



Lars Jaeger

Die zweite Quanten- revolution

Vom Spuk im Mikrokosmos zu neuen
Supertechnologien

EBOOK INSIDE

 Springer

Die zweite Quantenrevolution

Lars Jaeger

Die zweite Quanten- revolution

Vom Spuk im Mikrokosmos zu
neuen Supertechnologien

 Springer

Lars Jaeger
Baar, Schweiz

ISBN 978-3-662-57518-5 ISBN 978-3-662-57519-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57519-2>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Text- und Konzeptberatung: Dr. Bettina Burchardt
Umschlaggestaltung: deblik Berlin unter Verwendung einer Abbildung
von © bunch_bundle, Adobe Stock

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Meinen Freunden Wolfgang und Alexander

Prolog: Das weiße Kaninchen

In Douglas Adams' Parodie auf das intergalaktische Geschehen *Per Anhalter durch die Galaxis* heißt es gleich zu Beginn des zweiten Buchs:

Es gibt eine Theorie, die besagt, wenn jemals irgendwer genau herausfindet, wozu das Universum da ist und warum es da ist, dann verschwindet es auf der Stelle und wird durch noch etwas Bizarrereres und Unbegreiflicheres ersetzt. – Es gibt eine andere Theorie, nach der das schon passiert ist.

Passender lässt sich die Physik des 20. Jahrhunderts kaum beschreiben. Um 1900 herum waren physikalische Konzepte wie Felder und Wellen, die unsichtbare Kraft der Gravitation und die Entropie bereits etwas bizarr und für ein breites Publikum nur schwer begreiflich. All diese

Phänomene konnte man nicht sehen oder anfassen, doch sie waren berechenbar und vorhersagbar und gaben das, was die Menschen in ihrem Alltag erlebten, wieder. Trotz ihrer Abstraktheit waren sie immer noch sehr anschaulich im Vergleich zu den Gedankengebäuden, die die Physiker entwickeln mussten, um die Natur der Atome (sowie auch die Weiten des Universums) zu begreifen.

Der Siegeszug des völlig Bizarren begann mit der Beobachtung, dass auf atomarer Ebene bestimmte Größen nicht jeden beliebigen Wert annehmen können. Zum Beispiel nimmt die abgestrahlte Energie bestimmter Körper nur festgelegte, also diskrete Werte an. Sie ist sozusagen abgepackt, in sogenannten Quanten (vom lateinischen Wort *quantum* – so viel). Würden die Regeln der Mikrowelt auch in „unserer“ Welt gelten, könnten wir in unserer Wohnung nur eine Zimmertemperatur von 10, 20 oder 30 °C einstellen, alle Werte dazwischen gäbe es einfach nicht. Kurze Zeit darauf erkannten die Physiker, dass Licht eine Doppelnatur aufweist: Einmal ist es eine Welle, ein anderes Mal ein Teilchen. Gleiches beobachteten sie dann auch beim Elektron. Doch wie kann ein räumlich lokalisiertes Teilchen gleichzeitig eine räumlich ausgedehnte, also delokalisierte Welle sein? In der Welt der klassischen Wissenschaften, in der Weiß immer Weiß ist und Schwarz immer Schwarz, stellte dieser „Welle-Teilchen-Dualismus“ eine unerhörte Provokation dar.

Im ausgehenden 19. Jahrhundert hatten sich die Physiker gerade an den Gedanken gewöhnt, dass sie mit ihren Theorien bald die Welt vollständig verstehen würden. Doch kurz darauf waren sie plötzlich gezwungen, sich von 250 Jahre alten physikalischen und mehr als

2500 Jahre alten philosophischen Gewissheiten zu verabschieden. Mit immer mehr „Unmöglichkeiten“ mussten sie lernen umzugehen: Quantenobjekte können mehrere Zustände gleichzeitig aufweisen, beispielsweise zum gleichen Zeitpunkt an verschiedenen Orten sein. Und dann besitzen Quantenobjekte noch nicht einmal objektiv festgelegte Eigenschaften: Ihre Eigenschaften lassen sich nur mit Wahrscheinlichkeiten angeben, Messergebnisse sind vom Beobachter abhängig, und ihre Zustände (Wellenfunktionen) zerfallen einfach so außerhalb jeglicher Zeit. Und schließlich ist da noch das Merkwürdigste aller Quantenphänomene: die Verschränkung räumlich getrennter Teilchen. Selbst wenn sie weit voneinander entfernt sind, können zwei Teilchen wie durch Zauberei aneinander gekoppelt sein. Unterm Strich lässt sich sagen: Das Wesen und die Eigenschaften von Quantenobjekten sind hochabstrakt und lassen sich nicht mehr mit unseren Alltagsvorstellungen und Denktraditionen vereinbaren.

Trotz all dieser unanschaulichen Unwägbarkeiten sagt die heutige Quantentheorie den Ausgang von Experimenten und Naturgeschehnissen mit einer in der gesamten Wissenschaft unübertroffenen Exaktheit vorher. Wieder ein kontraintuitiver Zusammenhang, der jeder Alltagserfahrung widerspricht: Aus etwas, das unbestimmt und nicht fassbar ist, wird ein zu hundert Prozent berechenbarer Vorgang.

Die Quantenphysik erscheint völlig verrückt: Wir begreifen zwar nicht, was genau und warum etwas passiert, können es aber exakt berechnen.

Weil wir immer exakter berechnen können, was sich auf atomarer Ebene abspielt, beherrschen wir den Mikrokosmos immer besser. Längst sind Anwendungen der Quantenphysik konkreter Bestandteil unseres Lebens geworden. Elektronik, Digitaltechnologien, Laser, Mobiltelefon, Satelliten, Fernseher, Radio, Nukleartechnik, die moderne Chemie, medizinische Diagnostik – all diese Technologien beruhen auf ihr. Wir vertrauen uns den Quantentechnologien an, auch wenn die dahinterstehende Theorie – unserem alltäglichen Verständnis nach – eine Welt mit sehr unsicheren und unbeständigen Erscheinungsformen und scheinbar paradoxen Eigenschaften beschreibt.

Erst seit einigen Jahren beginnen die Physiker, sich bewusstzumachen, dass die Quantenphysik einen bedeutenden Vorrat an noch nicht ausgeschöpften technologischen Möglichkeiten besitzt. Der renommierte Quantenphysiker Rainer Blatt sagt für das 21. Jahrhundert ein weiteres „Jahrhundert der Quantentechnologie“ voraus, das sowohl die Wirtschaft als auch die Gesellschaft noch einmal fundamental verändern werde. Wir beginnen gerade erst zu verstehen, was uns durch diese Revolution an Möglichkeiten erwächst, so Blatt.¹

Vieles, was in der Praxis schon umgesetzt wird, ist in der Theorie lange nicht ganz verstanden worden, teils sogar bis heute nicht. Die Quantenphysiker von heute sind wie Zauberer auf der Bühne, die Abend für Abend zuverlässig und mit größter Selbstverständlichkeit weiße

¹66. Lindauer Nobelpreisträgertagung, 26. Juni bis 1. Juli 2016.

Kaninchen aus ihrem Zylinder zaubern. Aber sie haben genauso wenig wie das Publikum eine Ahnung davon, wie diese in den Hut gekommen sind.

Ich möchte Sie mitnehmen in die völlig verrückte, großartige, unglaubliche Welt der Quanten. Auf dieser Reise werden wir zunächst die Welt der Quantentechnologien betrachten, die unsere Welt schon heute so maßgeblich prägen. Dabei werden wir erkennen, dass wir am Anfang einer weiteren atemberaubenden technologischen Entwicklung stehen. Im zweiten und im dritten Teil schauen wir uns die bizarren Entdeckungen in der Quantenwelt genauer an, die, wie im vierten Teil des Buches erläutert werden soll, auch das philosophische, spirituelle und religiöse Denken des 20. Jahrhunderts bedeutend prägen sollten. Der fünfte Teil führt uns schließlich zum unumstrittenen Kern der Quantenwelt, der die Basis zahlreicher aufregender zukünftiger Quantentechnologien darstellt und den die Physiker erst in den letzten Jahren so richtig erfassen konnten: *das Phänomen der Verschränkung*. Hier lösen sich, wie wir sehen werden, einige der hartnäckigsten Widersprüche auf, mit denen sich die Gründungsväter der Quantenphysik herumschlugen. Allerdings werden wir dabei neuen Fragen und weiteren scheinbaren Widersprüchen begegnen. Im letzten Kapitel wagen wir dann einen konkreten Ausblick, wie neue Quantentechnologien unseren zukünftigen Alltag prägen könnten.

Zahlreiche Personen haben diesen Text gelesen und dabei wertvolle Verbesserungsvorschläge gemacht. Zuallererst möchte ich Frau Bettina Burchardt danken, ohne die das

Buch in dieser Form nicht möglich geworden wäre. In vielen Stunden hat sie sich dem Text und seinen Inhalten gewidmet und dieses Buch in die Form gebracht, die es nun hat. Einen schönen Beitrag zur letzten Form dieses Buches hat auch Herr Michael ten Brink geleistet, dessen fachlichen Input ich sehr geschätzt habe. Dann möchte ich meiner Partnerin Frau Yuka Nakamura danken, für die emotionale und inhaltliche Unterstützung über die vielen Wochen des Schreibens. Herzlich danken möchte ich auch Herrn Frank Wigger für sein ausgezeichnetes Projektmanagement und die Begleitung während der Vollendung dieses Buches, des Weiteren meiner Agentin, Frau Beate Riess, für all ihre Unterstützung und Ermutigung nicht nur für dieses Buch, sowie desgleichen Herrn German Neundorfer.

Trotz all dieser Hilfe haben sich sicher der ein oder andere Fehler und zahlreiche Auslassungen nicht vermeiden lassen. Ich bitte den Leser um Entschuldigung und übernehme selbstverständlich die volle Verantwortung dafür. Nun aber: Vorhang auf!

Baar
im Juni 2018

Lars Jaeger

Inhaltsverzeichnis

Teil I **Quantum 2.0 – die zweite technologische Revolution aus der Welt der Quanten**

1	Große Macht	3
	Quantenphysiker – von Magiern zu Ingenieuren	7
	Immer abstraktere Theorie, immer konkretere Technologie – der Laser	11
	Quantenphysik und Elektronik – vom Transistor zum integrierten Schaltkreis	14
	Neue Verbindungen – Quantenchemie und Quantenbiologie	18
	Quantenphysik überall – und es kommt noch viel mehr	21

XIV Inhaltsverzeichnis

2	Nach unten hin gibt es noch viel Platz	23
	Aus Quantenspuk wird Technologie	26
	Immer genauer messen –	
	Quantentechnologien machen es möglich	33
	Der heilige Gral der Datensicherheit – die	
	Quantenkryptographie	38
3	Technologie im Allerkleinsten	43
	Nano – Unendliche Möglichkeiten im	
	unsichtbar Kleinen	44
	Wundermaterialien	47
	Wertvoller als Diamant	50
	Von der Mikro- zur Nanoelektronik	53
	Ultrakleine Maschinen – Beherrscher	
	der Nanowelt	55
	Wenn Nano- und Biotechnologie	
	miteinander verschmelzen	57
	Assembler – eine Welt aus Staub	59
4	Unfassbar schnell	63
	Der heutige Computer – ein Konzept	
	aus den 1940er-Jahren	66
	Eine neue Art zu rechnen	70
	Exponentielle Rechenkraft	72
	Probleme, die Quantencomputer lösen –	
	und neue, die sie schaffen könnten	77
	Wann kommt der Quantencomputer?	82
	Das Quanteninternet	84

Teil II Quantenwelten – Bizarres im ganz Kleinen

5	Widersprüchliche Atome	91
	Philosophische Widersprüche	93
	Höhlengleichnis gegen Atome mit Haken und Ösen	97
	Der Weg zu einer physikalischen Theorie der Atome	99
	Der problematische Rahmen der klassischen Physik	102
6	Natura facit saltus	107
	Ein Akt der Verzweiflung	108
	Der nächste Quantensprung – Einsteins Lichtteilchen	111
	Der Welle-Teilchen-Dualismus	113
	Von Thomsons Rosinenkuchen bis zu den Bohr'schen Quantensprüngen	116
	Strichcodes der Elemente	121
7	Tertium datur	125
	Welle-Teilchen-Dualismus 2.0	126
	Wellenmechanik – schöne neue abstrakte Welt	129
	Heisenbergs Unschärferelation und die neue Quantenmechanik	131
	Wellenfunktion und Wahrscheinlichkeiten – der Abschied von der physikalischen Kausalität	135

8	Sowohl als auch und weder noch	141
	Bizarres am Doppelspalt	144
	Der mysteriöse Kollaps der Wellenfunktion	149
	Bohrs Komplementaritätsprinzip – die Kopenhagener Deutung	151
	Der Streit – die Bohr-Einstein-Debatte um eine spukhafte Fernwirkung	154
9	Verlust der Identität	159
	Grenzen in Auflösung	160
	Zwei Elektronen – und doch ein und dasselbe	162
	Zwei und doch eines	165
	Altes Rätsel, neue Auflösung – das Gibbs- Paradoxon	170
	Wechselspiele mit Fermionen und Bosonen	172
	Supraleitung, Suprafluidität und Laser – nützliche makroskopische Quanteneffekte	175
	Offene Probleme der Kopenhagener Deutung	178

**Teil III Von Quantenfeldtheorien zu einer
 „Theorie von Allem“ – alles Materielle
 löst sich auf**

10	Negative Energien und der Elektronenspin	185
	Einsteins zweiter Geniestreich – die Spezielle Relativitätstheorie	186
	Eine neue Gleichung und die Auflösung des Spin-Rätsels	191
	Vom Entsetzen zur Sternstunde der theoretischen Physik	193

Löcher im See	195
Der Weg zur ersten Quantenfeldtheorie	198
11 Quantenfeldtheorien	201
In zwei Sprüngen vom klassischen Teilchen zum Quantenfeld	203
Die Neue Welt übernimmt die Führung	207
Quanten des elektromagnetischen Feldes – die neue Rolle des Photons	212
Teilchen aus dem Nichts	215
Die Entmaterialisierung der Materie	217
Alles ist eins	219
12 Unendlich minus unendlich gleich endlich	225
Sesam, öffne dich!	227
Spiralen und Loops	230
Kompliziert ohne Ende	234
Jenseits des Horizonts	236
Verbleibendes Unwohlsein	238
13 Immer mehr Teilchen	241
Konfusion im Teilchenzoo	242
Der edle achtfache Pfad der Physik	245
Drei Quarks für ein Musterzeichen	248
Gefangene Quarks	251
Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik	254
Das Teilchen, ohne das nichts geht	258
Noch nicht am Ende	259

14	Einstein passt nicht rein	263
	Einsteins zweite Relativitätstheorie	266
	Ganz nah an der Sonne	269
	Sackgasse Singularität	271
	Die Krux mit den Hierarchien	274
	Jenseits des Standardmodells	278
	Supersymmetrien, Strings und Quantenschlaufen	281
	Der Blick in die Sterne	283

**Teil IV Einschnitte ins philosophische,
 ästhetische und spirituelle Denken**

15	Der Weg in die Substanzlosigkeit	291
	Kein Boden mehr unter den Füßen	295
	Zufriedene Physiker, unzufriedene Philosophen	299
	„Shut up and calculate!“	303
16	Das neue Wahrheitsverständnis	305
	Der Königsberger Revolutionär	309
	Zufriedene Philosophen, unzufriedene Physiker	313
	Sekt und Selters	317
	Ganz oder gar nicht?	321
17	Das ewige Wechselspiel	325
	Das Ende der Ich-Illusion	328
	Die Substanzlosigkeit des Mittleren Weges	330

Leerheit im Herzen	335
Unlösbar verbunden und doch nicht in Einem verschwimmend	338
Eine Brücke über einen Abgrund von über 1800 Jahren	340
18 Symmetrien	345
Von der Kunst zur Wissenschaft	347
Symmetrie als Invarianz	350
Die größte Mathematikerin aller Zeiten	354
Ein Ausflug ins 8. Semester Mathematik	358
Schön genug, um wahr zu sein	360
Das Muttermal auf der Wange	363
19 Quantenbewusstsein und das Tao der Physik	367
Quantenphysik und Geist – ein populärer Zusammenhang	370
Die Quantenphysik als Krücke für unklares Denken	371
Ein paar Jahrzehnte zu spät	373
Ochs vorm Berge, eins, zwei, drei ...	376
Das Tao der Physik – die quantenesoterische Bewegung	378
Der Trugschluss der Quantenesoterik	382
20 Quantenphysik und Glauben	385
Einstein und Gott am Würfeltisch	387
Bohr und das fernöstliche Denken	390
Heisenberg und die Welt der Werte	394

XX Inhaltsverzeichnis

Wie die Quantenphysik den Glauben in die Ecke drängte	396
Was die Physik offen lassen muss	398

Teil V Verschränkung – des Quanten-Pudels Kern

21 Katzenschicksale	407
Der Sprung über die Grenze	409
Lagebesprechung	411
Die Verschränkung betritt die Bühne	414
Alles ist wahr	417
Die finale Frage	420
22 Wigners Freund	423
Messung mit Hintermann	424
Quanteneffekte in biologischen Systemen	427
Quantenphysik am Beginn des Lebens	432
Quantenphysik in unserem Kopf	435
23 EPR und die verborgenen Variablen	441
Einstein sträubt sich	443
Zusammenprall der Ansichten	446
Ein kurzes Strohfeuer	449
24 Die experimentelle Auflösung der Bohr-Einstein-Debatte	453
Bohm oder Bohr?	454
Das zweimal erfundene Rad	456
Von der Idee zur konkreten Anleitung	458
Aus Zwei mach Vier	461

Ein erfolgreiches Sabbatjahr	464
Es spukt wirklich in der Quantenwelt	466
Ein Startschuss – und kaum jemand läuft los	470
Mit Licht zum Erfolg	472
Die schrittweise Demontage der verborgenen Variablen	474
Eine Welt voller No-Gos	476
25 Das Zeitalter der Verschränkung	481
Erste Schritte in eine neue Technik	483
Abhörer durchs Weltall	487
Von der klassischen Informationstheorie zum Quantencomputer	490
Eine verpasste Gelegenheit	493
Ein weites Feld	495
26 Schrödingers Katze lebt	501
Die Suche nach dem magischen Punkt	504
Wenn Quantensysteme ein Bad in der Menge nehmen	506
Realität durch Dekohärenz	509
Ultraschnell in die Realität	513
Wie es weitergeht	515
Die Kehrseite der Dekohärenz	517
Teil VI Die Zukunft – Wohin geht es?	
27 Quantenrevolution 2.0	523
Technologie und gesellschaftlicher Wandel	527
Das mächtige Trio	529

XXII Inhaltsverzeichnis

Schnelle neue Welt	531
Wer sitzt am Steuer?	535
Sich informieren ist erste Bürgerpflicht	539
Epilog: Ein Morgen im Jahr 2050	542
Literatur	547
Personenverzeichnis	555
Sachverzeichnis	557

Teil I

**Quantum 2.0 – die zweite
technologische Revolution aus der
Welt der Quanten**



1

Große Macht

Wie eine Theorie des Mikrokosmos unsere Welt veränderte

Mit drei Problemen fing alles an:

1. Max Planck konnte sich im Jahr 1900 nicht erklären, dass sogenannte Schwarze Körper Energie nicht in beliebigen Mengen, sondern nur in „Energiepäckchen“ einer bestimmten Größe abstrahlen.
2. Albert Einstein sah sich 1905 zu der Interpretation gezwungen, dass Licht *gleichzeitig* Welle und Teilchen ist.
3. Ernest Rutherford entdeckte 1912 in einem aufsehenerregenden Experiment, dass das Atom aus einem Kern aus Protonen besteht, um den Elektronen herumkreisen; dies ist aber nach den Gesetzen der klassischen Physik gar nicht möglich.

Mit diesen drei Phänomenen im Gepäck begaben sich die Physiker im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts auf eine der aufregendsten intellektuellen Reisen in der Geschichte der Menschheit. Von den sicheren Küsten der klassischen Physik brachen sie auf, um wie die Seefahrer des 15. und 16. Jahrhunderts auf ganz neuen Wegen einen unbekanntem Ozean zu überqueren und zu erforschen, was sich auf seiner anderen Seite befindet.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts entdeckten Physiker, dass die Gesetze der klassischen Physik nicht immer und überall gelten.

Ihre Experimente führten ihnen immer klarer vor Augen, dass einige grundlegende Eigenschaften der Welt der Atome sich weder in unsere Alltagsvorstellungen noch in das bewährte Begriffssystem der abendländischen Philosophie einordnen lassen:

- Superposition:
Quantenobjekte können sich in einer Überlagerung von verschiedenen, sich klassisch ausschließender Zuständen befinden. Sie können sich beispielsweise zeitlich parallel entlang unterschiedlicher Pfade bewegen, also gleichzeitig an verschiedenen Orten sein.
- Zufälligkeit im Verhalten:
Die messbaren Eigenschaften eines Quantensystems sind in ihrem zeitlichen Verhalten nicht mehr eindeutig

bestimmt. Mit der Möglichkeit beispielsweise, gleichzeitig hier und an einem anderen Ort sein zu können, lässt sich sein beobachtbares Verhalten nur noch mit Wahrscheinlichkeiten beschreiben.

- **Abhängigkeit eines Quantenzustandes von der Messung:** In der Mikrowelt haben Messungen einen direkten Einfluss auf das zu messende Objekt. Es ist sogar noch bizarrer: Erst die Messung weist einem Quantenteilchen einen bestimmten Zustand zu. Im Grunde bedeutet dies: Quantenteilchen besitzen keine unabhängigen und objektiven Eigenschaften. Eine jede Eigenschaft erhalten sie erst durch den Akt einer Beobachtung.
- **Verschränkung:** Quantenteilchen können nichtlokal miteinander verbunden sein. Selbst wenn sie räumlich weit voneinander entfernt sind, können sie einer gemeinsamen physikalischen Entität (die Physiker sagen: einer einzigen „Wellenfunktion“) angehören, sodass sie wie von Geisterhand miteinander gekoppelt sind.

Jede dieser Eigenschaften der Mikrowelt verletzt eine von vier wesentlichen traditionellen philosophischen Prinzipien:

1. das *Eindeutigkeitsprinzip*, nach dem sich die Dinge in jeweils eindeutigen Zuständen befinden (der Stuhl steht vor dem Fenster und nicht neben der Tür);
2. das *Kausalitätsprinzip*, nach dem jeder Effekt eine Ursache haben muss (wenn der Stuhl umfällt, muss eine Kraft auf ihn eingewirkt haben);
3. das *Objektivitätsprinzip* (damit verbunden: das *Realitätsprinzip*), nach dem den Dingen eine von unserer

- subjektiven Wahrnehmung unabhängige, objektive Existenz zukommt (wenn wir den Raum verlassen, bleibt der Stuhl genau dort, wo er steht, und ist auch noch da, wenn wir ihn nicht mehr betrachten)¹; und
4. das *Unabhängigkeitsprinzip*, nach dem die Dinge sich einzeln und unabhängig voneinander verhalten (der Stuhl wird nicht von der Tatsache beeinflusst, dass im Nebenraum ein weiterer Stuhl steht).

Seit über 2500 Jahren setzen sich Philosophen mit den existentiellen Fragen der Menschheit auseinander. Demokrit hatte sich gefragt, ob sich Materie endlos teilen lassen kann und war zum Schluss gekommen, dass es unteilbare kleinste Teilchen geben muss, die Atome. Parmenides war auf der Suche nach der letztendlichen und unveränderlichen Substanz gewesen. Aristoteles und Platon hatten sich dafür interessiert, in welchem Verhältnis wir als Beobachter zum Beobachteten stehen. Es folgten hundert Generationen von Philosophen, die unermüdlich nach Klarheit und schlüssigen Beschreibungen der Welt suchten. Anfang des 20. Jahrhunderts wurde offenbar, dass viele der durch gründliche und unermüdliche Überlegungen gefundenen philosophischen Prinzipien nur für einen Teil der Welt gelten.

Einige Eigenschaften der Atome und ihrer Bestandteile stehen im Widerspruch zu unserer täglichen Erfahrungswelt. Wo die Gesetze der klassischen Physik nicht mehr greifen, verlieren auch philosophische Prinzipien ihre Gültigkeit.

Quantenphysiker – von Magiern zu Ingenieuren

Mussten den Physikern die Phänomene und Eigenschaften der Mikrowelt anfangs noch wie Magie erscheinen, so lernten sie mit der Zeit, wie man diese Zauberwelt, wenn man sie schon nicht vollständig verstehen kann, mit mathematischen Mitteln und Tricks immer genauer berechnet und schließlich bündigt. Ihr intellektueller Höhenflug führte die Physiker zu einer Theorie, die die beobachteten merkwürdigen Phänomene der Mikrowelt erklärte, wenn auch mit ganz neuen Prinzipien und Begriffen: zur *Quantentheorie*. Mit dieser theoretischen Basis wurden die Physiker von Magiern wieder zu Wissenschaftlern und später dann auch zu Ingenieuren. Denn die neue Theorie ermöglichte zahlreiche so erstaunliche wie ungeheure Technologien. Die erste davon erwuchs, als die Physiker ihre quantenphysikalischen Modelle auf den Atomkern anwendeten. Denn dabei erkannten sie: Hier findet sich eine gewaltige Menge an Energie.

In den Jahren, in der die Welt um sie herum in zwei Weltkriegen ins politische Chaos abkippte und ganze Städte dem Bombenhagel der Kriegsparteien zum Opfer fielen, mussten die Physiker den Einsturz ihrer eigenen althergebrachten Denkgebäude verkraften. Und dann entwickelten sie aus ihrer bizarren neuen Theorie eine Technologie, die mit einem Schlag nicht nur einzelne Straßenzüge, sondern ganze Städte und Regionen zu vernichten vermag. Noch während die Physiker jenseits der öffentlichen Wahrnehmung um die befremdlichen und

grotesken Eigenschaften der Mikrowelt stritten, trat die Quantenphysik zum ersten Mal auf die Bühne der Weltöffentlichkeit, und dies mit einem sehr realen und lauten Knall.

Die erste technische Anwendung der Quantenphysik war die furchtbarste Waffe, die jemals militärisch eingesetzt wurde: die Atombombe.

Wie entstand diese schreckliche Waffe? Seit dem Versuch Rutherfords von 1912 wusste man, dass der Atomkern aus elektrisch positiv geladenen Elementarteilchen (Protonen) besteht. Doch wie schon in der Schule unterrichtet wird, stoßen sich gleich geladene Teilchen ab. Wie ist es dann möglich, dass Atomkerne stabil sind? Die vielen Protonen im Atomkern müssten doch auseinanderfliegen! Eine weitere Kraft im Atomkern musste auf den sehr kurzen Distanzen im Atomkern weit stärker (anziehend) wirken als die elektrische Kraft. Doch was das für eine Kraft sein sollte, davon hatten die Physiker keine Ahnung. Ein weiteres Quantenrätsel!

Im Jahr 1938 führten die deutschen Forscher Otto Hahn und Lise Meitner Experimente mit Urankernen durch, um die unbekannte Kraft im Atomkern genauer zu untersuchen. Sie beschossen Uran mit seinen 92 Protonen und – je nach Isotop – 143 oder 146 Neutronen, die „Munition“ waren verlangsamte Neutronen. Es stellte sich heraus, dass durch den Beschuss zwei ganz andere Elemente entstanden waren: Barium und Krypton. Bariumatome, die sich schnell radiochemisch nachweisen ließen,

besitzen eine Kernladungszahl von 56 und sind damit weniger als halb so groß wie Urankerne. Wie war das möglich? Mithilfe theoretischer quantenphysikalischer Berechnungen kam Meitner zu dem Ergebnis, dass der Urankern durch das Neutronenbombardement zum Platzen gebracht worden war. Dabei nehmen die Bruchstücke sehr viel Energie auf, weit mehr, als in jedem bis dahin bekannten Atomprozess entstanden war. Doch woher kam diese Energie? Dies war ein weiteres Rätsel. Meitner berechnete auch, dass die beiden Kerne, die aus der Spaltung hervorgingen (plus drei Neutronen, die frei werden), in ihrer Summe geringfügig leichter waren als der ursprüngliche Atomkern des Urans plus das Neutron, das die Spaltung auslöste. Was war mit der fehlenden Masse geschehen?

An dieser Stelle kam Einsteins berühmte Formel $E=mc^2$, die dieser mehr als 30 Jahre zuvor aufgestellt hatte, ins Spiel: Denn die Differenz der Massen vor und nach der Spaltung entsprach genau der Energie, die die Bruchstücke aufgenommen hatten. Damit war zum ersten Mal ein Prozess bekannt geworden, in welchem sich die von Einstein formulierte Äquivalenz von Energie und Masse direkt offenbarte. Zugleich war damit aber auch klar geworden: Im Inneren des Atoms schlummern unvorstellbare Energien!

Viel Energie auf engem Raum – das weckte in den herrschenden Kriegszeiten schnell das Interesse der Militärs. Unter höchster Geheimhaltung (nicht einmal der Vizepräsident wurde eingeweiht) stellte die amerikanische Regierung ab 1941 ein Team von hochrangigen Wissenschaftlern und Technikern zusammen. Das Ziel

des *Manhattan Projekts*, des bis dahin komplexesten und schwierigsten Technikprojekts der Geschichte: der Bau einer Atombombe. Die Wissenschaftler waren erfolgreich. Am 16. Juli 1945 explodierte auf einem Testgelände in der Wüste von Neu Mexico die erste Atombombe der Weltgeschichte. Ihre Wucht übertraf noch die optimistischen Erwartungen der Physiker. Doch als sich der mächtige Atompilz am Horizont abzeichnete, überkam sie ein Gefühl tiefsten Unbehagens. Wie der Leiter des Manhattan Projekts, Robert Oppenheimer, später berichtete, zitierte er in diesem Moment innerlich aus der „Bhagavad Gita“, einer zentralen Schrift des Hinduismus: „Jetzt bin ich der Tod geworden, Zerstörer der Welten.“ Einer seiner Kollegen, der Direktor des Tests, Kenneth Bainbridge, drückte es plastischer aus: „Jetzt sind wir alle Huren söhne.“ Ihre Ernüchterung war begründet: Schon drei Wochen später zeichnete sich der zweite Atompilz ab, dieses Mal über dem Himmel des Kriegsgegners Japan. Und nur zwei Tage später folgte der dritte. Von der wissenschaftlichen Entdeckung der Spaltbarkeit des Uran-Atomkerns bis zu den Atompilzen von Hiroshima und Nagasaki waren kaum sieben Jahre vergangen.

Mit der Atombombe verlor die Quantenphysik gleich zu Beginn ihrer Existenz ihre Unschuld. Die Physiker mussten erkennen, dass ihr Wissensdrang nicht nur das herrschende Weltbild, sondern auch die Welt zerstören konnte.