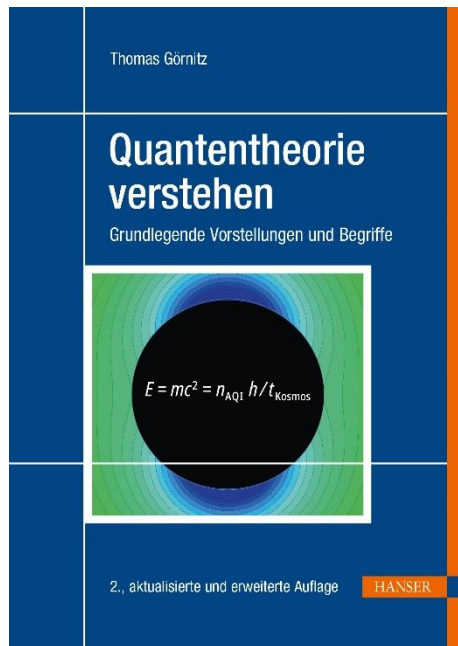


HANSER



Leseprobe

zu

Quantentheorie verstehen

von Thomas Görnitz

Print-ISBN: 978-3-446-48026-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-48054-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446480261>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

Vorwort	XVII
1 Reale und mögliche Strukturen als Triebkraft der Natur	1
1.1 Einstein und Weizsäcker über die Grundlagen der Naturwissenschaft ...	4
1.2 Ein wenig Mathematik	8
1.2.1 Raum	8
1.2.2 Einige weitere mathematische Begriffe	10
1.3 Ein Blick auf die Grundlagen der Naturwissenschaft	14
1.3.1 Alltag, Quanten und noch etwas Mathematik	16
1.3.2 Wie gelangt der Mensch zu Naturgesetzen?	20
1.4 Die Beziehungen der physikalischen Strukturen	24
1.4.1 Theoriebereiche der Physik	24
1.4.2 Der Geltungsbereich der Physik	25
1.4.3 Ein Blick auf die Strukturen der Quantentheorie	25
1.4.4 Quantentheorie und das Verhältnis von Fakten und Möglichkeiten	33
1.4.5 Beziehungen zwischen Quantenfeldtheorie und Relativitätstheorie	33
1.4.6 Relativitätstheorien	34
1.5 Ein Überblick auf Einteilungen der Quanten	35
1.6 Fakten, Möglichkeiten, Quantisierung	38
1.6.1 Die fundamentalen Wechselwirkungen	39
1.6.2 Elektromagnetische Wechselwirkung und die Existenz der Objekte	39

1.7	Zum Verhältnis von Physik, Chemie und Biologie	40
1.7.1	Photonen in der Chemie	43
1.7.2	Virtuelle Teilchen in der Chemie	44
1.7.3	Weitere interessante Quanteneffekte	47
1.7.4	Einfluss der Information auf die Steuerung biochemischer und biologischer Prozesse	48
1.7.5	Kein Widerspruch zwischen Biologie und Physik!	49
1.8	Die Unterscheidung zwischen Inhalt und Form, zwischen Teilen und Ganzheit	52
1.8.1	Quantentheorie und Hylemorphismus	52
1.8.2	Teile werden zu Ganzheiten	54
1.8.3	AQIs und Qubits – was ist gleich, was verschieden?	55
1.8.4	Form und Inhalt in der Chemie	57
1.8.5	AQIs versus Bedeutung	58
1.8.6	Was ist zu erwarten	59
2	„Erklären“ in der Physik	61
2.1	Erklären mit Quantenfeldtheorie	63
2.2	Ein Blick auf das Erforschbare	65
2.3	Regeln und Gesetze durch „Näherungen“	66
2.4	Interpretationen von Objektivem und Subjektivem	73
3	Inspiration und Induktion, Theorie und Experiment	81
3.1	Wahrscheinlichkeiten als Maß für Möglichkeiten	82
3.2	Bilder von Möglichkeiten?	83
3.3	Inspiration	84
3.4	Erstellen von Theorien, ihre Akzeptanz und ihre Bestätigung	86
4	Quanten und Schwarze Löcher	91
4.1	Das erste Bild von einem „Schwarzen Loch“	91
4.2	Fundamentale Quantentheorie und die Schwarzen Löcher	93
4.3	Vom „Schwarzen Loch“ zum „It from Bit“	99
4.3.1	Thermodynamik: Black Holes strahlen	99
4.3.2	Die Vorgeschichte zum „It from Bit“	105
4.4	Das „It from Bit“ und seine Probleme	106
4.5	Zur Bedeutung der Planck-Einheiten	111
4.6	„Mysteriöse Eigenschaften“ der Schwarzen Löcher	114

5	Bits, Qubits und AQIs	117
5.1	Computing und Quantencomputing	117
5.2	Die Bits beim Quantencomputing und der Unterschied zu den AQIs	119
5.3	Quantencomputing ist reversibel	121
5.4	Das Gehirn als Quantencomputer?	125
5.5	Analogien und Unterschiede zwischen Bewusstsein und Computer	130
5.6	Wahrnehmung von Gestalten und Kräften durch Lebewesen	136
5.7	Künstliche Intelligenz (KI) und Mustererkennung	141
6	Der Weg aus der Sackgasse der „kleinsten Teilchen“	145
6.1	Protypsis – der Ausweg aus der Sackgasse	148
6.2	Der historische Weg zur Protypsis	153
7	Grundprinzipien von klassischer und quantischer Physik	157
7.1	Kennzeichen der klassischen Physik	158
7.2	„Bedeutung“ und die Unterscheidung zwischen Form und Inhalt	160
7.3	Form als bedeutungsvolle Information	161
7.4	Quantentheorie – Ausgedehnte Ganzheit, Verschränkung, Nichtlokalität	162
7.4.1	Tunneleffekt	165
7.4.2	EPR-Gedankenexperiment	166
7.4.3	Eine Veranschaulichung des EPR-Experimentes	168
7.5	Zu welchen Strukturen hat die Quantentheorie geführt?	173
7.6	Die AQIs der Protypsis	175
7.7	Der Physik-Nobelpreis 2022 für Verschränkung und Nichtlokalität	179
7.7.1	Einstein und die Nichtlokalität der Quantentheorie	180
7.7.2	Die Bellsche Ungleichung	181
7.7.3	Clausers Experiment 1972	182
7.7.4	Aspects Experiment 1982	182
7.7.5	John Bells Reaktion	183
7.7.6	Zeilingers Experimente zur Nichtlokalität in der Quantentheorie	184
7.7.7	Zeilinger und das „Beamten“	185
7.7.8	Der „Messprozess“ als Spezialfall des Übergangs von Möglichkeiten zu Fakten	186
7.7.9	Ein Blick auf meine fachliche Diskussion mit C. F. v. Weizsäcker	187
7.7.10	Qubits als Eigenschaften von Objekten und AQIs als Basisstrukturen der Quantentheorie	188

7.7.11	Die Versuche zur Teleportation, dem Beamen	189
7.7.12	Abhörsichere Kommunikation	191
7.8	Die Dynamische Schichtenstruktur – Koexistenz von klassischer und quantischer Physik	193
7.8.1	Schrödingers Katze und Schrödingers Kätzchen	195
7.8.2	Dynamische Schichtenstruktur und Quantencomputing	198
7.8.3	Ignorabilia und kritische Vorannahmen	199
8	Ein Blick auf die „Zeit“	201
8.1	Wie wird Zeit wahrgenommen und eingeteilt	201
8.1.1	Fakten gliedern die Zeit	202
8.1.2	Aussagen über die Zeit	203
8.1.3	Die moderne Physik und die Zeit – Relativitätstheorien und Quantenphysik	203
8.1.4	Quantentheorie über die Zeit	205
8.1.5	Die Planck-Zeit	208
8.2	Reversibilität und Zeitumkehr	209
8.3	Die „ausgedehnte Gegenwart“ als Grundzug der Quantentheorie	211
8.4	Fakten und klassische Physik	213
8.5	Was war „vor“ der Zeit?	215
8.6	Der Beginn der Zeit	216
8.7	Ein „Ur-Hauch“, ein „Quantum“, statt „Urknall“	217
9	Grundlagen der Empirie	221
9.1	Erfahrung und Empirie in der Naturwissenschaft	222
9.2	Die Empirie und die Zeit	224
9.3	Transzendente Hypothesen	231
9.4	Zeit und Naturgesetze	233
9.5	Eine realistische Weltbeschreibung	235
10	Das Zählen von Fakten und von Möglichkeiten	237
10.1	Zwischenspiel	237
10.2	Zählen und Zahlen	241
10.3	Das Unendliche	244
10.4	Unendliches in der Physik?	247
10.5	Fakten, Möglichkeiten, Freiheit	251
10.6	Die Notwendigkeit der komplexen Zahlen	260

11	Das Entstehen der Fakten in der Natur	265
11.1	Der Messprozess aus Sicht der Protyposis	265
11.1.1	Warum schenkt man dem sogenannten Messprozess eine so große Aufmerksamkeit?	265
11.1.2	Zur Interpretation des Messprozesses in der Quantenmechanik	268
11.2	Die dynamische Schichtenstruktur und der Messprozess	273
11.3	Die umfassende Rolle der physikalischen Information	279
11.4	Schlussfolgerungen mit der Protyposis	290
11.4.1	Protyposis: Fakten auch ohne Beobachter	292
11.4.2	Der Quanten-Zenon-Prozess	297
11.4.3	Verlust von „Bedeutung“, jedoch nicht von absoluter Information	298
11.4.4	Massereiche Objekte erscheinen lokalisiert	299
11.5	Die Protyposis macht den Messprozess begreiflich	303
12	Die Protyposis und das Ganze	307
12.1	Ein wichtiger Unterschied zwischen Astronomie und Kosmologie	307
12.2	Das Ganze ist der Kosmos	310
12.3	Unbekannte Information – Thermodynamik	311
13	Reflexionen über die AQIs	315
13.1	Der Weg zu den quantischen Zuständen	315
13.2	Komplexes aus Einfachem	316
13.3	AQIs – ein einleuchtendes Postulat	318
14	Symmetriegruppen für Quantensysteme	325
14.1	Der Weg zu den Symmetrien für das Quantenbit	327
14.2	Symmetrien an Quantensystemen mit einem zweidimensionalen Zustandsraum	333
14.2.1	Die normerhaltende $SU(2)$ -Symmetrie	334
14.2.2	Der Übergang von der $SU(2)$ zur $SL(2, C)$	338
15	AQIs und die Planck-Länge	341
15.1	Die gruppentheoretische Definition der Metrik im kosmischen Raum	343
15.2	Die gruppentheoretische Begründung der Planck-Länge mit der Protyposis	347

16	Kosmologie und die Äquivalenz von Masse, Energie und absoluter Quanteninformation	355
16.1	Kosmologische Vorüberlegungen	355
16.2	Ein Blick auf Kosmologie und Allgemeine Relativitätstheorie	361
16.3	Kosmologische Variable	364
16.4	Die Erweiterung von $E = mc^2$ auf die AQIs	367
16.5	Die Energie eines AQIs	370
16.6	Die wichtige Unterscheidung zwischen AQIs und Entropie	371
16.7	Das „It from Bit“ muss reflektiert werden	372
16.8	Die zeitliche Entwicklung des Kosmos	380
16.9	Die Zustandsgleichung des Kosmos	383
16.10	Von der quantischen zu einer faktischen Beschreibung der kosmischen Entwicklung	389
16.11	Eine Nachbemerkung zur kosmologischen Konstante	392
17	Einige Gedanken über den realistischen Kosmos der Protyposis	397
17.1	Ein Bild der kosmischen Entwicklung	397
17.2	Aspekte von Kosmologie und Naturphilosophie	403
17.3	Zusammenfassung der Argumentationslinie	407
17.4	Die Metrik der Protyposis-Kosmologie	408
17.5	Eine unzeitgemäße Überlegung	412
17.6	Der empirische Input	413
18	Gravitation als Wirkung des Kosmos auf seinen Inhalt	417
18.1	Einstein über Kosmologie und Verbindungen von Allgemeiner Relativitätstheorie zur Newtonschen Theorie	417
18.2	Die Lösung des Konsistenzproblems zwischen Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantentheorie	419
18.3	Naturphilosophische Fragen zur Interpretation der Allgemeinen Relativitätstheorie	424
18.4	Eine Begründung von Einsteins Gleichungen aus der Quantentheorie der AQIs	430
18.5	Vom Kosmos zur Allgemeinen Relativitätstheorie!	435
18.6	Die Verbindung zur Empirie	437
18.7	Die wesentlichen Strukturen im Kosmos	440

19	Lösungen für Probleme der gegenwärtigen Kosmologie	445
19.1	Das Koinzidenz-Problem	445
19.2	Das Empirie-Problem	446
19.3	Das Horizont-Problem und die Inflation	446
19.4	Die kosmologische Konstante	447
19.5	Die frühen Schwarzen Löcher	448
19.6	Dunkle Energie und Dunkle Materie	451
19.7	Wofür wurde die Dunkle Materie postuliert?	452
20	Erklärung für ein Phänomen, für das die „Dunkle Materie“ postuliert wurde	459
20.1	Jet-Strukturen an Black Holes	461
20.2	Die Wirkung auf die Umlaufgeschwindigkeiten der Sterne	468
20.3	Gravitationslinsen	471
21	Schwarze Löcher: Entropie und Singularität	473
21.1	Der quasiklassische Zugang zur Entropie der Schwarzen Löcher	474
21.2	Bekensteins Entropie eines Schwarzen Loches	476
21.3	Eine kritische Frage an Bekensteins Resultat	480
21.4	Die Black-Hole-Entropie wird mit der Protyposis plausibel	483
21.5	Das Black-Hole-Modell der Protyposis	485
21.6	Die Innenraumlösung für Black Holes	488
21.6.1	Die Firewall am Horizont des Black Hole	489
21.6.2	Die quantentheoretisch begründete Innenraum-Metrik	489
21.7	Das Black-Hole-Informationsparadox auflösen	492
22	Quantenteilchen im Minkowski-Raum	497
22.1	Der Teilchenbegriff in der Kosmologie	498
22.2	Von den abstrakten Thesen zu den mathematischen Strukturen	499
22.3	Teilchen als Idealisierungen von Objekten	502
22.4	Ein erster Erfolg: Objekte in einem de-Sitter-Kosmos	510
22.4.1	Symmetrien für Quantenbits	510
22.4.2	Quantisierung: Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren	511
22.4.3	Weizsäckers „Stopf- und Rupfoperatoren“	513
22.4.4	$SO(4,1)$ -Darstellung über einem gegebenen Grundzustand	516
22.4.5	Der Übergang zur Poincaré-Gruppe	518

22.5	Masselose Teilchen im Minkowski-Raum	520
22.6	Generatoren der Poincaré-Gruppe	527
22.7	Impulszustände der Poincaré-Gruppe	528
22.8	Impulszustände der Poincaré-Gruppe über dem Vakuum der AQIs	529
22.9	Das Teilchen-Vakuum im Minkowski-Raum	531
22.10	Masselose Teilchen über dem Lorentz-Vakuum	534
22.11	Spinlose Teilchen mit Ruhmasse im Minkowski-Raum	534
22.12	Rechnerunterstützung für Teilchen-Darstellungen mit Spin und Ruhmasse im Minkowski-Raum	536
22.13	Explizite Zustände relativistischer Teilchen	538
22.14	Qubits zu Quantenteilchen – was bedeutet das	541
23	Die fundamentalen Wechselwirkungen	543
23.1	Wie können die allgegenwärtigen Verschränkungen aufgehoben werden?	545
23.2	Vier grundlegende Wechselwirkungen	547
23.2.1	Einige grundsätzliche Fragen	550
23.2.2	Zwei Seiten einer Medaille	550
23.3	Wechselwirkung und dynamische Schichtenstruktur	554
23.4	Wechselwirkung erfordert Trennung	556
23.5	Die Typen der Wechselwirkung	558
23.6	Bisherige Probleme mit den Eichtheorien	561
23.7	Einige Bemerkungen zur Mathematik bei Quantenfeldtheorien	562
23.8	Die Modellierung von Wechselwirkung	566
23.9	Elektromagnetische und schwache Wechselwirkung	567
23.10	Die starke Wechselwirkung	570
23.11	Die Antworten	576
24	Modelle für lokalisierte Objekte	579
24.1	Erläuterung zu den Grenzen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik	579
24.2	Quantenteilchen aus AQIs	582
24.3	Abschätzungen für „Bosonen“ und „Fermionen“	586
24.3.1	Ein Modell für „Bosonen“	586
24.3.2	Ein Modell für „Fermionen“	587
24.4	Die Teilchenmassen als Aufgabe	589

25	Ladungen generieren die Massen	591
25.1	Gravitations- und Higgs-Feld – Ähnlichkeiten und Unterschiede	591
25.2	Drei Ladungstypen	593
25.3	Zum Verhältnis von Materie und Antimaterie	594
25.4	Historische Versuche zur Erklärung der Masse	599
25.5	Ladung, Masse, Gravitation	606
25.6	Modelle für Teilchen im Kosmos der AQIs	607
26	Revue der mathematisch-physikalischen Resultate	609
26.1	Begründung einer Metrik für den kosmischen Raum, in dem wir leben	609
26.2	Die Definition einer kosmischen Zeit	610
26.3	Die Definition der Energie	610
26.4	Die Rolle der Thermodynamik	611
26.5	Das kosmologische Modell der AQIs	612
26.6	Die Allgemeine Relativitätstheorie	613
26.7	Schwarze Löcher	614
26.8	Wirkungen, die der Dunklen Materie zugeschrieben werden	615
26.9	Relativistische Teilchen	615
26.10	Die fundamentalen Wechselwirkungen	616
26.11	Quanteninformation	618
26.12	AQIs und Qubits	619
27	Leben, Bewusstsein, Soziales	621
27.1	Musterbildung	621
27.2	Unbelebtes und Lebendiges – Chemie und Informations-Chemie	622
27.3	Quantentheorie und Biologie	624
27.3.1	Beschreibung von Steuerung als Problem der Darstellung	625
27.3.2	Leben als metastabiles Fließgleichgewicht	627
27.3.3	Elektromagnetische Wechselwirkung – Grundlage aller Lebensvorgänge	628
27.3.4	Dynamische Schichtenstruktur und Leben	632
27.3.5	Vom metastabilen Fließgleichgewicht zum Metabolismus	632
27.3.6	Leben = Stabilisierung durch Informationsverarbeitung	633
27.3.7	Wahrnehmung, Empfindung und Quantentheorie	637
27.3.8	Systemtheorie und die Beschreibung des Lebendigen	641

27.3.9	Die mathematische Struktur zur Beschreibung des Lebendigen ..	645
27.3.10	Das ist Leben	650
27.4	Die Evolution des Lebendigen	651
27.4.1	Ganzheitliche Strukturen und das Entstehen von Bedeutung	652
27.4.2	Räumliche Information und Katalyse	654
27.4.3	Leben als Informationsaustausch, als Kommunikation	656
27.4.4	Rauschen – Quantenphysik im Verborgenen	656
27.4.5	Bedeutung aus dem Wechselspiel von Form und Inhalt	659
27.4.6	Zur RNA-Welt und der anschließenden Entwicklung	660
27.4.7	Leben und Sauerstoff	664
27.4.8	Beziehungsstrukturen in der Evolution	664
27.4.9	„Eingefrorene“ Quantenzustände	667
27.5	Vom Quantenbit zum Bewusstsein	668
27.5.1	Quantenmechanik und Bewusstsein?	669
27.5.2	Bewusstsein und Quantentheorie!	670
27.5.3	Reduktionismus, Dualismus, naturwissenschaftlicher Monismus	676
27.5.4	Bewusstwerdung	680
27.5.5	Bindungsverhalten von Sinneseindrücken	681
27.5.6	Quanteninformationsstruktur und Quantenfeldtheorie	682
27.5.7	Wie kann die Bewusstwerdung modelliert werden?	683
27.5.8	Die „ausgedehnte“ Psyche	688
27.5.9	Subjektivität und Qualia	689
27.5.10	Naturwissenschaftliche Definition von Bewusstsein	690
27.5.11	Zum Unterschied zwischen Bewusstsein und den Korrelaten des Bewusstseins	691
27.5.12	Freier Wille	695
27.5.13	Gedächtnis	697
27.5.14	Geistige Tätigkeiten	698
27.5.15	KI – künstliche Intelligenz	700
27.6	Quantenstrukturen wirken sogar im Sozialen	702
27.6.1	Beziehungsstrukturen wandeln sich zu neuen Gestalten	702
27.6.2	Informationszeitalter	704

28	Von der Naturwissenschaft zur Naturphilosophie	707
28.1	Wege der Erkenntnis	707
28.2	Regeln und Gesetze	710
28.2.1	Bestätigung und Falsifizierung	711
28.2.2	Einheit umfasst „Welt 1, 2 und 3“	712
28.3	Die Grundlage der Erscheinungen	714
28.4	Strukturen der Möglichkeiten	716
28.5	Widersprüche, Wahrscheinlichkeiten, Paradoxien	718
28.6	Wahrscheinlichkeit und Selbstbezüglichkeit anstelle von Paradoxien	720
29	Fazit: Was ist bereits erreicht, was ist zu erwarten?	723
29.1	Plancks Entdeckung und Einsteins Resümee	725
29.2	Ausblick	727
30	Anhänge	731
30.1	Der Teilchen-Zoo der Elementarteilchenphysik	731
30.2	Andere Interpretationen des Messprozesses	733
30.2.1	Zum Unterschied Theorie – Interpretation	734
30.2.2	Die de-Broglie-Bohm-Interpretation	735
30.2.3	Die „Viele-Welten“-Interpretation	740
30.2.4	Superdeterminism	742
30.3	Die Multiplizitäten von n-fachen Tensorprodukten zweidimensionaler Darstellungen der $SU(2)$	744
30.4	Die reguläre Darstellung der $SU(2)$	746
30.5	Unbegrenzte Anzahlen von AQIs und die Spezielle Relativitätstheorie	748
30.6	Rechnungen mit der Vaidya-Metrik	749
30.7	Zur Rotation von Galaxien	753
30.8	Vertauschungsrelationen mit Parabose-Operatoren	757
30.9	Bemerkungen zur Struktur der $SU(3)$	758
31	Danksagung	763
	Index	765

Vorwort zur zweiten Auflage

Am 1. Juli 2023 wurde das Weltraumteleskop Euclid gestartet. Seitdem liefert es wunderschöne und sehr aufschlussreiche Bilder über einen großen Bereich des Universums. Die offizielle Webseite beginnt mit der Feststellung:

„Euclid, our dark Universe detective, has a difficult task: to investigate how dark matter and dark energy have made our Universe look like it does today. 95 % of our cosmos appears to be made of these mysterious ‚dark‘ entities. But we don’t understand what they are because their presence causes only very subtle changes in the appearance and motions of the things we can see.“⁽¹⁾

(Euclid, unser Detektiv für das dunkle Universum, hat eine schwierige Aufgabe: Er soll herausfinden, wie Dunkle Materie und Dunkle Energie unser Universum zu dem gemacht haben, was es heute ist. 95 % unseres Kosmos scheinen aus diesen mysteriösen „dunklen“ Wesenheiten zu bestehen. Aber wir verstehen nicht, was sie sind, weil ihre Anwesenheit nur sehr subtile Veränderungen im Aussehen und in den Bewegungen der Dinge verursacht, die wir sehen können.)

Die Dunkle Energie und Dunkle Materie sind zwei zentrale Grundpfeiler für das Standardmodell der Kosmologie. Es wird als das Λ CDM-Modell bezeichnet. Dabei steht Λ (Lambda) für die sogenannte kosmologische Konstante. Sie kann aber auch die sogenannte Dunkle Energie darstellen. CDM ist Cold dark matter, also kalte Dunkle Materie. Über Dunkle Energie und Dunkle Materie, wird von den Mainstream-Kosmologen angemerkt, dass man bisher nicht versteht, was sie sind. *Das Standardmodell der Kosmologie* baut also zu 95 % auf etwas Unverstandenem auf.

Im Gegensatz zum kosmologischen Modell hat sich das *Standardmodell der Teilchenphysik* als erfolgreich erwiesen. Es hat zur Entdeckung des Higgs-Teilchens geführt.

¹ https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Euclid/Euclid_s_first_images_the_dazzling_edge_of_darkness, vom 07. 11. 2023

Jetzt jedoch wird oft gesagt, man sei in einer Krise, denn man möchte gute Gründe für weitere neue Entdeckungen finden. Die Experimente sind nun so genau geworden, dass kleine Abweichungen vom Teilchen-Modell erkennbar werden. Sie haben aber zu keinen neuen Teilchen geführt. Nach den gängigen Hoffnungen der Teilchenphysik sollen die unbekannten 95 % im Universum mögliche Argumente für Sorten von „neuen Teilchen“ liefern. Es gibt eine Vielzahl von Hypothesen über sie und vielfältige Namen dafür, jedoch seit Jahrzehnten keinen experimentellen Nachweis.

Der Mainstream befindet sich offenbar in einer Sackgasse. Ein solcher Einwand wäre zu billig, wenn nicht zugleich mathematische und physikalische Strukturen vorgeschlagen werden, die etwas Besseres aufzeigen. Dazu gehört eine deutliche Reduzierung der freien Parameter, deren Anzahl auch im Standardmodell der Teilchenphysik zu groß ist. Das sind willkürlich festlegbare Größen, mit denen experimentelle Kurven an eine hypothetische Gleichung angepasst werden können. Ferner war eine Verbindung zwischen dem Einfachen, dem Großen und dem Kleinen als drei verschiedenen Beschreibungsbereichen der Natur notwendig gewesen. Das geschieht im Buch, u. a. auch mit einer ausführlichen Kritik am Standardmodell der Kosmologie und mit einer Begründung des Standardmodells der Teilchenphysik.

Die mathematische Struktur der Quantentheorie hat seit einem halben Jahrhundert einen Denkweg eröffnet, welcher völlig neue Vorstellungen ermöglicht. Diese erfordern allerdings einen neuen Blick auf manche der bisherigen Dogmen.

Es war und ist ein Ziel des vorliegenden Buches, die Grundprinzipien der Quantentheorie verstehbar werden zu lassen und zugleich für die speziell Interessierten auch die mathematischen Grundlagen dafür aufzuzeigen.

Die Quantentheorie ist die beste, weil genaueste Theorie, mit der wir Menschen die Naturvorgänge beschreiben. Nicht ein einziges experimentelles Ergebnis hat ihr widersprochen. Ihr Geltungsbereich ist universell. Er reicht von den einfachsten Strukturen, den abstrakten Quantenbits, zum gesamten kosmischen Raum und andererseits bis zu den kleinsten elementaren Teilchen. Als Theorie über das Wirken von Möglichkeiten konfrontiert uns die Quantentheorie mit Phänomenen, die im Bereich des Faktischen nicht vorkommen. Die Quantentheorie stellt die mathematische Struktur bereit, mit der das Entstehen von etwas Neuem, Anderem und Komplexen aus Einfachem erklärt werden kann. In vielen Fällen ist ihre hohe Genauigkeit nicht immer notwendig, da kann eine Theorie über Fakten genügen, wie es die klassische Physik ist.

Ich bin mir darüber im Klaren, dass im Buch zwei verschiedene Lesergruppen angesprochen werden sollen. Zum einen gibt es ein breites Interesse, die in der Schule teilweise unzureichend vermittelten Kenntnisse über die Wirklichkeit in der Natur weiter auszubauen. Für diese Leser finden sich im Buch sehr viele Stellen, die man ohne Studium der mathematischen Zusammenhänge verstehen kann.

Andererseits führt unter den gegenwärtigen Lehr- und Forschungsbedingungen die Beschäftigung mit der Physik und mit den Teilen der Naturwissenschaft, die wie Chemie und Biologie aus guten Gründen nicht mehr zur Physik gerechnet werden, dazu, dass Zeit und Kraft für ein Befassen mit den Grundlagen der Naturwissenschaften nur schwer erübrigt werden können. So wichtig auch die Anwendungen der naturwissenschaftlichen Erkenntnisse sind, so stammen doch diese Anwendungen aus Arbeiten an den Grundlagen von früheren Wissenschaftler-Generationen.

Ein heutiger Vorlauf in der Reflexion der Grundlagen ist eine Voraussetzung für kreative Wissenschaft von morgen. Da diese Reflektionen nicht auf philosophische Überlegungen beschränkt werden dürfen, habe ich es als notwendig empfunden, auch die Zusammenhänge zu verdeutlichen, die nur in der Sprache der Mathematik einfach formuliert werden können.

Mancher Inhalt kann als eine Herausforderung angesehen werden. Denn hier wird gezeigt, dass aus der mathematischen Struktur des fundamentalen Teils der Naturwissenschaften, aus der Physik, geschlussfolgert werden muss, dass die Grundlage der Realität eine nichtmaterielle Struktur ist und dass sich aus dieser die materiellen Strukturen und deren Verhalten ableiten lassen.

Wir erleben gegenwärtig noch eine gewisse Euphorie über kleinste materielle Teilchen, die wie gesagt mit den geheimnisvollen Namen Dunkle Materie und Dunkle Energie bezeichnet werden und für deren Existenz trotz jahrzehntelanger intensiver Suche jeder experimentelle Hinweis fehlt. Der ausgebliebene Erfolg verführt leicht dazu, nur nach neuen größeren und aufwendigeren Experimenten und damit nach einem „mehr des Gleichen“ zu rufen. Die Vorstellung einer Alternative, nämlich auch nach neuen Ideen Umschau zu halten, wird nicht als ein hilfreicher Hinweis angesehen. Ich habe es erlebt, dass er als Provokation missdeutet wird.

In der Naturwissenschaft und somit auch in der Naturphilosophie werden gegenwärtig drei besonders wichtige Probleme betont. Sie zielen auf drei Bereiche, die scheinbar so weit voneinander entfernt sind, dass ein Zusammenhang zwischen ihnen auf den ersten Blick sehr unwahrscheinlich erscheint. Sie betreffen die Kosmologie, also das Größte und Umfangreichste, was man in der Naturwissenschaft untersuchen kann. Sie betreffen weiterhin die kleinsten elementaren Teilchen, also Dasjenige, was man als die Grundstrukturen der Materie bezeichnen kann. Und als drittes wird das Problem des Bewusstseins hinzugerechnet. Es ist dasjenige, was uns Menschen mit Sprache und Schrift zur Kommunikation befähigt und was damit die Voraussetzung für eine Möglichkeit von Naturwissenschaft und Naturphilosophie ist.

Auf diese Probleme wird eine Antwort gegeben, die auf naturwissenschaftlich fundierten Erkenntnissen beruht.

Während man in der Philosophie die vielfältigsten Theorien darüber entwickelt hat, was man unter „Erklären“ verstehen soll, verfolgt man in der Naturwissenschaft schon immer ein gleichermaßen nützliches wie einsichtiges Prinzip: Unter „Erklären“

versteht man den theoretischen oder tatsächlichen Aufbau von komplizierten und komplexen Strukturen aus einfachen Strukturen. Diese sollen letztlich so einfach sein, dass ein weiterer Erklärungsbedarf nicht ersichtlich ist. So pflegt man seit Jahrtausenden die Vorstellung, man könnte alles das, was uns in der Realität begegnet, letztendlich in kleinste Teile zerlegen. Diese sollen ihrerseits so klein und einfach sein, dass eine weitere Zerlegung bei ihnen nicht mehr nötig und möglich ist. Seit den alten Griechen bezeichnet man sie als Atome.

Die Geschichte der Naturwissenschaft zeigt, wie unerhört erfolgreich diese Idee von „atomaren Objekten“ gewesen ist. Jetzt aber ist Naturwissenschaft so genau geworden, dass die Erklärungskraft dieser Vorstellungen an ihr Ende gelangt ist. Die Schwierigkeiten, die gegenwärtig in der Kosmologie, in der Elementarteilchenphysik und in der Hirnforschung Probleme bereiten, sind verbunden mit den Vorstellungen über „kleinste materielle Teilchen“ als die *Letztgrundlage der Wirklichkeit*.

Im Buch wird gezeigt, welche Lösungen sich mit der Quantentheorie ergeben haben.

Schon in meiner Jugend wollte ich wissen, „was die Welt im Innersten zusammenhält“. Wie erwähnt sollten das damals die „einfachsten Bausteine der Natur“ sein. Mein Weg zum Studium der Theorie der Elementarteilchen war damit vorgezeichnet.

Dieser Bereich der Physik firmierte damals noch unter dem Begriff Hochenergiephysik. Allerdings hat sich damals niemand gefragt, wieso das Grundlegende und Einfachste mit den höchsten Energien zusammenhängen soll. Meine jahrzehntelange Befassung mit den Grundlagen der Physik und mit ihren mathematischen Strukturen führte mich zu anderen Vorstellungen. Die kleinen Teilchen sind zwar durchaus wichtig. Sie sind aber viel zu kompliziert, als dass sie tatsächlich die Basis für ein Verstehen der Wirklichkeit in ihrer vollen Breite bereitstellen könnten.

Im Buch wird daher dasjenige ausführlich dargelegt, was zu den tatsächlichen Grundlagen der Quantentheorie und damit der gesamten Physik gehört.

Es sind nicht die kleinsten, sondern stattdessen die einfachsten Strukturen.

Diese Aussage mag auf den ersten Blick simpel erscheinen. Aber eine solche Erkenntnis erfordert eine radikale Umkehr in den Vorstellungen über die Natur und damit des naturwissenschaftlichen Denkens. Die notwendige Veränderung erstreckt sich nicht nur auf die elementaren Teilchen, sondern auch auf die Kosmologie, auf die Wissenschaft, die sich mit der Entwicklung des Universums beschäftigt. So hat sie es auch ermöglicht, die Phänomene zu erklären, für die man die Dunkle Materie und die Dunkle Energie postuliert hatte. Sie lieferte nicht zuletzt auch eine Lösung für die Vorstellungen vom Bewusstsein.

Dass die räumlich kleinsten Teilchen die maximale Energiedichte erfordern, ist bekannt seitdem Max Planck die Quanten entdeckt hatte, also seit mehr als einem Jahrhundert. Die konsequente Schlussfolgerung besagt, dass das mathematisch und physikalisch Einfachste mit der geringsten Energiedichte und somit mit der größten Ausdehnung verbunden ist. Diese Einsicht ist Grundlage für das Verstehen der Physik.

Die gesuchten mathematisch einfachsten physikalischen Quantenstrukturen werden räumlich die maximale Ausdehnung besitzen. Sie sind so einfach, dass ihnen noch keinerlei Eigenschaft, also auch kein konkreter Ort im Kosmos zugeordnet werden kann. Sie haben auch sonst noch keine andere spezielle Eigenschaft, sie sind also noch frei von jeder konkreten Bedeutung. Die Mathematik der Quantentheorie zeigt dann, wie sich daraus auch die lokalisierten materiellen und energetischen Strukturen entwickeln können.

Ausgedehnte ganzheitliche Systeme werden in der Physik als „nichtlokal“ bezeichnet. In der Geschichte der Naturwissenschaften wird deutlich, dass die Beschreibungen der Natur eine immer abstraktere Form annehmen. Die Sprechweisen hingegen bleiben oft an den alten Vorstellungen hängen. Wir lassen noch immer „die Sonne aufgehen.“ Das Konkrete ist bildhaft und anschaulich, aber es erlaubt kaum Regeln und erst recht keine Naturgesetze. Diese erfordern mit immer größerem Geltungsbereich immer abstraktere Strukturen. Das bedeutet, dass die mathematisch abstraktesten Strukturen notwendig sind, um die Grundlagen zu erfassen.

Es sei noch einmal betont, der Ausgangspunkt des Buches war die Mathematik der Quantentheorie. Sie führt zu den einfachsten Grundstrukturen. Aus denen lässt sich dasjenige rekonstruieren, was die Physik beschreibt.

Die einfachsten Quantenstrukturen sind mathematisch identisch mit denen, die als Quantenbits bezeichnet werden.

Die zwei Begriffe „Bit“ und „Quantenbit“ sind weit in den öffentlichen Sprachgebrauch vorgedrungen. Die Möglichkeiten der Computer und vor allen diejenigen der Systeme der künstlichen Intelligenz werden zunehmend über Wissenschaft und Forschung hinaus auch in Wirtschaft, Politik und in den Medien wahrgenommen. Das Ignorieren der quantentheoretischen Grundlagen ist natürlich beim Quantencomputing unmöglich. Dass aber bereits schon das normale Computing ohne eine Technik auf Basis der Quantentheorie unmöglich wäre, wird selten betont.

Wichtig für das Verstehen des Lebens und noch wenig in seiner Bedeutung dargestellt wird die Tatsache, dass alle Prozesse einer biologischen Informationsverarbeitung von den Einzellern über die Pflanzen, Pilze und Tiere bis hin zum menschlichen Bewusstsein auf dem Austausch von Lichtquanten, den Photonen beruhen, also auf Quantenprozessen.

Wenn von Quantenbits gesprochen wird, so ist allerdings zu beachten, dass die Quantenbits als Quanteninformation im Computer als Eigenschaft von kleinen Teilchen erscheinen. Durch diese Anbindung an lokalisierte Objekte tritt das Quantenbit in diesem Fall selbst ebenfalls lokal auf.

Die fundamentalen Quantenstrukturen, die AQIs, soll man sich hingegen nicht als Eigenschaft von etwas anderem vorstellen. Ein AQI, ein Abstraktes und Absolutes Bit von QuantenInformation, ist ein Quantenbit noch ohne jede Anbindung an etwas Lokales.

Die von Einstein aufgezeigte Äquivalenz von Materie und Bewegung, $E = mc^2$, übersteigt jede anschauliche Vorstellung. Trotzdem gehört sie zu den experimentell immer wieder bestätigten Grundtatsachen. Diese Äquivalenz konnte mit den AQIs erweitert werden auf eine Struktur, die unter anderem auch als das erscheinen kann, was man üblicherweise als Information bezeichnet.

Eine Äquivalenz, wie z. B. $E = mc^2$, ist keine Gleichheit. Äquivalenz bedeutet einerseits, dass es Prozesse gibt, bei denen das eine in das andere umgewandelt werden kann. Sie bedeutet andererseits, dass die Unterscheidung in zwei verschiedene Erscheinungsformen sinnvoll und begründet ist und in vielen Fällen aus praktischen Gründen nicht aufgehoben werden soll.

Von den AQIs führt ein gerader Weg zu dem, was als Verschränkung und als Nichtlokalität bezeichnet wird. Verschränkungen führen aus einfachen Quantensystemen zu komplizierteren Quantensystemen, in denen diese einfachen Systeme nicht mehr als sichtbare Teile vorhanden sind. Verschränkungen verbinden die Ausgangsteile auf eine multiplikative Weise, sodass *das Ganze mehr wird als die bloße Summe seiner Teile*.

Ein AQI ist so wenig Information, dass es nicht einmal einen Ort markieren kann. Es ist ausgedehnt – nichtlokal – und zwar über den gesamten kosmischen Raum – und trotz der Ausdehnung teilelos. Im Unterschied zum üblichen Verständnis von „Information“ kann ein AQI auch keine Bedeutung vermitteln. Ein AQI ist noch bedeutungsfrei. Deshalb war ein neuer Begriff für die Menge aller AQIs notwendig: Protyposis.

Wenige Monate nach dem Erscheinen der ersten Auflage dieses Buches wurden drei Experimentalphysiker mit dem Nobelpreis für ihre Experimente in genau denjenigen Bereichen der Quantentheorie geehrt, die im Buch als ihre wesentlichen Aspekte herausgearbeitet worden waren. Der Nobelpreis wurde für Experimente im Zusammenhang mit Nichtlokalität und mit Verschränkung verliehen. Mit der Physik der AQIs werden derartige Versuche leichter verstehbar.²⁾

Wenn bei der Beschreibung dieser Experimente oft noch von „zwei Teilchen“ oder von „zwei Photonen“ gesprochen und geschrieben wird, so ist dies der jahrhundertelangen Konzentration auf die kleinen Teilchen in der Ausbildung der Physiker geschuldet. Dabei wird aber ein anderer wesentlicher Aspekt der Quantentheorie ausgeschlossen. Die Quantentheorie zeigt auf, dass nicht nur in unserem menschlichen Leben, sondern auch bereits in der unbelebten Natur bloße Möglichkeiten reale Wirkungen hervorrufen können.

² Görnitz, T.: https://www.academia.edu/92858403/Explaining_Nobel_Prize_Physics_2022; https://www.researchgate.net/publication/364648473_Der_Nobelpreis_Physik_2022_-Die_seit_langem_ausstehende_offentliche_Anerkennung_fur_Experimente_welche_die_theoretischen_Aspekte_einer_grundlegenden_Eigenschaft_der_Quantenphysik_bestatigen

In der Sprache der Physik spricht man von Superpositionen.

Die „zwei Quanten“, z. B. zwei Photonen, sind in ihrer Verschränkung bloße Möglichkeiten, sie dürfen nicht wie etwas Faktisches gedacht werden. Selbst wenn am Beginn und am Ende eines solchen Experimentes die gleichen Strukturen anzutreffen sind, so sind diese während ihrer Verschränkung zwischen Anfang und Ende nicht als eigenständige Teile des Ganzen vorhanden. Erst das *Erkennen des Ganzen als ein „mehr als die Summe der Teile und als etwas anderes als diese“* kann ein Verstehen bereits ohne Einschluss des gesamten mathematischen Apparates ermöglichen.

Der Einschluss der Quanteninformation als Grundlage in die Physik hatte es auch ermöglicht, die für das Verstehen des Lebens für lange Zeit als wichtig erachteten, aber nicht zur Naturwissenschaft gehörenden Begriffe wie „Lebenskraft“, „Entelechie“ oder „Elean vital“ abzulösen. Sie konnten ersetzt werden durch eine in die Naturwissenschaften eingebundene Quanteninformation, die zu Steuerungen fähig ist.

Die „Steuerung“ stammt aus der Schifffahrt. Der Steuermann nimmt Informationen aus der Umwelt und über das Schiff auf. Dann wird von ihm mit einem relativ verschwindenden Einsatz von Energie die Bewegung des Schiffes beeinflusst. Auch in der Technik versteht man unter Steuerung die Beeinflussung eines Gerätes unter vernachlässigbarem Energieeinsatz.

Ähnlich ist es in der Biologie. Die „Energiewährung“, das Adenosintriphosphat (ATP), und dessen „Recycling“ aus Adenosindiphosphat (ADP), betrifft eine Masse, die täglich etwa der Hälfte der Körpermasse gleichkommt. Die Informationen hingegen, die die betreffenden Prozesse auslösen und steuern, sind im Vergleich dazu winzig. Die Selbststabilisierung durch eine steuerungsfähige Quanteninformation ist ein zentraler Aspekt des Lebens. Diese Vorstellung kann jetzt aus der Metaphysik in die Physik übergeführt werden. Erst damit wurden auch die Grundlagen für ein naturwissenschaftliches Verstehen des Bewusstseins geschaffen – ein Verstehen, welches über eine Beschreibung der Verarbeitungsorte im Rahmen der Hirnphysiologie hinausgeht und das die Wirkung des Bewusstseins auf das Gehirn naturwissenschaftlich erklärbar gemacht hatte.³⁾

³ Siehe z. B. Görnitz, T.; Görnitz, B. (2016) Von der Quantenphysik zum Bewusstsein: Kosmos, Geist und Materie, Springer, Heidelberg

Vorrede zur ersten Auflage

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 frühere 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, sodass 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 neben den mathematischen Grundlagen 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 Welt-

sicht, 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 berechnete 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 oder gar unmöglich gemacht.

In der Wissenschaft sind wir daher herausgefordert, 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. (Dieser Ausdruck verschleiert, dass 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 müssen).

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 kosmische 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 war.) 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.

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 das, 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.“⁴⁾

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

⁴ Kant, I. (1786) *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*, A VIII.

keine Physik. Man kann physikalische Strukturen sprachlich darstellen und erläutern. Das ist eine ständige Aufgabe der Wissenschaftler. Sie bleibt wichtig, u. a. auch um vielen Missbrauch in die Schranken zu weisen, der mit dem Begriff „Quanten“ getrieben wird. Allerdings 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 Fundamentalgrößen.

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 Sonnenauf-

gang 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 Materiel-len wird durch die Naturwissenschaft eine dahinterstehende Quanteninfor-mationsstruktur 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 nicht zu langer 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 ausge-dehnt 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“ in der Naturwissenschaft 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 AQIs als Quantenbits definierbar. Nur mit sehr vielen von ihnen werden spezielle Strukturen wie z. B. 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.⁵⁾

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, die mathematisch als Wahrscheinlichkeiten erfasst werden können.

Dass faktische Kräfte reale Wirkungen erzeugen, ist evident. Die Quantentheorie zeigt darüber hinaus, dass z. B. Elektronen sich anders verhalten, wenn sie die Möglichkeit haben, unkontrolliert und unbeobachtet durch zwei nebeneinander liegende Spalten fliegen zu können, als wenn sie durch Kontrolle zu einem faktischen Verhalten gezwungen werden und sie somit faktisch nur durch einen Spalt fliegen.

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

Solange also das Elektron nicht in einen faktischen Zustand gezwungen wird, dann besitzt es die *Möglichkeit*, zur gleichen Zeit durch beide Spalten fliegen zu können. Die Wahrscheinlichkeiten dafür können berechnet werden – und das ist weder ein Widerspruch noch ist es unverständlich.

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

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

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

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

⁵ Görnitz, T. (1999) *Quanten sind anders: Die verborgene Einheit der Welt*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

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 Löchern⁶. 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.

⁶ Sie werden auch als Black Hole bezeichnet, oder auch nur kurz BH.

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 – und das ist eine historisch neue Einsicht aus der Quantentheorie – neben den Fakten auch die Möglichkeiten, die noch nicht faktisch geworden sind. Mit „Möglichkeiten“ ist dabei nicht dasjenige gemeint, was bereits als Fakten vorliegt, uns aber unbekannt ist. Es ist evident, dass wir Menschen uns auch nach den Möglichkeiten richten, die vorhanden sind oder die wir erwarten. Überraschend dürfte es aber sein, dass auch Möglichkeiten wirksam werden, die aus der Umgebung des betrachteten Quantenobjektes resultieren, und dass dies zu den Grundeigenschaften der Natur gehört, welche die Quantentheorie beschreibt. So verhalten sich beispielsweise Elektronen oder Photonen unterschiedlich beim Durchgang durch zwei nebeneinanderliegende Spalten: Das Verhalten richtet sich danach, ob die Möglichkeit besteht, unkontrolliert hindurchgelangen zu können, oder ob diese Möglichkeit durch eine Kontrolle beseitigt wird, weil festgestellt wird, durch welchen der Spalten sie faktisch geflogen sind. In Abschnitt 10.5 werden wir das ausführlicher betrachten.

In diesem Sinne ist die Physik die Wissenschaft derjenigen mathematisch darstellbaren Strukturen, die reale Wirkungen erzeugen können.

Was man in der Mathematik konstruieren kann, das 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 verhelfen, die Realisierung von unerwünschten Möglichkeiten zu verhindern, also ihr „Faktisch-Werden“ zu vermeiden. Das kann z. B. zur „Paradoxie der Prophylaxe“ führen: Unein-

sichtige 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 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 zumeist 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. Prinzipien sind das, 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, dass sie der Logik zugrundeliegen. Damit

¹ Gaiser, K. (1998) *Platons ungeschriebene Lehre. Studien zur systematischen und geschichtlichen Begründung der Wissenschaften in der Platonischen Schule*, 3. Auflage, Klett-Cotta, Stuttgart; Reale, G. (1993) *Zu einer neuen Interpretation Platons: Eine Auslegung der Metaphysik der großen Dialoge im Lichte der ‚ungeschriebenen Lehren‘*, Ferdinand Schöningh, Paderborn

müssen sie also nicht der Logik der Fakten unterliegen. Deshalb wohl ist diese Lehre nicht aufgeschrieben worden, denn das „Eine“ und die „unbegrenzte Zweiheit“ formen einen logischen Widerspruch, *wenn sie zugleich als Fakten gedacht werden*.

Wir können das Ganze, das Eine, erst in seiner Zerlegung in Vielheiten begreifen und erklären, denn eine Theorie bezieht sich auf vieles. Über ein Unikat sind aber Einsichten möglich.

Mit einer Formel wird eine Beziehung zwischen Strukturen aufgezeigt, die zuvor als Verschiedenes verstanden wurden. Ein gutes Beispiel dafür ist die berühmteste Formel der Physik: $E = mc^2$. Sie zeigt die Äquivalenz zwischen Materie und Energie. Diese beiden Größen waren bis dahin als etwas völlig Verschiedenes interpretiert worden.

Man kann also Beziehungen zwischen physikalischen Größen in einer Formel verdeutlichen und damit Äquivalenzen aufklären. Andere Formeln, die Differentialgleichungen, ermöglichen die Berechnung von zeitlichen Veränderungen von Systemen für viele verschiedene Ausgangssituationen.

In allen diesen Fällen ist es wichtig, dass viele verschiedene Situationen oder Fälle und nicht nur ein einziger Spezialfall betrachtet wird. Schließlich ist eine Formel als Ausdruck für eine Gesetzmäßigkeit nur für eine Vielheit sinnvoll und nicht für das „Eine“.

Im Buch geht es zuerst um fundamentale Einsichten über das Ganze. Daraus ergeben sich dann für bestimmte Bereiche der Realität sehr erfolgreiche und sehr bewährte Theorien. So wird im Folgenden gezeigt, wie aus dem *Prinzip der Protyposis* die bewährten Theorien der Physik für bestimmte Teilbereiche der Erscheinungen im Kosmos 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 „Protyposis“ 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 bedeutungsoffen oder bedeutungsfrei im Gegensatz zu den Qubits des Quantencomputers.

Zur Wortbedeutung dieses ungebräuchlichen Begriffes:

Protyposis stammt aus dem Altgriechischen. Der Wortstamm τύπτω (typto) bedeutet: „schlagen, auch z.B. eine Münze prägen“; προτύπτω (protypto) „vorwärtsdringen, vorbrechen“; τυπώω (typoo) „eindrücken, prägen“; προτυπώω (protypoo) „eine Vorstellung von etwas Zukünftigem geben“; προτύπος (protyposis) „das Vorgeprägte, das Sich-Ausprägende, Sich-Entwickelnde“.

Die AQIs der Protyposis, die das Kernstück des Buches bilden, sollen bereits hier kurz vorgestellt werden:

Die AQIs sind die einfachsten Quantenstrukturen.

Aus den AQIs lassen sich alle komplexen Strukturen konstruieren.

Ein AQI kann als eine „kosmische Grundschiwingung“ visualisiert werden.

Die Zustände eines AQIs spannen einen lediglich zweidimensionalen komplexen Raum \mathbb{C}^2 auf.

Da ein AQI die mathematische Struktur eines Qubits hat, aber noch keine spezielle Bedeutung haben kann, war für die Gesamtheit aller AQIs ein neuer Begriff notwendig: Protyposis.

Wie sich die AQIs der Protyposis zu einer Kosmologie und zu den speziellen Strukturen im Kosmos formt, zu Atomen, Photonen und zu bedeutungsvoller Information, ist Gegenstand der folgenden Kapitel.

1.1 Einstein und Weizsäcker über die Grundlagen der Naturwissenschaft

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

„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.“⁽²⁾
 (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.)

² Einstein, A. (1954) *The Meaning of Relativity*, 6th ed., Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA, Appendix II D, S. 164

Einstein meinte offenbar eine Struktur, die eher mit den ganzen Zahlen verwandt ist als mit den reellen Zahlen (dem Kontinuum, wie die Feldtheorien).

Wenn Einstein nach seinem kreativen Forscherleben mit Schwerpunkt auf den Feldtheorien Derartiges publiziert, dann sollte dies Anlass für gründliches Nachdenken sein. *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“ miteingeschlossen 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 Maxwellschen 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 geahnt 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 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 den 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 der beiden Seiten einer Münze illustriert. Von diesen kann immer nur eine gesehen werden. Ich halte die damit vermittelte bildliche Vorstellung für recht unglücklich gewählt. Sie vermittelt den Eindruck, als könnten beide komplementäre Aspekte zur gleichen Zeit faktisch existieren, aber nur nicht erkannt werden. Das trifft nicht zu. Komplementäre Eigenschaften existieren gleichzeitig stets nur als Möglichkeiten. Die beiden Seiten einer Münze hingegen als Fakten.

³ Hempel, C. G.; Weizsäcker, C. F. v. (1955) *Komplementarität und Logik I*, Naturwiss. 42, S. 521–529, S. 545–555, (1958) *Komplementarität und Logik II*, Z. f. Naturforschung 13a, S. 245

⁴ siehe z. B. Görnitz, T. (2020) *Das Wirken der Quanten – Band 1: Antworten auf die großen Fragen der Physik*, DAS NEUE DENKEN, München

Komplementäre Eigenschaften erscheinen als zugleich notwendige Charakterisierungen eines Systems, die jedoch in der betreffenden theoretischen Beschreibung niemals gleichzeitig 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“. Wie Weizsäcker gern berichtete, hatte Bohr 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 oder gedacht werden.

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

Eine 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 dem Doppelspaltversuch (Abschnitt 10.5) 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 8 und 9 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 eine Abfolge von einfachen Fragen beendet werden kann. Einfache 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 Trivialität mit der sehr kühnen Behauptung, dass sich aus der Grundstruktur der Quantentheorie eine der bis dahin ungeklärten Fragen der Physik – die der Begründung der Dreidimensionalität der Realität – lösen lassen würde.

1.2 Ein wenig Mathematik

Ein paar mathematische Begriffe sollen so weit erläutert werden, dass es für das Verständnis hilfreich ist.

1.2.1 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 je drei eigene Koordinaten für dessen Orte und Geschwindigkeiten einführen.

⁵⁾ Hempel, C. G.; Weizsäcker, C. F. v. (1955), S. 552

Die Mathematiker erkannten bald, dass man eine solche Struktur als einen Raum mit vielen Dimensionen verstehen kann. Bei einem Teilchen ergeben Ort plus Geschwindigkeit einen mathematischen sechsdimensionalen Raum. Bei mehreren Teilchen erhalten wir einen Raum mit insgesamt sechsmal so viel Dimensionen, wie es beteiligte Teilchen gibt.

Die mathematischen Vorstellungen gehen also weit über „Länge, Breite und Höhe“ hinaus. Trotzdem sind diese mathematischen Abstraktionen auch für physikalische Vorstellungen äußerst nützlich. Die berühmte Mathematikerin Emmy Noether (1882–1935) prägte den Begriff der „abstrakten Anschauung“, der auch für manche physikalische Probleme hilfreich ist.

Die Entwicklung ging 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.

Man könnte manche der gegenwärtigen Modelle der Physik so karikieren: 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 überlegen, welche rationalen Gründe es 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.

1.2.2 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. Bei der Addition wird das Ende eines Vektors an die Spitze des anderen angefügt.

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 bei einem Quantensystem darauf hingewiesen, dass mit einem konkreten Zustand stets auch die Möglichkeit von anderen Zuständen gegeben ist.

Nicht nur in der Mathematik, auch in der Physik wurde der abstrakte mathematische Raumbegriff immer umfassender verwendet. Schließlich ergab sich die Frage, welche Dimension der „Realität“ zuzusprechen ist. So gibt es gegenwärtig in der Physik nicht nur die Vorstellung, dass einige der mathematischen Dimensionen etwas mit der Realität zu tun haben könnten, sondern auch Vorschläge, nach diesen „verborgenen Dimensionen“ experimentell zu suchen. Mir ist nicht bekannt, dass das erfolgreich war.

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

Index

Symbole

17 Kamele 655
 π 247f.
 Λ CDM-Kosmologie 359

A

Abel, Henrik 330
Absicht 635
Absichten 696
Absolute Bits von QuantenInformation 37
Absolute, das 37
absolute Information 103
Abstammung des Menschen 23
Abstraktion 281, 302, 633f.
Abstraktionsstufen 638
AdS-Modelle 383
Agostini, Pierre 374
Ähnliches 22, 66
algebraic theory 4
Algorithmus 198
Al-Khalili, Jim 289
All-Aussage 711
Allgemeine Relativitätstheorie 35, 97, 362, 419
Allgemeine Relativitätstheorie, Vakuum-Lösung 109
Allmacht 20
Alter des Kosmos 230
Alternative, einfache 6
Alternativlosigkeit 251
Ambivalenz 76, 137
Amplitude 151
Analogien 640
Anästhetika 686
Anderson, Carl David 731
Anderson, Philip Warren 174
Anordnung, räumliche 654
Anti-de-Sitter-Modelle 383
Anti-de-Sitter-Universum 109
Antigravitation 366, 451
Antimaterie 520, 532, 731
Antiteilchen 54
antiunitär 510
Anti-Ur 510, 539
Approximation 210, 508, 553, 678
a priori 226
AQI XXIX, XXXI, 3, 35 ff., 53 ff., 67, 114 ff., 120, 148 ff., 241, 281, 298, 402, 503, 725
Äquivalenz 148
Arbeit 100
archai 710
Archetypen 242
Aristarch von Samos 86f., 222
Aristoteles 16, 52, 229, 239, 710

Arndt, Markus 185
 Aromatizität 42
 Aspect, Alain 166, 171, 179, 545
 Assoziation 634
 Astronomia Nova 360
 Astronomie, griechische 222
 Ätherdruck 604
 Ätherwind 203
 Atom 27, 148
 – stabiles 41
 Atombombe 242
 Atomist 148
 Atomkern 43, 56, 599
 Atommodell 474
 a-tomos 146
 Atomuhr 207
 ATP 679
 Attraktor 632
 Auge 678
 Augustinus 216
 Aussenden von Information 300
 Axiom 89, 226, 709
 Axiomensystem 226
 Axon 678

B

Baars, Bernard J. 694
 Babylon 202
 Backward Causation 16
 Bacon, Francis 89
 Beamen 190
 Beckenstein-Hawking-Entropie 485
 Beck, Friedrich 686
 Beckmann, Franz 372
 Bedeutung 52, 80, 152, 161, 177f., 280, 299, 653
 Bedeutungsfreiheit 120
 Bedeutungsstrukturen XXXII
 Bedeutungszuordnung 280
 Bedingung a priori 225
 Bekenstein-Hawking-Entropie 347, 473
 Bekenstein, Jacob 93, 99f., 105f., 114f., 422, 475ff., 484, 582
 Bell, John 166, 181
 Benennung 280
 Beobachter 268, 279, 289, 292, 302, 305
 Beobachtung 21, 159
 Bertalanffy, Ludwig von 641
 Beschleuniger 145, 545
 Beschleuniger-Experiment 296
 Beschleunigung 230, 406
 Beschreibung 271, 657
 Bessel, Friedrich Wilhelm 87
 Bethe, Hans 253, 591
 Bewegung 148
 Bewegung an sich 27
 Bewegungen, natürliche 81
 Bewegungsgruppe 506
 Bewertung 179, 633
 Bewusstsein 75, 78, 130, 134, 144, 199, 268, 273, 289, 302, 672, 685
 Bewusstsein, Definition 690
 Bewusstseinsinhalte 78, 691
 Beziehung 702
 Beziehungsstruktur 75, 667, 702
 Bezugssystem 34, 204
 Bifurkation 195, 290
 Big Bang 215, 358, 388, 402
 Big Bounce 388
 Big Crunch 366
 Bindung, chemische 164
 Bindungsverhalten 681
 Biologie XXIX, 51
 Biomoleküle 79
 Bismarck, Otto v. 372
 Bit 688
 Black Hole 95, 99, 145, 155, 298, 421f., 451, 459, 483
 Black Hole, rotierendes 459
 Black Hole, supermassives 461
 Bloch, Felix 120
 Bloch-Kugel 119
 Blome, Hans-Joachim 388
 Bogoljubov, Nikolai Nikolajewitsch 601
 Böhm 520
 Bohm, David 733
 Bohmsche Mechanik 269, 734

Bohr, Niels 6, 85, 173, 212, 474
 Bojowald, Martin 388
 Boltzmann, Ludwig 88, 101, 104
 Boltzmann-Statistik 520, 525
 Bolyai, János 227, 405
 Boost 506
 Bornschen Regel 734
 Börse 703
 Bose-Einstein-Kondensat 295
 Bose-Einstein-Statistik 501
 Bose-Erzeugungoperator 512
 Bose, Satyendranath 504
 Bose-Statistik 557
 Bose-Vernichtungsoperator 512
 Boson 45, 512
 Bottom-up-Wirkung 636
 Brahe, Tycho 359, 372
 Brillouin, Léon Nicolas 477
 Brout, Robert 592
 Bruch 244
 Brückengesetz 72, 235, 309
 Brukner, Časlav 212
 Bruno, Giordano 255
 Buchstaben 688

C

Cantor, Georg 244ff.
 Carnot, Sadi 477
 Cartan, Élie Joseph 573
 Casimir, Hendrik 555
 Casimir-Operator 537, 555
 Castell, Lutz 332
 Cauchy, Augustin-Louis 246
 Cauchy-Riemannsche-Differentialgleichung 563
 causa finalis 16
 Cellarius, Andreas 87, 359
 CERN 557
 Chadwick, James 731
 Chaos 658
 Chaos, deterministisches 24, 172
 ChatGPT 143
 Chemie XXIX, 41

Chlor 43
 Christodoulou, Demetrios 477
 Clauser, John 171, 179, 545
 Clausius, Rudolf 100, 104
 CO₂ 651
 Codierung 584
 Compton-Wellenlänge 108, 475
 Computer 117, 198
 Contergan 57
 Coulomb, Charles Augustin de 39
 Coulombfeld 39, 269
 Coulombkraft 43
 CP-Invarianz 520, 597f.
 CPT-Invarianz 399, 520, 579, 596
 CPU 129
 CP-Verletzung 598
 Crick, Francis 51
 C-Transformation 596

D

Daly, Herman 727
 Dämon, Laplacescher 213
 Dampfmaschine 100
 Darstellung, irreduzible 506
 Darstellung, reguläre 348
 Darwin, Charles 23, 652
 de-Broglie-Bohm-Interpretation 735
 de Broglie, Louis 301, 733
 Decodierung 584, 638, 668
 deduktiv-nomologisches Modell 61
 Deep learning 144
 Deep Space Nine 96
 Dekohärenz 285ff., 295
 de Lagrange, Joseph-Louis 564
 delayed choice 212
 Delta-Funktion 71
 Denkgesetz 241
 Descartes, René 10, 233, 541
 De-Sitter-Gruppe 509, 516
 De-Sitter-Kosmos 510, 607
 De-Sitter-Raum 520
 de Sitter, Willem 499, 509
 Determiniertheit 214, 253

Deutsche Physik 256
 Dezimalbrüche 243
 Diagonalverfahren 244
 Dichotomie 52
 Dichteänderung 547
 Dichtematrix 120, 157, 286, 553
 Dichteoperator 157, 286, 553
 Dielektron 37
 Diffeomorphismusinvarianz 425
 Differentialgleichung 171, 209
 Differentialgleichung, nichtlineare 172
 Dimension 12, 248
 Dimensionsanalyse 13
 Dinosaurier 676
 Diphoton 166 f., 191
 Dirac, Paul 15, 71, 113, 400, 426, 532, 731
 Dirac-See 533
 direktes Produkt 17, 568
 direkte Summe 568
 dissipative Strukturen 50
 Distributionen 71
 Diversität 640
 Dixmier, Jacques 516
 DNA 661
 Dobzhansky, Theodosius 652
 Dokument 266
 Doppelpulsar 424
 Doppelspalt 258
 Doppelspalt-Experiment 82
 doxa, Meinung 235
 Drehimpuls 13, 474
 Drehung 506
 Driesch 231
 Drieschner, Michael 233, 336
 Druck 362, 423, 552
 Druck, homogener 461
 Druck, isotroper 461
 Druck, kosmologischer 454
 Druck, negativer 367
 Dualismus 52, 676
 du Bois-Reymond, Emil 199, 225
 Duftmarken 702
 Dunkle Energie 358, 367, 424, 440, 451

Dunkle Materie 358, 424, 440, 451, 454, 472
 dynamische Schichtenstruktur 29, 83, 193 ff., 198, 554, 661, 667, 710, 733
 Dyson, Freeman J. 356

E

Ebbesen, Thomas 46
 Eccles, John 686
 Eco-Evo-Devo 664
 Eddington-Akkretionsrate 450
 Eddington, Arthur 96, 449
 Eddington-Finkelstein-Koordinaten 98, 475
 Eddington-Limit 451
 EEG 131, 289, 680, 686
 Ehlers, Jürgen 366, 419
 Eigen, Manfred 632
 Eigenschaft 48, 52 ff., 75, 121
 Eigenschaft, von Objekten 132
 Eine, das 2
 eingefrorene Zustände 103
 Einheit 200, 710
 Einheit des Bewusstseins 681
 Einstein, Albert XXXII, 2 ff., 22, 37, 85 f., 148, 173, 195, 204 ff., 230, 252, 255 f., 301, 366, 382 f., 389, 402, 405, 420, 426, 504, 547 f., 554, 591, 609, 653, 725
 Einstein-Fahrstuhl 424
 Einsteinium 280
 Einstein-Kosmos 343, 407
 Einstein-Kreuz 471
 Einstein-Podolski-Rosen-Phänomene 545
 Einweg-Quantencomputer 125
 Einzelfall 74
 Einzeller 79, 633
 Eisen 55
 Elektrodynamik 543
 Elektromagnetismus 547
 Elektronen 600
 Elektronenradius, klassischer 605
 Element 600

- Elementarladung 605
 - Elementarteilchen 149, 615
 - Elementarteilchenphysik 155, 233, 561
 - Elementarteilchentheorie 176
 - Elementarvolumen 586
 - Elemente 651
 - Ellipsen 361
 - Ellis, George 393
 - Emergenz 72, 75, 309, 666
 - Emergenz, schwache 644
 - Emergenz, starke 644
 - Emission, virtuelle 300
 - Empfindungen 637
 - Empirie 199, 227f., 289
 - Empirie-Problem 308, 446
 - Endcrash 457
 - Endknall 452
 - Endknall-Kosmologie 366
 - Endkollaps 366
 - Energetische Quanten 36
 - Energie 36, 100
 - Energiebedingung, dominante 393
 - Energiebedingung, schwache 393
 - Energiebedingung, starke 393
 - Energie des Gravitationsfeldes 424
 - Energiedichte 362f.
 - kosmologische 454
 - Energiedichte-Druck-Tensor 364
 - Energie, kinetische 56
 - Energiekonzentration 369
 - Energie, negative 109
 - Energiesatz 383
 - Englert, Berthold-Georg 737
 - Englert, François 592
 - Ensemble-Eigenschaft 552
 - Ensemblephysik XXX
 - Entartungsdruck 363
 - Entelechie 357, 660
 - Entropie 50, 100ff., 477, 484ff., 552
 - Entropie, absolute 103
 - Entropie, Änderung 102
 - Entropie, Export von 636
 - Entropie, negative 477
 - Enzym 47, 655
 - Epigenetik 663
 - EPR 170
 - EPR-Experimente 545
 - EPR-Korrelationen 254
 - Erbgut 67
 - Ereignisse 278
 - Erfahrung 199, 222
 - Erinnerung 137
 - Erkenntnis 708
 - Erkenntnis a priori 225
 - Erklären 15, 61ff., 216, 657
 - Erklärung 175
 - Erklärung des Lebens 79
 - Erklärungslücke 136
 - Erster Hauptsatz 312
 - Erzeugen von Quantenteilchen 64
 - Erzeugungs- und Vernichtungs-Operatoren 38
 - Euklid 10, 228, 709
 - Euler, Leonhard 746
 - Everett, Hugh III. 741
 - Evo-Devo 663f.
 - Evolution 52, 67, 662
 - Evolution, kosmische 25, 74
 - Evolutionstheorie, synthetische 663
 - Ewigkeit 216
 - Expansion des Kosmos 294
 - Experiment 21, 223, 229
 - Experimentator 252
 - Exponentialabbildung 549
 - Exziton 45, 155
- F**
- Fake News XXVII
 - Fakten 38, 290
 - Faktisch-Werden 1, 296
 - Faktum 305
 - Falschfarbenbild 91
 - Fantasie 639, 653
 - Faserbündel 335, 568
 - Faserung 335
 - Fehlfaltung 57
 - Feldquanten 29, 65, 174, 511, 564

Feldtheorie 5
 Felsen 653
 Fermi-Dirac-Statistik 501, 505
 Fermi, Enrico 45, 356
 Fermi-Erzeugungsoperator 512
 Fermion 332
 Fermionen 45, 505
 Fermi-Statistik 557
 Fermi-Vernichtungsoperator 512
 Fernwirkung 736
 Fernwirkungstheorie 405
 festgelegt 640
 Festkörper 43
 Festkörperphysik 41f.
 Festkörpertheorie 64
 Feynman-Integral 329
 Feynman, Richard P. 174
 Film 213
 Finitismus, offener 320
 Finkelstein, David 96, 100
 Firmware 129
 Fisher, Ronald 662
 Fittler, Robert 247
 Fixsternparallaxe 87, 405
 Fließgleichgewicht 50, 195, 632, 661
 FLRW-Kosmos 379, 459
 Flüssigkeit, ideale 364
 Fock-Darstellung 555
 Fock, Wladimir Alexandrowitsch 32, 554
 Fördermittel 455
 Form 52, 140, 160, 632
 Formel 3
 Form, konkrete 77
 Formkonstanz 715
 Foucault, Léon 87
 Fourier, Joseph 249
 Fourier-Reihen 337
 Freedman, Stuart J. 182
 Freie Energie 100
 Freiheit 256
 Freiheitsgrad 101, 252
 Frequenz 151
 Freud, Sigmund 23
 Friedmann, Alexander 364, 499

Friedmann Gleichungen 411
 Froschschinkel 686
 Führungsfeld 735
 fundamentalen Wechselwirkungen 39
 Funktion, analytische 563

G

Gaiser, Konrad 2
 Galaxie 452
 Galilei, Galileo 21, 87, 223, 359
 Galvani, Luigi 686
 Ganze, das 37
 Ganzheit 16, 164, 168, 296, 703
 Gas, ideales 101, 312
 Gastruloide 665
 Gauß, Carl Friedrich 227, 405
 Gedächtnis 634
 Gedächtnis, holografisches 697
 Gedanke 76, 689
 Gedanken 672, 688
 Gedankenexperiment 21, 89
 Gedanken im Gehirn 134
 Gefühl 76, 138
 Gegenwart, ausgedehnte 143, 164, 205, 210f.
 Geheimdienst 281
 Geheimnis des Lebens 661
 Gehirn 125, 132, 289, 300
 Geist 52
 Geistige Tätigkeit 302
 Gell-Mann-Matrizen 574
 Gell-Mann, Murray 600
 Gen 661
 Genauigkeit 25
 Genom 661
 Genzel 93
 Geodäte 405
 Geometrie, euklidische 227f.
 Geometrie, hyperbolische 228, 405
 Geometrie, nichteuklidische 405
 Geometrie, sphärische 227, 405
 Georgiev, Danko D. 686
 Gerlach, Walther 738

Gesamtheit des Empfindens 638
 Gesamttensorraum 515
 Geschwindigkeit 97
 Gesetz 22, 66, 74, 223
 Gesetzmäßiges 241
 Gestalt 54, 140f., 160, 659
 Gewissheit, absolute 228
 Ghez 93
 Gilgamesch-Epos 241
 Gitterzellen 302
 Gleiches 22, 66
 Gleichgewicht 49
 Gluon 69, 155, 549f., 570, 577, 600, 732
 Gödel, Kurt 200, 214, 226ff., 233, 355
 Goethe, Johann Wolfgang v. 40, 88, 146, 199
 Goseck 698
 GPS-System 424
 Gradienten 627
 Graudenz, Dirk 333
 Gravitation 35, 39, 91, 230, 406, 547, 558
 Gravitationsfeld 208, 383
 Gravitationskollaps 113
 Gravitationskonstante 112, 230, 343
 Gravitationslinse 471
 Gravitationswellen 86, 405
 Gravitonen 300, 422
 Green, Herbert Sydney 526
 Greensche Zerlegung 526
 Grenzwert 6, 246
 Grolle, Johann 92
 Grossmann, Marcel 2
 Gründe 252
 Grundlegung der Naturwissenschaft 322
 Grundschiwingung 149
 Grundzustand 99, 467
 Grundzustandsenergie 98
 Gruppe 210, 246
 Gruppe, diskrete 330
 Gruppe, kommutative 330
 Gruppe, kompakte 348
 Gruppe, kontinuierliche 330
 Gruppe, Liesche 330

Gruppe, nichtkommutative 330
 Gruppenstruktur 210
 Gruppen, unitäre 330
 GULAG 256
 Gültigkeitsbereich 271
 Guralnik, Gerald S. 592
 GUT 549, 595
 Guzmán 468

H

H₂O 70
 Haag, Rudolf 293, 366
 Haber-Bosch-Verfahren 636
 Hadronen 571, 731
 Hagen, C. Richard 592
 Haken, Hermann 632
 Halbgruppe 210, 246
 Haldane, John Scott 50
 Halteproblem 228
 Hardware 129
 Hauptsatz, Erster 362
 Hawking, Stephen 93, 104, 419, 422
 Hawking-Strahlung 105
 Hawking-Temperatur 114, 481
 Heisenberg 249
 Heisenbergsches Urfeld 176
 Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation 97
 Heisenberg, Werner 7, 23, 26, 89, 173, 256, 336, 371, 400, 557, 725
 Hempel, Carl Gustav 61
 henadisch 563
 Heraklit 66, 710
 Herodot 214
 Higgs-Feld 362
 Higgs, Peter 592
 Higgs-Teilchen 65, 69, 88, 145, 362, 601
 Hilbert, David 13, 226, 249, 337, 406
 Hilbert-Raum 13, 249, 555
 Hipler, Franz 372
 Hippocampus 302
 Hirnphysiologie 199
 Hirntod 131, 289

Hochenergiephysik 64, 545
 Hochkulturen 708
 Hochtemperatur-Supraleiter 281
 Hologramm 110, 697
 Homöostase 635
 Homunkulus 634
 Hopf-Faserung 335
 Hopf, Heinz 335
 Horizont 96, 299, 463, 466 f., 474
 Horizont, Oberfläche 107
 Horizont-Problem 446
 Hormon 678
 Hoyle, Fred 402
 Hubble, Edwin 205, 255
 Hubble-Konstante 432
 Hubble-Parameter 432
 Huygens, Christiaan 40
 Hylemorphismus 53
 Hypothesen 21, 256

I

IceCube 145
 Ich, das 675
 Idealisierung 209, 503
 Ideen, platonische 710
 identisch 66
 Identität des Ununterscheidbaren 37
 Ideologie 703
 Illusion 136, 213, 252
 Impuls 97
 indefinite Metrik 382
 induktive Verallgemeinerung 21
 induktiv-statistische Erklärung 63
 Inflation 358, 367, 447
 Inflaton 447
 Information 36, 279
 Information, abgespeicherte 138
 Information, absolute 53
 Information als Eigenschaften 135
 Information, bedeutungsfreie 653
 Information, bedeutungsvolle XXVII, 48, 130, 638, 662 f., 667
 Informationen, verschränkte 659

Informationsparadox 298, 483, 492
 Informationsstruktur 75
 Informationsverarbeitung 51, 679
 Informationsverarbeitung, biologische 129, 677
 Informationsverarbeitung, intelligente 130, 632
 Informationsverarbeitung, technische und biologische 130
 Inhalt 160
 Inhalt, materieller 52
 Inhomogenität 547
 İnönü, Erdal 510
 Integrationskonstante 365
 Intentionalität 635
 Internet 143, 702
 Interpretation 734
 Interpretationen der Quantentheorie 723
 Interpretationsproblem 269
 Intuition, physikalische 406
 Ion 124
 Irreversibles 293
 ISO(3,1) 506
 ISS 424
 It from Bit 99, 105 f., 148
 It from Qubit 108

J

Jahr 202
 James-Webb-Teleskop 74
 Jaynes, Edwin Thompson 477
 Jet 459, 467
 Jetzt-Zeitpunkt 230
 Joos, Erich 287
 Jordan, Pascual 113
 Jung, Carl Gustav 241
 Jupiter-Monde 359

K

- Kaluza, Theodor 14
 kanonisch konjugiert 63, 97
 Kant, Immanuel *XXVIII*, 149, 214, 224 *ff.*, 231, 238
 Katabolismus 633
 Katalysator 47, 654
 Katalysator, organochemischer 655
 Katze, grau 22
 Katze, Schrödingers 195
 Kauffman, Stuart A. 641
 Kaufmann, Walter 603
 Kausalität 20, 117
 Keilschrift 241
 Keim von Subjektivität 78, 690
 Kekulé, August 42
 Kenntnisnahme 77
 Kenntnis, objektive 78
 Kepler, Johannes 87, 229, 404, 452
 Kernphysik 599
 Kerr-Lösung 459
 Kerr, Roy 459, 483
 KI 141
 Kibble, Tom 592
 Kiefer, Claus 273, 492
 kinetische Energie 98
 Kiselev 469
 klassische Mechanik 101
 Klauder, John R 544
 Kleinert, Andreas 372
 Kleinheit 25
 Klein, Oskar 14
 Klimaproblematik 209
 Knöllchenbakterien 636
 Kochen 277
 Kochen, Simon 278
 Kognition 675, 684
 Koinzidenzproblem 445
 Kollaps 287, 364
 Komet von 1577 361
 Kommunikation 656
 Kommutator 329
 Kompartiment 660
 Komplementarität 6 *f.*, 76, 236
 Komplexes 280
 Komplexität 641, 658, 685
 Komplexkonjugation 510, 533
 Konfigurationsraum 13
 Konsistenzüberlegung 22
 Kontext 136
 Kontinuum 30, 35, 339
 Kontinuumsmodell für Materie 104
 Kontraktionsphase 366
 Kontrolle 258
 Koordinaten-Kosmos 556
 Kopenhagener Deutung 270
 Kopenhagener Interpretation 289
 kopernikanische Wende *XXVII*, 87
 Kopernikus, Nikolaus 87, 223, 359, 372, 404
 Körperfunktion, basale 131
 Korrelate des Bewusstseins 675
 Korrelation 166
 kosmischer Druck 383
 Kosmologie 215, 307, 310, 419, 457
 kosmologische Konstante 358, 366, 383, 407, 447, 509
 kosmologischer Term 440
 kosmologisches Prinzip 446
 Kosmos 65, 204
 Kosmos, beschleunigt expandierender 366
 Kraft 543, 714
 Kraftfeld 29, 548
 Kraftfelder, elektromagnetische 659
 Kraftquanten 36, 504, 557
 Krall, Stephan 625, 660, 723
 Krämer, Hans Joachim 2
 Kränkung 23
 Krausz, Ferenc 375
 Kreativität 143
 Krüger, Ralf 689, 695
 Krümmungsänderung 547
 Krümmungsskalar 519
 Kruskal-Koordinaten 98
 Kruskal, Martin 100
 Kuhn, Thomas 23

Kultur 73
 Kunst 698
 Künstliche Intelligenz 141
 Kurlbaum, Ferdinand 62

L

Labor 507
 Ladung 499, 592
 Ladung, elektrische 390
 Lagrangedichte 564
 Laguerre-Polynome 529
 Lamarck, Jean-Baptiste de 663
 Landau, Lev Davidovich 604
 Lange, Axel 664, 667
 Längeneinheit 337
 Längeneinheit, fundamentale 368
 Langzeitgedächtnis 697
 Laplace, Pierre-Simon de 213
 Leben 194f., 242, 653
 Lebendiges 75, 371
 Lebenskraft 660
 Lebenspraxis 268
 Lebesgue, Henri Léon 348
 Lebewesen 48f., 67, 195, 280, 584
 Leguminosen 636
 Leibniz, Gottfried Wilhelm 37, 171, 225, 246, 504
 Lemaître, Georges 255, 364, 499
 Lepton 600, 608
 Leptonen-Familienstruktur 608
 Lernen 635
 Lernfähigkeit 22
 Le Verrier, Urbain 229
 LHC 64, 145, 557
 L'Huillier, Anne 374
 Libet, Benjamin 695
 Lichtgeschwindigkeit 96, 204, 343, 488
 Lichtquanten 88, 548
 Lichtquanten, virtuelle 40
 Lie-Algebra 549
 Lie-Gruppe 549
 Lie, Sophus 330, 499
 Lifshitz, Evgeny Mikhailovich 604

Limes, quasiklassischer 108
 List, Benjamin 655
 Lobatschewski, Nikolai 227, 405
 Löcher 155
 Loch, virtuelles Teilchen 64
 Locked-in-Patienten 675
 Logarithmen 119
 Logik 176, 228, 241, 708
 Lokalisation 148, 300
 Lokalität 424
 Lorentzgruppe 332, 509
 Lorentzgruppe, inhomogene 506
 Lorentz, Hendrik Antoon 204, 499, 601
 Lorentztransformation 426
 Lorentz-Vakuum 300, 531ff., 555
 Lösung, kosmologische 421
 Lösungskurve 171
 Lüders, Gerhart 596
 Luhmann, Niklas 703
 Luther, Martin 372
 Lyre, Holger 561

M

Mach, Ernst 21, 88, 104, 435
 Machtstrukturen 255
 MacMillan, David 655
 Magneten 571
 Magnetismus 361
 Majorana, Ettore 595
 Majorana-Teilchen 595
 Makromolekül 677
 Mannigfaltigkeit 12, 232
 Mannigfaltigkeit, pseudoeuklidisch 12
 Marxismus-Leninismus 256
 Masse 85, 333
 Maßeinheitensystem 112
 Masse, schwere und träge 35
 Materie 36, 148, 520
 Materiedichte 247
 Materielle Quanten 36
 Materiequanten 557
 Materiewelle 733
 Mathematik 1

- Matos 468
 - Matrix 18
 - Matrizenmechanik 26, 249
 - Maxwell, James Clerk 325, 547
 - Maxwellsche Gesetze 225
 - Maxwellsche Gleichungen 39
 - Maxwells Dämon 477
 - Mayr, Ernst 652
 - McFadden, John Joe 289
 - Mechanik 40, 503
 - Mechanik, Newtonsche 89
 - Medina, Rodrigo 604
 - Melia, Fulvio 433, 449
 - Membran, semipermeable 660
 - Merkur 360, 420
 - Merkur-Bahn 229
 - Meson 571
 - Messanordnung 170
 - Messergebnis 168f., 267
 - Messprozess 202, 211, 265
 - Messung 73, 77, 210, 218, 279, 297, 672
 - Messung, unscharfe 283
 - Messvorgang 283
 - Metabolismus 632
 - Metapher 150
 - Metaphysik 239, 403
 - metastabil 635
 - Meter 343
 - Methode, deduktive 89
 - Methode, induktive 89
 - Metrik, indefinite 11
 - Michelangelo 716
 - Michelson, Albert 203, 426
 - Michelson-Morley-Experiment 204
 - Mikrophysik XXX, 25, 155, 422
 - Mikroporen 651
 - Mini-Black-Hole 616
 - Minkowski, Hermann 12, 382, 499
 - Minkowski-Metrik 425
 - Minkowski-Raum 11, 382, 508, 579
 - Mitochondrien 656
 - Möglichkeiten, wirkende 157
 - Molekül 41, 56
 - Moleküle, Eigenschaften von 654
 - Monat 202
 - Monismus 676
 - Monismus, informationeller 714
 - Monom 513, 520
 - monomaterialistischer Fehlschluss 541, 715
 - Monopol 571
 - Monopole, magnetische 145
 - Moore'sches Gesetz 345
 - Morley, Edward 203, 426
 - Moser, Edvard 302
 - Moser, May-Britt 302
 - Motive 696
 - Mott, Nevill Francis 174
 - Moylan 520
 - Mozart, Wolfgang Amadeus 716
 - Mpc 432
 - Münchhausen 719
 - Musik 639
 - Mutationen 663
 - Myon 600, 731
 - Myon-Neutrino 600
 - Mysterium 201, 676
- ## N
- NaCl 43
 - Näherung 66
 - Näherungscharakter 164
 - Nanopartikel 370
 - Nanoteilchen 43
 - Natrium 43
 - Natur 73
 - Naturalismus 213
 - Naturgesetz 20, 24, 68, 100, 117, 210
 - Naturkonstante 112, 343
 - Naturkonstante, fundamentale 113
 - Naturwissenschaft 14, 73
 - Nazidiktatur 256
 - Neandertaler 702
 - Nebenklasse 572
 - Necker-Würfel 133
 - Neddermeyer, Seth Henry 731
 - negativer Druck 457, 604

Neptun 230
 Netzhaut 678
 Netzwerk 117
 Neue Physik 541
 Neumann, J. v. 276
 Neuron 133
 neuronales Netz 134
 Neutrino 146, 595, 731
 Neutrino-Oszillation 600
 Neutron 731
 Neutronenstern 363
 Newton, Isaac 15, 40, 84 ff., 171, 203, 214, 223 ff., 229, 361, 405 f.
 Newton, T. D. 516
 Nichtdeterminiertheit 268
 nicht-kommutative Multiplikation 537
 Nichtkommutativität 267
 Nichtlinearität 118
 Nichtlokalität 164, 268, 305, 633, 688
 Nichtmaterielles 140, 237
 Nichts 216
 Nichtseiende 216
 Nichtumkehrbarkeit 293
 Nichtvertauschbarkeit 76, 164
 Nobelpreis für Physik 93
 Noble, Denis 661
 Noether, Emmy 9, 499, 549
 Noether-Theorem 549
 Non-cloning-Theorem 639
 Non-Standard-Analysis 247
 Norm 333
 Null-Menge 551
 Núñez 468

O

Objekt 53, 503
 Objekt, elementares 22, 54, 161
 Objekt, frei bewegbares 27
 Objektivierbarkeit 77 f.
 Objekt, klassisches 657
 Objektstrukturen XXXII
 Oersted, Hans Christian 21
 O'Keefe, John 302
 Oppenheimer, Robert 120
 Oppenheim, Paul 61
 Optik 40
 Optimierungsproblem 123
 Optionen 82
 Optionen überdenken 681
 Orbital 42
 Ordnung 65
 Organisation 636
 Ort 97
 Ort, möglicher 476
 Ortelius, Abraham 708
 Ortsraum 336
 Ostwald, Wilhelm 104

P

Panpsychismus 673
 Parabose-Operatoren 527
 Parabose-Ordnung 525
 Parabose-Statistik 505
 Paradoxie 1, 7, 170, 216, 529
 Parallaxe 360
 Parallelenaxiom 227, 405
 Parameter 72
 Parität 234
 Paritätsverletzung 597
 Parmenides 235, 297, 710
 Pauli-Matrizen 568
 Pauli-Prinzip 586
 Pauli, Wolfgang 7, 225, 242, 596 f., 731
 Peano 226
 Penrose, Roger 93, 96, 184, 388, 419, 476, 688, 713
 Penzlin, Heinz 50, 637
 Periheldrehung 230, 420
 Perpetuum mobile 312
 Perry, Malcom 93
 Persönlichkeitsmerkmale 690
 Phänomene, psychische 77
 Phasenraum 13
 Philosophie 240
 Phonon 64
 Photon 132, 289, 300, 549, 679

- Photonen, reale 662
 Photonen, verschränkte 679
 Photonen, virtuelle 71, 131, 662
 Physikalismus 74, 77
 Physik der Beziehungen XXXII
 Physik der Möglichkeiten XXXII
 Physik des Genauen XXXI
 Physik, klassische 213
 Physik, neue 14
 Pietschmann, Herbert 369
 Pionier-Quantenmechanik 552
 Pixel 133
 Planck-Einheiten 367, 475
 Planck-Energie 616
 Planck-Fläche 379
 Planck-Länge 107ff., 113, 344, 485, 545, 609
 Planck-Masse 344
 Planck, Max XXXIII, 25, 88, 173, 208, 225, 341ff., 368, 475, 548, 725
 Plancksche Formel 68, 148
 Planck-Zeit 344, 610
 Platon 2, 200, 710
 Podolsky, Boris 22, 166
 Poincaré-Gruppe 332, 504ff., 527, 555, 566, 615
 Poincaré, Henri 499, 538, 604
 Poisson-Klammer 329
 Polarisation 120
 Polariton 30, 44ff., 155, 552
 Polariton-Laser 47
 Polaritons 48
 Popper, Karl 21, 712f.
 Populationsgenetik 662
 Positronen 600
 Positronium 45, 54
 Pospiech, Gesche 184
 Post-Darwinsche Informationsweitergabe 698
 Potenzial 211
 Potenzialität 16, 173, 563
 Potenzmenge 151, 338
 Prä-Bedeutung 178, 660
 Präparation 173, 210
 Pribram, Karl 697
 Priester, Wolfgang 388
 Prigogine, Ilya 50
 Primas, Hans 279, 294, 552
 Prinzip, holographisches 109
 Prinzip, kosmologisches 248
 Prion 57
 Problem, unentscheidbares 226
 Produkt, direktes 159
 Produkt, direktes, von Gruppendarstellungen 342
 Prognose 224, 269
 Prophylaxe 1
 Proportionalitätskonstante 230
 Protein 47
 Proton 145, 585
 Prottyposis 3, 22, 77, 116, 140, 148, 151, 208, 233ff., 239, 253, 279ff., 311, 440, 484f.
 Prottyposis-Kosmologie 423, 462
 Prozess, individueller 212
 Prozess, realer 209
 Psyche 75
 Psychische, das 74ff.
 Psychosomatik 688f.
 psychosomatische Zusammenhänge 648
 P-Symmetrie 597
 Ptolemäus 87, 360
 P-Transformation 596
 Punktteilchen 15, 27, 64, 68, 175, 370, 475, 503, 735
 Pythagoras 11, 84, 243, 709
- ## Q
- Qualia 77f., 690
 Quanten 297
 Quantenalgorithmen, variationelle 128
 Quantenbit 27, 36, 70, 77, 163, 280, 545
 Quantencomputer 117, 198
 Quantencomputing 119f.
 Quanteneichfeldtheorie 547
 Quantenelektrodynamik 548

Quantenfeld 30, 362, 370
 Quantenfeldtheorie 29, 64, 155, 562
 Quantengleichgewicht 736
 Quantengravitationseffekte 113
 Quanteninformation 51, 177, 289
 Quanteninformation, absolute XXVII, 53
 Quanteninformationsstruktur XXX
 Quanten-Kosmologie 428
 Quantenmechanik 27, 38, 41, 269, 551
 Quantenpotenzial 735
 Quantenprozesse 289
 Quantenpunkt 370
 Quantenradierer 281
 Quantenschaum 107
 Quanten-Schmetterlings-Effekt 172
 Quantensprung 375
 Quantenstrukturen, einfache 555
 Quantensystem, abgeschlossenes 206
 Quantenteilchen 27, 585
 Quantenteilchen, masselose 27
 Quantentheorie 93, 113, 419
 Quantenvakuum der Teilchen 598
 Quanten, virtuelle 64, 548
 Quanten-Zeno-Effekt 297, 640
 Quantenzustand 78, 169
 quantische Parallelverarbeitung 695
 Quantisierung 38, 511
 Quantisierung, kanonische 63
 Quantisierung, zweite 53, 563
 Quark 69, 155, 505, 550, 570, 577, 600, 732
 Quark-Antiquark-Paar 571
 Quark-Gluon-Plasma 174
 Quasare 461
 Quasipartikel 30
 Quasiteilchen 44, 49, 64, 174, 533
 Qubit, bedeutungsvolles 75
 Quintessence 468
 Quintessenz 367

R

Rahaman 469
 Ramadan 202
 Ramanujan, Srinivasa 716
 Ramírez 468
 Rauch, Helmut 184
 Raum 8
 Raum, unendlicher 203
 Raum-Zeit-Geometrie 424
 Rauschen 135, 657
 Reale, Giovanni 2
 Realexistenz 714
 Realismus, naiver 86
 Realität XXX, 148, 210
 Reduktion 148
 Redundanz 658
 Reflexion 80, 253, 634
 Reflexionsstufen 685
 Reflexivität 634
 Regel 22, 66
 Regelmäßigkeit 24
 Regress, infiniter 634
 Reibung 209
 Reissner-Nordström-Metrik 606
 Reiz 633, 678
 Relativitätstheorie 207, 532
 Relativitätstheorie, Allgemeine 93, 96, 113, 204f., 428
 Relativitätstheorie, Spezielle 64, 113, 206
 Religion 215
 Repräsentationsstufe 638
 Resonanz, quantische 150
 Resultat 121
 reversibel 121
 Reversibilität 209
 Revolution, wissenschaftliche 23
 Riemann, Bernhard 2, 86, 405
 Riemannsche Geometrie 2
 RNA 660
 RNA-Welt 661
 Robertson, Howard 364, 499
 Robinson, Abraham 247
 Roboterarm 134

Rømer, Ole 203
 Rosen, Nathan 22, 166
 Rotationsgeschwindigkeit 455
 Rotverschiebung 255, 449
 Rubens, Heinrich 62
 Rubin, Vera 452
 Rückkopplung 141, 633
 Rückquantisierung 422
 Ruhmasse 266
 Rupf- und Stopf-Operatoren 512, 521

S

S3 149
 Schall 76
 Schalldruck 636
 Schaltkreis 675
 Schelling, Friedrich Wilhelm 717
 Scherer, Irmgard 40, 149, 718
 Schlüssel, abhörsicher 192
 Schmetterlingseffekt 172, 420
 Schmidt, Erhard 276, 285
 Schreiber, Ulrich 637
 Schrift 67, 371, 702
 Schrödinger, Erwin 26, 139, 173, 195, 544
 Schrödinger-Gleichung 26, 249
 Schrödingers Kätzchen 197
 Schrödingers Katze 22
 schwache Wechselwirkung 39
 Schwartz, Laurent 71
 Schwarzes Loch 91, 104, 247, 344, 364, 469
 Schwarzschild, Karl 96, 99, 421, 483
 Schwarzschildkoordinaten 475
 Schwarzschild-Radius 475
 Schwebung 680
 Schwere 35, 85, 558
 Schwerkraft 35
 Schwinger, Julian 174
 Science-Fiction 14
 Scully, Marian 737
 Sehen 289
 Sehvorgang 132
 Seiendes 216
 Selbst, das 675
 Selbstorganisation 704
 Shannon, Claude 477
 Sicherheit, beweisbare 233
 Signal 633
 Singularität 94, 288, 419, 473
 Sinus 151
 Slipher, Vesto 255
 Smolin, Lee 115
 SO(2) 509
 SO(3) 509
 SO(3,1) 509
 SO(3,2) 509
 SO(4) 509
 SO(4,1) 509f., 607
 Software 129
 Sonnenfinsternis 86, 209, 214
 Soziologie 703
 Spalt 28
 Spekulation 238
 Spencer-Brown, George 703
 Spezialfall 266
 Spezielle Relativitätstheorie 34
 Spiegelungssymmetrie 233
 Spin 36, 55, 333, 735
 Spinoren 332
 Sprache 67f., 80, 636, 698
 Sprachentwicklung 679
 SQUID 124
 Stalin, Josef 256
 Standardmodell der Kosmologie 357
 starke Wechselwirkung 39
 Stein 653
 Steinhardt, Paul 447
 Stern, Otto 42, 653, 738
 Steuerung 48
 Stochastik 172, 658
 Stoff 543
 Stoff-Quanten 36
 Stonehenge 698
 Storch 167
 Störung 283
 Strahlenoptik 29
 Straumann, Norbert 561

- Strings 107
 String-Theorie 14
 Ström 517f.
 Strom des Psychischen 135
 Strominger, Andrew 92, 613
 Struktur 1, 237
 Struktur, einfachste 70
 Strukturelle Quanten 36
 Strukturen, komplexe 57
 Strukturformel 164
 Strukturquanten 38
 Struktur, räumliche 371
 Struktur, soziale 702
 Struminsky, Boris Vladimirovich 601
 Subjektivität 51, 672
 Subjektivität der Qualia 690
 Subjektivitäts-Keim 672
 Summe, direkte 342
 Superauswahlregel 551, 656
 Superdeterminismus 252ff.
 Supernova 471
 Supernova-Explosion 145
 Superposition 10, 76, 118ff.
 Superstrings 107
 Suprafluidität 295
 Supraleitung 295
 Susskind, Leonard 482
 Süssmann, Georg 366, 737
 Symbiose 636, 656
 Symbolbildung 585
 Symmetrie 209
 Symmetriegruppe 548
 Synergetik 632
 System 238
 Systemeigenschaft 639, 718
 Systemtheorie 652
- T**
- Tachyonen 507
 Takahashi, Reiji 516
 Tangentialraum 509
 Tauon 600
 Tauon-Neutrino 600
 Tavkhelidze, Albert Nikiforovich 601
 Taylor-Reihen 337
 Technik 73, 199
 Teilchen 12, 17, 236, 333, 570, 607, 615
 Teilchen-Antiteilchen-Paar 105, 532
 Teilchenbeschleuniger 456
 Teilchen, elementareres 22
 Teilchen-Modell 520
 Teilchen, stabiles 116
 Teilchenvakuum 616
 Teilchen-Vakuum 38
 Teilchen, virtuelle 38
 Teilchenzahl 101
 Teileloses 164
 Teilelosigkeit 164
 Teilstrukturen 236
 Teleportation 190
 Temperatur 100, 552
 Temperatur, absolute 178
 Tensor 16
 Tensorprodukt 17f., 54ff., 235, 568, 645
 Tensorrang 513
 Tensorraum 513
 Thales von Milet 214
 Thallium 281
 Theorie 2
 Theorie, abgeschlossene 23, 89
 Theorie des Genauen 116
 Thermodynamik 73, 100
 Thermodynamische Wahrscheinlichkeit 102
 Thomas, Llewellyn Hilleth 516
 t'Hooft, Gerard 582
 T-Invarianz 400, 598f.
 Tipler, Frank 366
 Tischlerei 544
 Tomonaga, Sin-Itiro 174
 Top-Down-Wirkung 636
 Träger, energetischer 67
 Träger, materieller 67
 Trägerwechsel 75
 Trägheit 35, 85
 Translation 506

transzendent 231
 Transzendentes 232
 Transzendentes 199f.
 Triangulierung 303
 Triester Theorie 278
 T-Transformation 596
 Tunneleffekt 165, 686
 Turing, Alan 226ff.
 Typen von Quanten 36

U

U(1)-Eichung 560
 überabzählbar 555
 überabzählbar unendlich 245
 Übergangsstruktur 239
 Überlichtgeschwindigkeit 254
 Uhr 204
 Umeichungen 559
 Umlaufgeschwindigkeit 462
 Umwelt 136
 unbegrenzte Zweiheit 710
 Unbelebtes 256, 653
 Unendlich 5
 Unendliches 227, 308
 Unendlichkeit 5, 297
 Unendlichkeit, unphysikalische 35
 Unikat 273
 Universum 273
 Universum, holografisches 346
 Uniware 129f., 138, 637, 673, 689
 Unkenntnis 101, 172
 Unordnung 102
 Unschärfe 291
 Ununterscheidbarkeit, lokale 230
 Unwesentliches 5, 309
 Unwissen 257, 290
 Unwissenheit 281
 Ur 176, 511, 520
 Ur-Alternative 105, 114, 119f., 153, 176
 Ur-Hauch 599
 Urknall 217
 Urobjekt 176
 Ursache 212, 252

Ursache, geistige 696
 Urteil a priori 226
 Ur-Theorie 428

V

Vaidya-Metrik 462
 Vaidya, Prahalad Chunnial 459, 462, 466
 Vakuum 64, 105, 533
 Vakuum der AQIs 528f.
 Vakuum der Teilchen 531
 Vakuumenergie 98, 448
 Vakuum-Energiedichte 440
 Vakuum-Lösung 483, 509
 Van Vleck, John Hasbrouck 174
 Variable 72
 Venus 360
 Venus von Willendorf 698
 Verallgemeinerung, induktive 22
 Vernichten von Quantenteilchen 64
 Vernichtungs-Operator 329
 Verschränkung 139, 167, 544, 551, 658
 Verständnis von Materie, vorquanten-
 theoretisches 677
 Verstehen 177
 Vertauschungsregel 511
 Viel-Elektronen-System 37
 Viele Welten 269
 Viele-Welten-Interpretation 734
 Vierer-Ur 510
 Viren 79
 Virtualitätsphänomen 571
 Virus 161, 653
 von Jolly, Johann 225
 von-Neumann-Algebra 552ff.
 Vorhersage 83
 Vulkan 230, 712

W

Waddington, Conrad 663
 Wahrnehmung 76, 136, 678
 Wahrnehmung von Fakten 136
 Wahrscheinlichkeit 101, 118
 Wahrscheinlichkeitstheorie 82f.
 Wahrscheinlichkeit, thermo-
 dynamische 102, 331
 Walker, Arthur 364, 499
 Wallace, Alfred Russel 652
 Walter, Herbert 737
 Walther, Philip 212
 Wärme 100, 104, 209
 Wasserdampf 57
 Weaver, Warren 477
 Wechselwirkung 236, 336
 Wechselwirkung, biologische 558
 Wechselwirkung, elektromagnetische
 39, 558
 Wechselwirkungsstärke 557
 Weinberg, Steven 177
 Weismann, August 663
 Weismannismus 256
 Weißer Zwerg 363
 Weiss, Paul Alfred 641
 Weizsäcker, Carl Friedrich v. XXXII, 6ff.,
 37, 85, 105, 148, 153, 224, 233, 253ff.,
 278, 293, 317f., 327, 332, 366, 425, 473,
 502, 510, 557, 585, 591, 609, 653, 725
 Welcher-Weg 281
 Welle, elektromagnetische 40
 Wellen 152
 Wellen, elektromagnetische 659
 Wellenerscheinungen 27
 Wellenfunktion 149, 211, 286
 Wellenoptik 29
 Welle-Teilchen-Dualismus 27, 258
 Weltbild 88, 404
 Weltbild, geozentrisches XXIX, 23, 116
 Weltbild, heliozentrisches XXIX, 23, 116
 Werner, Eric 705
 Wheeler, John Archibald XXXII, 96, 99,
 105ff., 178, 374, 378, 476, 545, 609

Widerspruch 7
 Widerspruchsfreiheit 200, 226
 Wiederholbarkeit 223
 Wigner, Eugene 238, 325, 499, 506, 510,
 527, 615, 669, 746
 Wirklichkeit 257, 672
 Wirkung 212
 Wirkung, gravitative 363
 Wirkungsausbreitung 76
 Wirkungsquantum 26, 109, 343, 727
 Wissen 176, 268, 279, 289
 Wissenschaft 1
 Wittgenstein, Ludwig 80
 Wort 688
 Würfel 287
 Wurmloch 96f.

Z

Zahlenfolge 246
 Zahlen, komplexe 83
 Zahl, imaginäre 562
 Zahl, irrationale 243ff.
 Zahl, komplexe 246
 Zauberei XXVII
 Zaun, Harald 185
 Zeh, Heinz-Dieter 285ff.
 Zeilinger, Anton 171, 179, 493, 545,
 582f.
 Zeit 265
 Zeitfreiheit 137, 164
 Zeitlosigkeit 200, 212
 Zeitpfeil 20, 210
 Zeitspiegelung 234
 Zeitstruktur 288
 Zeitumkehr 209
 Zeit, unendliche 203
 Zeitvariable 211
 Zeitverlauf 104
 Zeit, zyklische 382
 Zellulärer Automat 109
 Zenon 297
 Zenon von Elea 6
 Zentrum der Milchstraße 95

- Zerfall, radioaktiver 39
- Zufall 82, 696
- Zufälligkeit 172
- Zustand 102, 297
- Zustand, aktueller 672
- Zustände, eingefrorene 667
- Zustände, verschränkte 139
- Zustand, gemischter 286
- Zustand, kohärenter 18, 139, 545
- Zustandsgleichung, kosmologische 384
- Zustandsraum 12
- Zustand, stationärer 562
- Zustandsvektor 13
- Zustand, verschränkter 18
- Zwang 83
- Zweiheit, unbegrenzte 2, 200
- Zweiter Hauptsatz 49, 104, 311
- Zwei-Zustands-System 120
- Zwicky, Fritz 452
- Zwillingsparadox 206