

Ulrich Wunderlin

Lehrbuch der phänomenologischen Chemie

Band 3

2. vollständig überarbeitete Auflage
von Sven-Heiko Bubel

edition waldorf

Pädagogische Forschungsstelle beim Bund der Freien Waldorfschulen
Wagenburgstraße 6 · 70184 Stuttgart

© edition waldorf

2. Auflage Stuttgart 2018

Sie finden uns im Internet unter www.waldorfbuch.de
--

ISBN 978-3-940606-97-6

Gestaltung und Satz: tebitron gmbh, Gerlingen

Druck und Bindung: DRUCKtuell Druck- und Verlagsgesellschaft mbH, Gerlingen

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf der
vorherigen schriftlichen Einwilligung der Pädagogischen Forschungsstelle Stuttgart.

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

Vorwort	10
Atomvorstellungen und Reaktionsmechanismen der mineralischen Chemie	12
1. Einleitung	12
2. Stoffe und Teilchen – Systeme und Komponenten	13
3. Der Aufbau der Atome – eine erste Annäherung	21
3.1. Atommodelle und ihre geschichtliche Entwicklung	21
3.1.1. Das Daltonsche Atommodell	21
3.1.2. Das Kern-Hülle-Modell von Rutherford	23
3.2. Die Elementarteilchen – die Komponenten der Atome	24
3.3. Der Atomkern	27
3.4. Die Atommasse, die Molekülmasse, das Mol und die Avogadro-Konstante	28
4. Das Periodensystem und der Aufbau der Elektronenhülle	32
4.1. Das Periodensystem	32
4.2. Unterschiede in den Eigenschaften der Elemente	32
4.3. Die Struktur der Elektronenhülle	33
5. Das Kugelwolkenmodell als erweitertes Schalenmodell	36
5.1. Atommodelle der Elemente der ersten drei Perioden	36
5.2. Elektronenschreibweise (nach G. LEWIS)	38
5.3. Das Zustandekommen einer Atombindung	39
5.4. Kovalente Verbindungen	41
5.5. Nomenklatur der binären kovalenten Verbindungen (Nichtmetall-Nichtmetall- oder Nichtmetall-Halbmetailverbindungen)	42
5.6. Das Kugelwolkenmodell und die räumliche Gestalt der Moleküle	43
5.7. Homöopolare und heteropolare Atombindungen	45
5.8. Die Ableitung der Strukturformel bei gegebener Molekülformel	47
5.9. Oktetterweiterung	49
5.10. Die Ableitung des Dipolcharakters eines Moleküls	50
5.11. Die Bindungslänge und die Bindungsenergie	52
6. Zwischenmolekulare Kräfte	52
7. Molekulare Stoffe	57
7.1. Nichtmetalle	57
7.1.1. Wasserstoff	57
7.1.2. Kohlenstoff	58
7.1.3. Stickstoff	60
7.1.4. Phosphor	60
7.1.5. Sauerstoff	61
7.1.6. Schwefel	62
7.1.7. Halogene	62
7.2. Reaktionen der Nichtmetalle	63
7.2.1. Die Reaktion von Wasserstoff mit Chlor	63
7.2.2. Die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff	63
7.2.3. Die Reaktion von Wasserstoff mit Stickstoff	64
8. Ionenbindung und Salze	64
8.1. Atom- und Ionenradien	64
8.2. Das Ionengitter	66
8.3. Die Ableitung der Substanzformel einer binären Ionenverbindung und die Nomenklatur	68
8.4. Die Bildung von Moleküllionen und ihre Salze	69
8.4.1. Moleküllionen	69
8.4.2. Salze der Moleküllionen	70
8.4.3. Metallkomplexionen	71

8.4.4. Das Auflösen eines Salzes in Wasser	72
8.5. Berthollide Verbindungen	74
9. Metalle	75
9.1. Physikalische Eigenschaften	75
9.2. Die Metallbindung	75
9.3. Metallgitter	76
9.4. Legierungen	78
10. Zusammenfassung:	
chemische Bindungen und chemische Verbindung	79
10.1. Chemische Bindungstypen – Ebene der Teilchen	79
10.2. Chemischen Verbindungstypen – Ebene der Stoffe	79
10.3. Die vier Gittertypen	80
11. Der Verlauf chemischer Reaktionen	80
11.1. Die Reaktionsgeschwindigkeit	80
11.2. Das chemische Gleichgewicht	81
11.3. Das Prinzip von Le Chatelier	82
11.4. Reaktionsmechanismen der anorganischen Chemie	83
11.5. Energiediagramme	84
11.6. Thermische Stabilität einer Bindung und die chemische Reaktionsfähigkeit	86
11.7. Die Berechnung der Bildungsenthalpie aus den Bindungsenergien der Edukte und Produkte	86
12. Redoxreaktionen	88
12.1. Die Oxidationszahlen (OZ)	88
12.2. Die klassischen und modernen Begriffe: Oxidation und Reduktion	89
12.3. Beispiele für Redoxreaktionen	92
12.3.1. Ein Metall im elementaren Zustand reagiert mit einem Salz eines edleren Metalls	92
12.3.2. Reaktionsfähiges Nichtmetall reagiert mit einem Salz eines Nichtmetalles	93
12.3.3. Ein Alkalimetall reagiert mit Wasser	94
12.3.4. Redox-tabelle	94
12.4. Redoxgleichgewichte	95
13. Die Elektrochemie	95
13.1. Die Elektrolyse von Schmelzen (= Schmelzflusselektrolyse)	96
13.2. Die Elektrolyse wässriger Lösungen	97
13.3. Galvanische Zellen	98
13.3.1. Halbzellen	98
13.3.2. Galvanische Zelle, aus zwei leitend verbundenen Halbzellen	99
13.3.3. Galvanische Zelle, aus zwei Elektroden und einem Elektrolyten bestehend	99
14. Protolysen oder Säure-Base-Reaktionen	102
14.1. Die Protonenübertragungsreaktionen	102
14.2. Konjugiertes oder korrespondierendes Säure-Base-Paar	102
14.3. Strukturelle Merkmale von Säuren und Basen	103
14.4. Ampholyte	104
14.5. Die Einteilung der Säuren	105
14.6. Die Gewinnung von Sauerstoffsäuren und löslichen Metallhydroxiden	105
14.7. Reaktionen der Säuren mit Salzen	108
14.7.1. Die Reaktion eines Metallhydroxids mit einer Säure	108
14.7.2. Unvollständige Neutralisationen	108
14.7.3. Das Lösen eines schwerlöslichen Metalloxids in einer starken Säure	109
14.7.4. Die Reaktion einer Säure mit einem beliebigen Salz	109
14.7.5. Allgemeine Säure-Base-Reaktionen	109
14.8. Protolysegleichgewichte	110
15. pH-Wert und einfache Berechnungen	111
15.1. Die Autoprotolyse des Wassers	111

15.2. Die Definition des pH-Werts	112
15.3. pH-Berechnungen bei starken Säuren	112
15.4. pH-Berechnungen bei gut löslichen Metallhydroxiden (Alkali- oder Erdalkalimetallhydroxide)	112
15.5. Saure oder alkalische Salzlösungen	113
16. Indikatoren und Puffersysteme	114
16.1. Indikatoren	114
16.2. Puffer	115
17. Die Säure- oder Aciditätskonstante	116
17.1. Allgemeines	116
17.2. Die Stärke von Säuren und Basen	116
17.3. pH-Berechnungen bei schwachen Säuren	117
17.4. Der pH-Berechnungen bei schwachen Basen	119
17.5. Der Zusammenhang zwischen Säurestärke und Struktur	120
17.5.1. Binäre Säuren	120
17.5.2. Sauerstoffsäuren	121
18. Neutralisationskurven und ihre Anwendungen	122
18.1. Titrationskurven	122
18.2. Pufferungskurven	124
19. Änderungen der koordinativen Verhältnisse	128
19.1. Die Löslichkeit der Salze	128
19.2. Fällungsreaktionen	128
19.3. Lösungsgleichgewichte und Löslichkeitsprodukt	129
19.3.1. Das Löslichkeitsprodukt	129
19.4. Komplexbildung	132
19.5. Ligandenaustauschreaktionen	132
20. Energetik chemischer Reaktionen	133
20.1. Einleitung	133
20.2. Innere Energie und erster Hauptsatz der Thermodynamik	134
20.3. Die freie Enthalpie und die Triebkraft einer Reaktion	137
20.4. Katalysatoren und ihre Wirkungsweise	141
20.4.1. Katalysatoren	141
20.4.2. Katalysierte Reaktionen	142
20.4.3. Homogene Katalyse	142
20.4.4. Heterogene Katalyse	143
20.5. Elektrochemische Spannungsreihe und Korrosionselemente	144
20.5.1. Zellpotential und freie Reaktionsenthalpie	144
20.5.2. Oxidations- und Reduktionspotentiale	148
20.5.3. Korrosionselemente	149
21. Die Radioaktivität	151
21.1. Die Entdeckung der Radioaktivität	151
21.2. Die natürlichen radioaktiven Strahlen	151
21.3. Die Arten des radioaktiven Zerfalls	151
Reaktionsmechanismen der organischen Chemie und Aspekte der makromolekularen Chemie	154
1. Einleitung	154
2. Die aliphatischen Kohlenwasserstoffe	155
2.1. Physikalische Eigenschaften der Alkane	155
2.2. Chemische Reaktionsmöglichkeiten der Alkane	158
2.2.1. Reaktionen mit Sauerstoff (Verbrennung, Abb. 4)	158
2.2.2. Reaktionen mit Halogenen (Halogenierung)	159
2.3. Physikalische Eigenschaften der Alkene	163
2.4. Chemische Reaktionsmöglichkeiten der Alkene	164

2.4.1. Reaktionen mit Sauerstoff (Verbrennung, Abb. 11)	164
2.4.2. Reaktionen mit Halogenen (Halogenierung)	165
2.4.3. Die Addition von unsymmetrisch gebauten Reaktionspartnern	166
2.4.3.1. Die Addition von Halogenwasserstoffen	166
2.4.3.2. Addition von Halogenwasserstoffen an Alkene mit unsymmetrischer Lage der C-C-Doppelbindung	166
2.4.3.3. Die katalytische elektrophile Addition von Wasser	168
2.4.3.4. Die Addition von Sauerstoffsäuren	168
2.4.3.5. Addition von Wasserstoffgas (Hydrierung)	170
2.4.3.6. Polymerisationen	170
2.5. Physikalische und chemische Eigenschaften der Alkine	174
3. Das Säure-Base-Konzept nach Lewis	176
4. Aromatische Kohlenwasserstoffe	178
4.1. Einleitung	178
4.2. Der spezielle Charakter der aromatischen Verbindungen	179
4.3. Chemische Reaktionsmöglichkeiten	181
4.3.1. Die Reaktion von Benzen mit Sauerstoff im Überschuss (Verbrennung)	181
4.3.2. Die Reaktion mit Halogenen (Halogenierung)	181
4.3.3. Die Nitrierung von Benzen	184
4.3.4. Die Zweitsubstitution	186
4.3.5. Synthese und Reaktionen von Benzenhomologen	191
4.3.6. Kondensierte Aromaten	192
5. Alkohole, Aldehyde und Ketone	193
5.1. Alkohole	193
5.1.1. Die chemischen Reaktionen der Alkohole	193
5.1.1.1. Reaktion mit Alkalimetallen	194
5.1.1.2. Die Reaktion mit Säuren	196
5.2. Chemische Reaktionsmöglichkeiten der Aldehyde und Ketone	198
6. Carbonsäuren	200
7. Ether	202
8. Amine und Aminosäuren	206
9. Übersicht der verschiedenen Reaktionsmechanismen	208
10. Makromoleküle und Kunststoffe	210
11. Treibstoffe	215
12. Waschaktive Stoffe (Seifen oder Tenside)	219
13. Biochemie	223
13.1. Kohlenhydrate	223
13.2. Proteine	227
13.3. Enzymatische Katalyse	227
14. Aspekte der Stereochemie; optische Aktivität	230
14.1. Enantiomere und Diastereomere	230
14.2. Die D- und L-Nomenklatur	233
14.3. Die R- und S-Nomenklatur	235
14.4. Herstellung optisch aktiver Verbindungen	236
15. Struktur und Farbe – wichtige Farbstoffklassen und ihr Molekülbau	237
15.1. Allgemeines	237
15.2. Zusammenhang zwischen Molekülbau und Farbigkeit	238
15.3. Wichtige Farbstoffklassen und ihre Synthesen	241
15.3.1. Azofarbstoffe	241
15.3.2. Triphenylmethanfarbstoffe	243
15.3.3. Carbonylfarbstoffe	243
15.4. Grundlagen der Textilfärbung	245
15.4.1. Färben mit einem Direktfarbstoff	246
15.4.2. Färben mit einem Entwicklungsfarbstoff	248

15.4.3. Färben mit einem Reaktivfarbstoff	249
15.4.4. Färben mit einem Küpenfarbstoff	249
15.4.5. Färben mit einem Beizenfarbstoff	249
Wissenschaftliche Erkenntnishaltungen in der Chemie – Orbitalmodell und Übersicht der Naturstoffe	251
1. Einleitung	251
2. Schlüsselmomente der Chemiegeschichte und deren Beziehung zur Bewusstseinsentwicklung des Menschen	252
2.1. Paracelsus und die Iatrochemie (iatros griechisch. = Arzt)	252
2.2. Lavoisier und die Gasgesetze/Grundlegung der klassischen Chemie	256
2.3. Wöhler und die Harnstoffsynthese	258
2.4. Mendelejew, Meyer und das Periodensystem	259
2.5. Le Châtelier und der Gleichgewichtsbegriff	261
2.6. Aspekte der modernen Chemie	263
2.7. Chemie und Umweltfolgen/Wege zur green chemistry	265
3. Die Entwicklungsgeschichte der Atommodelle	268
4. Die Quantenmechanik und ihre Bedeutung für die moderne Physik und Chemie	270
4.1. Wellenmechanische Grundlagen	270
4.2. Lichtphänomene und ihre Deutung	273
4.3. Vereinfachte Vorstellungen von der Quantenmechanik	276
4.4. Elektronen als Teilchen und als Wellen	277
4.5. Das Wasserstoffspektrum und das Atommodell von Bohr	278
4.6. Die Schrödingergleichung	283
4.7. Das Elektron im eindimensionalen Potentialtopf	284
4.8. Der Grundzustand des Wasserstoffatoms	290
4.9. Der erste angeregte Zustand des Wasserstoffatoms	292
4.10. Zusammenfassung	294
5. Das Orbitalmodell als erweitertes Atommodell	294
5.1. Allgemeines und Quantenzahlen	294
5.2. Das Orbitalmodell und das Periodensystem	297
5.3. Die Bildung eines Moleküls	299
5.4. Die Hybridisierung und die Sigma-Bindung am Beispiel des Methan	304
5.5. Die π -Bindung am Beispiel der Alkene, Alkine und Aromaten	308
5.6. Erweiterung auf Nicht-Kohlenstoffverbindungen	314
5.7. Die Molekülorbitaltheorie	315
6. Das Orbitalmodell, Erkenntnisgewinn und Erkenntnisgrenzen	319
7. Chemie und Biochemie; Naturstoffe, ihre Synthesewege und natürliche Gliederung	322
7.1. Einleitung und Überblick	322
7.2. Die Kohlenhydrate	326
7.3. Fette, Öle, Phospholipide und Wachse	341
7.4. Proteine	350
7.5. Nucleinsäuren	359
7.6. Die Aromaten und ihre Synthese	361
7.7. Die Isoprenoide (Terpene und Steroide)	368
7.8. Stickstoff-Heterocyclen	379
8. Übersicht der Naturstoffchemie	390
9. Zusammenfassung	395
10. Literatur	397
11. Abbildungsnachweise	399
Stichwortverzeichnis	401
Die chemischen Elemente	415

Vorwort

Chemie ist eine besondere Wissenschaft; sie steht zwischen der Physik, die sich mit dem „So-Sein“ der Materie auseinandersetzt und der Biologie als Wissenschaft des Lebendigen, die sich mit dem Bau und den chemischen Stoffwechselprozessen in den Lebewesen, die immer Kreisprozesse sind, beschäftigt. Chemie hat Anteil an beiden Wissenschaften, besonders deutlich wird das in der physikalischen Chemie und der Biochemie.

Das eigentlich Chemische ist die Wissenschaft der Prozesse, das Prozessuale, das Geheimnis der Stoffumwandlungen. Das hat KÉKULÉ 1859 noch deutlich im Blick gehabt, als er die Chemie als Wissenschaft so definiert hat:

„Chemie ist die Lehre von den stofflichen Metamorphosen der Materie. Ihr wesentlicher Gegenstand ist nicht die existierende Substanz, sondern vielmehr ihre Vergangenheit und ihre Zukunft. Die Beziehungen eines Körpers zu dem, was er früher war, und zu dem, was er werden kann, bilden den eigentlichen Gegenstand der Chemie.“ (KÉKULÉ 1859)

Im Verlaufe des 20. Jahrhunderts ist aber gerade dieser Aspekt des Prozessualen mehr und mehr in den Hintergrund geraten, die dauerhafte Substanz in ihrem So-Sein ist immer deutlicher in den Vordergrund gestellt worden, was zwei weitere Zitate deutlich belegen:

“Chemistry is the science of matter; the branch of the natural sciences dealing with the composition of substances and their properties and reactions.” (PAULING 1940)

„Chemie ist die Wissenschaft vom Verstehen und Manipulieren der materiellen Welt in der molekularen Dimension.“ (FRENKING, 1998).

Damit ist aufgezeigt, wie das „Denken in kleinsten Teilchen“ (die molekulare Dimension) zum beherrschenden Gegenstand der Chemie als Wissenschaft geworden ist. Allzu häufig werden jedoch die entwickelten Modelle mit der Wirklichkeit gleichgesetzt, ohne sich gedanklich deutlich zu machen, dass damit eine andere Ebene beschrieben wird. Damit zeigt sich eine weitere Doppelstellung der Chemie als einer Wissenschaft zwischen dem Studium der Prozesse und dem Denken in kleinsten Entitäten. Beide Bereiche haben Anteil an der Chemie, müssen aber dennoch unterschieden werden.

RUDOLF STEINER hat für den Chemieunterricht an den Waldorfschule in knappen Formulierungen einen Lehrplan für die 7. bis zur 12. Klasse skizziert, der alle wesentlichen Aspekte einer guten chemischen Ausbildung enthält, wobei der Chemieunterricht dem Entwicklungsstand der Jugendlichen entsprechend gegliedert wird. Diesen Lehrgang in einer projektmäßig angelegten Ausarbeitung vorzulegen, ist das Anliegen dieses Lehrbuchs, das gleichermaßen für Lehrer- und Schülerhand geeignet und auf drei Bände angelegt ist.

Im ersten Band sind drei Chemieprojekte vorgelegt, die ganz aus der Anschauung und den chemischen Schlüsselprozessen entwickelt sind und zu einer (bildhaften) Übersicht der mineralischen (anorganischen), der bevorzugt aufbauenden Chemie der Pflanze und der im Wesentlichen durch Abbauprozesse geprägten Chemie des tierischen und menschlichen Organismus führen.

Im zweiten Band wird daran angeknüpft und die bildhafte Übersicht wird verstärkt gedanklich durchdrungen und so zur Erkenntnis verdichtet. Ziel ist es, eine Übersicht der Stoffeswelt und ihrer Gesetzmäßigkeiten zu erreichen, die an die Alltagserfahrungen anknüpft und interdisziplinär die Verbindungen zu verwandten Fachgebieten und Wissenschaftszweigen aufzeigt.

Der vorliegende dritte Band knüpft insofern an die beiden ersten an, dass die dort beschriebenen und untersuchten Prozesse die Grundlage bilden, um auch die zweite Ebene der Chemie, die Wirksamkeit der kleinsten Teilchen zu untersuchen und die Ergebnisse, die auf dieser Ebene zu gewinnen sind, mit den bereits gewonnen zu verbinden. Dabei werden die Bereiche, die besonders der physikalischen Chemie angehören nur soweit berücksichtigt, als darauf auch Bezug genommen wird.

In diesem dritten Band sind drei verschiedene Projekte zusammengefasst, die schrittweise an die Thematik heranführen und diese von verschiedenen Seiten beleuchten. Dabei ist der gesamte Aufbau modular gegliedert, so dass auch Teilbereiche aus den einzelnen Projekten zusammengefasst und bearbeitet werden können.

Die vorliegenden Texte wurden im Sinne der Praxisforschung an verschiedenen Schulen bereits seit vielen Jahren eingesetzt und sind so ständig aus der direkten Umsetzungserfahrung heraus weiterentwickelt worden.

Viele Menschen haben dazu beigetragen, dass diese Ausarbeitung in der vorliegenden Form veröffentlicht werden kann. Ihnen allen sei ein herzlicher Dank ausgesprochen. Besondere Erwähnung verdienen:

Armin Scheffler hat durch viele Gespräche und stetige innere Anteilnahme große Hilfe geleistet, das Buchprojekt in die vorliegende Form zu bringen.

Hans-Joachim Strüh, Björn Heinlein, Martin Errenst und Martin Rozumek haben durch ihre Gesprächsbeiträge und das kritische Gegenlesen der Textentwürfe wesentliches zur Verbesserung beigetragen.

Auch Wolfgang Schad danke ich für viele hilfreiche Diskussionen und die stets unterstützende Begleitung des gesamten Projekts.

Meinen Schülerinnen und Schülern danke ich für viele Verbesserungsvorschläge aus der Anwendung der Texte in der Praxis und besonders auch für die Überprüfung und Korrektur der neu erarbeiteten Grafiken im Unterricht.

Auch gebührt meiner Frau Silvia Wunderlin ein außerordentlich großer Dank für die vielen Stunden gemeinsamer Diskussionen und die anhaltende Unterstützung während der gesamten jahrelangen Entwicklungs- und Ausarbeitungsphase.

Christian Boettger schließlich danke ich ganz herzlich für die wohlwollende Unterstützung und zielführende Förderung des gesamten Projekts von Seiten des Herausgebers. Er hat den Wünschen und Vorstellungen des Autors stets Offenheit und Verständnis entgegengebracht.

Zürich, im Mai 2013

Ulrich Wunderlin

Vorwort zur 2. Auflage

In tiefer Verbundenheit haben wir im Sommer 2016 von unserem Kollegen in der Forschungsstelle und Verfasser dieses Buches, Ulrich Wunderlin, Abschied nehmen müssen. Sein Leben endete urplötzlich und unerwartet am 11. August bei einem Tauchgang in einem seiner geliebten Weltmeere. Sein Tod traf seine Familie, seine Schülerinnen und Schüler, seine Freunde und alle, die ihn kannten, sehr. Er wird schmerzlich vermisst. Das betrifft auch seine vielen Arbeits- und Publikationsprojekte. Das dreibändige Chemiebuch, das er für die Waldorfschulbewegung hinterlassen hat, bedarf einer ständigen Überarbeitung und Aktualisierung. Als Pädagogische Forschungsstelle sind wir sehr glücklich, dass Sven-Heiko Bubel gewonnen werden konnte, die Überarbeitung und Aktualisierung dieses 3. Bandes vorzunehmen. Wir sind Herrn Bubel sehr dankbar für seinen großen Einsatz und freuen uns, den Band nun in der 2. Auflage den Kolleginnen und Kollegen und insbesondere unseren Schülerinnen und Schülern zur Verfügung stellen zu können.

Stuttgart, 2018

Christian Boettger

Leitung Pädagogische Forschungsstelle
beim Bund der Freien Waldorfschulen

Atomvorstellungen und Reaktionsmechanismen der mineralischen Chemie

1. Einleitung

Im ersten Projekt dieses dritten Bandes werden wir uns vor allem mit der Frage nach der „Art der Wirklichkeit der Atome“ und der Bedeutung der Atomvorstellungen für die Chemie als Wissenschaft – besonders für die Chemie der mineralischen Welt – beschäftigen. Damit knüpfen wir in diesem Projekt unmittelbar an das Chemieprojekt der 10. Klasse (Band 2) an.

Immer wieder sind in den Darstellungen des zweiten Bandes dieses Lehrwerks Atome genannt oder Atomvorstellungen benutzt worden, um bestimmte Eigenschaften von Stoffen zu charakterisieren. Atome und Atomvorstellungen prägen das heutige naturwissenschaftliche Weltbild. Beobachtbare Phänomene werden mit der Hilfe der Vorstellungen von „kleinsten Teilchen“ erklärt, die selber aber nicht gesehen werden können. Was mit Hilfe dieser Denkvorstellungen der kleinsten Teilchen geleistet werden kann, wo sie nützlich sind, wo aber auch hinderlich, das zu untersuchen und herauszuarbeiten, ist das Ziel dieses ersten Projekts. Wir verfolgen hier eine mereologische Zugriffsweise auf den Atombegriff, so wie ihn BRIGITTE FALKENBURG in ihrer „Teilchenmetaphysik“ (1995) charakterisiert. Damit wird angedeutet, dass das, was wir hier aufbauen, nicht der einzig mögliche Zugang zum Atomverständnis und zum Atombegriff ist – der kausale Zugang, der besonders in der Physik betrieben wird, geht von anderen Grundvoraussetzungen aus. Wir wählen hier aber den mereologischen Ansatz, da er derjenige Zugriffsmodus ist, der dem Fach Chemie als „Wissenschaft des Prozessualen“ am angemessensten ist¹.

MAX BORN hat 1964 auf der Tagung der Chemienobelpreisträger folgendes gesagt:

„Später hat es mich interessiert zu analysieren, wo das Hindernis lag, das mich von der Chemie fernhielt. Es hat etwas mit der weiten Kluft zwischen wahrgenommener Wirklichkeit und Symbol zu tun. Das Wasser, das ich trinke oder in dem ich bade, und das Symbol H_2O schienen mir keine direkte Beziehung zu haben; sie sind durch einen langen Weg der Analyse verbunden, der ohne Erfahrung über viele andere Substanzen und Symbole nicht gangbar ist“. (zitiert aus Buck et al 2004).

Dieses hier beschriebene „Gefühl der Weltentfremdung“ taucht bereits bei Demokrit (siehe Abb. 7) auf, der bekanntlich als erster von den Atomen gesprochen hat: „*Der gebräuchlichen Redewendung nach gibt es Farbe, Süßes, Bitteres; in Wirklichkeit aber nur Atome und Leeres. Die Sinne sprechen da zum Verstand: Armer Verstand, von uns nimmst du die Beweisstücke und willst uns damit niederwerfen? Zum Fall wird dir der Niederwurf.*“ (zitiert nach Wagenschein 1977). Interessanterweise wird in Schulbüchern meist nur der erste Teil dieses Satzes erwähnt, um aufzuzeigen, dass die Atomvorstellungen ja bereits sehr alt seien.

¹ Wörtlich übersetzt heißt Mereologie: die Wissenschaft von den Teilen des Ganzen

Um zu einem wirklichen Verständnis zu kommen, braucht es beides, die mit den Sinnen beobachtbaren Phänomene, die in den bisherigen Chemieprojekten (Band 1 und Band 2) sehr ausführlich behandelt worden sind, und die gedankliche Durchdringung der Phänomene – auch bis hinein in die Welt der kleinsten Teilchen. Allerdings müssen wir uns von Beginn an klar machen, dass in diesem Übergang ein Sprung vorliegt, dass es hier keine kontinuierlich wechselnde und sich abwandelnde Vorstellung gibt, die nahtlos von den Phänomenen zu den Atomen führen würde. Den „Sprung zu den Atomen“ (wie es BUCK [2004] nennt) muss man bewusst vollziehen, dann kann man die Modellvorstellungen gewinnbringend einsetzen ohne die beobachtbare Wirklichkeit aus den Augen zu verlieren. Diesen Weg zu gehen, ist das Anliegen dieses Projekts.

2. Stoffe und Teilchen – Systeme und Komponenten

Reine Stoffe – und nur auf diese beziehen wir uns hier – sind charakterisiert durch ihre physikalischen Konstanten (Schmelzpunkt, Siedepunkt, Sublimationspunkt, Dichte, Farbe, Leitfähigkeit). Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um Elemente oder um chemische Verbindungen handelt. Der atomare oder molekulare Aufbau ist zwar kennzeichnend für den einzelnen Stoff, aber nicht notwendig, um diesen genau zu charakterisieren, wohl aber um die Unterscheidung in elementare Stoffe (sie können mit Hilfe chemischer Analytik nicht weiter zerteilt werden) oder Verbindungen zu erkennen.

Teilchen haben die meisten genannten Eigenschaften nicht – ein Wassermolekül hat keinen Schmelz- oder Siedepunkt, ein Natriumatom hat weder Schmelz- noch Siedepunkt noch Farbe oder metallischen Glanz, kann aber bei thermischer Anregung gelbes Licht emittieren (Wellenlänge 589,3 nm). Die Atome zeigen eine subatomare Komposition, die vorhandenen Protonen, Elektronen und Neutronen kennzeichnen eine bestimmte Atomart. Moleküle lassen sich in Atome zerlegen oder aus ihnen bilden, **bestehen** aber nicht aus Atomen; wir können nicht einmal hinsichtlich ihrer Masse von einer atomaren Komposition der Moleküle sprechen; wohl zeigen aber die Moleküle eine bestimmte Anordnung und räumliche Konfiguration der Atome, aus denen sie entstanden sind.

Die Stoffe können wir mit all unseren Sinnen wahrnehmen, sie prägen unsere Alltagserfahrungen („das Wasser, das ich trinke oder in dem ich bade“), die Welt der kleinsten Teilchen dagegen ist eine eigenschaftsarme Welt, die ich über mein Denken und viele Phänomene, die ich zur Erkenntnis gedanklich durchdringen und verdichten muss, erschließen kann (Symbol H_2O). Bei diesem Übergang in eine „andere Welt“, beim Sprung von der Welt des „Farbigen, des Süßen und des Bitteren“ in die Welt der „Teilchen und der Leere“, wird vom erkennenden Menschen eine Reduktion, ein Abbau der Erfahrungen ihrer Lebenswelt gefordert – wir müssen lernen, Eigenschaften wegzudenken, um neue Erkenntnisse erschließen zu können. Ständig werden wir uns im Sprung zwischen diesen beiden Welten bewegen und müssen dabei erkennen, welche Erkenntnisart jeweils die Zutreffende und Angemessene ist. Das ist anspruchsvolle Erkenntnisarbeit, die sich aber lohnt, da sie eine neue Dimension der Wirklichkeit aufschließt und wir uns auf diesem Weg dem Geheimnis der Materie nähern können.

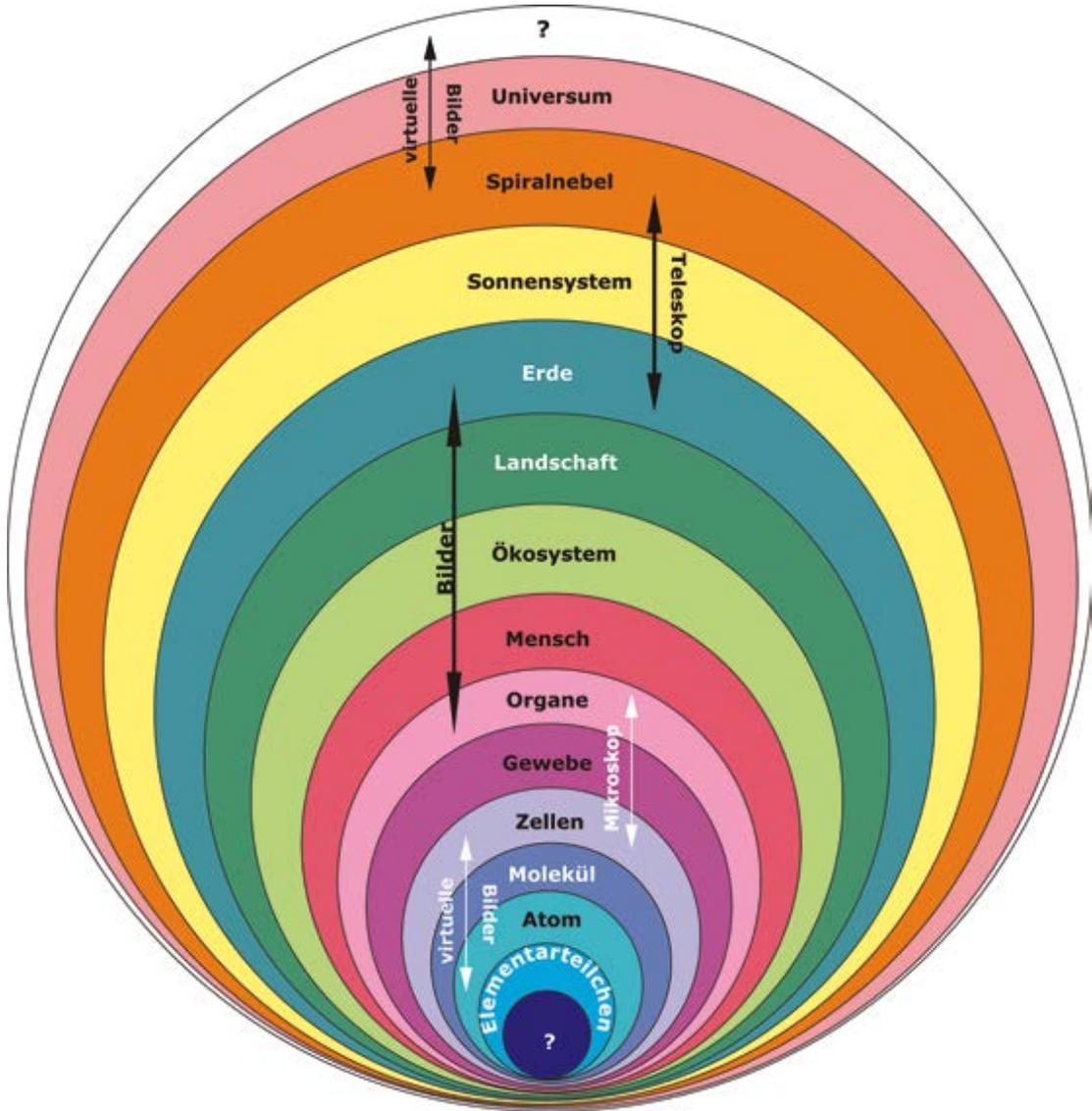
Diesen Weg führen wir am Beispiel des Daniell-Elements (siehe Band 2, Seite 91) ein. Erinnern wir uns: Das Daniell-Element ist die Grundlage für den Aufbau einer Batterie, ein System, das in der Lage ist, aus der im System vorhandenen (potentiellen) chemischen Energie elektrische Energie zu produzieren und dadurch über diese Arbeit zu leisten. Damit dieses System funktioniert, braucht es folgende Komponenten:

- a) Eine Kupferplatte in einer 1 molaren Kupfersulfatlösung
- b) Eine Zinkplatte in einer 1 molaren Zinksulfatlösung
- c) Eine elektrisch leitenden Verbindung der beiden Metallplatten (über einen Spannungsmesser, ein Glühbirnchen, einen Rotor, usw.)
- d) Eine Stromschüssel gefüllt mit konzentrierter Natriumsulfatlösung.

Jede einzelne Komponente ist für das Ganze eine notwendige Voraussetzung, aber für sich alleine leistet die Einzelkomponente nicht, was das Gesamtsystem hervorbringen kann, nämlich die Umwandlung von chemischer in elektrische Energie. Das geht nur in einer einzig möglichen Anordnung dieser Einzelkomponenten. Alle Teile, alle Komponenten müssen in einer bestimmten Anordnung zusammenwirken, damit das System als Ganzes funktioniert. Das Daniell-Element als Ganzes ist so nicht als reine Summe seiner Komponenten zu verstehen, da diese – wie erwähnt – nur in einer bestimmten Anordnung als System Batterie funktionieren. Das System als Ganzheit ist eine übergeordnete Einheit, sie ist mehr als die bloße Summe der einzelnen Komponenten.

Diese Betrachtung, die wir am Beispiel einer Batterie dargestellt haben, lässt sich beliebig ausdehnen. Wir gehen als Beispiel vom Menschen aus. Er ist selbst Komponente in einem größeren System (Familie, Schulklasse, Schule, Stadt, usw.). Schließlich lebt der Mensch in einer bestimmten Landschaft, in einem charakteristischen Ökosystem unseres Planeten Erde (siehe Abb. 1). Dieser ist aber Teil unseres Sonnensystems, das wiederum Komponente unserer Galaxie, der Milchstraße, ist. Diese wiederum bildet mit vielen anderen Spiralgalaxien das gesamte Universum. Dabei können wir bemerken, dass wir nicht alles mit bloßem Auge wahrnehmen können, wir brauchen für die Beobachtung der Planeten als kugelförmige Himmelskörper ein Teleskop, ebenso für die Beobachtung von Spiralnebeln. Wollen wir uns aber ein Bild einer gesamten Galaxie oder gar des Universums machen, dann reichen einfache Vergrößerungen nicht mehr aus, wir sind auf indirekte Bilder oder virtuelle Bilder angewiesen, die mittels Computerprogrammen über die Messungen von verschiedenen nicht optischen Teleskopen berechnet werden.

Der Mensch ist aber nicht nur Komponente in größeren Systemen, sondern als einzelnen Organismus genommen auch ein System. Der Mensch besitzt physiologische Funktionseinheiten, die Organe, die aber selber wieder in Gewebe zu untergliedern sind. Die Gewebe sind aus gleichartig differenzierten Zellen aufgebaut. Um Gewebe und Zellen zu beobachten, benötigen wir wiederum Sehhilfen (Lupen, Lichtmikroskope). Die Zellen wiederum haben Untersysteme – oder eben wiederum Komponenten – als Funktionseinheiten, es handelt sich um die Zellorganellen, die bestimmte physio-



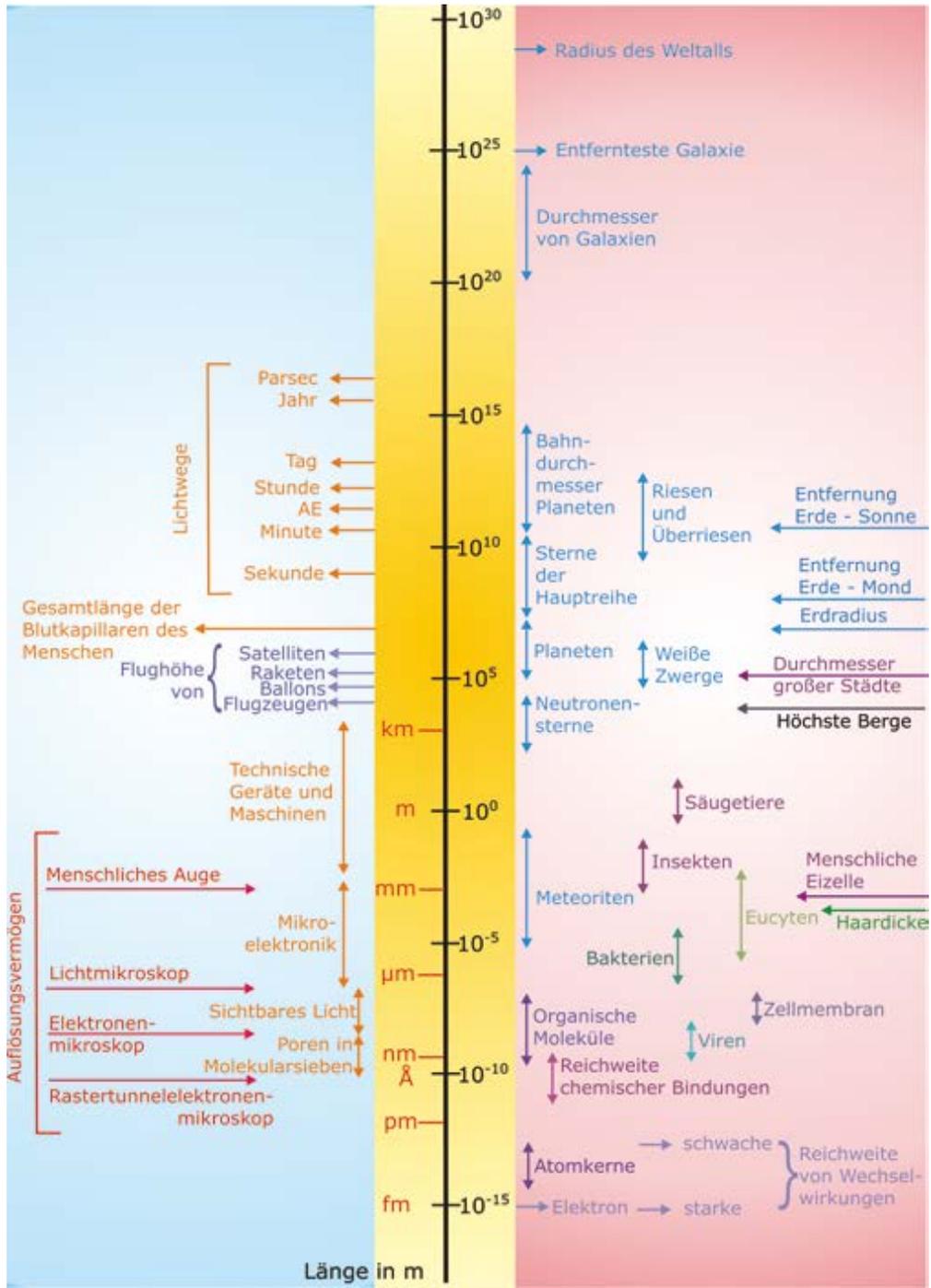
● **Abb. 1:** Verschachtelung von Systemen

logische und biochemische Prozesse ermöglichen. Wenn wir hier in die Feinstrukturen gehen wollen, dann benötigen wir die Elektronenmikroskope, die eine ganz andere Art der Bilderzeugung haben, als das beim Lichtmikroskop der Fall ist. Der Computer erschafft das Bild aufgrund von mathematischen Formeln, mit deren Hilfe Spannungsunterschiede zu einem Bild berechnet werden (was ja auch bei einem Ultraschallgerät ähnlich abläuft). Wir können hier von einer indirekten Abbildung sprechen (virtuelles Bild). Allein das schon ist ein deutlicher Sprung in der Qualität der Abbildung. Ver-

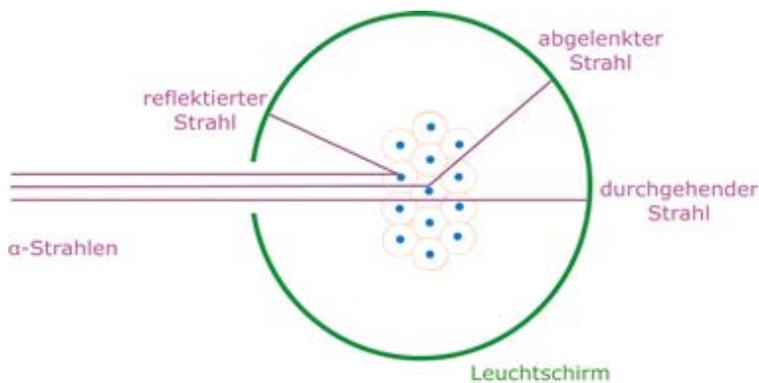
gleichbares gilt natürlich auch für das Rastertunnelelektronenmikroskop, das uns heute ermöglicht, Bilder von Molekülen und Atomen zu erzeugen.

Wenn wir diesen Weg gedanklich ernst nehmen, dann werden folgende Gesichtspunkte deutlich:

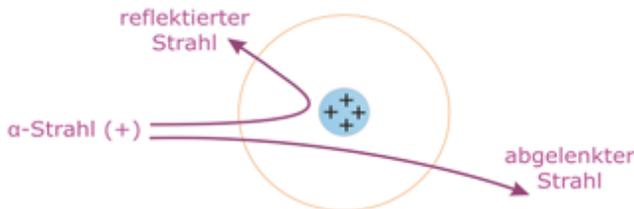
- a) Jedes System bildet auf seiner Ebene eine in sich geschlossene Ganzheit. Um ein solches System zu beschreiben, gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Wege. Der eine Weg reduziert das System auf die Summe seiner Komponenten und versucht, die Ganzheit als Summe der Einzelprozesse zu beschreiben. So gehen wir analytisch experimentell auch richtigerweise vor. Der zweite Weg zeigt aber, dass gerade in biologischen Systemen das nicht so einfach ist. Der Begründer der Systembiologie WEISS formulierte 1970 diese Tatsache folgendermaßen: „Der Systembegriff verkörpert die Erfahrung, dass es Gestaltungsprozesse gibt, die in ihrer typischen Struktur nicht auf einem vorbestimmten, vollkommen stereotypen Mosaik von linearen Einzelvorgängen, sondern auf der Tatsache beruhen, dass die Einzelvorgänge zwar viele Freiheitsgrade besitzen, aber den ordnenden Einschränkungen unterworfen sind, die die integrale Aktivität des ‚Ganzen‘ in seiner strukturhaften Systemdynamik auf sie ausübt“. Damit beschreibt WEISS ein System als Einheit, die regulierend und funktionseinschränkend auf die Komponenten einwirkt. Das bedeutet aber, dass wir beim rein analytischen Erkennen nicht stehen bleiben dürfen, sondern, dass wir dabei auch das System als Ganzes bzw. als eine Ganzheit berücksichtigen müssen. So sind immer zwei Aspekte zu beachten, der Stoff mit all seinen Phänomenen und Erscheinungen (die Welt des mit Sinnen Wahrnehmbaren) und die Komponenten, die Teilchen, die bestimmte charakteristische Aspekte des Systems einer Substanz beschreiben; diese darf aber nicht als bloße Summe dieser Teilchen gedacht werden.
- b) Alle natürlichen materiellen Systeme sind hierarchisch verschachtelt, wie wir das auch in Abbildung 1 dargestellt haben. Dabei zeigen sich aber auch überraschende Zusammenhänge des ganz Kleinen mit dem ganz Großen. Wenn wir die Größen- oder Zeitangaben logarithmisch auftragen, zeigen sich diese Zusammenhänge besonders deutlich, biologische Systeme ordnen sich organisch ein zwischen die Systeme im molekularen Bereich und den Systemen des Universums (siehe Abb. 2 – 5). Diese Ordnung ist erstaunlich klar und zeigt sich auf verschiedenen Ebenen. Der Kosmos des Lebendigen ist eingespannt zwischen dem Mikrokosmos der einzelnen Teilchen und dem Makrokosmos unseres Universums. Selbst technische Prozesse und Vorgänge sind nichts vollkommen Neues, sondern fügen sich in diese Ordnung wie selbstverständlich ein.
- c) Wenn wir dieses fundamentale Prinzip einmal zugrunde legen, können auch Naturprozesse vertiefter verstanden werden. Es geht nicht mehr um deren rein mechanistische Deutung, sondern wir als verstehende Menschen sind eigentlich immer einbezogen. Dieser Gesichtspunkt ist gerade in unserer Zeit von wesentlicher Bedeutung. Betrachten wir eine Substanz, so sind verschiedene Systemaspekte zu betrachten. Nehmen wir einmal einen Bergkristall. Aus dem Kieselgel bildet sich durch die äußeren Bedingungen eine ganz bestimmte Form eines Kristalls, der immer einzigartig ist, obwohl die stoffliche Komponente nicht oder kaum verändert ist. Neben den



● **Abb. 2:** Logarithmische Ordnung von Längendimensionen

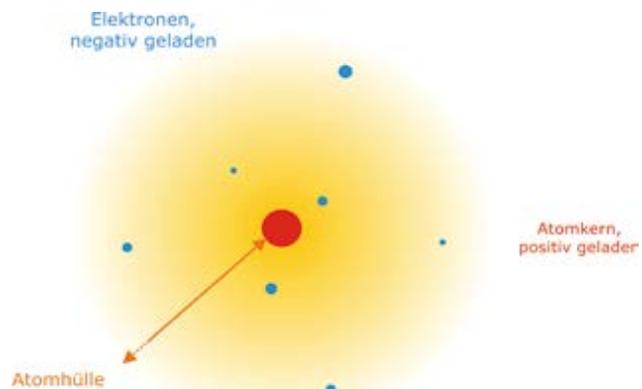


Detail-Darstellung zu Reflektion und Ablenkung
(kommen nicht durch harte Oberflächen, sondern durch Ablenkungen von Ladungen zustande)



● **Abb. 12:** Die Deutung nach dem Kern-Hülle-Modell von Rutherford

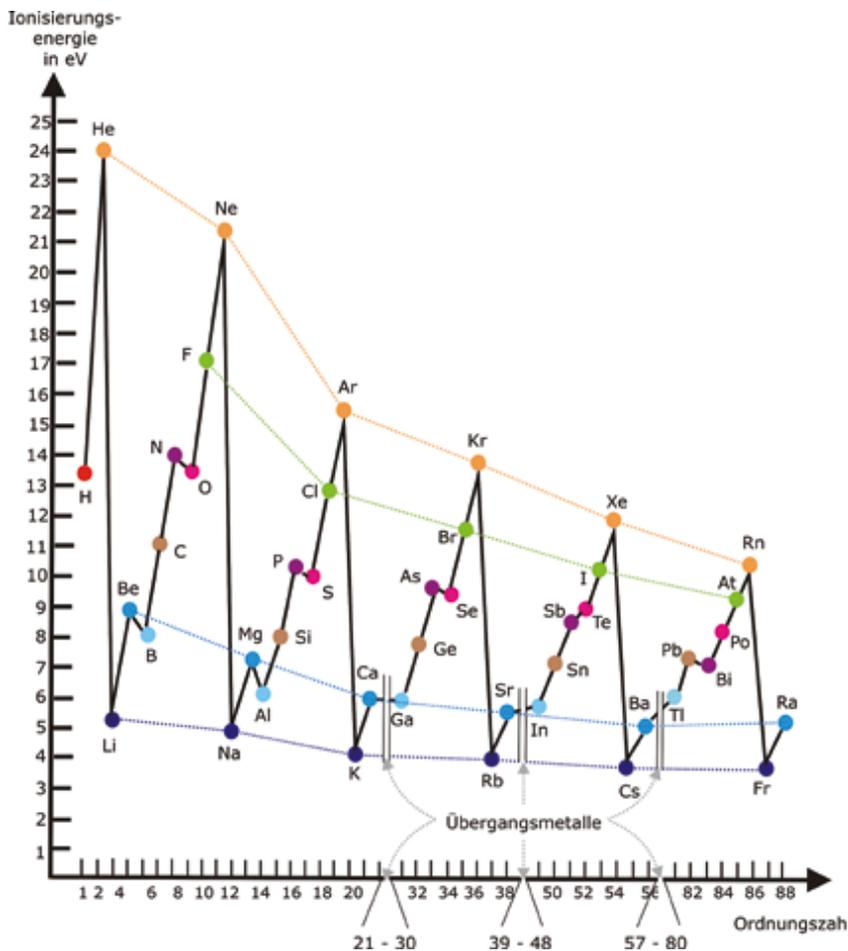
Diese Größe hat MILLIKAN (1868–1910) 1910 in einem einfachen Experiment nachgewiesen: Er beobachtete durch ein Mikroskop die Fallgeschwindigkeit feinsten Öltröpfchen; deren Größe und Masse ist bestimmbar aus der Fallgeschwindigkeit selber und der Dichte des verwendeten Öls. Diese Fallgeschwindigkeitsversuche führte er in einem elektrischen Feld zwischen zwei Kondensatorplatten durch. Durch Ionisierung (erreicht durch eine radioaktive Bestrahlung der Öltröpfchen) machte er dann die Tröpfchen



● **Abb. 13:** Das Kern-Hülle-Modell. Der scharfe Rand des roten Bezirks im Zentrum repräsentiert den Bereich, bei dem Abstossung in Anziehung (aufgrund von Kernkräften) umkippt. Der gelb eingefärbte Bezirk ist der Bereich des Atoms, in dem 90% der zugehörigen Elektronen erwartet werden können.

4.3. Die Struktur der Elektronenhülle

Bei einem chemischen Vorgang ändert sich nur der äußerste Teil der Elektronenhülle. Von einem Atom kann man, wie gerade erwähnt, Elektronen abspalten. Dabei entstehen geladene Atome, die man als Ionen, genauer als **Kationen**, bezeichnet. Elektronen, die weiter vom Atomkern entfernt sind, lassen sich auf Grund der elektrostatischen Kräfte, die mit zunehmendem Radius abnehmen, leichter abspalten. Auf Grund der experimentell gemessenen Ionisierungsenergien kann man erkennen, dass in der Elektronenhülle verschiedene Energiestufen auftreten, dabei werden alle Valenzelektronen aus der jeweiligen Atomhülle stufenweise entfernt und die jeweiligen Energien, die es dazu braucht, gemessen. Abb. 17 zeigt die für die erste Ionisierungsstufe notwendigen Ionisierungsenergien. Die Ionisierungsenergie wird in eV (= Elektronenvolt) angegeben. 1 eV ist die Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen der Spannung 1 Volt erhält ($1 \text{ eV} \approx 95,8 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$).



● **Abb. 17:** Eine Zusammenstellung der Ionisierungsenergie