmen stellt. Hinsichtlich der empirischen Genauigkeit ist dies die erfolgreichste Theorie in der Geschichte der Wissenschaft. Physiker verwenden das Standardmodell tagtäglich, um die Folgeprodukte von Teilchenkollisionen zu berechnen, die Materiesynthese beim Urknall, die extremen Bedingungen in Atomkernen und vieles andere.

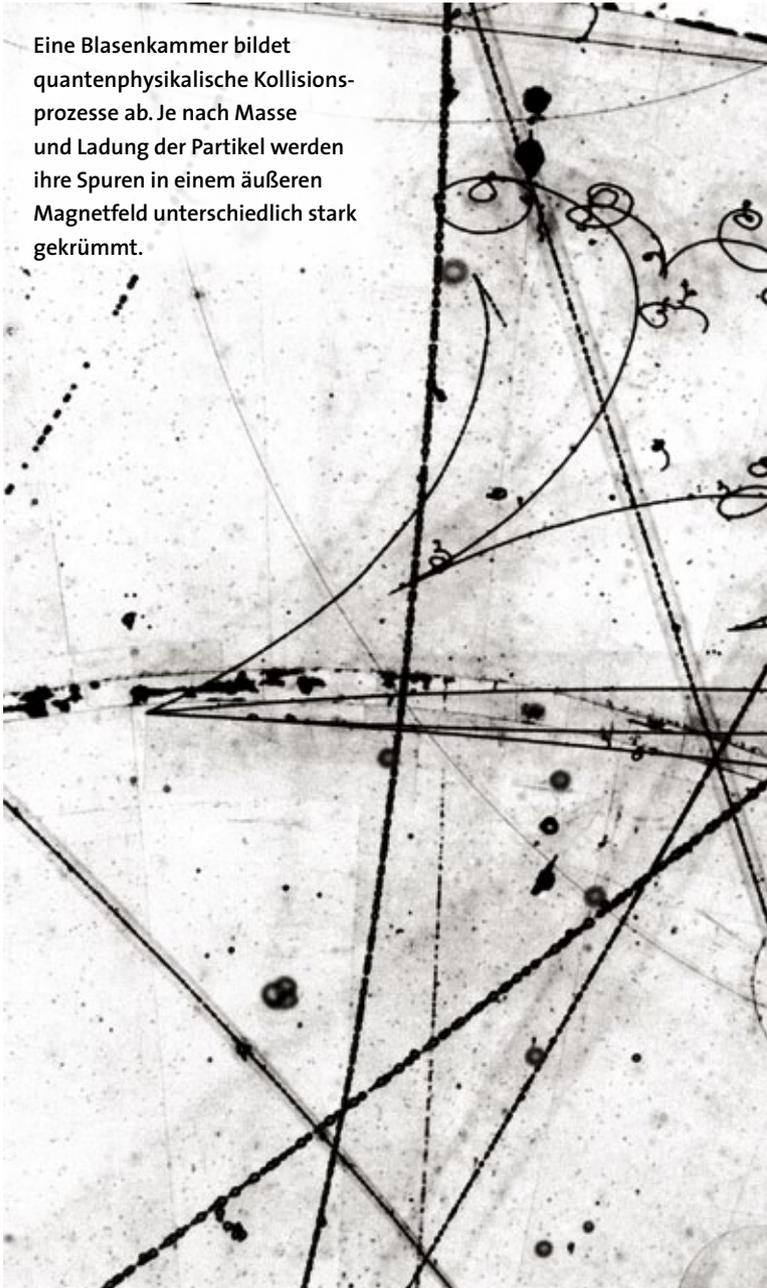
AUF EINEN BLICK

WEDER TEILCHEN NOCH FELDER

1 Die Teilchenphysik handelt von Teilchen – sollte man meinen. Üblicherweise stellt man sich dabei kleine Kugeln vor, die im Raum umherschwirren. Doch bei genauer Betrachtung erweist sich der **Teilchenbegriff** als nicht sinnvoll anwendbar.

2 Für viele Physiker sind Teilchen keine Dinge, sondern **Anregungen eines Quantenfelds** – des modernen Gegenstücks zu klassischen Feldern wie dem Magnetfeld. Doch auch Felder haben **paradoxe Eigenschaften**.

3 Manche Forscher meinen daher, die Grundbestandteile der Welt seien weder Teilchen noch Felder, sondern **bestimmte Strukturen oder Bündel von Eigenschaften**.



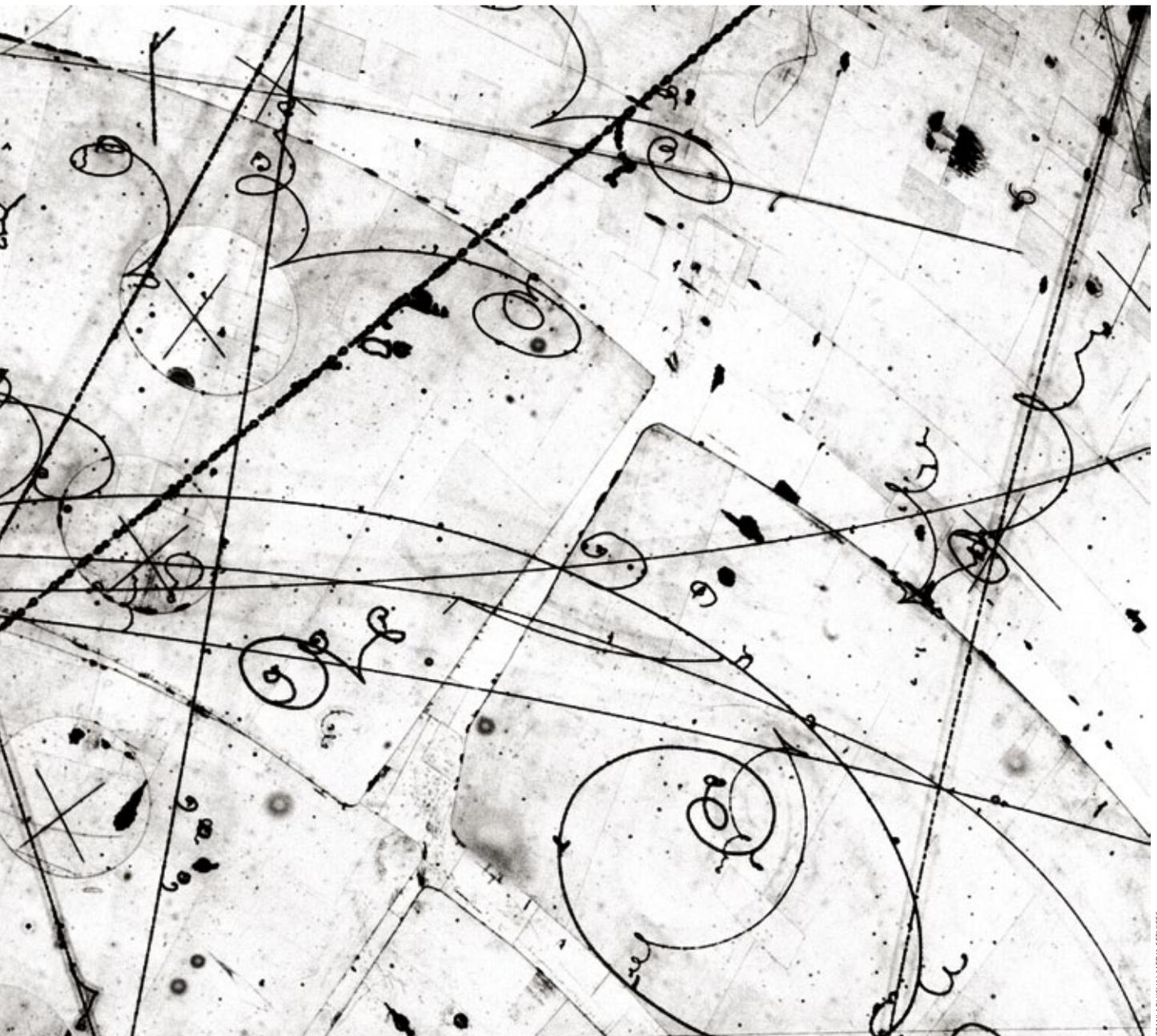
Eine Blasenkammer bildet quantenphysikalische Kollisionsprozesse ab. Je nach Masse und Ladung der Partikel werden ihre Spuren in einem äußeren Magnetfeld unterschiedlich stark gekrümmt.

Darum mag es überraschen, dass die Physiker nicht einmal sicher sind, was die Theorie besagt beziehungsweise worin ihre »Ontologie« besteht – das ihr zu Grunde liegende Bild von der physikalischen Realität. Diese Verwirrung unterscheidet sich von den viel diskutierten Paradoxien der Quantenmechanik, etwa von der berühmten Frage, ob eine in eine Kiste gesperrte Katze zugleich lebendig und tot sein kann. Die ungeklärte Deutung der Quantenfeldtheorie behindert den Fortschritt zu jeder Art von »neuer Physik« jenseits des Standardmodells, beispielsweise der Stringtheorie. Es ist heikel, eine neue Theorie zu formulieren, wenn wir die bereits vorhandene nicht verstehen.

Auf den ersten Blick erscheint der Inhalt des Standardmodells offensichtlich. Es besteht zum einen aus Gruppen

von Elementarteilchen wie Quarks und Elektronen und zum anderen aus vier Arten von Kraftfeldern, welche die Wechselwirkung zwischen den Teilchen vermitteln. Dieses Schema wurde auch schon öfter in »Spektrum der Wissenschaft« präsentiert. Es mutet zwar überzeugend an, kann aber gar nicht zufrieden stellen.

Zunächst einmal gehen die beiden Kategorien unscharf ineinander über. Die Quantenfeldtheorie weist jeder Elementarteilchensorte ein Feld zu: Wenn es Elektronen gibt, existiert unweigerlich auch ein Elektronenfeld. Umgekehrt sind die Kraftfelder nicht kontinuierlich, sondern quantisiert; darum gibt es Teilchen wie das Photon, das Quant des elektromagnetischen Felds. Somit scheint die Unterscheidung zwischen Teilchen und Feldern künstlich zu sein, und





die Physiker behandeln oft das eine oder das andere als fundamentaler. Die Debatte über die Frage, ob die Quantenfeldtheorie letztlich von Teilchen oder Feldern handelt, hat sich ergebnislos im Kreis gedreht. Sie begann als Kampf der Titanen, mit bedeutenden Physikern und Philosophen auf beiden Seiten. Bis heute sind beide Begriffe wegen ihrer Anschaulichkeit in Gebrauch, obwohl die meisten Physiker einräumen würden, dass ihre klassische Bedeutung nicht zu den Aussagen der Theorie passt. Doch wenn die von den Wörtern »Teilchen« und »Feld« wachgerufenen Vorstellungen nicht zutreffen, müssen Physiker und Philosophen sich darüber klar werden, was an ihre Stelle treten soll.

Angeichts der festgefahrenen Lage haben einige Philosophen der Physik grundsätzlich andere Lösungen vorgeschlagen. Demnach besteht die materielle Welt letztendlich aus weniger fassbaren »Gegenständen« wie Relationen oder Eigenschaften. Eine besonders radikale Idee besagt, dass sich alles vollständig auf Strukturen reduzieren lässt – ohne irgendeinen Bezug auf Einzeldinge. Das ist eine kontraintuitive und revolutionäre Idee, aber manche meinen, die Physik zwingt uns, sie anzunehmen.

Probleme der Teilcheninterpretation

Wenn Laien, aber auch Experten über die Mikrowelt nachdenken, stellen sie sich Teilchen vor, die etwa bei einem Zusammenstoß wie kleine Billardkugeln voneinander abprallen. Dieser Teilchenbegriff ist das Relikt eines Weltbilds, das von den altgriechischen Atomisten abstammt und mit den Theorien Isaac Newtons (1643–1727) seinen Siegeszug vollendete. Aus mehreren Gründen verhalten sich die Grundelemente der Quantenfeldtheorie jedoch ganz und gar nicht wie Billardkugeln.

Erstens bezieht sich der klassische Teilchenbegriff auf etwas, was einen bestimmten Ort einnimmt; aber die »Teilchen« der Quantenfeldtheorie besitzen keine klar definierten Positionen: Ein Partikel in Ihrem Körper hält sich streng genommen nicht nur in dessen Innerem auf. Ein Beobachter, der versucht, den Ort des Teilchens zu messen, wird es mit

kleiner, aber von null verschiedener Wahrscheinlichkeit in den entlegensten Winkeln des Universums entdecken. Dieser Widerspruch offenbarte sich schon in den ersten Formulierungen der Quantentheorie, wurde aber noch eklatanter, als Theoretiker die Quantenmechanik mit der Relativitätstheorie vereinigten. Relativistische Quantenteilchen sind gleichsam aalglatt: Sie lassen sich auf keine spezielle Lokalität festnageln.

Zweitens hängt der Teilchenort vom Bewegungszustand des Beobachters ab. Ein Partikel, das Sie in Ihrem Haus beobachten, erscheint einem daran vorbeirasenden Freund über das gesamte Universum ausgebreitet. Nicht nur der Ort eines Teilchens hängt also von Ihrem Standpunkt ab, sondern sogar die Frage, ob es überhaupt einen Ort einnimmt. Darum hat es wenig Sinn, lokalisierte Teilchen als die Grundelemente der Wirklichkeit anzunehmen.

Drittens: Selbst wenn Sie auf das Festnageln der Teilchen verzichten und sie einfach bloß zählen, kommen Sie in Schwierigkeiten. Angenommen, Sie möchten wissen, wie viele Teilchen sich in Ihrem Haus befinden. Sie gehen durch die Räume und finden drei Teilchen im Esszimmer, fünf unter dem Bett, acht in einem Küchenschrank und so weiter. Nun zählen Sie alles zusammen. Zu Ihrer Bestürzung wird die Summe nicht der Gesamtzahl der Teilchen entsprechen. In der Quantenfeldtheorie ist die Teilchenzahl eine Eigenschaft des gesamten Hauses. Um sie zu bestimmen, müssten Sie das Kunststück fertigbringen, das ganze Haus auf einmal zu vermessen, nicht Zimmer für Zimmer.

Ein extremes Beispiel für die Haltlosigkeit der Teilcheninterpretation ist das Vakuum, das in der Quantenfeldtheorie paradoxe Eigenschaften besitzt. Man kann insgesamt ein Vakuum vor sich haben – definitionsgemäß einen Zustand mit null Teilchen – und dennoch in jedem endlichen Teilgebiet etwas ganz anderes beobachten als ein Vakuum. Das Haus kann sozusagen völlig leer sein, obwohl man in den Zimmern überall Teilchen findet.

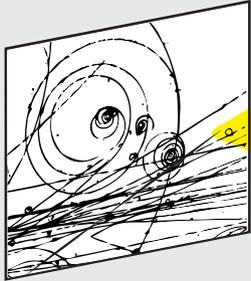
Eine verblüffende Besonderheit des Quantenvakuums ist der so genannte Unruh-Effekt, benannt nach dem kanadischen Theoretiker William Unruh von der University of British Columbia. Während ein ruhender Astronaut meint, sich in perfektem Vakuum aufzuhalten, findet sein Kollege in einem beschleunigt vorbeifliegenden Raumschiff, er sei von einem Wärmebad aus unzähligen Teilchen umgeben. Diese Diskrepanz zwischen Beobachterstandpunkten tritt auch am Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs auf und führt zu paradoxen Aussagen über das Schicksal hineinstürzender Materie (siehe »Das Informationsparadoxon bei Schwarzen Löchern« von Leonard Susskind, Spektrum der Wissenschaft 6/1997, S. 58). Ein von Partikeln erfülltes Vakuum mutet absurd an – aber nur, weil uns der klassische Teilchenbegriff in die Irre führt. Wenn die Teilchenzahl vom Bezugssystem abhängt, hat es offenbar wenig Sinn, Teilchen für grundlegend zu halten.

Außerdem folgt aus der Theorie das Phänomen der so genannten Quantenverschränkung: Teilchen büßen als Teil

Paradoxe Quantenteilchen

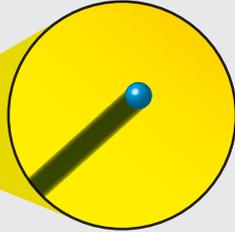
In der Quantentheorie verhalten sich Teilchen nicht wie klassische Objekte, sondern zeigen paradox anmutende Eigenschaften. Quantenteilchen sind insbesondere nicht lokalisierbar. Im Allgemeinen kann man Teilchen keine eigenständige Existenz und bestimmte Eigenschaften zuschreiben, wenn sie zu einem Gesamtsystem gehören.

Was wir feststellen



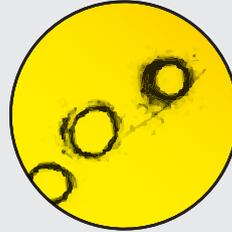
Spuren in einer Blasenkammer

Was wir daraus folgern



Teilchen durchqueren die Kammer und hinterlassen Spuren.

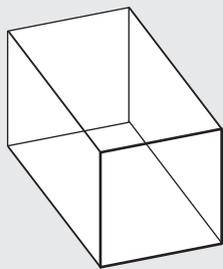
Warum das falsch ist



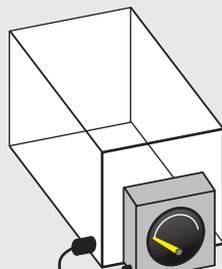
Wir sehen nur kleine Blasen, keine kontinuierliche Teilchenbahn.

TEILCHEN SIND NICHT LOKALISIERT

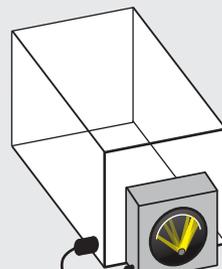
Ein Quantenteilchen beschreibt keine kontinuierliche und beliebig exakt bestimmbare Bahn. Die Spur in der Blasenkammer ist eine Folge getrennter Ereignisse.



ein Feld im Vakuumzustand



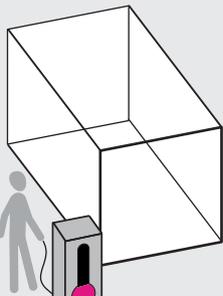
Geigerzähler wird nicht reagieren.



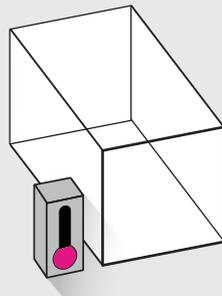
Geigerzähler klickt.

DAS VAKUUM IST NICHT LEER

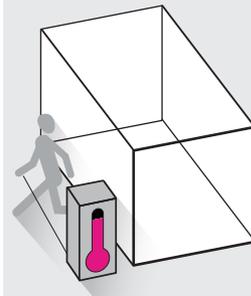
Gemäß der Quantentheorie zeigt ein Messgerät selbst im Vakuum die Anwesenheit von Teilchen an.



ein Vakuum am absoluten Nullpunkt



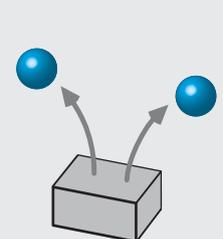
Jeder Beobachter misst ein kaltes Vakuum.



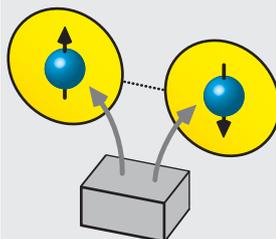
Ein beschleunigter Beobachter misst ein warmes Teilchengas.

TEILCHENEXISTENZ HÄNGT VOM BEOBACHTER AB

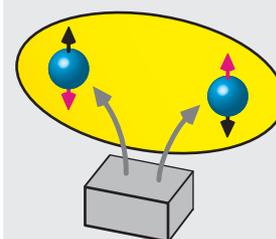
Teilchen sollten unabhängig vom Bewegungszustand des Beobachters existieren. Doch gemäß dem Unruh-Effekt nimmt ein beschleunigter Beobachter Teilchen wahr, wo sein ruhender Kollege ein Vakuum feststellt.



Ein verschränktes Teilchenpaar hat einen bestimmten Spin.



Jedes Teilchen hat einen bestimmten Spin.



Nur das Gesamtsystem hat einen definierten Spin.

TEILCHEN HABEN KEINE INDIVIDUELLEN EIGENSCHAFTEN

Quantenteilchen können verschränkt sein: Sie verhalten sich nicht als separate Partikel, sondern als ein unteilbares System.

eines Quantensystems ihre Individualität ein. Sie haben nicht nur Charakteristika wie Masse und Ladung gemeinsam, sondern auch räumliche und zeitliche Eigenschaften, beispielsweise den Bereich, in dem sie aufzufinden sind. Doch wenn zwei verschränkte Teilchen komplett ununterscheidbar sind, welchen Sinn hat es dann eigentlich, sie als separate Objekte zu betrachten? Das verschränkte System verhält sich als unteilbares Ganzes, und der Begriff eines Teils und erst recht eines Teilchens wird bedeutungslos.

Diese theoretischen Probleme mit dem Teilchenbegriff widersprechen der Anschauung. Entdeckt ein »Teilchendetektor« etwa keine Teilchen? Doch tatsächlich werden die Teilchen immer indirekt erschlossen. Ein Detektor registriert bloß zahlreiche separate Anregungen des Sensormaterials. Es ist aber nicht zulässig, diese punktuellen Ereignisse zu verbinden und zu schließen, es gäbe Teilchen auf Bahnen, die sich zeitlich verfolgen lassen.

Alle bisher dargelegten Argumente versetzen der Idee, die Natur bestünde aus einer Art kugelähnlicher Partikel, den Todesstoß. Darum ist die Bezeichnung Teilchenphysik eigentlich irreführend. Man kann zur Not von Quantenteilchen sprechen, obwohl diese praktisch nichts mit klassischen Partikeln gemein haben. Konsequenterweise sollte man den Begriff ganz fallen lassen. Manche ziehen daraus den Schluss, dass die Quantenfeldtheorie am besten als eine reine Feldtheorie zu verstehen sei. Demnach wären Teilchen nichts als Kräuselungen in einem Feld, das den Raum wie eine unsichtbare Flüssigkeit erfüllt. Doch wie sich gleich zeigt, lässt sich die Quantenfeldtheorie auch nicht allein durch Felder beschreiben.

Probleme der Feldinterpretation

Wie schon der Name nahelegt, behandelt die Quantenfeldtheorie klassische Phänomene wie elektrische und magnetische Felder mit Mitteln der Quantentheorie. Aber was heißt das? Ein Magnetfeld zwingt Eisenfeilspäne, sich um einen Stabmagneten zu ordnen, und ein elektrisches Feld lässt Haare zu Berge stehen. Ein Quantenfeld hingegen ist davon so verschieden, dass sogar ein theoretischer Physiker es sich kaum anschaulich vorzustellen vermag.

Das klassische Feld weist jedem Punkt der Raumzeit eine physikalische Größe zu, zum Beispiel Temperatur oder elektrische Feldstärke. Dagegen 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.

Historisch betrachtet entstand die Quantenfeldtheorie durch »Quantisieren« der klassischen Feldtheorie. Dabei nehmen die Theoretiker eine Gleichung und ersetzen physikalische Größen durch so genannte Operatoren, die für mathematische Vorgänge wie Differenzieren oder Wurzelziehen stehen. Manche Operatoren können auch bestimmte physi-

kalische Prozesse wie das Aussenden oder Absorbieren von Licht beschreiben. 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 $\sqrt{\quad}$. Um einen Temperaturwert zu erhalten, müsste man den Operator erst auf eine weitere mathematische Größe anwenden, den so genannten Zustandsvektor; er beschreibt die Beschaffenheit des betreffenden Systems.

Auf den ersten Blick ist diese Eigenart der Quantenfelder nicht überraschend. Schon die Quantenmechanik, auf der die Quantenfeldtheorie aufbaut, liefert nicht eindeutige Werte, sondern nur Wahrscheinlichkeiten. Doch in Letzterer geht es noch seltsamer zu: Die vermeintlich fundamentalen Quantenfelder legen nicht einmal Wahrscheinlichkeiten fest; das tun sie erst, wenn sie mit dem Zustandsvektor kombiniert werden.

Durch die Notwendigkeit, das Quantenfeld auf den Zustandsvektor anzuwenden, wird es sehr schwierig, sich unter dem Gegenstand der Theorie etwas Anschauliches vorzustellen. Der Zustandsvektor ist »holistisch« oder ganzheitlich; er beschreibt das gesamte System und bezieht sich nicht auf einen bestimmten Ort. Damit untergräbt er das, was Felder eigentlich ausmacht: dass und wie sie sich über die Raumzeit verteilen. Ein klassisches Feld veranschaulicht beispielsweise, wie sich Lichtwellen durch den Raum ausbreiten; das Quantenfeld beraubt uns dieses Bilds und sagt nichts darüber aus, wie die Welt funktioniert.

Offensichtlich ist das Standardbild von Elementarteilchen, zwischen denen Kraftfelder wirken, keine brauchbare Ontologie – es drückt nicht aus, was in der physikalischen Welt wirklich vorgeht. Auch wird nicht klar, was ein Teilchen oder ein Feld eigentlich ist. Häufig wird erwidert, Teilchen und Felder sollten als komplementäre Aspekte der Realität betrachtet werden. Doch das hilft nicht weiter, denn die beiden Begriffe funktionieren selbst in den Fällen nicht, wo wir angeblich nur den einen oder den anderen Aspekt vor uns haben. Glücklicherweise gibt es für die Quantenfeldtheorie außer Teilchen und Feldern weitere ontologische Möglichkeiten.

Strukturen als Basis der Realität

Immer mehr Leute glauben heute, dass es in Wirklichkeit nicht auf Dinge ankommt, sondern auf die Beziehungen zwischen ihnen. Dieser Standpunkt, der so genannte Strukturrealismus, bricht mit herkömmlichen atomistischen Konzepten der materiellen Welt noch radikaler als alle ontologischen Varianten von Teilchen und Feldern.

Anfangs etablierte sich eine gemäßigte Version unter dem Namen epistemischer Strukturrealismus (von griechisch episteme = Wissen). Ihm zufolge werden wir zwar niemals das wirkliche Wesen der Dinge erkennen, können aber wissen, wie sie miteinander in Beziehung stehen. Beim Phänomen Masse beispielsweise sieht man niemals die Masse selbst, sondern nur, wie ein massetragender Körper mit ei-

nem anderen durch das örtliche Schwerfeld wechselwirkt. Die Struktur der Welt, die ausdrückt, wie Dinge wechselwirken, ist der dauerhafteste Teil physikalischer Theorien. Neue Theorien können unsere Vorstellung von den Grundbausteinen der Welt umstürzen, aber oft bewahren sie die Strukturen. Nur so können Forscher Fortschritte machen.

Das wirft die Frage auf: Warum kennen wir nur die Relationen zwischen Dingen und nicht die Dinge selbst? Die einfachste Antwort lautet: Es gibt nur Relationen. Dieser Sprung führt zu einem radikaleren Standpunkt, dem ontischen Strukturenrealismus (von griechisch *to on* = das Seiende).

Die vielfältigen Symmetrien der modernen Physik unterstützen den ontischen Strukturenrealismus. Sowohl in der Quantenmechanik als auch in der einsteinschen Gravitationstheorie haben bestimmte Veränderungen – so genannte Symmetrietransformationen – keine empirischen Konse-

quenzen. Diese Transformationen vertauschen die einzelnen Dinge, aus denen die Welt besteht, ohne deren Beziehungen zu verändern. Ein einfaches Beispiel: Bei einem spiegelsymmetrischen Gesicht vertauscht der Spiegel das linke Auge mit dem rechten, das linke Nasenloch mit dem rechten und so fort. Dennoch bleiben die relativen Positionen der Gesichtszüge samt und sonders erhalten. Diese Relationen definieren geradezu das Gesicht, während Zuschreibungen wie »links« und »rechts« vom Betrachter abhängen. Die Gegenstände, die wir »Teilchen« und »Felder« nennen, gehorchen abstrakteren Symmetrien, aber das Prinzip ist das gleiche.

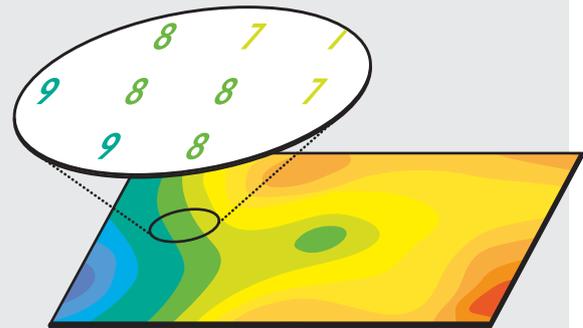
Gemäß Ockhams Rasiermesser, benannt nach dem Philosophen Wilhelm von Ockham (1288–1347), ziehen Physiker und Philosophen Ideen vor, die ein Phänomen mit möglichst wenigen Zusatzannahmen erklären. In unserem Fall kann man eine völlig ausreichende Theorie konstruieren, indem

Vieldeutige Quantenfelder

Physiker nennen die führende Theorie des Mikrokosmos **Quantenfeldtheorie**, aber die von dieser Theorie beschriebenen Felder haben kaum etwas mit den Feldern der klassischen Physik gemeinsam.

Klassisches Feld

Definitionsgemäß ist ein Feld eine physikalische Größe, bei der jedem Raumpunkt ein messbarer Wert zugewiesen wird. Ein Beispiel ist das elektrische Feld: Die Feldstärke ist größer in der Nähe elektrischer Ladungen oder Strom führender Drähte. Wenn man ein geladenes Testteilchen irgendwo im Raum platziert, bestimmt die Feldstärke, welche Kraft das Teilchen erfährt und wie stark es beschleunigt wird.

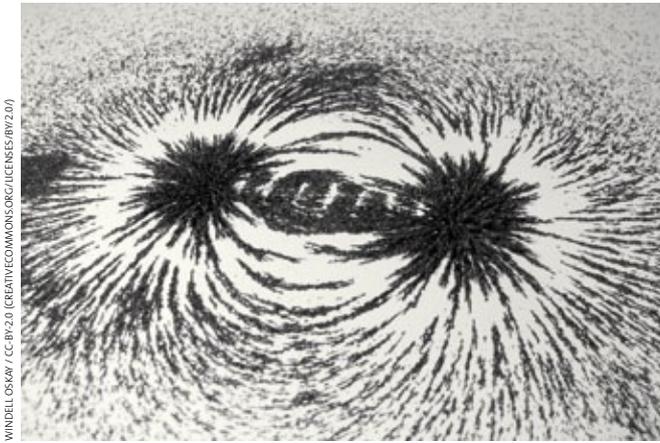


Quantenfeld

In der Quantenfeldtheorie ist jedem Raumpunkt kein eindeutig bestimmter Wert des Felds zugeordnet, sondern eine Menge möglicher Werte. Der tatsächlich beobachtete Wert hängt von einem eigenen mathematischen Gebilde ab, dem Zustandsvektor Ψ . Dieser ist nicht für einen bestimmten Ort definiert, sondern erstreckt sich über den gesamten Raum.



JEN CHRISTIANSEN



Ein klassisches Feld ordnet jedem Punkt des Raums eine eindeutig definierte Größe und Richtung der Feldstärke zu. Beispielsweise übt ein Magnetfeld auf Eisenfeilspäne eine bestimmte Kraft aus, die sich durch Feldlinien veranschaulichen lässt.

man die Existenz bestimmter Relationen postuliert, ohne zusätzlich einzelne Dinge anzunehmen. Darum sagen die Anhänger des ontischen Strukturrealismus: Verzichtet wir auf Dinge als etwas Fundamentales; betrachten wir die Welt als eine Gesamtheit von Strukturen oder Netzwerken von Beziehungen.

Im Alltag erleben wir viele Situationen, in denen nur Relationen zählen und die Beschreibung der vernetzten Dinge bloß Verwirrung stiftet. Zum Beispiel muss man bei einer U-Bahnfahrt wissen, wie die Stationen zusammenhängen. In London ist die Station St. Paul's direkt mit Holborn verbunden, während man von Blackfriars kommend mindestens einmal umsteigen muss, obwohl Blackfriars näher bei Holborn liegt als St. Paul's. Es kommt vor allem auf die Struktur der Verbindungen an. Wer eine Fahrt plant, braucht auch nicht zu wissen, dass die U-Bahnstation Blackfriars kürzlich sehr hübsch renoviert wurde. Andere Beispiele sind das World Wide Web, das neuronale Netzwerk des Gehirns und das Genom. Sie alle funktionieren selbst dann weiter, wenn einzelne Computer, Zellen, Atome ausfallen.

Ein weiteres Argument für den Strukturrealismus liefert die Quantenverschränkung. Sie ist ein holistischer Effekt. Alle Wesenseigenschaften von zwei verschränkten Teilchen wie ihre elektrische Ladung und all ihre äußeren Eigenschaften wie ihr Ort reichen nicht aus, um den Zustand des Zweiteilchensystems zu bestimmen. Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Das atomistische Weltbild – alles wird durch die Eigenschaften der elementarsten Bausteine und ihre raumzeitlichen Relationen bestimmt – bricht zusammen. Statt Teilchen für primär und Verschränkung für sekundär zu halten, sollten wir die Sache vielleicht umgekehrt betrachten.

Man mag es seltsam finden, dass es Zusammenhänge ohne zusammenhängende Objekte geben soll. Das klingt wie eine Heirat ohne Brautleute. Viele Physiker und Philosophen

halten es tatsächlich für unmöglich, dass feste Objekte nur auf der Basis von Relationen entstehen. Darum versuchen einige Verfechter des ontischen Strukturrealismus einen Kompromiss zu finden. Sie verneinen nicht, dass es Objekte gibt, sondern behaupten nur, Relationen oder Strukturen seien ontologisch primär. Mit anderen Worten: Objekte besitzen keine Wesenseigenschaften, sondern gewinnen ihre Eigenart erst durch ihr Verhältnis zu anderen Objekten. Doch das ist ein fauler Kompromiss. Niemand bestreitet, dass Objekte Beziehungen haben. Interessant und neuartig ist erst der Standpunkt, dass alles nur aus Relationen hervorgeht. Vorläufig ist der Strukturrealismus eine provokante Idee, die noch weiterentwickelt werden muss, bevor wir wissen, ob damit unser Interpretationsproblem gelöst wird.

Bündel von Eigenschaften

Eine zweite Alternative zur Deutung der Quantenfeldtheorie geht von einer simplen Erkenntnis aus. Obgleich Teilchen- und Feldinterpretationen traditionell als radikal verschieden gelten, haben sie etwas Entscheidendes gemeinsam. Beide unterstellen, dass die Grundelemente der materiellen Welt dauerhafte Einzelgebilde sind, denen Eigenschaften zugeschrieben werden können. Diese Grundeinheiten sind entweder Teilchen oder – im Fall der Feldtheorien – Raumzeitpunkte. Viele Philosophen denken wie ich, dass die Aufteilung in Objekte und Eigenschaften der tiefere Grund ist, warum sowohl Teilchen- wie Feldansätze letztlich scheitern. Stattdessen sollte man Eigenschaften als die einzige Grundkategorie ansehen.

In der Regel gelten Eigenschaften als »Universalien«, als abstrakte Allgemeinbegriffe. Sie können nicht separat von den konkreten Dingen existieren, die ebendiese Eigenschaften haben. Zwar hielt der antike Philosoph Platon (428–348 v. Chr.) Allgemeinbegriffe für eigenständige Ideen, die nicht in Raum und Zeit existieren, sondern in einem eigenen Ideenhimmel. Doch wenn man beispielsweise an Rot denkt, stellt man sich normalerweise spezielle rote Gegenstände vor und nicht einen separaten Gegenstand namens »Röte«. Nun ließe sich diese Denkweise auch umkehren und den jeweiligen Eigenschaften eine von Objekten unabhängige Existenz zubilligen. Eigenschaften sind demnach konkrete Einzelheiten oder »Partikularien«, und was wir gewöhnlich ein Ding nennen, ist ein Bündel von Eigenschaften wie Farbe, Form, Festigkeit und so weiter.

Die Vorstellung, Eigenschaften seien nicht Universalien, sondern Einzelheiten, unterscheidet sich von der traditionellen Auffassung; darum haben Philosophen für eine partikularisierte Eigenschaft den neuen Ausdruck »Tropé« eingeführt. Er klingt zwar etwas komisch und weckt unzutreffende Assoziationen, hat sich aber inzwischen eingebürgert.

Normalerweise begreifen wir Dinge nicht als Bündel von Eigenschaften, doch die Idee wird weniger ungewohnt, wenn wir versuchen, uns in die allerersten Lebensjahre zurückzusetzen. Wenn wir zum ersten Mal einen Ball sehen und erleben, nehmen wir streng genommen keinen Ball wahr,

sondern eine runde Form, eine Farbe, ein elastisches Tastgefühl. Erst später assoziieren wir dieses Bündel von Wahrnehmungen mit einem bestimmten Objekt namens Ball. Wenn wir das nächste Mal so etwas sehen, denken wir nur noch »Schau, ein Ball« und vergessen, wie viel begriffliche Arbeit in dieser scheinbar unmittelbaren Wahrnehmung steckt.

In der Tropenontologie kehren wir zu den direkten Wahrnehmungen der frühen Kindheit zurück. Wir erleben nicht zuerst einen Ball und heften ihm nachträglich Eigenschaften an, sondern wir erleben Eigenschaften und nennen sie Ball. Ein Ball ist nichts als seine Eigenschaften.

Auf die Quantenfeldtheorie angewandt heißt das: Was wir ein Elektron nennen, ist eigentlich ein Bündel aus verschiedenen Tropen: drei feste Wesenseigenschaften (Masse, Ladung und Spin) sowie zahlreiche wandelbare nichtwesentliche Eigenschaften, die sich auf Wahrscheinlichkeiten für Ort und Geschwindigkeit beziehen. Zum Beispiel sagt die Theorie voraus, 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 hingegen unproblematisch. Das Vakuum enthält, wie es sich gehört, keine Teilchen – wohl aber Eigenschaften. Ein Teilchen ist das, was man bekommt, wenn diese Eigenschaften sich auf eine bestimmte Weise bündeln.

Physik und Metaphysik

Wie kann eine so erfolgreiche Theorie wie die Quantenfeldtheorie derart grundlegende Kontroversen auslösen? Die Antwort liegt auf der Hand. Die Theorie sagt uns zwar, was wir messen können, aber sie spricht in Rätseln, wenn es um die Frage geht, was eigentlich hinter unseren Beobachtungen steckt. Die Theorie beschreibt das Verhalten von Quarks, Myonen, Photonen und diversen Quantenfeldern, aber sie sagt nichts darüber aus, was ein Photon oder ein Quantenfeld wirklich ist. Das muss sie auch gar nicht, denn physikalische Theorien können empirisch gültig sein, ohne metaphysische – jenseits der Physik liegende – Fragen zu klären.

Vielen Physikern genügt das. Sie nehmen eine so genannte instrumentelle Haltung ein und verneinen, dass wissenschaftliche Theorien die Welt widerspiegeln sollen. Für sie stellen Theorien bloß Instrumente dar, mit denen sich experimentelle Vorhersagen machen lassen. Dennoch sind die meisten Wissenschaftler überzeugt, dass ihre Theorien zumindest einige Aspekte der Natur abbilden, bevor Experimentatoren eine Messung durchführen. Wollen wir nicht die Welt verstehen, wenn wir Wissenschaft treiben?

Um ein umfassendes Bild der physikalischen Welt zu gewinnen, muss man Physik mit Philosophie kombinieren. Beide Disziplinen ergänzen einander. Die Metaphysik liefert

verschiedene konkurrierende Rahmen für die Ontologie der materiellen Welt, kann aber über Fragen der inneren Widerspruchsfreiheit hinaus keine Auswahl unter ihnen treffen. Die Physik wiederum gelangt allein nicht zu schlüssigen Aussagen über fundamentale Fragen wie die Definition von Objekten, die Rolle der Individualität, den Status von Eigenschaften, das Verhältnis von Dingen und Eigenschaften sowie die Bedeutung von Raum und Zeit.

Das Zusammenwirken der beiden Disziplinen ist besonders wichtig in Zeiten, in denen Physiker gezwungen sind, Grundlagen ihres Forschungsgegenstands zu revidieren. Metaphysisches Denken leitete schon Isaac Newton und Albert Einstein, und auch heute beeinflusst es viele Theoretiker, welche die Quantenfeldtheorie mit Einsteins Gravitationstheorie vereinigen möchten. Philosophen haben ganze Bibliotheken von Büchern und Artikeln über Quantenmechanik und Gravitationstheorie geschrieben, während wir gerade erst beginnen, die Realität der Quantenfeldtheorie zu erforschen. Die hier skizzierten Alternativen zu den Standardansichten über Teilchen und Felder könnten Physikern bei ihrem Streben nach der großen Vereinigung wichtige Impulse geben. ~

DER AUTOR



Meinard Kuhlmann vertritt eine Professur für Philosophie an der Universität Bielefeld. Nach dem Studium der Physik und der Philosophie forschte er unter anderem an den Universitäten Bremen, Oxford, Chicago und Pittsburgh. Seit 2012 ist er Sprecher der Arbeitsgemeinschaft »Philosophie der Physik« der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLEN

- Kuhlmann, M. et al. (Hg.):** Ontological Aspects of Quantum Field Theory. World Scientific, Singapur 2002
- Kuhlmann, M.:** The Ultimate Constituents of the Material World: In Search of an Ontology for Fundamental Physics. Ontos/De Gruyter, Berlin 2010
- Kuhlmann, M.:** Quantum Field Theory. In: Stanford Encyclopedia of Philosophy, 2012 (nur online)
<http://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/quantum-field-theory>

WEBLINKS

- www.scientificamerican.com/aug2013/field
Ein Video zur Erklärung des Feldbegriffs
- Baker, D.J.:** Against Field Interpretation of Quantum Field Theory. In: British Journal for the Philosophy of Science 60, S. 585–609, 2009
<http://philsci-archiv.pitt.edu/4132/1/AgainstFields.pdf>
- Halvorson, H., Clifton, R.:** No Place for Particles in Relativistic Quantum Theories? In: Philosophy of Science 69, S. 1–28, 2002
<http://arxiv.org/abs/quantph/0103041>
- Diesen Artikel, weitere Literatur und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1286309