

Vom Klötzchenatom zur Stringwelt

Die Genese einer neuen Physik: Vor 150 Jahren legte James Clerk Maxwell den Grundstein zur modernen Feldtheorie. *Von Martin Koch*

Woraus bestehen alle Dinge? Von welcher Substanz ist die Materie? Das fragte Thales von Milet, der Urvater der griechischen Philosophie, schon vor rund 2500 Jahren. Antworten hierauf gab es seitdem viele. Doch keine war für die Wissenschaftsgeschichte so folgenreich wie die des in der thrakischen Stadt Abdera lebenden Philosophen Demokrit (um 460-370 v.u.Z.): »Nur scheinbar hat ein Ding eine Farbe, nur scheinbar ist es süß oder bitter; in Wirklichkeit gibt es nur Atome und leeren Raum.«

Alle Atome bestehen laut Demokrit aus der gleichen Substanz. Sie sind fest und unwandelbar, aber unterschiedlich in ihrer Größe und Gestalt. Und sie besitzen die Fähigkeit, sich durch Bewegung, Druck und Stoß mit anderen Atomen zu verbinden. In diesem Prozess formt sich die materielle Welt, ohne dass dafür ein Schöpfer vonnöten wäre.

Die Atomistik, sagte der Physik-Nobelpreisträger Richard Feynman einmal, sei die wichtigste Erkenntnis der Menschheit, die er einer außerirdischen Zivilisation mitteilen würde. Gleichwohl blieb diese Erkenntnis unter dem Einfluss von Aristoteles und des in Europa herrschenden Christentums jahrhundertlang unbeachtet. Erst als der französische Philosoph Pierre Gassendi den epikureischen Atomismus im 17. Jahrhundert mit der Theologie versöhnt hatte, hielten die Atome schrittweise Einzug in die Wissenschaft.

Wegweisend hierfür wurde die Physik Isaac Newtons, der zufolge die Materie aus massiven Teilchen besteht, die den Gesetzen der Mechanik gehorchen. Nachdem sich diese Gesetze bei der Beschreibung irdischer und kosmischer Bewegungsvorgänge hervorragend bewährt hatten, erlangte die klassische Mechanik den Status einer Universaltheorie des Universums. Dennoch blieben die Grundannahmen Newtons nicht unwiderrprochen. Insbesondere dessen Vorstellung von der Gravitation als einer Fernkraft, die unvermittelt durch den Raum wirkt und sich unendlich schnell ausbreitet, hatte für manche Gelehrte den unangenehmen Beigeschmack des Okkulten.

Aber erst die mit dem Elektromagnetismus verbundenen Phänomene ließen eine andere Form der Wirkungsübertragung vermuten. Das Fundament für den Paradigmenwechsel von der Fern- zur Nahwirkungstheorie legte Michael Faraday, der dabei von dem heute weithin vergessenen kroatischen Naturforscher Roger Joseph Boscovich beeinflusst war. In seinem Hauptwerk »Philosophiae Naturalis Theoria« (1758) hatte Boscovich die atomistische Mechanik Newtons mit der Monadologie von Gottfried Wilhelm Leibniz und der Idee des Dynamismus verbunden. Das heißt: Er stellte sich das, was wir heute Elementarteilchen nennen, als punktförmige Kraftzentren vor, die dennoch Trägheit besitzen und über ein einheitliches Gesetz miteinander wechselwirken. Obwohl sich das von ihm vorgeschlagene Kraftgesetz als untauglich erwies, hat der dynamische Atomismus die Physik nachhaltig beeinflusst. Boscovichs Theorie, schrieb Friedrich Nietzsche, sei »der größte Triumph über die Sinne, der bisher auf Erden errungen worden ist.«

Faraday äußerte sich zwar nicht ganz so überschwänglich. Aber auch er studierte Boscovichs Ideen sehr genau. »Wenn ich richtig verstehe«, schrieb er 1844, »so sind Boscovichs Atome einfach Kraftzentren, aber keine materiellen Teilchen als Sitz dieser Kräfte.« Faraday blieb dabei jedoch nicht stehen. Statt die materiellen Atome durch immaterielle Kraftzentren zu ersetzen, entwickelte er ein gänzlich neues Konzept, nämlich das eines realen Kraftfeldes, in dem sich elektrische und magnetische Wir-

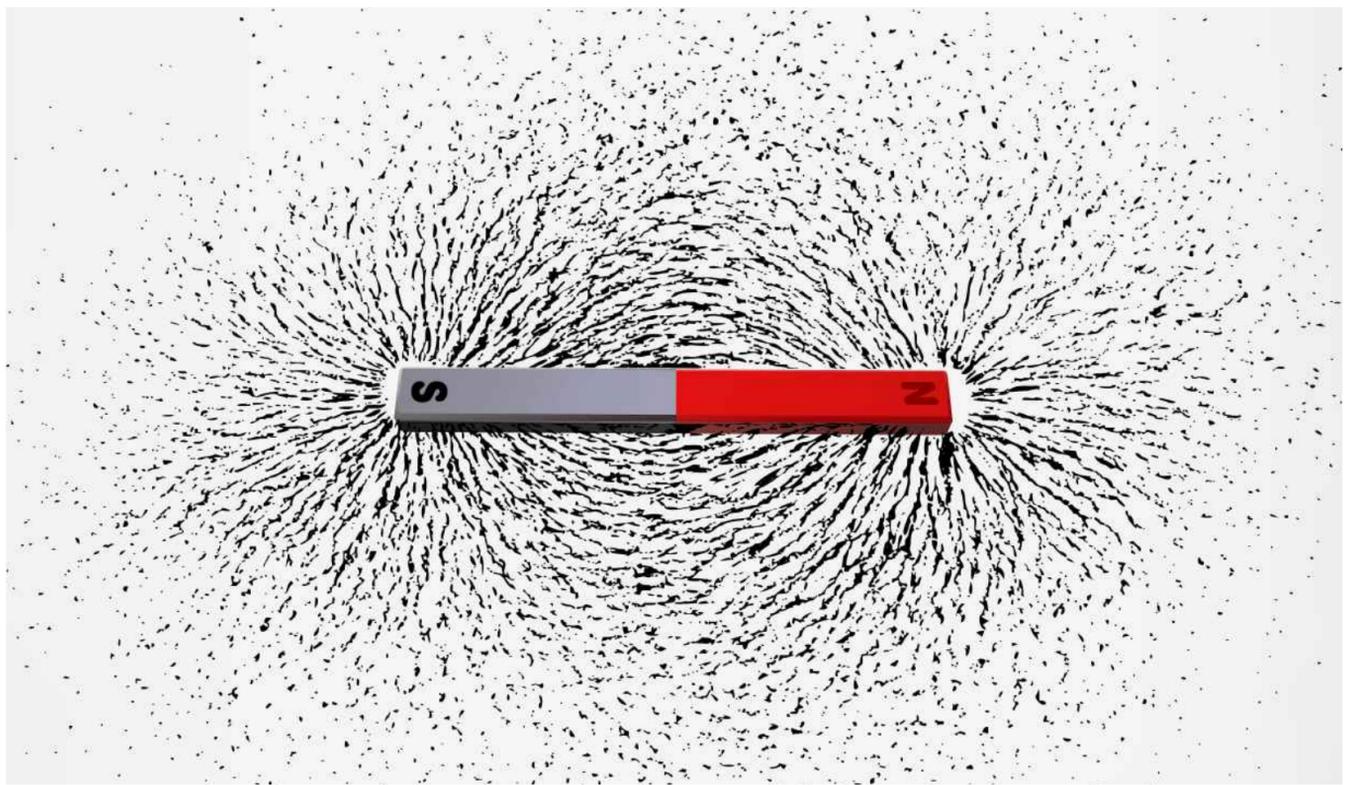
kungen im Raum kontinuierlich von Punkt zu Punkt fortpflanzen.

Im Anschluss an den dänischen Physiker Hans Christian Oersted, der 1820 die magnetische Wirkung des elektrischen Stroms nachgewiesen hatte, war Faraday bemüht, auch den umgekehrten Prozess zu realisieren, also Magnetismus in Elektrizität zu verwandeln. Nach mehreren Fehlschlägen gelang ihm 1831 der große Wurf: Er entdeckte die elektromagnetische Induktion. Und Faraday fand noch mehr heraus, nämlich dass ein Magnetfeld die Eigenschaften von polarisiertem Licht beeinflusst. Davon ausgehend wurden in der Folge mindestens elf Theorien entworfen, um den Zusammenhang zwischen Elektrizität, Magnetismus und Licht zu beschreiben. Faraday selbst war mit einer solchen Aufgabe überfordert, denn er besaß keine mathematische Ausbildung und konnte der Legende nach nicht einmal ein Binom quadrieren. Am Ende blieb es dem schottischen Physiker James Clerk Maxwell vorbehalten, Elektrizität und Magnetismus zu einer Naturkraft zu vereinen und nachzuweisen, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist.

Im Geiste der damaligen Physik beschrieb Maxwell die Phänomene der Elektrizität und des Magnetismus zunächst mittels mechanischer Analogien. Faradays Kraftlinien etwa stellte er sich als kleine, veränderliche Röhren vor, durch welche eine Flüssigkeit strömt, die sich nicht zusammendrücken lässt. Als Abbild der Wirklichkeit wollte Maxwell solche Modelle allerdings nicht verstanden wissen. Sie dienten lediglich dem Zweck, schrieb er, gewisse Theoreme der Mathematik »in einer anschaulichen und auf physikalische Probleme leicht anwendbaren Form darzustellen«. Formeln allein seien dafür weniger geeignet.

Eine erste, stark mechanisch geprägte Darstellung der Grundgleichungen des Elektromagnetismus veröffentlichte Maxwell 1861/62 in seiner Arbeit »On Physical Lines of Force«. Drei Jahre später legte er einen weiteren Aufsatz vor, in dem er die mechanischen Modelle weniger stark beanspruchte und die elektromagnetischen Wellen unmittelbar aus den Feldgleichungen ableitete. Der Text erschien 1865 unter dem Titel »A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field« in einer der ältesten wissenschaftlichen Zeitschriften der Welt, den »Philosophical Transactions of the Royal Society«.

Heute gehören die vier Maxwell'schen Gleichungen zu den berühm-



Jeder Schüler kennt wohl dieses Bild: Feine Eisenspäne zeichnen das Feld zwischen den Polen eines Magneten nach.

Foto: 123rf/Sastypotos

testen Formeln der Physik. Und sie beeindrucken nicht nur das geübte mathematische Auge durch ihre Eleganz und Schönheit. »War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb?« fragte 1893 der österreichische Physiker Ludwig Boltzmann in Anlehnung an Goethe. Inzwischen kann man sogar T-Shirts und Tassen mit Maxwells Gleichungen kaufen. Sie bieten die Vorlage für Tattoos sowie Balladen im Internet (www.youtube.com/watch?v=PsCyEO2AHZQ).

Glaut man Stephen Hawking, dann hat Maxwell »die wirtschaftlich wichtigsten Gleichungen« der Geschichte formuliert. Tatsächlich gäbe es ohne sie kein Radio, keinen Fernseher, keinen Computer, kein Smartphone, um nur einige Beispiele zu nennen. Darüber hinaus bildeten sie für Physiker immer auch einen Anreiz, auf eine einheitliche Theorie der Naturkräfte hinzuwirken.

Davon waren lange Zeit nur zwei bekannt: Elektromagnetismus und Gravitation. Vor 100 Jahren gelang es Albert Einstein im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie, die Gravitation mit der Krümmung der vierdimensionalen Raumzeit zu identifizieren. Anschließend ver-

suchte er, auch dem elektromagnetischen Feld eine geometrische Eigenschaft der Raumzeit zuzuordnen. Allein der Erfolg blieb ihm versagt. Zumal in der Folge zwei weitere Naturkräfte entdeckt wurden, die schwache und starke Kraft, die ihre Wirkung dort entfalten, wo die von Einstein einst ungeliebte Quantenmechanik gilt: in atomaren Dimensionen. Während die schwache Kraft unter anderem den radioaktiven Betazerfall steuert, hält die starke Kraft den Atomkern und dessen Bausteine zusammen.

Bereits in den 1940er Jahren präsentierte Richard Feynman und andere Physiker eine Quantenversion des Elektromagnetismus: die Quantenelektrodynamik (QED). Sie wurde zum Vorbild für alle weiteren sogenannten Quantenfeldtheorien. 1967 kam als nächstes die Vereinigung von elektromagnetischer und schwacher Kraft zu Stande. Die hierbei entwickelte Theorie wurde seitdem vielfach präzise bestätigt. Natürlich gab es auch Versuche, die starke Kraft in das neue Konzept einzubinden. Was dabei entstand, nennt man heute etwas hochtrabend Große Vereinheitliche Theorie (GUT,

engl.: Grand Unified Theory). Doch sämtlichen GUT-Varianten fehlt bislang die experimentelle Fundierung.

Anders als in der klassischen Physik haben die Felder in der Quantenfeldtheorie die Eigenschaft, aus speziellen Elementarteilchen zu bestehen, sogenannten Bosonen, die zwischen Materieteilchen hin- und herfliegen und dadurch Kräfte übertragen. Im Fall des elektromagnetischen Feldes wird die Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen durch den Austausch virtueller Photonen (Lichtteilchen) vermittelt. Doch anders als reale Photonen, die etwa auf die Netzhaut treffen, kann man virtuelle Photonen mit einem Teilchendetektor nicht nachweisen.

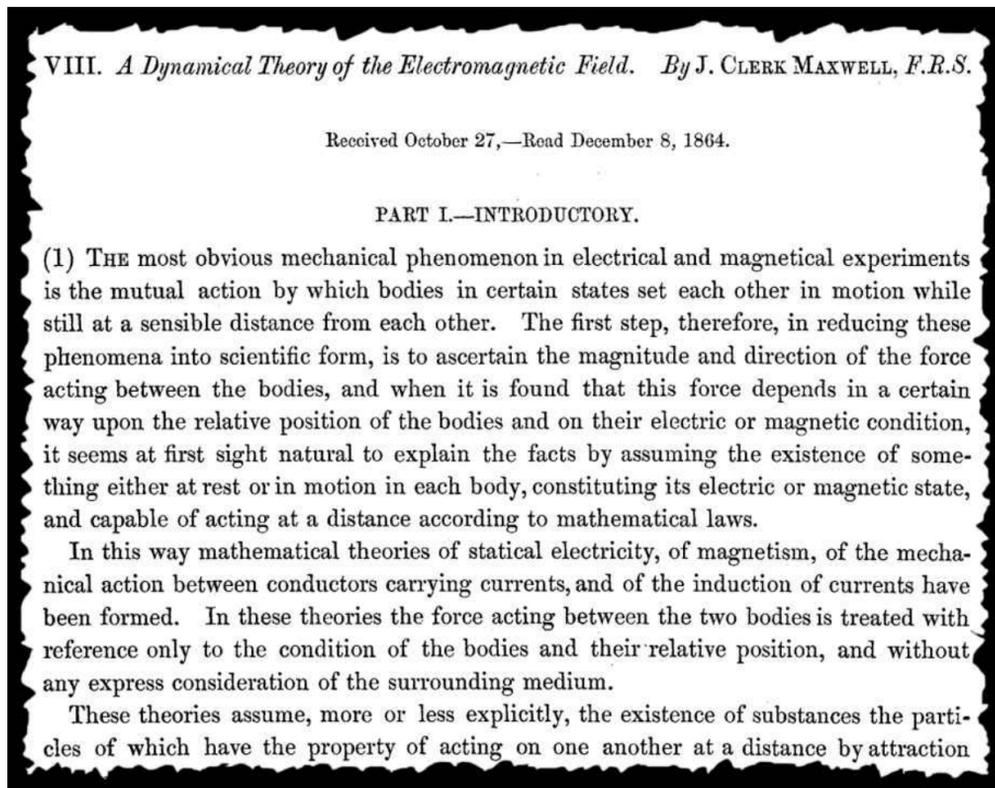
Die größten Probleme bereitet Physikern nach wie vor die vierte Naturkraft, die Gravitation. Sie zu quantisieren, ist bisher nicht gelungen. Mehr noch führt die Verbindung von Allgemeiner Relativitätstheorie und Heisenbergscher Unschärferelation zu unauflösbaren Unendlichkeiten. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, vertrauen viele Physiker auf die sogenannte Stringtheorie, die ein Teilchenkonzept beinhaltet, das mit der ursprünglichen Vorstellung vom Klötzchenatom nur noch wenig gemein hat. Strings (engl.: Fäden, Saiten) sind vielmehr vibrierende eindimensionale Objekte, deren Schwingungszustände sich verschiedenen Elementarteilchen zuordnen lassen. Darunter auch dem Graviton, dem theoretisch postulierten Botenteilchen der Schwerkraft.

Allerdings benötigt man, um eine Stringtheorie widerspruchsfrei formulieren zu können, eine Raumzeit, die zehn und mehr Dimensionen aufweist. Warum nehmen wir dann aber nur drei Dimensionen des Raumes und eine der Zeit wahr? Auch darauf haben Physiker eine Antwort parat: Die überzähligen Dimensionen sind zu einem Raum von extrem geringer Größe zusammengerollt und damit für uns faktisch nicht vorhanden. Eine Chance, ihre Existenz trotzdem nachzuweisen, böten eventuell gigantische Beschleuniger, die es in dieser Form aber noch nirgends gibt.

Bis heute, so darf man resümieren, hat die mit dem Namen Newton, Maxwell und Einstein verbundene Suche nach einer »Weltformel« nicht den gewünschten Erfolg gebracht. Im Gegenteil. »Die Physik ist noch lange nicht am Ende«, meint Hawking und fügt etwas enttäuscht hinzu, dass eine »Theorie von Allem« wohl auf ewig ein Traum bleiben wird.

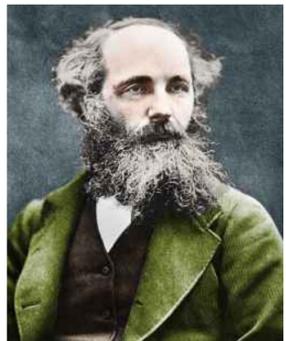
»War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb?«

Der österreichische Physiker Ludwig Boltzmann 1893 über Maxwells Gleichungen



Maxwells Veröffentlichung von 1865 in den »Philosophical Transactions of the Royal Society«

Abb.: RS



James Clerk Maxwell

Der schottische Physiker (13. Juni 1831 bis 5. November 1879) hat neben seiner revolutionären Theorie des Elektromagnetismus auch Wesentliches zur statistischen Mechanik beigetragen. Das Bild zeigt ihn um 1875.

Foto: imago/Leemage