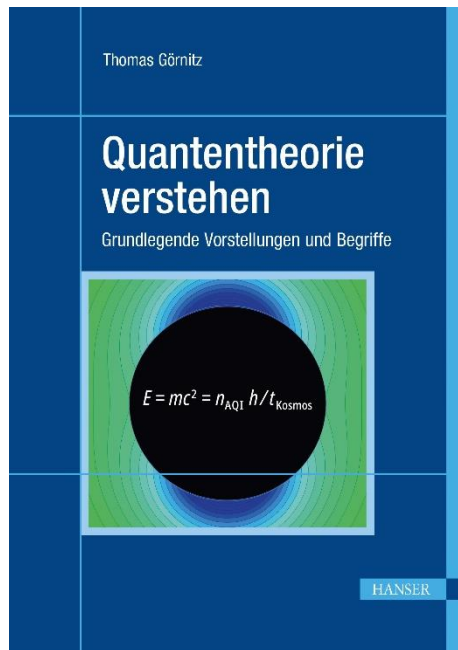


HANSER



Leseprobe

zu

Quantentheorie verstehen

von Thomas Görnitz

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

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

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446472259>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	XV
Vorrede	XVII
1 Reale und mögliche Strukturen als Triebkraft der Natur	1
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
2	Was meint man mit „Erklären“?	53
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
3	Quanten und Schwarze Löcher	69
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
4	Bits, Qubits und AQIs	93
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
5	Der Weg aus der Sackgasse der „kleinsten Teilchen“	115
5.1	Protyposis – der Ausweg aus der Sackgasse	117
5.2	Der historische Weg zur Protyposis	122
6	Grundprinzipien von klassischer und quantischer Physik	125
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
7	Ein Blick auf die „Zeit“	153
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

8	Grundlagen der Empirie	167
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
9	Das Zählen von Fakten und von Möglichkeiten	181
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
10	Der Messprozess aus Sicht der Protyposis	205
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
11	Die Protyposis und das Ganze	241
11.1	Ein wichtiger Unterschied zwischen Astronomie und Kosmologie ...	241
11.2	Das Ganze ist der Kosmos	243
11.3	Unbekannte Information – Thermodynamik	244

12	Reflexionen über die AQIs	247
12.1	Der Weg zu den quantischen Zuständen	247
12.2	Komplexes aus Einfachem	248
12.3	AQIs – ein einleuchtendes Postulat	250
13	Symmetriegruppen für Quantensysteme	255
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
14	AQIs und die Planck-Länge	269
14.1	Die gruppentheoretische Definition der Metrik im kosmischen Raum	270
14.2	Die gruppentheoretische Begründung der Planck-Länge mit der Protyposis	273
15	Kosmologie und die Äquivalenz von Masse, Energie und absoluter Quanteninformation	279
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
16	Einige Gedanken über den rationalen Kosmos der Protyposis	309
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
17	Inspiration und Induktion, Theorie und Experiment	321
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
18	Gravitation als Wirkung des Kosmos auf seinen Inhalt	329
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
19	Lösungen für Probleme der gegenwärtigen Kosmologie	349
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
20	Erklärung für ein Phänomen der Dunklen Materie	361
20.1	Jet-Strukturen an Black Holes	362
20.2	Die Wirkung auf die Umlaufgeschwindigkeiten der Sterne	370
21	Schwarze Löcher: Entropie und Singularität	375
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
22	Quantenteilchen im Minkowski-Raum	395
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
23	Die fundamentalen Wechselwirkungen	431
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
24	Modelle für lokalisierte Objekte	461
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
25	Ladungen generieren die Massen	471
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
26	Revue der mathematisch-physikalischen Resultate	487
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
27	Leben, Bewusstsein, Soziales	497
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
28	Naturwissenschaft, und über sie hinaus	541
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

29	Fazit: Was ist bereits erreicht, was ist zu erwarten?	553
29.1	Plancks Entdeckung und Einsteins Resümee	554
29.2	Ausblick	556
30	Anhänge	559
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
	Index	587

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.¹

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.²

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 gefolgt 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 „ π “ 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.¹ 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 τυπώ (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 Feststellung²:

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.³

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.⁴

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.⁵

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.

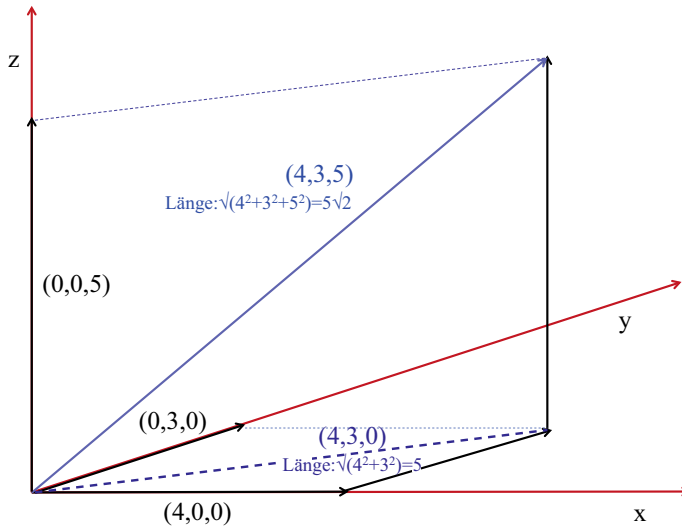


Bild 1.1 Der Vektor $(4, 3, 5)$ entsteht aus den drei Vektoren $(4, 0, 0) + (0, 3, 0) + (0, 0, 5) = (4, 3, 5)$. Jeder dieser drei Vektoren steht auf den beiden anderen senkrecht, d. h. sie haben keine gemeinsamen Anteile. (Sie sind zueinander orthogonal.) Die Abstände in den Dreiecken werden mit dem „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.⁶

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.

Index

Symbole

Λ CDM-Kosmologie 280
 π 189 f.

A

Abel 259
Absicht 502
Absichten 530
Absolute Bits von QuantenInformation 31
Absolute, das 31
absolute Information 80
Abstammung des Menschen 19
Abstraktion 218, 235, 500 f.
Abstraktionsstufen 504
AdS-Modelle 299
Ähnliches 18, 56
algebraic theory 3
Algorithmus 149
Al-Khalili 224
All-Aussage 545
Allgemeine Relativitätstheorie 29, 74, 283, 329
Allgemeine Relativitätstheorie, Vakuum-Lösung 84
Allmacht 16
Alter des Kosmos 176
Alternative, einfache 4
Alternativlosigkeit 193
Ambivalenz 65, 107
Amplitude 120
Anabolismus 500
Analogien 505
Anästhetika 529
Anderson 140, 559
Anti-de-Sitter-Modelle 299
Anti-de-Sitter-Raum 401
Anti-de-Sitter-Universum 84
Anti-Gravitation 286, 353
Antimaterie 410, 420, 559
Antiteilchen 46
antiunitär 402
Anti-Ur 402
Approximation 160, 400, 438, 522
a priori 171
AQL XXII, XXIII, 2, 30 f., 45, 47, 57, 88, 90, 96, 118, 120, 184, 218, 231, 312, 397
Äquivalenz 118
Arbeit 77
Archetypen 185
Aristarch von Samos 168, 325
Aristoteles 13, 44, 174, 182, 543
Aromatizität 36
Aspect 133
Assoziation 501
Astronomia Nova 281
Astronomie, griechische 168
Ätherdruck 480
Ätherwind 155
Atom 23, 118
Atombombe 185
Atomist 118
Atomkern 37, 47, 477
Atommodell 376
Atom, stabiles 35
Atomuhr 158
ATP 523
Attraktor 499
Auge 522
Augustinus 165
Aussenden von Information 233
Axiom 171, 327, 543
Axiomensystem 171
Axon 522

B

Babylon 154
 Backward Causation 12
 Bacon 327
 Beck 529
 Beckenstein-Hawking-Entropie 386
 Bedeutung 44, 68, 122, 129, 142 f., 217, 232, 511
 Bedeutungsstrukturen XXIV
 Bedeutungszuordnung 218
 Bedingung a priori 170
 Bekenstein 70, 76 f., 81 f., 89, 331, 377 f., 385, 463
 Bekenstein-Hawking-Entropie 273, 375
 Bell 133
 Benennung 218
 Beobachter 207, 215, 217, 224, 226, 235, 237
 Beobachtung 17, 127
 Bertalanffy 506
 Beschleuniger 115, 432
 Beschleuniger-Experiment 229
 Beschleunigung 175, 315
 Beschreibung 210, 513
 Bessel 325
 Bewegung an sich 23
 Bewegungen, natürliche 321
 Bewegungsgruppe 399
 Bewertung 144, 500
 Bewusstsein 64, 67, 101, 150, 208, 212, 224, 235, 519
 Bewusstsein, Definition 527
 Bewusstseinsinhalte 527
 Beziehung 534
 Beziehungsstruktur 64, 518, 534
 Bezugssystem 29, 156
 Bifurkation 225
 Big Bang 164, 279, 302, 312, 477
 Big Bounce 302
 Big Crunch 287
 Bindung, chemische 131
 Bindungsverhalten 524
 Biologie XXI, 43
 Biomoleküle 67
 Bit 526
 Black Hole 76, 115, 123, 231, 331, 353, 361, 384
 Black Hole, rotierendes 361
 Black Hole, supermassives 363
 Bloch 95

Bloch-Kugel 95
 Blutner 539
 Bogoljubov 478
 Bohm 561
 Böhm 410
 Bohmsche Mechanik 209, 562
 Bohr 4, 139, 162, 376
 Bojowald 302
 Boltzmann 78, 80, 326
 Boltzmann-Statistik 410
 Bolyai 173, 314
 Boost 399
 Bornschen Regel 562
 Börse 534
 Bose 398
 Bose-Einstein-Kondensat 229
 Bose-Einstein-Statistik 395
 Bose-Erzeugungsoperator 404
 Bose-Statistik 442
 Bose-Vernichtungsoperator 404
 Boson 38, 403
 Bottom-up-Wirkung 502
 Brahe 281
 Bruch 187
 Brückengesetz 61, 180, 243
 Brukner 162
 Bruno 196
 Buchstabe 525

C

Cantor 186, 189
 Casimir-Operator 424, 440
 Castell 261
 Cauchy 189
 Cauchy-Riemannschen-Differentialgleichungen 447
 causa finalis 13
 Cellarius 281, 325
 CERN 442
 Chadwick 559
 Chaos, deterministisches 138
 Chemie XXI, 35
 Chlor 37
 Christodoulou 378
 Clausius 77, 80
 CO₂ 499
 Codierung 465
 Computer 149
 Contergan 49
 Coulomb 33

Coulombfeld 33, 209
 Coulombkraft 36
 CP-Invarianz 476
 CPT-Invarianz 461, 475
 CP-Verletzung 476
 Crick 43
 C-Transformation 474

D

Daly 557
 Dämon 163
 Dämon, Laplacescher 163
 Dampfmaschine 77
 Darstellung, irreduzible 399
 Darstellung, reguläre 274
 Darwin 19, 510
 de Broglie 234, 561
 de-Broglie-Bohm-Interpretation 562
 Decodierung 465, 504, 519
 Deep Space Nine 73
 Dekohärenz 220, 222, 224, 229
 delayed choice 162
 Delta-Funktion 60
 Denkgesetz 185
 Descartes 7, 177, 428
 de Sitter 395, 401
 De-Sitter-Gruppe 401, 406
 De-Sitter-Kosmos 402, 483
 De-Sitter-Raum 401, 410
 Determiniertheit 163, 194
 deterministisches Chaos 20
 deutsche Physik 197
 Dezimalbrüche 186
 Diagonalverfahren 187
 Dichotomie 44
 Dichteänderung 433
 Dichtematrix 95, 125, 221f.
 Dichtematrizen 438
 Dichteoperator 125, 221
 Dichte-Operatoren 438
 Dielektron 31
 Diffeomorphismusinvarianz 334
 Differentialgleichung 137, 159
 Differentialgleichung, nichtlineare 138
 Dimension 10, 190
 Dimensionsanalyse 10
 Dinosaurier 521
 Diphoton 133f.
 Dirac 11, 60, 87, 334, 419, 559
 Dirac-See 420

direktes Produkt 14, 451
 direkte Summe 451
 Dissipative Strukturen 42
 Diversität 505
 Dixmier 406
 DNA 516
 Dokument 206
 Doppelpulsar 333
 Doppelspalt 198
 doxa, Meinung 179
 Drehimpuls 10, 376
 Drehung 399
 Driesch 176
 Drieschner 178, 264
 Druck 283, 333, 438
 Druck, homogener 363
 Druck, isotroper 363
 Druck, kosmologischer 356
 Druck, negativer 287
 Dualismus 44, 521
 du Bois-Reymond 150, 171
 Duftmarken 534
 Dunkle Energie 280, 287, 333, 343, 353
 Dunkle Materie 280, 333, 343, 353, 355f.,
 373
 Dynamische Schichtenstruktur 24, 144, 146,
 149, 322, 516, 518, 544, 561

E

Eccles 529
 Eco-Evo-Devo 518
 Eddington 73, 352
 Eddington-Finkelstein-Koordinaten 75, 377
 Eddington-Limit 353
 EEG 224, 524, 528
 Ehlers 287, 329
 Eigen 499
 Eigenschaft 44f., 47
 Eigenschaften 41, 64
 Eigenschaft, von Objekten 103
 Eine, das 2
 eingefrorene Zustände 79
 Einheit 151, 543
 Einheit des Bewusstseins 524
 Einstein XXIV, 1, 3, 31, 117, 133, 139, 147, 155,
 157, 175, 193, 196f., 234, 286, 298f., 312,
 314, 324, 330, 335, 398, 434, 440, 471,
 487, 511
 Einstein-Fahrstuhl 333
 Einsteinium 218

- Einstein-Kosmos 271, 315
 Einstein-Kreuz 372
 Einweg-Quantencomputer 100
 Einzeller 500
 Eisen 47
 Elektromagnetismus 434
 Elektronen 478
 Elektronenradius, klassischer 482
 Element 477
 Elementarladung 481
 Elementarteilchen 493
 Elementarteilchenphysik 123, 178, 445
 Elementarteilchentheorie 141
 Elementarvolumen 466
 Elemente 499
 Ellipsen 282
 Emergenz 61, 64, 243
 Emission, virtuelle 234
 Empfindungen 503
 Empirie 150, 172, 174, 224
 Empirie-Problem 242, 349
 Endcrash 358
 Endknall 353
 Endknall-Kosmologie 287
 Endkollaps 287
 Energie 30, 77
 Energie des Gravitationsfeldes 333
 Energiedichte 283f.
 Energiedichte-Druck-Tensor 285
 Energiedichte, kosmologische 356
 Energie, kinetische 48
 Energiekonzentration 289
 Energie, negative 84
 Energiesatz 299
 Englert 471, 564
 Ensemble-Eigenschaft 438
 Ensemblephysik XXII
 Entartungsdruck 284
 Entelechie 279, 515
 Entropie 42, 77f., 80, 379, 384, 386, 438, 503
 Entropie, absolute 80
 Entropie, Änderung 79
 Entropie, negative 379
 Enzym 40
 Epigenetik 517
 EPR-Experiment 133
 EPR-Gedankenexperiment 133
 EPR-Korrelationen 195
 Ereignisse 216
 Erfahrung 150, 168
 Erkenntnis 542
 Erkenntnis a priori 170
 Erklären 12, 53, 165, 513
 Erklärung des Lebens 67
 erster Hauptsatz 245
 Erzeugen von Quantenteilchen 54
 Erzeugungs- und Vernichtungs-Operatoren 32
 Euklid 7, 173, 543
 Euler 573
 Evo-Devo 517f.
 Evolution 44, 57
 Evolution, kosmische 20, 63
 Evolutionstheorie, synthetische 517
 Ewigkeit 165
 Expansion des Kosmos 228
 Experiment 17, 168, 174
 Experimentator 194
 Exponentialabbildung 435
 Exziton 38
- F**
- Fake News XX
 Fakten 32, 224
 Faktisch-Werden 1, 229
 Faktum 219, 237
 Falschfarbenbild 69
 Fantasie 505, 511
 Faserbündel 263, 451
 Faserung 263
 Fehlfaltung 48
 Feldquanten 25, 55, 140, 403
 Feldtheorie 3
 Felsen 511
 Fermi 38
 Fermi-Dirac-Statistik 395, 398
 Fermi-Erzeugungsoperator 404
 Fermion 260
 Fermionen 38, 398
 Fermi-Statistik 442
 Fermi-Vernichtungsoperator 404
 Fernwirkung 563
 Fernwirkungstheorie 314
 festgelegt 505
 Festkörper 36
 Festkörperphysik 35
 Festkörpertheorie 54
 Feynman 140
 Feynman-Integral 258
 Film 163

- Finitismus, offener 251
 Finkelstein 73, 77
 Fisher 517
 Fittler 189
 Fixstern-Parallaxe 314, 325
 Fließgleichgewicht 42, 146, 499
 FLRM-Kosmos 296
 FLRW-Kosmos 361
 Flüssigkeit, ideale 285
 Fock 440
 Fock-Darstellung 440
 Fördermittel 356
 Form 44, 128, 499
 Form, konkrete 66
 Formkonstanz 548
 Foucault 326
 Fourier 191
 Fourier-Reihen 265
 freie Energie 77
 Freiheit 197
 Freiheitsgrad 78, 194
 Frequenz 120
 Freud 19
 Friedman 395
 Friedmann 285
 Friedmann Gleichungen 317
 Froschschenkel 529
 Führungsfeld 562
 fundamentalen Wechselwirkungen 33
 Funktion, analytische 447
- G**
- Gaiser 2
 Galaxie 354
 Galilei 16, 168, 281, 325
 Galvani 529
 Ganze, das 31
 Ganzheit 13, 131, 135, 230
 Ganzheiten 535
 Gas, ideales 77, 245
 Gauß 173, 314
 Gedächtnis 501
 Gedächtnis, holografisches 531
 Gedanke 65, 519, 526
 Gedankenexperiment 17, 327
 Gefühl 65
 Gegenwart, ausgedehnte 112, 131, 157, 160 f.
 Geheimdienst 218
 Geheimnis des Lebens 516
 Gehirn 103, 224, 233
- Geist 44
 Geistige Tätigkeit 235
 Gell-Mann 478
 Gell-Mann-Matrizen 456
 Genauigkeit 21
 Genom 516
 Genzel 71
 Geodäte 314
 Geometrie, euklidische 173
 Geometrie, hyperbolische 173, 314
 Geometrie, nichteuklidische 314
 Geometrie, sphärische 173, 314
 Georgiev 539
 Gerlach 565
 Gesamt-Tensor-Raum 406
 Geschwindigkeit 74
 Gesetz 18, 56, 169
 Gesetzmäßiges 185
 Gestalt 46, 128, 514
 Gewissheit, absolute 173
 Ghez 71
 Gilgamesch-Epos 184
 Gitterzellen 235
 Gleiches 18, 56
 Gleichgewicht 42
 Gluon 59, 435 f., 453, 458, 478, 559
 Gödel 151, 171, 173, 178, 279
 Goethe 34, 150, 326
 Goseck 531
 GPS-System 333
 Graudenz 268
 Gravitation 29, 33, 69, 175, 315, 433, 442
 Gravitationsfeld 158, 299
 Gravitationskollaps 88
 Gravitationskonstante 87, 175, 271
 Gravitationslinse 372
 Gravitationswellen 314, 324
 Graviton 234
 Green 414
 Greensche Zerlegung 414
 Grenzwert 4
 Grenzwerte 189
 Grolle 70
 Grossmann 1
 Gründe 194
 Grundlegung der Naturwissenschaft 253
 Grundschwingung 118
 Grundzustand 75, 369
 Grundzustandsenergie 75
 Gruppe 160, 188
 Gruppe, diskrete 259

Gruppe, kommutative 259
 Gruppe, kompakte 274
 Gruppe, kontinuierliche 259
 Gruppe, Liesche 259
 Gruppe, nichtkommutative 259
 Gruppenstruktur 160
 Gruppen, unitäre 259
 GULAG 197
 Gültigkeitsbereich 210
 Guralnik 471
 GUT 474
 Guzmán 370

H

Haag 227, 287
 Haber-Bosch-Verfahren 502
 Hadronen 453, 559
 Hagen 471
 Haken 499
 Halbgruppe 160, 188
 Haldane 43
 Halteproblem 173
 Hauptsatz, Erster 284
 Hawking 70, 81, 330 f.
 Hawking-Strahlung 81
 Hawking-Temperatur 88, 382
 Heisenberg 5, 22, 139, 191, 197, 264, 291, 327, 442
 Heisenbergsches ‚Urfeld‘ 141
 Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation 74
 henadisch 447
 Heraklit 56, 543
 Herodot 163
 Higgs 471
 Higgs-Feld 283
 Higgs-Teilchen 55, 115, 283, 326, 478
 Hilbert 171, 191, 265, 314
 Hilbert-Raum 10, 191, 440
 Hintergrundstrahlung 498
 Hippocampus 235
 Hirnphysiologie 150
 Hirntod 102, 224
 Hochenergiephysik 54, 432
 Hochkulturen 542
 Hochtemperatur-Supraleiter 218
 Hologramm 85, 531
 Homöostase 501
 Homunkulus 501
 Hopf 263

Hopf-Faserung 263
 Horizont 73, 232, 364, 368 f., 376
 Horizont, Oberfläche 83
 Horizont-Problem 350
 Hormon 522
 Hoyle 312
 Hubble 156, 196
 Hubble-Konstante 338
 Hubble-Parameter 338
 Huygens 34
 Hylemorphismus 45
 Hypothesen 197

I

IceCube 115
 Ich, das 520
 Idealisierung 160, 397
 Ideen 544
 identisch 56
 Identität des Ununterscheidbaren 31
 Ideologie 534
 Illusion 163, 194
 Impuls 74 f.
 indefinite Metrik 298
 induktive Verallgemeinerung 17
 Inflation 279, 287, 350
 Inflaton 350
 Information 30, 217
 Information, absolute 45
 Information, bedeutungsfreie 511
 Information, bedeutungsvolle 41, 504, 518
 Informationen, verschränkte 514
 Informationsparadox 231, 383, 391
 Informationsstruktur 64
 Informationsverarbeitung 43, 523
 Informationsverarbeitung, biologische 521
 Informationsverarbeitung, intelligente 499
 Inhalt 128
 Inhalt, materieller 44
 Inhomogenität 433
 Inönü 402
 Integrationskonstante 285
 Intentionalität 502
 Interferenz 219
 Internet 534
 Interpretation 561
 Interpretationsproblem 208
 Intuition, physikalische 315
 Irreversibles 227
 ISS 333

It from Bit 76, 81 f.

It from Quantumbit 83

J

Jahr 154

Jaynes 379

Jet 361, 369

Jetzt-Zeitpunkt 175

Joos 222

Jordan 87

Jung 185

Jupiter-Monde 281

K

Kaluza 11

Kant XXI, 119, 164, 170, 172, 176, 182

Katabolismus 500

Katalysator 40

Katze, grau 18

Katze, Schrödingers 147

Kauffman 506

Kaufmann 480

Kausalität 16, 93

Keilschrift 184

Keim von Subjektivität 66, 527

Kekulé 36

Kenntnisnahme 66

Kenntnis, objektive 66

Kepler 175, 281, 313, 325, 354

Kernphysik 477

Kerr 361, 384

Kerr-Lösung 361

Kibble 471

Kiefer 238, 391

kinetische Energie 75

Kiselev 370

klassische Mechanik 78

Klauder 431

Klein 11

Kleinheit 21

Knöllchenbakterien 502

Kochen 215

Koinzidenzproblem 349

Kollaps 222, 285

Komet von 1577 282

Kommunikation 512

Kommutator 258

Komplementarität 4, 65, 180

Komplexes 217

Komplexität 506

Komplexbijugation 402, 420

Konfigurationsraum 10

Konsistenzüberlegung 17

Kontinuum 25, 30, 267

Kontinuumsmodell für Materie 80

Kontraktionsphase 287

Kontrolle 199

Koordinaten-Kosmos 441

Kopenhagener Deutung 209

Kopenhagener Interpretation 224

kopernikanische Wende XIX, 325

Kopernikus 168, 281, 313, 325

Körperfunktion, basale 102

Korrelate des Bewusstseins 520

Korrelation 133

kosmischer Druck 299

Kosmologie 164, 241, 243, 330, 358

kosmologische Konstante 280, 287, 299, 315, 351, 401

kosmologischer Term 343

kosmologisches Prinzip 349

Kosmos 56, 156

kosmos, beschleunigt expandierender 287

Kraft 547

Kraftfeld 25, 434

Kraftfelder, elektromagnetische 514

Kraftquanten 398, 442

Krall 538

Krämer 2

Kränkung 19

Krüger 526, 530

Krümmungsänderung 433

Krümmungsskalar 409

Kruskal 77

Kruskal-Koordinaten 75

Kuhn 19

Kunst 531

L

Labor 400

Ladung 395, 472

Lagrange-dichte 448

Laguerre-Polynome 417

Lamarck 517

Landau 480

Lange 519

Längeneinheit 265

Längeneinheit, fundamentale 288

Langzeitgedächtnis 531

- Laplace 163
 Leben 145f., 185
 Lebendiges 64, 290
 Lebenskraft 515
 Lebenspraxis 208
 Lebesgue 274
 Lebewesen 41f., 57, 146, 465
 Leguminosen 502
 Leibniz 31, 138, 170, 189, 397
 Lemaître 196, 285, 395
 Lepton 478, 484
 Leptonen-Familienstruktur 484
 Lernen 502
 Lernfähigkeit 18
 Le Verrier 175
 LHC 115, 442
 Libet 530
 Lichtgeschwindigkeit 73, 155f., 271, 388
 Lichtquanten 326, 434
 Lichtquanten, virtuelle 33
 Lie 259, 395
 Lie-Algebra 435
 Lie-Gruppe 435
 Lifshitz 480
 Limes, quasiklassischer 84
 Lobatschewski 173, 314
 Loch, virtuelles Teilchen 54
 Locked-in-Patienten 520
 Logik 141, 173, 185, 542
 Lokalisation 118, 233
 Lokalität 334
 Lorentz 155, 395, 479
 Lorentz-Gruppe 261, 401
 Lorentz-Gruppe, inhomogene 399
 Lorentz transformations 335
 Lorentz-Vakuum 234, 418, 440
 Lösung, kosmologische 331
 Lösungskurve 138
 Lüders 475
 Luhmann 535
 Lyre 445
- M**
- Mach 17, 80
 Machs 326
 Machtstrukturen 196
 Magneten 453
 Magnetismus 282
 Majorana 473
 Makromolekül 521
 Mannigfaltigkeit 9, 177
 Mannigfaltigkeit, pseudo-euklidisch 9
 Marxismus-Leninismus 197
 Masse 261, 324
 Maßeinheitensystem 87
 Masse, schwere und träge 29
 Materie 30, 118, 410
 Materiedichte 190
 Materiequanten 442
 Materiewelle 561
 Mathematik 1
 Matos 370
 Matrix 14
 Matrizenmechanik 22, 191
 Maxwell 434
 Maxwellsche Gesetze 171
 Maxwellsche Gleichungen 33
 Maxwells Dämon 379
 McFadden 224
 Mechanik 34, 397
 Mechanik, Newtonsche 327
 Medina 481
 Melia 352
 Membran, semipermeable 515
 Merkur 282, 330
 Merkur-Bahn 175
 Meson 453
 Mess-Anordnung 137
 Messergebnis 135f., 207
 Messprozess 153, 161, 205
 Messung 160, 216, 519
 Messung, unscharfe 219
 Messvorgang 219
 Metabolismus 499
 Metapher 119
 Metaphysik 182, 313, 542
 metastabil 501
 Meter 271
 Methode, deduktive 327
 Methode, induktive 327
 Metrik, indefinite 9
 Michelangelo 549
 Michelson 155, 334
 Michelson-Morley-Experiment 155
 Mikrophysik XXII, 21, 123, 331
 Mikroporen 499
 Mini-Black-Hole 493
 Minkowski 9, 395
 Minkowski-Metrik 334
 Minkowski-Raum 9, 298, 401
 Mitochondrien 512

Möglichkeit 1, 13, 32
 Molekül 35, 48
 Monat 154
 Monismus 521
 Monismus, informationeller 546
 Monom 404, 410
 monomaterialistischer Fehlschluss 428, 547
 Monopol 453
 Mooresches Gesetz 272
 Morley 155, 334
 Moser, Edvard 235
 Moser, May-Britt 235
 Motive 530
 Mott 140
 Moylan 410
 Mozart 549
 Mpc 338
 Musik 505
 Mutationen 517
 Myon 478, 559
 Myon-Neutrino 478
 Mysterium 153, 520

N

NaCl 37
 Näherung 56
 Näherungscharakter 131
 Nanoteilchen 36
 Natrium 37
 Natur 63
 Naturalismus 165
 Naturgesetz 16, 58, 76, 93, 160
 Naturkonstante, fundamentale 87
 Naturkonstanten 271
 Naturwissenschaft 11, 63
 Nazidiktatur 197
 Neandertaler 534
 Nebenklasse 454
 Neddermeyer 559
 negativer Druck 480
 Neptun 175
 Netzhaut 522
 Netzwerk 93
 Neue Physik 428
 neuronales Netz 105
 Neutrino 115, 473, 559
 Neutrino-Oszillation 478, 484
 Neutron 559
 Neutronenstern 284

Newton 11, 34, 138, 154, 164, 169 f., 175, 282,
 314 f., 324 f., 406
 Nichtdeterminiertheit 208
 nicht-kommutative Multiplikation 423
 Nichtkommutativität 206
 Nichtlokalität 131, 208, 237, 500, 526
 Nichtmaterielles 181
 Nichts 165
 Nichtseiende 164
 Nichtumkehrbarkeit 227
 Nichtvertauschbarkeit 65, 131
 Noble 516
 Noether 435
 Noether-Theorem 435
 Non-cloning-Theorem 505
 Non-Standard-Analysis 189
 Norm 262
 Nöther 395
 Null-Menge 436
 Núñez 370

O

Objekt 45, 397
 Objekte, klassische 513
 Objekt, elementarerer 18
 Objekt, elementares 45, 128
 Objekt, frei bewegbares 23
 Objektivierbarkeit 66
 Objektstrukturen XXIV
 Oersted 17
 O'Keefe 235
 Oppenheimer 95
 Optik 34
 Optionen 322
 Orbital 35
 Organisation 503
 Ort 74
 Ortelius 542
 Orte, mögliche 377
 Ortsraum 264
 Ostwald 80

P

Panpsychismus 520
 Parabose-Operatoren 414
 Parabose-Statistik 398
 Parabose-Statistik, 410
 Paradoxie 1, 5, 137, 164
 Parallaxe 282

- Parallelen-Axiom 173, 314
 Parameter 62
 Parität 178
 Paritätsverletzung 475
 Parmenides 179, 230, 543
 Pauli 5, 170, 185, 475, 559
 Pauli-Matrizen 451
 Pauli-Prinzip 466
 Peano 171
 Penrose 71, 73, 329 f., 378, 546
 Penzlin 43, 503
 Periheldrehung 175, 330
 Perpetuum mobile 245
 Perry 70
 Phasenraum 10
 Philosophie 183
 Phonon 54
 Photon 103, 224, 233, 435, 523
 Photonen, verschränkte 523
 Photon, virtuelles 61
 Physikalismus 63, 66
 Physik der Beziehungen XXIV
 Physik der Möglichkeiten XXIV
 Physik des Genauen XXIV
 Physik, klassische 163
 Physik, neue 11
 Pietschmann 68, 308
 Pionier-Quantenmechanik 438
 Planck XXV, 21, 139, 171, 271, 288, 326, 377, 434
 Planck-Einheiten 288, 377
 Planck-Energie 493
 Planck-Fläche 296
 Planck-Länge 83, 85, 88, 271, 385, 432, 487
 Planck-Masse 271
 Plancksche Formel 58, 117
 Planck-Zeit 271, 488
 Platon 2, 151, 543
 Podolsky 17, 133
 Poincaré 395, 425, 480
 Poincaré-Gruppe 261, 398, 400, 414, 440, 449, 493
 Poisson-Klammer 258
 Polarisierung 96
 Polariton 25, 37, 39 f., 438
 Polariton-Laser 40
 Polaritons 41
 Popper 17, 545
 Populationsgenetik 517
 Positronen 478
 Positronium 38, 46
 Post-Darwinsche Informationsweitergabe 531
 Potenzial 161
 Potenzialität 12, 139, 446
 Potenzmenge 120, 266
 Prä-Bedeutung 143, 515
 Präparation 139, 160
 Pribram 531
 Prigogine 42
 Primas 216, 228, 438
 Prinzip 1, 13
 Prinzip, holografisches 84
 Prinzip, kosmologisches 190
 Prion 48
 Problem, unentscheidbares 171
 Produkt, direktes 126
 Produkt, direktes, von Gruppendarstellungen 269
 Prognose 170, 209
 Prophylaxe 1
 Proportionalitätskonstante 175
 Protein 40
 Protonen 115, 466
 Protyposis 2, 18, 65, 90, 117, 120, 158, 177, 179, 183, 194, 217 f., 244, 343, 385 f.
 Protyposis-Kosmologie 333, 364
 Prozess, individueller 162
 Prozess, realer 159
 Psyche 64, 520
 Psychische, das 63, 65
 Psychosomatik 526
 P-Symmetrie 475
 Ptolemäus 281, 325
 P-Transformation 474
 Punktteilchen 12, 22, 54, 58, 376, 397, 562
 Pythagoras 8, 186, 543
- Q**
- Qualia 66 f., 527
 Quanten 230
 Quantenbit 22, 59, 65, 131, 217, 432
 Quantencomputer 149
 Quantencomputing 94
 Quanteneichfeldtheorie 434
 Quantenelektrodynamik 434
 Quantenfeld 25, 283
 Quantenfeldtheorie 25, 54, 123 f., 446
 Quantengleichgewicht 564
 Quantengravitationseffekte 88
 Quanteninformation 43, 224

Quanteninformation, absolute XX, 45
 Quanteninformationsstruktur XXII
 Quanten-Kosmologie 337
 Quantenmechanik 22, 32, 35, 208, 437
 QuantenPotenzial 563
 Quantenprozesse 224
 Quantenradierer 218
 Quantenschaum 83
 Quanten-Schmetterlings-Effekt 139
 Quantenstrukturen, einfache 440
 Quantensystem, abgeschlossenes 157
 Quantenteilchen 23, 465
 Quantenteilchen, masselose 23
 Quantentheorie 70, 87, 330
 Quantenvakuum 476
 Quanten, virtuelle 54, 434
 Quanten-Zenon-Effekt 230
 Quantenzustand 66, 135
 quantische Parallelverarbeitung 530
 Quantisierung 32, 403
 Quantisierung, kanonische 54
 Quantisierung, zweite 45, 447
 Quark 58, 398, 436, 453, 458, 478, 559
 Quark-Antiquark-Paar 453
 Quasare 362
 Quasipartikel 25
 Quasiteilchen 37, 41, 55, 140
 Qubit, bedeutungsvolles 64
 Quintessence 370
 Quintessenz 287

R

Rahaman 371
 Ramadan 154
 Ramanujan 549
 Ramírez 370
 Raum, unendlicher 154
 Raum-Zeit-Geometrie 333
 Rauschen 513
 Reale 2
 reale und virtuelle Quanten 32
 Realismus, naiver 324
 Realität XXII, 118, 160
 Realität des Geistigen 535
 Reduktion 118
 Redundanz 514
 Reflexion 68, 194, 501
 Reflexivität 501
 Regel 18, 56
 Regelmäßigkeit 19

Regress, infiniter 501
 Reibung 160
 Reissner-Nordström-Metrik 483
 Reiz 500, 522
 Relativitätstheorie 158, 419
 Relativitätstheorie, Allgemeine 70, 73, 87,
 156, 337
 Relativitätstheorie, Spezielle 55, 87, 157
 Religion 164
 Repräsentationsstufe 504
 Resonanz, quantische 120
 reversibel 96
 Reversibilität 159
 Revolution, wissenschaftliche 19
 Riemann 1, 314, 324
 Riemannsche Geometrie 1
 RNA 515
 RNA-Welt 516
 Robertson 395
 Robinson 189
 Rosen 17, 133
 Rotationsgeschwindigkeit 356
 Rotverschiebungen 196
 Rückkopplung 111, 500
 Rückquantisierung 332
 Ruhmasse 206
 Rumpf- und Stopp-Operatoren 404, 410

S

S3 118
 Schaltkreis 520
 Schelling 549
 Scherer 34, 119
 Schmetterlings-Effekt 138, 330
 Schmidt 214, 221
 Schreiber 503
 Schrift 57, 291, 534
 Schrödinger 22, 109, 133, 139, 147, 431
 Schrödinger-Gleichung 22, 191
 Schrödingers Katze 17
 schwache Wechselwirkung 33
 Schwartz 60
 Schwarzes Loch 69, 80, 190, 271, 285, 370
 Schwarzschild 73, 76, 331, 384
 Schwarzschildkoordinaten 377
 Schwebung 524
 Schwere 29, 443
 Schwerkraft 29
 Schwinger 140
 Scully 564

- Sehen 224
 Sehvorgang 103
 Seiendes 164
 Selbst, das 520
 Selbstorganisation 535
 Shannon 379
 Sicherheit, beweisbare 178
 Signal 500
 Singularität 72, 223, 330, 375
 Sinus 120
 Slipher 196
 Smolin 89f.
 SO(2) 401
 SO(3) 401
 SO(3,1) 401
 SO(3,2) 401
 SO(4) 401
 SO(4,1) 401f., 483
 SO(4,1). 401
 Sonnenfinsternis 159, 163, 324
 Soziologie 535
 Spalt 24
 Spekulation 182
 Spencer-Brown 535
 Spezialfall 206
 Spezielle Relativitätstheorie 28f.
 Spiegelungssymmetrie 178
 Spin 30, 261, 562
 Spinoren 260
 Spins 47
 Sprache 57, 68, 531
 Sprachentwicklung 523
 SQUIT 98
 Stalin 197
 Standardmodell der Kosmologie 279
 starke Wechselwirkung 33
 Stein 511
 Stern 35, 511, 565
 Steuerung 41
 Stochastik 138
 Stonehenge 531
 Storch 134
 Störung 219
 Strahlenoptik 24
 Strings 83
 String-Theorie 11
 Ström 408f.
 Strominger 70, 491
 Struktur 1, 181
 Struktur, einfachste 60
 Strukturen, komplexe 48
 Strukturformel 131
 Strukturquanten 32
 Struktur, räumliche 291
 Struktur, soziale 534
 Struminsky 478
 Subjektivität 43, 519
 Subjektivität der Qualia 527
 Subjektivitäts-Keim 519
 Summe, direkte 270
 Superauswahlregel 437, 513
 Superdeterminismus 193
 Superdeterminismus 195
 Supernova 372
 Supernova-Explosion 115
 Superposition 7, 65, 93, 95
 Superstrings 83
 Suprafluidität 229
 Supraleitung 229
 Susskind 383
 Süßmann 287, 564
 Symbiose 502, 512
 Symbolbildung 465
 Symmetrie 159
 Symmetriegruppe 435
 Synergetik 499
 System 181
 Systemeigenschaft 505
- T**
- Tachyonen 400
 Takahashi 406
 Tangentialraum 402
 Tauon 478
 Tauon-Neutrino 478
 Tavkhelidze 478
 Taylor-Reihen 265
 Technik 150
 Teilchen 9, 14, 180, 261, 453, 483, 493
 Teilchen-Antiteilchen-Paare 81, 419
 Teilchenbeschleuniger 357
 Teilchen, elementareres 18
 Teilchen-Modell 410
 Teilchen, stabiles 90
 Teilchen-Vakuum 32, 493
 Teilchen, virtuelle 32
 Teilchenzahl 78
 Teileloses 131
 Teilelosigkeit 131
 Teilstrukturen 180
 Temperatur 77, 438

Temperatur, absolute 142
 Tensor 13
 Tensorprodukt 13 f., 46, 48, 180, 451, 507
 Tensorrang 404
 Tensor-Raum 404
 Thales von Milet 163
 Thallium 218
 Theorie 1
 Theorie, abgeschlossene 19, 327
 Theorie des Genauen 90
 Theory of everything 2
 Thermodynamik 62, 76
 Thermodynamische Wahrscheinlichkeit 78
 Thomas 406
 t'Hooft 463
 T-Invarianz 476 f.
 Tipler 287
 Tischlerei 431
 Tomonaga 140
 Top-Down-Wirkung 502
 Träger, energetischer 57
 Träger, materieller 57
 Trägerwechsel 64
 Trägheit 29
 Translation 399
 transzendent 150 f., 176 f.
 Triangulierung 235
 Triester Theorie 216
 T-Transformation 474
 Tunneleffekt 132, 529
 Turing 171, 173
 Typen von Quanten 30

U

U(1)-Eichung 444
 überabzählbar 440
 überabzählbar unendlich 188
 Übergangsstruktur 183
 Überlichtgeschwindigkeit 195
 Uhr 156
 Umeichungen 443
 Umlaufgeschwindigkeit 364
 unbegrenzte Zweiheit 543
 Unbelebtes 197, 511
 Unendliches 172, 242
 Unendlichkeit 3, 230
 Unendlichkeit, unphysikalische 30
 Unikat 212
 Universum 212

Universum, holografisches 273
 Uniware 101, 503, 520, 526
 Unkenntnis 78, 138
 Unordnung 79
 Unschärfe 226
 Ununterscheidbarkeit, lokale 175
 Unwesentliches 4, 242
 Unwissen 198, 224
 Unwissenheit 218
 Ur 141, 403, 410
 Ur-Alternative 81, 88, 95, 122
 Urknall 223
 Urojekt 141
 Ursache 162, 194
 Ursache, geistige 530
 Urteil a priori 172
 Ur-Theorie 337

V

Vaidya 361, 363, 368
 Vaidya-Metrik 364
 Vakuum 81
 Vakuum-Energie 75, 351
 Vakuum-Energiedichte 343
 Vakuum-Lösung 384, 401
 Van Vleck 140
 Variable 61
 Venus 282
 Venus von Willendorf 531
 Verallgemeinerung, induktive 17
 Vernichten von Quantenteilchen 54
 Vernichtungs-Operator 258
 Verschränkung 109, 133, 431, 436
 Verständnis von Materie, vorquanten-
 theoretisches 521
 Vertauschungsregel 403
 Viel-Elektronen-System 32
 Viele Welten 209
 Viele-Welten-Interpretation 561
 Vierer-Ur 402
 Viren 67
 Virtualitätssphänomen 454
 Virus 128
 v. Neumann 214
 von Jolly 171
 von-Neumann-Algebra 438 ff.
 Vulkan 175, 545

W

Waddington 517
 Wahrnehmung 65, 503, 522
 Wahrscheinlichkeit 77
 Wahrscheinlichkeitstheorie 322
 Wahrscheinlichkeit, thermodynamische 78,
 260
 Walker 285, 395
 Wallace 510
 Walter 564
 Walther 162
 Wärme 77, 80, 160
 Wasserdampf 48
 Weaver 379
 Wechselwirkung 180, 264
 Wechselwirkung, biologische 443
 Wechselwirkung, elektromagnetische 33,
 443
 Wechselwirkungsstärke 442
 Weinberg 142
 Weismann 517
 Weismannismus 197
 Weiss 506
 Weißer Zwerg 284
 Weizsäcker XXIV, 4, 6, 31, 81, 91, 117, 122,
 170, 178, 196, 216, 227, 243, 257, 261, 287,
 375, 396, 402, 426, 442, 465, 487, 511
 Welcher-Weg 218
 Welcher-Weg-Information 219
 Welle, elektromagnetische 34
 Wellenerscheinungen 22
 Wellenfunktion 118, 161, 221
 Wellenoptik 24
 Welle-Teilchen-Dualismus 22, 198
 Weltbild 313, 326
 Weltbild, geozentrisches XXII, 19, 90
 Weltbild, heliozentrisches XXII, 19, 90
 Weltformel 2
 Werner 536
 Wheeler XXIV, 73, 76, 81, 91, 142, 295, 378,
 432, 487
 Widerspruch 5
 Widerspruchsfreiheit 151, 171
 Wiederholbarkeit 168
 Wigner 182, 395, 399, 402, 414, 493, 573
 Wirklichkeit 198, 519
 Wirkung 162
 Wirkung, gravitative 284
 Wirkungsquantum 21, 84, 271
 Wissen 141, 207, 217, 224

Wissenschaft 1
 Wittgenstein 68
 Wort 525
 Wunder 64
 Würfel 222
 Wurmloch 73f.

Z

Zahlenfolge 189
 Zahlen, komplexe 322
 Zahl, imaginäre 446
 Zahl, irrationale 186, 188
 Zahl, komplexe 188
 Zauberei XX
 Zeh 222
 Zeilinger 463
 Zeit 205
 Zeitfreiheit 107, 131
 Zeitlosigkeit 151, 162
 Zeitpfeil 16, 160
 Zeitspiegelung 178
 Zeitstruktur 223
 Zeitumkehr 159
 Zeit, unendliche 154
 Zeitvariable 161
 Zeit, zyklische 298
 Zellulärer Automat 84
 Zenon 230
 Zenon von Elea 4
 Zentrum der Milchstraße 72
 Zerfall, radioaktiver 33
 Zufall 530
 Zufälligkeit 138
 Zustand 79, 230
 Zustand, aktueller 519
 Zustände, eingefrorene 518
 Zustände, kohärente 109
 Zustände, verschränkte 109
 Zustand, gemischter 222
 Zustand, kohärenter 15, 432
 Zustandsgleichung, kosmologische 299
 Zustandsraum 9
 Zustand, stationärer 446
 Zustandsvektor 10
 Zustand, verschränkter 15
 Zweierheit, unbegrenzte 2, 151
 Zweiter Hauptsatz 42, 80, 244
 Zwei-Zustands-System 95
 Zwicky 354
 Zwillingsparadox 157