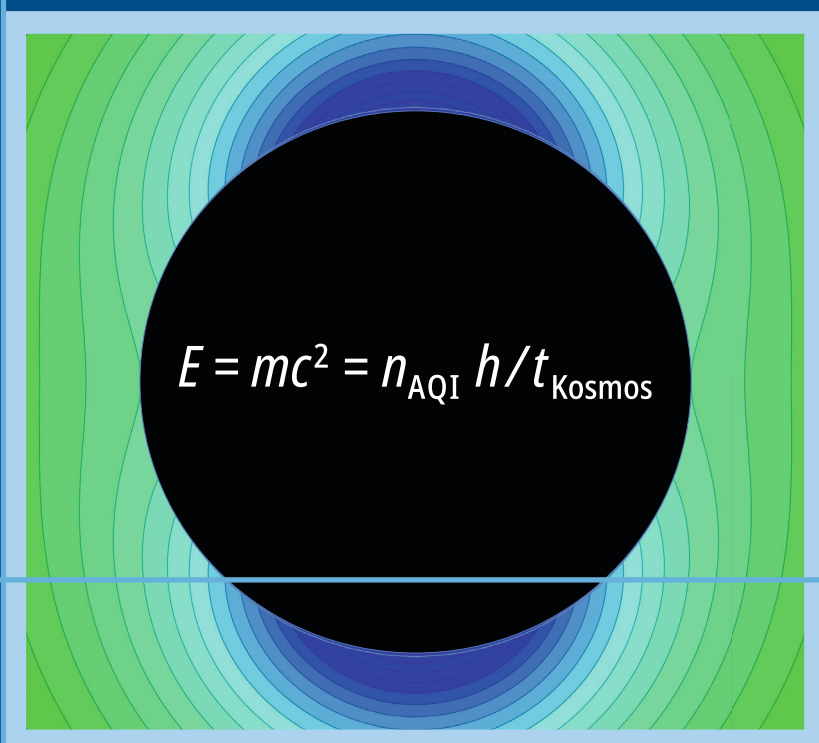


Thomas Görnitz

# Quantentheorie verstehen

Grundlegende Vorstellungen und Begriffe



HANSER



Görlitz  
**Quantentheorie verstehen**



**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)



Thomas Görnitz

# Quantentheorie verstehen

Grundlegende Vorstellungen und Begriffe

HANSER

Der Autor:

*Prof. Dr. Thomas Görnitz*, Fachbereich Physik, Goethe-Universität Frankfurt/Main

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht, auch nicht für die Verletzung von Patentrechten, die daraus resultieren können.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also 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 benützt werden dürften.

Bibliografische Information der deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: Melanie Zinsler

Titelmotiv: © Thomas Görnitz

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: Eberl & Koesel Studio, Altusried-Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-47225-9

E-Book-ISBN: 978-3-446-47319-5

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>XV</b>
<b>Vorrede</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1 Reale und mögliche Strukturen als Triebkraft der Natur</b> .....	<b>1</b>
1.1 Einstein und Weizsäcker über die Grundlagen der Naturwissenschaft	3
1.1.1 Raum .....	6
1.1.2 Einige weitere mathematische Begriffe .....	7
1.2 Ein Blick auf die Grundlagen der Naturwissenschaft .....	11
1.2.1 Alltag, Quanten und etwas Mathematik .....	12
1.2.2 Wie gelangt der Mensch zu Naturgesetzen? .....	16
1.3 Die Beziehungen der physikalischen Strukturen .....	20
1.3.1 Theoriebereiche der Physik .....	20
1.3.2 Der Geltungsbereich der Physik .....	20
1.3.3 Ein Blick auf Quanten- und Relativitätstheorie .....	21
1.3.4 Quantentheorie und das Verhältnis von Fakten und Möglichkeiten .....	27
1.3.5 Beziehungen zwischen Quantenfeldtheorie und Relativitätstheorie .....	28
1.3.6 Relativitätstheorien .....	29
1.4 Eine Einteilung der Quanten .....	30
1.5 Fakten, Möglichkeiten, Quantisierung .....	32
1.5.1 Die fundamentalen Wechselwirkungen .....	33
1.5.2 Elektromagnetische Wechselwirkung und die Existenz der Objekte .....	33
1.6 Zum Verhältnis von Physik, Chemie und Biologie .....	34

1.6.1	Photonen in der Chemie	36
1.6.2	Virtuelle Teilchen in der Chemie	37
1.6.3	Weitere interessante Quanteneffekte	40
1.6.4	Einfluss der Information auf die Steuerung biochemischer und biologischer Prozesse	41
1.6.5	Kein Widerspruch zwischen Biologie und Physik!	42
1.7	Die Unterscheidung zwischen Inhalt und Form, zwischen Teilen und Ganzheit	44
1.7.1	Quantentheorie und Hylemorphismus	44
1.7.2	Teile werden zu Ganzheiten	46
1.7.3	AQIs und Qubits – was ist gleich, was verschieden?	47
1.7.4	Form und Inhalt in der Chemie	48
1.7.5	AQIs versus Bedeutung	49
1.7.6	Was ist zu erwarten	50
<b>2</b>	<b>Was meint man mit „Erklären“?</b>	<b>53</b>
2.1	Erklären mit Quantenfeldtheorie	53
2.2	Ein Blick auf das Erforschbare	56
2.3	Regeln und Gesetze durch „Näherungen“	56
2.4	Interpretationen von Objektivem und Subjektivem	63
<b>3</b>	<b>Quanten und Schwarze Löcher</b>	<b>69</b>
3.1	Das erste Bild von einem „Schwarzen Loch“	69
3.2	Fundamentale Quantentheorie und die Schwarzen Löcher	71
3.3	Vom „Schwarzen Loch“ zum „It from Bit“	76
3.4	Black Holes strahlen	76
3.5	Die Vorgeschichte zum „It from Bit“	81
3.6	Das „It from Bit“ und seine Probleme	82
3.7	Zur Bedeutung der Planck-Einheiten	86
3.8	„Mysteriöse Eigenschaften“ der Schwarzen Löcher	89
<b>4</b>	<b>Bits, Qubits und AQIs</b>	<b>93</b>
4.1	Computing und Quantencomputing	93
4.2	Die Bits beim Quantencomputing und der Unterschied zu den AQIs	95
4.3	Quantencomputing ist reversibel	96



4.4	Das Gehirn als Quantencomputer? .....	99
4.5	Analogien und Unterschiede zwischen Bewusstsein und Computer ...	101
4.6	Wahrnehmung von Gestalten und Kräften durch Lebewesen .....	106
4.7	Künstliche Intelligenz und Mustererkennung .....	111
<b>5</b>	<b>Der Weg aus der Sackgasse der „kleinsten Teilchen“ .....</b>	<b>115</b>
5.1	Protyposis – der Ausweg aus der Sackgasse .....	117
5.2	Der historische Weg zur Protyposis .....	122
<b>6</b>	<b>Grundprinzipien von klassischer und quantischer Physik ....</b>	<b>125</b>
6.1	Kennzeichen der klassischen Physik .....	126
6.2	„Bedeutung“ und die Unterscheidung zwischen Form und Inhalt ....	128
6.3	Bedeutung als Form .....	128
6.4	Quantentheorie – Ausgedehnte Ganzheit, Verschränkung, Nichtlokalität .....	130
6.5	Zu welchen Strukturen hat die Quantentheorie geführt? .....	139
6.6	Die AQIs der Protyposis .....	141
6.7	Die Dynamische Schichtenstruktur – Koexistenz von klassischer und quantischer Physik .....	144
6.7.1	Schrödingers Katze und Schrödingers Kätzchen .....	147
6.7.2	Quantencomputing .....	149
6.7.3	Ignorabilia und kritische Vorannahmen .....	150
<b>7</b>	<b>Ein Blick auf die „Zeit“ .....</b>	<b>153</b>
7.1	Wie wird Zeit wahrgenommen und eingeteilt .....	153
7.1.1	Fakten gliedern die Zeit .....	153
7.1.2	Aussagen über die Zeit .....	154
7.1.3	Die moderne Physik und die Zeit – Relativitätstheorien und Quantenphysik .....	155
7.1.4	Quantentheorie über die Zeit .....	156
7.1.5	Die Planck-Zeit .....	159
7.2	Reversibilität und Zeitumkehr .....	159
7.3	Die „ausgedehnte Gegenwart“ als Grundzug der Quantentheorie ....	161
7.4	Fakten und klassische Physik .....	163
7.5	Was war „vor“ der Zeit? .....	164

<b>8</b>	<b>Grundlagen der Empirie</b> .....	<b>167</b>
8.1	Erfahrung und Empirie in der Naturwissenschaft .....	168
8.2	Die Empirie und die Zeit .....	170
8.3	Transzendente Hypothesen .....	176
8.4	Zeit und Naturgesetze .....	178
8.5	Eine realistische Weltbeschreibung .....	179
<b>9</b>	<b>Das Zählen von Fakten und von Möglichkeiten</b> .....	<b>181</b>
9.1	Zwischenspiel .....	181
9.2	Zählen und Zahlen .....	184
9.3	Das Unendliche .....	186
9.4	Unendliches in der Physik? .....	189
9.5	Fakten, Möglichkeiten, Freiheit .....	193
9.6	Die Notwendigkeit der komplexen Zahlen .....	200
<b>10</b>	<b>Der Messprozess aus Sicht der Protyposis</b> .....	<b>205</b>
10.1	Warum schenkt man dem Messprozess eine so große Aufmerksamkeit? .....	205
10.2	Zur Interpretation des Messprozesses in der Quantenmechanik .....	208
10.3	Die dynamische Schichtenstruktur und der Messprozess .....	212
10.4	Die umfassende Rolle der physikalischen Information .....	217
10.5	Schlussfolgerungen mit der Protyposis .....	224
10.5.1	Protyposis: Fakten auch ohne Beobachter .....	226
10.5.2	Der Quanten-Zenon-Prozess .....	230
10.5.3	Verlust von „Bedeutung“, jedoch nicht von absoluter Information .....	231
10.5.4	Massereiche Objekte erscheinen lokalisiert .....	233
10.6	Die Protyposis macht den Messprozess begreiflich .....	236
<b>11</b>	<b>Die Protyposis und das Ganze</b> .....	<b>241</b>
11.1	Ein wichtiger Unterschied zwischen Astronomie und Kosmologie ...	241
11.2	Das Ganze ist der Kosmos .....	243
11.3	Unbekannte Information – Thermodynamik .....	244

<b>12</b>	<b>Reflexionen über die AQIs</b> .....	<b>247</b>
12.1	Der Weg zu den quantischen Zuständen .....	247
12.2	Komplexes aus Einfachem .....	248
12.3	AQIs – ein einleuchtendes Postulat .....	250
<b>13</b>	<b>Symmetriegruppen für Quantensysteme</b> .....	<b>255</b>
13.1	Symmetriegruppen für das Quantenbit .....	257
13.2	Symmetrien an Quantensystemen mit einem zweidimensionalen Zustandsraum .....	262
13.2.1	Die normerhaltende $SU(2)$ -Symmetrie .....	262
13.2.2	Der Übergang von der $SU(2)$ zur $SL(2, C)$ .....	266
<b>14</b>	<b>AQIs und die Planck-Länge</b> .....	<b>269</b>
14.1	Die gruppentheoretische Definition der Metrik im kosmischen Raum	270
14.2	Die gruppentheoretische Begründung der Planck-Länge mit der Protyposis .....	273
<b>15</b>	<b>Kosmologie und die Äquivalenz von Masse, Energie und absoluter Quanteninformation</b> .....	<b>279</b>
15.1	Kosmologische Vorüberlegungen .....	279
15.2	Ein Blick auf Kosmologie und Allgemeine Relativitätstheorie .....	283
15.3	Kosmologische Variable .....	285
15.4	Die Erweiterung von $E = mc^2$ auf die AQIs .....	288
15.5	Die Energie eines AQIs .....	290
15.6	Die wichtige Unterscheidung zwischen AQIs und Entropie .....	291
15.7	Das „It from Bit“ muss reflektiert werden .....	291
15.8	Die zeitliche Entwicklung des Kosmos .....	297
15.9	Die Zustandsgleichung des Kosmos .....	299
<b>16</b>	<b>Einige Gedanken über den rationalen Kosmos der Protyposis</b> .....	<b>309</b>
16.1	Ein mögliches Bild der kosmischen Entwicklung .....	309
16.2	Aspekte von Kosmologie und Naturphilosophie .....	313
16.3	Zusammenfassung der Argumentationslinie .....	316
16.4	Die Metrik der Protyposis-Kosmologie .....	317

16.5	Eine unzeitgemäße Überlegung .....	318
16.6	Der empirische Input .....	319
<b>17</b>	<b>Inspiration und Induktion, Theorie und Experiment .....</b>	<b>321</b>
17.1	Wahrscheinlichkeiten als Maß für Möglichkeiten .....	321
17.2	Bilder von Möglichkeiten? .....	323
17.3	Inspiration .....	324
17.4	Erstellen von Theorien, ihre Akzeptanz und ihre Bestätigung .....	324
<b>18</b>	<b>Gravitation als Wirkung des Kosmos auf seinen Inhalt .....</b>	<b>329</b>
18.1	Die Lösung des Konsistenzproblems zwischen Allgemeiner Relativitäts- und Quantentheorie .....	329
18.2	Zur Begründung der Allgemeinen Relativitätstheorie .....	333
18.3	Eine Begründung von Einsteins Gleichungen aus der Quantentheorie	338
18.4	Vom Kosmos zur Allgemeinen Relativitätstheorie! .....	340
18.5	Die Verbindung zur Empirie .....	341
18.6	Die wesentlichen Strukturen im Kosmos .....	342
<b>19</b>	<b>Lösungen für Probleme der gegenwärtigen Kosmologie .....</b>	<b>349</b>
19.1	Das Koinzidenz-Problem .....	349
19.2	Das Empirie-Problem .....	349
19.3	Das Horizont-Problem und die Inflation .....	350
19.4	Die kosmologische Konstante – ein Problem .....	351
19.5	Die frühen Schwarzen Löcher .....	351
19.6	Dunkle Energie und Dunkle Materie .....	353
19.7	Wofür wurde die Dunkle Materie postuliert? .....	354
<b>20</b>	<b>Erklärung für ein Phänomen der Dunklen Materie .....</b>	<b>361</b>
20.1	Jet-Strukturen an Black Holes .....	362
20.2	Die Wirkung auf die Umlaufgeschwindigkeiten der Sterne .....	370
<b>21</b>	<b>Schwarze Löcher: Entropie und Singularität .....</b>	<b>375</b>
21.1	Der quasiklassische Zugang zur Entropie der Schwarzen Löcher .....	376
21.2	Bekensteins Entropie eines Schwarzen Loches .....	378
21.3	Eine kritische Frage an Bekensteins Resultat .....	381

21.4	Die Black Hole-Entropie wird mit Protyposis plausibel	384
21.5	Das Black-Hole-Modell der Protyposis	385
21.6	Die Innenraumlösung für Black Holes	388
21.7	Das Informationsparadox auflösen	391
<b>22</b>	<b>Quantenteilchen im Minkowski-Raum</b>	<b>395</b>
22.1	Von den abstrakten Thesen zu den mathematischen Strukturen	395
22.2	Teilchen als Idealisierungen von Objekten	396
22.3	Ein erster Erfolg: Objekte in einem de-Sitter-Kosmos	402
22.3.1	Symmetrien für Quantenbits	402
22.3.2	Quantisierung: Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren	403
22.3.3	v. Weizsäckers „Stopf- und Rupfoperatoren“	404
22.3.4	$SO(4,1)$ -Darstellung über einem gegebenen Grundzustand	406
22.3.5	Der Übergang zur Poincaré-Gruppe	409
22.4	Masselose Teilchen im Minkowski-Raum	410
22.5	Generatoren der Poincaré-Gruppe	414
22.6	Impulszustände der Poincaré-Gruppe	416
22.7	Impulszustände der Poincaré-Gruppe über dem Vakuum der AQIs	416
22.8	Das Teilchen-Vakuum im Minkowski-Raum	418
22.9	Masselose Teilchen über dem Lorentz-Vakuum	421
22.10	Spinlose Teilchen mit Ruhmasse im Minkowski-Raum	421
22.11	Rechnerunterstützung für Teilchen-Darstellungen mit Spin und Ruhmasse	423
22.12	Explizite Zustände relativistischer Teilchen	424
22.13	Qubits zu Quantenteilchen – was bedeutet das	428
<b>23</b>	<b>Die fundamentalen Wechselwirkungen</b>	<b>431</b>
23.1	Wie können die allgegenwärtigen Verschränkungen aufgehoben werden?	432
23.2	Vier grundlegende Wechselwirkungen	433
23.2.1	Einige grundsätzliche Fragen	436
23.2.2	Zwei Seiten einer Medaille	436
23.3	Wechselwirkung und dynamische Schichtenstruktur	439
23.4	Wechselwirkung erfordert Trennung	441

23.5	Die Typen der Wechselwirkung	442
23.6	Bisherige Probleme mit den Eichtheorien	445
23.7	Einige Bemerkungen zur Mathematik bei Quantenfeldtheorien	446
23.8	Die Modellierung von Wechselwirkung	449
23.9	Elektromagnetische und schwache Wechselwirkung	450
23.10	Die starke Wechselwirkung	452
23.11	Die Antworten	457
<b>24</b>	<b>Modelle für lokalisierte Objekte</b>	<b>461</b>
24.1	Quantenteilchen aus AQIs	463
24.2	Abschätzungen für „Bosonen“ und „Fermionen“	466
24.2.1	Ein Modell für „Bosonen“	466
24.2.2	Ein Modell für „Fermionen“	467
24.3	Die Teilchenmassen als Aufgabe	469
<b>25</b>	<b>Ladungen generieren die Massen</b>	<b>471</b>
25.1	Drei Ladungstypen	472
25.2	Zum Verhältnis von Materie und Antimaterie	473
25.3	Historische Versuche zur Erklärung der Masse	477
25.4	Ladung, Masse, Gravitation	482
25.5	Modelle für Teilchen im realen Kosmos	483
<b>26</b>	<b>Revue der mathematisch-physikalischen Resultate</b>	<b>487</b>
26.1	Begründung einer Metrik für den kosmischen Raum, in dem wir leben	487
26.2	Die Definition einer kosmischen Zeit	488
26.3	Die Definition der Energie	488
26.4	Die Rolle der Thermodynamik	489
26.5	Das kosmologische Modell der AQIs	490
26.6	Die Allgemeine Relativitätstheorie	491
26.7	Schwarze Löcher	492
26.8	Wirkungen, die der Dunklen Materie zugeschrieben werden	492
26.9	Relativistische Teilchen	493
26.10	Die fundamentalen Wechselwirkungen	493

26.11	Quanteninformation .....	495
26.12	AQIs und Qubits .....	495
<b>27</b>	<b>Leben, Bewusstsein, Soziales .....</b>	<b>497</b>
27.1	Quantentheorie und Biologie .....	497
27.1.1	Stabilisierung durch Informationsverarbeitung .....	500
27.1.2	Wahrnehmung und Empfindung .....	503
27.1.3	Zur mathematischen Struktur von Systemen des Lebendigen .....	506
27.2	Ein Blick auf die Evolution .....	510
27.2.1	Rauschen – Quantenphysik im Verborgenen .....	513
27.2.2	RNA-Welt und anschließende Entwicklung .....	515
27.2.3	Beziehungsstrukturen in der Evolution .....	518
27.3	Vom Quantenbit zum Bewusstsein .....	519
27.3.1	Der Ausweg aus dem Dilemma .....	521
27.3.2	Bewusstwerdung und Bindungsverhalten .....	524
27.3.3	Die „ausgedehnte“ Psyche .....	525
27.3.4	Subjektivität und Qualia .....	527
27.3.5	Freier Wille .....	529
27.3.6	Gedächtnis .....	531
27.3.7	Geistige Tätigkeiten .....	531
27.4	Quantenstrukturen wirken sogar im Sozialen .....	533
27.4.1	Beziehungsstrukturen wandeln sich zu neuen Gestalten .....	534
27.4.2	Informationszeitalter .....	536
<b>28</b>	<b>Naturwissenschaft, und über sie hinaus .....</b>	<b>541</b>
28.1	Wege der Erkenntnis .....	541
28.2	Regeln und Gesetze .....	544
28.3	Bestätigung und Widerlegung in der Naturwissenschaft .....	545
28.4	Mathematische Strukturen .....	545
28.5	Die Grundlage der Erscheinungen .....	547
28.6	Strukturen der Möglichkeiten .....	548
28.7	Auflösen von Paradoxien .....	550

<b>29</b>	<b>Fazit: Was ist bereits erreicht, was ist zu erwarten? .....</b>	<b>553</b>
29.1	Plancks Entdeckung und Einsteins Resümee .....	554
29.2	Ausblick .....	556
<b>30</b>	<b>Anhänge .....</b>	<b>559</b>
30.1	Der Teilchen-Zoo der Elementarteilchenphysik .....	559
30.2	Andere Interpretationen des Messprozesses .....	561
30.2.1	Zum Unterschied Theorie - Interpretation .....	561
30.2.2	Die de-Broglie-Bohm-Interpretation .....	562
30.2.3	Die „Viele-Welten“-Interpretation .....	568
30.2.4	Superdeterminism .....	569
30.3	Die Multiplizitäten von n-fachen Tensorprodukten zweidimensionaler Darstellungen der $SU(2)$ .....	570
30.4	Die reguläre Darstellung der $SU(2)$ .....	572
30.5	Unbegrenzte Anzahlen von AQIs und die Spezielle Relativitätstheorie .....	574
30.6	Rechnungen mit der Vaidya-Metrik .....	575
30.7	Zur Rotation von Galaxien .....	579
30.8	Vertauschungsrelationen mit Parabose-Operatoren .....	582
30.9	Bemerkungen zur Struktur der $SU(3)$ .....	583
	<b>Index .....</b>	<b>587</b>



# Danksagung

Die Inhalte dieses Textes, sofern sie nicht die Mathematik betrafen, sind in ungezählten Diskussionen mit meiner Frau, der Veterinärmedizinerin und Diplompsychologin Dr. Brigitte Görnitz, immer wieder reflektiert worden. Das Buch hätte ohne ihre kreative Unterstützung und Ermutigung so nicht entstehen können.

Für Nachfragen und hilfreiche Hinweise danke ich ebenfalls sehr herzlich dem theoretischen Physiker und Chemiker Prof. Dr. Jochen Schirmer.

Als sehr anerkennenswert habe ich die gute Betreuung durch meinen Lektor Volker Herzberg empfunden.

Nicht zuletzt gilt mein Dank auch den vielen Teilnehmern in den Seminaren und Gesprächskreisen, denen ich mich verbunden fühle. Bei dem bearbeiteten weit fachübergreifenden Themenkreis ist der diskursive Austausch mit Interessierten, die nicht aus meinem Fach sein müssen, fruchtbar und anregend. Von diesen geschätzten Gesprächspartnern möchte ich besonders hervorheben den Mathematiker und Innovationsmanager Günter Kornmann, den Wirtschaftswissenschaftler und Psychologen Korbinian Kornmann, den Facharzt für Psychiatrie und psychosomatische Medizin Dr. Ralf Krüger, den Biologen Dr. Stephan Krall, den Mediziner Dr. Florian Dittrich und den Ethnologen und Naturphilosophen Prof. Dr. Paul Drechsel.



# Vorrede

Wir Menschen stehen gegenwärtig vor einer Situation, die ein grundlegendes Umdenken erforderlich macht. Eine Menschheit von ungefähr 8 Milliarden muss ihren Umgang mit den Gütern der Erde überdenken, wenn sie als Zivilisation überleben will. Dazu gehört auch die Verbesserung der Gestaltung der Beziehungen, eine gerechte Teilhabe an den materiellen und kulturellen Gütern sowie für jeden Menschen die Ermöglichung eines Bewusstseins, das kulturell und wissenschaftlich allseitig gebildet sein kann.

Energie und vor allem Materie lassen sich nicht „erzeugen“. Natürlich lassen sich verschiedene Erscheinungsformen ineinander umwandeln. Aber beispielsweise wird gegenwärtig darauf verwiesen, dass Bausand knapp wird, weil der Sand aus der Sahara für Beton nicht verwendet werden kann.

In der Tat nutzen wir für uns bisher nur einen geringen Anteil der Energie, die uns von der Sonne erreicht. Diese Energie betrifft nicht nur die Solarzellen, auch Wind und Wellen werden letztlich von der Sonne angetrieben. Für ihre Nutzung gibt es noch viel „Luft nach oben“.

Bei manchen chemischen Elementen jedoch, nehmen wir als Beispiel den Phosphor, sind die gut ausbeutbaren Vorkommen begrenzt. Phosphor ist wegen seines Anteils im Genom und als Bestandteil des Energielieferanten Adenosin*triphosphat* in der Zelle für jedes Lebewesen unersetzlich. Da Phosphor deswegen auch einen wichtigen Anteil im Dünger bildet, ist der früher verschwenderische Umgang mit ihm bereits beträchtlich eingegrenzt worden. Die Wissenschaft hatte einen Einblick in Zusammenhänge ermöglicht, die nicht auf der Hand lagen. So hat die Reduzierung nicht nur bei den Wasch- und Reinigungsmitteln bereits zu einem Rückgang bei der durch zu viel Phosphor verursachten Eutrophierung von Gewässern geführt.

Die Menschheit ist konfrontiert mit der Aufgabe, ihr Handeln ändern zu müssen. Das wird jedoch nur dann möglich sein, wenn unser Verständnis der Wirklichkeit die Realität immer besser erfasst. Das wird nur mithilfe der Wissenschaft gelingen und es wird erleichtern, einen zu verschwenderischen Umgang mit den natürlichen Ressourcen einzugrenzen.

Auf der Basis von Grundlagenforschung sollte es möglich werden, auch die Folgen der Folgen sowie die Material-, Energie- und Informationsabläufe und -Kreisläufe bis in ihre globalen Zusammenhänge besser zu verstehen. Auch die scheinbar unerschöpflichen Vorkommen von Luft und Wasser sind bei weitem nicht so ungefährdet, wie man das über lange Zeiten geglaubt hatte.

Da Materie nicht vermehrt werden kann, ist ein Wirtschaftsverhalten unmöglich, welches auf einem dauerhaft wachsenden Verbrauch von materiellen Gütern beruht.

Ein solcher wachsender Verbrauch wird jedoch bisher im Verstehen von „Wirtschaftswachstum“ als Grundpostulat vorausgesetzt und als allheilender Fetisch verstanden. Ebenso wenig ist auch fruchtbarer Boden, der die Grundlage für die Ernährung darstellt, ohne weiteres zurückzugewinnen oder gar vermehrbar.

Es wird also ein neuer Blick auf die Wirklichkeit notwendig, der eine zu enge Sicht auf die Realität erweitert.

In vielen Darstellungen aus den Bereichen der Naturwissenschaft von der Physik bis zur Hirnforschung kann man den Eindruck gewinnen, dass es im Grunde neben der Realität des Materiellen nichts Weiteres gäbe, womit sich Naturwissenschaft befassen müsste. Damit jedoch bleiben die sozialen und geistesgeschichtlichen Einflüsse auf die Wirklichkeit und damit auch auf die Natur weitgehend im Hintergrund oder werden gänzlich ignoriert. Im Buch werden die grundlegenden Zusammenhänge der Wirklichkeit ausführlich reflektiert. Das erfolgt vor allem auf der Grundlage der Quantentheorie, der besten und genauesten Erfassung der Wirklichkeit.

Neben den naturwissenschaftlichen und naturphilosophischen Schwerpunkten sind in dem Text auch die mathematischen Zusammenhänge eingebaut. Es wird allerdings zu allen mathematischen Ausführungen eine breite verbale Darstellung gegeben, so dass ein Überblick über die grundlegenden Vorstellungen auch gewonnen werden kann, wenn man die mathematischen Fundierungen nur überfliegt.

Im Folgenden werden die Basisstrukturen der Quantentheorie ausgebreitet und aufbereitet. Mit ihnen wird diese angeblich „unverstehbare“ oder gar „verrückte“ Theorie begreifbar. Es geht also im Buch um ein Verstehen dessen, was Quantentheorie für unsere Sicht auf die Natur und auf uns selbst bedeutet. Wie ich aus eigener Erfahrung weiß, sind wegen der Fülle des zu vermittelnden Stoffes in der normalen Vorlesung über Quantenmechanik derartige Aspekte nur sehr schwer oder gar nicht unterzubringen.

Mit den quantentheoretischen Fundamenten wird eine naturwissenschaftlich begründete Sicht auf die gesamte Wirklichkeit vorgestellt. Sie umfasst Vorstellungen, welche von der kosmischen Entwicklung über die kleinsten Teilchen der Materie bis zur menschlichen Psyche reichen.

Gewiss sind in unserer gegenwärtigen Zivilisation viele Menschen davon überzeugt, dass eine Wende im Verhalten dringend geboten ist. Leider bewirken allein Apelle für ein ethisches Verhalten wenig. Das gilt besonders dann, wenn sie gegen einen scheinbar „wissenschaftlich begründeten“ Mainstream antreten müssen, der dem Psychischen und damit auch dem Geistigen eine weit nachgeordnete Rolle hinter der Realität des Materiellen zuweist. Zumindest können sowohl das Konsumverhalten als auch viele Vorstellungen über das innere Wesen des Menschen und seiner Einbettung in das kosmische Geschehen diesen Eindruck nicht entkräften.

Die Einsicht in einen Evolutionsprozess, der vom Beginn des Kosmos über das Leben bis zum menschlichen Bewusstsein geführt hat, zeigt klar, dass eine dualistische Weltansicht, also ein „Nebeneinander“ von Geist und Materie, zwar einen pragmatischen Umgang mit der Realität erleichtert und somit einen praktischen Nutzen haben kann, jedoch niemals eine fundamentale Bedeutung. Es muss eine gemeinsame Grundlage für beides geben –

und genau diese Grundlage kann die Quantentheorie liefern. Das wird im Buch naturwissenschaftlich und auch naturphilosophisch begründet. Den zugrundeliegenden mathematischen und physikalischen Strukturen wollen wir uns im vorliegenden Text schrittweise nähern.

Vielen Menschen wird es vielleicht ähnlich wie mir ergehen. Technische Entwicklungen und wissenschaftliche Erkenntnisse erstaunen uns und erleichtern vieles im täglichen Leben. Die Ergebnisse der wissenschaftlichen Forschung ermöglichen es, schnell neue Impfstoffe zu entwickeln. Manche Krankheiten werden heilbar, denen wir bisher machtlos gegenüberstanden.

Andererseits machen wir uns berechtigte Sorgen um die nächsten Generationen und die globalen Ungleichheiten. Wir sind konfrontiert mit einer weltweiten Wirtschaftsweise, der man nicht ansehen kann, dass die Einsicht in die Beschränktheit der materiellen und energetischen Ressourcen auf der Erde bereits zum Leitfaden des ökonomischen Handelns geworden wäre.

Trotz der erwähnten technischen Anwendungen der Quantentheorie kann man dem Eindruck schwer ausweichen, dass das politische und ökonomische Handeln weitgehend noch auf einem Weltbild beruht, das seine naturwissenschaftlichen Grundüberzeugungen hauptsächlich aus den großen Entwicklungsfortschritten der klassischen Physik bezieht. Und noch immer gibt es umfangreiche Versuche, die Quantentheorie in diese mathematische Struktur einzupassen.

Bereits ein flüchtiger Blick auf die geistesgeschichtlichen Zusammenhänge im 20. Jahrhundert zeigt zwei entgegengesetzte Tendenzen.

Einerseits eine sich als materialistisch bezeichnende Utopie, die sich vor allem durch eine Verleugnung der Realität des Geistigen sowie durch die Unterdrückung der Bedürfnisse der Menschen nach Freiheit auszeichnete.

Andererseits kann man die Ansicht wahrnehmen, dass nicht nur unsere Vorstellungen und Anschauungen unsere psychischen Konstruktionen seien. Das sind sie in der Tat. Wenn jedoch die materiellen oder biologischen Grundlagen ebenfalls zu lediglich sozialen oder psychischen Konstrukten erklärt werden, so wird damit ein Zugang zur Realität sehr erschwert.

In der Wissenschaft sind wir daher herausfordert, eine Trennung zwischen Abbildern der Wirklichkeit und Zerrbildern zu verdeutlichen.

Gegenwärtig erleben wir in der westlichen Kultur einen gewaltigen Fortschritt in der Anwendung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse und zugleich im politischen Raum eine Überschätzung der materiellen, also ökonomischen Triebkräfte, die verbunden ist mit einer Unterschätzung von ideologischen und kulturellen, also geistigen Antrieben von Menschen.

Die Naturwissenschaft des 21. Jahrhunderts ermöglicht uns eine, wie oft im Feuilleton so schön formuliert wird, „kopernikanische Wende“ im Verständnis der Natur. (Obwohl Kopernikus in seiner Zeit so wenig öffentlich wirkte, dass man es mehr als ein halbes Jahrhundert lang nicht für nötig befand, sein Buch durch die Inquisition verbieten zu lassen).

Dank der Entwicklungen in der Quantentheorie kann jetzt auch in der Naturwissenschaft akzeptiert werden, was uns in unserem alltäglichen Leben vollkommen selbstverständlich ist:

Nicht allein die faktischen materiellen Umstände, auch unsere gedanklichen Vorstellungen, unsere Erkenntnisse und Erwartungen sowie die noch nicht faktisch gewordenen Möglichkeiten, alle diese für uns bedeutungsvollen Informationen beeinflussen unser Handeln.

Diese Selbstverständlichkeiten können erst in der Naturwissenschaft des 21. Jahrhunderts den ihnen zukommenden gebührenden Platz erhalten und in dieser und in der Philosophie akzeptiert werden.

Die Quantentheorie hat zu der Erkenntnis geführt, dass die Grundlage der Realität durch die Evolution aus einer absoluten Quanteninformation geschaffen wurde und wird. Eine solche Quanteninformation, so zeigt sich, ist äquivalent zu Materie und Energie und bildet die eigentliche Grundlage der Wirklichkeit.

Unser Alltag füllt sich mehr und mehr mit Ereignissen und Gebrauchsgegenständen, welche vor nicht allzu langer Zeit als Zauberei empfunden worden wären oder bei denen man eine Berichterstattung als Märchen oder Lüge bezeichnet hätte. (Lüge deshalb, weil damals auch ein Begriff wie „Fake News“ noch nicht in aller Munde gewesen wäre.) Jules Vernes „Reise zum Mond“ war einst Science-Fiction, seit einem halben Jahrhundert ist es Vergangenheit und wohl bald wieder aktuell. Der Zauberspiegel: „Wer ist die Schönste im ganzen Land“ heißt heute vielleicht „Instagram“?

Ich glaube, dass wohl kaum ein Mensch, der diese technischen Geräte benutzt, dabei an „Quantentheorie“ denkt, einen Bereich der Physik, der seit einem Jahrhundert existiert und der das alles erst ermöglicht hat.

Vielen Menschen ist nicht bewusst, dass beispielsweise elektronische Uhren, Handys, Flachbildschirme, Steuerungssysteme für PKWs und Solarzellen sowie natürlich auch das Internet mit allen seinen guten und bedrohlichen Möglichkeiten ohne die Erkenntnisse aus der Quantentheorie vollkommen unmöglich sein würden.

Alle die Geräte in der Medizin und speziell in der Hirnforschung, bei denen man sogar ohne einen chirurgischen Eingriff umfangreiche Kenntnisse über Zustände und Vorgänge im Inneren des Körpers und auch im Gehirn erhalten kann, sind ebenfalls ohne Anwendungen aus der Quantentheorie undenkbar. Dass heute Eltern schon vor der Geburt wissen können, ob es ein Mädchen oder Junge wird, das verwundert wohl niemanden mehr. Dass die technische Entwicklung bereits Operationen am Ungeborenen ermöglicht, findet man vielleicht doch überraschend.

Die Quantentheorie hat mit ihren Ergebnissen nicht nur unseren Alltag verändert, sie erfordert auch eine Veränderung in der Art und Weise, wie wir über die Wirklichkeit nachdenken.

Auch in seriösen Darstellungen verwendet man oft als Grundlage für Erklärungen von Quantenphänomenen Bilder und Erfahrungen, die man an unbelebten Alltagsgegenständen gelernt hat. Und dann stellt man verwundert fest, dass die Quanten sich völlig anders verhalten können.

Was kann uns helfen, diejenigen Vorgänge in der Natur besser zu verstehen, bei denen das Wirken der Quanten berücksichtigt werden muss?

### **Ein Fazit liegt auf der Hand:**

Der tatsächlichen Basis der Naturwissenschaften auf den Grund zu gehen, bedurfte einer intensiven Forschungsarbeit. Sie soll hier dargelegt werden. Auf dieser Grundlage können wir unsere Anschauungen ändern.

Nur was wir verstanden haben kann uns helfen, besser zu reagieren. Alles, was wir nicht verstehen, vermittelt uns lediglich ein gewisses Gefühl von Ohnmacht.

Ein berühmter deutscher Philosoph hat einmal geschrieben:

*Ich behaupte aber, daß in jeder besonderen Naturlehre nur so viel eigentliche Wissenschaft angetroffen werden könne, als darin Mathematik anzutreffen ist. Denn nach dem Vorhergehenden erfordert eigentliche Wissenschaft, vornehmlich der Natur, einen reinen Theil, der dem empirischen zum Grunde liegt, und der auf Erkenntniß der Naturdinge a priori beruht.<sup>1</sup>*

In dieser These von Immanuel Kant (1724 - 1804) wird viel behauptet und gegen sie wird sich sicherlich weiterhin viel Widerstand regen. Doch können wir heute, 200 Jahre später, erkennen, dass hinter dieser Behauptung mehr Zutreffendes liegt, als man damals wissen konnte.

Die einzelnen Wissenschaften betrachten Teilbereiche der Natur. Wenn es jedoch um die Grundlagen geht, dann ist „das Ganze“, der Kosmos, einzubeziehen. Heute erkennen wir im Kosmos eine Evolution von sehr einfachen Strukturen über das Leben bis zu einer Gesellschaft von Menschen mit Sprache und einem hochkomplexen Sozialsystem.

Die Mathematik als die Wissenschaft möglicher Strukturen ist ein unentbehrliches Gestaltungswerkzeug zumindest für diejenige Naturwissenschaft, die sich mit den einfachsten Strukturen beschäftigt, also für die Physik. Ohne Mathematik gibt es keine Physik. Man kann physikalische Strukturen sprachlich darstellen und erläutern. Jedoch ist ein wirkliches und tieferes Verstehen ohne die Mathematik wahrscheinlich unmöglich.

Ohne die physikalischen Grundlagen bleibt der Chemie das Erklären ihrer Beziehungsstrukturen und Bildungsgesetze verwehrt. Biologie wiederum bliebe ohne diese beiden Wissenschaften auf das Beschreiben von Erscheinungen und Verhaltensweisen beschränkt.

Auf der Basis der einfachen Strukturen entwickeln dann diese Naturwissenschaften und alle die weiteren Wissenschaften ihre jeweils eigenständigen Gesetze.

Je komplexer also die Strukturen werden, desto vielschichtiger werden auch die Versuche, mit mathematischer Unterstützung neue Zusammenhänge finden zu können. Schließlich ist das Finden von Korrelationen nicht dasselbe wie das Entdecken von tatsächlichen Abhängigkeiten und Ursächlichkeiten.

Vor allem die Biologie hatte bisher zu Recht darauf verwiesen, dass für sie ein naturwissenschaftliches Verstehen des Wirkens von Information notwendig ist.

Mit der hier dargelegten Grundlage der Quantentheorie erfolgt die Einordnung der Information in den Rahmen der naturwissenschaftlichen Größen.

Die Quantentheorie ist der genaueste Teil der Physik. Diese große Genauigkeit hat zur Folge, dass bei einem Quantenteilchen, wie z. B. einem Elektron, für die mathematische Beschreibung seines Zustandes unendlich viele Zahlen notwendig sind. Das gilt bereits auch für masselose Objekte wie einem Lichtquant. Bereits das zeigt, dass die Quantenteilchen sehr komplexe Entitäten sind.

Im Gegensatz dazu genügen bei den mathematisch und physikalisch einfachsten aller möglichen Quantenstrukturen zwei Zahlen, um den Zustand einer solchen einfachstmöglichen Quantenstruktur festzulegen.

*Diese mathematisch und physikalisch einfachsten Strukturen sind absolute und noch bedeutungsfreie Bits von Quanteninformation, AQIs.*

Ein tatsächliches Fundament für die Quantentheorie und damit auch für die Physik und die übrigen Naturwissenschaften kann jetzt auf der Basis einer absoluten und kosmologisch begründeten Quanteninformation errichtet werden. Im Buch wird gezeigt, wie sich aus ihnen die komplexen Strukturen erzeugen lassen, welche die Physik beschreibt.

Diese Feststellung bedeutet eine ähnlich große Herausforderung an unsere Vorstellungskraft wie es der Übergang vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild gewesen sein mag. Aller Augenschein spricht für die Bewegung der Sonne um die Erde. Obwohl wir bis heute dieses Bild in der Sprache bewahrt haben, weil ein Sonnenaufgang so überzeugend ist und ein Sonnenuntergang so beeindruckend sein kann, nötigt uns die naturwissenschaftliche Beschreibung und Erklärung, diese Vorstellung umzukehren.

Im Mittelalter war es für viele Menschen noch nicht einmal erreichbar, lesen und schreiben lernen zu können. Jetzt hingegen ist es einfacher, so viel naturwissenschaftliches Verständnis erlernen zu können, dass man versteht, wieso die Erde um die Sonne läuft. Da sie auch um ihre eigene Achse rotiert, entsteht der Augenschein einer täglichen Bewegung der Sonne um die Erde.

Heute erkennen wir immer klarer: Hinter der offensichtlichen Realität des Materiellen wird durch die Naturwissenschaft eine dahinterstehende Quanteninformationsstruktur aufgezeigt.

Im Folgenden wird dargelegt, was auf diesem Wege bereits erreicht worden ist und was von den nachfolgenden Wissenschaftlergenerationen noch zu leisten ist.

Solche neue Einsicht erleichtert zugleich, sich von den über die Quantentheorie verbreiteten zu engen Vorstellungen von Quantenphysik als „Mikrophysik“ und als „Ensemblephysik“ zu verabschieden.

Damit wird Quantentheorie verstehbar – und aus einem tatsächlichen Verstehen ergeben sich neue fruchtbare Erkenntnisse.

Natürlich bleibt es zutreffend, dass im mikroskopisch Kleinen, bei den Atomen und Molekülen, ohne Quantentheorie keine vernünftigen Ergebnisse erhalten werden. Und ebenso bleibt es richtig, dass Wahrscheinlichkeitsaussagen nur mit Statistik überprüft werden können, also nur mit hinreichend großen Ensembles. Falsch werden diese Vorstellungen, wenn sie – wie früher vielfach üblich – verabsolutiert werden. So konnte man noch vor einiger Zeit in physikalischen Publikationen lesen, dass Aussagen über ein einzelnes Atom unsinnig seien. Seit einiger Zeit wird wie selbstverständlich mit einzelnen Atomen und Ionen experimentiert. Früher lag der Erklärungsschwerpunkt für Quantentheorie beim Durchgang vieler winziger Teilchen oder Lichtquanten durch einen engen Doppelspalt. Es



ist an der Zeit, dass auch diejenigen Quantenexperimente in die Lehrbücher geraten, die sich mit Quantensystemen befassen, welche sich ohne eine Aufspaltung in Teile über weit mehr als tausend Kilometer ausdehnen.

Das Bild von „Quantentheorie als Mikrophysik“ hatte es bisher so schwer gemacht, neben den Vorstellungen von „Quanten als kleine Kügelchen“ auch Raum dafür zu öffnen, dass Quantenstrukturen in manchen Situationen als unermesslich weit ausgedehnt zu denken sind.

Während die neuen Bilder nicht leicht zu vermitteln sind, sind andererseits die mathematischen Strukturen seit langem bekannt. So wie Kepler die vorhandene Mathematik der Ellipsen verwenden konnte, um die alten Bilder von den kreisförmigen Planetenbewegungen abzulösen, so hilft die Mathematik auch jetzt, um besser zutreffende Vorstellungen über die Realität zu eröffnen.

In der Mathematik ist viel an notwendiger Vorarbeit geleistet worden. Sie würde allerdings gleichsam im luftleeren Raum der virtuellen Strukturen verbleiben, wenn sie nicht mit der Physik auf das Geschehen in der Natur angewendet wird. Ohne die Mathematik bleibt wiederum die Physik kraftlos und lediglich beschreibend. Sie kann dann nicht erklärend wirken. Zu dieser Erkenntnis sind auch philosophische Gedankengänge notwendig. Durch Reflexionen kann deutlich werden, was die verwendeten Begriffe und Strukturen bedeuten.

Einer meiner jüngeren Enkel hat mich gefragt, was „Baum“ bedeutet. Ich erklärte ihm zuerst, dass der „Baum“ ein Lebewesen ist. Dann begann ich mit dem ganzen Baum und zerlegte ihn in der Beschreibung in Stamm und Wurzeln, mit Rinde, Ästen, Blättern, Blüten und Früchten. Eine noch weitere Aufgliederung in Moleküle und Atome und zu noch Kleinerem würde für ihn wohl noch zu kompliziert werden.

Dieses Vorgehen passt zu einem bekannten, aber in der Weiterführung überraschenden Befund: Viele Philosophen und Physiker vertraten seit der Antike die Vorstellung, dass „Kleineres“ zugleich „Einfacheres“ sein würde.

Die Geschichte der Quantentheorie offenbart allerdings das Gegenteil zu dieser Vorstellung. Im Gegensatz zu ihr führt nach der Schwelle, die mit den chemischen Atomen gekennzeichnet werden kann, der immer weiter beschrittene Weg ins räumlich Kleine zu immer komplizierteren anstatt zu einfacheren Theorien.

Da man unter „Erklären“ im Allgemeinen versteht, etwas Kompliziertes aus dem Einfachen aufzubauen oder zumindest daraus zu rekonstruieren, bedeutet ein „wirkliches Erklären“, mit dem „wirklich Einfachsten“ zu beginnen. Das sind die erwähnten AQIs.

#### **Hier eine erste kurze Kennzeichnung:**

Ein AQI ist so einfach, dass ihm keine Eigenschaft, also keine spezielle Bedeutung und auch kein spezieller Ort im Kosmos, zugeordnet werden kann. Es kann veranschaulicht werden wie eine Schwingung, die über den ganzen Raum ausgedehnt ist. Mathematisch und physikalisch sind sie als Quantenbits definierbar. Nur mit sehr vielen von ihnen werden spezielle Strukturen wie lokalisierte Teilchen möglich.

## Was lässt sich zuerst ganz allgemein zur Quantentheorie sagen?

Die Quantentheorie wurde erst notwendig und unabweisbar, als Experimente und Theorien sehr genau geworden waren.

- Die Quantentheorie erweist sich als die Physik des Genauen.

Der im Zusammenhang mit der Quantentheorie unglücklich gewählte Begriff der „Unschärfe“ erschwert diese Einsicht.

- Die Quantentheorie erweist sich als eine Physik der Beziehungen.<sup>2</sup>

Beziehungen begründen das Entstehen von etwas Neuem, von Ganzheiten, von Strukturen, welche mehr sind als die Summe ihrer Teile. Man kann sogar formulieren:

- Beziehungsstrukturen werden zu Objektstrukturen und werden bei Lebewesen auch zu Bedeutungsstrukturen.

Die Quantentheorie zeigt weiterhin, dass über die Fakten hinaus sogar Möglichkeiten, die noch keine Fakten geworden sind, bereits Wirkungen hervorrufen können.

- Die Quantentheorie erweist sich als eine Physik der Möglichkeiten.

Gelegentlich finden sich vollkommen falsche Vorstellungen über die Quantentheorie. Es sind Aussagen von der Art: »Ein Kreisel kann sich rechtsherum oder linksherum drehen, ein Elektron dreht sich gleichzeitig in beide Richtungen.«

Diese Behauptung über das Elektron ist gemäß der deutschen Grammatik eine Aussage über Fakten. Wenn sich Aussagen über Fakten widersprechen, dann sind sie nicht „alternativ“, sondern unglaubwürdig oder Unsinn. Als Reaktion auf solche unzulänglichen Bilder wird der Quantentheorie oft eine Unverstehbarkeit attestiert. Aber sollte man nicht die beste und genaueste Theorie, die wir besitzen, verstehen können?

- Das Wichtige an der Quantentheorie ist, dass sie keine Aussagen über faktische Zustände, sondern Aussagen über Möglichkeiten formuliert.

Erst wenn man das Elektron misst und damit nötigt, in einen faktischen Zustand überzugehen, dann dreht es sich entweder nach links oder nach rechts – genau so, wie es die Logik verlangt. Solange also das Elektron nicht in einen faktischen Zustand gezwungen wird, dann besitzt es zur gleichen Zeit die *Möglichkeit*, sich rechtsherum oder linksherum drehen zu können. Und das ist weder ein Widerspruch noch ist es unverständlich.

Hinter der Aussage über „Möglichkeiten“ steht die Tatsache, dass die Quantentheorie eine neue „Philosophie der Zeit“ erforderlich macht. Diese Änderung ist noch grundlegender als jene, die sich aus den beiden Relativitätstheorien ergeben haben.

Im Buch wird darüber reflektiert, was aus den Grundstrukturen der Quantentheorie gefolgert werden soll und kann.

Albert Einstein (1879 – 1955) hatte am Ende seines Forscherlebens die Vision, dass die Basis der Physik sich in einer Struktur zeigen könnte, die in ihrer konkreten Ausführung dem entspricht, was hier vorgestellt wird.

Carl Friedrich v. Weizsäcker (1912 – 2007) war der erste, der den Weg in ein solches Programm eröffnete und der im deutschen Sprachraum darüber viel veröffentlichte. Viele Jahre später hat Archibald Wheeler (1911 – 2008) die im englischen Sprachraum prägend

gewordene These „It from Bit“ verkündet – allerdings ohne dabei aus dem zu engen Rahmen „Quantenphysik = Mikrophysik“ und den damit verbundenen Vorstellungen herauszutreten.

In eine solche Grundlegung ist nun ein halbes Jahrhundert an weiterer Forschungsarbeit eingeflossen. Das Buch will seine Leserinnen und Leser auf dem Weg mitnehmen, der von den naturwissenschaftlich erkennbaren Grundlagen der Wirklichkeit bis zu den gegenwärtigen Theorien führt.

Dabei wird gezeigt, wie weit und mit welchen Erfolgen das Programm, die Physik aus *kosmologisch begründeten absoluten Quantenbits* zu rekonstruieren, bereits durchgeführt worden ist.

Der Forscherdrang, immer besser verstehen zu wollen, was den Phänomenen zugrunde liegt, wie die Natur wirkt und wie wir das alles erklären können, ist der Hauptmotor in der Entwicklung der Naturwissenschaften. Glühendes Eisen strahlt. Max Planck (1858 – 1947) wollte verstehen, wie solche Strahlung zustande kommt. Die dafür notwendige Verbindung von Elektrodynamik und Thermodynamik führte ihn unausweichlich zur Quantentheorie.

Quantentheorie und Allgemeine Relativitätstheorie verbinden sich an den Schwarzen Löchern. Die dort notwendige Verkettung dieser beiden Theorien führte unausweichlich dazu, die *Quanteninformation* in die Physik einzuschließen.

Der *Einschluss der Quanteninformation als das Fundament in die Physik* bedeutet eine grundlegende Wende gegenüber derjenigen Naturwissenschaft, in der ich selbst und die meisten meiner Kollegen ausgebildet wurden.

Daraus folgt eine Schwierigkeit beim Schreiben dieses Buches. Es werden allseitig kreative neue Ideen gefordert und zugleich wird gewünscht, dass sie sehr einfach – sozusagen mund- bzw. denkgerecht – dargeboten werden. Sie sollen fantasievoll sein, aber auch die etablierten Gedanken bestätigen.

Um eine solche Quadratur des Kreises zu bewältigen ist ein Blick auf die Mathematik hilfreich. Die Quadratur des Kreises ist unmöglich, sie würde erfordern, unendlich viele Stellen von „ $\pi$ “ zu berücksichtigen. Zugleich kommen wir zu der Einsicht, dass eine solche Unmöglichkeit doch näherungsweise immer so gut erledigt werden kann, wie es die Umstände erfordern. Daher wird an vielen Stellen des Buches neben den zugrundeliegenden mathematischen Strukturen der neuen Physik zugleich ausführlich dargelegt, wie sie verstanden werden können.

## Literatur

- 1 Kant I (1786) *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*, A VIII.
- 2 Görnitz T (1999) *Quanten sind anders/Die verborgene Einheit der Welt*, Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag



# 1

## Reale und mögliche Strukturen als Triebkraft der Natur

*Die Mathematik ist die Wissenschaft denkbarer logischer Strukturen.*

*Die Physik ist die Wissenschaft realisierbarer Strukturen.*

Die Strukturen, die in der Natur reale Wirkungen hervorrufen können und die von der Physik erfasst werden, umfassen neben den Fakten auch die Möglichkeiten, die noch nicht faktisch geworden sind. Damit sind nicht diejenigen Möglichkeiten gemeint, die bereits als Fakten vorliegen, uns aber unbekannt sind. *In diesem Sinne ist die Physik die Wissenschaft derjenigen mathematisch darstellbaren Strukturen, die reale Wirkungen erzeugen können.*

Alles, was man in der Mathematik konstruieren kann, ist viel umfassender als die physikalische Realität. Viele Strukturen der Mathematik werden nach bisheriger Kenntnis nicht realisiert. Mit den mathematischen Strukturen lassen sich nicht nur faktische Geschehnisse modellieren, sondern auch die Entwicklungen von physikalischen Möglichkeiten. So können die Prognosen für Möglichkeiten auch dazu helfen, die Realisierung von unerwünschten Möglichkeiten zu verhindern, also ihr „Faktisch-Werden“ zu vermeiden. Das kann z.B. zur „Paradoxie der Prophylaxe“ führen: Uneinsichtige Menschen erklären nach dem Erfolg einer Prophylaxe, dass sie überflüssig gewesen sei.

Die Forderung von Wirkungsmöglichkeit wird an die Mathematik nicht gestellt. Von manchen mathematischen Theorien ist zumindest gegenwärtig eine Anwendung in einem physikalischen Modell noch nicht zu erkennen. Allerdings hat es in der Geschichte der Physik immer wieder überraschende Anwendungen von mathematischen Methoden gegeben, die bis dahin nur in der Mathematik benutzt wurden. Ein bekanntes Beispiel ist die Riemannsche Geometrie, die Bernhard Riemann (1826 - 1866) als eine reine mathematische Erkenntnis gestartet hatte. Nachdem Albert Einstein (1879 - 1955) die Feinheiten dieser mathematischen Strukturen von seinem Freund, dem Mathematiker Marcel Grossmann (1878 - 1936) erfahren hatte, erwiesen sie sich als der Schlüssel zum Verstehen der Gravitation.

In der Physik finden sich viele Theorien. Diese haben jeweils einen Anwendungsbereich und beziehen sich auf viele ähnliche Fälle. Die Theorien werden oft als Differentialgleichungen formuliert. Durch die verschiedenen Anfangsbedingungen werden beliebig viele Situationen erfasst.

*Theorien handeln nicht von einem Fall, sondern von vielen Fällen.*

Im vorliegenden Buch geht es nicht nur um Gesetze, sondern auch um den Begriff „Prinzip“.

Die Redewendung „im Prinzip“ wird im Alltag oft so verwendet, dass das Gemeinte gerade nicht erfüllbar ist, aber eigentlich erfüllbar sein sollte. In philosophischen Zusammenhängen und auch hier im Buch ist eine solche Abschwächung nicht intendiert.

Als Prinzipien (Griech: ἀρχή, arché – Anfang, Prinzip, Ursprung; Plural archai) kann dasjenige bezeichnet werden, was den Theorien zugrunde liegt, was die Theorien erst ermöglicht.

Während die Theorien logisch geschlossene Strukturen sein sollen, kann das von den Prinzipien nicht verlangt werden. Platons „ungeschriebene Lehre“ handelt von den Archai. Weizsäcker hatte mich auf das 1993 erschienene Buch von G. Reale und die vorausgehenden Arbeiten von Krämer und Gaiser aufmerksam gemacht.<sup>1</sup> Diese Prinzipien bei Platon sind das „Eine“ und die „unbegrenzte Zweiheit“. Der „Aufstieg“ steuert auf das „Eine“. Von dort erfolgt der „Abstieg“ in die „unbegrenzte Zweiheit“, in die Realität mit ihrer Vielfältigkeit.

In den Diskussionen mit Weizsäcker waren wir zu dem Schluss gekommen, dass die Archai vor der Idee der Logik kommen, also nicht der Logik der Fakten unterliegen. Deshalb wohl ist diese Lehre nicht geschrieben worden, denn das „Eine“ und die „unbegrenzte Zweiheit“ formen einen logischen Widerspruch, *wenn sie als Fakten gedacht werden*.

Wir können das Ganze, das Eine, nur in seiner Zerlegung in Vielheiten begreifen und erklären. Eine „Theorie“ über das „Eine“ wäre ein Widerspruch in sich, denn eine Theorie bezieht sich auf vieles. So kann eine Bezeichnung „Theory of everything“ aus meiner Sicht zu unzutreffenden Schlussfolgerungen führen. Ebenso unsinnig ist der im Deutschen zu findende Begriff der „Weltformel“. Eine Formel ist als Ausdruck für ein Gesetz nur für eine Vielheit sinnvoll und nicht für das „Eine“.

Hier im Buch geht es um das Ganze. Und natürlich gibt es sehr erfolgreiche und sehr bewährte Theorien. Diese sind unbedingt ernst zu nehmen. Deshalb wird im Folgenden gezeigt, wie aus dem *Prinzip der Protyposis* die bewährten Theorien der Physik hergeleitet werden können.

Die Protyposis als die Grundlage der Physik ist die Gesamtheit der in der Vorrede bereits erwähnten einfachsten Strukturen, die Gesamtheit der absoluten und noch bedeutungsfreien Bits von Quanteninformation, der AQIs.

Wir haben diesen Begriff gewählt, um die Verwechslung der absoluten Quanteninformation, der AQIs, mit demjenigen Informationsbegriff zu vermeiden, der, wie im Alltag üblich, bereits mit einer speziellen Bedeutung gedacht wird. Die Protyposis ist also bedeutungs-offen oder bedeutungsfrei im Gegensatz zu den Qubits des Quantencomputers.

#### **Zur Wortbedeutung dieses ungebräuchlichen Begriffes:**

Protyposis stammt aus dem Altgriechischen. Der Wortstamm τύπω (typto), bedeutet: „schlagen, auch z. B. eine Münze prägen“; προτύπω (protupto) „vorwärtsdringen, vorbrechen“; τυπώ (typoo) „eindrücken, prägen“, προτυπώ (protypoo) „eine Vorstellung von etwas Zukünftigem geben“; προτύποις (protyposis) „das Vorgeprägte, das Sich-Ausprägende, Sich-Entwickelnde“.

## ■ 1.1 Einstein und Weizsäcker über die Grundlagen der Naturwissenschaft

Gleichsam als Quintessenz seines Forscherlebens über die Feldtheorien in der Physik beendete Albert Einstein (1879 – 1955) die letzte von ihm redigierte Ausgabe seines Buchs „The Meaning of Relativity“ mit der folgenden Feststellung<sup>2</sup>:

*One can give good reasons why reality cannot at all be represented by a continuous field. From the quantum phenomena it appears to follow with certainty that a finite system of finite energy can be completely described by a finite set of numbers (quantum numbers). This does not seem to be in accordance with a continuum theory and must lead to an attempt to find a purely algebraic theory for the description of reality. But nobody knows how to obtain the basis of such a theory.*

*(Man kann gute Gründe dafür anführen, warum die Realität überhaupt nicht durch ein kontinuierliches Feld dargestellt werden kann. Aus den Quantenphänomenen scheint mit Sicherheit zu folgen, dass ein endliches System endlicher Energie vollständig durch eine endliche Menge von Zahlen (Quantenzahlen) beschrieben werden kann. Dies scheint nicht im Einklang mit einer Kontinuumstheorie zu stehen und muss zu dem Versuch führen, eine rein algebraische Theorie zur Beschreibung der Wirklichkeit zu finden. Aber niemand weiß, wie man die Grundlage einer solchen Theorie erhalten kann.)*

Einstein schwebt hierbei offenbar eine Struktur vor Augen, welche eher mit den ganzen Zahlen verwandt ist als mit den reellen Zahlen (dem Kontinuum, wie die Feldtheorien).

Wenn Einstein nach einem so intensiven und kreativen Forscherleben mit dem Schwerpunkt auf den Feldtheorien eine derartige Feststellung publiziert, so sollte diese These Anlass geben, darüber gründlich nachzudenken. *Was Einstein hiermit verlangt, das ist nicht weniger, als die Physik in ihren Grundlagen neu zu bedenken.*

Kontinuierliche Feldtheorien sind mathematische Strukturen, in denen unendlich kleine und unendlich große Werte auf gleichsam „angeborene Weise“ mit eingeschlossen sind. In der Natur jedoch und in ihrer physikalischen Beschreibung sind „Unendlichkeiten“ ein Hinweis darauf, dass die betreffende Theorie sich in ihrer Idealisierung zu weit von der Natur entfernt hat. In der Natur, die wir beobachten können, existiert nichts unendlich Großes – und auch nichts unendlich Kleines.

Selbstverständlich weiß Einstein um die große Bedeutung der Feldtheorien. Zu denen gehören nicht nur die sehr erfolgreichen Strukturen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie und der Maxwell'schen Elektrodynamik, sondern auch die quantentheoretischen Beschreibungen elektromagnetischer Phänomene in der Quantenelektrodynamik oder der Quantenchromodynamik.

Einstein wusste natürlich, dass die in der Physik verwendeten theoretischen Unendlichkeiten unverzichtbar und hilfreich sind. Man benötigt sie vor allem im „Nenner eines Bruches“. Denn damit wird es möglich, etwas zu null werden zu lassen, was zur Beschreibung der betreffenden Situation nichts Nutzbringendes beitragen kann. Einstein mag jedoch gehäht haben, dass den in der Physik verwendeten „Unendlichkeiten“ noch etwas anderes zugrundeliegen muss – nämlich eine „endliche Struktur“.

In der Mathematik kann man das „unendlich“ Große und Kleine aus den ganzen Zahlen erzeugen. Die ganzen Zahlen verkörpern das einfachste Beispiel von dem, was Einstein mit „algebraischer Theorie“ meint. Der Übergang von diesen zum Kontinuum der reellen Zahlen geschieht in der Mathematik mithilfe von Grenzprozessen, von „Limes-Strukturen“. Denn das Unendliche kann nur als Grenzprozess behandelt werden, als Gesetzmäßigkeit über ein Verhalten z. B. von Zahlenfolgen.

### **Kann das Unendliche auch für die Physik gelten?**

Im Unterschied zu den mathematischen Größen kann ein physikalischer Messwert „Unendlich“ für uns Menschen nicht existieren!

„Prinzipiell“ kann man immer weiter zählen, „prinzipiell“ kann man Brüche – also das Verhältnis zweier ganzer Zahlen – immer kleiner werden lassen.

Erst mit den Grenzwertbildungen gegen „unendlich groß“ und „unendlich klein“ werden viele Strukturen erkennbar, weil man damit in der jeweiligen Situation Unwesentliches ausblenden, also „verschwinden“ lassen kann.

Für einen Milliardär ist wahrscheinlich der Unterschied zwischen einem Dollar und einem Cent oft uninteressant. Er wird auf diese Information verzichten. Ein anderes mögliches Beispiel wäre, an einem Punkt der Kurve den Unterschied zwischen dieser Kurve und der Tangente zu ignorieren. Wenn ich einen Stadtplan verwende, dann wird damit der Unterschied zwischen der Erdkugel und einer Tangential-Fläche an diese Kugeloberfläche zu Null gemacht.

#### **Es wird also zweierlei erkennbar:**

Einerseits erlauben die Übergänge zu Grenzwerten das Ausschließen von unwichtigen Teilaspekten. Andererseits gibt es in der Natur keine tatsächlichen Unendlichkeiten. Es steht also die Aufgabe an, einerseits „algebraische“, d. h. diskrete Strukturen zu suchen. Sie haben dann eine gewisse Ähnlichkeit mit den ganzen Zahlen. Und andererseits muss man dann daraus Limes-Strukturen konstruieren, um sich das in der Natur Vorfindliche so zu vereinfachen, dass es für uns einer mathematischen Beschreibung zugänglich wird.

Fast zur gleichen Zeit, in der Einstein seine obige These formulierte, entwickelte Carl Friedrich v. Weizsäcker in drei Artikeln über „Komplementarität und Logik“ die ersten Überlegungen, um die Quantentheorie auf der Basis von „einfachen Alternativen“ zu begründen.<sup>3</sup>

In dieser Zeit sah man den Unterschied zwischen Quantentheorie und klassischer Physik vor allem in dem, was von Niels Bohr (1885 – 1962) als „Komplementarität“ bezeichnet wurde.

Mit dem Begriff der Komplementarität wird auf die Tatsache verwiesen, dass in der Quantentheorie eine gleichzeitige Messung von Ort und Impuls eines Teilchens nicht möglich ist, weil beide Größen gemäß Theorie nicht gleichzeitig existieren. Hingegen beruht die klassische Physik auf der Vorstellung, dass zur gleichen Zeit für ein Teilchen ein wohldefinierter Ort und eine wohldefinierte Geschwindigkeit existieren würden. Diese so fruchtbaren und erfolgreichen Vorstellungen aus der klassischen Physik sind allerdings keineswegs selbstverständlich. Darauf hatte der antike Philosoph Zenon von Elea (490 – 430 v. Chr.) bereits vor zweieinhalb Jahrtausenden hingewiesen.<sup>4</sup>



In populären Darstellungen wird Komplementarität gelegentlich am Beispiel einer Münze illustriert. Dabei wird darauf verwiesen, dass – obwohl Vorder- und Rückseite das Wesen der Münze ausmachen – immer nur die eine von beiden gesehen werden kann. Ich halte die damit vermittelte bildliche Vorstellung für unglücklich gewählt. Sie vermittelt den Eindruck, als würden beide zueinander komplementären Aspekte zur gleichen Zeit faktisch existieren können. Das ist jedoch nicht das, was den Sachverhalt betrifft.

*Komplementäre Eigenschaften erscheinen als gleichzeitig notwendige Charakterisierungen eines Systems, die jedoch in der betreffenden theoretischen Beschreibung niemals zugleich faktisch werden können.*

Als anschauliches Beispiel verwendete Niels Bohr (1885 – 1962) gelegentlich die Komplementarität zwischen Liebe und Gerechtigkeit. Sie sind beide im Zusammenleben der Menschen wichtig, wenn ein gutes soziales Miteinander resultieren soll. Jedoch streng genommen schließen sie *im Rahmen der klassischen Logik* einander aus.

Bohr war für die jungen Quantenphysiker wie Werner Heisenberg (1901 – 1976), Wolfgang Pauli (1900–1958) und viele andere so etwas wie eine „Vaterfigur“. Er hatte die Fähigkeit, in einer freundlichen Art und Weise die Argumente seiner Gesprächspartner so lange zu hinterfragen, bis alle Schwächen der Argumentation aufgedeckt waren. Dabei half ihm seine Fähigkeit, zwischen einer Paradoxie und einem Widerspruch zu unterscheiden.

Ein Widerspruch behauptet, dass zwei sich ausschließende Aussagen (z. B. „Ein Dreieck hat vier Seiten“ und „Ein Dreieck hat nicht vier Seiten“) zugleich faktisch zutreffen. Eine Paradoxie hingegen ist „παρά, neben“ der „δόξα, Meinung“. Sie kann unerwartet, unglaublich, ja widersprüchlich erscheinen.

Paradoxe Aussagen über Möglichkeiten erscheinen dann als Widersprüche, wenn sie als Fakten formuliert werden.

Ein Beispiel, das wir später noch genauer betrachten werden (siehe Abschnitt 9.5.), ist die oft zu lesende Behauptung bei der Beschreibung des Doppelspaltversuches: „Das Quantenteilchen fliegt durch beide nebeneinander liegende Spalten“. Der Widerspruch verschwindet, wenn man die Aussage auf Möglichkeiten bezieht: „Das Quantenteilchen hatte die Möglichkeit, zur gleichen Zeit durch beide nebeneinander liegende Spalten zu fliegen.“

Eine solche paradoxe Aussage wird zu einem Widerspruch, wenn man mit ihr zugleich die Vorstellung verbindet, dass Möglichkeiten stets und ausschließlich auf Unkenntnis über Fakten beruhen.

Aus diesem Versuch wird deutlich, dass er auch unser Wissen über die Struktur der Zeit erweitert. Anstelle der Vorstellung einer lückenlosen Aneinanderreihung von faktischen Zeitpunkten zeigt die Quantentheorie, dass zwischen zwei Fakten, in diesem Beispiel zwischen dem Aussenden des Teilchens und seinem Registrieren am Bildschirm, in diesem Versuch kein weiteres Faktum postuliert werden darf. Ein Eingriff, um ein Faktum zu erzwingen, verändert oder zerstört das Experiment. In den Kapiteln 7 und 8 wird dargelegt, wie wir aus der Quantentheorie lernen können, dass die Struktur der Zeit raffinierter ist, als oft gedacht wird, und dass sie differenzierter betrachtet werden muss.

Quantentheorie kann interpretiert werden als eine Änderung der Logik, welche die komplementären Aspekte jeder fundamentalen Naturbeschreibung berücksichtigt.

Weizsäcker konzentrierte sich bei seinen Überlegungen auf den Zusammenhang von Komplementarität mit Logik – und in der Logik gibt es „einfache Alternativen“.

*Die Quantenlogik der einfachen Alternative führt zu einer Mannigfaltigkeit von Zuständen, die der Gesamtheit der Richtungen im dreidimensionalen reellen Raum zugeordnet werden kann ...*

*Ich möchte vermuten, dass die mathematischen Eigenschaften des wirklichen physikalischen Raumes auf diese Weise aus der Komplementaritätslogik folgen.<sup>5</sup>*

Was steckt hinter dieser Vorstellung?

Einerseits verweist Weizsäcker darauf, dass jede beliebige Fragestellung durch ein immer weitergeführtes Stellen von einfachen Fragen, zu einem Ende geführt werden kann. Die einfachen Fragen erfordern und erwarten als Antworten lediglich „ja“ oder „nein“. Auch jedes experimentelle Ergebnis kann in eine Abfolge von „Ja-Nein-Angaben“ eingegrenzt werden.

Andererseits verbindet Weizsäcker diese triviale Feststellung mit der sehr kühnen Behauptung, dass sich aus der Grundstruktur der Quantentheorie eine der bis dahin ungeklärten Fragen der Physik – die nach einer Begründung der Dreidimensionalität der Realität – lösen lassen würde.

### 1.1.1 Raum

Vielleicht wird man sich fragen, wieso man um die drei Dimensionen Länge, Breite und Höhe so viel Aufhebens macht. Man weiß und sieht es doch, dass es so ist.

Dass der Raum, in dem wir leben, mit Länge, Breite und Höhe drei Dimensionen hat, das war über Jahrtausende keine Frage, über die man nachgedacht hätte. Auch bei der Entwicklung der Mechanik war das selbstverständlich. Allerdings musste man in ihr für jedes Teilchen eigene Koordinaten für dessen Orte und dessen Geschwindigkeiten einführen.

Die Mathematiker erkannten bald, dass man eine solche Struktur als einen Raum mit so vielen Dimensionen verstehen kann, wie es insgesamt unabhängige Koordinaten gibt.

Die Entwicklung ging aber weiter. Die Mathematiker zeigten, dass man die Erkenntnisse über gekrümmte Flächen, wie z. B. die Oberfläche einer Kugel, auch auf Räume mit mehr Dimensionen als nur die zwei einer Fläche übertragen kann. Der Raumbegriff wurde immer mehr auch zu einem Werkzeug in der Physik und die Vorstellungen über Dimensionen wurden immer allgemeiner.

Es ergab sich daher eine Verallgemeinerung des Raumbegriffes, von der man normalerweise in der Schule nichts hört.

Die vielfachen Verallgemeinerungen und ihre Nützlichkeit ließen schließlich doch bei manchen Physikern die nachdenkliche Frage aufkommen, weshalb wir der Überzeugung sind, in einer dreidimensionalen Welt zu leben.

Wenn man übertreiben wollte, so könnte man manche der noch gegenwärtigen Modelle der Physik so karikieren, dass man sagt: Der Raum ist elfdimensional. Das ist so evident, dass man es nicht begründen muss. Und dann zeigt sich, dass sich sieben Dimensionen so stark einrollen, dass wir bisher von ihnen noch nichts bemerken konnten und nur die vierdimensionale Raumzeit bemerkbar ist.

Wenn wir das alles bedenken, dann kann man doch überlegen, ob es rationale Gründe dafür gibt, dass der Raum drei und die Zeit eine Dimension besitzt.

Mit dieser kurzen Schilderung sollte deutlich werden, wieso „Raum“ mit seinen Verallgemeinerungen und seinen vielfältigen Bedeutungen mit zu den am häufigsten benutzten Begriffen in der Physik gehört. Es soll daher kurz skizziert werden, was mit Begriffen wie Raum, Vektoren usw. gemeint ist. Wer sich allerdings solchen eher mathematischen Spezialitäten noch nicht zuwenden will, kann die Kästen überblättern.

## 1.1.2 Einige weitere mathematische Begriffe

### Vektoren

Noch lange nach den Zeiten von Euklid (ca. 300 v. Chr.) war mit „Raum“ der dreidimensionale Raum (mit Länge, Breite und Höhe) gemeint, in dem wir leben. Auch waren Zeichnen und Rechnen voneinander getrennt, also Geometrie und Algebra.

René Descartes (1596 – 1650) erfand das Koordinatensystem. Das war genial. Es ermöglichte damit auch eine rechnende („die analytische“) Geometrie. Seitdem wird in der Mathematik der Begriff „Raum“ sehr häufig und für sehr verschiedene Entitäten verwendet.

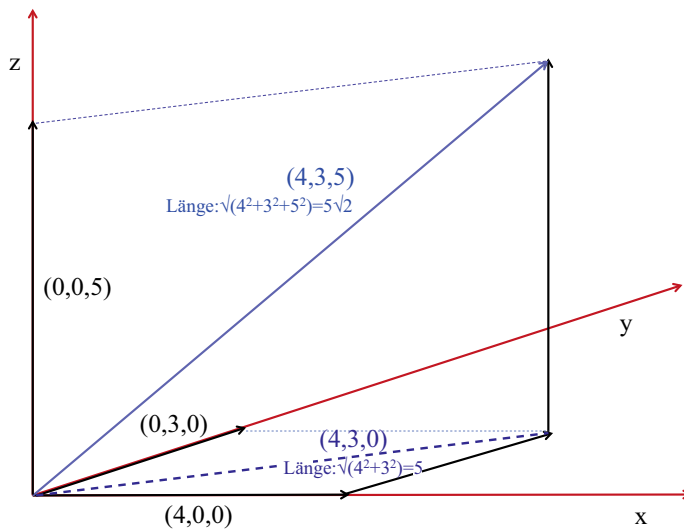
Mit dem Koordinatensystem können Vektoren (Pfeile) definiert werden. Sie definieren ihren Endpunkt durch ein Zahlentupel.

Vektoren werden addiert, indem das Ende des einen an die Spitze des anderen angefügt wird.

### Superposition

Bei einem Quantensystem werden den verschiedenen Zuständen Vektoren zugeordnet. So, wie man verschiedene Möglichkeiten miteinander kombinieren kann, kann man wie in Bild 1.1 einen Vektor aus anderen Vektoren aufbauen oder auch in andere zerlegen. In der Mathematik spricht man dabei von der Summe der Vektoren. In der Quantentheorie verwendet man den Begriff der Superposition oder auch der „Überlagerung“ dafür.

Mit der Superposition wird ein einem Quantensystem darauf hingewiesen, dass mit einem konkreten Zustand stets auch die Möglichkeit von anderen Zuständen gegeben ist.



**Bild 1.1** Der Vektor  $(4, 3, 5)$  entsteht aus den drei Vektoren  $(4, 0, 0) + (0, 3, 0) + (0, 0, 5) = (4, 3, 5)$ . Jeder dieser drei Vektoren steht auf den beiden anderen senkrecht, d. h. sie haben keine gemeinsamen Anteile. (Sie sind zueinander orthogonal.) Die Abstände in den Dreiecken werden mit dem „Pythagoras“ (ca. 570 – 510 v. Chr.) berechnet.

Nicht nur in der Mathematik, auch in der Physik wurde der abstrakte mathematische Raumbegriff immer umfassender verwendet. Daher tauchte schließlich die Frage auf welche Dimension der „Realität“ zugesprochen werden muss. Bekanntlich gibt es gegenwärtig in der Physik nicht nur die Vorstellung, dass tatsächlich einige der mathematischen Dimensionen etwas mit der Realität zu tun haben könnten, sondern auch Vorschläge, nach diesen „verborgenen Dimensionen“ mit Experimenten zu suchen. Bisher jedenfalls ist mir nicht bekannt geworden, dass es dabei irgendeinen Erfolg gegeben hätte.

Weizsäckers These war, dass bereits aus der mathematisch einfachsten Quantenstruktur die Dreidimensionalität der Realität folgt.

### Allgemeinere Räume

In Bild 1.1 wurde für die Messung von Abständen der Pythagoras eingeführt. Einen Raum, in dem man Abstände sinnvoll definieren kann, wird „metrisch“ genannt. Ein Zeichenblatt wäre ein Beispiel für eine global definierbare Metrik, was bei einem Gummituch nicht möglich ist.

Als Einstein seine Spezielle Relativitätstheorie einführte, hat er zu den drei Raumdimensionen als vierte Dimension die Zeit als eine *imaginäre Koordinate* hinzugenommen. Dadurch wird das Quadrat von  $t$  negativ. (Zu den imaginären Zahlen, die in der Quantentheorie für das Beschreiben von Möglichkeiten unverzichtbar sind, mehr dazu in Kapitel 9)

Mit der imaginären Zeit erscheint im Pythagoras für einen „Abstand“  $s$  ein negatives Vorzeichen:  $x^2 + y^2 + z^2 - t^2 = s^2$ .

Ein Raum bei dem im Pythagoras auch negative Vorzeichen auftreten, nennt man „Pseudo-euklidisch“. Man spricht von einer indefiniten Metrik. Die „Pseudo-Abstände“ in einer solchen Metrik können wegen des negativen Vorzeichens auch von verschiedenen Punkten null werden. (So vergeht für einen Lichtstrahl selbst auf seinem Weg zwischen Emission und Absorption keine Zeit!)

Der dreidimensionale Raum (der Ortsraum, in dem wir leben) bildet zusammen mit der Zeit einen solchen pseudo-euklidischen Raum, den Minkowski-Raum. Er wurde von Hermann Minkowski (1864 – 1909) für eine Beschreibung der Relativitätstheorie eingeführt.

### ***Mannigfaltigkeit***

Als *Mannigfaltigkeit* wird eine mathematische Raumstruktur bezeichnet, die lokal, also in einer kleinen Umgebung eines Punktes, wie ein Euklidischer Raum beschrieben werden kann.

Eine Mannigfaltigkeit, die uns geläufig ist, ist die Erdoberfläche. Für kleine Bereiche ist sie flach wie ein Zeichenblatt und ein Stadtplan ist gut zu verwenden. Für größere Bereiche oder die Erde als ganze benötigen wir einen Atlas mit Karten (so sprechen auch die Mathematiker) oder wir können die Krümmung als Kugeloberfläche mit Bergen und Tälern nicht mehr gut mit einem Blatt Papier erfassen.

In der Kosmologie sind auch andere Mannigfaltigkeiten bedeutsam, welche „pseudo-euklidisch“ sind.

### ***Zustandsraum als „Mannigfaltigkeit von Zuständen“***

Der „Zustandsraum“ ist ein abstrakter Raum, dessen „Koordinatenachsen“ den Eigenschaften des Systems, z. B. eines Teilchens, entsprechen. Dabei darf eine solche Eigenschaft keine gemeinsamen Anteile mit den jeweils übrigen derartigen (d. h. orthogonalen) Eigenschaften haben.

Ein Teilchen in der Mechanik besitzt drei unabhängige Ortskoordinaten (Länge, Breite und Höhe, hier als die Koordinaten  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Hinzu kommen noch drei zugehörige Geschwindigkeitskoordinaten  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ . Diese sechs unabhängigen Koordinaten erfassen den Zustand eines Teilchens in der klassischen Mechanik.

Der Zustandsraum eines Teilchens in der Mechanik ist somit sechsdimensional – und kann nicht mehr einfach auf ein Papier gezeichnet werden.

Mit dem Begriff der Dimension werden in der Wissenschaft und auch in der Öffentlichkeit sehr disparate Vorstellungen verbunden. Es ist für das Verständnis wichtig, zu unterscheiden, wann der Begriff Dimension im physikalischen Sinne gemeint ist, wann damit eine mathematische Abstraktion bezeichnet wird oder ob er umgangssprachlich auf etwas „Anderes“ oder „Neuartiges“ hinweisen soll.

## Dimension

In der Geometrie und der Mathematik allgemein gibt die Dimension an, wie viele Vektoren in einem Punkt aufeinander senkrecht stehen können. Auf dem Zeichenblatt sind es zwei, im dreidimensionalen Raum wird ein solches Tupel (hier besser Tripel) aus den Koordinaten  $(x, y, z)$  geformt.

Mathematisch wird es möglich, diese Tupel für beliebige Dimensionen zu formen. So wäre  $(x, y, z, u, v, w)$  ein Vektor in einem sechsdimensionalen Raum.

*Solche abstrakten Räume erleichtern mathematische Vorstellungen, sie haben zumeist nichts mehr mit dem dreidimensionalen Raum zu tun, in dem wir leben und in dem sich alles Existierende befindet.*

Vektoren erscheinen in sehr verschiedenen Zusammenhängen, sowohl für das Zeichenblatt, auf dem wir geometrische Figuren entwerfen, wie auch für den Raum, in dem beispielsweise die Flugsicherung die Flugzeuge verfolgt. Aber in sehr vielen abstrakten Strukturen der klassischen Physik, wie beispielsweise dem „Konfigurationsraum“, in dem alle Ortskoordinaten von Teilchen eines Systems aufgeführt werden, wird die Struktur von „Vektoren“ verwendet.

### Phasenraum

Beim Phasenraum werden zusätzlich auch die Impulskoordinaten miteingefasst.

### Hilbert-Raum

Der nach David Hilbert (1862 – 1943) benannte Hilbert-Raum ist die Bezeichnung für den Raum der Zustände in der Quantentheorie. Ein Quantenbit wird durch zwei Angaben festgelegt, man spricht bei seinem Zustandsraum von einem „zweidimensionalen Hilbert-Raum“.

Die Quantenmechanik ist so genau, dass der Zustandsraum für ein Teilchen unendlich viele Angaben benötigt, damit es wirklich genau festgelegt ist. Für ein Teilchen bilden daher die Zustandsvektoren mathematische Elemente im unendlichdimensionalen Hilbert-Raum.

### Sonstiger Sprachgebrauch von Dimension

Im sonstigen Sprachgebrauch findet sich der Dimensionsbegriff in vielfältiger Verwendung. Der Sinn dabei besteht darin, dass Eigenschaften zusammengefasst und verglichen werden, die voneinander unabhängig sind (oder gedacht werden).

Bei einer „Dimensionsanalyse“ wird beispielsweise geprüft, mit welcher Potenz in einer physikalischen Größe, z. B. der Wirkung, Grundgrößen wie Zeit  $t$ , Länge  $l$  oder Masse  $m$  vorkommen.

Wenn wir diese (verallgemeinerten) „Dimensionen“ beschreiben, so gilt: Kraft  $F$  ist Masse mal Beschleunigung, Energie  $U$  ist Kraft mal Weg. Wirkung  $S$  wird eingeführt als Energie mal Zeit oder auch Weg  $l$  mal Impuls  $p$ . Der Impuls ist Masse mal Geschwindigkeit  $v$ . Die gleiche Dimension wie die Wirkung hat auch der Drehimpuls  $L$ .

(Bei der Dimensionsanalyse wird aber nicht deutlich, dass die Wirkung ein Skalar und der Drehimpuls ein Vektorprodukt aus zwei Vektoren ist.)

$$F = m \frac{l}{t^2} \quad U = F l = m \frac{l^2}{t^2} \quad S = U t = m \frac{l^2}{t^2} t = l m \frac{l}{t} = L$$

In diesem Zusammenhang dürfte jedem klar sein, dass mit der „Dimension der Masse“ keine weitere geometrisch zu verstehende Größe, keine weitere „Länge in eine neue Richtung“ gemeint ist.

Das hilft vielleicht, die Einführung „zusätzlicher Dimensionen“, wie sie beispielsweise bei der Theorie von Theodor Kaluza (1885 – 1954) und Oskar Klein (1894 – 1977) für eine Verbindung von Allgemeiner Relativitätstheorie mit Maxwells Theorie der Elektrodynamik vorgenommen wurde, sowie deren moderne Weiterentwicklung zur String-Theorie etwas nüchterner zu sehen. So wird man auch bei der Beschreibung der Bewegung zweier Satelliten um die Erde mit ihren dafür notwendigen sechs Ortskoordinaten nicht davon sprechen, das System würde sich in einem „sechsdimensionalen Raum“ befinden.

Leider werden oft die Unterschiede zwischen dem Bezug zur physikalischen Realität und zu einer abstrakten mathematischen Konstruktion einerseits und andererseits zu einer außerwissenschaftlichen Verwendung verwischt. Die in Science-Fiction-Filmen sehr beliebte Verwendung von Zusatzdimensionen des „Hyperraums“, aus welchen dann vielleicht sogar ein Raumschiff mit Aliens auftaucht, kann – wie ich weiß – recht spannend sein, hat jedoch mit ernsthafter Wissenschaft nichts zu tun.

## ■ 1.2 Ein Blick auf die Grundlagen der Naturwissenschaft

Über ein halbes Jahrhundert nach Einstein und Weizsäckers Hypothese hat die Physik gewaltige Fortschritte gemacht.

Heute kann man oft lesen oder hören, dass es zwei Bereiche der Natur gibt. Für das Große und das Kosmische ist die *Allgemeine Relativitätstheorie* und für das mikroskopisch Kleine das *Standardmodell der Elementarteilchenphysik* zuständig. (Eine Skizze der gegenwärtigen Vorstellung über die Elementarteilchen findet sich in Abschnitt 30.1. Zum Higgs-Teilchen werden auch in Kapitel 25 einige Zusammenhänge erläutert.)

Seit langem wurde das Ziel ausgegeben, für diese zwei Theoriebereiche eine Verbindung oder besser noch eine Vereinigung zu schaffen. Auch deswegen finden sich immer mehr Stimmen, die nach einer „*neuen Physik*“ rufen.

Von fast allen diesen „Rufnern“ werden unter der „neuen Physik“ jedoch nur neue Exemplare von noch kleineren Teilchen oder Strings verstanden, jedenfalls unbekannte submikroskopisch kleine Objekte.

Dieses Vorhaben erweist sich jedoch immer mehr als eine Sackgasse.

Was ist zu bedenken?

Beim Eröffnen von neuen Perspektiven haben gelegentlich in der Tat die physikalischen Vorstellungen zu neuen mathematischen Strukturen geführt. Das war beispielweise bei Newton mit der Differential- und Integralrechnung der Fall oder bei Diracs Einführung der Delta-Funktion, die erst viele Jahre später zu dem Gebiet der Distributionen erweitert wurde. Sie gehören heute zu den theoretischen Grundlagen der Quantenfeldtheorie.

Aber sowohl bei der Speziellen als auch bei der Allgemeinen Relativitätstheorie waren Einsteins neue physikalische Vorstellungen das Entscheidende, die Mathematik dafür war schon lange vorhanden.

Auch bei einer tatsächlichen Grundlegung der Naturbeschreibung sind die neuen physikalischen Vorstellungen das Wesentliche.

Welche Änderungen an den bisherigen Vorstellungen sind nötig?

Wir müssen uns von dem Leitmotiv der klassischen Physik verabschieden, welche das Punktteilchen als universelle Grundlage ansieht. Es geht ums Ablösen von der Vorstellung, dass „das Einfache“ mit den kleinsten Ausdehnungen zu tun haben würde.

*Erklären bedeutet, Kompliziertes aus Einfacherem zu begründen. Das Einfachste ist einfach und nicht kompliziert. Die komplizierte Mathematik wird für das Komplizierte notwendig werden.*

Es zeigte sich bisher immer wieder, dass es keine erkennbaren Gültigkeitsgrenzen für die Quantentheorie gibt. Man muss sie heute nicht mehr ausschließlich als „Mikrophysik“ verstehen. Natürlich bleibt es wahr, dass im „sehr Kleinen“ ohne die große Genauigkeit der Quantentheorie keine zutreffende Beschreibung der Natur erfolgen kann. „Im Großen“ hingegen ist diese Genauigkeit oft nicht notwendig, so dass man dort zumeist mit der weniger genauen klassischen Physik auch erfolgreich arbeiten kann.

Über lange Zeit galt die Quantentheorie als unverständlich. Nachdem der Erfolg der klassischen Physik auf der gleichzeitigen Existenz von Ort und Impuls aufbaut, wurde die von der Quantentheorie aufgezeigte Komplementarität – also die Unvereinbarkeit von einer gleichzeitigen exakten Existenz sowohl vom Ort als auch vom Impuls – von vielen Physikern als etwas Unverständliches angesehen. Denn im theoretischen Rahmen der klassischen Physik wird wie gesagt diese gleichzeitige Existenz von einem scharfen Ort und einem scharfen Impuls zu dem Grundpostulat erhoben, auf dem die ganze mathematische Struktur dieser Theorie beruht.

Der Erfolg der Quantentheorie beruht darauf, dass ihr eine andere und vor allem bessere, weil genauere mathematische Beschreibung der Natur zugrundeliegt.

An den verschiedenen Vorurteilen, die aus der klassischen Physik erwachsen, muss man jedoch heute nicht mehr uneingeschränkt festhalten. Die Grundprinzipien der Quantentheorie lassen sich verständlich formulieren und sie sind unseren alltäglichen Erfahrungen näher als manche Vorstellungen der klassischen Physik.<sup>6</sup>

### 1.2.1 Alltag, Quanten und etwas Mathematik

Wie aufgezeigt erleben wir im Alltag immer wieder, dass ein Ganzes mehr ist als die Summe seiner möglichen Teile, und auch, dass unser Verhalten nicht nur von den Fakten, sondern auch von den noch nicht faktisch gewordenen Möglichkeiten, von den Potenzialitäten beeinflusst wird. *Der Begriff „Potenzialität“ soll das Wirksamwerden von Möglichkeiten verdeutlichen, die sich noch nicht als Fakten realisiert haben.*

Dabei darf das Gemeinte nicht als eine „Kraft“ missverstanden werden, die gleichsam aus der Zukunft in die Gegenwart wirkt. Auch wenn es philosophische Spekulationen über „Backward Causation“ gibt, so sollte doch in der Naturwissenschaft an den Vorstellungen



von Ursachen und Wirkungen festgehalten werden, die zwischen zwei faktischen Ereignissen gefunden werden können.

Allerdings können bei Lebewesen Informationen über künftige Möglichkeiten zu dem führen, was in der lateinischen Übersetzung von Aristoteles (384 – 322 v. Chr.) als die „*causa finalis*“ bezeichnet wurde. Lebewesen haben Ziele, und die Informationen über Realisierungsmöglichkeiten für diese Ziele wirken auf das gegenwärtige Handeln. Wenn „Potenzialität“ veranschaulicht werden soll, dann wohl am besten durch eine Information, die bereits in der Gegenwart über die Möglichkeiten der Zukunft vorliegen kann.

Quantentheorie ist zu verstehen als die mathematische Formulierung der Tatsache, dass diese beiden Prinzipien – „Ganzheiten sind mehr als die Summe ihrer Teile, sie sind anders und neu“ sowie „Möglichkeiten erzeugen reale Wirkungen“ – bereits im Verhalten der unbelebten Natur zu finden sind.

In der Quantentheorie werden komplexe und komplizierte Strukturen nicht in einer additiven, sondern in einer *multiplikativen* Weise aus einfachen Strukturen aufgebaut. Eine additive Kombination ist das Kennzeichen von klassischen Zusammensetzungen. In der Quantentheorie wird der Zustandsraum des Gesamtsystems hingegen durch das Tensorprodukt der Zustandsräume der Teilsysteme erzeugt.

Wie können Tensoren begriffen werden?

Tensoren können verstanden werden als Kombinationen von Vektoren, als „Tensorprodukte“. Sie wirken als *Abbildungen zwischen Vektoren*, indem sie einem Vektor einen anderen Vektor zuordnen.

### Tensoren

Ein Vektor gibt eine Richtung an. Beispielsweise kann man aus verschiedenen Richtungen auf einen Schwamm drücken. Die zu beobachtende Wirkung wiederum hängt von der einwirkenden Richtung ab, äußert sich aber in verschiedene Richtungen verschieden.

Die Kombination aus dem einwirkenden Vektor und dem resultierenden Vektor kann durch das Tensorprodukt der beiden Vektoren erfasst werden. Man erhält damit einen Tensor zweiter Stufe, der auch als Matrix notiert werden kann. In der Mechanik spricht man bei diesem Beispiel vom Spannungstensor, denn der Schwamm wird nicht nur zusammengedrückt, sondern auch verbogen und an manchen Stellen sogar gedehnt.

Mathematisch kann ein Tensor zweiter Stufe eine lineare Abbildung zwischen Vektoren vermitteln. Dabei ist es wichtig, dass der vermittelte Zusammenhang nicht von den jeweils verwendeten Koordinatensystemen abhängig ist. Bei einer Änderung des Koordinatensystems ändern sich die konkreten Formen der Vektoren und Tensoren so, dass ihre Beziehungen unverändert erhalten bleiben.

Tensoren zweiter Stufe treten vielfach in der Physik auf. Der metrische Tensor gibt die Struktur des Raumes an. Der Riemannsche Krümmungstensor ist ein Tensor vierter Stufe, der die Informationen über die Krümmung des Raumes vermittelt.

Für die Quantentheorie ist es zentral, dass der Zustandsraum von wechselwirkenden Systemen aus dem Tensorprodukt der Zustandsräume der Teilsysteme gebildet wird. Das bedeutet mit anderen Worten, es entsteht dabei Neues.

### Das „direkte Produkt“ und das Tensorprodukt der Zustandsräume

Wie oft in der Wissenschaft werden von einem ungünstig gewählten Begriff Vorstellungen erzeugt, die ein Verstehen erschweren. Der Begriff „Produkt“ wird verschieden verwendet: beim „direkten Produkt“ der Zustände eines Systems der klassischen Physik sowie beim „Tensorprodukt“ der Zustände eines Systems der Quantenphysik. Die Formulierung „direktes Produkt“ ist zwar mathematisch korrekt, sie verschleiert jedoch die physikalischen Zusammenhänge.

*Die einfachsten Entitäten der klassischen Physik sind Teilchen.* Der Zustandsraum eines Teilchens wird durch drei Orts- und drei Geschwindigkeitskoordinaten aufgespannt. Hat man mehrere Teilchen, so kann man lesen, dass der Zustandsraum des Gesamtsystems aufgespannt wird durch das „direkte Produkt“ der Ein-Teilchen-Zustandsräume.

Dabei kann leicht übersehen werden, dass für den Fall  $R^n$  (z. B. für einen  $n$ -dimensionalen Konfigurationsraum) diese Konstruktion *identisch ist mit der direkten Summe* dieser Räume. So besteht der Zustandsraum eines Systems von zwei Teilchen aus sechs Orts- und sechs Geschwindigkeitskoordinaten, der eines Systems von drei Teilchen aus neun Orts- und neun Geschwindigkeitskoordinaten. Hierbei werden die Dimensionen *addiert!*

*Der dafür schlecht gewählte Begriff „Produkt“ verdeutlicht diese Addition nicht.*

**Im Gegensatz dazu werden die Dimensionen der Zustandsräume von zusammengesetzten Quantensystemen nicht additiv, sondern tatsächlich multiplikativ kombiniert.**

*Die einfachsten Entitäten in der Quantenphysik sind Quantenbits.* Ein Quantenbit hat einen zweidimensionalen Zustandsraum, zwei haben einen vierdimensionalen und drei Quantenbits einen achtdimensionalen Zustandsraum. ( $2 \times 2 \times 2 = 8$ )

Beim Tensorprodukt werden die Dimensionen der Teilräume multiplikativ verbunden.

Da  $2 \times 2 = 2 + 2$ , kann der Unterschied zwischen Produkt und Summe mit diesem Beispiel nicht erläutert werden. Bereits mit 3 wird der Unterschied deutlich  $3 \times 3 > 3 + 3$ .

Das Tensorprodukt von zwei dreidimensionalen Vektoren  $(a_1, a_2, a_3)$  und  $(b_1, b_2, b_3)$  ist der neun-dimensionale Vektor

$$(a_1b_1, a_2b_1, a_3b_1, a_1b_2, a_2b_2, a_3b_2, a_1b_3, a_2b_3, a_3b_3).$$

Er wird zumeist als rechteckiges Schema (als Matrix bzw. als Tensor zweiter Stufe) geschrieben:

$$\begin{pmatrix} a_1b_1 & a_1b_2 & a_1b_3 \\ a_2b_1 & a_2b_2 & a_2b_3 \\ a_3b_1 & a_3b_2 & a_3b_3 \end{pmatrix}$$

Mit Hilfe von Tensorprodukten aus Quantenbits lassen sich die Quantenteilchen bilden.

Die 2 ist die kleinste natürliche Zahl, die hinreichend oft mit sich selbst multipliziert zu einem Ergebnis führt, das größer ist als jede vorgegebene Zahl. Beispielsweise ist es mathematisch trivial, dass für jede natürliche Zahl  $n$  gilt  $2^n > n$ . Die binäre Alternative, ein Quantenbit, ist die einfachste Struktur, die aus mathematischen Gründen möglich ist. Ihr Zustandsraum ist zweidimensional.

### Verschränkte oder kohärente Zustände

Mit dem Tensorprodukt haben wir den mathematischen Aufbau eines Quantensystems aus einfacheren Systemen beschrieben. Im Gegensatz zur Superposition ist hierbei eine multiplikative Zusammensetzung gemeint. Diese führt zu einem Zustandsraum mit einer Dimension, die sich aus dem Produkt der Dimensionen der Zustandsräume der Teilsysteme ergibt.

Bei der multiplikativen Zusammensetzung können die Zustände der Teile multiplikativ zusammengefügt werden. Der so erzeugte Zustand darf dann verstanden werden, dass er zusammengesetzt aus diesen Teilen besteht. Das jedoch ändert sich in der Regel sofort, denn Möglichkeiten verändern sich.

Im großen Zustandsraum sind fast alle Zustände *nicht* von dieser Art, dass die Teile noch getrennt sind. Vielmehr ist dann das Ganze mehr und anders als die Summe der Teile.

Ein Zustand des großen Systems kann daher in der Regel nicht mehr als das Produkt von Zuständen der Teile dargestellt werden. Ein solcher Zustand kann dann höchstens als *Superposition von verschiedenen Produktzuständen* begriffen werden. Dahinter steht die physikalische Erkenntnis, dass das Ganze wieder in Teile zerlegt werden kann, dass es aber keineswegs gewiss ist, dass dabei wieder die Ausgansteile erhalten werden.

Alle diese Zustände, welche keine reinen Produktzustände sind, bezeichnet man als „verschränkte“ oder auch „kohärente“ Zustände. Sie charakterisieren die entstandene Ganzheit.

Mit den verschränkten Zuständen wird es verstehbar, wie mit der Quantentheorie die mathematische Struktur gefunden wurde, die das Entstehen von „Systemen“ erklärt, bei denen oft davon gesprochen wird, dass „neue Eigenschaften emergieren“.

*Die Quantentheorie ist die „Physik des Neuen“.*

Die Quantentheorie hat sich als die beste und genaueste Beschreibung der Natur erwiesen. Ihre multiplikative Struktur ist das Fundament dafür, aus den einfachsten Strukturen alle komplexen Strukturen zu entwickeln, welche die Physik beschreiben kann.

**Aus dieser Sicht erscheint es geradezu zwangsläufig, dass das Fundament der Physik von Quantenbits gebildet wird, denn noch einfachere Strukturen gibt es nicht.**

Allerdings ist dabei zu beachten, dass es notwendig ist, noch abstrakter zu werden als v. Weizsäcker. Die fast automatische Gleichsetzung von Quantenbit mit „bedeutungsvoller Information“ galt es zu überwinden.

Weiterhin ist darauf zu verweisen, dass aus den recht anschaulichen Grundprinzipien eine mathematische Struktur abgeleitet wird, die mit manchen ihrer Schlussfolgerungen für die meisten Menschen wenig anschaulich ist.

Im Folgenden soll die Entwicklung nachvollziehbar werden, welche mathematischen Strukturen aus den so einfach klingenden Prämissen entwickelt wurden, und wie weit mit diesen bereits die etablierten Strukturen der Physik begründet werden konnten. Die philosophischen Überlegungen, die den Weg zu einer grundlegenden neuen Physik begleitet haben, runden den Text an vielen Stellen ab.

### 1.2.2 Wie gelangt der Mensch zu Naturgesetzen?

In früheren Zeiten hatte man die Vorstellung, dass allmächtige Wesen, eine oder mehrere Gottheiten, den geordneten Ablauf des Weltgeschehens bewirken würden. Allerdings ist es unter einer derartigen Prämisse nicht möglich, kausale Zusammenhänge zu begründen. Die üblichen Vorstellungen von „Allmacht“ lassen keinerlei Raum für eine Kausalität, denn für eine Allmacht gilt definitionsgemäß, dass sie an keine Kausalität oder an irgendwelche Ursachen gebunden sein sollte und dass sie jederzeit in beliebiger Weise in jedes Geschehen eingreifen könnte.

Daher setzte sich immer mehr die Überzeugung durch, dass für naturwissenschaftliche Überlegungen im engeren Sinne transzendente und metaphysische Argumente nicht einbezogen werden dürfen. Während ein „allmächtiges Wesen“ aus der Naturwissenschaft verbannt wurde, blieb jedoch für viele Naturwissenschaftler die gleichsam göttliche Ordnung der Naturgesetze weiterhin bestehen. Manchmal wird sogar der Eindruck erweckt, als würden die Naturgesetze bereits vor der Natur existieren und die Natur müsste sich – sobald sie existiert – nach diesen Gesetzen richten.

*Ich bin der Überzeugung, dass der Natur eine fundamentalere Rolle zugebilligt werden sollte als den Regeln und Gesetzen, die von uns Menschen aus dem Verhalten der Natur abstrahiert werden.*

Aus manchen derjenigen Aspekte der Naturgesetze, die von vielen Physikern als absolut fundamental angesehen werden, erwächst beispielsweise das Problem des sogenannten Zeitpfeils.<sup>7</sup> Der Grund dafür ist, dass die mathematische Struktur von einigen der als fundamental deklarierten Naturgesetze es erlaubt, von einem gewählten Zeitpunkt aus in gleicher Weise in die Zukunft wie in die Vergangenheit zu rechnen. Aus Sicht dieser mathematischen Struktur ergibt sich somit kein Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft. Alle unsere Alltagserfahrungen jedoch widersprechen einer solchen Aussage.

#### Wie also kommen wir zu den Naturgesetzen?

Hängen die Naturgesetze fertig am Baum der Erkenntnis? Muss man sie nur abpflücken?

Die Idee von Naturgesetzen ist eine enorme intellektuelle Leistung unserer Vorfahren. Schon sehr früh begannen die Menschen, die Regeln in den Abläufen der Himmelserscheinungen wahrzunehmen und zu studieren. Auf der Erde hingegen gibt es niemals zwei vollkommen gleiche Situationen. Selbst Zwillinge werden zu unterschiedlichen Zeiten geboren. Sie haben auch sonst manche unterschiedlichen Eigenschaften. So blieb eine Ordnung für lange Zeit dem Himmel vorbehalten.

Für einfache Prozesse jedoch ließen sich in späterer Zeit auch auf der Erde Gesetzmäßigkeiten erkennen und prüfen. Galileo Galilei (1564 – 1642) wird als der Vater der mathematisch

ausgewerteten Experimente angesehen. Je idealer eine Situation gestaltet werden konnte, desto klarer traten Regelmäßigkeiten zutage. Beispielsweise gilt der Satz, dass alle Körper gleich schnell fallen, nur in einem luftleeren Raum, z. B. in einem ausgepumpten Glasrohr. In normaler Luft wissen und berücksichtigen wir, dass Blätter und Flugzeuge sich in der Luft anders bewegen als beispielsweise Steine.

Naturgesetze werden also aus der Natur abstrahiert und müssen immer wieder an dieser geprüft werden, um sie gegebenenfalls in neuen Situationen zu korrigieren. Das wird vor allem notwendig, wenn neue Experimente genauere Ergebnisse liefern.

Eine gute Richtlinie dafür liefern Karl Poppers (1902 - 1994) Überlegungen, dass man wissenschaftliche Hypothesen falsifizieren können sollte. Allerdings ist dabei daran zu erinnern, dass Popper seine Falsifikationsthese nicht als Dogma verstanden haben wollte. Das passt auch gut zur physikalischen Praxis.

Zumindest in der Physik strebt man danach, Gesetze für alle möglichen Fälle aufzustellen. Was aber alle möglichen Fälle sind, das kann man von vornherein nicht wissen.

Erst wenn man Beispiele gefunden hat, wo eine als Naturgesetz gedachte Hypothese im Widerspruch zur Erfahrung kommt, wird es möglich, den Gültigkeitsbereich der Hypothese abzustecken. Popper schlägt in diesem Falle vor, dass man die Hypothese als falsifiziert begreifen müsse. Das ist in vielen Fällen eine zutreffende Empfehlung. Oft aber behält man die Hypothese bei, aber nur für den Gültigkeitsbereich, in dem sie sich bewährt hat.

Ein solches Verhalten ist auch deshalb sinnvoll, weil man die Wahrheit einer Falsifikation nicht beweisen kann.

Anders formuliert: eine Falsifikation kann nicht verifiziert werden. Denn dafür müsste absolut sicher sein, dass ein zweifelsfrei zuverlässiges Experiment, welches gemäß einer zweifelsfrei wahren Theorie durchgeführt wurde, ein wahres und die Hypothese falsifizierendes Ergebnis geliefert hat. Allerdings müsste eine solche wahre Theorie verifiziert sein, was ja gemäß Popper nicht möglich ist.

### **Experiment, Gedanken-Experiment, induktive Verallgemeinerung**

Der letzte Prüfstein für eine Theorie in der Naturwissenschaft ist die Natur selbst. Dazu sind *Beobachtungen* und *Experimente* notwendig.

Der Weg zum Finden regelhafter und gesetzmäßiger Zusammenhänge kann jedoch auch über „*Gedankenexperimente*“ führen. Hans Christian Oersted (1777 - 1851) arbeitete mit dieser Idee, die durch Ernst Mach (1838 - 1916) große Verbreitung fand.

Besonders von Albert Einstein sind wichtige Erkenntnisse zuerst durch Gedankenexperimente gewonnen worden. Beispiele waren die „Vorstellung einer Bewegung auf einem Lichtstrahl“, der „frei fallende Fahrstuhl“, der zur Allgemeinen Relativitätstheorie führte, oder das von ihm zusammen mit Boris Podolsky (1896 - 1966) und Nathan Rosen (1909 - 1995) vorgeschlagene „EPR-Experiment“ an einem ausgedehnten Quantensystem. Ein Gedankenexperiment ist auch „Schrödingers Katze“. Auf diese Experimente wird in späteren Kapiteln noch eingegangen.

Schließlich sind auch noch *Konsistenzüberlegungen* und *induktive Verallgemeinerungen* als besonders wichtige Gedankenexperimente anzusehen. Diese können verschiedene be-

währte Theorien in eine neue Verbindung bringen und sind mögliche Quellen für die Erweiterung der Naturwissenschaft. Zu diesem Bereich gehört auch die Theorie der Prototyposis. Sie bildet das Kernthema des Buches. (Siehe besonders Abschnitt 5.1 sowie 6.6)

Mit der Prototyposis wird deutlich, wie eng die kosmischen und irdischen Situationen auf einer grundlegenden Ebene verbunden sind. Aber natürlich können wir Menschen mit dem Kosmos keine Experimente anstellen. Jedoch unsere auf der Erde gefundenen Erkenntnisse können wir mit unseren Theorien mit dem Kosmos und mit den Erscheinungen in ihm verbinden.

### **Wozu suchen wir Naturgesetze?**

Alles Lebendige beruht auf einer gewissen Lernfähigkeit. Erfahrungen mit ähnlichen Situationen ermöglichen bessere Reaktionen auf Neues, so ergeben sich Regeln und sogar Gesetze. Regeln setzen Ähnliches und Gesetze setzen Gleiches voraus. Im expandierenden Kosmos und auch im Alltag wissen wir allerdings, dass es streng genommen niemals zwei gleiche Situationen gibt.

Es ist in der Geschichte der Naturwissenschaften eine sehr späte Erkenntnis, dass es erst bei den Elementarteilchen so wenige Eigenschaften gibt, dass zwei der gleichen Sorte nicht unterschieden werden können.

Man kann mit dieser Feststellung sogar den Begriff eines „elementaren Teilchens“ oder eines „elementaren Objektes“ definieren: Elementare Teilchen haben so wenige Eigenschaften, dass zwei der gleichen Sorte nicht voneinander unterschieden werden können.

Sonst jedoch ist es so, dass Ähnlichkeit und erst recht Gleichheit nach dem Prinzip gefunden werden: „Nachts sind alle Katzen grau.“ Gleiches entsteht also dadurch, dass in Situationen Unwesentliches ignoriert wird, was für deren Beschreibung nicht notwendig zu sein scheint. Man könnte sagen: Nebensächliche Unterschiede werden unter den Teppich gehöhrt.

Heute können wir also feststellen, dass Naturgesetze keine Götter sind und dass ihnen auch keine quasigöttliche Rolle zugeschrieben werden soll. Wir finden die Gesetze dadurch, dass in der Natur von unwesentlichen Unterschieden abstrahiert wird und nur die wesentlichen Informationen berücksichtigt werden.

Wenn man in der Beschreibung Einzelheiten ignoriert, dann können durch einen solchen Verzicht neue Zusammenhänge erkennbar werden. Einem Molekül kann man theoretisch eine Energie und einen Impuls zuordnen. Betrachtet man in einem Gas nur noch Mittelwerte davon, dann können durch das Ignorieren von Unterschieden zwischen den einzelnen Teilchen jeweils neue Gesetzmäßigkeiten erkennbar werden. Dies tritt sehr deutlich bei der Thermodynamik hervor. (siehe auch Abschnitt 3.4)

*Um das Ganze noch einmal in anderen Worten zu wiederholen: alle Naturwissenschaft ist immer Näherung, ist Annäherung an die Realität!*

Zugleich ist dazu festzustellen, dass wir Menschen uns mit unserem Beschreiben und Verstehen dem Geschehen in der Natur immer besser und genauer annähern.

Wie Werner Heisenberg festgestellt hatte, ist die neuzeitliche Naturwissenschaft zu verstehen als eine „Abfolge abgeschlossener Theorien“. Das ist ein gewisser Gegensatz zu der „wissenschaftlichen Revolution“, die Thomas Kuhn (1922 – 1996) für den Übergang von einer Physik des Aristoteles zu der Physik Galileis und Newtons zutreffend beschrieben hatte.

Seit dem Ende des 19. Jahrhunderts zeigen neue Theorien auf, wo die alten erfolgreich weiterhin verwendet werden können und wo diese nicht weiter angewendet werden sollen, weil sie dort zu inakzeptablen Prognosen führen.

*Naturwissenschaft „besitzt“ nicht die Wahrheit über das Verhalten der Natur, aber sie nähert sich dieser immer mehr und immer besser an.*

Umbrüche in der Sicht der Menschen auf die Natur können große Widerstände hervorrufen. So wurde der Übergang vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild oder Darwins Überlegungen zur Abstammung des Menschen in der jeweiligen Zeit von vielen Menschen wie eine persönliche Kränkung erlebt. Oder wie Sigmund Freud (1856 – 1939) es formulierte, der noch die unbewussten Anteile der Psyche hinzufügte, als eine „Kränkung der Menschheit“ insgesamt.

Hinter der von Freud ausgesprochenen und von ihm auch bei anderen Menschen wahrgenommenen Kränkung könnte auch ein Gefühl der Angst verborgen sein. Eine solche Angst könnte beispielsweise daher rühren, dass so vieles noch unbekannt ist und nicht kontrolliert werden kann. Man fühlt sich den kosmischen, biologischen und psychischen Einflüssen ausgeliefert und weiß zugleich, wie wenig man an diesen beeinflussen kann.

Möglicherweise ist es ebenfalls Ausdruck einer empfundenen Kränkung, dass bis heute manche Chemiker und Biologen darauf verweisen, dass in ihren Wissenschaften Naturgesetze gelten, die nicht zu denen der Physik gehören würden. Dieser Hinweis auf Gesetze jenseits der Physik trifft zu, wenn er etwas differenzierter formuliert wird.

Es gibt unbestreitbar eine Abfolge in der Gültigkeit von Naturgesetzen. Es gibt grundlegende Gesetze mit einem universellen Gültigkeitsbereich und andere, die in einem speziell ausgewählten Bereich sinnvoll angewendet werden können. In noch differenzierteren Bereichen der Naturwissenschaft gibt es kaum „Gleichheit“. Eine notwendige Voraussetzung für „Gesetze“ ist dann nicht gegeben. Vielmehr ist es dort wesentlich, auf die aus Ähnlichkeiten erwachsenden Regelmäßigkeiten zu verweisen.

Ich würde es jedoch als falsch empfinden, wenn aus den unterschiedlichen Geltungsbereichen und dem Ordnungsgefüge vom Einfachen und Allgemeinen zum Komplexen und Differenzierten so etwas wie eine „Wert- und Bedeutungsordnung“ der Naturwissenschaften gefolgert würde.

Für die Abstufung von Geltungsbereichen zuerst ein Beispiel aus dem gesellschaftlichen Alltag: Es gibt eine Verfassung, jedoch viele Gesetze. Allerdings darf kein Gesetz gegen die Verfassung verstoßen. Es gibt noch mehr Verordnungen, aber keine Verordnung sollte gegen ein Gesetz verstoßen.

## ■ 1.3 Die Beziehungen der physikalischen Strukturen

Die einfachsten und deswegen universellsten Naturgesetze behandelt die Physik. Da die Physik nur die einfachsten Zusammenhänge untersucht, können ihre Gesetze sogar mit der uns gegenwärtig bereits zur Verfügung stehenden Mathematik formuliert werden.

### 1.3.1 Theoriebereiche der Physik

Wir unterscheiden heute zwei Bereiche der Physik. Sie blicken in unterschiedlicher Weise auf die Natur und sollen kurz beschrieben werden.

Zur *klassischen Physik* gehören die Mechanik der Teilchen, wozu auch die Theorie des deterministischen Chaos gerechnet werden kann, sowie auch die Mechanik der Flüssigkeiten. Zwischen den Teilchen wirken die Kräfte der Gravitation. Diese wurde mit dem Newtonschen Gravitationsgesetz und später mit der Allgemeinen Relativitätstheorie erfasst. Die elektromagnetischen Kräfte werden durch Elektrodynamik und Spezielle Relativitätstheorie beschrieben.

Die *Quantenphysik* untergliedert sich in die Quantenmechanik, die Quantenelektrodynamik, die Quantenfeldtheorien der schwachen und der starken Wechselwirkung sowie als Grundlage von allem die Theorie einer absoluten und daher kosmischen Quanteninformation.

Die *Thermodynamik* wird in beiden Bereichen benötigt. Man kann sie kennzeichnen als eine Theorie, die dann wichtig wird, wenn man ein System beschreiben will, das aus vielen Subsystemen besteht, wie z.B. viele Moleküle in einem Gas, deren einzelnes Verhalten uninteressant ist, und bei dem es lediglich darauf ankommt, diese Unkenntnis mit einem Maß zu charakterisieren.

### 1.3.2 Der Geltungsbereich der Physik

Wir kennen keinen Bereich im Kosmos, von dem wir sinnvollerweise annehmen könnten, dass dort die Physik nicht gilt. Mit den von uns Menschen bereits gefundenen Naturgesetzen können wir sogar feststellen, welche Aussagen über den Zusammenhang mit dem kosmischen Geschehen möglich sind. Die kosmische Evolution lässt uns somit erkennen, dass alle komplexeren Strukturen sich aus den anfänglichen und einfachsten Strukturen gebildet haben.



Vor etwas mehr als einem Jahrhundert schien der Physik „nur noch“ ein Verständnis für manche Eigenschaften des Lichtes zu fehlen. Das war Max Plancks Einstieg in die Quantentheorie, in einen Bereich, der damals in keiner Weise zu überblicken war. Sehr bald wurde die Verbindung zu den Atomen offensichtlich und weitere Quantenphänomene wurden entdeckt.

Seit dieser Zeit wird die Quantentheorie noch sehr oft als der Bereich der „Mikrophysik“ klassifiziert. Richtig daran ist, dass sie dort unausweichlich ist. Zunehmend jedoch wird immer deutlicher, dass es um „Genauigkeit“ und nicht um „Kleinheit“ geht. Die Quantentheorie ist manchmal auch für Größeres als nur für die Atome notwendig.

Bevor wir weiter voranschreiten, scheint ein erster Blick auf die Quantenstrukturen hilfreich zu sein.

### 1.3.3 Ein Blick auf Quanten- und Relativitätstheorie

Vielfach findet man, wie betont, die Darstellung, dass die Quantentheorie die Theorie für das „Kleine“, die „Mikrophysik“ sei. Für den „Makrobereich“ bis hin zur Kosmologie wird die Relativitätstheorie als allein zuständig deklariert.

Wie im Buch klargestellt wird, aber auch in vielen anderen Darstellungen immer deutlicher hervortritt, ist die Quantentheorie keinesfalls auf das Mikroskopische allein eingeschränkt. Ihre Bedeutung reicht vom Kosmos bis zu den elementaren Teilchen. Und erst sie ermöglicht es, alle die komplexen Strukturen zu verstehen, die zwischen diesen beiden Extremen des räumlich Großen und des räumlich Kleinen angesiedelt sind.

Zum Sprachgebrauch bei der Quantentheorie gibt es eine interessante historische Parallele. Für lange Zeit bedeutete „Mechanik“ im Grunde genommen das gleiche wie das Wort „Physik“. Bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts gab es umfangreiche Bestrebungen in der Physik, die neuen Phänomene der Elektrizität in den Rahmen der damals bekannten Mechanik einzubetten.

Eine ähnliche Entwicklung war in der Physik nach der Entdeckung der Quantenmechanik zu erkennen. In vielen populären Darstellungen wird das Wort „Quantenmechanik“ als gleichbedeutend mit „Quantenphysik“ verwendet. Dabei geht aber für die Nichtfachleute verloren, dass es sich um verschiedene Theoriebereiche handelt, die sich wegen verschiedenen Methoden und verschiedener Voraussetzungen voneinander unterscheiden.

Der Einstieg in die Quantentheorie begann mit Max Plancks Entdeckung des Wirkungsquantums als einer fundamentalen Naturkonstante.

Man versuchte dann, diese neue Naturkonstante in die Mechanik einzubauen. Um die mit dem Wirkungsquantum vorgezeichnete Diskretheit der Wirkung, mit dem „Sprunghaften“, und vor allen auch des Drehimpulses zu erreichen, mussten mechanische Gesetze teilweise außer Kraft gesetzt werden.

- **Wirkungen** sind quantisiert, sie treten nur in „Anzahlen“ oder „Stufen“ auf.
- **Veränderungen sind genau genommen „Quantensprünge“**



Ein Begriff kehrt sich in sein Gegenteil um, denn **der Quantensprung ist die kleinste Veränderung, die nicht null ist!**

**Bild 1.2** Bei einer sehr genauen Untersuchung der Vorgänge in der Natur zeigt sich, dass faktische Veränderungen „stufenförmig“ sind. Kontrastierend dazu findet sich oft der Gebrauch dieses Wortes, mit dem dann eine besonders großartige Veränderung gekennzeichnet werden soll.

Mit Werner Heisenbergs Vorschlag der Matrizenmechanik und schließlich mit der Schrödinger-Gleichung war die mathematische Struktur der Quantenmechanik aufgedeckt worden. Aus dieser entwickelte sich später auch eine Quantentheorie der Kraftfelder und schließlich die Quantentheorie der Information.

## Quantenmechanik

Die Quantenmechanik ist eine Theorie über eine jeweils feste Anzahl von Quantenteilchen, die durch ein klassisches Kraftfeld miteinander in Wechselwirkung treten.

Im Unterschied zur klassischen Mechanik zeigt die genauere Beschreibung der Teilchen in der Quantenmechanik, dass deren Verhalten in manchen experimentellen Situationen besser dadurch beschrieben wird, dass man sie wie Wellenerscheinungen behandelt. Das ist der oft erwähnte Welle-Teilchen-Dualismus der Quantenmechanik.

Während in der klassischen Mechanik das „Punktteilchen“ die einfachste mögliche physikalische Struktur darstellt, zeigt sich in der Quantenmechanik, dass man zur genauen Festlegung des Zustandes eines Quantenteilchens unendlich viele Angaben benötigt.

Bereits das verdeutlicht, dass ein Teilchen in der Quantenmechanik keineswegs die einfachste mathematische Struktur repräsentiert. Die einfachste Quantenstruktur hat im Unterschied zum Teilchen einen nur zweidimensionalen Zustandsraum. Diese Struktur wird daher oft als „Quantenbit“ bezeichnet. Der exakte Zustand eines Quantenbits wird also durch lediglich zwei Zahlen festgelegt.

## Quantenbit

Das *Quantenbit* ist die mathematisch einfachste aller möglichen Quantenstrukturen. Ein Bit von Information *allein*, also ohne einen speziellen Kontext, ist so einfach, dass es keinerlei Lokalisierung erlaubt. Es ist kosmisch ausgedehnt.

### Quantenteilchen mit Masse

Seit Jahrtausenden wurden „Atome“, kleinste Teilchen, für das „Einfachste“ gehalten, da sie gemäß Definition nicht weiter zerlegbar sind. Die Mathematik der Quantentheorie zeigt jedoch, dass Teilchen keineswegs etwas „Einfaches“ sind.

Lokalisieren im Ortsraum kann man „Teilchen“ mit Masse. Die exakte mathematische Beschreibung eines Quantenteilchens als Modell eines in Raum und Zeit frei bewegbaren Objektes erfordert *unendlich viele Quantenbits*.

### Quantenteilchen ohne Masse – Photonen

Masselose Quantenteilchen, Photonen, kann man „im Impulsraum lokalisieren“, d. h. ihnen einen definierten Impuls geben. Da sie immer mit Lichtgeschwindigkeit fliegen, können sie im Ortsraum nicht lokalisiert werden.

Bei den Photonen besteht eine Verstehensschwierigkeit in der Tatsache, dass Photonen „nur Energie“ sind. Energie kann man als „Bewegung“ interpretieren. Im Alltag kennen wir nur „Bewegung von etwas“. Die Photonen sind hingegen nicht Bewegung von einem Objekt, sondern „reine Bewegung“ oder „Bewegung an sich“.

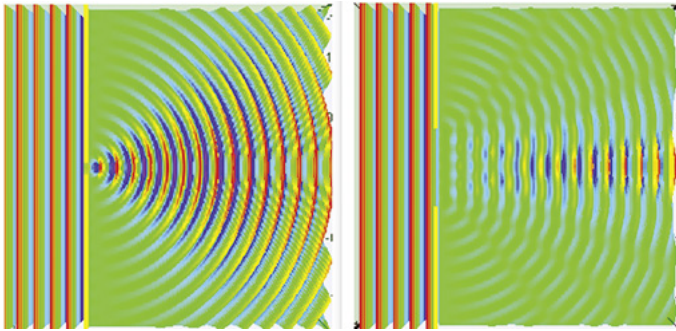
Bei den Photonen wird besonders deutlich, welche Anforderungen an unsere Vorstellungskraft die quantentheoretische Beschreibung der Realität erforderlich macht.

Wir denken üblicherweise über die uns umgebende Natur in einer *faktischen Weise*. Die Quantentheorie konfrontiert uns mit der Notwendigkeit, uns auch *Bilder über Möglichkeiten* vorstellen zu sollen. Aber ein Bild ist bereits ein Faktum, Bilder von Möglichkeiten können also nur dann gelingen, wenn der Möglichkeitscharakter des Gedachten gleichzeitig immer wieder betont wird.

Als Einstein seine Lichtquantenhypothese aufstellte hat er sich darauf bezogen, dass beim Photoeffekt (dem „Hallwachs-Effekt“) ein einzelnes Photon ein einzelnes Elektron aus dem Metallverband herausschlägt. Ein solcher Vorgang ist für uns nur mit dem Bild des Photons als kleines Teilchen vorstellbar. Zugleich aber soll man sich ein Photon als eine sich ausbreitende Kugelwelle vorstellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit vom Emissionspunkt aus gleichförmig in den Raum ausbreitet.

Wenn wir diese beiden Bilder als Fakten denken, dann sind sie vollkommen unvereinbar. Allerdings gehört es zum Wesen der Möglichkeiten, dass diese beiden Möglichkeiten zugleich relevant sein können. Das Photon hat also die Möglichkeit, sich im Raum auszubreiten und dann an einem der möglichen Punkte eine ganz lokale Wirkung hervorrufen zu können.

Wenn viele Photonen von der gleichen Stelle zugleich emittiert werden und durch Blenden eine Richtung vorgegeben wird, dann kann das Bild eines Lichtstrahls zutreffender sein. Man kann sich dabei vorstellen, dass die Wahrscheinlichkeitswellen miteinander interferieren und so eine Ausbreitung in Form einer Kugelwelle dann die Situation weniger zutreffend beschreibt als das Bild eines Strahls.



**Bild 1.3** Das Verhalten<sup>8</sup> von Wellen an einem engen und einem breiten Spalt: Wenn der Spalt die Größenordnung der Wellenlänge besitzt, dann breitet sich dahinter die Welle als Teil einer Kugelwelle aus. Wird der Spalt wesentlich breiter, dann entsteht immer mehr das Bild eines Strahls. Da auch dieser Strahl wieder auffächern kann, können weitere Blenden notwendig werden.

Wir können daran erkennen, dass und wie äußere Bedingungen das Verhalten von Quantensystemen verändern. Dazu gehört ebenfalls, dass viele gleiche Quanten ein Verhalten zeigen, welches oftmals hinreichend gut mit klassischen Vorstellungen beschrieben werden kann, z. B. Lichtstrahl statt Kugelwelle.

Falls eine Wechselwirkung eines Photons mit einem Elektron stattfindet, dann ist das ein Faktum. Von der zuvor existierenden Möglichkeit der Kugelwelle um das Zentrum des ursprünglichen Emissions-Ortes ist danach nichts mehr vorhanden.

Am Licht wird somit etwas deutlich, was die Struktur der Physik insgesamt betrifft und was in Abschnitt 6.7 noch einmal genauer reflektiert werden wird, die „Dynamische Schichtenstruktur“ von klassischer und quantischer Physik.

In der Schule lernen wir die „Strahlenoptik“ kennen. Das Verhalten einer sehr großen Zahl von Photonen, deren Quelle sehr weit weg ist, wie z. B. die Sonne, oder die durch Blenden zu einem Strahl geformt wurden, werden als „Lichtstrahlen“ beschrieben. Damit kann die Reflexion am Spiegel oder der Weg durch eine Glaslinse bereits gut erfasst werden. Für Hochleistungsobjektive, wie sie besonders für die Herstellung von Masken in der Mikrochip-Produktion benötigt werden, muss man die „Wellenoptik“ berücksichtigen.<sup>9</sup> Dass das Verhalten komplexer wird, wenn der Wellencharakter berücksichtigt wird, das wird an Bild 1.3 (Verhalten von Wellen an engen und breiten Spalten) erkennbar.

Da es auch elektromagnetische Aktivität im Gehirn gibt, die als EEG aufgezeichnet werden kann, soll nur darauf verwiesen werden, dass die EEG-Muster auf dem Papier oder dem Bildschirm zwar die Frequenzen der Photonen und damit die Schwingungsaktivitäten der aus ihnen gebildeten elektromagnetischen Wellen aufzeigen, also die zeitlichen Veränderungen elektromagnetischer Aktivitäten in einem kleineren Hirnbereich, jedoch nicht die zugehörigen Wellenlängen deutlich werden lassen. Diese betragen bei einer 1-HZ-Schwingung immerhin 300 000 km und bei 10 Hz immerhin noch 30 000 km.

Für eine genaue Erfassung der elektromagnetischen Wechselwirkungen muss man zur Quantenfeldtheorie übergehen.

## Quantenfeldtheorie

Bevor Einstein die Lichtquanten vorgeschlagen hatte, sprach man nur vom elektromagnetischen „Kraftfeld“. Mit der quantentheoretischen Behandlung der Lichtquanten, der Photonen, wurde erkennbar, dass jedes Kraftfeld verstanden werden kann (und oft auch muss) als eine unbegrenzte Anzahl von Quantenteilchen, den Feldquanten. Und in entsprechender Weise kann man auch eine Ansammlung von materiellen Quantenteilchen, die als Materie und nicht als Kraft erscheinen, verstehen als den speziellen Zustand eines Quantenfeldes.

Vor allem für die quantischen Strukturen in Materie, zuerst in kristallinen Körpern, aber zunehmend auch in weniger geordneten Stoffen wie Flüssigkeiten oder amorphen Strukturen wie Gläsern, kann man die dort herrschenden Kräfte immer besser mit quantenfeldtheoretischen Methoden untersuchen und verstehen. Manche der Quantenteilchen, die man durch mathematische Symmetrie-Überlegungen in der Hochenergie postuliert aber bisher nicht gefunden hatte, lassen sich als virtuelle Teilchen finden, als „Anregungen“ der komplizierten Grundzustände von Festkörpern.

Solche „Quasipartikel“, also Strukturen, die wie Teilchen wirken, die aber Kombinationen von anderen realen oder virtuellen Teilchen sein können, lassen zunehmend Phänomene erklärbar werden, die man sich auch mit viel Fantasie schwerlich hätte ausdenken können. (siehe z.B. die Polaritonen) Für solche Probleme scheinen die Methoden der Quantenfeldtheorie vielfach unersetzbar zu sein.

### Quantenfeld

Die verschiedenen Kraftfelder wirken ausgedehnt im Raum und können sich mit ihrer Reichweite unterscheiden. Für jeden mathematischen Punkt in ihrer Umgebung – so die mathematische Hypothese – soll die Kraft definiert sein. Auch ein Quantenfeld verwendet die Idealisierung der Punkte eines raumzeitlichen Kontinuums. Als mögliche Beschreibung des Zustandes eines Quantenfeldes kann die Anzahl der „Feldquanten“ dienen.

*Ein Quantenfeld entspricht damit einer Menge von unbegrenzt vielen Quantenteilchen.*

*Die Quantenfeldtheorie relativiert den Unterschied zwischen Kraft und Stoff.*

Daher übernimmt die Quantenfeldtheorie den Feldbegriff auch für die Materie. (Neben dem Photonenfeld gibt es beispielsweise auch ein Elektronen- oder Protonenfeld.)

Die Quantenfeldtheorien sind dadurch ausgezeichnet, dass in ihrem jeweiligen Beschreibungsrahmen der Realität das Entstehen und Vernichten von Quantenteilchen beschrieben werden kann.

In der Quantenfeldtheorie wird also berücksichtigt, dass man in ihrem Rahmen keine festen Teilchenanzahlen postulieren muss, während im Gegensatz dazu diese Anzahlen von Teilchen in der Quantenmechanik festliegen.

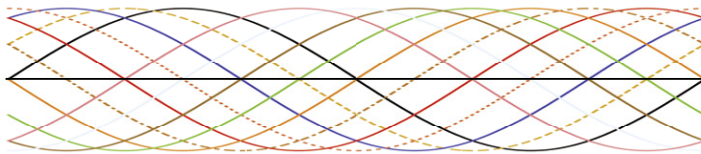
Bei dem Begriff Quantenfeld hat man wahrscheinlich zuerst das innere Bild vor Augen, dass eine über den ganzen Raum weit ausgedehnte Struktur in jedem Punkt des Raumes eine bestimmte Kraftwirkung hervorruft. (Der Bereich kann auch auf einen „Kasten“ eingeschränkt werden, z.B. wenn Mikrowellen in einem Resonator beschrieben werden.)

Die Beschreibung und Darstellung im Raum ist bei den Quantenfeldern, den Quantenteilchen und den AQIs sehr verschieden.

Ein Quantenfeld kann man sich veranschaulichen als ein *im Raum ausgedehntes Gebilde*, welches in jedem Raumpunkt einen Wert haben kann, der je nach der erhaltenen Lösung der Feldgleichung in jedem Raumpunkt unterschiedlich sein kann und für jede Lösung sich auch unterschiedlich zwischen den Raumpunkten verändern kann.

Bei einem Quantenteilchen hat man zumeist die Vorstellung eines an einem Raumpunkt konzentrierten Gebildes. Besser ist die Vorstellung, dass die Menge der möglichen Orte, an denen das Teilchen gefunden werden kann, um einen Raumpunkt herum konzentriert ist. So wird das Elektron im Grundzustand des Wasserstoffatoms mit hoher Wahrscheinlichkeit am Atomkern und mit geringer Wahrscheinlichkeit weit weg davon gefunden werden.

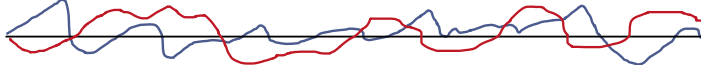
Die AQIs sind abzählbar und können daher als „Grundlage einer algebraischen Struktur“ dienen, die Einstein postuliert hatte. Ein AQI wurde als kosmisch ausgedehntes Gebilde eingeführt. Allerdings ist im Gegensatz zum Quantenfeld beim AQI einzig und allein als Veränderung des Zustandes der Ort des Maximums der Schwingung variabel. Wenn dieser Ort fixiert ist, dann ist zugleich die gesamte über den Kosmos ausgedehnte Struktur vollkommen festgelegt.



AQIs sind (so wie der Sinus) festgelegt, nur für die Stelle ihres Schwingungs-Maximums gibt es verschiedene Punkte



Quantenteilchen können gezählt und an jedem Punkt gefunden werden



Quantenfelder können sehr unterschiedlich an jedem Punkt einen anderen Wert haben

**Bild 1.4** Ein Quantenfeld ist eine Struktur, die im Raum ausgedehnt ist und die an jedem Punkt des Raumes einen beliebigen Wert annehmen kann. Ein Quantenteilchen nimmt einen gewissen kleinen Raumbereich ein, der sich überall befinden kann. Ein AQI ist ausgedehnt über den gesamten kosmischen Raum. Als „Grundschwingung“ kann jedoch lediglich der Ort seines Maximums variieren, nichts anderes kann dann noch am AQI verändert werden.

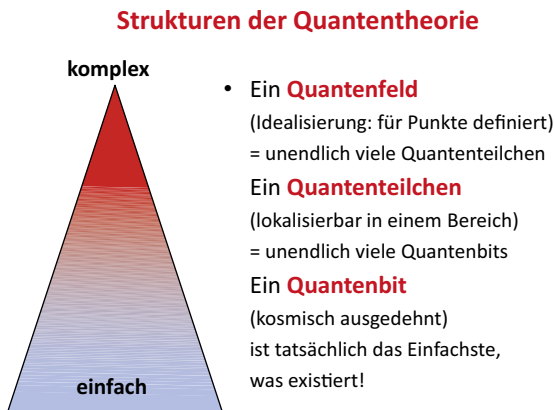
Sehr oft ist es aber wichtig, noch ein anderes Bild für ein Quantenfeld zu verwenden.

Das Quantenfeld wird charakterisiert durch seine Zustände. Der Grundzustand, das Vakuum, ist dadurch gekennzeichnet, dass damit behauptet wird: „An keinem der unendlich vielen Punkte im Raum ist ein Feldquantenteilchen vorhanden“. Aus diesem Vakuum-Zustand kann man dann die Quantenteilchen erzeugen.

Der erste angeregte Zustand postuliert, dass an einem der unendlich vielen Punkte im Raum ein Feldquantenteilchen vorhanden ist. Ein Quantenfeld gilt übrigens erst dann als nachgewiesen, wenn man hinreichend viele Experiment-Ergebnisse für mindestens jeweils ein Teilchen aufzeigen konnte. Der nächste Zustand des Feldes über dem Vakuum würde zwei Teilchen enthalten, dann 3, 4, 5 und so weiter.

Diese Darstellung von Quantenfeldern ist aus meiner Sicht sowohl die einfachste als auch die anschaulichste. Sie wurde entwickelt von Vladimir Fock (1889 – 1974) und heißt deshalb die Fock-Darstellung.

Die nachfolgende Zeichnung soll noch einmal einen Überblick geben.



**Bild 1.5**

Die Strukturen der Quantentheorie

(Es sei nur angemerkt, dass es im Rahmen der mathematischen Physik bekannt ist, dass es unendlich viele verschiedene mögliche Darstellungen für Quantenfelder gibt. Diese sind vor allem dadurch ausgezeichnet, dass man bei ihnen auch Mischungen mit klassischen Anteilen betrachten kann, also zum Beispiel verursacht durch Temperaturen, die von 0 K verschieden sind. Für die Überlegungen, die wir hier anstellen, tragen diese wichtigen mathematischen Feinheiten allerdings wenig zu einem prinzipiellen Verständnis bei.)

### 1.3.4 Quantentheorie und das Verhältnis von Fakten und Möglichkeiten

Es ist wohl jedermann geläufig, dass Faktisches kopiert werden kann. Man kann Texte abschreiben oder kopieren. Man konnte früher von Photographien „mehrere Abzüge“ und heute „mehrere Ausdrücke“ bestellen. Auch ein auswendig gelerntes Gedicht lässt sich wiederholt aufsagen.

Dass alles betrifft Faktisches. Fast unmöglich jedoch oder zumindest recht schwierig scheint es zu sein, spontane Rede wortwörtlich zu wiederholen. Auch ein Gefühl lässt sich zwar schildern, jedoch wohl schwerlich identisch nacherleben.

Die Quantentheorie liefert für diese Erfahrungen eine mathematische Begründung. Das „no-cloning-theorem“ zeigt auf, dass es prinzipiell unmöglich ist, einen unbekanntem bzw. nicht selbst hergestellten Quantenzustand zu duplizieren.

Der Beweis stützt sich auf den Widerspruch zwischen der Linearität der Operatoren in Quantentheorie und der Tensorproduktstruktur von zusammengesetzten Systemen.

Wenn man annimmt, es würde einen linearen Operator  $U$  geben, der einen unbekanntem Quantenzustand kopieren kann. Dann würde er einen Ausgangszustand  $|\alpha\rangle \otimes |\xi\rangle$  in  $|\alpha\rangle \otimes |\alpha\rangle$  umwandeln und natürlich auch  $|\beta\rangle \otimes |\xi\rangle$  in  $|\beta\rangle \otimes |\beta\rangle$

$$U|\alpha\rangle \otimes |\xi\rangle = |\alpha\rangle \otimes |\alpha\rangle$$

sowie

$$U|\beta\rangle \otimes |\xi\rangle = |\beta\rangle \otimes |\beta\rangle \quad (1.1)$$

Dann gilt aber wegen der Linearität von  $U$  weiterhin

$$U(|\alpha\rangle + |\beta\rangle) \otimes |\xi\rangle = U|\alpha\rangle \otimes |\xi\rangle + U|\beta\rangle \otimes |\xi\rangle = |\alpha\rangle \otimes |\alpha\rangle + |\beta\rangle \otimes |\beta\rangle$$

sowie andererseits

$$\begin{aligned} U(|\alpha\rangle + |\beta\rangle) \otimes |\xi\rangle &= (|\alpha\rangle + |\beta\rangle) \otimes (|\alpha\rangle + |\beta\rangle) \\ &= |\alpha\rangle \otimes |\alpha\rangle + |\beta\rangle \otimes |\beta\rangle + |\alpha\rangle \otimes |\beta\rangle + |\beta\rangle \otimes |\alpha\rangle \end{aligned} \quad (1.2)$$

### 1.3.5 Beziehungen zwischen Quantenfeldtheorie und Relativitätstheorie

Photonen besitzen keine Ruhmasse und können daher mit beliebig geringer Energie erzeugt werden. Wenn man aber auch das Entstehen und Vergehen im Bereich der Teilchen mit Ruhmasse experimentell untersuchen möchte, dann zeigt es sich, dass dazu so große Energien notwendig sind, welche nur mit Geschwindigkeiten im relativistischen Bereich erzielt werden können.

Beschränkt man sich auf die elektromagnetische Wechselwirkung, also auf masselose Photonen, dann ist man auch dabei sofort im Bereich der Lichtgeschwindigkeit und damit im Felde der speziellen Relativitätstheorie.

Im Bereich der elementaren Teilchen, gleichgültig ob mit oder ohne Ruhmasse, hat also die Quantenfeldtheorie mit ihrem Erzeugen und Vernichten von Quanten immer das Problem, mit der Speziellen Relativitätstheorie behandelt werden zu müssen. Dieser Sachverhalt verdeckt allerdings, dass das Wesentliche an der Quantenfeldtheorie nicht die Spezielle Relativitätstheorie ist.

*Die Bedeutung von Quantenfeldtheorien besteht vor allem darin, das Wirken von virtuellen Teilchen zu verdeutlichen, die als reelle Teilchen erscheinen und wieder verschwinden können.*

Die nichtrelativistische Quantenmechanik behandelt den Raum in der Weise, die sich aus der Planckschen Formel ergibt. Teilchen können nur auf „Raumbereiche“ lokalisiert werden. Die Unbestimmtheitsrelation würde zu einem scharfen „Punkt“ eine unendlich große Impuls-Unbestimmtheit erforderlich werden lassen.

Zu den klassischen Kraftfeldern in der Quantenmechanik passt auch, dass ebenfalls die Zeit wie eine klassische Größe behandelt wird. Es gibt in der Quantenmechanik einen Operator für den Ort. Dieser gibt die Wahrscheinlichkeit an, ein Teilchen in einem Volumen um



diesen Ort finden zu können. Es gibt jedoch in der Quantenmechanik keinen Operator für die Zeit.

Die Spezielle Relativitätstheorie erfordert eine gleichwertige Behandlung der Koordinaten von Raum und Zeit. Daraus hat sich ergeben, dass die in der Quantenmechanik vorhandene quantische Behandlung des Raumes durch die Verwendung von Orts-Operatoren abgeändert werden muss zu einer klassischen Behandlung der Zeit sowie des Raumes. Beides wird modelliert als ein physikalisches Kontinuum. Das hat unter anderem die Konsequenz, dass damit den mathematischen Punkten des Kontinuums eine physikalische Bedeutung zugeschrieben werden muss, die ihnen im Rahmen der Quantentheorie im Grunde genommen nicht gestattet werden kann.

### 1.3.6 Relativitätstheorien

Die **Spezielle Relativitätstheorie (SRT)** geht von dem empirischen Befund aus, dass in allen Bezugssystemen – unabhängig von deren Relativgeschwindigkeit – die Lichtgeschwindigkeit stets den gleichen Wert besitzt. Das hat für einen Beobachter in einem Inertialsystem (also in einem unbeschleunigten Bezugssystem) die Konsequenz, dass das Verhältnis zwischen zeitlichen Dauern und räumlichen Abständen in einem anderen Inertialsystem verändert erscheint. Wenn man in dem anderen System eine Uhr beobachtet, dann gilt der Merksatz: „Bewegte Uhren gehen langsamer“. In einem Bezugssystem, welches sich relativ zum Beobachter bewegt, vergeht die Zeit langsamer und die Abstände werden kürzer.

Die Spezielle Relativitätstheorie ist eine klassische Theorie. In ihr werden zeitartige und raumartige Abstände zwar im Vorzeichen unterschieden, aber als Strukturen im gleichen vierdimensionalen Raum verstanden. Für diesen wird die mathematische Struktur des Kontinuums postuliert. Dabei wird jedem mathematischen Punkt die Möglichkeit der physikalischen Realität zugesprochen. Das begründet einen Unterschied zur Quantenmechanik, in der die Zeit mit dem Modell des mathematischen Kontinuums beschrieben wird, während für räumliche Abstände das Modell des Punktes als Realität nicht verwendet werden kann. Die Punkte sind dort nur möglich, aber nicht faktisch.

Die **Allgemeine Relativitätstheorie (ART)** geht von dem empirischen Befund aus, dass lokal und ohne Bezug zum Kosmos zwischen der Wirkung von Schwerkraft und von einer Beschleunigung nicht unterschieden werden kann. Mit anderen Worten:

Die Gravitation ist äquivalent zu einer Veränderung der Raumzeitstruktur, also der Geometrie.

Da der Widerstand gegen eine Beschleunigung sich als „Trägheit“ äußert, die Wirkung eines Gravitationsfeldes hingegen als „Schwere“, wird mit der ART die Gleichheit von „schwerer und träger Masse“ begründet.

*Die Gravitation wirkt auf alle Inhalte des Kosmos.*

Die postulierte Realität der mathematischen Punkte bedeutet zugleich einen Widerspruch zu der Grundstruktur der Quantentheorie. In der Quantentheorie würde man für einen mathematischen Punkt eine unendlich große Energiedichte benötigen. Dieser Sachverhalt erklärt, weshalb man in der Quantenfeldtheorie immer wieder mit unphysikalischen Unendlichkeiten konfrontiert wird.

Die Quantentheorie lässt in Strenge für *faktische* Abstände kein Kontinuum als mathematisches Modell zu. Das Kontinuum wird lediglich für Möglichkeiten postuliert.

## ■ 1.4 Eine Einteilung der Quanten

Die *einfachsten Strukturen*, die wir in der Natur erkennen können, sind die auch mathematisch einfachsten Quantenstrukturen: *absolute kosmologisch begründete Quantenbits, AQIs*.

Wie im Buch nachfolgend gezeigt werden wird, formen sie sich zu dem, was uns als fundamentale Teilchen der Materie, als Energie und als bedeutungsvolle Information begegnet.

Mit der Protyposis wird die Struktur der zweiten Quantisierung nicht auf der Basis von Teilchen untersucht, sondern auf der Basis der Quantenbits. Es ist zu erwarten, dass von dort ausgehend die bei den Teilchen etwas unglücklich vorliegende „Verschraubung“ von Quantentheorie mit dem Kontinuum der Speziellen Relativitätstheorie gelöst werden kann. Schließlich ist diese Beziehung die Ursache dafür, bei quantenfeldtheoretischen Berechnungen immer wieder die etwas unlogische Gleichsetzung von unendlich mit null vornehmen zu müssen.

### Typen von Quanten:

- **Materielle Quanten** (haben eine Masse): Elektronen, Protonen, Atome, Moleküle, ...
- **Energetische Quanten** (haben keine Masse): Photonen
- **Strukturelle Quanten** (existieren nicht als freie Teilchen, sondern nur als virtuelle Objekte. Sie werden auch als Quasiteilchen bezeichnet.): Phononen, Exzitonen, Polaritonen usw. und ebenfalls auch die Quarks und Gluonen.
- **Quantenbits** als Basis von allem

Daraus ergibt sich folgende Einteilung:

- **Materie** besitzt eine Ruhmasse, sie ist träge. Sie kann Energie und Information aufnehmen und abgeben.
- **Energie** ist notwendig, um Materie zu bewegen. Sie kann Information aufnehmen und abgeben.
- **Information** kann bereitgestellte Energien auslösen und somit Lebewesen steuern. Sie wird dadurch für dieses jeweilige Lebewesen bedeutungsvoll.

Eine weitere Einteilung kann ebenfalls noch vorgenommen werden. Sie entspricht der alten philosophischen Unterscheidung zwischen Kraft und Stoff:

- Für **Stoff-Quanten** kann man vergrößert sagen: „wo eines ist, kann kein zweites sein“. Diese Teilchen besitzen einen „Spin  $\frac{1}{2}$ “ (Das bezeichnet ein spezielles Rotationsverhal-

ten, erst nach einer Rotation um  $4 \times \pi = 720^\circ$  ist der ursprüngliche Zustand des Quantenteilchens wieder erreicht.) Man nennt sie Fermionen, später mehr dazu.

- Für **Kraft-Quanten** kann man vergrößert sagen: „wo eines ist, wollen andere auch sein“. Diese Teilchen besitzen einen „Spin 0 oder 1“ (Das bezeichnet ein spezielles Rotationsverhalten, nach einer Rotation um  $2 \times \pi = 360^\circ$  ist der ursprüngliche Zustand des Quantenteilchens wieder erreicht.) Man nennt sie Bosonen, auch dazu später mehr.

Da  $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$  ist, wird verstehbar, dass die über Jahrhunderte als grundlegend angesehen Unterscheidung zwischen Kraft und Stoff von der Quantentheorie relativiert wird. Beide Teilchensorten lassen sich ineinander umwandeln.

*Die mathematisch einfachsten Quantenstrukturen, Absolute Bits von Quanteninformation (AQIs), die in ihrer Gesamtheit die Protypis sind, bilden die Grundlage von allem.*

Die Entwicklung der Quantentheorie hat – von Einsteins Hypothese und Weizsäckers Überlegungen ausgehend – zu einer Grundlegung auf der Basis der mathematisch einfachsten Quantenstrukturen geführt.

Die „Absolutheit“ der Quantenbits soll darauf verweisen, dass sie nicht in Bezug auf eine andere Entität zu verstehen sind. Sie stehen also auch nicht in Relation zueinander, sondern zum „Absoluten“, dem „Ganzen“, dem Kosmos.

Eine solche Absolutheit lässt die AQIs als identisch erscheinen. Ergibt sich daraus ein Konflikt mit der These von Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 – 1716) von der „Identität des Ununterscheidbaren“?

### **Identität des Ununterscheidbaren (Principium identitatis indiscernibilium)**

Wenn es zwei Sachen gibt, dann sollen sie nach Leibniz auch irgendwie unterscheidbar sein.

Eine Anekdote über Leibniz berichtet davon, dass seine These angezweifelt wurde. Er soll dann dazu aufgefordert haben, man möge ihn durch zwei identische Blätter aus dem Schlosspark von Hannover empirisch widerlegen. Natürlich war das damals (und ist auch heute) unmöglich.

Dazu kann man anmerken, dass durch die Quantentheorie dieses Prinzip in einer dialektischen Weise modifiziert wird. Bekanntlich kann man beispielsweise kein Elektron von einem anderen Elektron unterscheiden. Das gilt für alle identischen Elementarteilchen, Atome usw.

Bei den elementaren Quantenteilchen sind so wenige Eigenschaften vorhanden, dass sie ununterscheidbar werden.

Wie ist im Blick auf die Quantentheorie das Leibnizsche Prinzip zu modifizieren?

Wenn wir ein System mit vielen Elektronen haben, dann formen diese wegen ihrer Wechselwirkung eine einzige Entität. (Also z.B. nicht „zwei Elektronen“ sondern „ein Dielektron“. Dieses hat dann mehr und andere Eigenschaften als zwei einzelne Elektronen.) Das müsste man fortsetzen bis zum Kosmos als ungeteilte quantische Ganzheit. Dann jedoch wird die Aussage trivial, weil es dann nicht mehr zwei verschiedene Entitäten gibt.

Die theoretische Zerlegung eines Viel-Elektronen-Systems in viele einzelne identische Elektronen ist eine mathematische Näherung. Diese ist jedoch für die praktischen Rechnungen unverzichtbar. Nur in dieser Näherungsbeschreibung gibt es statt einem Dielektron zwei Elektronen.

Das Leibnizsche Prinzip ist damit in einer gewissen Weise dialektisch „aufgehoben“. Es ist aufgehoben, so wie man ein Gesetz „aufhebt“, so dass es nicht mehr gültig ist – und es ist zugleich aufgehoben, so wie man ein Buch aufhebt und nicht verbrennt. Einerseits sind also „zwei ununterscheidbare Elektronen“ nicht das Behauptete, weil sie wegen ihrer Wechselwirkungen ein neues Ganzes, ein Dielektron sind. Andererseits sind alle hinreichend komplexen Strukturen dadurch ausgezeichnet, dass es keine zwei identischen Exemplare von ihnen gibt.

## ■ 1.5 Fakten, Möglichkeiten, Quantisierung

### Die Wirksamkeit von Fakten und von Möglichkeiten

Unser alltägliches Handeln wird nicht nur von den Fakten beeinflusst, sondern auch von den Möglichkeiten, die wir erwarten, erhoffen oder befürchten.

Aus der Quantentheorie kann man lernen, dass bereits in der unbelebten Natur, sogar bei den Elementarteilchen gilt: Sie verhalten sich unterschiedlich, je nachdem, welche Möglichkeiten ihnen offenstehen oder verschlossen sind.

### Reale und virtuelle Quanten

Die wirksamen Möglichkeiten betreffen sogar die Existenz der Teilchen. „Virtuelle Teilchen“ existieren lediglich als Möglichkeiten. Sie können jedoch reale Wirkungen erzeugen. Ein Beispiel sind die virtuellen Photonen, welche die Coulomb-Kraft erzeugen. Solange allerdings dem betreffenden Zustand nicht genügend Energie zugeführt wird, können sie nicht als viele „reale Teilchen“ in Form elektromagnetischer Wellen in Erscheinung treten. Die Strukturquanten wie Quarks und Phononen existieren ausschließlich virtuell, sie können nie im Vakuum als frei bewegliche Teilchen erscheinen.

### Quantisierung

Den Übergang von einer klassischen, also faktischen Beschreibung zu einer quantischen Beschreibung bezeichnet man als „Quantisierung“. Dazu werden Erzeugungs- und Vernichtungs-Operatoren eingeführt. Diese erfassen den Übergang zwischen möglichen und realen Eigenschaften oder Strukturen.

Beispielsweise wird in der Quantenmechanik die Anzahl der Quantenteilchen als Faktum behandelt. Durch die Definition von Erzeugungs- und Vernichtungs-Operatoren für Teilchen gelangt man von der Quantenmechanik zu einer Quantenfeldtheorie.

Man definiert als ein „Teilchen-Vakuum“ einen Zustand, in dem kein Teilchen vorhanden ist. Durch die wiederholte Anwendung eines Erzeugungsoperators wird dann jeweils ein

neues Teilchen erzeugt. Den verschiedenen Sorten von Teilchen entsprechen verschiedene mathematische Strukturen der Operatoren.

Wenn man die Natur nicht sehr genau beschreiben und verstehen will, dann genügen oft die Konzepte der klassischen Physik mit der Coulombkraft anstelle virtueller Photonen und den elektromagnetischen Wellen anstelle realer Photonen.

### 1.5.1 Die fundamentalen Wechselwirkungen

Die AQIs begründen auch die fundamentalen Wechselwirkungen. Auch darauf soll bereits ein erster Blick geworfen werden: Was sind diese fundamentalen Wechselwirkungen?

Die *Gravitation* wirkt auf alles, was sich im Kosmos befindet.

Alle Materie, die wir kennen, lässt sich in Atome zerlegen. Die *starke Wechselwirkung* ermöglicht stabile Atomkerne, die *schwache Wechselwirkung* lässt nicht beliebige Formen von diesen Atomkernen zu, denn sie bewirkt bei manchen Atomkernen einen radioaktiven Zerfall.

Den Aufbau der Atome und die Wechselwirkung zwischen diesen zu Molekülen und zu Flüssigkeiten und festen Körpern wird durch die *elektromagnetische Wechselwirkung* erzeugt. Immer, wenn sie genau verstanden und beschrieben werden soll, dann zeigt sich, dass es sich um die Emission und Absorption virtueller und realer Photonen handelt.

### 1.5.2 Elektromagnetische Wechselwirkung und die Existenz der Objekte

#### Die Beschreibungen der elektromagnetischen Wechselwirkung in der Natur

Im Alltag sind außer der Gravitation sämtliche Erscheinungen, also auch alle chemischen und biologischen Vorgänge, Folgen der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Alle Atome besitzen einen positiv geladenen Kern und eine Hülle aus negativ geladenen Elektronen. Die Wirkungen der von den elektrischen Ladungen verursachten Kräfte werden im Rahmen der klassischen Physik durch die Maxwellschen Gleichungen erfasst.

Für die elektrische Ladung gilt das von Charles Augustin de Coulomb (1736 – 1806) entdeckte Kraftgesetz der Elektrostatik. Es wirkt zwischen verschiedenen Ladungen anziehend und zwischen gleichen abstoßend. Elektrische Ströme sind bewegte elektrische Ladungen. Sie erzeugen magnetische Kraftfelder. Beschleunigte Ladungen und veränderliche Ströme erzeugen elektromagnetische Wellen.

Wenn es wirklich genau werden und wenn es um ein grundsätzliches Verstehen gehen soll, dann wird es notwendig, die Quanteneigenschaften der Realität zu berücksichtigen. *Bei quantischer Genauigkeit erweist sich das Coulombfeld als Wirkung von vielen virtuellen Lichtquanten, von Photonen.* Man spricht von einem *virtuellen Photon*, weil es durch zusätzliche Energiezufuhr real werden kann. Durch seine „mögliche Existenz“ kann es gemäß Quantentheorie jedoch reale Wirkungen erzeugen. Dabei muss es nicht alle Bedingungen erfüllen, die an ein reales Photon zu stellen sind. In der Quantenfeldtheorie zeigt sich, dass virtuelle

Teilchen auch „off-mass-shell“ erscheinen können. Dann ist die relativistische Beziehung zwischen Energie und Impuls nicht mehr so wie bei einem realen Teilchen.

Eine elektromagnetische Welle muss als eine riesige Anzahl von realen Photonen verstanden werden. Auch wenn eine Auflösung der Welle in einzelne Photonen erst bei einer hinreichend großen Frequenz und daher bei kleinen Wellenlängen und großen Photonenenergien technisch möglich wird, sind manche Vorgänge allein mit den klassischen Vorstellungen von Wellen schwer zu erklären.

Sämtliche Objekte, die man als zusammengesetzt aus Atomen beschreiben kann, existieren also auf der Basis der elektromagnetischen Wechselwirkung, auf dem Austausch von virtuellen und realen Photonen.

## ■ 1.6 Zum Verhältnis von Physik, Chemie und Biologie

Die *Physik* ist primär auf das prinzipielle Verständnis der elementaren Strukturen und der Wechselwirkungen ausgerichtet. Allerdings sind die Abgrenzungen zwischen den Wissenschaften zum Teil historisch bedingt und daher mit einer gewissen Willkür behaftet.

Historisch lag der Schwerpunkt der Physik bei Mechanik und Optik. Man kann ohne Übertreibung sagen, dass erst mit Newtons Mechanik die moderne theoretische Physik begann. Seine Optik mit seiner physikalischen Erklärung der Farben führte später zu einer großen Abwehr bei Johann Wolfgang v. Goethe (1749 – 1832). (Dieser große Dichter war zu seiner Zeit ebenfalls als ein bedeutender Naturforscher bekannt. Mit seiner Entdeckung des Zwischenkieferknochens gab er einen Hinweis auf eine gemeinsame Abstammung von Tier und Mensch. Dass man aber die Natur des Lichtes sollte dadurch entdecken können, dass man einen dünnen Lichtstrahl in ein dunkles Zimmer fallen lässt, das war seiner künstlerischen Natur völlig zuwider.)

In meiner Ausbildung hatte ich gelernt, dass Isaak Newton (1642 – 1726) eine Theorie der Lichtteilchen vertreten habe – dies im Gegensatz zu seinem Zeitgenossen Christiaan Huygens (1629 – 1695), der eine Wellentheorie vertrat. Wie ich beim Austausch mit der amerikanischen Philosophin Irmgard Scherer erfahren habe<sup>10</sup>, überlegte sich Newton in seinen „Queries“ (die in meiner deutschen Ausgabe der Optik fehlen) in Query 13:

*Do not several sorts of Rays make Vibrations of several bignesses, which according to their bignesses excite Sensations of several Colours, much after the manner that the Vibrations of the Air, according to their several bignesses excite Sensations of several Sounds?*

*And particularly do not the most refrangible Rays excite the shortest Vibrations for making a Sensation of deep violet, the least refrangible the largest for making a Sensation of deep red, and the several intermediate sorts of Rays, Vibrations of several intermediate bignesses to make Sensations of the several intermediate Colours?<sup>11</sup>*

*(Machen nicht verschiedene Arten von Strahlen Vibrationen von verschiedenen Größenordnungen, die nach ihren Größenordnungen Empfindungen von verschiedenen Farben er-*

*regen, ähnlich der Art und Weise, wie die Schwingungen der Luft nach ihren verschiedenen Größenordnungen Empfindungen von verschiedenen Tönen erregen?*

*Und insbesondere erregen nicht die am leichtesten brechbaren Strahlen die kürzesten Schwingungen, um eine Empfindung von tiefem Violett zu erzeugen, und die am wenigsten brechbaren die größten, um eine Empfindung von tiefem Rot zu erzeugen, und die verschiedenen Zwischenarten von Strahlen, und erzeugen nicht Schwingungen von mehreren Zwischengrößen die Empfindungen der verschiedenen Zwischenfarben?)*

Dass Newton sowohl eine Teilchen- als auch eine Wellennatur beim Licht erwogen hatte, hat mich überrascht.

Später kamen zur theoretischen Physik die Elektrodynamik und Thermodynamik hinzu.

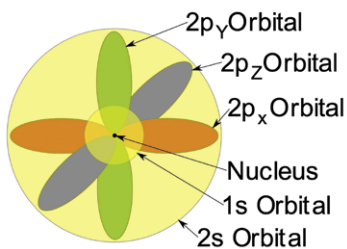
Wesentlich komplexere Strukturen als die Physik untersucht die *Chemie*. Die Stoffumwandlungen gelangten aus der Alchemie in die Chemie. Daher wird sie heute zumeist als die Wissenschaft der Moleküle und deren Verhalten verstanden.

Sinnvollerweise verwendet die Chemie als ihren Ausgangspunkt die Existenz stabiler Atome. Deren Elektronenhüllen reagieren gemäß der elektromagnetischen Wechselwirkung miteinander und können Moleküle bilden. Da diese Vorgänge nur mithilfe der Quantenmechanik erklärt werden können, kann die Theorie der modernen Chemie als Quantenmechanik bezeichnet werden. Da nicht nur die Moleküle, sondern auch die Strukturen und das Verhalten der festen Körper ohne Quantentheorie unerklärlich bleiben, wird die „Festkörperphysik“ wohl nur aus historischen Gründen nicht zur Chemie, sondern zur Physik gerechnet.

Moleküle und feste Körper werden durch elektromagnetische Kräfte zusammengehalten. Bei hohen Temperaturen werden diese Bindungen gelöst. Da es im Inneren von Sternen so heiß ist, dass dort alle Festkörper und Moleküle zerfallen, ist dort auch kein Anwendungsgebiet der Chemie und der Festkörperphysik.

Die Verbindung zwischen Quantenmechanik und Chemie ist im letzten Jahrhundert sehr eng geworden. Die Quantenmechanik ist die Theorie der Chemie, das wissen die Chemiker heute und nutzen es, wenn sie z. B. von Orbitalen sprechen.

Die Orbitale kennzeichnen die möglichen Orte der Elektronen in einem Atom oder Molekül. Zumeist werden sie dadurch veranschaulicht, dass man Hüllen zeichnet, in denen sich 90% dieser möglichen Orte befinden.



**Bild 1.6**

Die 1s, 2s und 2p Orbitale eines Natriumatoms. Besonders<sup>12</sup> überraschend ist es, wie eng möglichen Orte der Elektronen im Grundzustand (1s-Orbital) am Ort des Atomkerns und um diesen herum konzentriert sind.