

# Noch ein Quäntchen Quantenphysik

Von Gunther Geipel

Im Jahr 1900 legte *Max Planck* den entscheidenden Grundstein der Quantentheorie. Auch der Ausdrucks „Quantenphysik“ wurde erstmals von ihm verwendet, und zwar in seinem 1929 gehaltenen Vortrag „*Das Weltbild der neuen Physik*“. Der Begriff „Quantenphysik“ macht deutlich, dass es sich bei der Quantentheorie nicht einfach um eine Theorie unter mehreren handelt, sondern dass die gesamte Physik dadurch eine neue Richtung bekommen hat. Bevor wir aber dazu kommen, muss ein kurzer Rückblick erfolgen:

## Atome

Der griechische Philosophie *Leukipp* und sein Schüler *Demokrit von Abdera* haben bereits um 500 vor Christus die Vorstellung vom „*átomos*“, dem „Unzerschneidbaren“ als dem kleinsten Baustein der Materie entwickelt.<sup>1</sup> Bis heute ist diese Vorstellung aktuell; und das einst so kühne und völlig spekulative Gedankenkonstrukt der Atomisten ist inzwischen - beginnend etwa im Jahr 1900 - vielfach experimentell bestätigt worden. „*Nach heutiger Auffassung ist ein Atom der kleinste Bestandteil eines chemischen Elements.*“ (*Brigitte Falkenburg*)

Andererseits aber wissen wir heute, dass „Atome“ nicht das sind, was ihr Name sagt, dass sie trotz ihrer Kleinheit sehr wohl teilbar sind. Sie bestehen aus Neutronen, Protonen und Elektronen, wobei Protonen und Neutronen wiederum aus kleineren Bausteinen gebildet werden.

Unsere gesamte materielle Welt besteht aus nicht mehr als 92 Atomsorten, deren „Mengengebilde“ man sinnvollerweise „Elemente“ nennt. Aber das Atom ist eben keineswegs der kleinste Baustein der Materie.

## Ein Blick ins Wasserstoffatom

Schauen wir ein Wasserstoffatom und seine erstaunlichen Größenverhältnisse etwas genauer an! Das Wasserstoffatom ist das einfachste aller Atome. Um seinen einfach positiv geladenen Atomkern (mit einem Proton) „kreist“ ein einziges negativ geladenes Elektron. Der „einfache“ Wasserstoff nimmt damit den ersten Platz im Periodensystem der Elemente ein und wird mit dem Buchstaben „H“ (lat. hydrogenium) bezeichnet.

„Einfach“ im Sinne von „simpel“ aber ist auch das „einfache“ Wasserstoffatom keinesfalls! Der Radius des Atomkerns steht zu dem der Atomhülle in einem Verhältnis von etwa 1:40.000. *Rüdiger Blume*, Professor für Chemie und Didaktik der Chemie, schreibt dazu: „Zum Vergleich denken wir uns einen Kreis mit einem Radius, der der Höhe des Eiffelturms gleicht (324 m). Im Zentrum des Kreises liegt eine kleine Murmel mit dem Radius von 0,8 cm [...] Abgerundet beträgt das Verhältnis der Volumina von Atomkern und Atom 1:10<sup>14</sup>. Das H-Atom besteht also wirklich mehr oder weniger aus leerem Raum. Der Atomkern nimmt davon nur ein *Hundertbillionstel* ein.“<sup>2</sup>

Wenn also das Atom fast nur aus leerem Raum besteht, muss sich die Dichte im winzigen Kern konzentrieren. Und in der Tat: über 99,9 % der Atommassen stecken in den

---

<sup>1</sup>Zum Begriff und zur Erforschung des Atoms siehe: <http://www.naturphilosophie.org/atom-2/> (Dort auch weitere Literatur).

<sup>2</sup> [http://www.chemieunterricht.de/dc2/tip/02\\_10.htm](http://www.chemieunterricht.de/dc2/tip/02_10.htm)

Atomkernen. Und die Dichte des Atomkerns hat es entsprechend in sich: sie beträgt etwa 100 Millionen Tonnen pro Kubikzentimeter! 25 Millionen Elefanten wiegen etwa diese 100 Millionen Tonnen. Und die denke man sich nun in einem kleinen Würfel, mit dem wir „Mensch-ärger-dich-nicht“ spielen! Bei diesem Gedanken wird bei mir aus „Mensch-ärger-dich-nicht“ ein „Mensch-wunder-dich-sehr“!

Dieses Raum- und Massewunder finden wir keineswegs nur beim Wasserstoff. Materie, wie wir sie tagtäglich erleben, ist ganz überwiegend leerer Raum, auch wenn in anderen Elementen mehr Elektronen „ihre Bahn ziehen“ als im Wasserstoff. Und im Zentrum der riesigen Leere finden sich bei jedem Element die ebenso winzigen wie gewichtigen „Massekolosse“ der Atomkerne.

Erstaunlich ist nun außerdem, dass die kleinen Bausteine der Protonen und Neutronen im Atomkern, die Quarks, selbst nur etwa 1 Prozent zur Masse beitragen.<sup>3</sup> Etwa 99 % der Masse hingegen resultieren aus den Kräften, die im Atomkern zwischen den Quarks wirksam sind. Wenn also über 99,9 % der Atommasse in den Atomkernen stecken, dann kommen wiederum ca. 99 % davon durch die inneren „Wechselwirkungen“ zustande, insbesondere durch die „starke Kernkraft“.

Ein bisschen Einblick in die innere Größe der Miniwelt haben wir nun bereits gewonnen. Um als Kontrapunkt noch einmal zu verdeutlichen, wie klein diese atomare Welt ist: Verbinden sich 2 Atome „H“ mit einem Atom „O“, dem Sauerstoff, so entsteht Wasser, das berühmte H<sub>2</sub>O. Ein Wassertropfen besteht aus einer unvorstellbar großen Zahl von H<sub>2</sub>O-Wassermolekülen: ungefähr  $3 \times 10^{19}$ , oder 30 Quadrillionen, oder 3 Milliarden mal 10 Milliarden.

### **Ein Quäntchen „Kernwissen“ zur Quantenphysik**

Der Kern der wissenschaftlichen Beschäftigung mit der Welt des Allerkleinsten ist die Quantentheorie. Und ein „Quäntchen“ von den Grundlagen der Quantenphysik wollen wir uns anschauen:

„Quäntchen“ und „Quant“ haben sprachgeschichtlich nichts miteinander zu tun. Die alte Gewichtseinheit (und Währungseinheit) „Quäntchen“ war der fünfte Teil eines „Lots“ und leitete sich vom mittellateinischen „quentinus“ = „fünfter Teil, Fünftel“ her. Der Begriff „Quant“ hingegen kommt vom lateinischen Fragewort „quantum“ = „wie groß?, wie viel?). In der Physik steht er dafür, dass es im Bereich der kleinsten Dinge keine fließenden Größen gibt, sondern dass es in (winzigsten!) Sprüngen vorwärtsgeht. Ohne diesen „Zwang zu festgesetzten Abständen“ wäre eben z.B. ein Atom instabil, Kern und Hülle mit ihren Plus-Minus-Ladungen würden sich sofort in einer Weise anziehen, dass sie ineinander stürzen und sich gegenseitig neutralisieren. Die Frage „wie groß?“ deutet also mit gutem Grund ein tiefes Strukturmerkmal der „Quantenwelt“ mit der „Quantelung“ ihrer Größen an.

Max Planck, der Vater der Quantentheorie, hat diesen „Abstandszwang“ im Jahr 1900 sogar schon exakt berechnen und in eine schwindelerregend kleine und dabei unfassbar genaue Zahl fassen können: das plancksche Wirkungsquantum beträgt  $6,626\ 069\ 57 \cdot 10^{-34}$ . Da versagen bei mir alle Versuche der Veranschaulichung...

„Kernwissen“ zur Quantenphysik findet sich m.E. bei Wikipedia schön zusammengefasst:

---

<sup>3</sup> Und die Gluonen als zweite Bausteinsorte der Protonen und Neutronen sind nach dem Standardmodell masselos, was jedoch nicht heißt, dass sie nicht doch eine sehr geringe Masse aufweisen könnten.

„Die Quantenphysik unterscheidet sich von der klassischen Physik vor allem in folgenden Punkten:

- Quantenhypothese: Bestimmte physikalische Größen können nicht jeden beliebigen Wert annehmen sondern nur bestimmte diskrete Werte. Man sagt, sie sind „quantisiert“ oder „gequantelt“.
- Welle-Teilchen-Dualismus: Quantenobjekte zeigen – je nach Betrachtungsweise – Eigenschaften von Wellen oder Teilchen (sprich: Massepunkten), sind aber weder das eine noch das andere. Die wahre Natur der Quantenobjekte entzieht sich der konkreten Anschauung.
- Die Quantenphysik ist nicht deterministisch. Das bedeutet, dass der Ausgang eines Experiments nicht eindeutig durch die Anfangswerte festgelegt ist. Oft lassen sich nur Aussagen über Wahrscheinlichkeiten machen.
- Der Ausgang eines Experiments ist niemals unabhängig von der Beobachtung, sondern immer untrennbar mit ihr verbunden. D. h., der Beobachtungsvorgang beeinflusst das zu beobachtende Phänomen in physikalischer Weise.“<sup>4</sup>

### Ein Quäntchen Geschichte der Quantenphysik

*„Gegen Ende des 19. Jahrhunderts glaubten die Physiker, die Physik sei im Wesentlichen abgeschlossen. Die Physiker hatten zwei große Theorien, die Mechanik und die Elektrodynamik und die etwas dazwischen angesiedelte Theorie der Thermodynamik. Die Wechselwirkungen zwischen Materie und Strahlung wurden mithilfe des Lorentzschen Kraftgesetzes erklärt.*

*Zwar gab es einige ungeklärte Punkte, einige nicht erklärbare Beobachtungen, doch man gewöhnte sich langsam daran, sie zu ignorieren. [...] Und genau aus diesen scheinbar "letzten Problemen der Physik" heraus entstand fast das gesamte neue physikalische Weltbild.“<sup>5</sup>*

Max Plancks Theorie von der Quantisierung der Energie (1900), Albert Einsteins Erklärung des photoelektrischen Effekts durch die Lichtquantenhypothese (1905), Niels Bohrs Atommodell mit quantisierten Elektronenbahnen (1913), das bohr-sommerfeldsche Atommodell (1916) und Louis de Broglies (sich nicht bewährende, aber doch weiterführende) Theorie der Materiewellen (1924) waren wichtige Meilensteine der frühen Quantenphysik.

Die zweite Etappe, die Quantenmechanik, fand ihren Beginn mit der Formulierung der Matrizenmechanik durch Werner Heisenberg, Max Born und Pascual Jordan, mit Schrödingers und Heisenbergs unterschiedlichen und doch adäquaten Formulierungen der Quantenmechanik (alles 1925) und mit Heisenbergs Unschärferelation (1927). Weitere wichtige Entdeckungen waren das „Pauli-Prinzip“, die „spukhaften Fernwirkung“ der Quantenverschränkung und die Dekohärenz hinsichtlich makroskopischer Systeme. Mit dem Orbitalmodell wurde ein grundsätzlich anderes Bild vom Atom gezeichnet: statt Elektronenbahnen gibt es darin nur noch Aufenthaltswahrscheinlichkeiten in einer „Wolke“. Und schließlich konnte – nicht zuletzt dank neuer gigantischer Technik- immer mehr konkretes Wissen über die Vielzahl und die Eigenschaften der kleinsten Teilchen und der Kräfte zwischen ihnen angesammelt werden. - Die Etappen und Schritte der Quantenphysik aber alle nachzuzeichnen, würde unser „Quäntchen“ überdehnen. Und ich denke, man kann und muss als „Laienwissenschaftler“ auch nicht alles davon wissen.

---

<sup>4</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenphysik> (Zugriff 4.8.2014)

<sup>5</sup> <http://de.wikibooks.org/wiki/Quantenmechanik>