

Handwritten notes in Cyrillic script, likely related to Mendeleev's work.

| | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | H | He | Li | Be | B | C | N | O |
| | 1,008 | 4,003 | 6,941 | 9,012 | 10,81 | 12,01 | 14,01 | 16,00 |

Handwritten text on the left margin, possibly a name or title.

Handwritten list of elements and their atomic weights:

H=1. ?=8. ?=39. Cu=63,4. Ag=108. Hg=200.
 He=94. N=24. Zn=65,2. Ca=40. ~~Uff~~
 B=11. Al=27,4. ?=68. Ni=116. Au=197.
 C=12. Si=28. ?=40. Sn=118.
 N=14. P=31. As=75. Sb=122. Bi=210.
 O=16. S=32. Se=79,4. Te=128?
 F=19. Cl=35,5. Br=80. I=127.
 Li=7. Na=23. K=39. Rb=85,4. Cs=133. Fr=201.
 Ba=137. Pb=207.
 ?=45. Co=58. Ni=58,7.
 ? Co=56? La=94.
 ? Pt=60? Au=197.
 ? Zn=70? Th=118?

Zum Historischen Periodensystem und dem Chemometer: Daten und Fakten

Das lineare Periodensystem (Chemometer)

Die Linearisierung des Periodensystems ist eigentlich ein Schritt zurück, denn ein entscheidendes Charakteristikum geht dabei verloren: die Periodizität. Gerade diese ist nämlich der eigentliche Schlüssel zum Verständnis. Doch dazu gleich mehr. Die lineare Darstellung der Elemente macht dennoch Sinn: Kenne ich alle Namen, die sich hinter den international gültigen Abkürzungen verbergen? Wo steht ein Element, das mich interessiert? Wer sind seine Nachbarn? Diese und so manche anderen Fragen lassen sich mit dem Chemometer rasch beantworten.

Die lineare Darstellung der Reihenfolge der Elemente hat eine interessante Geschichte. 1860 hatte auf Initiative von F. A. Kekulé in Karlsruhe der erste „Internationale Chemiker-Kongress“ mit 140 Teilnehmern stattgefunden. Ein wichtiges Ergebnis war die Übereinkunft über die Atomgewichte der damals etwa 60 bekannten Elemente. Die naheliegende Anordnung nach den Atomgewichten schien allerdings keinen „chemischen“

Sinn zu ergeben. Benachbarte Elemente zeigten große Unterschiede, während entferntere sich wie Verwandte verhielten. 1864 machte jedoch der englische Chemiker John Alexander Reina Newlands, damals Leiter des Labors einer Zuckerfabrik, darauf aufmerksam, dass sich jeweils bei einem Intervall von acht Elementen auffallende Ähnlichkeiten in den Eigenschaften zeigten. Sein Gesetz der Oktaven erntete zunächst nur Spott. Erst nach der physiko-chemischen Faktenanalyse von Julius Lothar Meyer (nach der Größe der Atome) und dem visionären Konzept von Dimitri Mendelejew (nach den Verwandtschaften in den chemischen Eigenschaften) wurde erkannt, dass Newlands auf der richtigen Spur war.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts bekam die Anordnung der Elemente nach ihrem Atomgewicht jedoch eine überraschende Bedeutung. Nachdem Konrad Röntgen 1895 die nach ihm benannten Strahlen entdeckt hatte, untersuchte der junge begabte Physiker Henry Moseley im

Essai d'une système des éléments d'après leurs poids atomiques et fonctions chimiques par D. Mendeleeff.

18 II 69.

▲ Eine der ersten Skizzen Dimitri Mendelejews zur Neuordnung der Elemente.

Handwritten notes at the bottom of the page.

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 9 F 19,00 | 10 Ne 20,18 | 11 Na 22,99 | 12 Mg 24,30 | 13 Al 26,98 | 14 Si 28,09 | 15 P 30,97 | 16 S 32,07 | 17 Cl 35,45 | 18 Ar 39,95 | 19 K 39,10 | 20 Ca 40,08 |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|

Labor von Ernest Rutherford die Röntgenspektren aller damals bekannten Elemente. Er fand etwas Erstaunliches: Die Wurzel aus den Frequenzen der Röntgenstrahlen der jeweiligen Elemente war den Ordnungszahlen dieser Elemente proportional (Moseley'sches Gesetz). Das war in dreierlei Hinsicht von grundlegender Bedeutung. Zunächst brachte Moseley die Elemente in eine Reihenfolge, die sowohl die bestehende Ordnung bestätigte als auch auf Lücken hinwies. So wurde auf ein noch fehlendes Element (Rhenium) aufmerksam gemacht. Zweitens zeigte sich, dass das Phänomen der Periodizität, das Dimitri Mendelejew in einem geistigen Geniestreich auf das gesamte Reich der Elemente ausdehnte, sowohl die chemischen als auch die physikalischen Eigenschaften, wie Atom- und Ionenradien, umfasste. Und drittens war ein für allemal klargestellt, dass es keine weiteren Elemente zwischen den Ordnungszahlen 1 und 92 mehr gibt. Es waren nur noch ein paar Lücken zu schließen, ansonsten konnte die Suche eingestellt werden. Die Welt der Materie war kartiert, und jedem Element wurde darin ein fester Platz zugeordnet. Der vielversprechende Henry Moseley kam, wie so viele Talente, im Ersten Weltkrieg jung ums Leben.



◀ Henry Moseley (1887–1915) in dem Laboratorium, wo er das nach ihm benannte Gesetz entdeckte.

Das klassische Periodensystem

Die Entdeckung der 92 natürlichen Elemente, die im Universum vorkommen und die alle auch auf der Erde zu finden sind – was nicht unbedingt vorhersehbar war – ist eine der größten Leistungen menschlichen Forschergeistes. Es mutet wie ein Wunder an: die Evolution hat ein Wesen hervor-

gebracht, das in der Lage ist zu erkennen, woraus die Welt besteht. Und gegen Ende des 20. Jahrhunderts lernt dieses Wesen sogar noch, die Prinzipien der Lebensvorgänge zu verstehen, denen es seine Existenz verdankt. Doch damit beginnt ein völlig neues Kapitel der Wissenschaftsgeschichte. Bleiben wir zunächst bei den Elementen.

20
Ca
40,08

21
Sc
44,96

22
Ti
47,87

23
V
50,94

24
Cr
52,00

25
Mn
54,94

26
Fe
55,85

27
Co
58,93

28
Ni
58,69

29
Cu
63,55

30
Zn
65,41

31
Ga
69,72

Die vorzeitliche Metallurgie hat sich empirisch entwickelt. Sie wurde handwerklich tradiert und daher nur langsam verbessert. Im Altertum waren sieben Elemente (nach heutiger Definition) bekannt: Gold, Silber, Kupfer, Zinn, Quecksilber, Blei und Schwefel. Holzkohle wurde nicht als Element betrachtet, und Diamant galt als Mineral. Die Alchemie im alten Arabien und im mittelalterlichen Europa verstand sich als Geheimwissenschaft und setzte sich illusorische Ziele, wie die Umwandlung von Blei in Gold, das Suchen nach dem Stein der Weisen oder nach „Alkahest“, einem Stoff, in dem sich alles löst. Da keine Religion Aussagen darüber macht, auf welche Weise und wie viele Elemente der jeweilige Schöpfer schuf, konnten sich Mythen und Phantasien frei entfalten. Es war Robert Boyle, der im 17. Jahrhundert im Sinne der europäischen Aufklärung den Paradigmenwechsel einleitete. In seiner 1660 erschienenen Schrift „New Experiments“ beschrieb er mit klaren Worten seine Experimente so detailliert, dass jeder sie nachvollziehen konnte, was durchaus beabsichtigt war. Er befreite damit die Alchemie von ihrer notorischen Geheimniskrämerei, die sie nur in Verruf gebracht hatte. Es ging ihm nicht mehr um einen individuellen Wissensvorsprung,



▲ Robert Boyle (1627–1691)

sondern um allgemeinen Erkenntnisgewinn. Damit begann die wissenschaftliche Chemie im offenen, freien Denken der Aufklärung. So ist es kein Zufall, dass alle natürlichen, stabilen Elemente im abendländischen Europa entdeckt, bzw. als solche identifiziert wurden, und zwar ohne Ausnahme.

Die frühen Forscher waren Einzelgänger, manchmal sogar Sonderlinge, wie der nahezu autistisch menschen scheue Henry Cavendish, damals einer der reichsten Männer Englands. Sie waren von Neugier und Erkenntnisdrang getrieben. Ihre Untersuchungen führten sie eigenständig durch und finanzierten sie auch selbst. Wer nicht vermögend war, arbeitete unter primitiven Bedingungen, wie etwa der idealistische Provinzapothecker Carl Wilhelm Scheele: ohne aufwändige Hilfsmittel, nur mit Verstand und Gedächtnis, Phantasie und Kombinationskraft, mit geschickten Händen und unter Aufopferung der eigenen Gesundheit. Andere steckten ihr ganzes Geld in die Optimierung ihrer Geräte. Auf diese Art und Weise machte der französische Forscher Antoine de Lavoisier die Chemie zur exakten Wissenschaft. Von dem Geld, das er als rigoroser Steuereintreiber verdiente, leistete er sich die besten Waagen und Messgeräte. Dadurch begründete er die Notwendigkeit präziser Methodik, um verlässliche und reproduzierbare Aussagen über Quantitäten zu erhalten. Sein Leben nahm ein zu frühes, tragisches Ende, denn den zweifelhaften Dienst für den König musste er während der Revolution mit seinem Kopf bezahlen.

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 32 Ge 72,64 | 33 As 74,92 | 34 Se 78,96 | 35 Br 79,90 | 36 Kr 83,80 | 37 Rb 85,47 | 38 Sr 87,62 | 39 Y 88,91 | 40 Zr 91,22 | 41 Nb 92,91 | 42 Mo 95,94 | 43 Tc 98,91 |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|



▲ *Antoine de Lavoisier mit seiner Frau.*

Die frühen Forscher hatten sich zunächst mit dem Desinteresse und der Gleichgültigkeit ihrer Umwelt abzufinden. Aber die Erfolge wecken zunehmend Interesse. In dem Maße, wie sich ein Nutzen der Chemie abzeichnete, wurden die Mächtigen und

Wissbegierigen auf sie aufmerksam. In Akademien und Universitäten entstanden Anfang des 19. Jahrhunderts (beginnend mit der Royal Institution 1807 in London) die ersten Laboratorien mit dotierten Stellen. Nun stießen Talente aus den mittellosen Bevölkerungsschichten zur der noch kleinen Gemeinschaft von Forschern. Humphry Davy, Michael Faraday, Martin Heinrich Klaproth und Joseph Fraunhofer sind herausragende Beispiele dafür.

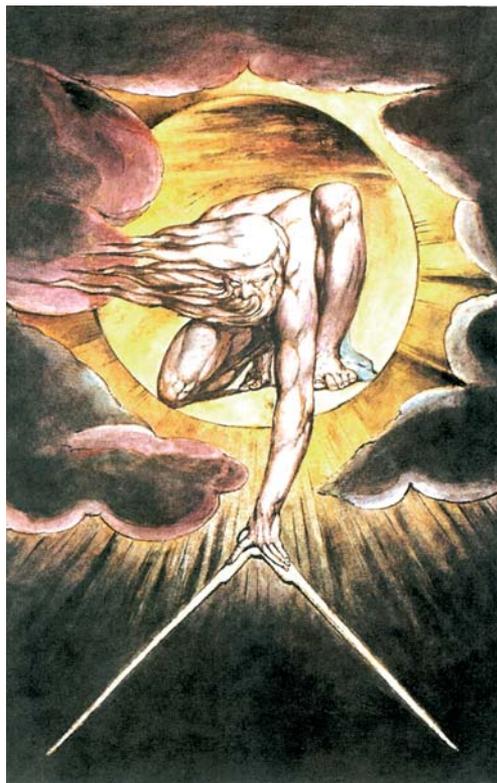
In der Folge begann das Wissen der Chemie rasch zu wachsen. Der Begriff „Element“ wurde von dem bescheidenen Quäker und Schullehrer John Dalton definiert. Jöns Berzelius führte die Symbole für die Elemente ein. Die Entdeckung der Elemente verlief auffallend in Schüben. Es waren jeweils methodische Fortschritte, die zu neuen Erkenntnissen führten. Zunächst wurde empirisch gesucht und viel „geprobelt“. Die Kunst mit dem Lötrohr umzugehen, beherrschten vor allem die schwedischen Chemiker virtuos. Dann führte Antoine de Lavoisier die genaue Messung und, was noch wichtiger war, die Bilanzierung ein. David Humphry nutzte die Volta'sche Säule, um mit Elektrizität Chemie zu betreiben. Durch Elektrolyse entdeckte er so fünf neue Elemente. Robert Bunsen und Gustav Kirch-

hoff machten sich mit der Spektralanalyse auf die Suche. Die Luftverflüssigung durch Carl Linde ermöglichte Sir William Ramsey die Auffindung aller Edelgase bis auf Radon. Die Radioaktivität verriet die Existenz instabiler Elemente. Und schließlich wurden von Henry Moseley die Röntgenspektren genutzt, um die Reihenfolge der Elemente endgültig zu bestätigen.

Der Weg war jedoch mühevoller als er sich zusammenfassend beschreiben lässt. Mitte des 19. Jahrhunderts drückte die Chemiker zunehmend ein Problem: das chemische Wissen häufte sich wie Heu auf einem Leiterwagen. „Chaos pur“, würde man heute sagen. Jedes Element zeigte individuelle Eigenschaften, durch die es sich insbesondere von seinen Nachbarn drastisch unterschied, obwohl es ihnen im Atomgewicht so nahe stand. Man denke nur an die drei benachbarten Elemente Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff. Sicher, schon früh waren gewisse Ähnlichkei-

◀ *Das Lötrohr ist ein Metallrohr mit einer kleinen Düse und einem Mundstück, das zum Untersuchen von Mineralien benutzt wird. Durch die Düse wird Luft in die Flamme eines Gasbrenners eingeblasen und dadurch die Mineralprobe auf sehr hohe Temperatur erhitzt.*

| | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 |
| Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| 98,91 | 101,1 | 102,9 | 106,4 | 107,9 | 112,4 | 114,8 | 118,7 | 121,8 | 127,6 | 126,9 | 131,3 |



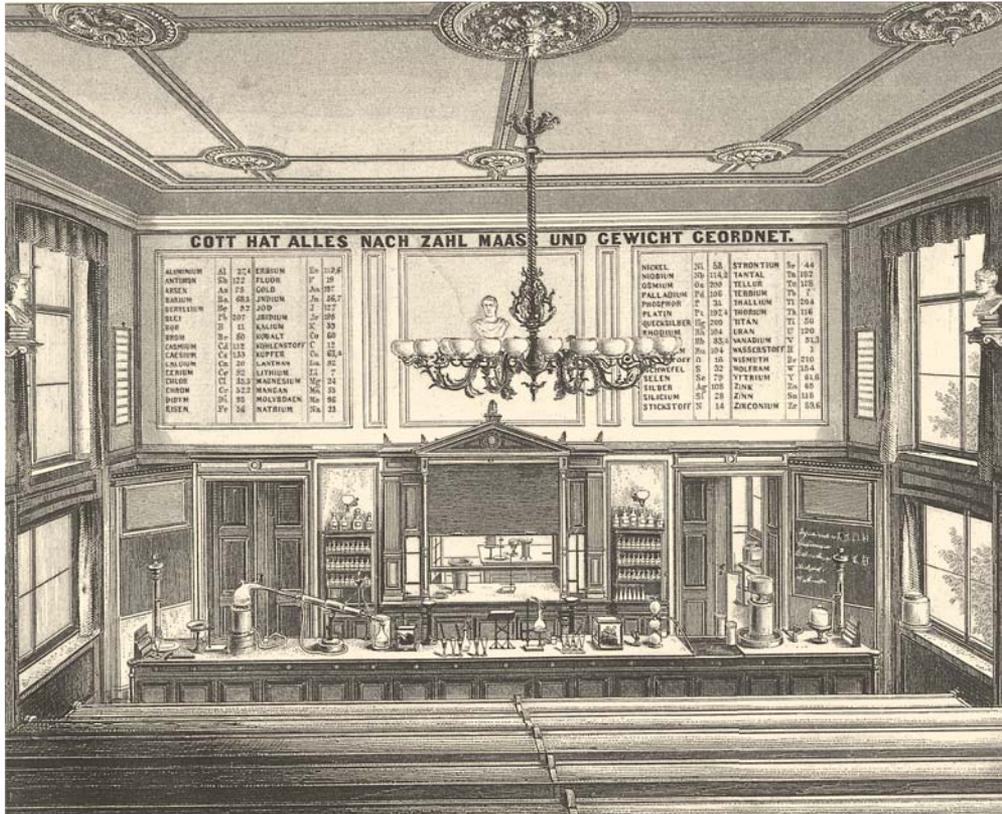
▲ „Die Schöpfung“ von William Blake (1794).

ten in den chemischen Eigenschaften entfernter Elemente aufgefallen. J.W. Döbereiner hatte als erster auf sogenannte „Triaden“ aufmerksam gemacht (z.B. Ca, Sr, Ba). Einige Elemente bildeten starke Basen, andere starke Säuren und diese schienen einander besonders zugeneigt. Solche „Wahlverwandtschaften“ animierten den Geheimrat Goethe, der an Mineralogie und der frühen Chemie ein waches Interesse pflegte, sogar zu seinem bekannten Roman.

Dann gab es Metalle, Nichtmetalle und eigenartige Elemente, die so taten, als seien sie Metalle. Aber wo blieb eine Ordnung? Hatte nicht Isaac Newton schon 200 Jahre zuvor für die Physik eindrucksvoll gezeigt, dass Gott das Buch der Natur in der Sprache der Mathematik geschrieben hat? Isaac Newton widmete sein späteres Leben hauptsächlich der Alchemie, um auch dort nach einer Ordnung zu suchen. Allerdings scheiterte er kläglich, weil die Zeit noch nicht reif dafür war. Die Erfolge der wissenschaftlichen Forschung und die einsetzende technologische Nutzung hatten den Glauben bestärkt, dass Gott die Welt nach den Gesetzen der Mathematik geschaffen hatte. Das berühmte Bild, das William Blake 1794 von der Schöpfung malte, ist eine Metapher für den damaligen Zeitgeist.

Und wie sah es bei den Elementen aus? Wie viele gab es überhaupt? Waren die Elemente, die man bisher kannte, wirklich nicht weiter zu zerlegen? Fanden sie sich nur auf der Erde? Hatte Gott sie von Anbeginn geschaffen oder waren sie in einer Art von Evolution entstanden? Selbst an der Existenz von Atomen wurde gezweifelt. Zu den nebulösen Vorstellungen und den unzähligen Vergeblichkeiten schrieb 1837 der angesehene französische Chemiker Jean B.A. Dumas: „Wenn ich die Macht hätte, würde ich das Wort Atom aus der Wissenschaft streichen.“

Verbissen wurde nach Ordnungsprinzipien gesucht. Neben dem schon geschilderten Vorschlag Newlands wurden noch fast hundert Versuche registriert. Durch einen glücklichen Zufall ist uns ein Dokument überliefert, das die Situation der Chemie eindrucksvoll festgehalten hat. Für die 11. Auflage, die der Brockhaus-Verlag in Leipzig als Real-Enzyklopädie (1864–68) in 15 Bänden herausgab, wurden für das Kapitel „Chemische Technologie“ zahlreiche Abbildungen erstellt. Darunter befindet sich auch ein Bild des Hörsaals des Chemischen Instituts der Universität Leipzig. In diesem Hörsaal hat später Wilhelm Ostwald gelesen, und Carl Bosch sowie Alwin Mittasch haben dort als Studenten ge-

55
Cs
132,956
Ba
137,357
La
138,958
Ce
140,159
Pr
140,960
Nd
144,261
Pm
146,962
Sm
150,463
Eu
152,064
Gd
157,265
Tb
158,966
Dy
162,5

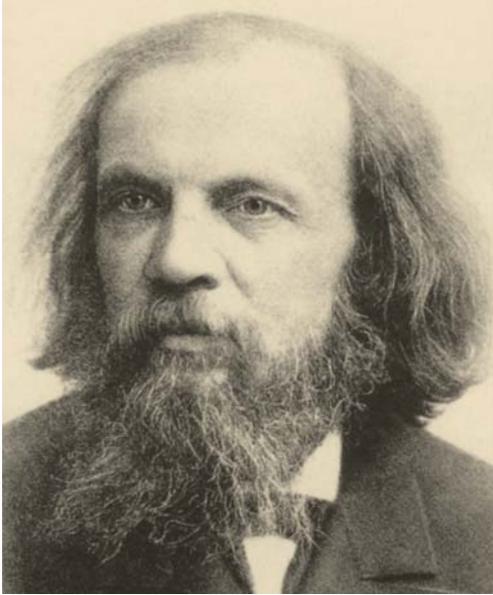
◀ Hörsaal im Chemischen Institut der Universität Leipzig.

essen. Sie wurden später gemeinsam die Pioniere der technischen Ammoniak-Synthese bei der BASF AG. Aber werfen wir einen Blick auf das Periodensystem, das die Stirnwand des Hörsaals „schmückt“ (auch heute noch gibt es keinen chemischen Hörsaal, der auf das Periodensystem verzichtet).

Das Bild entstand um 1864. Der erste Chemiker-Kongress 1860 in Karlsruhe hatte stattgefunden. Die Atomgewichte waren in Übereinkunft festgelegt worden. 1863 wurde Indium entdeckt und bereits in die Reihe der 64 bekannten Elemente aufgenommen. Noch immer hatten die Entdecker das Recht, den von ihnen gefundenen Elementen in freier Willkür den Namen zu geben. Und wie werden die Elemente angeordnet? Nach dem Alphabet, das seinerseits historisch entstanden ist, ohne jede Logik und innere Zusammenhänge. Und dennoch herrschte die tiefe Überzeugung, dass es in der Welt der Elemente eine verborgene Ordnung geben müsse. Wie zum Trotz steht über der Tabelle das Bibelwort aus den Apokryphen des Salomon:

GOTT HAT ALLES NACH ZAHL MAASS UND GEWICHT GEORDNET.

| | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 |
| Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir |
| 162,5 | 164,9 | 167,3 | 168,9 | 173,0 | 175,0 | 178,5 | 180,9 | 183,8 | 186,2 | 190,2 | 192,2 |



▲ *Dimitri Iwanowitsch Mendelejew (1834–1907).*

Wie Recht sollten die Gestalter des Hörsaals behalten! Nur wenige Jahre hat es noch gedauert bis tatsächlich eine Ordnung erkannt wurde. 1869 kam es zu einer denkwürdigen Doppelentdeckung. Dem

deutschen Chemiker Julius Lothar Meyer (1830–1895) fiel bei seiner streng wissenschaftlichen Analyse der Atomgewichte und der Atomvolumina eine bemerkenswerte Periodizität auf. Er begnügte sich mit dieser faktischen Feststellung, zumal er mehr an den physiko-chemischen Problemen interessiert war. Sachlich und faktenorientiert, waren ihm Hypothesen suspekt, und Spekulationen lehnte er strikt ab. Ganz anders dachte zur gleichen Zeit ein nur unter Fachleuten bekannter Chemiker aus Sankt Petersburg. Dimitri Mendelejew hatte ein begnadetes Gedächtnis für chemische Details. So konnte er die chemischen Ähnlichkeiten zwischen bestimmten Elementen in seine Betrachtung einbeziehen. Seine Schlussfolgerung war an Kühnheit kaum zu überbieten. Das ordnende Prinzip im Reich der Elemente sei die „Periodizität“, so das Credo von Dimitri Mendelejew. Wer war dieser Mann, der so urwüchsig aussah und so melancholisch-nachdenklich schaute? Er stammte aus einem kleinen Ort in Sibirien. Die Mutter erkannte früh die außergewöhnliche Begabung und brachte den Jungen unter größten Mühen nach Sankt Petersburg (sie starb bald darauf), damit er angemessene Bildungschancen fände. Der vielseitig talentierte Sohn wandte sich den Naturwissenschaften zu, insbesondere der

Chemie. Sein umfassendes Wissen erlaubte es ihm, chemische Eigenschaften und physikalische Daten wie Atomgewichte und geschätzte Atomgrößen geradezu spielerisch zu kombinieren.

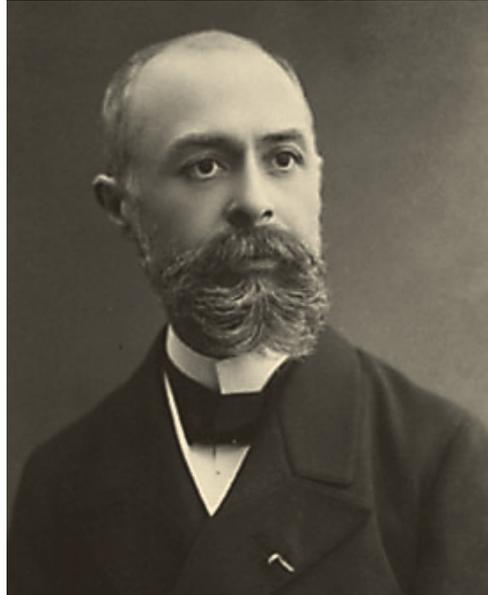
Sein Periodensystem fand keineswegs einhellige Zustimmung. Heute ist das gut nachvollziehbar, denn es handelte sich um einen Umbruch, den wir heute als „Paradigmenwechsel“ bezeichnen würden. Seit Isaac Newton und Gottfried Wilhelm von Leibniz waren die Naturforscher es gewohnt, die Naturgesetze in Gleichungen zu formulieren. Und hatte nicht James Clerk Maxwell 1855 mit seinen genialen Gleichungen die Zusammenhänge zwischen Elektrizität und Magnetismus überzeugend aufgeklärt? Das System von Mendelejew war mathematisch dagegen primitiv. Es handelte sich um eine schlichte Matrix, in der die Elemente waagrecht in Perioden und senkrecht in Gruppen eingeteilt wurden. Waren die Zusammenhänge wirklich so einfach?

Es war die verblüffende Stimmigkeit der Fakten und weniger die intellektuelle Überzeugungskraft, die die noch kleine Chemikergemeinschaft veranlasste, den Vorschlag ernst zu nehmen. Aber sein System hatte Lücken, zumal damals erst 64 Elemente bekannt waren. Mit sibirischer Dick-

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 78 Pt 195,1 | 79 Au 197,0 | 80 Hg 200,6 | 81 Tl 204,4 | 82 Pb 207,2 | 83 Bi 209,0 | 84 Po 209,0 | 85 At 210,0 | 86 Rn 222,0 | 87 Fr 223,0 | 88 Ra 226,0 | 89 Ac 227,0 |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|

schädlichkeit prognostizierte Mendelejew 1871, dort gäbe es Elemente, diese seien nur noch nicht entdeckt. So fehlten beispielsweise unter Aluminium und Silicium noch Elemente. Er nannte diese „Eka-Aluminium“ und „Eka-Silicium“ und sagte deren chemische Eigenschaften in etwa voraus. Als 1875 zunächst Gallium von Paul Emile Lecoq de Boisbaudran und 1886 Germanium von Clemens Winkler auf Grund dieser Vermutungen entdeckt wurden, gab es keine Zweifel mehr an Mendelejews genialem Konzept. Obwohl die Nobelpreise ab 1901 vergeben wurden und Mendelejew bis 1907 lebte, wurde er übergangen. „Sein“ Periodensystem war inzwischen zum selbstverständlichen Wissen geworden.

Wie die Atome strukturiert sind, konnten die Chemiker mit ihren Methoden nicht ermitteln. Die Entdeckung der Radioaktivität durch Henri Becquerel und die Arbeiten des Ehepaares Marie und Pierre Curie zeigten jedoch, dass schwere Atome nicht stabil waren. Das eherne Postulat von ihrer Unteilbarkeit war nicht mehr zu halten. Ernest Rutherford kam 1906 mit der nächsten Horrormeldung. Seine Streuversuche bewiesen, dass das Atom fast leer ist. Eine winzige Kernmasse wird in weitem Abstand von Elektronen umkreist. Hätte



▲ *Henri Becquerel (1852–1908).*

der Kern die Größe eines Kirschkernes und würde mitten auf dem Fußballfeld liegen, dann würden die Elektronen in den äußersten oberen Rängen des Stadions kreisen. Wäre der Kern so groß wie ein Fußball, würden ihm die ersten Elektronen in

einem Abstand von einem Kilometer umkreisen. Dazwischen herrscht die reine Leere.

Das Phänomen der ungeraden Atomgewichte konnten die Physiker dadurch erklären, dass die Kerne der Elemente neben der definierten Zahl von Protonen eine unterschiedlich Zahl von neutralen Neutronen enthalten können. Atome, die sich nur in der Zahl der Neutronen unterscheiden, werden Isotope genannt. Sie verhalten sich chemisch identisch. Die bekanntesten Isotope, die auch einen eigenen Namen tragen, sind die des Wasserstoffs. Der Deuterium-Kern besteht aus einem Proton und einem Neutron. Tritium besitzt zwei Neutronen und ist instabil, das heißt es zerfällt, ist also radioaktiv. Seine Halbwertszeit beträgt 12,3 Jahre. Inzwischen sind von fast allen Elementen stabile und instabile Isotope bekannt. Sieben Elemente des Periodensystems sind allerdings von Natur aus radioaktiv, d.h. keines ihrer Isotope ist stabil. Bei der Kernfusion wird eine geringe Menge an Masse ebenfalls in Energie umgewandelt, sodass man einen Massendefekt beobachtet. Als Bezugskern wurde international der Kohlenstoff-Kern mit 6 Protonen und 6 Neutronen und einem Atomgewicht von 12,000 definiert. Aufgrund des Massendefekts beträgt das Atomge-

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 |
| Ac | Th | Pa | Ur | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm |
| 227,0 | 232,0 | 231,0 | 238,0 | 237,0 | 244,1 | 243,1 | 247,1 | 247,1 | 251,1 | 252,1 | 257,1 |



◀ *Werner Heisenberg (1901–1976)*

klassischen Physik ein elektromagnetisches Feld auf, wobei sie Energie verlieren und bald in den Kern stürzen müssten. Der junge dänische Physiker Niels Bohr setzte sich darüber hinweg und postulierte, wenn die Elektronen auf den für sie vorgesehenen Bahnen kreisten, würden sie nicht der klassischen Physik unterliegen. Erhielten die Elektronen einen entsprechenden Energiestoß, würden sie auf die nächste der magischen Bahnen springen. Das Planeten-Modell wurde sogleich populär und erklärte auch die von Max Planck beobachteten Quantensprünge. Es passte auch zu der 1905 von Albert Einstein veröffentlichten Erkenntnis, dass Raum und Zeit ein Kontinuum bilden, während Materie und Energie gequantelt, also „körnig“ sind. 20 Jahre lang war die Welt in Ordnung, bis 1927 der junge Werner Heisenberg darauf hinwies, es könne gar nicht ermittelt werden, wo ein Elektron sich befände. Mit jeder Messmethode würde es zwangsläufig aus seinem Zusammenhang gerissen. Seine „Unschärfe-Relation“ ließe nur die Angabe von Aufenthaltswahrscheinlichkeiten zu. Ansonsten regiere der Zufall. Einstein wollte diese Konsequenz nicht

akzeptieren („Gott würfelt nicht!“). Schließlich formulierte Erwin Schrödinger für diese Aufenthaltsräume der Elektronen Wellengleichungen. Daraus ergaben sich, insbesondere durch die Arbeiten von Max Born, die sogenannten „Orbitale“. Diese haben ein völlig anderes Aussehen als die anschaulichen Kreisbahnen von Bohr.

Die Chemiker übernahmen das Konzept und formulierten auch für chemische Bindungen und ganze Moleküle derartige Orbitale. Daraus ergab sich ein erheblicher Erkenntnisgewinn und plausible Erklärungen für viele Phänomene. Aber der Preis war eine höchst formale Abstraktion. Das war nicht trivial, zumal von Theoretikern das Gespenst an die Wand gemalt wurde, mit der Verbesserung der Computer werde die Chemie berechenbar. Diese „Vertheoretisierung“ ist jedoch bald an ihre Grenzen gestoßen.

Denn, wie so oft, kam es anders als prognostiziert. Bei der Suche nach Molekülen, die nützlich sind (Farbstoffe), sich menschenfreundlich zeigen (Medikamente) oder brauchbare Materialien ergeben (Kunststoffe), ist die Theorie hilfreich, aber keineswegs erfolgsentscheidend. Kreativität und Wissen sowie Erfahrung und Intuition der Forscher sind nicht zu ersetzen.

wicht des Wasserstoffs nicht glatte 1,000 sondern 1,008.

Die lichtflink kreisenden Elektronen bereiteten den Physikern anfangs ganz erhebliche Probleme, denn bewegte Ladungen bauen nach der

101
Md
258,1

102
No
259,1

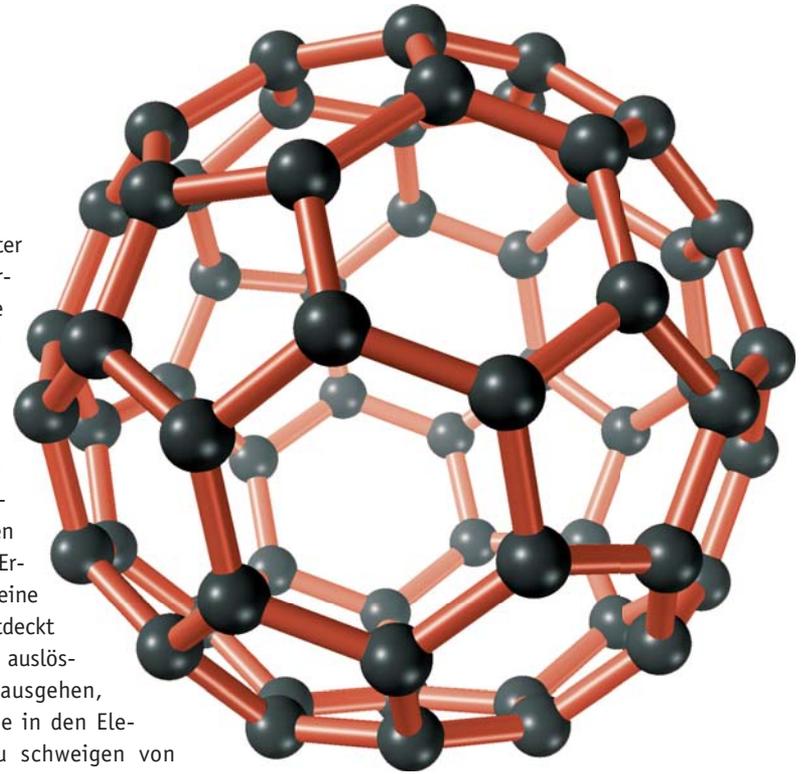
103
Lr
262,1

Neue aufregende Paradigmenwechsel haben das Gesicht der Chemie verändert. War es beispielsweise für die Organische Chemie in der Vergangenheit vor allem von Interesse, wie Moleküle miteinander **reagieren**, so hat sich mit zunehmender Betrachtung komplexer Lebensprozesse gezeigt, dass es noch interessanter sein kann herauszufinden, wie Moleküle miteinander **kooperieren** und dabei funktionale Systeme mit ganz erstaunlichen Eigenschaften bilden. Diese Art der Chemie steht noch ganz am Anfang. Das gilt auch für die so genannte Nano-Welt. Bei Teilchen in der Größenordnung von wenigen Nanometern geht die Quantenmechanik in die klassische Mechanik über. Entsprechend überraschend sind die sprunghaften Änderungen der Eigenschaften. In der Anorganischen Chemie ist ein mindestens ebenso großer Wandel im Gange. Wer hätte vorauszusagen gewagt, dass es große Produktionsstätten für anorganische Produkte geben würde, die sauberer und steriler sind als jede Pharmaproduktion. Dort muss es vor allem keimfrei zugehen, bei der Herstellung von Halbleitern und Mikrochips dagegen muss das Arbeitsumfeld sogar staubfrei sein. Hochreine Elemente, spezifische Dotierungen und neuartige Legierungen zeigen aufregende Eigenschaften für innovative Problemlösungen.

Selbst bei den Veteranen unter den Elementen ist man vor Überraschungen nicht sicher. Viele Elemente kommen in allotropen Modifikationen vor. Das bedeutet, die Atome können sich unterschiedlich anordnen. Beim Kohlenstoff kannte man die amorphe Form (Ruß), den graumetallischen Graphit und den schillernden Diamanten. Das Erstaunen war groß, als 1982 eine weitere Form, die Fullerene, entdeckt wurden und eine neue Chemie auslösten. Wir können also davon ausgehen, dass noch weitere Geheimnisse in den Elementen schlummern, ganz zu schweigen von ihren Verbindungen.

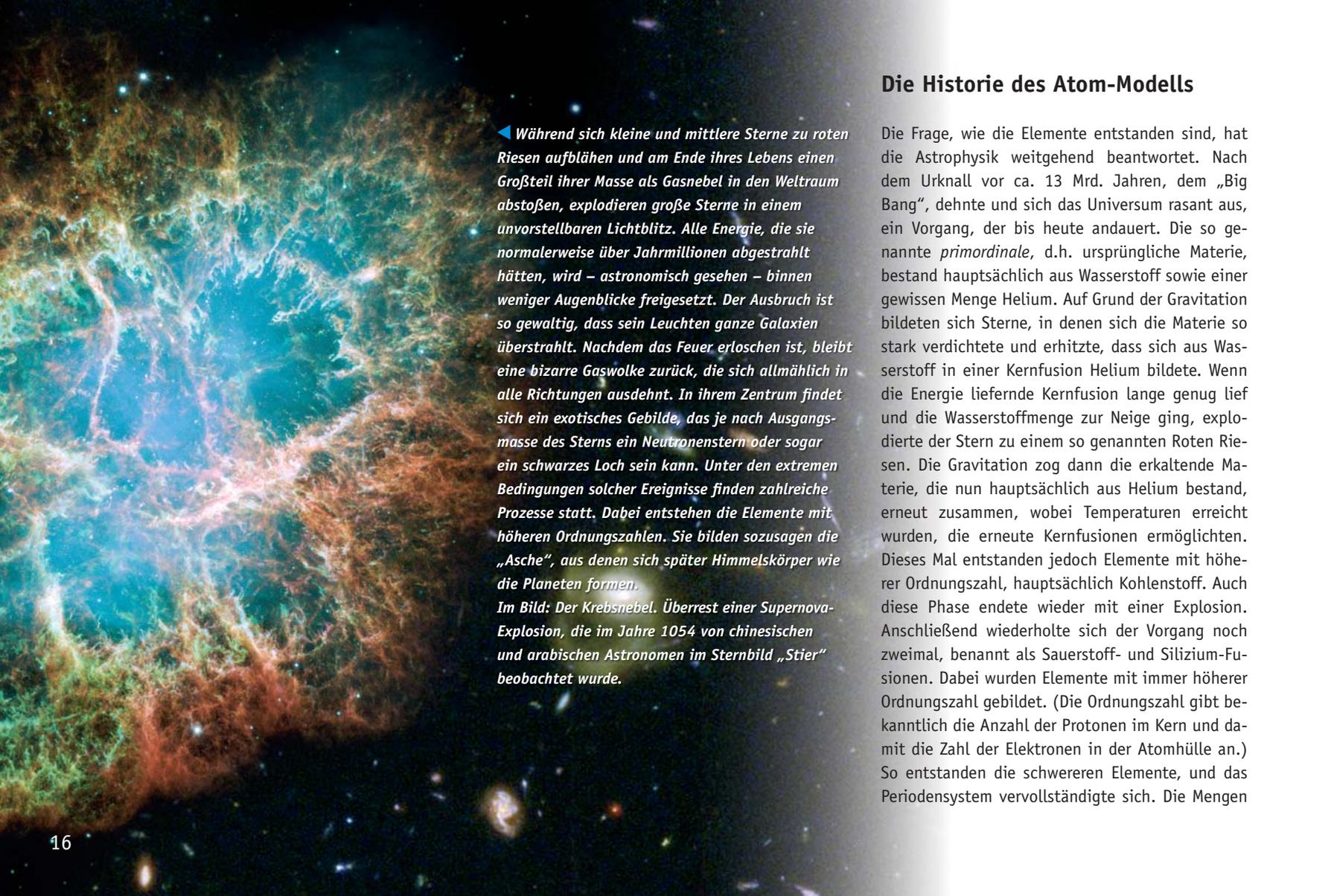
Das Periodensystem der Elemente ist keine Erfindung des Menschen. Dieses Ordnungsprinzip wurzelt in den tiefen Geheimnissen der Natur. Jedes Element hat seinen determinierten Platz und seine spezifische Identität.

Das Wissen darüber weiter zu vertiefen und die jeweiligen Eigenschaften sowie deren Kombinationen zu nutzen, um die Lebensbedingungen



▲ „Bucky Ball“ (Fulleren oder „Fußballmolekül“), eine erst 1982 entdeckte Modifikation des Kohlenstoffs, die sich sogleich großer Popularität erfreute.

für die wachsende Zahl von Menschen nachhaltig zu sichern und zu verbessern, sind die herausfordernden Aufgaben und Ziele für die Chemie in Wissenschaft und Anwendung.



◀ *Während sich kleine und mittlere Sterne zu roten Riesen aufblähen und am Ende ihres Lebens einen Großteil ihrer Masse als Gasnebel in den Weltraum abstoßen, explodieren große Sterne in einem unvorstellbaren Lichtblitz. Alle Energie, die sie normalerweise über Jahrmillionen abgestrahlt hätten, wird – astronomisch gesehen – binnen weniger Augenblicke freigesetzt. Der Ausbruch ist so gewaltig, dass sein Leuchten ganze Galaxien überstrahlt. Nachdem das Feuer erloschen ist, bleibt eine bizarre Gaswolke zurück, die sich allmählich in alle Richtungen ausdehnt. In ihrem Zentrum findet sich ein exotisches Gebilde, das je nach Ausgangsmasse des Sterns ein Neutronenstern oder sogar ein schwarzes Loch sein kann. Unter den extremen Bedingungen solcher Ereignisse finden zahlreiche Prozesse statt. Dabei entstehen die Elemente mit höheren Ordnungszahlen. Sie bilden sozusagen die „Asche“, aus denen sich später Himmelskörper wie die Planeten formen.*

Im Bild: Der Krebsnebel. Überrest einer Supernova-Explosion, die im Jahre 1054 von chinesischen und arabischen Astronomen im Sternbild „Stier“ beobachtet wurde.

Die Historie des Atom-Modells

Die Frage, wie die Elemente entstanden sind, hat die Astrophysik weitgehend beantwortet. Nach dem Urknall vor ca. 13 Mrd. Jahren, dem „Big Bang“, dehnte und sich das Universum rasant aus, ein Vorgang, der bis heute andauert. Die so genannte *primordiale*, d.h. ursprüngliche Materie, bestand hauptsächlich aus Wasserstoff sowie einer gewissen Menge Helium. Auf Grund der Gravitation bildeten sich Sterne, in denen sich die Materie so stark verdichtete und erhitzte, dass sich aus Wasserstoff in einer Kernfusion Helium bildete. Wenn die Energie liefernde Kernfusion lange genug lief und die Wasserstoffmenge zur Neige ging, explodierte der Stern zu einem so genannten Roten Riesen. Die Gravitation zog dann die erkaltende Materie, die nun hauptsächlich aus Helium bestand, erneut zusammen, wobei Temperaturen erreicht wurden, die erneute Kernfusionen ermöglichten. Dieses Mal entstanden jedoch Elemente mit höherer Ordnungszahl, hauptsächlich Kohlenstoff. Auch diese Phase endete wieder mit einer Explosion. Anschließend wiederholte sich der Vorgang noch zweimal, benannt als Sauerstoff- und Silizium-Fusionen. Dabei wurden Elemente mit immer höherer Ordnungszahl gebildet. (Die Ordnungszahl gibt bekanntlich die Anzahl der Protonen im Kern und damit die Zahl der Elektronen in der Atomhülle an.) So entstanden die schwereren Elemente, und das Periodensystem vervollständigte sich. Die Mengen

der einzelnen Elemente waren dabei sehr unterschiedlich. Außerdem bildeten sich mehr Elemente mit geraden Ordnungszahlen als ihre ungeraden Nachbarn (Harkins Regel).

Als die Erde vor ca. 4,5 Mrd. Jahren aus Sternstaub entstand, hatte ihre Materie vier solcher Zyklen hinter sich. Jedes unserer Atome, aus denen wir bestehen, bringt also eine lange Geschichte mit. Aber warum endete sie? Die Erklärung gibt die Atomphysik. Wenn der Hauptteil der Materie aus dem Element Eisen besteht, wird bei weiteren Kernfusionen keine Energie mehr frei, im Gegenteil: sie erfordern Energie. Das zeigen die großen Teilchen-Beschleuniger, in denen Kernfusionen studiert werden. Außerdem werden die Atome ab der Ordnungszahl 82, also dem Blei, zunehmend instabil. Dann lässt sich aus ihrer Spaltung Energie gewinnen, wie es mit Uran in den Kernkraftwerken geschieht.

Unsere Erde besteht in ihrem Kern zum größten Teil aus Eisen. Sie ist, kosmisch betrachtet, ein Aschekörnchen, das zur Ruhe gekommen ist. Allerdings wird diese nicht ewig dauern. Die Sonne ist ein Stern in seiner ersten Phase. In 4 Mrd. Jahren wird sie sich zu einem Roten Riesen verwandeln, in dem auch die Erde aufgehen wird. Bis dahin ist jedoch noch sehr viel Zeit.

So gut wir die Vergangenheit zu kennen glauben, so unsicher sind die langfristigen Prognosen. Wird sich das Universum weiter ausdehnen oder in einen Gleichgewichtszustand eintreten? Kehrt sich

der Entstehungsvorgang womöglich um und endet in einem „Big Crunch“? Dabei würde alle Materie quasi in einem unvorstellbaren Schwarzen Loch zusammengezogen. Dann könnte es zu einem erneuten Urknall kommen. Würden dann die gleichen Naturgesetze gelten, von denen wir annehmen, dass sie seit Anbeginn bestanden und sich nicht verändert haben? Welchen Ursprung haben die Naturgesetze eigentlich? Seit Albert Einstein wissen wir: Wenn keine Materie existiert, verschwinden auch Raum und Zeit. Aber was ist mit der Mathematik? Bleibt sie erhalten? Fragen über Fragen! Begnügen wir uns an dieser Stelle mit einem Vorgang, den wir gut nachvollziehen können: Woher kommt unser Wissen über das Atom?

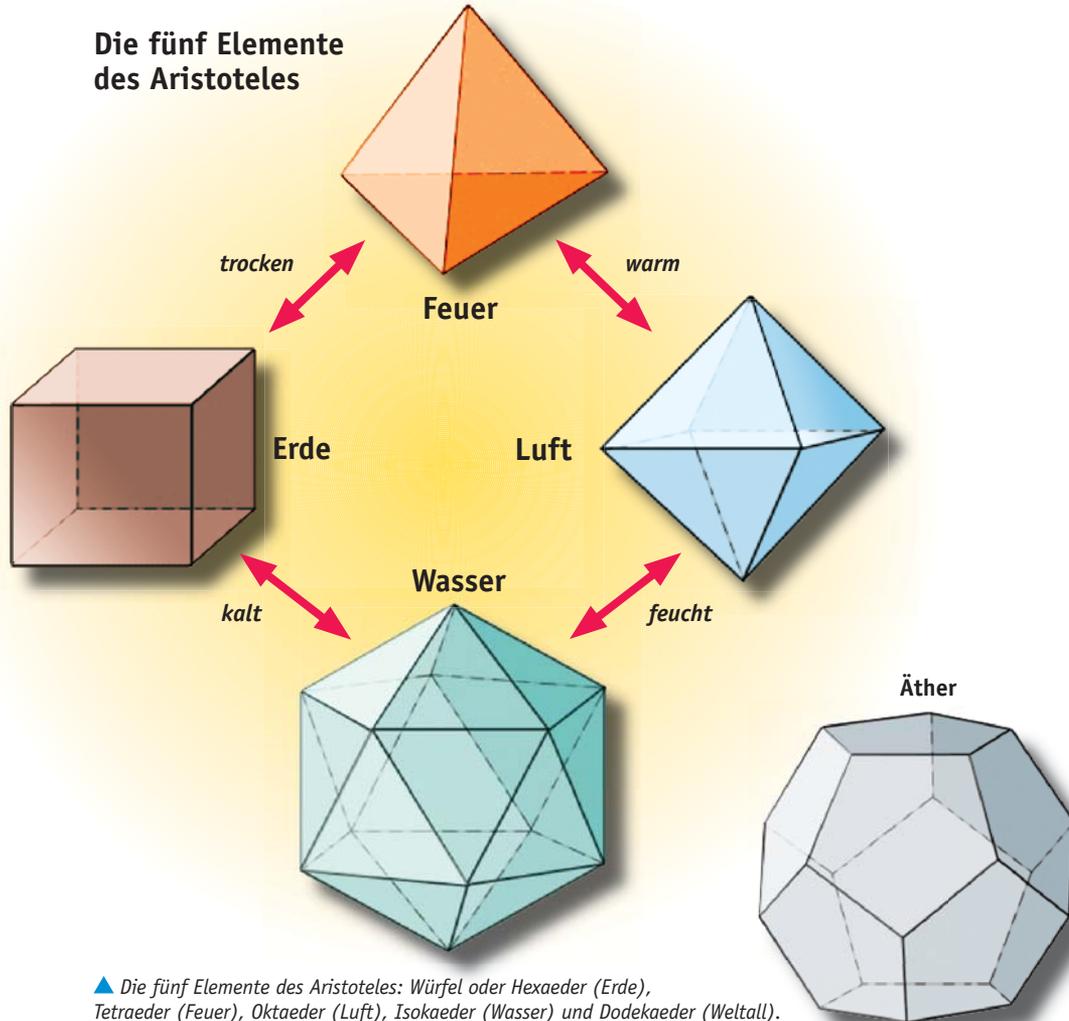
Die Geschichte unserer Vorstellung vom Atom ist so spannend wie ein Kriminalroman, und zwar aus zwei Gründen: Erstens gibt es nur Indizien für

die Existenz der verschiedenen Atome. Das gilt im Grunde bis heute, denn die Bilder von Atomen, die inzwischen wohl jeder gesehen hat, sind nur visualisierte Messdaten. Augenzeugen gibt es keine. Zweitens finden sich weder Hinweise auf den Täter noch auf ein Motiv. Wer hat die Atome und ihre Gesetze so geschaffen wie sie sind? Waren die Naturgesetze vor der Entstehung der Atome schon da, haben sie sich gebildet oder gar verändert? Und schon sind wir wieder in der Metaphysik, wo wir – zumindest an dieser Stelle – gar nicht hinwollen.

▼ *In ca. vier Milliarden Jahren wird sich auch unsere Sonne zu einem roten Riesen entwickeln. Der Durchmesser wird dann bis zur Mars-Bahn reichen und die Existenz der inneren Planeten beenden.*



Die fünf Elemente des Aristoteles



▲ Die fünf Elemente des Aristoteles: Würfel oder Hexaeder (Erde), Tetraeder (Feuer), Oktaeder (Luft), Isokaeder (Wasser) und Dodekaeder (Weltall).

„Back to the roots!“ – so sagt man heute auf Neudeutsch. Und die Wurzeln für die Frage nach der Materie liegen – wie sollte es bei einem so grundlegenden Problem anders sein – bei den vorsokratischen griechischen Naturphilosophen. Natürlich haben sie sich denkend gefragt: Woraus besteht die Natur, beziehungsweise woraus ist sie entstanden?

Der erste Denkanstoß kam von Thales von Milet (um 625–547 v. Chr.). Alle Lebewesen enthalten Wasser. Also schloss er plausibel, der Urstoff müsse Wasser sein. Seine Hypothese fiel allerdings in selbiges, denn schon sein Schüler Anaximander (um 611–546 v. Chr., Erfinder der Sonnenuhr) traute ihr nicht. Er glaubte an ein abstraktes Urprinzip (das Apeiron), das sich in einem Kreislauf bilde und vergehe. Anaximenes (585–525 v. Chr.) sah die Luft als den Urstoff an. Für Pythagoras (570–500 v. Chr.) begann alles mit der Zahl. Eine ziemlich abstrakte Vorstellung; allerdings muss bedacht werden, dass die Bibel mit der Feststellung „Im Anfang war das Wort“ auch nicht viel konkreter ist. Sehr anschaulich war die Lehre von Empedokles (492–432 v. Chr.). Für ihn bestand die Welt aus vier Elementen: Wasser, Erde, Feuer und Luft. Damit ließ sich viel erklären, und so ist es nicht verwunderlich, dass diese Vorstellung schnell viele Anhänger fand. Die prominentesten waren Platon (427–347 v. Chr.) und mit ihm Aristoteles (384–322 v. Chr.). Sie ordneten jedem Element einen der fünf platonischen Körper zu (Würfel für die Erde,

Oktaeder für die Luft, Tetraeder für das Feuer, Iso-kaeder für das Wasser). Das zwölfflächige Dodekaeder stand für das Weltall. Dieses war nach der Vorstellung von Aristoteles vom Äther erfüllt. Die Suche nach dieser Quintessenz hat im Mittelalter die Alchimisten umgetrieben. Den Beweis, dass es den Äther gar nicht gibt, konnte erst Albert Einstein mit der Relativitätstheorie erbringen.

Bleiben wir aber zunächst in der Antike. Ein stiller, zurückgezogener Querdenker namens Leukipp verfolgte im 5. Jh. v. Chr. ein Gedankenexperiment. Materie lässt sich bekanntlich teilen und zerkleinern. Aber wie oft kann dieser Vorgang wiederholt werden? Doch sicher nicht bis ins Unendliche. Irgendwann muss das doch ein Ende haben, man stößt auf das Unteilbare, griechisch *à-tomos*. Zum Glück hatte Leukipp einen Schüler, Demokrit von Abdera (um 460–370 v. Chr.). Dieser war lebensfroh, reiselustig, diskussionsfreudig und klug. Er errichtete aus der Atom-Hypothese seines Lehrers ein Denkgebäude und brachte es mit großem Erfolg unter die Leute. Alle Materie besteht aus Atomen, die ihrerseits stofflich gleich sind. (Als hätten Leukipp und Demokrit die Elektronen, Protonen und Neutronen vorausgeahnt.) Die Unterschiedlichkeit der Materie kommt durch Gestalt, Lage und Anordnung der Atome zustande. Zwischen den Atomen herrscht Leere. (Auch das erwies sich als richtig.) Da für Demokrit auch die Seele aus feinen „Feuer“-Atomen bestand, könnte man ihn für einen reinen Materialisten halten. Aber in seiner Ethik stellte er

hohe Anforderungen an den Geist des Menschen. Für ihn gab es also trotz seiner Lehre von den Atomen doch noch etwas, das über der Materie stand.

Fast zweieinhalb Jahrtausende herrschte dann Ruhe in dieser Frage. Es kamen keine neuen Fakten hinzu, und mit der Schöpfungsgeschichte der Bibel war sowieso alles geklärt. Die Geheimnisse Gottes zu hinterfragen, war ketzerisch, im Mittelalter sogar gefährlich. Mit solchen Leuten hat die Inquisition erst gar nicht lange gefackelt. Erst mit der Aufklärung wurde diese uralte Frage neu gestellt und schließlich experimentell und theoretisch beantwortet.

Für die Gestaltung des Posters „Das Historische Periodensystem“, für das dieses Buch als Ergänzung geschrieben wurde, war es schwierig, den historischen Ablauf der Ereignisse und Erkenntnisse der Atomforschung gerecht darzustellen. Der Grund ist trivial: Für die Ideengeschichte des Atoms (unterste Reihe auf dem Poster) war aus grafischen Gründen nur Platz für 14 Persönlichkeiten (passend zu den 14 Lanthanoiden und Actinoiden). Doch welche sollten dargestellt und welche weggelassen werden, ohne ihnen Unrecht zu tun? Die befragten Fachleute beantworteten diese Frage unterschiedlich, und irgendwann musste nach bestem Wissen und Gewissen entschieden werden. Die Auswahl wurde getroffen, um für diesen einmaligen historischen Vorgang Interesse zu wecken. Dabei wurde besonderer Wert auf die methodischen Fortschritte und die Paradigmenwechsel

| Atom-Idee | Atom-Modell 1803 | Atomvolumen 1811 | X-Strahlen 1895 |
|---|---|---|---|
| Demokrit von Abdera (460–375 v. Chr.) | John Dalton (1766–1844) | Lorenzo Avogadro (1776–1856) | Wilhelm C. Röntgen (1845–1923) |
|  |  |  |  |

gelegt. Wer hier und da eine andere Entscheidung getroffen hätte, wird um Nachsicht gebeten.

Nun zur „Ahnenerie“ auf dem Poster. Demokrit steht selbstverständlich an erster Stelle. Es folgt John Dalton (1766–1844), ein bescheidener, gläubiger Mensch, der sich sein eindrucksvolles, breites naturwissenschaftliches Wissen als Autodidakt aneignete. In dem von ihm gefundenen Gesetz der multiplen Proportionen der Elemente in ihren jeweiligen chemischen Verbindungen sah er zu Recht einen indirekten Beweis für die Existenz von Atomen. Er stellte sie sich als feste Kügelchen vor, denen er spezifische Symbole gab. Mit dem von ihm präzisierten Begriff des „Elements“ hat sich der aus bescheidenen Verhältnissen stammende Schullehrer unsterblich gemacht.

Einen oft unterschätzten Beitrag für die Vorstellung von den Atomen lieferte Lorenzo Avogadro (1776–1856; 2006 jährt sich sein Todestag zum 150. Mal). Er kam aus begüterttem Haus, war Ju-

| | | | | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|--|---|---|---|---|
| X-Strahlen 1895 | Radioaktivität 1896 | Elektronen 1897 | Quantenphysik 1900 | Isotope 1900 | Kern-Hülle-Modell 1911 | Planeten-Modell 1913 | Pauli-Prinzip 1924 | Quantenmechanik 1926 | Wellenmechanik 1926 | Statistische Quantenmechanik 1926 |
| Wilhelm C. Röntgen (1845–1923) | Antoine H. Becquerel (1852–1908) | Sir Joseph J. Thomson (1856–1940) | Max K. E. L. Planck (1858–1947) | Frederick Soddy (1877–1956) | Sir Ernest Rutherford (1871–1937) | Niels H. D. Bohr (1885–1962) | Wolfgang Pauli (1900–1958) | Werner K. Heisenberg (1901–1976) | Erwin Schrödinger (1887–1961) | Max Born (1882–1970) |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

rist und Menschenfreund; sein tiefes Interesse galt jedoch der Naturwissenschaft. Daten, Experimente und scharfsinnige Überlegungen führten ihn zu der Erkenntnis, dass gleiche Volumina von Gasen auch die gleiche Anzahl von Atomen enthalten mussten. Da von einigen Gasen das Atomgewicht bekannt war, war er in der Lage, das „Atomvolumen“ mit 22,4 l bei 20 °C zu bestimmen. Weiterhin erkannte er, dass die Elemente Sauerstoff und Wasserstoff als zweiatomige Verbindungen vorliegen. Deshalb definierte er den Begriff „Molekül“, der in der Chemie zum Schlüsselwort wurde.

In der Bildergalerie fällt die große Lücke zwischen 1811 (Lorenzo Avogadro) und 1895 (Wilhelm Röntgen) auf. In der Zwischenzeit hatte es auf allen Gebieten der Naturwissenschaften spektakuläre Fortschritte gegeben. In diesem Zusammenhang war die Entwicklung des Periodensystems durch Julius Lothar Meyer und Dimitri Mendelejew einer der wichtigsten Schritte.

Dennoch blieb die Vorstellung von den Atomen umstritten. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts nahmen die Kontroversen sogar zu. Glühende Anhänger des Atomismus wie Ludwig Boltzmann (1844–1906) stießen auf erbitterten Widerstand, z.B. bei Ernst Mach (1838–1916). Dieser forderte aus erkenntnistheoretischen Gründen eine hypothesefreie Wissenschaft. Solange sich die Atome nicht direkt nachweisen ließen, sei ihre Existenz anzuzweifeln.

Gerade dieser Purismus war das Leitmotiv für die Auswahl der angeführten Forscher. Das wird am Beispiel von Wilhelm Röntgen (1845–1923, 1901 erster Nobelpreis für Physik) sogleich erkennbar. Röntgen hat keinen unmittelbaren Beitrag zum Atom-Modell geleistet. Er hat mit seiner Entdeckung der Kathodenstrahlung (den Röntgen- oder sog. X-Strahlen) jedoch ein Werkzeug geschaffen, das einen unmittelbaren Einblick in die Atomhülle erlaubte. Damit konnte der junge Henry Moseley

(1887–1915, gefallen) 1913 die Reihenfolge der Elemente nach ihrer Ordnungszahl eindeutig festlegen.

Was bei Röntgen ausschlaggebend war, gilt auch für Antoine H. Becquerel (1852–1908, 1903 Nobelpreis für Physik zusammen mit dem Ehepaar Curie). Seine Entdeckung der Radioaktivität war nicht nur die Grundlage für das Auffinden von neuen Elementen (Radium und Polonium durch das Ehepaar Curie). Die Radioaktivität und ihre Phänomene wurden zum Universalwerkzeug, mit dem die nachfolgenden Physiker und Chemiker Einsichten in die Welt der Atome gewannen.

Sir Joseph Thomson (1856–1940, 1906 Nobelpreis für Physik) entdeckte 1897 das freie Elektron und erforschte dessen Eigenschaften. Er entwickelte nach damaligem Erkenntnisstand ein erstes konkretes Atom-Modell, bei dem die Elektronen in einer positiv geladenen Masse eingebettet waren. Sein „Plum pudding-Modell“ sollte sich jedoch bald

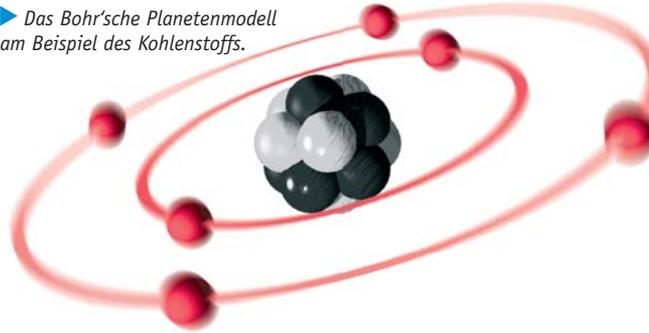
als unzutreffend herausstellen. Das schmälert aber nicht die Bedeutung dieses vielseitigen und erfolgreichen Forschers.

Max Planck (1858–1947, Nobelpreis für Physik 1918) hatte zunächst nicht die Atome im Visier, sondern die Thermodynamik und dabei vor allem die Strahlungsgesetze. 1900 überraschte er die Berliner Physikalische Gesellschaft – und später die ganze Welt – mit einer experimentell belegten Erkenntnis, die das Weltbild veränderte: Anders als Zeit und Raum ist die Energie „gequantelt“. Sie bildet also kein Kontinuum, sondern ist quasi körnig. Die kleinste Einheit ist das Planck'sche Wirkungsquantum, eine zentrale Naturkonstante.

Frederic Soddy (1877–1956, Nobelpreis für Chemie 1921) wies zusammen mit Sir William Ramsay im Jahr 1903 nach, dass beim Zerfall von Radium Helium entsteht. Er erkannte darin ein übergeordnetes Phänomen und prägte 1913 den Begriff „Isotop“ für Atome mit der gleichen Ordnungszahl, die aber wegen unterschiedlicher Anzahl von Neutronen ein anderes Atomgewicht besitzen. Die Isotope eines Elementes verhalten sich chemisch gleich, haben unter bestimmten Bedingungen jedoch physikalisch unterschiedliche Eigenschaften (Isotopen-Trennung). Wie sich später herausstellte, steigt mit zunehmender Ordnungszahl das Verhältnis von Neutronen zu Protonen.

Sir Ernest Rutherford (1871–1937, 1908 Nobelpreis für Chemie, was ihn als Physiker verwunderte) war ein genialer Experimentator und ein

► *Das Bohr'sche Planetenmodell am Beispiel des Kohlenstoffs.*

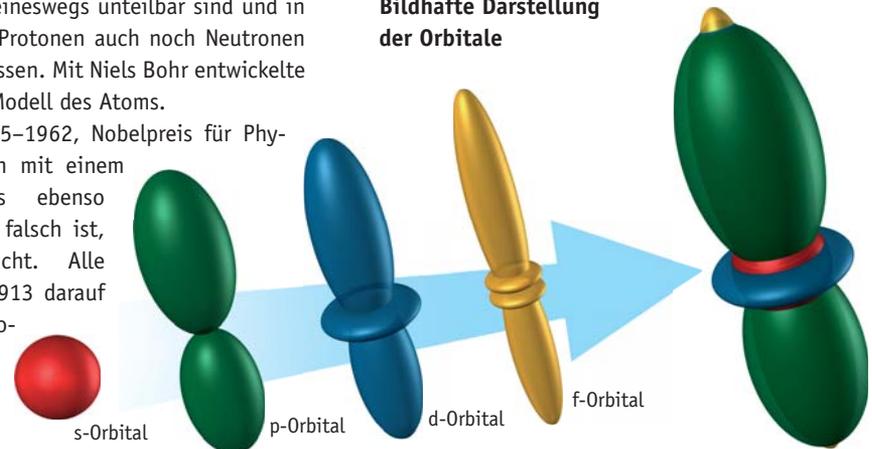


ebenso genialer Deuter der Ergebnisse. Er erkannte die drei Arten der Strahlung (Alpha-, Beta- und Gamma-). Die Alpha-Strahlung, die aus Heliumkernen besteht, nutzte er, um durch Streuversuche zu beweisen, dass das Atom fast leer ist. Der Durchmesser des Atomkerns ist etwa 10.000mal kleiner als das Atom selbst. Außerdem konnte er beweisen, dass Atome keineswegs unteilbar sind und in ihrem Kern neben Protonen auch noch Neutronen vorhanden sein müssen. Mit Niels Bohr entwickelte er das Kern-Hülle-Modell des Atoms.

Niels Bohr (1885–1962, Nobelpreis für Physik 1922) hat sich mit einem Atom-Modell, das ebenso elegant wie leider falsch ist, unsterblich gemacht. Alle Fakten deuteten 1913 darauf hin, dass die Elektronen den Atomkern nicht wie Bienen

¹ Didaktisch hat sich das Schalenmodell wegen seiner Anschaulichkeit bis heute gehalten. Es werden sieben Schalen unterschieden (K, L, M, N, O, P, Q). Diese haben jeweils eine bestimmte Anzahl von Orbitalen (s, p, d, f). Das s-Orbital kann zwei Elektronen aufnehmen, das p-Orbital 6, das d-Orbital 10 und das f-Orbital 14. Bei den Übergangsmetallen und den Lanthanoiden und Actinoiden werden die inneren Schalen aufgefüllt, was ihre chemischen Besonderheiten als auch ihre Ähnlichkeiten erklärt. Die Unterteilung in acht Haupt- und zehn Nebengruppen wurde aufgegeben. Nach internationaler Übereinkunft besteht das Periodensystem heute aus 18 Gruppen.

Bildhafte Darstellung der Orbitale



umschwirren. Insbesondere die Spektren und die Quantentheorie waren Indizien für eine Ordnung. Natürlich lag ein Planeten-Modell nahe, aber nach der klassischen Physik müssten die bewegten Elektronen Energie abstrahlen und alsbald in den Kern stürzen. Der 28-jährige Niels Bohr setzte sich darüber hinweg und postulierte, auf den vorgesehenen Bahnen wären die Elektronen „out of law“. Das hieß im Klartext, mit der klassischen Physik ließen sich die Eigenschaften des Atoms weder beschreiben noch erklären. Es krachte im Gebäck des Physikalischen Theoriegebäudes. Grundsätzlich neue Modelle mussten entwickelt werden.¹

Werner Heisenberg (1901–1976, Nobelpreis für Physik 1932) entwickelte die Quantenmechanik, mit der sich die Atome zutreffend beschreiben lassen. Mit seinem Lehrer und Freund Niels Bohr erarbeitete er in der „Kopenhagener Deutung“ die Konsequenzen – ein neues Weltbild entstand. Er fand heraus, dass auf atomarer Ebene die klassischen Gesetze der Physik keine Gültigkeit haben. Statt Ursache und Wirkung gelten Zufall und Wahrscheinlichkeit. Ort und Impuls atomarer Teilchen lassen sich grundsätzlich nicht gemeinsam bestimmen, so die Heisenberg'sche Unschärferelation. Wird eine der Größen gemessen, verändert sich zwangsläufig die andere.

Erwin Schrödinger (1887–1961, Nobelpreis für Physik 1933) übertrug die von L. V. de Broglie für

Elektronen entwickelte Vorstellung von Materiewellen auf das ganze Atom und entwickelte so die Wellenmechanik. Mit Hilfe der „Schrödinger-Gleichungen“ lassen sich die Orbitale als Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Elektronen beschreiben. Die Wellenmechanik stellte zwar einen Fortschritt dar, erwies sich jedoch in Folge als unzureichend.

Max Born (1882–1970, Nobelpreis für Physik 1954) legte 1926 mit seiner statistischen Interpretation der Quantenmechanik das Fundament für die Weiterentwicklung der Quantentheorie. Vor allem wurde es möglich, die Chemische Bindung theoretisch zu verstehen. Max Born war einer der

bedeutendsten theoretischen Physiker des 20. Jahrhunderts, ein erfolgreicher und vielseitiger Hochschullehrer (W. Heisenberg, P. Jordan u.a.) sowie ein Mahner für die Wahrnehmung der Verantwortung in den Naturwissenschaften.

Wolfgang Pauli (1900–1958, Nobelpreis 1945) formulierte mit 24 Jahren das Ausschließungsprinzip, berühmt geworden als „Pauli-Prinzip“. Danach unterscheiden sich alle Elektronen eines Atoms voneinander, keines gleicht einem anderen. Aus seinen theoretischen Überlegungen folgerte er dazu die Existenz von so genannten Kernspins, die auch die Hyperfeinstruktur von Spektrallinien erklären. Seine Hypothese konn-



► *Die Suche nach der Weltformel ist noch nicht beendet.*

te später eindeutig bestätigt werden. Da jedes Element seine eigene Elektronenkonfiguration besitzt, erklären sich auch die unterschiedlichen chemischen Eigenschaften.

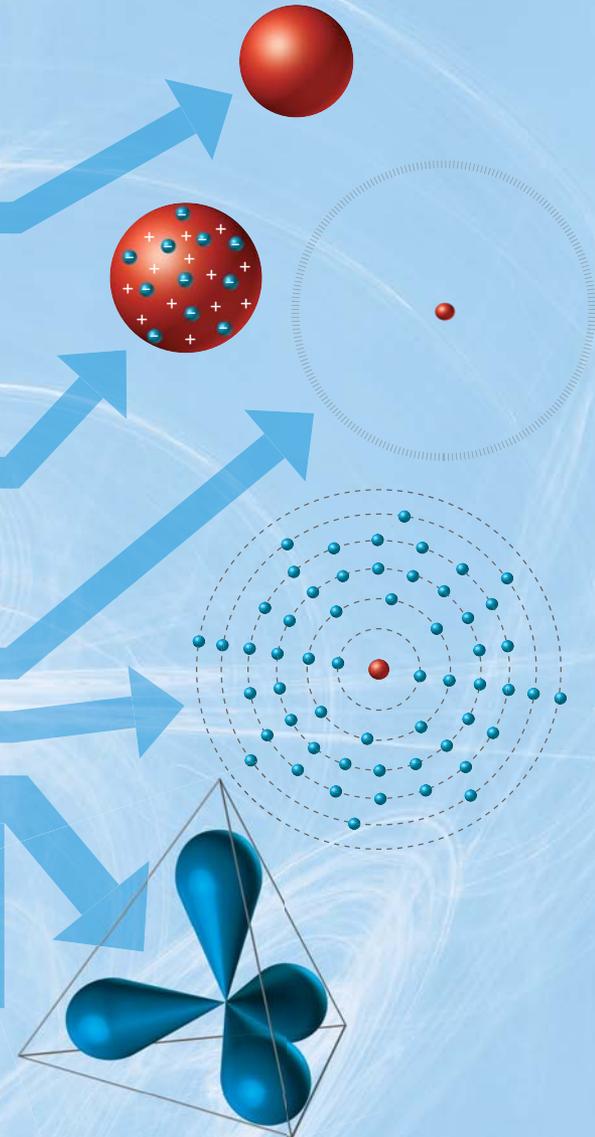
All die genannten wissenschaftlichen Beiträge über die Eigenschaften des Atoms waren Pionierleistungen und haben die Chemie nachhaltig beeinflusst. Darüber hinaus beschäftigten sich die Theoretischen Physiker auch mit der Frage, was die Materie überhaupt ist. Nach der Relativitätstheorie standen Materie und Energie in dem bekannten Zusammenhang: $E = m \cdot c^2$. Hinzu kamen andere wichtige Fragen, z.B. welche Kräfte die geballte positive Ladung im Kern zusammenhalten. Dabei stellte sich paradoxerweise heraus, dass zwischen den kleinsten Teilchen im Atomkern die stärksten Kräfte wirken. Zwischen den größten Körpern des Universums wirkt dagegen die schwächste Kraft, nämlich die Gravitation. Auch die Suche nach der Weltformel, die die vier Kräfte (Gravitation, elektromagnetische Kraft, schwache Wechselwirkung zwischen Bestandteilen des Atomkerns, die für den Beta-Zerfall verantwortlich sind, sowie die starke Kraft im Atomkern) in einer Theorie zusammenfasst, ist noch nicht erfolgreich beendet. Ein neuer Ansatz, den Zusammenhang zwischen Materie und Energie zu beschreiben, ist die „String-Theorie“. Nach ihr besteht Materie aus kompakten, schwingenden Energiebündeln (*String* heißt Faden). Auf dieser subatomaren Ebene wäre das Universum einheitlich strukturiert. Diese Fragen führen in die Naturphilosophie.

Die Chemie hat jedoch noch viele konkrete Probleme zu lösen. Aus dem Meer der möglichen Verbindungen – ca. 30 Millionen sind derzeit bekannt und ein Ende ist nicht abzusehen – gilt es, die nützlichen und hilfreichen zu finden. Beim Phänomen der Selbstorganisation von Molekülen stehen wir erst am Anfang des Erkennens und Nutzens; das gilt besonders für molekulare Systeme mit funktionalen Eigenschaften. Die Herstellung von Materialien mit ungewöhnlichen oder gar noch unbekanntem Eigenschaften bietet vielversprechende Chancen. Und schließlich stehen Chemie und Biologie vor der Herausforderung, die komplexen Lebensvorgänge auf der molekularen Ebene aufzuklären und zu verstehen. Die schon erreichten Erfolge dürfen nicht darüber hinweg täuschen, dass der Weg noch lang sein wird und mit vielen Überraschungen zu rechnen ist.

▼ *Millionen von Verbindungen lagern in den Substanzbibliotheken großer Unternehmen.*

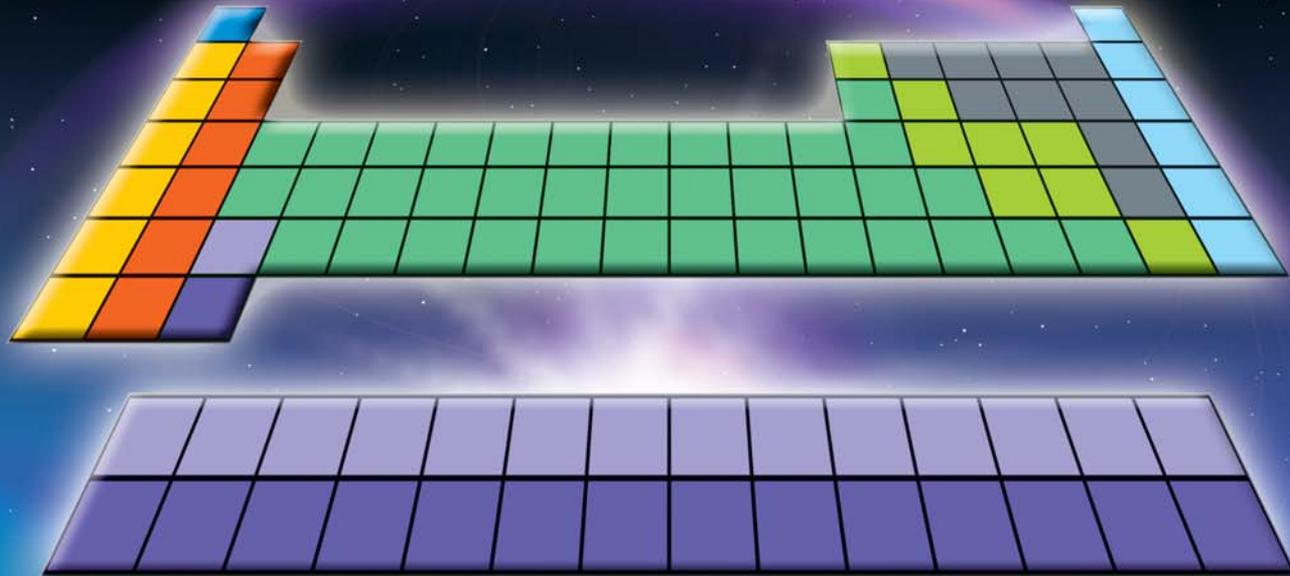
Historie des Atom-Modells

| | | | |
|------------------------------|--------------------|--------------------------------|-------------|
| Demokrit | (460–375 v.Chr.) | Atom-Idee | |
| John Dalton | (1766–1844) | Erstes Atom-Modell | 1803 |
| Lorenzo Avogadro | (1776–1856) | Atomvolumen | 1811 |
| Wilhelm Röntgen | (1845–1923) | X-Strahlen | 1895 |
| Antoine H. Becquerel | (1852–1908) | Radioaktivität | 1896 |
| Sir Joseph Thomson | (1856–1940) | Elektronen | 1897 |
| Max K.E.L. Planck | (1858–1947) | Quantenphysik | 1900 |
| Frederick Soddy | (1877–1956) | Isotope | 1900 |
| Sir Ernest Rutherford | (1871–1937) | Kern-Hülle-Modell | 1911 |
| Niels Bohr | (1885–1962) | Planeten-Modell | 1913 |
| Wolfgang Pauli | (1900–1958) | Ausschließungs-(Pauli-)Prinzip | 1924 |
| Werner K. Heisenberg | (1901–1976) | Quantenmechanik | 1926 |
| Erwin Schrödinger | (1887–1961) | Wellenmechanik | 1926 |
| Max Born | (1882–1970) | Statistische Quantenmechanik | 1926 |

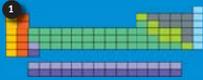


Die Elemente der Welt

Eigenschaften, Entdeckung, Vorkommen und Nutzung



- | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Wasserstoff | Edelgase | Alkali- metalle | Erdalkali- metalle | Hälbmetalle | Nicht- metalle | Metalle | Lanthanoide | Actinoide |



H ¹

Wasserstoff

Hydrogene

Atomgewicht
1,008

Isotope
Deuterium
Tritium



1766 Henry Cavendish (1731–1810) erkennt Wasserstoff als Element.



1661 von Robert Boyle (1627–1691) bei der Einwirkung von Metallen auf Säuren als „brennbare Luft“ isoliert, vorher von Alchemisten beobachtet.



◀ *Im Wassermolekül liegen die Wasserstoff-Atome nicht gegenüber, sondern bilden einen Winkel von 105°. Das Dipol-Moment des Moleküls verleiht diesem besondere Eigenschaften, wie die Fähigkeit zur Bildung von Wasserstoff-Brücken: $\text{O}\cdots\text{H}\cdots\text{O}$ (20–40 kJ/mol).*

◀ *Brennstoffzellen gelten als zukunftsweisende Energiequelle, insbesondere für Autos. Dabei wird Wasserstoff mit Sauerstoff der Luft zu Wasser umgesetzt und Strom gewonnen. Der Wasserstoff muss nicht aus Erdöl stammen (Kohle, Sonne usw.)*



Name: von *hydro genes* (griech.) = wasserbildend

Eigenschaften

Das am häufigste Element im Universum besteht aus einem Proton und einem Elektron. In allen Sternen läuft die Kernfusion zu Helium ab. So ist der kleine Wasserstoff (Atomradius: 0,078 nm) der „Sunnyboy“ unter den Elementen. Auch in Lebewesen ist er das häufigste Element. 60% der Atome unseres Körpers sind Wasserstoff. Mit Sauerstoff bildet sich in heftiger Reaktion (Knallgas) Wasser. Das Wasser verdankt seine ungewöhnlichen Eigenschaften (es siedet erst bei 100°C, Eis ist leichter als Wasser usw.) den Wasserstoffbrücken. Diese entsteht durch die elektrische Anziehung des positiv geladenen Protons des einen Wassermoleküls mit dem partiell negativ geladenen Sauerstoff eines anderen (10–20 kJ/mol). Für das Leben sind diese Wasserstoffbrücken zwischen Sauerstoff- und Stickstoff-Atomen unverzichtbar (sie halten u.a. DNA und Proteine zusammen).

Nur beim Wasserstoff haben die anderen Isotope eigene Namen: Deuterium und Tritium. Der „nackte“ Wasserstoff, das Proton, katalysiert viele wichtige Reaktionen.

Wasserstoff wird vielfältig genutzt: Ammoniak-Synthese, Schweißen, Raketentreibstoff, Reduktionsmittel z.B. für Fette, Entschwefelung von Ölprodukten usw. H_2 ist der zukunftssträchtige Energieträger: Wasserstoff-Motoren, Brennstoff-Zellen und eventuell Kernfusion.

▶ *Modell der DNA-Doppelhelix. Wasserstoffbrückenbindungen halten die beiden DNA-Stränge zusammen. Ohne sie wäre das Leben nicht möglich.*

