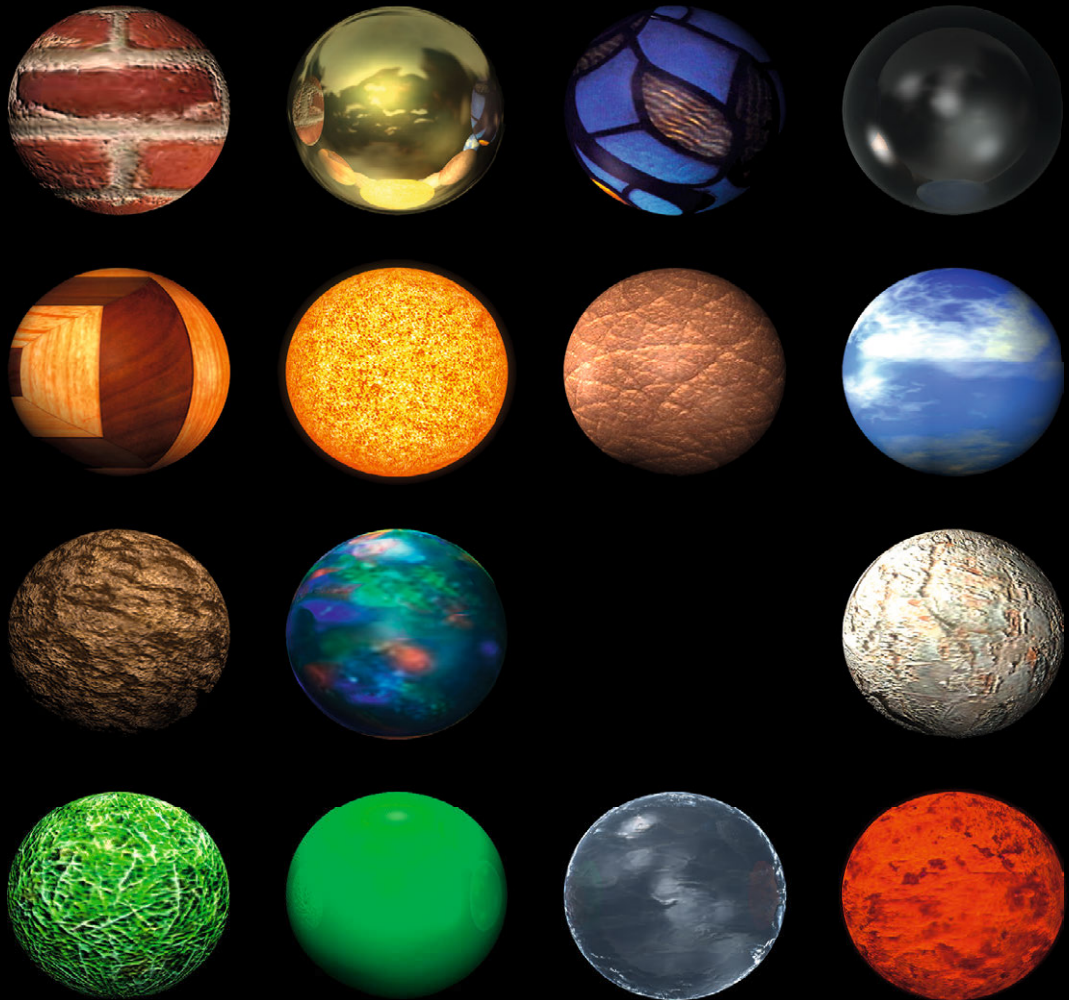


N. Welsch J. Schwab C. Chr. Liebmann



Materie

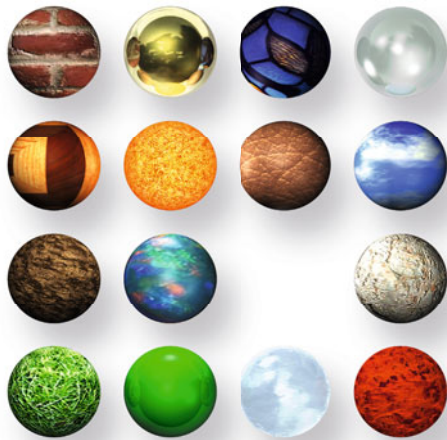
Erde, Wasser, Luft und Feuer

Materie

Norbert Welsch · Jürgen Schwab · Claus Chr. Liebmann

Materie

Erde, Wasser, Luft und Feuer



Adressen der Autoren:

Dr. Norbert Welsch
Marienburger Straße 12
72072 Tübingen
Telefon: 07071-79990
Mobil: 0151-14 86 79 32
e-Mail: nw@welsch.com
homepage: www.welsch.com

Jürgen Schwab
Schellingstr. 47
72072 Tübingen
e-Mail: juergenm.schwab@matter-matters.de
homepage: www.matter-matters.de

Dr. Claus Chr. Liebmann
Lammstraße 16/1
72072 Tübingen

ISBN 978-3-8274-1888-3

ISBN 978-3-8274-2265-1 (eBook)

DOI 10.1007/ 978-3-8274-2265-1

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

Springer Spektrum
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Planung und Lektorat: Merlet Behncke-Braunbeck, Dr. Christoph Iven

Redaktion: Dr. Monika Niehaus-Osterloh, Dr. Michael Zillgitt

Fotos/Zeichnungen: siehe „Bildquellen“ im Anhang

Satz: Welsch & Partner scientific multimedia, Tübingen

Einbandabbildung und Einbandentwurf: Welsch & Partner scientific multimedia, Tübingen

Druck und Verarbeitung: Appl aprinta Druck, Wemding

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-spektrum.de

Für meine Tochter
Laura-Marie

Norbert Welsch

Für meine Frau
Ursula Dachs

Jürgen Schwab

Für meine Mutter
Anni Liebmann

Claus Chr. Liebmann

Danksagung

Wir danken allen Familienmitgliedern, Freunden und Bekannten, die im Laufe der fünf Jahre der Entstehungszeit durch Diskussionen, Hinweise, Beiträge, Bereitstellung von Bildern und Korrekturen aktiv am Zustandekommen des Buches beteiligt waren oder die einfach unter der zeitlichen Konkurrenz zu leiden hatten. „Ars longa, vita brevis“ gilt leider auch für die Arbeit an einem Werk, das allen drei Autoren viel Herzblut abverlangt hat.

Last but not least ist der Verlag ein entscheidender Faktor beim erfolgreichen Zustandekommen eines Buchwerkes. Wir danken hier insbesondere Frau Merlet Behncke-Braunbeck und Herrn Dr. Christoph Iven für die engagierte Betreuung über die ganzen Entstehungsjahre. Frau Dr. Niehaus-Osterloh und Herrn Dr. Zillgitt danken wir für die sorgfältigen Korrekturen und Verbesserungsvorschläge. Hier konnten wir auf ein kompetentes und wohlwollendes Team beim Verlag Springer Spektrum zählen, das uns einerseits durch Terminvorgaben eine realistische Grenze setzte (und diese mehrfach erweitern musste), andererseits aber auch stets ein offenes Ohr bot und Lösungen für anstehende Probleme bereit hatte.

Eine dieser Problemlösungen war auch die Erlaubnis zur Auslagerung der ausufernden vollständigen Literaturliste ins Internet. Da diese dutzende zusätzliche Seiten verschlungen hätte, wären ansonsten allzu viele Abstriche am Inhalt notwendig gewesen. Aus diesem Grund findet sich im Anhang nur eine stark gekürzte Form dieses natürlich unverzichtbaren Teils.

Norbert Welsch
Jürgen Schwab
Claus Chr. Liebmann



Interaktive Medien · Bilder · Texte · Errata · Literaturhinweise · Neuigkeiten
Unter **www.welsch.com** finden Sie teilweise kostenlose Materialien der
Autoren zu den Büchern **Farben** und **Materie**.

Vorwort

Die Idee zu diesem Buch wurde bald nach Fertigstellung eines Werkes über „Farben“ geboren. Sie hat ihre Wurzeln in einen fast kindlich zu nennenden Interesse an der Welt um uns herum, in der unmittelbaren Faszination des Erfahr- und Erforschbaren. Dieses Ausgehen von der direkt mit unseren Sinnen erfahrbaren Alltagswelt halten wir trotz aller Theorielastigkeit der modernen Naturwissenschaften für den einzig gangbaren Weg zu einem tieferen Weltverständnis.

So soll auf der einen Seite durch einen breiten interdisziplinären Ansatz auch nicht versucht werden, den zahlreichen ausgezeichneten Lehrbüchern der Chemie, Physik und Biologie „einfach“ noch ein neues, in erster Linie für Fachleute lesenswertes Werk hinzuzufügen.

Andererseits aber wollten wir auch vermeiden, auf einem oberflächlichen Niveau stehen zu bleiben, das nur eine rein beschreibende Sicht der Dinge liefern könnte, und oft genug nicht geeignet wäre, tiefere Zusammenhänge aufzudecken.

Diese Gratwanderung war zweien von uns (Norbert Welsch und Claus Chr. Liebmann), laut den meisten Kritikern, beim „Farben“-Buch (2004, 3. Aufl. 2012) weitgehend gelungen.

Wir werden also auch in diesem Buch die Unmittelbarkeit des Erlebens unserer Umwelt zum Ausgangspunkt für eine Reise nehmen, die zuweilen auch in die Tiefe geht.

„Nur dadurch, dass ich Wasser anfasse, kann ich lernen, was es heißt, dass Wasser nass ist. Zugleich höre ich es glucksen oder tropfen, sehe ich Wellen und Reflexe, rieche vielleicht das Meer oder das Gras am Seeufer und erhalte so einen Gesamteindruck ...“(Manfred Spitzer)

Diesen Ansatz als Auseinandersetzung mit den verschiedenen Aspekten der Materialität der Welt, der sich bei Spitzer auf das kindliche Lernen bezieht, auf den Aufbau adäquater Repräsentationen der Außenwelt im Gehirn, möchten wir als Anknüpfungspunkt für ein vernetztes Verständnis materieller Erscheinungsformen und Vorgänge wählen.

Wir werden dabei nicht davor zurückschrecken, den Leser über Klippen von Theorie und Formeln zu führen, wo dies für das Verständnis unabdingbar ist. Als Reisebegleiter und kompetenten Führer durch solch unebenes Gelände habe ich (Norbert Welsch) meinen langjährigen Freund Jürgen Schwab gewinnen können, der sich als weiterer Co-Autor vornehmlich den Formulierungen der philosophischen und der etwas tiefer gehenden materialwissenschaftlichen, physikalischen und mathematischen Teile widmete.

Aber keine Angst – am Wegesrand wartet mit interessanten Bildern stets eine bequeme Lodge mit Gelegenheit zur Erholung und imposanten Ausblicken auf das erkundete Gebiet.

Wir werden bei unserer Wanderung eine große Zahl verschiedener Fachgebiete durchschreiten oder auch nur streifen, was immer die Gefahr birgt, dass die dort herrschenden Kapazitäten gerade ihr Gebiet als besonders grob zertrampelt empfinden und über die Eindringlinge herfallen. Wenn man aber ein Buch über die gesamte materielle Welt schreibt, wird es schon aus Platzgründen an manchen Stellen notwendig sein, Vereinfachungen und Verkürzungen vorzunehmen, die mancher Experte vielleicht als zu weitgehend betrachten könnte. Hierfür möchten wir an dieser Stelle um Verständnis bitten. Unseren Lesern wünschen wir, dass sie nach der hoffentlich anregenden Lektüre mit ihren eigenen Gedanken ein wenig tiefer „in die Dinge der Welt“ eingedrungen sind, zumindest so weit dies der heutige Stand der Wissenschaft erlaubt. Denn jenes nach bestem Vermögen erfolgende verstandesmäßige Durchdringen einiger Aspekte der Welt um uns ist es wohl, was unter nur wenig anderem unser Menschsein definiert. Es ist das „sapiens“ (lat. einsichtsfähig, weise) in unserer so unbescheiden gewählten Artbezeichnung *homo sapiens*.

Norbert Welsch
Welsch & Partner
scientific multimedia

Jürgen Schwab

Claus Chr. Liebmann

Tübingen, Frühjahr 2012



Luft, Wasser, Erde, Feuer, Du...
Schöntal, 23.09.2005

Fünf Elemente

*Ich bin wie Luft...
Du brauchst mich zum Atmen,
meine Leichtigkeit, Zartheit
kannst du erspüren,
Dich von ihr tragen lassen,
nur festhalten kannst Du sie nicht,
denn sie entweicht Dir
und was bleibt
sind die Spuren von Duft
in Deiner Nase...*



*Ich bin wie Wasser...
Du brauchst mich,
Um Deinen Durst zu löschen,
Deinen Durst nach Liebe,
Deinen Durst nach Erfüllung.
Nur festhalten kannst Du mich nicht,
denn hältst Du an mir fest,
fließe ich und versickere ich
und was bleibt
sind die Spuren von Nass
auf Deinen Händen...*



*Ich bin wie Erde, die Dich ernährt...
Du brauchst mich zum Sattwerden,
um Deinen Hunger zu stillen,
Deinen Hunger nach Einssein,
nach Vervollkommenung.
Nur festhalten kannst Du mich nicht,
denn ich zerfalle zu Staub
und werde zur Spur
Deines Vorbeiziehens,
in der Luft aufwirbelnd,
im Wasser Wellen schlagend...*



*Ich bin wie Feuer...
Das Dich leben lässt..
Und Du brauchst mich
für das Lodern Deiner Augen,
für Das Aufwallen Deines Blutes,
für den Schlag Deines Herzens.
Nur festhalten kannst Du mich nicht,
denn Du würdest verbrennen
und Du würdest zu Staub
und zu Dampf
und zu Luft werden...
Denn Du würdest wie ich...*

*...denn ich bin wie Luft...
ich bin wie Wasser...
ich bin wie Erde...
ich bin wie Feuer
ich bin wie Du...*

Elena Sworski
mit freundlicher Genehmigung

Bilder: Sabina Mucha
mit freundlicher Genehmigung

Inhalt

1 Mensch und Materie

Woraus ist die Welt gemacht?

- Kindliche Fragen... 3
- Auf der Suche nach der Welt 3
- Das Gewebe der Natur 5
- Modelle 6
- Etymologie 11
- Was Sie in diesem Buch erwartet... 12

2 Wahrnehmung

Sehen und Co. – Die fünf Sinne

- Sehen – Wahrnehmen – Verstehen 17
- Fühlen und Tasten 23
- Riechen und Schmecken 24
- Hören 26

3 Historischer Überblick

Vom Mythos zum Logos – Die Antike

- Vom Ursprung der Welt – die Schöpfungsmythen 29
- Entmythologisierung der Natur 31
- Die vier Elemente – Empedokles 33
- Leukipp und Demokrit – die frühen Atomisten 34
- Ideen oder Form? Platon und Aristoteles 34
- Eine Zeit des Umbruchs 38

Spätantike und Mittelalter

- Stagnation und Wiedergeburt 41
- Die islamische Wissenschaft 42
- Aristoteles' Erben im Abendland 43

Wuxing

- Fünf Elemente im chinesischen Denken 45
- Vom Wandel in der Welt 46

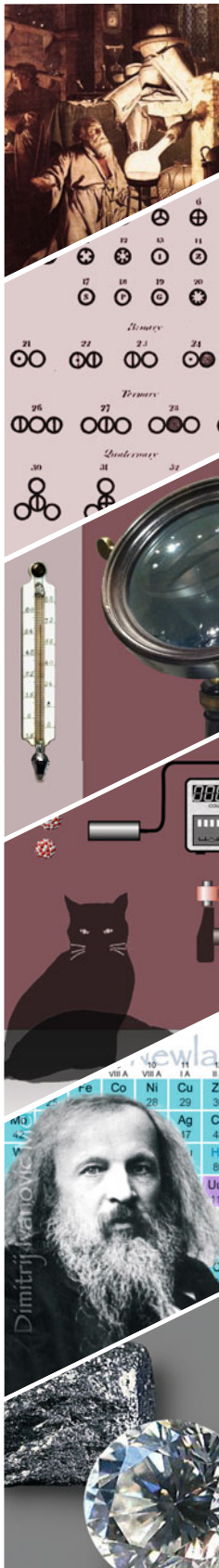
Der Advent der modernen Naturwissenschaft

- Eine Zeit des Umbruchs – die frühe Neuzeit 50
- Galileo Galilei – die Geburt der modernen Mechanik 53
- Res cogitans und res extensa – Descartes 54

Materie als Masse

- Issac Newton 56
- Masse, Trägheit und Gravitation 57





Von der Alchemie zur Chemie

- Aus Mystik wird Wissenschaft 59
- Elemente und Transmutation 61
- Paracelsus und die Iatrochemie 63

Die Entwicklung der modernen Chemie

- Von Minima Naturalia zu Atomen 64
- Revolution in Chemie und Gesellschaft 71
- Von Atomen zu Molekülen 76
- Die Ordnung der Elemente 78

Feld und Materie

- Von der Natur des Lichts 80
- Seltene Kräfte: Elektrizität und Magnetismus 82
- Die Kraft der Elektrizität 84

Der Äther

- Mysteriöses Medium des Lichts 87
- Äther und Materie 89

Wärme und Materie

- Wohl temperiert 90
- Energie und Entropie 93
- Wärmestrahlung und die Ultraviolett Katastrophe 96

Die Struktur des Atoms

- Moderne Atomtheorien 98

Umbruch: Die Quantentheorie

- Welle oder Teilchen, oder beides? 103
- Ist die Quantentheorie unvollständig? 107
- Was ist Materie heute? 112

4 Demokrits Erben

Das Geheimnis der Stoffe

- Elemente und ihre Eigenschaften 115
- Aufbau der Materie 123
- Das moderne Atommodell 134

Elemente im Periodensystem

- Ein Schema erklärt die Materie 137

Teilchen finden zusammen

- Verbindungen 144
- Ionenbindung 145
- Metallbindung 146
- Atombindung 148
- Wasserstoffbrückenbindung 149
- Van-der-Waals-Wechselwirkung 150
- Was geschieht, wenn viele Teilchen zusammentreffen? 150
- Kristalle und Kristallgitter 153
- Polymere – alte Werkstoffe der Menschheit 159

Eigenschaften der Stoffe

- Das Ganze aus den Teilen 160
- Phasen und Phasenübergang 166
- Das Einmaleins der Werkstoffeigenschaften 174
- Wenn Körper schwingen 193
- Wärmekapazität 197
- Wärmeleitfähigkeit 200
- Elektrische Leitfähigkeit 203
- Vom Leiter zum Supraleiter 207
- Superisolation 209
- Magnetismus 209
- Transparenz und Absorption 215
- Struktur und Farbe 217

5 Erde und Feststoffe

Die Welt, auf der wir stehen

- Ein ganz besonderer Planet 223
- Schalenbau der Erde 224
- Bausteine der Erdoberfläche 226
- Gebrannte Tonminerale – die Tonkeramiken 229
- Baukeramiken 231
- Gebrauchskeramiken 232
- Gesteine – komplexe natürliche Festkörper 235
- Verwitterung 236
- Sedimentgesteine 237
- Magmatite und Metamorphite – Produkte des Erdinneren 244

Vom Rohstoff zum Werkstoff

- Die Kunst der Verwandlung 245
- Fließender Fels – grauer Alltag 247
- Von einer Dichtungsmasse zum Straßenbelag 249

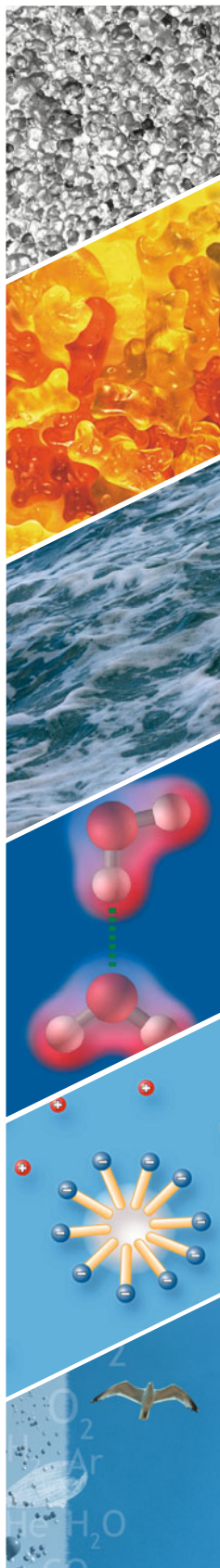
Metallische Werkstoffe

- Neue Zeiten brechen an 251
- Vom Eisen zum Stahl 254
- Eisen, Cobalt, Nickel – das magnetische Dreigespann 259
- Amorphes Metall – ein Material zwischen zwei Welten 263
- Edelmetalle 263
- Leichtmetalle – Aluminium und Titan 270
- Verrufenes Schwermetall – Blei 271
- Buntes Allerlei – Chrom 272
- Ein Schwergewicht – Uran 273
- Starke Luftküsse – Metallschäume 275
- Hartes zerschneiden – kein Problem 275
- Grenzgänger: Halbmetalle 277

Anorganische Werkstoffe

- Gläser – Nicht immer zerbrechlich 281
- Glasfasern 284
- Glaskeramik – Herdplatten und Teleskopspiegel 286





Organische Materialien

- Von Hölzern, Fasern und Beuteln 287
- Papier – Ein unentbehrliches Kommunikationsmittel 289
- Aus dem Leben der Beuteltiere 291
- Kunstfaser – Die neue Wolle 296
- Ausgewählte Kunststoffe 297
- Von Gummiadlern und -bären 302
- Selbstheilende Werkstoffe 306

6 Wasser

Flüssigkeiten

- Eine Materieform ohne Form 309
- Rheologie – Alles fließt 311

Wasser

- Das nasse Element 313
- Die Erde, ein Wasserplanet 313
- Das Wassermolekül 314
- Von der Erde gen Himmel und zurück 319
- Eis – das feste Wasser 321
- Gespanntes Wasser 323

Stoffgemische

- Ein schönes Durcheinander 326
- Lösungen 326
- Emulsionen 329
- Suspensionen 330
- Tenside – Sie lieben Wasser und Fette 331

Öle, Fette und ihre Abkömmlinge

- Ohne sie würde das Leben anders verlaufen 334
- Lebenssaft der Wirtschaft – Erdöl 343

Alkohole

- Mehr als ein Genussmittel 349
- Bekannte Alkohole 350

Exotische Flüssigkeiten

- Das fließende Silber – Quecksilber 353

7 Luft

Das Element der Freiheit

- Schwerer als erwartet... 359
- Ein Gasgemisch 359

Flüchtige Berührung

- Die Eigenschaften von Gasen 361
- Planetare Schutzhüllen 364
- Boten des Eros oder üble Stinker – die Geruchsstoffe 368

Luftige Stoffe

- Nicht nur Sauerstoff 371
- Lebenselixier und Gift – der Sauerstoff 371
- Stickstoff – Hauptbestandteil der Luft 376
- Wasserstoff – Ein brandgefährliches Gas 377
- Reaktionsträge Sonderlinge 378
- Methan – Klimaschädling und Hoffnungsträger 379

8 Feuer

Geschichte und Mythologie

- Der Stoff aus dem die Flammen sind 383

Feuer und Flamme

- Chemie und Physik der Verbrennung 385
- Flammen 386

Plasma

- Der vierte Aggregatzustand 387
- Plasmen in der Natur 387
- Plasmen in Technik, Forschung und Medizin 390

9 Form und Materie

Ordnung und Zufall

- Zufall – In den Naturgesetzen nicht(?) vorgesehen 397

Entropie

- Das Streben nach Unordnung 405

Komplexe Strukturen

- Welt aus dem Gleichgewicht 410

10 Elementarteilchen

Physik der kleinsten Teilchen

- Was die Welt im Innersten zusammenhält 417

Die Rätsel des Atomkerns

- Von Tröpfchen zu Schalen 420
- Ein Schalenmodell für Atomkerne 422
- Kernmagnetismus 424

Das Standardmodell

- Von den Nukleonen zum Standardmodell 426
- Wellenfunktionen und Quantenfelder 431

Jenseits des Standardmodells

- Von SUSY, Strings und Loops 437





11 Kosmologie

Welt des Großen und des ganz Großen

- Sag mir was die Sternlein sind... 445
- Asteroiden und Planetenmissionen als Informationsquelle 452
- Wissen vom Kleinsten für das Größte 453
- Das Universum im Computer 454

Materie im Universum

- Welten aus Gas und Sternenstaub 454
- Sonne 455
- Planetologie 457
- Monde 461
- Von Fall zu Fall... 464

Sterne und Sternentwicklung

- Über die Kinderstuben schwerer Atome 467
- Sterne im Gleichgewicht 471
- Kosmochemie jenseits des Heliums 475
- Elementsynthese durch Ungleichgewichtsprozesse 476

Deep Space

- Von der Milchstraße zu den fernsten Objekten in Raum und Zeit 482
- Urknall 490
- Vom Anfang zum Ende der Welt 497

12 Leben

Das Geheimnis der Rose

- Was ist eigentlich Leben? 501
- Weniger Materie – mehr Form 504
- Zentrale Biomoleküle 508

Die chemische Evolution

- LUCA – Last Universal Common Ancestor 510
- Von Makromolekülen zur Urzelle 512

Die biologische Evolution

- Von LUCA zu Domainen 514
- Wie geht es weiter? 516

Extraterrestrisches Leben

- Wo beginnt man zu suchen? 519

Anhang

- Bildquellen 522
- Literaturverzeichnis 524
- Index 528



KAPITEL 1

Mensch und Materie

Kindliche Fragen...

Auf der Suche nach der Welt

Das Gewebe der Natur

Modelle

Etymologie

Was Sie in diesem Buch erwartet

Zum ersten Kapitel

Materie ist um uns und in uns – wir selbst und das bekannte Universum bestehen aus Materie und Energie. Doch manchmal hindert uns gerade die Unmittelbarkeit und Allgegenwart der Materie daran, dieses Thema gebührend zu betrachten. Man sieht sozusagen „den Wald vor lauter Bäumen nicht“.

Dieses erste Kapitel wird versuchen, den Blick auf diese Bäume und den ganzen Rest der materiellen Welt zu lenken; uns helfen, unseren Standpunkt gegenüber der physischen Natur zu finden.

Dabei werden wir feststellen, dass die Beschäftigung mit der Stofflichkeit der materiellen Welt nicht nur eine Sache für spleenige Wissenschaftler ist, sondern dass sie direkt dem kindlichen Urinteresse entspringt, das viele Lebewesen und insbesondere menschliche Kinder ihrer Umwelt gegenüber empfinden.

Wir werden anschließend kurz auf die Methodik eingehen, die unser Forschen prägt, und dabei die Begriffe Hypothese, Theorie und Modell thematisieren.

Daneben werden wir dem Ursprung der Begriffe Masse, Materie, Material, Substanz und Stoff nachgehen.

Am Ende des ersten Kapitels erwartet uns ein kurzer Überblick über den Inhalt dieses Buches und Gliederung seiner restlichen Kapitel.



Mensch und Materie

Woraus ist die Welt gemacht?

Kindliche Fragen...

Wird ein Mensch geboren, so lernt er in den ersten Lebensjahren langsam, sein Ich vom Rest der Welt, der Außenwelt, zu unterscheiden. In dieser Zeit beginnt er auch, die Materialität dieser Außenwelt zu erfassen. Er lernt, Kategorien zu bilden und Strukturen wieder zu erkennen.

Neben den abstrakten Kategorien wie „gut“ und „böse“, die Kinder – als die für Ihr Dasein vielleicht wichtigste Unterscheidung – ebenfalls sehr früh erlernen, erkennen schon Zweijährige bewusst auch stoffliche Eigenschaften wie etwa „nass“. Das Töchterchen von einem der Autoren bezeichnete bald den Schnee als „kalt, nass“ und den Dampfnebel aus dem Bügeleisen als „heiß, nass“. Dabei beginnt sich die Einteilung der Dinge nach verschiedenen Stoffen und Aggregatzuständen als eine wesentliche Kategorie in der Wahrnehmung der Welt um uns herauszubilden. Nur wenig später, im Alter von drei bis vier Jahren, fangen die Fragen an nach dem Woher? Wie sind die Menschen, wie die Tiere entstanden? Teilerklärungen, wie „aus winzig kleinen Tieren oder einzelnen Zellen“, helfen nicht lange weiter. Woher kam die erste Zelle, fragt dieses Wesen, das sich in einer wunderbaren Welt findet, und bringt seinen Vater damit schon in allergrößte Erklärungsnot.

Dieses Urbedürfnis, die Welt, in die wir nach dem Philosophen MARTIN HEIDEGGER (1889–1976) „geworfen“ sind, zu kategorisieren und zu analysieren, bildet vielleicht den Kern menschlicher Intelligenz. Sie ist eines der Grundmerkmale unserer Spezies. Leider tritt dieses kindliche „wissen wollen“, woraus unsere Welt – „das Mannigfaltige“, um mit HEIDEGGER zu sprechen – wirklich besteht und wie es funktioniert, bei vielen von uns im Laufe ihres Lebens zurück. Es wird verschüttet zwischen täglichen Existenzsorgen, beruflichen Verpflichtungen und Zerstreuungen.

Auf der Suche nach der Welt

Das Interesse daran, wie die Natur beschaffen ist, „was die Welt im Innersten zusammenhält“ (GOETHE, Faust) steckt aber noch im Erwachsenenalter in jedem Menschen. Naturwissenschaftler haben es zu ihrem Beruf gemacht. Es gehört zu den charakteristischsten menschlichen Eigenschaften überhaupt. Auch ist es keinesfalls so, dass ein besseres Verständnis der Naturvorgänge das Staunen über die Existenz – religiöse Menschen mögen sie Schöpfung nennen – vermindert. JOHANN WOLFGANG VON GOETHE (1789–1832) ließ seinen Faust sagen:

„der Schauer ist der Menschheit bestes Teil“
(Faust II, Vers 6272 / Faust)

Dieses Gefühl des Schauderns vor dem großartigen Bild der Natur empfinde ich immer dann, wenn ich etwa in einer sternklaren Sommernacht auf einer Wiese liege und die Gestirne betrachte – die sichtbare Materie des Universums am Himmel, die noch warme Erde im Rücken, den Duft nach Heu in der Nase. Aber ebenso empfinde ich, wenn ich ein wenig vom Aufbau der Materie in meiner Hand verstanden habe. Wenn ich Zusammenhänge sehe, die mir helfen zu verstehen, warum die Dinge so sind, wie sie sind, sei es ein Felsblock oder eine Seifenblase.

Selbst gebildete Menschen wissen oft nicht, worauf sie mit ihren eigenen Füßen stehen. Woraus besteht eigentlich die Erde, gerade einmal zehn Meter unter der Oberfläche? Die Wenigsten wissen es zu sagen, und ich muss gestehen, dass ich selbst erst nach einem halben Chemiestudium begonnen habe, ernsthaft darüber nachzudenken. Für die meisten Menschen wäre es hingegen undenkbar, zehn Meter von einem Bretterzaun entfernt zu leben und überhaupt nicht wissen zu wollen, was sich dahinter verbirgt! Aber wir brauchen gar keine zehn Meter weit zu gehen. Bereits der Kugelschreiber in unserer Hand, das Papier dieses Buches oder das Glas, aus dem wir trinken, enthalten so viele Rätsel, dass man ein Forscher-



© 2011 Weisch & Partner scientific multimedia



FAUST

Habe nun, ach! Philosophie,
Juristerei und Medizin,
Und leider auch Theologie
Durchaus studiert mit heißem Bemühn.
Da steh ich nun, ich armer Tor!
Und bin so klug als wie zuvor.
Heiße Magister, heiße Doktor gar
Und ziehe schon an die zehen Jahr
Herauf, herab und quer und krumm
Meine Schüler an der Nase herum,
Und sehe, dass wir nichts wissen können!
Das will mir schier das Herz verbrennen.
Zwar bin ich gescheiter als all die Laffen,
Doktoren, Magister, Schreiber und Pfaffen;
Mich plagen keine Skrupel noch Zweifel,
Fürchte mich weder vor Hölle noch Teufel,
Dafür ist mir auch alle Freud entrissen,
Bilde mir nicht ein, was Rechts zu wissen,
Bilde mir nicht ein, ich könnte was lehren,
Die Menschen zu bessern und zu bekehren.
Auch hab ich weder Gut noch Geld,
Noch Ehr und Herrlichkeit der Welt;
Es möchte kein Hund so länger leben!
Drum hab ich mich der Magie ergeben,
Ob mir durch Geistes Kraft und Mund
Nicht manch Geheimnis würde kund.
Daß ich nicht mehr mit saurem Schweiß
Zu sagen brauche, was ich nicht weiß.
Daß ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält,
Schau alle Wirkenskraft und Samen,
Und tu nicht mehr in Worten kramen.

O sähst du, voller Mondenschein,
Zum letztenmal auf meine Pein,
Den ich so manche Mitternacht
An diesem Pult herangewacht:
Dann über Büchern und Papier,
Trübsel'ger Freund, erschienst du mir!
Ach! könnt ich doch auf Bergeshöhn
In deinem lieben Lichte gehn,
Um Bergeshöhle mit Geistern schweben,
Auf Wiesen in deinem Dämmer weben,
Von allem Wissensqualm entladen,
In deinem Tau gesund mich baden!

JOHANN WOLFGANG VON GOETHE

leben darauf verwenden könnte, sie wirklich genau zu ergründen. In diesem Sinn gleicht die Welt einem Hologramm, bei dem Information über das gesamte Bild schon in jedem kleinsten Ausschnitt zu finden ist. Die wichtigsten Geheimnisse der Welt stecken in jedem alltäglichen Gegenstand: Könnte man im Detail verstehen, wie eine Ameise funktioniert, so hätte man wohl einen Großteil der Welt verstanden.

Der Weisheit letzter Schluss

Wenn jemand daher kommt und sagt, so und nicht anders ist die Welt, kommt nur und lernt es, ist größte Vorsicht geboten. Etwas von Religion steckt in solchen absoluten Aussagen, und sie entsprechen in keiner Weise unserem heutigen wissenschaftlichen Selbstverständnis.

Insbesondere im Lauf der letzten gut hundert Jahre haben die Wissenschaftler ihre Lektion an Bescheidenheit gelernt. Zu oft mussten stolze und wunderschöne Theoriegebäude große Erweiterungen, Umbauten und Renovierungsmaßnahmen über sich ergehen lassen. Vor allem wird heute (meistens) klar unterschieden zwischen echten Theorien und Arbeitshypothesen, die nur dazu dienen, eine Vermutung zu formulieren, um sie dann zu überprüfen. Im Gegensatz zur umgangssprachlichen Verwendung wird mit Theorie in der Wissenschaft ein klar definiertes Gedankengebäude für einen ebenso klar definierten Anwendungsbereich bezeichnet, das durch zahlreiche damit in Einklang stehende Befunde gestützt wird. Gute Theorien sollten auch experimentelle Befunde vorhersagen, und sie legen Experimente zu ihrer eigenen Überprüfung nahe. Zudem existieren für jede Theorie Schlüsselexperimente, deren negativer Ausgang sie fast zwangsläufig zu Fall bringen würde. Sie muss dann normalerweise in ihrem Gültigkeitsbereich stärker eingeschränkt oder modifiziert bzw. erweitert werden, um den neuen Ergebnissen Rechnung zu tragen. In einigen Fällen muss sie auch ganz aufgegeben und durch eine Theorie ersetzt werden, die mit den experimentellen Beobachtungen in Einklang steht.

Und von Beobachtungen wollen wir in diesem Buch immer wieder ausgehen. Vom direkt sinnlich Erfahrbaren, das uns in der Welt begegnet, von Dingen, die wir im Wortsinn „begreifen“ können. Dies wird uns fester Grund und Anker sein, wenn wir uns tiefer hinein begeben



in die Strukturen und Ähnlichkeiten der Dinge. Und wir werden dieses Begreifen auch nicht aus den Augen verlieren, wenn wir uns mit zugrunde liegenden Denkmodellen befassen, die nicht immer gleich intuitiv zu erfassen sind.

Schwierigkeiten im Kleinen wie im Großen

Viele wissenschaftliche Theorien des letzten Jahrhunderts sind ihrem Wesen nach recht unanschaulich. Das kommt daher, dass sie sich mit Phänomenen beschäftigen, die weit außerhalb unserer Alltagserfahrung liegen. Allerdings wäre es völlig verfehlt anzunehmen, dass diese Bereiche deshalb keinen Einfluss auf unsere Existenz hätten und von Wissenschaftlern womöglich nur deshalb untersucht werden, weil es in der uns vertrauten Welt nichts mehr für sie zu tun gibt.

Die Welt der aller kleinsten Dimensionen und die damit zusammenhängenden ungewöhnlichen Phänomene erweisen sich als so grundlegend für alles Existierende wie der Zement für ein Haus aus Beton. Wenn wir uns insbesondere in den Kapiteln 3, 4 und 10 mit Teilchen beschäftigen, die millionenfach kleiner sind als der Punkt am Ende dieses Satzes, so wird uns der gesunde Menschenverstand in diesen Regionen nicht leiten können. Hier zählt nicht mehr die Anschaulichkeit einer theoretischen Beschreibung, sondern nur noch ihre Übereinstimmung mit Messungen. Es ist das bizarre Reich der Quantentheorie. Hier gibt es Teilchen, die von einem Ort zum anderen gelangen, ohne jemals dazwischen gewesen zu sein, Quantenobjekte, die gleichzeitig stillstehen und sich bewegen und Katzen, die gleichzeitig tot und lebendig sind.

Und auch die wirklich großen Entfernungen in der Welt, die ungeheuren Zeiträume ihrer Existenz sowie die höchsten Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit bereiten unserem Vorstellungsvermögen gehörige Probleme. Die Welt verhält sich auch in diesen Dimensionen einfach nicht mehr so, wie wir es gewohnt sind. Sie richtet sich ganz einfach nicht danach, was bequem in unseren Kopf passt. Auch in diesen kosmischen Regionen, über die wir in Kapitel 11 sprechen werden, müssen wir unseren Alltagverstand gehörig umgewöhnen. Skurrile Dinge warten da auf uns: Sterne mit einer Kruste aus Eisen, andere, die zu einem Pfannkuchen abgeplattet sind und sich so schnell drehen wie ein Zahnarztbohrer, Gravitationskräfte, die

scheinbar aus dem Nichts wirken, Galaxien ohne Sterne und schließlich sogar Zeit, die unterschiedlich schnell läuft.

Das Gewebe der Natur

Trotzdem lässt sich – und das ist eigentlich ganz erstaunlich – zumindest etwas von den Phänomenen des Aller kleinsten und des Aller größten mit unserem menschlichen Gehirn verstehen. Unser Gehirn schafft es irgendwie, Gedankenkonstrukte wie die Mathematik oder physikalische Theorien zu entwickeln, die zur Untersuchung der Grundfragen des Universums und der darin enthaltenen Materie auf ganz eigentümliche und überraschende Art und Weise geeignet sind. Sie „passen“. Und dies, obwohl das Gehirn seine Evolution in irdischen Verhältnissen durchgemacht hat und es bisher wohl nicht unbedingt ein evolutionärer Vorteil war, astrophysikalische oder quantenmechanische Zusammenhänge zu verstehen. Aus Sicht der Biologie ist dies ein völlig überraschender Befund, denn normalerweise ist die Natur bei der Selektion der Ausstattung ihrer Organismen extrem ökonomisch, um nicht zu sagen geizig. Eigenschaften von Lebewesen beruhen nämlich auf körperlichen Strukturen und erfordern für ihren Aufbau stets Energie, also Nahrung, eine in der Natur stets knappe Ressource. Neue Eigenschaften entstehen beispielsweise durch zufällige Mutationen im Erbgut. Aber nur solche bleiben in der natürlichen Selektion erhalten, die sich positiv auf die Zahl der Nachkommen auswirken oder diese zumindest nicht durch Verschwendung von Energie reduzieren. Schließlich könnte die Energie, die wir für so „sinnlose“ Tätigkeiten verschwenden, ja andernfalls für die Fortpflanzung genutzt werden. Energie „verbraucht“ unser Denkapparat übrigens immerhin so viel wie ein durchschnittlicher Prozessor in einem modernen Computer. Vom Grundumsatz eines Menschen (der etwa der Leistung einer 75 Watt-Lampe entspricht), entfallen auf das Gehirn rund zwanzig Prozent, obwohl es nur zwei Prozent der Körpermasse ausmacht.

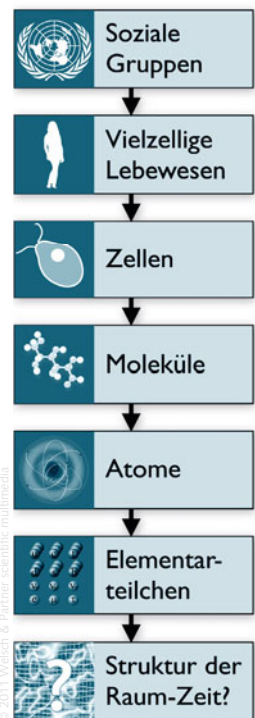
Unser über das unmittelbar Nützliche hinausgehendes Erkenntnisvermögen ist also nur dann biologisch erklärbar, wenn es quasi zufällig, als kostenloser und unschädlicher Nebeneffekt eines anderen evolutionären Vorteils entstanden ist und kaum zusätzliche Energie erforderte. Wir

Hypothese

Angenommene, aber (noch) nicht bewiesene Aussage

Theorie

Beschreibung eines Ausschnitts der Realität, die unter definierten Voraussetzungen überprüfbare Vorhersagen erlaubt.



1-2

Entitätsebenen. Aus menschlicher Sicht lässt sich Materie entsprechend ihrer stofflichen Basis und Komplexität in Stufen anordnen, die jeweils eigene Metastrukturen und typische Eigenschaften aufweisen.



wissen bisher nicht mit Bestimmtheit, was dieser entscheidende Vorteil war. War es eine Weiterentwicklung des planenden Vorausschauens, das schon viele Tiere zeigen? War es ein optimiertes Sozialverhalten? Oder waren es vielleicht die Folgen der Intensivierung des eigentlich noch weniger verstandenen Phänomens des Bewusstseins (► Bewusstsein, Seite 518), das übrigens neueren Forschungen zufolge ebenfalls nicht auf *Homo sapiens* beschränkt ist?

Man kann vermuten, dass ganz allgemein die Fähigkeit zur Bildung mentaler Repräsentationen der Außenwelt den entscheidenden Vorteil im Überlebenskampf mit sich brachte. Offensichtlich ist es für Lebewesen nützlich, auch über Dinge nachdenken zu können, die nicht unmittelbar sichtbar, sondern eher abstrakter Art sind. Neuere Untersuchungen zeigen, dass solche mentalen Repräsentationen und vielleicht ein Ich-Empfinden auch schon im Tierreich wesentlich verbreiteter sind, als früher allgemein angenommen. So wurde bei Rabenvögeln beobachtet, dass sie gezielt aus einem Draht einen Haken biegen können, um damit nach Nahrung zu angeln. Dazu müssen sie über eine abstrakte Vorstellung verfügen, wie ein Haken funktioniert. Affen können Symbole (keine Bilder konkreter Gegenstände) für Wörter benutzen und daraus Sätze bilden. Ebenso können sie mit kleineren Zahlen umgehen. Auch das ist eine abstrakte Repräsentation von etwas nicht direkt Sichtbarem. Und selbst bei Vertretern anderer Tiergruppen wie Kopffüßern und Fischen bis hin zu Insekten tritt erstaunlich planvolles Handeln auf. Wir sehen hier den Beginn von Modellbildungen, auch wenn diese Fähigkeit bei unserer eigenen Spezies wesentlich weiter entwickelt ist. Weit genug jedenfalls, um uns schließlich die Bildung komplexer geistiger Konstrukte bis hin zur Mathematik zu gestatten, bei denen kein offensichtlicher Zusammenhang mehr zu einem unmittelbaren Evolutionsvorteil besteht. Jedoch sollten wir bedenken, dass unsere auf Verstandesprozessen basierende technische Zivilisation uns erlaubt hat, auch die entferntesten Flecken dieses Planeten in einer Dichte zu besiedeln, die dutzendfach höher ist, als jede natürliche Population einer anderen Art mit ähnlicher Körpergröße. So etwas hat es in der gesamten Erdgeschichte noch nicht gegeben. Selbst wenn man das millionenfache Leid durch Hunger, Krankheit und Armut bedeutender Teile der menschlichen Erdbevölkerung

in Betracht zieht, so ist die Versorgung heute, prozentual gesehen, nicht schlechter geworden als zu jeder früheren Zeit und in jeder natürlichen Tierpopulation. Vielleicht schaffen wir sogar bald, (in evolutionären Zeiträumen gerechnet) andere Planeten der Milchstraße zu besiedeln und zu kolonisieren, wie es der berühmteste Physiker unserer Zeit, STEPHEN HAWKINS, immer wieder propagiert. Die Menschheit wäre dann selbst gegen globale Katastrophen gefeit. Kann man sich einen größeren Evolutionsvorteil vorstellen? Ob uns die zahlreichen Folgen der Erkenntnisfähigkeit in diesem Sinne schließlich auch langfristig Vorteile bringen werden oder womöglich genau das Gegenteil, das wird sich wohl erst im großen Experiment der nächsten Jahrtausende und Jahrmillionen zeigen.

Modelle

Modelle werden oft scherzhaft als „Denk-Krücken“ bezeichnet, Hilfsmittel zum Denken also. Dies bringt zum Ausdruck, dass wir – ob momentan oder sogar prinzipiell – mit unserem Bewusstsein nicht in der Lage sind, eine bestimmte Erscheinung in ihrer gesamten Komplexität zu erfassen, und uns irgendwie behelfen müssen. Wir müssen vereinfachen, uns auf das Wesentliche konzentrieren. So wird von einem Haus, bevor man es baut, ein Modell erstellt. Es erlaubt eine Vorstellung von dem späteren Aussehen und einen Überblick über die wesentlichen Merkmale. Dabei ist niemand überrascht, dass in einem solchen Modell keine Geranien in den Balkonkästen wachsen. Modelle vernachlässigen ganz bewusst viele Aspekte der Realität, von denen man annimmt, dass sie für das interessierende Phänomen keine große Bedeutung haben. Wissenschaftler machen sich andauernd Modelle der Wirklichkeit, und auch wir werden in diesem Buch ständig Modelle verwenden, wenn wir nach den kleinsten Teilchen der Materie fragen, nach den Strukturen, die bestimmte Eigenschaften hervorbringen, oder nach der großräumigen Verteilung der Materie in der Welt. Wissenschaftliche Modelle sind wie beim simplen Hausmodell vereinfachte Repräsentationen eines realen Systems. Es können einfache Analogien sein, etwa der Vergleich eines Atoms mit einem Tennisball, die vor allem didaktischen Zwecken dienen. Oft basieren Modelle aber auf einer bestimmten phy-

Modell

Ein Modell ist ein abstraktes Abbild eines Systems, das stellvertretend für das System untersucht wird.



sikalischen Theorie und sind im Vergleich zum Alltagsbegriff stärker formalisiert. Sie werden in physikalisch-mathematischer Formelsprache ausgedrückt, die es erlaubt, quantitative Zusammenhänge zu beschreiben.

Modelle und Theorien

Doch woher weiß man, was in einem Modell vernachlässigt werden darf und was nicht? Und woher weiß man, ob das Modell überhaupt den interessierenden Ausschnitt aus dem realen System repräsentiert?

Hier kommt die Theorie ins Spiel, die einem wissenschaftlichen Modell zugrunde liegt. Theorien liefern nicht nur die Formeln, nach denen bestimmte Modellgrößen berechnet werden können, sie sind es vielmehr, die viele der in Modellen verwendeten Größen erst definieren. Und damit geben sie auch vor, welche „Daten“ des betrachteten Systems auf welche Art und Weise ermittelt werden müssen. So sind für ein Modell der Planetenbewegungen des Sonnensystems auf Basis der Newtonschen Theorie die Massen der Planeten erforderlich. Da man Planeten nicht wiegen kann, benötigt man die Theorie bereits, um diese Massen über die Bahnradialen und Umlaufzeiten der Planeten zu berechnen. Die Theorie zeigt auch, ob man die Einflüsse der Planeten untereinander in Abhängigkeit von der angestrebten Fehlertoleranz vernachlässigen kann oder nicht.

Allerdings sollen Modelle auch dazu dienen, Theorien zu verifizieren. Nachdem wir anfangs die Bahndaten der Planeten ermittelt haben, sollte unser Modellsonnensystem deren Positionen vorhersagen können. Trifft diese Vorhersage (im Rahmen der Fehlertoleranz) zu, so bestätigt dies die zugrundeliegende Theorie. Aber wie weit kann man einer Theorie vertrauen, wenn das Modell, mit deren Hilfe man die Prüfung durchführt, die Theorie bereits voraussetzt? In der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts glaubten Wissenschaftstheoretiker, man könne dieses Problem dadurch lösen, dass man scharf zwischen theoretischen und reinen Beobachtungsgrößen in der Formulierung einer Theorie trennt und für ihre Prüfung nur letztere zulässt. In der Praxis ist diese Unterscheidung allerdings unmöglich: Was sind „reine“ Beobachtungsdaten? „Masse“ ist zum Beispiel nichts, was wir beobachten können. Auch Atome können wir nicht direkt beobachten. Die in diesem Buch präsen-

„Ich bin niemals zufrieden, bevor ich ein mechanisches Modell des Gegenstands konstruiert habe, mit dem ich mich beschäftige. Nur wenn es mir gelingt, ein solches herzustellen, dann verstehe ich den physikalischen Sachverhalt.“

LORD KELVIN (WILLIAM THOMSON), 1824–1907

„Ich höre und vergesse. Ich sehe und behalte. Ich handle und verstehe ...“

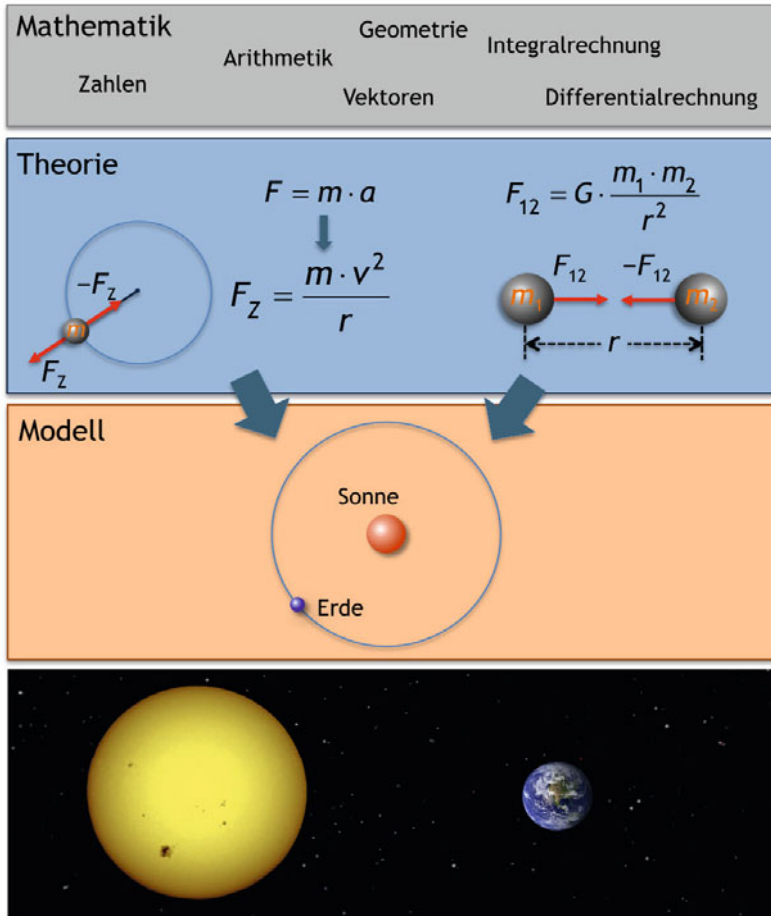
KONFUZIUS, 551–479 v. Chr.

tierten „Bilder“ von Atomen sind aus Messergebnissen abgeleitet, für deren Interpretation die Quantentheorie vorausgesetzt wird. Gegen eine zu strenge Trennung zwischen theoretischen und Beobachtungsbegriffen spricht auch, dass es oft gerade Übertragungen von Theorien und Begriffen auf völlig andere Anwendungsbereiche waren, die zu neuen Erkenntnissen führten. Allerdings ist das Zusammenspiel zwischen Beobachtung, Modell und Theorie tatsächlich heikel, wie man beim Thema „Dunkle Energie“ sehen kann: Die (indirekt auf Basis einer anderen Theorie) beobachteten Geschwindigkeiten von Galaxien im für uns sichtbaren Universum stehen nicht im Einklang mit Modellen unseres Universums auf Basis der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Standardtheorie der Elementarteilchen. Wo steckt der Fehler? In den Modellen oder in der Theorie?

Im Allgemeinen sind Wissenschaftler daher bemüht, möglichst viele unterschiedliche Systeme und möglichst viele Modelle oder Modellvarianten zu betrachten, um einer Theorie den Ritterschlag „(vorläufig) gut bestätigt“ zu erteilen. Nicht von ungefähr können Theorien, deren Formeln und Grundbegriffe sehr breit angelegt sind (wie die klassische Mechanik), auch gut bestätigt werden: Es gibt einfach sehr viele Systeme, auf die sie anwendbar sind. Das erklärt auch, warum Wissenschaftler nicht jedes „Gegenbeispiel“ für eine Theorie zum Anlass nehmen, dieselbe als widerlegt anzusehen. Ist ein neunzigjähriger, rauchender Alt-Bundeskanzler der Beweis, dass Rauchen unschädlich ist?

Typen von Modellen

In den einfachsten Fällen besteht ein Modell aus einem Satz von Formeln, die, angewandt auf bestimmte Eingabeparameter, die Ausgabewerte liefern. Auf diese Weise lässt sich beispielsweise die



Flugbahn eines Golfballs im Modell simulieren. In vielen Fällen ist eine geschlossene Formeldarstellung aber gar nicht bekannt, oder sie existiert überhaupt nicht, obwohl man die Gleichungen für das Verhalten der Einzelkomponenten durchaus kennt. Von dieser Art ist eine etwas genauere Version unseres Modells des Sonnensystems. Berücksichtigt man nicht nur die wechselseitige Anziehung zwischen Sonne und Planeten, sondern auch die der Planeten untereinander, so sind die erhaltenen Gleichungen nicht mehr „analytisch“, also durch Angabe einer Formel, lösbar. In der Regel kann man sie aber numerisch lösen, d. h. man kann für gegebene Eingabeparameter durch Näherungsverfahren der tatsächlichen Lösung nahe kommen. Der Nachteil dieses Verfahrens: Man erfährt wenig über die allgemeine Struktur aller möglichen Lösungen, man muss sie jeweils „ausprobieren“ oder auf weniger präzise Modelle ausweichen, deren Gleichungen man analytisch lösen kann. Das Verhalten dieser Lösungen gibt oft wertvolle Hinweise für das komplexere Modell, woraufhin man gezielt bestimmte Fälle numerisch

1-3

Theorie, Modell und Realität. Theorien definieren die Gesetze und Grundbegriffe, die man benötigt, um Modelle realer Systeme zu formulieren. In wissenschaftlichen Theorien werden Begriffe und Strukturen aus der Mathematik verwendet, um Zusammenhänge eindeutig und quantitativ zu erfassen. In mit Hilfe der Theorie formulierten Modellen werden theoretische Grundbegriffe mit Eigenschaften der realen Systeme verknüpft. Aus einer „Punktmasse“ der klassischen Mechanik wird in einem Modell des Sonnensystems ein Planet wie die Erde oder ein Stern wie unsere Sonne. Das Modell kann maximal die Elemente des realen Systems berücksichtigen, für die es in der Theorie Grundbegriffe gibt. Meist werden noch weitere Vereinfachungen vorgenommen, so wird beim System Erde-Sonne links angenommen, dass die Masse beider Körper in deren Mittelpunkt konzentriert gedacht werden kann. Die Sonne wird zudem als fixiert betrachtet: ihre Bewegung aufgrund der Anziehungskräfte der Planeten wird vernachlässigt. Das reale System selbst ist also viel umfangreicher, und die Menge seiner Eigenschaften und Objekte ist eher diffus definiert. So besteht das Sonnensystem nicht nur aus Planeten, sondern aus vielen kleinsten Körpern, Gaswolken, elektromagnetischer Strahlung, Strömen von Elementarteilchen und vielem mehr. Vieles davon ist im Rahmen der klassischen Mechanik, die die Bewegung der Planeten so gut beschreibt, gar nicht erklärbar. Neue Theorien mit anderen Begriffen müssen hier an ihre Stelle treten.

„ausprobieren“ kann. Oft kann man komplexere Sachverhalte auch dadurch annähern, dass man in einem einfacheren, „lösbarer“ Modell den Einfluss von „Störungen“ analysiert. Man wählt die Form der Störungen gerade so, dass sie möglichst viel vom komplexen Sachverhalt erfassen. So können in unserem einfachen Modell des Sonnensystems die Einflüsse der Planeten aufeinander auch als „Störungen“ ihrer Bahnen begriffen und damit - in gewissen Grenzen - ihre Wirkungen berechnet werden. Vor der Erfindung des Computers waren aufgrund des erforderlichen Rechenaufwandes numerischen Verfahren enge Grenzen gesetzt, weshalb man meist auf stark vereinfachte Modelle zurückgreifen musste. Dies galt insbesondere für Systeme aus sehr vielen Einzelelementen oder Parametern, deren kollektives Verhalten man erforschen wollte, wie zum Beispiel unser Gehirn. Heutzutage lassen sich dank Computer auch komplexere Modelle simulieren, was zu neuen Einsichten, unter anderem im Bereich der Materialwissenschaft, Molekulargenetik und Klimaforschung geführt hat. Aber auch heute noch bringen scheinbar „einfache“ Prozesse wie die Faltung eines Eiweißmoleküls Computer an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit, ganz zu schweigen von hochkomplexen Systemen wie unserem Gehirn.



Modelle, die auf Basis von Gleichungen der beschriebenen Art erstellt werden, nennt man *deterministisch*, unabhängig davon, ob man sie analytisch oder nur numerisch lösen kann. Kennt man alle Eingabeparameter zu einem bestimmten Zeitpunkt, so steht das Verhalten des Modells für alle Zeiten fest (was nicht zwingend für das reale System gelten muss!). Es gibt allerdings auch Modelle, bei denen statistische Methoden eingesetzt werden. Sie werden unter anderem genutzt, wenn nur die Häufigkeitsverteilung von Eingabeparametern bekannt ist oder die zeitliche Entwicklung eines Systems von so vielen Parametern abhängt, dass sie zumindest teilweise als zufallsgesteuert betrachtet werden kann. Statistische Modelle müssen keineswegs weniger verlässlich oder genau sein als „klassische“ Modelle. Bei Systemen aus sehr vielen Elementen hängt nämlich die zeitliche Entwicklung meist nicht vom Verhalten jedes einzelnen Elements ab, sondern folgt dem statistischen Gesetz der großen Zahlen. So wird der Druck eines Gases auf eine Gefäßwand durch eine riesige Zahl von Molekülen erzeugt, die unermüdlich dagegen stoßen. Der Wert des Drucks hängt aber nur von der mittleren Stoßzahl pro Zeit- und Flächeneinheit ab, nicht von der individuellen Geschichte aller beteiligten Gasmoleküle (► Kapitel 9).

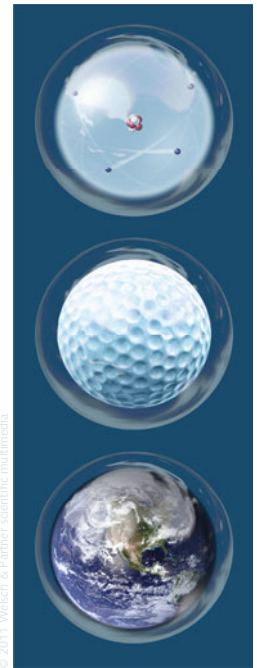
Oft hat man bei realen Systemen die Wahl, sie als Ansammlung diskreter Objekte (diskrete Modellierung) oder als kontinuierliches Medium (kontinuierliche Modellierung) zu modellieren. So kann man eine Flüssigkeit entweder als ein Strom von Teilchen oder als Materiefluss mit einer bestimmten Flussdichte ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) modellieren. Ob ein System „in Wirklichkeit“ aus diskreten Objekten besteht oder nicht, ist dabei oft zweitrangig. Sind die zu modellierenden Systemeigenschaften zumindest näherungsweise davon unabhängig, so können beide Modellierungswege zu gleichen Ergebnissen führen. Bei diskreter Modellierung ist das Entstehen kollektiven Verhaltens der einzelnen Elemente besonders augenfällig. Es ist überraschend, welch komplexes, ja sogar intelligentes Verhalten ein System zeigen kann, obwohl seine Elemente einfachen „dummen“ Regeln folgen. Bei Computersimulationen diskreter Systeme nutzt man heutzutage zunehmend das Konzept der Softwareagenten. Softwareagenten sind autonom nach bestimmten Regeln agierende Softwaremodule, die auch miteinander „kommunizieren“

können. Das Agentenparadigma liefert Erklärungen für kollektives Verhalten, zum Beispiel im Rahmen der Verkehrsmodellierung oder in der Verhaltensbiologie („Schwarmintelligenz“). Dennoch lassen uns manchmal auf diese Weise gewonnene Erklärungen unbefriedigt. Es ist ja keineswegs trivial, aus dem Verhalten des Modells zu einem besseren Verständnis der inneren Vorgänge zu kommen. Denn als „verstanden“ empfinden wir einen Vorgang eigentlich erst dann, wenn wir durch einen für uns unmittelbar nachvollziehbaren geistigen Prozess quasi eine Abkürzung zur Lösung finden.

Modelle für fremde Dimensionen

Um Schwierigkeiten mit Erscheinungen in sehr kleinen oder sehr großen Dimensionen zu begegnen, die für ungewohnt sind, greifen wir oft auf Modelle zurück, die wir gedanklich in die gewohnten Größenordnungen transformieren. Es wäre natürlich falsch, würde man z. B. ein Kugelmodell der Atomhülle mit der Atomhülle selbst verwechseln. Jede Theorie und erst recht jedes einfache Modell abstrahiert ja, wie wir oben betont haben, bestimmte Eigenschaften der Natur und hat daher stets nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich. Die Wahl des passenden Modells ist abhängig von der Ebene der Erklärung, die man anstrebt und vom Gültigkeitsbereich der jeweiligen Modelle. So gesehen, hat ein Tennisball ebenso Berechtigung, in bestimmten Situationen als Atommodell herangezogen zu werden, wie etwa das Bohrsche Atommodell mit seinen Elektronenbahnen oder das heute bevorzugte, auf der Quantentheorie basierende, Orbitalmodell.

Wie wichtig es ist, ein Modell nicht allzu leicht für die Wirklichkeit zu nehmen, wurde einem von uns erst kürzlich wieder klar, als er der sechsjährigen Tochter erklären wollte, dass Eis bei 0°C schmilzt und dabei erst einmal verhindert, dass sich das Schmelzwasser weiter erwärmt. In der Schule hatte man ja gelernt, dass zugeführte Energie zunächst das restliche Eis schmilzt, bevor sich das Wasser weiter erwärmt. Prompt kam die Gegenfrage: Aber was ist, wenn das letzte Eisstückchen nur noch ganz klein ist und viel Wasser da? Na dann ... – gilt dieses einfache Modell natürlich nicht mehr, musste zugegeben werden. Bedenkt man die endliche Wärmeleitfähigkeit von Wasser, so kann es natürlich ohne weiteres außen schon heiß sein, während noch Eis da ist.



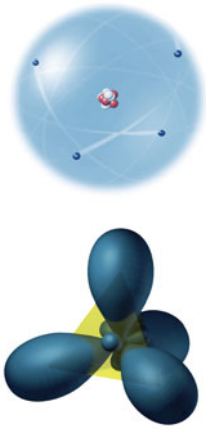
1-4

Kugelmodelle. Eine Kugel dient wegen ihrer Einfachheit als Modell für viele unterschiedliche Dinge, auch solche, die für unsere Vorstellung die „falsche“ Größe haben, z. B. ein Atom oder ein Planet.

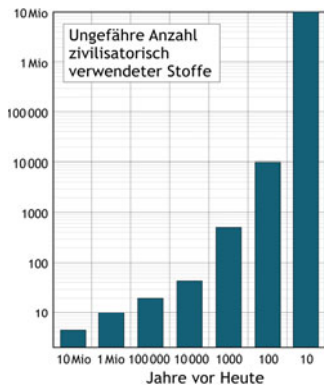


1-5

Modelle für Menschen. Bei der Berechnung von Fluchtwegen kann man Menschen einfach als Kreise modellieren. Legt man Wert auf Gemütszustände, so sind Smileys bessere Menschenmodelle. Will man Körperhaltungen des Menschen betrachten, benötigt man wieder andere Modelle.

**1-6**

Modelle für Atome. In Kapitel 3 und 4 werden wir einige konkrete Atommodelle betrachten, derer sich die Menschen im Laufe der Jahrhunderte bedient haben.

**1-7**

Materie, die uns umgibt. Im Lauf der zivilisatorischen Entwicklung hat der Mensch große Teile der Materie, mit der wir täglich in Berührung kommen, immer stärker beeinflusst. Ausgehend von Anpassungen der makroskopischen äußeren Form (Steinwerkzeuge) über Kombinationen und Strukturänderungen (Stahl) ist heute Manipulation von Materie auf molekularer (Kunststoffe, Metamaterialien) und sogar atomarer Ebene (Quantenpunkte) möglich. Der Begriff Materie wandelt sich. Er wird immer häufiger auf das jeweils beherrschte Material bezogen.

Es besteht dann eben kein thermodynamisches Gleichgewicht. Man tut also gut daran, den Differenzierungsgrad des Modells der Wirklichkeit sehr sorgfältig zu wählen.

Um das Wesen einer beschriebenen Erscheinung von verschiedenen Seiten zu beleuchten, kann es didaktisch sehr nützlich sein, das Erklärungsmodell immer wieder zu wechseln. Nur in diesem Sinn einer Annäherung an die Realität mit Hilfe von Theorien und Modellen kann man von wissenschaftlicher „Erkenntnis“ über die Struktur von Materie sprechen, die wir in diesem Buch vermitteln wollen. Die „Wirklichkeit“ kann und wird immer ganz anders aussehen. Was man sich unter dem Begriff „objektive Wirklichkeit“ überhaupt vorzustellen hat, bleibt auch heute Gegenstand philosophischer Diskussionen.

Trotz dieser Einschränkungen lässt sich heute ein in sich stimmiges Bild von normaler Materie zeichnen, das ein befriedigendes Verständnis vieler Prozesse erlaubt. Dass jede Erkenntnis an einem bestimmten Punkt endet, wird einem schmerzlich bewusst, wenn man an die Grenzen unseres Weltverständnisses im Kleinsten wie im Größten denkt. Gibt es etwas noch Elementarerer als die heute kleinsten bekannten Elementarteilchen, die Leptonen und Quarks? Gibt es ein „Außerhalb“ des bekannten Universums? Welchen Teil unserer universellen Heimat können wir überhaupt kennen? Wie alt ist die Welt? Gab es vielleicht eine Welt vor dem Urknall? Diesen Fragen werden wir uns im hinteren Teil des Buches erneut zuwenden, denn gerade in den letzten Jahren haben die Auswertungen neuerer Daten von Satelliten sowie von Ballonmessungen im Mikrowellenbereich und Statistiken über die Verteilung bestimmter Supernovae im Weltraum geradezu eine neue Ära der Kosmologie heraufbeschworen. Sie erlauben es nun erstmals auf einige Fragen quantitative Antworten zu bekommen (► Kapitel 11), oder zumindest begründete Hypothesen zu entwickeln, die einmal zu Antworten führen könnten. Die Erkenntnis, wie die Welt funktioniert, liegt zu einem beträchtlichen Teil in jedem ihrer kleinsten Teile verborgen, denn es sind immer wieder grundlegende Prinzipien, die sich, einmal enthüllt, in tausendfacher Anwendung quer durch die Natur wiederfinden lassen. Hätten wir nur einen Stein vollständig verstanden, so wüssten wir damit schon einiges über das dazugehörige Gebirge. Könnten wir wirklich genau verstehen, wie eine einzige win-

zige Ameise funktioniert, so würden viele Seiten aus dem Buch des Lebens offen vor uns liegen.

Wir wollen hier vorerst von sogenannten „emergenten“ Eigenschaften absehen, ohne sie ganz aus den Augen zu verlieren. So werden Eigenschaften bezeichnet, die wie bestimmte makroskopisch messbare Materialeigenschaften (Zähigkeit, Leitfähigkeit) oder auch die Intelligenz, erst durch das Zusammenwirken einer großen Zahl von Einzelementen entstehen. Für ein einzelnes atomares Bauteilchen ist es z. B. unsinnig, den Druck oder die Reißfestigkeit zu definieren; ebenso kann man nicht davon sprechen, dass ein Neuron ein wenig Intelligenz besitzt oder ein Buchstabe ein wenig des Sinns von Schillers Räuber enthält. Solche Eigenschaften großer Ensembles hängen neben den Bestandteilen ganz entscheidend von der Struktur ab, von der Art und Weise, wie die Komponenten miteinander verbunden sind. Als klassisches Beispiel hierfür kann der Kohlenstoff dienen. Sind seine Atome in regelmäßigen Sechsecken angeordnet, haben wir es mit Graphit zu tun, eine elektrisch leitfähige, dunkelgraue, sehr weiche Substanz, die in Bleistiften (im Widerspruch zu deren Namen) für die Schwärzung des Papiers sorgt. Sind die Kohlenstoffatome hingegen zu Tetraedern verknüpft, so handelt es sich um Diamant mit völlig anderen Eigenschaften: ein elektrischer Isolator, lichtdurchlässig und bis vor kurzem der härteste bekannte Stoff überhaupt. Wie die natürlichen Stoffe zusammengesetzt sind, ist schon für sich gesehen ein faszinierendes Thema. Doch die Gewinnung und Herstellung der künstlichen Werkstoffe, aus denen der Mensch seine Zivilisation aufgebaut hat, ist nicht minder spannend. So haben sich die Erscheinungsformen des Kohlenstoffs in den letzten Jahren um Fullerene, Nanoröhrchen und Graphen erweitert, von deren Existenzmöglichkeit zuvor niemand etwas ahnte. Auch sie sind Themen in diesem Buch. Jahrtausende an Erfahrung haben uns ursprünglich ermöglicht, die Materialien zu finden und zu verarbeiten, die unsere heutige Lebensweise – man mag sie verdammten oder preisen – erst ermöglicht haben. Ein weiter Weg führte unsere Vorfahren von den Fundstellen bestimmter harter Steine über die Verarbeitung von Pflanzenfasern zu Geweben bis zur Metallgewinnung. Was die Nutzung der materiellen Umwelt als Werkzeug und Werkstoff anging, kam es zu einer geradezu explosionsartigen Entwicklung (► Ab-



bildung 1-7). Zusätzlich zu den in der Natur vorkommenden Stoffen lernte der Mensch immer mehr Stoffe eigens für seine Zwecke zu gewinnen und zu nutzen. Ein verbessertes Verständnis der Materialien durch chemische und physikalische Forschung ermöglicht es Ingenieuren heute, Materialien mit genau für den geplanten Einsatz optimierten Eigenschaften herzustellen. Diese „designten“ Materialien ermöglichen in vielen Fällen auch einen schonenderen Umgang mit natürlichen Ressourcen. Langlebigere Produkte sind oft energetisch günstiger herzustellen, als mehrere kurzlebige. Andererseits können auf baldigen Zerfall „programmierte“ Kunststoffe einen Beitrag zur Entschärfung des Müllproblems leisten.

Etymologie

Materie, Matter und Matière

Der Begriff *Materie* wie auch der englische Begriff *matter* und das französische *matière* sind aus dem lateinischen *materia* entlehnt, das soviel wie Nutzholz, Bauholz, Stoff, aber auch Aufgabe, Anlage, Talent bedeutet. Von dieser ursprünglichen Bedeutung des Wortes im Lateinischen zeugt auch das portugiesische Wort *madeira* (Holz). Der Holzreichtum der portugiesischen Insel Madeira gab dieser ihren Namen.

Materia selbst stammt wohl von *mater* ab, was so viel wie Mutter, Ursprung, Quelle bedeutet, aber auch den inneren Teil des Baumes bezeichnet.

Mater wiederum hat seine Wurzeln im indogermanischen *mater* (Mutter), aus dem auch althochdeutsch *muoter*, altindisch *matar* und altgriechisch *mater* für Mutter abgeleitet ist.

Die griechischen Philosophen bezeichneten das Substrat aller Dinge als *hylê*, was ebenfalls Holz oder Wald bedeutete. Der *Hylozoismus* als die Lehre von der Beseeltheit der Natur hat hier seine Wurzeln, ebenso wie der *Hylomorphismus*, die Lehre von Form und Materie.

Material

Der Plural *Materialia* leitet sich vom Plural des lateinischen Worts *materialis*, was soviel wie „zur Materie gehörig“ bedeutet. Im heutigen Sprachgebrauch ist *Material* kein Synonym des physi-

kalisch orientierten Begriffs *Materie*, sondern es steht für technisch angewandte, oft stark bearbeitete oder umgewandelte Materie. Das Schwerkraft dieses Begriffs liegt eindeutig auf seiner Bedeutung für den Menschen.

Masse

Das Wort *Masse* hat seinen Ursprung im lateinischen *massa*, das einen Teigklumpen oder auch einen Klumpen Erz bezeichnen konnte. Später wurde es generell als eine Ansammlung von Körpern oder als Haufen verstanden. Seine physikalische Bedeutung als träge Masse erhielt es erst im 17. Jahrhundert.

Massa wiederum hat seinen Ursprung im griechischen *maza*, der Bezeichnung für ein grobes Fladenbrot aus Gerste, das, im Gegensatz zum feineren Weizenbrot *artos*, vorwiegend von einfachen Leuten gegessen wurde.

Die Herkunft von *maza* selbst ist nicht vollständig geklärt. Manches spricht dafür, dass es aus dem Hebräischen stammt. Dort bezeichnet *mazza* das ungesäuerte Brot der Israeliten, das auch in der Bibel vielfach erwähnt wird. Denkbar ist aber auch, dass das Wort den umgekehrten Weg ging und von den Griechen über die Philister ins Hebräische übernommen wurde.

Möglicherweise ist *maza* aber auch nur abgeleitet vom griechischen Wort *masso* für kneten (noch heute kennen wir das Wort *Massage* in dieser Bedeutung). Der arabische Ausdruck *mad-dah* wurde in der muslimischen Philosophie im Sinne von *Materie* benutzt und bezeichnet das Ausgedehnte.

Substanz

Substanz leitet sich vom lateinischen *substantia* ab, das für das Zugrundeliegende steht. Es ist ein Synonym des Wortes *essentia*, von dem das Wort *Essenz* (z. B. in Essigessenz) abstammt. In der Philosophie steht es für „das, wodurch etwas ist, was es ist“, also all das, was zum Beispiel einen Menschen zu einem Menschen oder einen Stein zu einem Stein macht. Es ist in diesem Sinn verwandt mit dem griechischen Wort *usia*, das für das Wesen von etwas steht. In der Umgangssprache steht es meist für einen chemischen Stoff, in der Medizin für ein einheitliches Gewebe (etwa die „graue Substanz“ des Nervengewebes) oder einen Wirkstoff.

Etymologie

Lehre von der Herkunft und Geschichte der Begriffe.

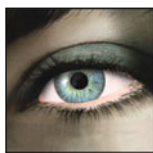


Stoff

Das Wort *Stoff* entstammt aus dem mittelniederländischen *stoffe* und dieses aus dem altfranzösischen *estoffe* (Gewebe). Die Herkunft dieses Wortes ist unklar. Stoff steht in der Physik ganz allgemein für die Materie, in der Chemie für eine Substanz einheitlicher Konsistenz mit bestimmten Eigenschaften wie Kochsalz oder Wasser. In der Chemie wird der Begriff *Stoff* nicht synonym zu Substanz verwendet. Während mit *Stoff* Materie in jedem Aggregatzustand gemeint sein kann, liegen *Substanzen* stets in fester Form vor.

Was Sie in diesem Buch erwartet...

Das vorliegende Buch geht deduktiv von der Wahrnehmung und der direkt sinnlich erfahrbaren Stofflichkeit unserer Alltagswelt aus und widmet sich dann den weniger direkt zugänglichen Formen der Materie. Dies ist Grund genug, uns zunächst einmal mit den Sinnen – den natürlichen und den künstlich geschärften – zu befassen, die allein in der Lage sind, uns Kunde von dem da draußen zu geben.



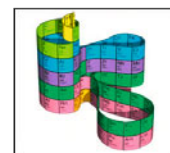
Im folgenden Kapitel über die **Wahrnehmung** (► Kapitel 2) werden wir zunächst beleuchten, auf welche Weise wir überhaupt Informationen über die Welt und die Materie darin gewinnen können. Dabei werden wir uns als Augentiere natürlich zunächst dem Sehen zuwenden. Wir diskutieren, welche Erweiterungen und Relativierungen auch ein scheinbar simpler Begriff wie das „Sehen“ in unserer modernen Welt bereits erfahren hat. Seit Wahrnehmbares beliebig speicherbar geworden ist, hat etwa ein Photon, das uns von einem Bild oder Film erreicht, nie selbst mit dem gesehenen Objekt in Wechselwirkung gestanden. Wahrnehmung wird auf die reine Informationsübermittlung reduziert. Sie verliert ihre Unmittelbarkeit und damit zum Teil auch ihre Authentizität. Gleichzeitig entfaltet sie aber mit der zur Verfügung stehenden technischen Sensorik eine zuvor unvorstellbare Reichweite bezüglich der Größendimensionen wie auch bezüglich der Sinnesmodalitäten. Doch auch alle anderen natürlichen und technisch verbesserten

Sinne liefern uns Informationen über die Welt und sind deshalb Gegenstand der Betrachtung. In metaphorischem Sinne verwenden wir „Sehen“ also für alle Erkennungsprozesse vom Reiz bis zur bewußten Wahrnehmung.



Ein **Historischer Überblick** (► Kapitel 3) stellt dar, welche Vorstellungen vom Ursprung der materiellen Welt in den Schöpfungsmythen der Kulturen

zum Ausdruck kommen, und wie sich diese zu rationalen und später naturwissenschaftlichen Vorstellungen hin entwickelten. Zu diesen gehört die Atomtheorie ebenso wie die antike Elementelehre mit ihrer Viergliederung in Feuer, Wasser, Erde, Luft und dem fünften Element Äther. In der Folge stehen die antiken Elemente in diesem Buch nur noch metaphorisch für die wichtigsten Aggregatzustände der Materie, nämlich für Festkörper, Flüssigkeit, Gas und Plasma. Die Entwicklungsgeschichte zentraler und heute selbstverständlicher Begriffe wie Element, Verbindung oder Masse, führt deutlich vor Augen, wie weit der Weg von unmittelbarer Sinneserfahrung zur naturwissenschaftlichen Erklärung der materiellen Welt ist. Auch die Schwierigkeiten, mit denen Wissenschaftler bei der Interpretation von Erkenntnissen konfrontiert sind, sind Gegenstand dieses Kapitels. Nicht nur für Katzenliebhaber ist dabei die Diskussion interessant, ob eine Katze gleichzeitig tot und lebendig sein kann.



In **Demokrits Erben** (► Kapitel 4) beginnen wir mit den fundamentalen Bausteinen, deren Eigenschaften unsere Erfahrungswelt unmittelbar prägen: den Atomen. Aus ihrem Aufbau folgt das periodische System der Elemente (PSE), auf das wir auch in späteren Kapiteln immer wieder zurückgreifen werden. Wir werden sehen, wie sich die Eigenschaften der uns bekannten Stoffe aus der Wirkung von Kräften zwischen Atomen dieser Elemente ergeben: Warum sind Metalle elektrische Leiter und Kunststoffe (meistens) nicht? Warum ist ein Stoff elastisch? Warum bilden manche Stoffe Kristalle und andere nicht? Wir werden auch der Frage nachgehen, warum es überhaupt unterschiedliche „Phasen“ gibt, wie Physiker und Chemiker die Erscheinungs-

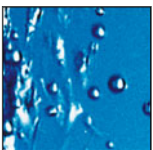


formen der Materie als Festkörper, Flüssigkeit und Gas auch nennen.

Jedem antiken „Element“, also jedem Aggregatzustand, wird in der Folge ein eigenes Kapitel gewidmet. Die Kapitelabfolge der Aggregatzustände entspricht dabei bewusst weder der üblichen Elementreihenfolge (Feuer, Wasser, Erde, Luft), noch der bei vielen chemischen und physikalischen Abhandlungen bevorzugten Gliederung nach zunehmender struktureller Komplexität, ausgehend von Gas über Flüssigkeiten hin zu Feststoffen. Wir betrachten stattdessen zunächst die Feststoffe, die uns sowohl in der Natur als auch in der zivilisatorischen Umwelt besonders deutlich entgegentreten und die deshalb in diesem Buch überproportional viel Raum einnehmen. In jedem Stoffkapitel werden auch „Exoten“ angesprochen, also besonders interessante Stoffe mit eher unbekannten und seltsam anmutenden Eigenschaften wie Ferrofluide, Aerogele, durchsichtiger Beton oder Superflüssigkeiten.

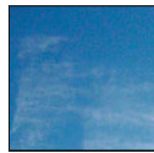


Die **Erde** (► Kapitel 5), das Reich der mineralischen und oftmals kristallinen Stoffe, macht den Anfang. Wir beschäftigen uns damit, worauf wir eigentlich stehen und mit was wir bauen. Der Schichtaufbau der Erde sowie die Zusammensetzung verbreiteter Gesteine, Bodenarten und Minerale ist ebenso Thema, wie die vom Menschen genutzten Baumaterialien. Warum wird Ton beim Brennen hart? Aus was besteht Asphalt? Es geht auch um Metalle, ihre Gewinnung und Veredelung. Was unterscheidet Eisen von Stahl? Was versteht man unter Flotation? Wer ist der Nickel-Kobold? Wir sprechen über Hartmetalle, Gläser, Halbleiter, Papier, Kunstfasern und Kunststoffe, kurz: über die Werkstoffe, die uns in der heutigen Zivilisation laufend begegnen. Die Frage, wie man Stahl hart und Gummi elastisch macht, gehört dabei ebenso dazu wie die Frage, wie Solarzellen funktionieren und aus was Gummibärchen gemacht werden.



Flüssigkeiten betrachten wir in ihrer gesamten Breite, von **Wasser** (► Kapitel 6) über Öle, Seifen, Alkohole, Ionische Flüssigkeiten, Quecksilber, Superflüssigkeiten und Magma. Der Frage, warum sich Wasser nass anfühlt, Öl aber nicht, gehen wir

ebenso auf den Grund, wie der Frage, warum sich letzteres in Wasser nicht löst, in Seifenlauge aber wohl. Alkohole sind wiederum Ausgangspunkt vieler interessanter Flüssigkeiten, unter anderem der wohlriechenden Ester, zu denen auch Fette und Speiseöle gehören. Estern und ätherischen Ölen (die eigentlich gar keine Öle sind) verdanken wir den Wohlgeruch von Blumen und Parfums. Heute wichtiger noch als Speiseöl ist allerdings das Erdöl, welches mit ersterem nicht viel gemein hat. Aber wie entsteht eigentlich Erdöl und wie stellt man daraus Benzin, Diesel oder Plastik her?



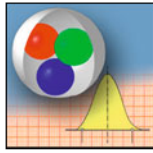
Natürlich bildet die uns umgebende **Luft** (► Kapitel 7) mit ihren wichtigsten Bestandteilen den Ausgangspunkt des Kapitels über Gase. Dabei geht es auch um den Aufbau der Atmosphäre, um Ozonlöcher und den Treibhauseffekt. Im Zentrum des physikalischen Verhaltens der Gase stehen natürlich die bekannten Gasgesetze, mit denen sich das Verhalten dieser vergleichsweise einfachen Materieform gut verstehen lässt. Es geht auch um angenehme Gerüche und wie wir sie von weniger gut riechenden Gasen unterscheiden können. Wir stellen viele wichtige Gase, mit denen der Mensch zu tun hat, einzeln vor: Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Methan bzw. Erdgas und die Edelgase. Damit kennen wir schon die „üblichen Verdächtigen“, denen wir im Kapitel über Kosmologie auf den Gasplaneten erneut begegnen werden.



Der Aggregatzustand Plasma, symbolisiert durch das antike Element **Feuer** (► Kapitel 8), schließt sich zwanglos an das Gas an. Hier zeigt sich ein Vorteil der gewählten ungewöhnlichen Reihenfolge in der Behandlung der Aggregatzustände. Die Betrachtung führt von der direkten Erfahrung mit Plasmen auf der Erde in Form von Flammen und Leuchtstoffröhren hin zur Elementarteilchenphysik und zu kosmologischen Fragestellungen. Wussten Sie, dass das auf der Erde eher exotische Plasma der im Universum am weitesten verbreitete Aggregatzustand ist? Plasmen in und zwischen Sternen und ionisierte kosmische Gasnebel kommen dabei zur Sprache. Auch hier stoßen wir auf direkte Verbindungen von



unseren irdischen Erfahrungen mit dieser Materieform. Zum Beispiel auf die in kommenden Kapiteln thematisierten Zustände direkt nach dem Urknall.



Form und Materie (► Kapitel 9)

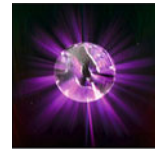
geht der keineswegs trivialen Frage nach, wie aus einfachen Bausteinen komplexe, hochgradig organisierte Strukturen wie Lebewesen entstehen können. Hier spielen Begriffe wie Selbstorganisation, Chaos und Entropie eine zentrale Rolle. Warum widerspricht steigende Komplexität nicht dem Streben nach Unordnung? Kann ein Schmetterling tatsächlich einen Tornado auslösen? Und was hat Entropie mit Information zu tun? Aber auch der Rolle des Zufalls in einer Welt scheinbar deterministischer Naturgesetze werden wir nachgehen. Computernutzer werden zudem erfahren, wie groß die Speicherkapazität eines USB-Sticks höchstens sein kann und wie dies mit der Entropie schwarzer Löcher zusammenhängt.



Im Kapitel Elementarteilchen (► Kapitel 10) verlassen wir

erstmalig die Welt der Atome, in der Protonen, Neutronen und Elektronen den Ton angeben. Wir begeben uns eine Ebene tiefer, in die Welt der Elementarteilchen. Wie man im vorherigen Jahrhundert feststellen musste, ist diese Welt ungleich reichhaltiger, als man es für „elementare“ Teilchen eigentlich erwartet hätte. Das sogenannte Standardmodell ordnet diesen Zoo der Elementarteilchen in drei Familien, von denen nur die erste die uns bekannte materielle Welt aufbaut. Erst die Wechselwirkungen zwischen solchen Teilchen liefern eine über das chemische Verständnis hinaus gehende physikalische Erklärung der Eigenschaften der Materie. Beispielsweise dient die Theorie der Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld als Erklärung für die Existenz der Masse. Allerdings verlassen wir spätestens auf dieser Ebene die „materielle“ Welt der Materie. Materie und Energie werden eins und im Mittelpunkt stehen abstrakte Konzepte wie Quantenfelder und Symmetrie. Hier stoßen wir an die Grenzen unseres heutigen Verständnisses über die Grundstruktur der Welt. Prominente Ansätze, diese Grenzen zu überwinden, werden wir kennenlernen: Superstringtheorie und Loop-

Quantengravitation. Wir werden auch erfahren, warum der LHC (Large Hadron Collider) in Genf eine wichtige Rolle dabei spielt und warum viele Physiker glauben, dass unsere Welt mehr als 3 Dimensionen haben muss.



Das folgende Kapitel Kosmologie (► Kapitel 11) widmet sich dem

Aufbau und der Verteilung der Materie im Großen. Ausgehend von den irdischen Beobachtungsmöglichkeiten und Instrumenten wird unser Wissen über die Verteilung der Materie und über die von ihr gebildeten Strukturen im Sonnensystem, in der Galaxis und im sichtbaren Bereich des Universum dargestellt. Die Strukturen der Welt in unterschiedlichen Größenskalen führen uns zurück zur Frage nach dem Ursprung der Welt, den Kosmogonien, die wir im historischen Kontext in Kapitel 3 bereits betrachteten. Wie hängt all das zusammen mit dem Aufbau der Materie aus subatomaren Teilchen wie Leptonen und Quarks? Warum glauben Kosmologen, dass sich unser Kosmos immer schneller ausdehnt? Und was können wir aus der allgegenwärtigen kosmischen Hintergrundstrahlung über das junge Universum vor beinahe 14 Milliarden Jahren lernen?



Ein letztes Kapitel über Lebende Systeme (► Kapitel 12) ist den

strukturellen und entropischen Besonderheiten solcher Strukturen und der Emergenz der „Lebendigkeit“ gewidmet – der Entstehung und Evolution immer stärker spezialisierter (und scheinbar entropisch unwahrscheinlicherer) Lebewesen bis hin zum Bewusstsein und zur Auseinandersetzung mit der Welt. Hier werden wir erneut die Stellung des Menschen in der materiellen Welt thematisieren und damit den Bogen schlagen zu den einleitenden Kapiteln. ■

KAPITEL 2

Wahrnehmung

Sehen – Wahrnehmen – Verstehen
Fühlen und Tasten
Riechen und Schmecken
Hören



Zum zweiten Kapitel

Wenn wir uns mit der Materie in der Welt befassen wollen, ist es angebracht, zunächst nach dem Wahrnehmungs- und Erkenntnisprozess selbst zu fragen, der uns Menschen Informationen über eben diese Materie liefert. Die Evolution hat uns mit Sinnen ausgestattet, die uns erlauben, für unser Überleben wichtige Eigenschaften der materiellen Welt mehr oder weniger direkt wahrzunehmen und darauf zu reagieren. Die Tatsache, dass wir Informationen aus der Umwelt zum Überleben brauchen, führte letztlich zur Entstehung unseres Gehirns. Erstaunlicherweise gestattet dies uns sogar ein Bewusstsein unserer selbst. Und wir können diese Welt nicht nur verwundert und staunend betrachten, sondern sie auch neugierig untersuchen. Diese Neugierde zeichnet Kinder und Wissenschaftler aus. Sie ermöglicht es uns vor allem, einen Teil der materiellen Welt wirklich zu verstehen, auch wenn wir letztlich nicht sagen können, wie groß dieser Teil eigentlich ist.

Wir beschäftigen uns in diesem Kapitel damit, auf welche Weise wir Materie mit unseren Sinnen wahrnehmen können und wie unser Nervensystem mit der Ausbildung eines inneren Modells dazu beiträgt. Wir diskutieren, welche Erweiterungen und Relativierungen z. B. ein Begriff wie „Sehen“ in unserer modernen Welt erfahren hat. Und natürlich müssen wir uns auch Gedanken darüber machen, warum wir nur die Sinne besitzen, die wir tatsächlich haben, und keine anderen.

Dieser Ansatz führt weiter zu dem riesigen Gebiet unserer technisch erweiterten Sinne, mit denen wir das Verständnis (der Dinge in) der Welt während der letzten Jahrhunderte ein gehöriges Stück vorantreiben konnten. Wir haben unsere natürlich vorhandenen Sinne mit der Technik geschärft und sogar ganz neue Sinnesmodalitäten erschaffen, die wir vorher nicht besaßen, ja für die es teilweise in der gesamten Lebenswelt der Erde kein einziges Beispiel gibt. Künstliche Sinne lassen uns im Dunkeln sehen, ein Magnetfeld wahrnehmen oder Gammastrahlung registrieren. Wir schauen in die Details der Materie hinein und zu den entferntesten Sternen empor. Damit sind für uns im wahrsten Wortsinn „unvorstellbare“ Dimensionen im Allerkleinsten und im Allergrößten „zugänglich“ geworden. Aber: Können wir das alles noch in gleicher Weise verstehen und so begreifen wie die Information, für deren Bewältigung unser Nervensystem ursprünglich entstanden ist?