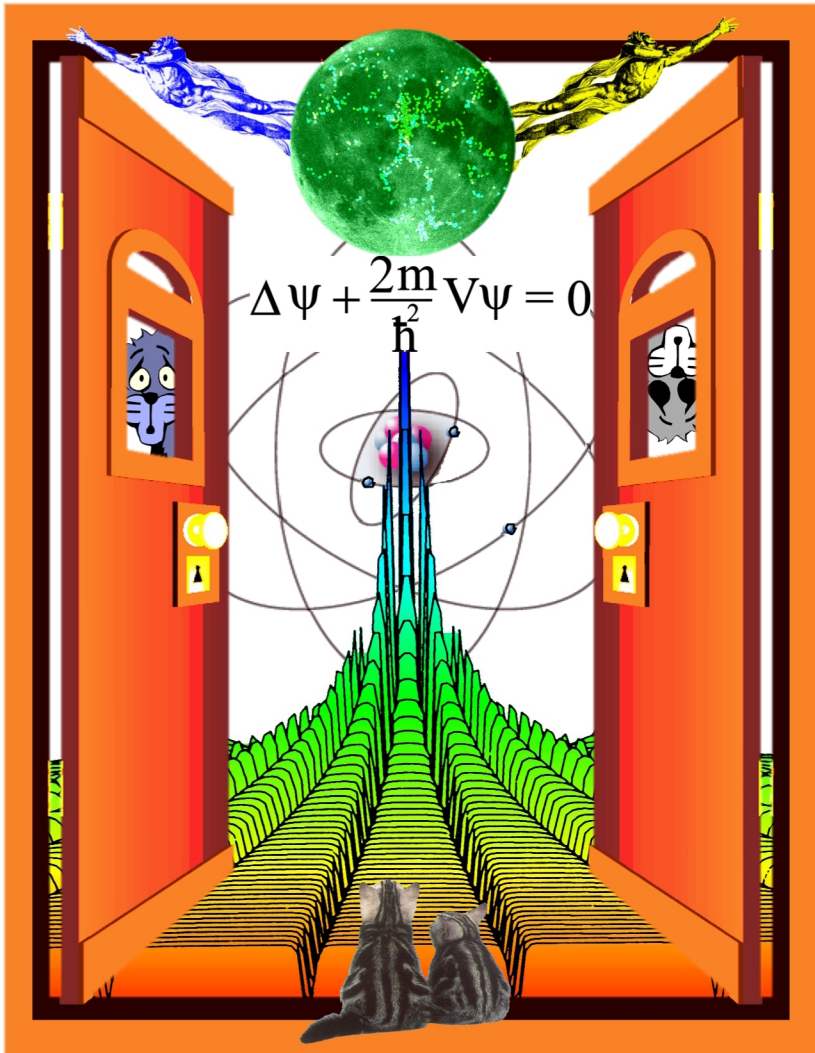


*Peter Ripota präsentiert:*

# *Das Rätsel der Quanten*



**... und seine Lösung!**



*Peter Ripota präsentiert:*

*Das Rätsel  
der Quanten*

**... und seine Lösung!**



*Peter Ripota*

*studierte  
Physik und  
Mathematik  
an der  
Technischen  
Hochschule  
Wien. Als  
langjähriger  
Mitarbeiter des  
P.M.-Magazins  
popularisierte  
er die ver-  
schiedensten  
Themen,  
vor allem  
aus Physik,  
Mathematik  
und Astronomie.*

Das Titelbild ist eine Collage aus wichtigen Konzepten der Quantenphysik. Hinter den Fenstern der Tür sehen wir Schrödingers Katze, links lebt sie noch, rechts ist sie schon tot. In der Mitte prangt die Grundgleichung der Quantenphysik, die Schrödinger'sche Wellengleichung. Darunter sehen wir eine symbolische Darstellung des so wichtigen "Doppelspaltversuchs", vermittelt durch das "Bohmsche Quantenpotenzial". Unten hocken zwei Kätzchen als naive Beobachter, die den Mond betrachten, damit er nicht verschwindet, was er gemäß der "Kopenhagener Deutung" tun müsste, wenn man ihn nicht sieht. Vor dem Mond beobachten die Kätzchen zwei "Zwillingsteilchen", die zur selben Zeit und am gleichen Ort entstanden sind und durch ein unsichtbares, aber weitreichendes Band zusammen gehalten werden (auch auf der Rückseite des Buchs abgebildet). Im Hintergrund schimmert das Bohrsche Atommodell als mikroskopische Version des Sonnensystems. - Die Autorenvorstellung zeigt den Verfasser im Kreis von Schrödingers Kätzchen, wobei von der optimistischen Annahme ausgegangen wird, dass die arme Katze überlebte und Nachkommen zeugte.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2016 Peter Ripota

Herstellung und Verlag: Books on Demand GmbH, Norderstedt

ISBN 978-3-7412-4752-1

e-mail: [tango@peter-ripota.de](mailto:tango@peter-ripota.de)

Webseite: <http://www.peter-ripota.de/einstein/>

# Inhalt

## Was ist so besonders an der Quantenphysik? 6

<b>Was sind Quanten?</b>	10
<b>Die Schöpfer der Ideen</b>	16
Demokrit, der Denker	16
Boltzmann, der Zähler	19
Planck, der Korrekte	26
Einstein, der Visionär	32
Mach, der Nüchterne	39
Bohr, der Philosophierer	45
Heisenberg, der Patriot	55
de Broglie, der Kühne	66
Schrödinger, der Klassiker	71
Dirac, der Ästhet	82
Everett, der Träumer	94
Bell, der Kritiker	99
Bohm, der Mystiker	104
<b>Die Ideen der Schöpfer</b>	113
Das Taubenschlag-Prinzip	113
Die Planckschen Strahlungsgesetze	118
Der Doppelspalt-Versuch	123
Wie Heisenberg zu den Matrizen kam	131
Unbestimmtheit - Unschärfe - Unsicherheit	140
Verschränkung	148
Schrödingers Katze	151
Der Kollaps der Wellenfunktion	155
Die Bra-Ket-Schreibweise	158
Mathematiker und Physiker	166

Wie Bohm zu seinen Trajektorien kam	171
Vertagte Entscheidungen	177
Teleportation	185
Gibt es Einzelteilchen?	189
Das Geheimnis der Wandertröpfchen	192
Wie wirklich ist die Wirklichkeit?	198
Kopenhagener Deutung	205
Viele-Welten-Theorie	207
Führungswellentheorie	208
Quanteninformationstheorie	209
Transaktions-Interpretation	210
Mystische Physik	212
Ghirardi-Rimini-Weber	213
Charon	214
Capra	216
Wolf	218
Quantenphysik und Sciencefiction	222
<b>Literatur</b>	<b>230</b>

## Was ist so besonders an der Quantenphysik?

*Eine angebliche wissenschaftliche Entdeckung ist wertlos, wenn sie nicht einer Bardame erklärt werden kann.*

ERNEST RUTHERFORD

Zahlreiche wissenschaftliche Theorien entwickelten Konzepte, die einander scheinbar widersprachen, die nicht gleichzeitig richtig sein konnten. So postulierte die Phlogistontheorie um 1700 einen Stoff - Phlogiston - der bei Verbrennung aus jedem Körper entweicht. Endgültig widerlegt wurde sie 1785 von ANTOINE LAVOISIER, der zeigen konnte, dass bei jeder Verbrennung das genaue Gegenteil eintritt: Ein Stoff (Sauerstoff) dringt in den Körper ein, was man durch Gewichtsveränderung nachweisen kann.

Oder der Streit, wer bezüglich der Eigenschaften von Licht Recht hat: NEWTON, der sich Licht aus Teilchen bestehend vorstellte, oder HUYGENS, der meinte, Licht wäre eine Wellenerscheinung. Heute wissen wir, dass beides stimmt. Oder Wärme: Ist sie ein Stoff, der aus einem Körper herausgezogen oder in ihn eingebracht werden kann? Oder liegt ihre Ursache im Körper selbst? Schließlich Atome: Besteht die Materie aus ihnen, oder ist diese ein Kontinuum? Nicht zuletzt der leere Raum, manchmal mit dem "Vakuum" gleichgesetzt: Ist er wirklich völlig leer oder enthält er Energien, Felder, virtuelle Teilchen?

All diese Fragen (die zum Teil noch unbeantwortet sind) ergaben Theorien mit Voraussagemöglichkeiten, und sie sind teilweise heute noch in Gebrauch, solange sie einfach zu handhaben sind und ihre Voraussagen zutreffen. Ein Beispiel: Wärme entsteht durch Bewegung der Moleküle, wie BOLTZMANN nachweisen konnte. Bei Diffusionsprozessen aber wird Wärme wie eine Flüssigkeit behandelt, die vom heißen zum kalten Pol fließt und auch den Formeln der Strömungsmechanik gehorcht.



Bei der Quantenphysik ist alles anders. Zwar existieren auch hier Formeln, die zu korrekten Voraussagen führen, aber die dahinter liegenden Probleme sind tiefgreifend und einzigartig. Es geht schlicht um wesentliche Fragen jeder Naturerkenntnis, als da sind:

- Was ist real, was virtuell (nur als Bild vorhanden), wie kann ich zwischen beiden unterscheiden? (→ Wie wirklich ist die Wirklichkeit, Kopenhagener Deutung)
- Verändert der Beobachter allein durch Beobachten die Welt? (→ Wie wirklich ist die Wirklichkeit, Kopenhagener Deutung)
- Gibt es ein geheimnisvolles telepathisches Band zwischen zwei Zwillingsteilchen, über das sie augenblicklich über Milliarden von Lichtjahren kommunizieren? (→ Verschränkung)
- Können Bewusstsein und freier Wille durch die Quantenphysik erklärt werden? (→ Mystische Physik, Fred Alan Wolf)
- Sind durch die Quantenphysik außersinnliche Wahrnehmung oder gar Teleportation möglich? (→ Teleportation)
- Gibt es Welten jenseits der unsrigen, in einer anderen Dimension, wie sie Sciencefiction-Autoren und Esoteriker postulieren? (→ Quantenphysik und Sciencefiction, Multiversen)
- Sind Lichtteilchen intelligent und "präkognitiv" (die Zukunft vorauswissend)? (→ Mystische Physik, Charon)
- Greift Gott gelegentlich ein und richtet die Sache wieder gerade? (→ Mystische Physik, Ghirardi–Rimini–Weber)
- Gibt es einen Einfluss aus der Zukunft? (→ Wie wirklich ist die Wirklichkeit, Transaktions-Interpretation)

Alle diese Fragen werden in manchen philosophischen Schulen mit "ja" beantwortet, während andere solchen Fragen mit Unverständnis begegnen. Kein Wunder, dass Quantenphysiker oft die Grenze zu Esoterik und Mystik überschreiten, dass manche Auto-

ren sich mit Fragen des Bewusstseins, der Realität und mit außer-sinnlichen Phänomenen auseinander setzen. Und damit viel Unausgegorenes verbreiten, was Laien und Fachleute in gleicher Weise verwirrt.

Solcherlei Verwirrungen ein wenig zu klären ist Aufgabe dieses Buchs. Es ist nicht nur für Bardamen bestimmt (siehe Eingangszitat), sondern für alle, die sich dafür interessieren und nicht der Meinung sind, alles wäre geklärt, und den Rest überlasse gefälligst den Fachleuten. Nichts ist geklärt, und Fachleute verschleiern oft, anstatt aufzuklären. Manchmal auch, weil sie's nicht besser wissen. Das hat auch der berühmte Physiker und Nobelpreisträger RICHARD FEYNMAN erkannt, als er in seinen Vorlesungen über die Geschichte der Quantenphysik seinen Schülern freimütig bekannte: *Ich präsentiere die Geschichte der Physik vom Standpunkt des Physikers, aber der ist nie korrekt. Ich erzähle Ihnen eine Art standardisierte Mythen.*

Dabei gehe ich zuerst auf einige Pioniere der Quantenphysik ein und zeige ihre Beiträge zur Entwicklung dieser Wissenschaft - wobei auch hier einige Fakten, die jeder zu kennen glaubt, sich als Mythen erweisen und die wahren Hintergründe hoffentlich klarer werden. Im zweiten Teil behandle ich typische Konzepte, wobei sich manche Ausführungen aus dem ersten Teil unter anderen Gesichtspunkten wiederholen werden. Insbesondere das Doppelspalt-Experiment, Grundlage des Verständnisses von Quantenphänomenen, sowie die scheinbar unerklärlichen Versuche mit "aufgeschobener Entscheidung" werden ausführlich und anschaulich erklärt und gedeutet. In dem Kapitel "Wie wirklich ist die Wirklichkeit" zeige ich, wie die einzelnen "Schulen" die Mathematik der Quantenphysik interpretieren und welche seltsamen Welten dabei entstehen. Im Kapitel über "Wandertröpfchen" schließlich versuche ich den Leser zu überzeugen, dass an den Quantenphänomenen nichts Geheimnisvolles ist, weil wir sie auch in der Makrowelt erleben, erzeugen, nachweisen und erklären können.

Dies ist kein Lehrbuch. Es setzt wenig voraus, dringt aber in den Wust verworrener und vernünftiger Gedanken ein und klärt hoffentlich einiges, was in Büchern und Vorlesungen über Quantenphysik unter den Tisch gekehrt wird. Und es ist nicht immer streng objektiv - ab und zu fließt auch meine eigene Meinung ein. Meine Vorurteile gegenüber bestimmten Personen der Geschichte kommen ohnedies deutlich zum Vorschein. So habe ich viel Verständnis für den depressiven Boltzmann und wenig für den dominierenden Bohr; ich bin über Heisenbergs Persönlichkeit verwirrt, verehere aus rein patriotischen Gründen Schrödinger und sehe in Dirac einen Charakter, mit dem ich mich voll identifizieren kann, natürlich nicht, was meine geistigen Fähigkeiten betrifft. Dafür habe ich darauf verzichtet, Kurzbiografien zweier wichtiger Männer zu schreiben, weil sie mir vom Charakter her so unsympathisch waren: Pauli, der zerstörerische Kritiker, und von Neumann, der fanatische Vernichter. Ihre Beiträge zur Entwicklung der Wissenschaft (auch ihre negativen) werden aber gebührend berücksichtigt.

Bei aller (ohnedies nur vorgespielter) Bescheidenheit möchte ich Erwin Schrödinger zitieren, einen der Pioniere der Quantenphysik, der in dem bemerkenswerten Aufsatz "Ist die Naturwissenschaft milieubedingt?" aus dem Jahr 1932 schreibt: *"Wenn eine volle, interessante Persönlichkeit hinter der Darstellung zu spüren ist, verzeihen wir am Ende ein Maß an Subjektivität - jedenfalls lieber, als dass wir uns von einem gewissenhaften Chronisten langweilen lassen."*

Trotz der anspruchsvollen Materie wünsche ich bei der Lektüre viel Vergnügen!

## Was sind Quanten?

Die allwissende Wikipedia definiert ein Quant so:

*In der Physik bezeichnet der Begriff Quant (von lateinisch quantum ‚wie groß‘, ‚wie viel‘) ein Objekt, das durch einen Zustandswechsel in einem System mit diskreten Werten einer physikalischen Größe, meist Energie, erzeugt wird. Quanten können immer nur in bestimmten Portionen dieser physikalischen Größe auftreten, sie sind mithin die Quantelung dieser Größen.*

Und Wikipedia gibt einige Beispiele für Quanten:

Das **Photon** als Quant des elektromagnetischen Feldes.

Das **Phonon** als Quant mechanischer Verzerrungswellen im Festkörper.

Das **Plasmon** als Quant einer Anregung im Festkörper, bei der die Ladungsträger gegeneinander schwingen.

Das **Magnon** als Quant magnetischer Anregungen.

Das Quant des **Drehimpulses**, das nicht als Teilchen interpretiert wird.

Das **Gluon** als Quant des Kraftfeldes, welches die Starke Wechselwirkung überträgt.

Das **Graviton** als Quantelungsgröße des Schwerefeldes.

Durch die gesamte Geschichte des Abendlands, seit den antiken griechischen Denkern, zieht sich der geistige Gegensatz zwischen einer Welt, die aus unterscheidbaren Einzelteilchen besteht ("**Atome**", **Korpuskeln**) und einer alldurchdringenden Entität, die nicht unterteilt werden kann ("**Apeiron**", **Feld**). Korpuskeln sind räumlich begrenzt und somit sicht- und fassbar. Felder erfüllen vollständig den Raum, sind unsichtbar und nur durch ihre Wirkung erschließbar. Bereits die antiken griechischen Philosophen erkannten den Unterschied und errichteten auf ihrer jeweiligen Anschauung ganz unterschiedliche Denkgebäude. Die Anhänger einer allumfassenden Substanz gehörten eher zu den Mystikern, welche dem Menschen und seiner Erkenntnisfähigkeit eine besondere Rolle zuwiesen. So meinte ihr Hauptvertreter

Parmenides: *Ohne den Geist gäbe es das Universum nicht.* Diese Auffassung finden wir wieder in der "orthodoxen" Quantenphysik, wo die Welt erst durch den Betrachter entsteht bzw. ohne ihn nicht existiert. Wesentlich nüchterner geben sich die Atomisten. Einer ihrer prominentesten Vertreter, der römische Philosoph Lukrez, meinte gar: *Niemals zeugt die göttliche Kraft etwas aus nichts.* Was man auch so interpretieren kann: Die Welt war immer, einen Schöpfergott brauchen wir nicht. Weshalb auch die meisten Atomisten innerhalb der Physikergemeinde eher Atheisten waren (Beispiel: Boltzmann), während diejenigen, die alle Erscheinungen auf ein Feld zurückführen wollen, in irgendeiner Weise religiös erscheinen (Beispiel: Einstein).

Auch in den Religionen finden wir einen Unterschied zwischen Atom und Apeiron. Auf der einen Seite steht die jüdisch-christliche Tradition eines ansprechbaren, gelegentlich sogar sichtbaren persönlichen Gottes. Dagegen gibt es im Daoismus Chinas das "dau (tao)", dessen Bedeutung schwer in andere Sprachen übertragen werden kann. Die wörtliche Übersetzung "Methode, Prinzip, der rechte Weg" wird ihm in keiner Weise gerecht. Da passt schon eher die Bezeichnung "eine Art von transzendenter höchster Wirklichkeit und Wahrheit". In der Physik entspricht ihm am ehesten der - inzwischen verpönte - Begriff des "Äthers". Auch er ist ein allumfassendes Agens, eher passiv, aber für die Übertragung von Licht und Kräften von eminenter Bedeutung, unwandelbar, unzerstörbar, ewig. Er wurde durch den Feldbegriff ersetzt, der genauso wenig vorstellbar ist.

Selbst die Quantenphysik, immerhin mit Quanten, also mit unterscheidbaren Entitäten befasst, konnte nicht auf die Einführung von Feldern verzichten. Der Gegensatz zwischen "diskret" (unterscheidbar) und "kontinuierlich" (stetig, ineinanderfließend) wird besonders deutlich in der Mathematik der Zahlen. Denn sie beginnt mit den ganzen Zahlen, das sind die Atome der Arithmetik. Aus ihnen kann man die Bruchzahlen konstruieren, immer noch unterscheidbare Größen, die aber die Zahlenebene kontinuierlich

ausfüllen. Doch zwischen den Lücken, die es nicht gibt, haben noch unendlich viele andere Zahlen Platz - die reellen Zahlen, die nur durch unendliche Prozesse entstehen können. Wem das nicht genügt, der kann noch hyperreelle Zahlen dazwischenschieben, Infinitesimale, surreale Zahlen, usw.

Und so ergibt sich für Mathematiker und vor allem für Physiker das Problem, wie aus dem Atomaren das Grenzenlose entsteht - und umgekehrt. Für die Atomisten liegt die Lösung darin, möglichst viele Atome zu haben, die ununterscheidbar werden und so ein Kontinuum vortäuschen. Das aber funktioniert beispielsweise beim Licht nur durch die Annahme eines Äthers, eines Felds, eines Kontinuums. Umgekehrt ist es den Befürwortern reiner Felder möglich, daraus Teilchen zu konstruieren, indem sie eine "Singularität" des Felds postulieren. Die sieht dann aus wie ein Teilchen und heißt "Soliton". Doch solche Singularitäten sind instabil, was dem Zustand der materiellen Welt offensichtlich widerspricht.

Es war und ist in Geschichtsbüchern üblich, die Ereignisse der Weltgeschichte an einzelnen Personen aufzuzeigen. So wird Geschichte fassbar, aber so war es nicht. Besonders im Alltag haben die kleinen Leute, haben die Massen der unbedeutenden Menschen den größten Anteil. Große Gestalten stellen Weichen, aber den Zug voranzubringen ist Aufgabe der Namenlosen. H.G. WELLS hat in seiner "Weltgeschichte" genau das versucht, eine Geschichte ohne Namen, und es ist ihm wunderbar gelungen.

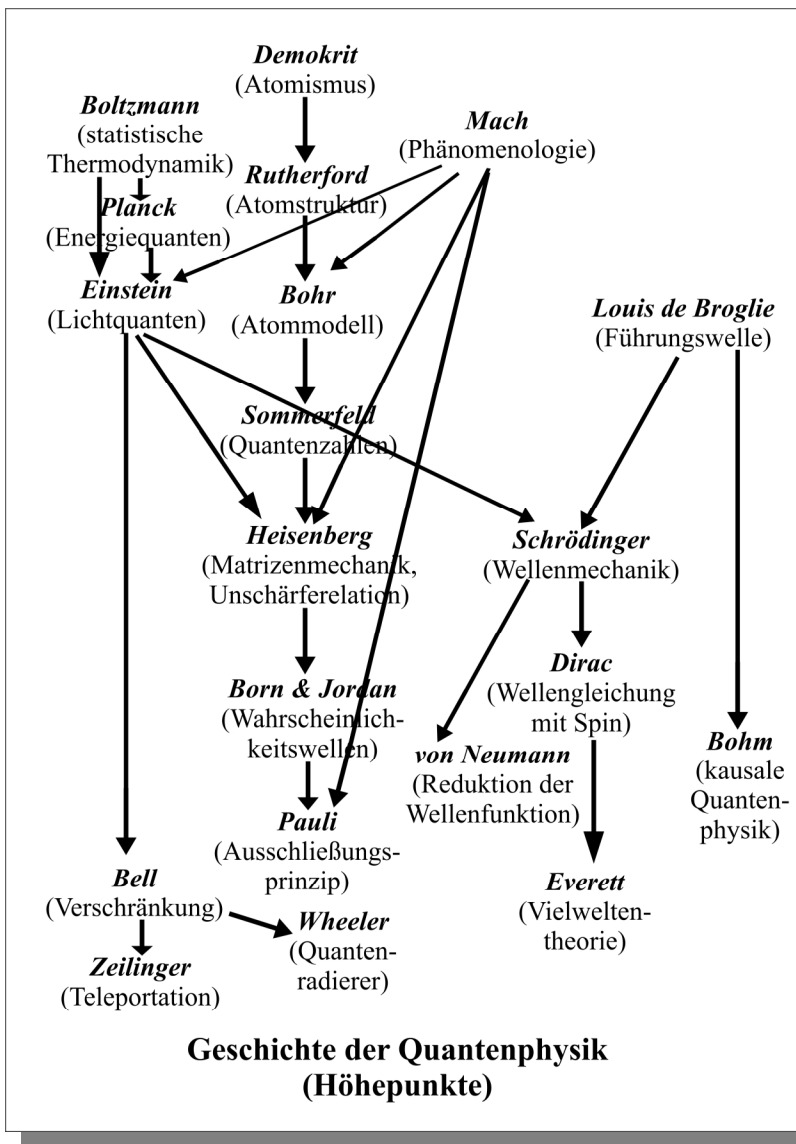
In den Wissenschaften ist es ähnlich. Auch hier muss ich wieder den Pionier der Kernphysik, ERNEST RUTHERFORD (1871-1937) zitieren: *Es liegt nicht in der Natur der Dinge, dass ein Mann eine plötzliche weltbewegende Entdeckung macht. Die Wissenschaft geht Schritt für Schritt voran, und jedermann hängt von dem Werk seiner Vorgänger ab.*

Das wusste schon ISAAC NEWTON (1643 - 1727), als er feststellte:

*Wenn ich weiter sah als andere, dann deshalb, weil ich auf den Schultern von Riesen stand.*

Dennoch wird in Wissenschaft und Mathematik noch mehr Wert auf den Beitrag individueller Geister gelegt als in Politik und allgemeiner Geschichte. So erhalten Naturgesetze oft die Namen ihrer Entdecker, mögen diese das Gesetz wirklich entdeckt oder es von anderen geistig übernommen haben. Wenn ich mich hier also denen anschließe, die Geschichte als aufeinanderfolge heroischer Taten heroischer Menschen betrachten, dann mit schlechtem Gewissen. Aber zumindest wird die Sache dadurch anschaulich und menschlich - und bei einer Geschichte der Quantenphysik, deren Hauptmerkmal Unstetigkeiten sind, durchaus gerechtfertigt. Obwohl Nicht-Historiker, habe ich mich dennoch um die Klarlegung der Hintergründe bemüht, aber die wirklichen Helden bleiben auch hier im Dämmerlicht der Geschichte verborgen.

Noch etwas: Erstaunlich viele Quantenphysiker entwickelten mystische Ideen. Wikipedia hat diesem Phänomen sogar ein eigenes Kapitel gewidmet. Unter anderem: Schrödinger glaubte, wie die indischen Philosophen, an nur *ein* Bewusstsein; Bohr meinte, die Welt werde im Augenblick ihrer Bewusstwerdung erschaffen; Pauli schrieb gemeinsam mit dem Psychologen C.G. Jung ein Buch über das esoterische Konzept der "Synchronizität"; Bohm sah einen Zusammenhang aller Dinge im Universum mit allem anderen; Everett, ein selbsterklärter Atheist, fand Trost in seiner Vielewelten-Theorie: Er könne ja in einer davon wiedergeboren werden. Usw. So habe auch ich ein bisschen Esoterik betrieben und gelegentlich - wenn die Person interessant genug war - Auszüge aus einem Computerhoroskop ans Ende des Kapitels gesetzt. Da stimme ich nämlich mit HEDWIG BORN überein, der Ehefrau des Nobelpreisträgers Max Born: "*Es ist immer wie eine Offenbarung, wenn ich hinter dem Physiker plötzlich den Menschen finde*". Im übrigen gilt: Jegliche Übereinstimmung von Charaktereigenschaften zwischen Astrologie und Empirie ist rein zufällig - wie die Ereignisse der Quantenphysik!





**Erläuterungen.** Ein Pfeil bedeutet eine geistige Beeinflussung. Da, wo Pfeile fehlen (im linken, unteren Bereich), kann man von der allgemeinen Auffassung der bereits etablierten Quantenphysik ausgehen, also von der "Kopenhagener" Deutung in Verbindung mit der Schrödingerschen Wellenfunktion. Deswegen auch der Pfeil von Schrödinger nach links unten. Wir haben den Ausdruck "Verschränkung" bei *Bell* hinzugefügt, aber die Idee stammt von Einstein und der Begriff von Schrödinger. Bell hat die Sache nur wieder entdeckt und daraus eine wichtige Ungleichung abgeleitet.

Es ist auch deutlich zu sehen, welchen großen Einfluss *Mach* mit seiner Philosophie auf wichtige Persönlichkeiten der Quantenphysik ausgeübt hat. Zudem sieht man hier zwei Tendenzen: In der Mitte und links (ab Bohr) sind diejenigen aufgeführt, die einem strikten Teilchencharakter und einer rein statistischen (nicht-kausalen) Interpretation der Ereignisse anhängen sowie nur Beobachtbares ("Observable") gelten lassen und weder eine darunterliegende Realität noch kausale Verknüpfungen akzeptieren. Diese Einstellung führt direkt zu Heisenbergs Matrizenmechanik. Auf der rechten Seite (ab Boltzmann) finden wir die Vertreter einer kausalen Physik zusammen mit der lückenlosen Beschreibung der Welt (keine Wahrscheinlichkeiten, keine Sprünge, nicht nur reine Teilchen). Diese Einstellung führt direkt zu Schrödingers Wellenmechanik.

Auch *Einsteins* Einfluss ist nicht zu übersehen. Seine spezielle Relativitätstheorie war Vorbild für Heisenbergs wissenschaftliches Vorgehen. Er war begeistert von de Broglies Wellenvorstellung, ermunterte Schrödinger, war Inspiration für Bell und Bohm - und ewiger, wenngleich vergeblicher Kritiker von Bohr.

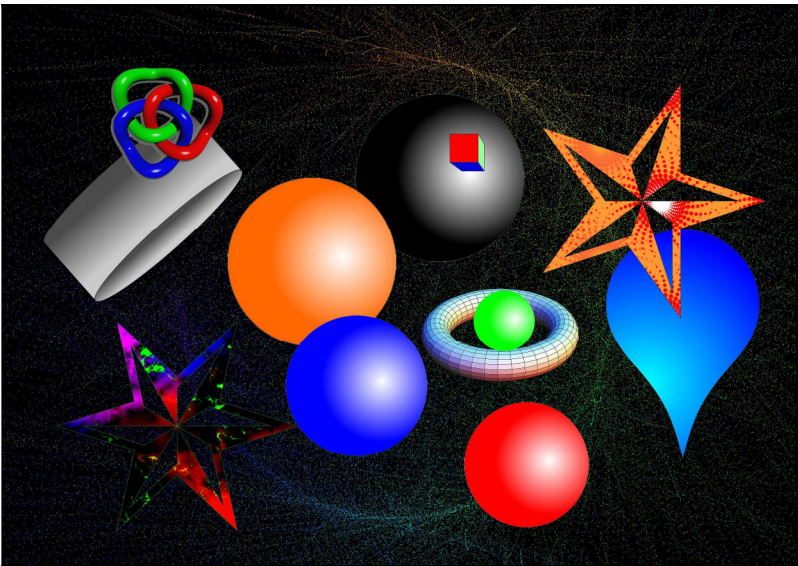
## Die Schöpfer der Ideen

**DEMOKRIT** (460/459 v.Chr. (Abdera) - 371 v.Chr.)

**Nationalität:** Thrakien

**Verdienst:** Hat zusammen mit seinem Lehrer und mit seinen Schülern zum ersten Mal die Idee kleinster, unteilbarer Naturbausteine eingeführt und damit die Wissenschaft des Abendlands wesentlich beeinflusst.

**Zitat:** *"Nur scheinbar hat ein Ding eine Farbe, nur scheinbar ist es süß oder bitter; in Wirklichkeit gibt es nur Atome und leeren Raum."*



*Die Vielfalt der Welt entsteht bei den Atomisten durch Atome unterschiedlicher Gestalt, die frei im Raum schweben, sich dort vereinigen und wieder lösen.*

Schon sein Lehrer LEUKIPP hatte sich von dessen Lehrer Parmenides und seinen mystischen Vorstellungen losgesagt und eine rein materialistische Weltanschauung geschaffen: Die Welt besteht aus unteilbaren, unzerstörbaren Teilchen unterschiedlichsten Aussehens, die ständig in Bewegung sind und durch ihre Verbindungen die Körper der Welt erzeugen. Dazwischen ist leerer Raum, sonst gibt es nichts. Die Idee eines leeren Raums war damals und auch lange Zeit im Abendland revolutionär, denn "Raum" war für die meisten Denker nur die Entfernung zwischen zwei Körpern. Wo keine Körper, da ist auch kein Raum, erst recht kein leerer Raum.

Die Theorie von Leukipp und Demokrit macht das Weltgeschehen verständlich, ohne auf metaphysische Annahmen zurückgreifen zu müssen. In ihrer Nachfolge durch EPIKUR und LUKREZ ("De rerum naturae", 55 v.Chr.) entwickelte sich auch eine Ethik, die wir heute als "Hedonismus" kennen. Dabei geht es nicht um hemmungslosen Genuss, sondern um maßvolle Freude an den kleinen Dingen. Epikur begrüßte seine Gäste am Eingang seines Gartens mit folgender Inschrift: *Tritt ein, Fremder! Ein freundlicher Gastgeber wartet dir auf mit Brot und mit Wasser im Überfluss, denn hier werden deine Begierden nicht gereizt, sondern gestillt.* Und seine Bescheidenheit drückt sich in folgender Bitte aus: *Schicke mir ein Stück Käse, damit ich einmal gut essen kann.* Später hat die Lehre der Stoiker mit ihrem Hauptvertreter Mark Aurel diese Ideen aufgegriffen und verfeinert. Zudem machte der Atomismus die Existenz von Göttern überflüssig. Die Atome kommen allein zurecht - Atomisten waren fast immer Atheisten!

Zurück zu Demokrit. In seinen Ideen war er extrem weitsichtig. Neben seiner Vorstellung von Atomen und leerem Raum nahm er Ideen der modernen Physik und Kosmologie voraus, darunter:

- das Konzept von unteilbaren letzten Teilchen (wir würden sie heute als Moleküle identifizieren), aus denen auch **Licht** bestehen soll;

- das Prinzip der **Kausalität**: "*Kein Ding entsteht planlos, sondern aus Sinn und unter Notwendigkeit.*" (wird Leukipp zugeschrieben);
  - die Wichtigkeit **zufälliger** (nicht voraussehbarer, aber durchaus kausaler) **Bewegungen** der Atome;
  - die Idee des **Vakuums** (leerer Raum);
  - die Tatsache, dass die Sonne ein **Stern** ist, die Milchstraße aus Sternen besteht und die Sonne im Mittelpunkt des Universums steht;
- usw.

In der Nachfolge der antiken Atomisten haben die ersten "Naturphilosophen" seit der Renaissance diese Ideen aufgegriffen und in ihre Theorien eingearbeitet. So behauptete GALILEI (1564–1642) das Gleiche, womit er in Gegensatz zur kirchlichen Lehre geriet. Galilei meinte (wie die Atomisten), Körper könnten ihre Form wandeln, nicht aber ihre Substanz. Für die kirchlichen Dogmatiker stellt sich die Sache genau umgekehrt dar: In der Eucharistie ("Abendmahl") bleibt die Form bestehen (Oblate und Wein), während sich die Substanz wandelt (wird zum Leib und Blut Christi). So kam der arrogante Gelehrte in Schwierigkeiten mit der Inquisition.

NEWTON (1643–1727) stützte seine Theorie auf feste, starre Körper, eine Art Atome, und deren Bewegungen. Im Gegensatz zur Vorstellung der Atomisten folgen diese Körper geordneten Bahnen, die von Kräften bestimmt sind. So schrieb er:

*"Nach allen diesen Betrachtungen ist es mir wahrscheinlich, dass Gott im Anfange der Dinge die Materie in massiven, festen, harten, undurchdringlichen und beweglichen Partikeln erschuf, von solcher Größe und Gestalt, mit solchen Eigenschaften und in solchem Verhältnis zum Raume, wie sie zu dem Endzwecke führten, für den er sie gebildet hatte, dass ferner diese primitiven Teilchen, weil sie fest sind, unvergleichlich härter sind als irgend*

*welche aus ihnen zusammengesetzte poröse Körper, ja so hart, dass sie nimmer verderben oder zerbrechen können."*

Die Vorstellungen der Atomisten ähnelten allerdings am ehesten dem, was sich in einem Gas abspielt, worauf wir bei der Besprechung der Errungenschaften von Boltzmann noch näher eingehen werden.

Später haben Chemiker wie JOSEPH-LOUIS PROUST (1797) und JOHN DALTON (1808) das Atomkonzept auf chemische Verbindungen übertragen und auf eine messbare und berechenbare Grundlage gestellt. Schließlich gelang es den Physikern um ERNEST RUTHERFORD, Atome sichtbar zu machen, ihren inneren Aufbau zu ergründen und sie schließlich mathematisch zu beschreiben. Welch seltsamen Dinge da zum Vorschein kamen, und wie die Wissenschaftler mit diesen Fakten fertig wurden, das werden wir ausführlich schildern.

**LUDWIG BOLTZMANN** (1844 (Wien) - 1906)

**Nationalität:** Österreich

**Verdienst:** Hat die Methode eingeführt, kontinuierliche Systeme wie Gase oder Strahlungsfelder durch diskontinuierliche Energiezellen theoretisch zu beschreiben. Hat damit die Konzepte und Methoden der Quantenphysik vorausgenommen.

**Nobelpreis:** fünfmal vorgeschlagen, aber nicht erhalten

**Formel:**  $S = k \log W$  (Entropiegleichung)

**Bedeutung:** Die Entropie (Unordnung) eines Makro-Zustands hängt ab von der Wahrscheinlichkeit seiner Mikrozustände.

**Zitat:** *"Ich sehe keinen Grund, nicht auch die Energie als atomistisch eingeteilt anzusehen."* (1891 in Anwesenheit von Max Planck)

Niemand hat das Atomkonzept so konsequent und mit so großem Erfolg eingesetzt wie der sensible Gelehrte aus Wien. Dabei

wandte er eine äußerst erfolgreiche Methode an, die von ihm stammt und zur Grundlage der gesamten Quantenphysik wurde, weswegen man ihn mit Recht als den eigentlichen "Vater der Quantenphysik" bezeichnen kann. Oder den Großvater, wenn man auf Planck als Vater bestehen will. Boltzmann ging von einer atomistischen Struktur der Materie aus, wofür es damals noch keine experimentellen Belege gab, und wofür er von seinen Zeitgenossen Mach und Ostwald heftig angegriffen wurde. Manche meinen sogar, diese ständigen Beschimpfungen wären der Grund für seinen Selbstmord gewesen. Vor allem: Boltzmann verwendete statische Methoden - er rückte dem Problem des Mikrokosmos mit Kombinatorik zu Leibe, eine Methode, die damals bei Physikern nicht üblich war und auf Unverständnis stieß. Statistik verwendeten die Militärverwalter, um die passenden Kleidergrößen für die Rekruten herauszufinden, und die Wahrscheinlichkeitsrechnung war den Glückspielern und Zockern vorbehalten. Wie jeder große Erneuerer war Boltzmann seiner Zeit weit voraus, was er selbst gar nicht bemerkte.

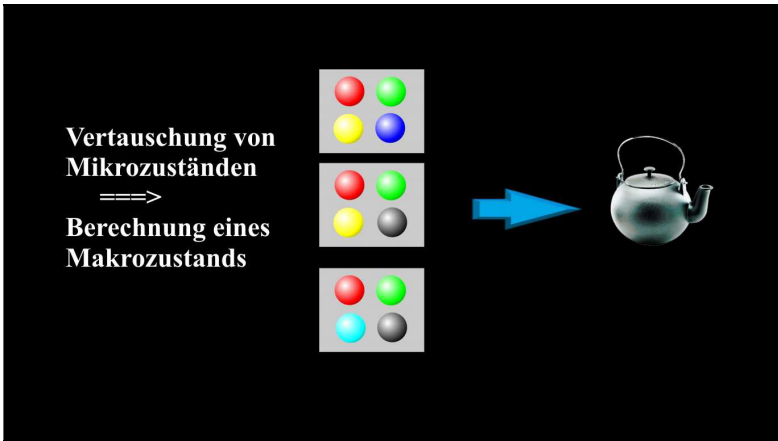
Doch Boltzmann ging weiter als seine Vorgänger. Er betrachtete nicht nur die Atome eines Gases als "diskret" (als unterscheidbare Teilchen), sondern er wandte das Prinzip der Unterteilung in unterscheidbare Einheiten auch auf unsichtbare Begriffe an, in erster Linie auf den der **Energie**. So zerteilte er den Energiegehalt eines abgeschlossenen Gases in kleine Zellen - wohlgermerkt, nicht in räumliche Zellen, sondern in begriffliche. Diese Energiepakete entstanden durch eine simple Einteilung in Energieeinheiten unterschiedlicher Stärke. Durch Vertauschen von Teilchen ergaben sich neue Energiezustände. Boltzmann untersuchte - rein theoretisch-mathematisch - welche Auswirkungen verschiedene (unsichtbare) Mikrozustände auf den (sichtbaren) Makrozustand des Gases haben, wie also Vertauschungen von "Atomen" (eigentlich: von Molekülen bestimmter Energie) sich äußerlich auswirken, wie sie Druck, Temperatur und Energie beeinflussen. So begründete er zusammen mit MAXWELL und GIBBS die "Statistische Thermodynamik", und so kam er auch zu seiner Definition

der **Entropie** (= Unordnung) eines Systems, die sich gänzlich von der bisher gültigen, rein thermodynamischen Definition unterscheiden. Seine Entropie-Definition stützt sich auf Wahrscheinlichkeiten, nicht auf Energien oder Temperaturen, und wird dadurch fast identisch mit der (viel später gefundenen) Definition der "Information".

Zudem ist die Entropie "additiv": Hat man zwei Systeme vorliegen, z.B. abgeschlossene Gasbehälter, das eine mit der Entropie  $S_1$ , das andere mit der Entropie  $S_2$ , so ist die Gesamtentropie des Systems (die Behälter bleiben für sich, werden nicht gemischt!) gleich  $S_1+S_2$ . Das Ganze auf Wahrscheinlichkeiten bezogen: Hat man zwei Systeme vorliegen, z.B. abgeschlossene Gasbehälter, das eine mit der Wahrscheinlichkeit  $W_1$ , das andere mit der Wahrscheinlichkeit  $W_2$ , so ist die Gesamtwahrscheinlichkeit des Systems gleich  $W_1*W_2$ . Und um das *Produkt* der Wahrscheinlichkeiten in die *Summe* der Entropien zu verwandeln, braucht man den Logarithmus - daher seine Entropiegleichung.

Boltzmann konnte auf Grund seiner Überlegungen und Berechnungen der mikrophysikalischen Zustände nunmehr makrophysikalische (= messbare) Größen und Beziehungen ableiten wie die Gasgleichung oder die spezifische Wärme eines Stoffes - ein Triumph der klassischen theoretischen Physik. Seine Energiezellen sind das Gleiche wie die **Quanten** der Quantenphysik, aber Boltzmann nannte sie nicht so, das tat erst sein Schüler Planck, der Boltzmanns Ideen auf die Absorption von Strahlungen anwandte.

Machen wir uns das Ganze an einem kleinen Beispiel klar. Nehmen wir an, wir hätten Kugel unterschiedlicher Größe und unterschiedlichen Gewichts in einem Behälter, in einer Art Rucksack mit diversen Abteilungen, wobei die großen Kugeln nicht unbedingt die schwersten sein müssen. Aber wir können die Plätze der Kugeln beliebig vertauschen.



*Verschiedene unsichtbare Mikrozustände (Kugeln in Urnen) führen zum gleichen Makrozustand (Temperatur des Kessels)*

Wollen wir das Gewicht des Behälters bestimmen, ist die Lage der Kugeln belanglos; wir können sie also beliebig vertauschen. Wollen wir die Stabilität des Behälters bestimmen, wird das Gewicht der einzelnen Kugeln und deren Lage wichtig, nicht aber deren Volumen. Wir können also gleich schwere Kugeln vertauschen, sofern sie auf der gleichen Höhe liegen. Wollen wir den Rauminhalt des Behälters bestimmen, wird das Gewicht der einzelnen Kugeln belanglos, nicht aber ihre Form. Wir können also Kugeln gleicher Form vertauschen.

Wir haben hier also zwei Objekte, die wir miteinander verknüpfen: Kugeln (entspricht irgendwelchen Teilchen) und "Urnen" (= kleine Behälter oder Schubfächer), auf die unsere Kugeln verteilt werden können. Die "Urnen" können alles Mögliche sein, z.B. Energiezustände, Frequenzbänder, Elektronenbahnen im Atom, usw. Wichtig ist nur: Kontinuierliches (wie etwa Energie oder Frequenz) muss vorher gedanklich in kleine Pakete zerlegt werden, was den Urnen entspricht. Wir lösen also das Kontinuum auf und ersetzen es durch ein Grobraster aus willkürlich bestimmten Einheiten. Wir vergröbern die Welt, verlieren dadurch Informati-