

# ELEMENTE

150 JAHRE PERIODENSYSTEM

EIN MAGAZIN DER  
GESELLSCHAFT  
DEUTSCHER CHEMIKER



ASTROCHEMIE

GEBURT DER ATOME  
IM WELTALL

ORGANISMEN

DIE BAUSTEINE  
DES LEBENS

ROHSTOFFE

SELTENE METALLE IN  
SMARTPHONES



*»DIE GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER  
UND IHRE MITGLIEDER UNTERSTÜTZEN  
UND FÖRDERN EINE NACHHALTIGE UND DAUERHAFTE  
ENTWICKLUNG IN GESELLSCHAFT, WIRTSCHAFT  
UND UMWELT. SIE HANDELN STETS AUCH IM BEWUSST-  
SEIN IHRER VERANTWORTUNG GEGENÜBER  
KÜNFTIGEN GENERATIONEN.«*

Die Wurzeln der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) reichen zurück bis ins Jahr 1867. Damals wurde in Berlin die Deutsche Chemische Gesellschaft gegründet, die nach dem Zweiten Weltkrieg zusammen mit dem 1887 gegründeten Verein Deutscher Chemiker zur heutigen GDCh verschmolz.

Mit rund 31 000 Mitgliedern aus Wissenschaft, Wirtschaft und freien Berufen gehört die GDCh zu den größten chemiewissenschaftlichen Gesellschaften der Welt. Sie gliedert sich in 27 Fachgruppen sowie weitere Arbeitskreise und

Arbeitsgemeinschaften, die spezielle Fachgebiete vertreten. Mit 60 Ortsverbänden ist die GDCh in allen chemierelevanten Regionen Deutschlands präsent. Die rund 9000 Studenten, Doktoranden und Berufsanfänger sind im »JungChemikerForum« organisiert.

Die gemeinnützige GDCh hat zum Ziel, die Chemie in Lehre, Forschung und Anwendung zu fördern. Darüber hinaus will sie Verständnis und Wissen von der Chemie sowie von chemischen Zusammenhängen in der Öffentlichkeit vertiefen.

Neben den »Nachrichten aus der Chemie« gibt die GDCh zahlreiche Fachzeitschriften heraus – darunter mit der deutschen und internationalen Edition der »Angewandten Chemie« eine der weltweit renommiertesten überhaupt.

Der »Karl-Ziegler-Preis« und der »Otto-Hahn-Preis« – Letzteren verleiht die GDCh gemeinsam mit der Stadt Frankfurt am Main und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft – zählen zu den höchstdotierten Auszeichnungen für Naturwissenschaftler in Deutschland.

[WWW.GDCH.DE](http://www.gdch.de)

LIEBE LESERINNEN,  
LIEBE LESER,

Das Periodensystem ist ein Ordnungssystem, in dem die heute bekannten 118 Elemente in einer chemisch-physikalisch sinnvollen Struktur angeordnet sind. Das Faszinierende an diesem System ist, dass die Natur selbst sich diese Ordnung gegeben hat. Das Periodensystem wurde nicht vom Menschen entwickelt, sondern entdeckt und zwar vor 150 Jahren, im Jahr 1869. Aus Anlass dieses Jubiläums haben die Generalversammlung der Vereinten Nationen und die UNESCO das Jahr 2019 zum Internationalen Jahr des Periodensystems ausgerufen.

Zugegeben, das Periodensystem sieht zunächst einmal kompliziert aus. Und viele Menschen erinnert es an den Chemieunterricht, den sie in der Schule oft als schwierig empfunden haben. Aber in dieser Beilage wollen wir nicht Ihr Schulwissen auffrischen, sondern Ihnen ganz ohne Formeln Neues, Wissenswertes, Skurriles und Faszinierendes rund um das Periodensystem vermitteln.

Fast zeitgleich und unabhängig voneinander haben der Russe Dmitri Mendelejew und der Deutsche Lothar Meyer in den 1860er Jahren die periodische Anordnung der Elemente erkannt und 1869 in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht. Damals waren noch längst nicht alle Elemente entdeckt und auf Grund von »Lücken« im damaligen Periodensystem konnte die Existenz weiterer, noch nicht bekannter Elemente vorhergesagt werden. Es war eine großartige Bestätigung des Periodensystems, dass die postulierten Elemente später tatsächlich entdeckt wurden und ihre chemischen und physikalischen

Eigenschaften den Vorhersagen verblüffend genau entsprachen. Einen Beitrag über die Entdeckung des Periodensystems und den Disput der beiden Chemiker, wer diese Ordnung denn nun als Erster erkannt hat, finden Sie ab Seite 6.

In einem der anderen Beiträge werden Sie erfahren, wie viele der heute bekannten Elemente die meisten von uns täglich nutzen, weil sie in modernen Smartphones verarbeitet sind. Wir werfen aber auch einen kritischen Blick darauf, wie diese Elemente gewonnen werden, und erläutern, warum das Recycling von Smartphones so schwierig ist.

Die Beiträge können Sie in beliebiger Reihenfolge und ohne chemische Fachkenntnisse lesen. Und wenn Sie neugierig geworden sind und mehr über das Periodensystem erfahren möchten, dann schauen Sie auf den Webseiten der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) vorbei.

Unter [www.gdch.de/periodensystem](http://www.gdch.de/periodensystem) finden Sie viele weitere Informationen zu den einzelnen Elementen.

WIR WÜNSCHEN IHNEN VIEL  
FREUDE BEI DER LEKTÜRE.



DR. MATTHIAS URMANN  
PRÄSIDENT  
DER GDCH

*M. Urmann*



PROF. DR. WOLFRAM KOCH  
GESCHÄFTSFÜHRER  
DER GDCH

*Wolfram Koch*

#### UMSCHLAGBILD

1869 entwickelten die Chemiker Dmitri Mendelejew und Lothar Meyer unabhängig voneinander eine Systematik der Elemente. Das Periodensystem half, zahlreiche unentdeckte Elemente vorherzusagen, etwa Scandium (Sc). Vor 150 Jahren kannte man 63 Elemente, heute umfasst das Periodensystem 118.

Getty Images / Science Photo Library / David Mack

# NAMENSGESCHICHTEN

BEI DER NAMENSUCHE LIEBEN SICH DIE ENTDECKER DER ELEMENTE VIELFÄLTIG  
INSPIRIEREN: VON MYTHEN, HIMMELSKÖRPERN, FUNDORTEN, FARBEN  
UND GERÜCHEN. EINE AUSWAHL:



## BROM UND OSMIUM

Das Halogen Brom und das Übergangsmetall Osmium verdanken ihre Namen ihrem penetranten Geruch – sowohl das altgriechische »bromos« als auch »osme« lassen sich mit »Gestank« übersetzen. Bromdämpfe riechen stechend, Osmiumtetroxid, das sich an der Oberfläche von Osmiumpulver bildet, nach Rettich und Ozon.



## WOLFRAM

Schon im 16. Jahrhundert soll der Mineraloge Georgius Agricola Wolframit als »lupi suma« bezeichnet haben. Übersetzt aus dem Lateinischen bedeutet das so viel wie »Wolf-Schaum« oder »Wolf-Rahm«. Die Verbindung war häufig Zinnerzen beigemischt und verschlackte das Zinn beim Schmelzen, fraß es also auf wie ein Wolf.



## NIHONIUM, MOSCOVIUM, TENNESS UND OGANESSON

Die Namen der vier jüngsten Mitglieder im Periodensystem der Elemente wurden von den jeweiligen Entdeckern vorgeschlagen und im November 2016 festgelegt. Hätten die Fans der Heavy-Metal-Band Motörhead entscheiden dürfen, würde Moscovium heute Lemmium heißen. Über 150 000 Fans unterschrieben eine Petition zur Benennung des Elements nach dem verstorbenen Frontsänger der Band, Lemmy Kilmister.



## SELEN UND TELLUR

Als der Chemiker Jakob Berzelius Anfang des 19. Jahrhunderts das Element Selen taufte, wollte er auf die Ähnlichkeit zu Tellur verweisen, das nach dem lateinischen »tellus« (Erde) benannt worden war. Er wählte daher das griechische »selene«: Mond.



## AMERICIUM, CALIFORNIUM, DARMSTADIUM, EUROPIUM, INDIUM, RHENIUM, YTTERBIUM

Rund 30 Elemente tragen einen Ort im Namen. Meist verweisen sie auf Städte, Regionen oder Länder. Americium und Europium sind nach Erdteilen benannt und Rhenium nach dem Fluss Rhein. Der schwedische Ort Ytterby war gleich viermal Namensgeber: für die seltenen Erden Erbium, Terbium, Ytterbium und Yttrium.

PETERHERMESFURTIAN / GETTY IMAGES / ISTOCK;  
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

|                       |                       |                      |                            |                      |                         |                        |                       |                         |                       |                     |                          |                    |                        |                       |  |  |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|--|--|
| 1<br>H<br>Wasserstoff |                       |                      | 3<br>Li<br>Lithium         | 4<br>Be<br>Beryllium |                         |                        |                       | 11<br>Na<br>Natrium     | 12<br>Mg<br>Magnesium |                     |                          |                    |                        |                       |  |  |
| 19<br>K<br>Kalium     | 20<br>Ca<br>Calcium   | 21<br>Sc<br>Scandium | 22<br>Ti<br>Titan          | 23<br>V<br>Vanadium  | 24<br>Cr<br>Chrom       | 25<br>Mn<br>Mangan     | 26<br>Fe<br>Eisen     | 27<br>Co<br>Cobalt      |                       |                     |                          |                    |                        |                       |  |  |
| 37<br>Rb<br>Rubidium  | 38<br>Sr<br>Strontium | 39<br>Y<br>Yttrium   | 40<br>Zr<br>Zirkonium      | 41<br>Nb<br>Niob     | 42<br>Mo<br>Molybdän    | 43<br>Tc<br>Technetium | 44<br>Ru<br>Ruthenium | 45<br>Rh<br>Rhodium     |                       |                     |                          |                    |                        |                       |  |  |
| 55<br>Cs<br>Caesium   | 56<br>Ba<br>Barium    | 57-71                | 72<br>Hf<br>Hafnium        | 73<br>Ta<br>Tantal   | 74<br>W<br>Wolfram      | 75<br>Re<br>Rhenium    | 76<br>Os<br>Osmium    | 77<br>Ir<br>Iridium     |                       |                     |                          |                    |                        |                       |  |  |
| 87<br>Fr<br>Francium  | 88<br>Ra<br>Radium    | 89-103               | 104<br>Rf<br>Rutherfordium | 105<br>Db<br>Dubnium | 106<br>Sg<br>Seaborgium | 107<br>Bh<br>Bohrium   | 108<br>Hs<br>Hassium  | 109<br>Mt<br>Meitnerium |                       |                     |                          |                    |                        |                       |  |  |
|                       |                       |                      |                            |                      |                         |                        |                       |                         | 57<br>La<br>Lanthan   | 58<br>Ce<br>Cer     | 59<br>Pr<br>Praseodym    | 60<br>Nd<br>Neodym | 61<br>Pm<br>Promethium | 62<br>Sm<br>Samarium  |  |  |
|                       |                       |                      |                            |                      |                         |                        |                       |                         | 89<br>Ac<br>Actinium  | 90<br>Th<br>Thorium | 91<br>Pa<br>Protactinium | 92<br>U<br>Uran    | 93<br>Np<br>Neptunium  | 94<br>Pu<br>Plutonium |  |  |



## NIOB

Niob ist Tantal sehr ähnlich, weswegen Heinrich Rose das Element 1844 nach Niobe benannte, der Tochter des Tantalos. Was er nicht wusste: Charles Hatchett hatte das Element schon 1801 entdeckt und Columbium getauft, zu Ehren Amerikas – seinerzeit auch bekannt als Columbia. Die IUPAC entschied sich 1950 trotzdem für den Namen Niob.



## ARSEN, CÄSIUM, CHROM, IOD, IRIDIUM

14 Namen verraten die Farbe des Elements oder seiner Verbindungen: Cäsium etwa, von lateinisch »caesius«, steht für himmelblau und verweist auf die Flammenfärbung des Elements, Iod kommt von griechisch »ioeides« für violett und Arsen von altpersisch »al-zarnik« für goldfarben. Chrom, von griechisch »chroma« (Farbe), und Iridium, von lateinisch »iris« (Regenbogen), sind die Chamäleons unter den Elementen.



## PHOSPHOR

Eigentlich suchte der Apotheker und Alchemist Hennig Brand nach dem »Stein der Weisen«, als er 1669 Urin destillierte. Statt eines Steins, der unedle Metalle in Gold verwandeln kann, erzeugte er eine im Dunkeln leuchtende Masse: weißen Phosphor. Der Name ist dem griechischen »phosphoros« (Lichtträger) entlehnt.



## KOBALT UND NICKEL

Kobalt und Nickel hießen bereits so, bevor man die Elemente entdeckt hatte. Im Mittelalter verwechselten Bergarbeiter kostbare Silber- und Kupfererze mit Kobalt- oder Nickelerzen, die sich nicht verarbeiten ließen. Sie glaubten daher, dass Kobolde und der Berggeist Nickel das Silber und Kupfer verhext oder aufgefressen hätten.



## HELIUM

Helium wurde als einziges Element zuerst im All entdeckt. 1868 bemerkte der französische Astronom Jules Janssen im Spektrum des Sonnenlichts die gelbe Spektrallinie des Edelgases. Der Name erinnert an den Fundort: Das griechische Wort »hélios« bedeutet Sonne.

|                           |                          |                          |                         |                         |                        |                          |                       |                         |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
|                           |                          |                          |                         |                         |                        | 2<br>He<br>Helium        |                       |                         |
|                           | 5<br>B<br>Bor            | 6<br>C<br>Kohlenstoff    | 7<br>N<br>Stickstoff    | 8<br>O<br>Sauerstoff    | 9<br>F<br>Fluor        | 10<br>Ne<br>Neon         |                       |                         |
|                           | 13<br>Al<br>Aluminium    | 14<br>Si<br>Silicium     | 15<br>P<br>Phosphor     | 16<br>S<br>Schwefel     | 17<br>Cl<br>Chlor      | 18<br>Ar<br>Argon        |                       |                         |
| 28<br>Ni<br>Nickel        | 29<br>Cu<br>Kupfer       | 30<br>Zn<br>Zink         | 31<br>Ga<br>Gallium     | 32<br>Ge<br>Germanium   | 33<br>As<br>Arsen      | 34<br>Se<br>Selen        | 35<br>Br<br>Brom      | 36<br>Kr<br>Krypton     |
| 46<br>Pd<br>Palladium     | 47<br>Ag<br>Silber       | 48<br>Cd<br>Cadmium      | 49<br>In<br>Indium      | 50<br>Sn<br>Zinn        | 51<br>Sb<br>Antimon    | 52<br>Te<br>Tellur       | 53<br>I<br>Iod        | 54<br>Xe<br>Xenon       |
| 78<br>Pt<br>Platin        | 79<br>Au<br>Gold         | 80<br>Hg<br>Quecksilber  | 81<br>Tl<br>Thallium    | 82<br>Pb<br>Blei        | 83<br>Bi<br>Bismut     | 84<br>Po<br>Polonium     | 85<br>At<br>Astat     | 86<br>Rn<br>Radon       |
| 110<br>Ds<br>Darmstadtium | 111<br>Rg<br>Roentgenium | 112<br>Cn<br>Copernicium | 113<br>Nh<br>Nihonium   | 114<br>Fl<br>Flerovium  | 115<br>Mc<br>Moscovium | 116<br>Lv<br>Livermorium | 117<br>Ts<br>Tenness  | 118<br>Og<br>Oganesson  |
| 63<br>Eu<br>Europium      | 64<br>Gd<br>Gadolinium   | 65<br>Tb<br>Terbium      | 66<br>Dy<br>Dysprosium  | 67<br>Ho<br>Holmium     | 68<br>Er<br>Erbium     | 69<br>Tm<br>Thulium      | 70<br>Yb<br>Ytterbium | 71<br>Lu<br>Lutetium    |
| 95<br>Am<br>Americium     | 96<br>Cm<br>Curium       | 97<br>Bk<br>Berkelium    | 98<br>Cf<br>Californium | 99<br>Es<br>Einsteinium | 100<br>Fm<br>Fermium   | 101<br>Md<br>Mendelevium | 102<br>No<br>Nobelium | 103<br>Lr<br>Lawrencium |

PETERHERMESFURIAN / GETTY IMAGES / IStock; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



## TANTAL

Anders Gustaf Ekeberg benannte Tantal nach dem König Tantalos. Der griechischen Mythologie zufolge wurde dieser von den Göttern verstoßen und litt in der Unterwelt große Qualen. Ekeberg wählte den Namen, da Tantal(V)-Oxid mit Säuren kein Salz bildet, also schmechten müsse und wie Tantalos seinen Durst nicht löschen könne.



## URAN, NEPTUNIUM, PLUTONIUM

Die radioaktiven Schwermetalle sind nach den Planeten Uran, Neptun und dem Zwergplaneten Pluto benannt, bei deren Namensgebung wiederum die Götter der griechischen und römischen Mythologie Pate standen. Wegen der Zerstörungskraft der Plutoniumbombe entschieden sich die Entdecker des gleichnamigen Elements für Pluton, den Herrscher der Totenwelt.



## PLATIN

Die Goldgräber in den spanischen Kolonien im 17. Jahrhundert glaubten, Platin sei wertlos, und warfen es daher in die Flüsse zurück oder verstreuten es auf der Erde. Wegen der Farbähnlichkeit wählten sie als Name die abfällige Verniedlichung des spanischen »plata« (Silber.)



## WASSERSTOFF UND SAUERSTOFF

Antoine de Lavoisier bezeichnete Sauerstoff 1777 als Oxygen. Der Name leitet sich ab vom griechischen »oxys« für »sauer« und »gen« für »ich stelle her«. Der Chemiker hatte irrtümlich angenommen, dass Sauerstoff und nicht Wasserstoff Säuren kennzeichnet. Korrekt beobachtete er die Bildung von Wasser beim Verbrennen von Wasserstoff. Er taufte das Element 1783 »Hydrogen«, was so viel wie »Wasser bildender Stoff« heißt.



## PROMETHIUM

Der Name des 1945 entdeckten Promethiums soll uns eine Warnung sein: Er ist an den Titanen Prometheus angelehnt. Der griechischen Mythologie nach brachte er den Menschen das Feuer. Die Forscher wollten darauf hinweisen, dass radioaktive Elemente in Menschenhand sehr gefährlich sein können.

# DIE ENTDECKUNG DES PERIODENSYSTEMS

VOR 150 JAHREN ENTWICKELTE DMITRI MENDELEJEW EINE SYSTEMATIK DER CHEMISCHEN ELEMENTE UND GILT HEUTE ALS DER »VATER DES PERIODENSYSTEMS«, OBWOHL SEINERZEIT AUCH ANDERE FORSCHER EINE ORDNUNG DER ELEMENTE ERKANNTEN.

**E**s war ein Spiel mit 63 Karten, und der russische Chemiker kannte die Spielregeln nicht. Er musste darin sieben Farben und zwölf Joker finden. Vielleicht waren es auch 17 Farben oder 19, und möglicherweise gab es 35 Joker, die wiederum in zwei Kategorien fielen. Zu allem Überfluss fehlten mindestens vier Karten, und zwei Paare enthielten vermutlich vertauschte Angaben.

Der St. Petersburger Chemieprofessor Dmitri Iwanowitsch Mendelejew (1834–1907) hatte sich vor 150 Jahren, im Februar 1869, eine knifflige Aufgabe vorgenommen: Für sein neues Lehrbuch wollte er eine möglichst logische Abfolge der Kapitel finden und die seinerzeit 63 bekannten chemischen Elemente ordnen. Darum spielte er mit ihnen: Er hatte die Elemente auf Karten geschrieben, die er wie beim Kartenspiel Solitaire vor sich auslegte, und suchte nach einem Muster, so einige seiner Biografen. Andere zitieren aus dem Tagebuch Mendelejews, dass er einen Teil der Lösung erträumte und nach dem Aufwachen so-

fort notierte. Ob diese Anekdoten stimmen oder nicht, dem Chemiker fiel eine Periodizität auf: Wenn er die Elemente nach dem Atomgewicht sortierte, wiederholten sich stets bestimmte chemische Eigenschaften.

Es gab eine feste Abfolge von Familien, deren Mitglieder jeweils ähnliche Salze oder Säuren bildeten. Erst kamen die Alkalimetalle wie Lithium, Natrium und Kalium, später die Kohlenstoff-, Stickstoff- und Sauerstoffgruppe und schließlich die Halogene mit Fluor, Chlor und Iod. Von einer Familie zur nächsten stieg die so genannte Wertigkeit, die Anzahl möglicher Bindungen eines Elements, zunächst an und nahm dann wieder ab.

Den ersten Entwurf einer Systematik, die dem heutigen Periodensystem ähnelte, skizzierte Mendelejew am 17. Februar 1869 (dem 1. März nach julianischem Kalender). Die Tabelle mit 19 Zeilen und sechs Spalten erschien in Deutschland im Frühjahr 1869 in der »Zeitschrift für Chemie«. Von oben nach unten hatte der Russe die Elemente in der Reihenfolge

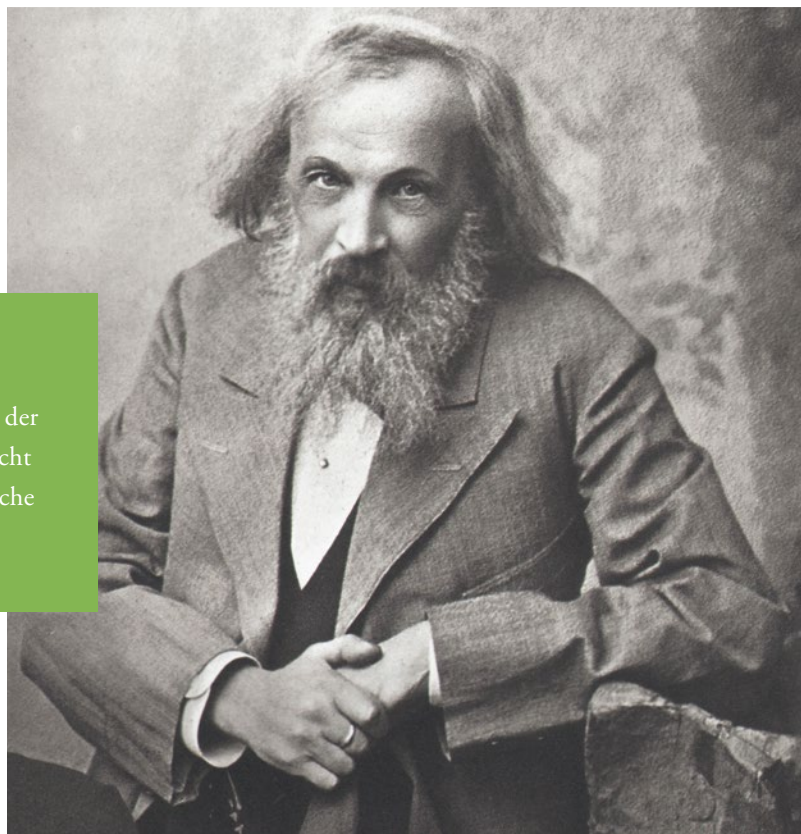
ihres Atomgewichts, heute sprechen wir von Atommassen, angeordnet. Die zweite Spalte etwa lautete: »Be, B, C, N, O, F, Na« – die Elemente von Beryllium bis Natrium, heute praktisch die zweite Periode des Periodensystems. Zudem waren sieben der später Hauptgruppen genannten Familien von Elementen schon zu erkennen. Jede hatte im Zentrum der Tabelle eine eigene Zeile.

## 118 MITGLIEDER

Diese Ordnung der chemischen Grundbausteine haben Wissenschaftler bis heute beträchtlich erweitert; das Periodensystem enthält inzwischen 118 Elemente, 90 natürlich vorkommende sowie 28 künstlich erzeugte – und ist doch noch immer zu erkennen. »Mendelejews Tafel war beständig genug, um sich der Kernladungszahl, den Isotopen, Edelgasen, seltenen Erden, Actiniden und der Quantenmechanik anzupassen«, schreiben die Autoren um Marco Fontani von der Universität Florenz in dem Buch »The Lost Elements«.

## DMITRI MENDELEJEW

Der St. Petersburger Chemieprofessor erkannte als einer der Ersten: Wenn man die Elemente nach ihrem Atomgewicht sortiert, wiederholen sich regelmäßig bestimmte chemische Eigenschaften – das Prinzip der Hauptgruppen.



AKG IMAGES / BLANC KUNSTVERLAG

Die Edelgase zum Beispiel wurden erst in den 1890er Jahren entdeckt. Den Zusammenhang zwischen dem Aufbau eines Atoms und der Position der Elemente im Periodensystem enthüllte die Quantenphysik ab 1911.

Womöglich besaßen Mendelejew und seine Zeitgenossen gerade die richtige Dosis Wissen. Einerseits hatte zu Beginn der 1860er Jahre der Chemiker-Kongress in Karlsruhe die Bestimmung der Atomgewichte weitgehend vereinheitlicht. Ohne diese Basis wäre Mendelejews Arbeit aussichtslos gewesen. Andererseits war ihm die Komplexität der Aufgabe nicht bewusst.

Vermutlich hätte es Mendelejew zum Beispiel erhebliche Schwierigkeiten bereitet, wenn er schon alle so genannten seltenen Erden hätte einordnen müssen. Diese 17 Elemente unterscheiden sich nämlich kaum in ihren Atommassen. Auch in ihren Eigenschaften findet man viele Ähnlichkeiten. »1869 kennt Mendelejew erst fünf, die ihm bereits Kopferbrechen bereiten«, schreibt die

Historikerin Bernadette Bensaude-Vincent von der Universität Sorbonne in Paris. Man könne »annehmen, dass die Periodentafel nur deshalb schon kurz nach dem Karlsruher Kongress konstruiert werden konnte, weil noch nicht alle seltenen Erden bekannt waren«.

Mendelejews Erfolg gründete auf jahrzehntelanger Vorarbeit vieler Kollegen. So berichtete 1816 Johann Wolfgang Döbereiner an der Universität Jena von Dreiergruppen chemisch ähnlicher Elemente wie den Erdalkalimetallen Calcium, Strontium und Barium. Diese wurden später Triaden genannt. Bei ihnen entsprach die Atommasse des mittleren Elements dem Mittelwert des leichtesten und des schwersten.

1864 erstellte der deutsche Chemiker Lothar Meyer (1830–1895) für sein Lehrbuch eine Tabelle, die 27 Elemente in sechs Spalten nach Atommasse und Wertigkeit kategorisierte. Heute wissen wir, dass das gerade sechs der acht Hauptgruppen waren. Es fehlten die Edelgase und die Borgruppe. Mit der Einordnung vieler Metalle hatte Meyer jedoch Schwierigkeiten und sortierte sie in weiteren Tabellen. Insgesamt konnte er so 50 Elemente unterbringen. Er führte die Differenzen der Atommassen explizit auf, sprach aber nicht von einer Periodizität, sondern von »Relationen für sechs als zusammengehörig wohl charakterisierte Gruppen von Elementen«. Und doch drückte sich »Periodizität durch die

Regelmäßigkeit der Atomgewichtsabstände aus«, schreibt der Münchner Historiker Ralph Cahn. Er hält es für »äußerst fragwürdig«, in dieser Tabelle noch kein Periodensystem zu sehen.

### WOHIN MIT DEN METALLEN?

Auch John Alexander Reina Newlands wurde erst sehr spät Ruhm zuteil, obwohl der Engländer bereits 1864 sein »Gesetz der Oktaven« formulierte. Er hatte festgestellt, dass die Eigenschaften der Elemente – zumindest bei den leichteren – wie die Töne der Tonleiter beim jeweils achten sehr ähnlich sind.

Die grundsätzliche Schwierigkeit bei dem Versuch, eine Ordnung zu finden, lag indes nicht bei den leichten, sondern bei den schwereren Elementen. Nach zwei Perioden mit je sieben Stoffen musste vom Alkalimetall Kalium zum Halogen Brom ein Bogen geschlagen werden, unter den 14 damals bekannte Stoffe passten. Neun davon waren die Metalle von Titan über Eisen bis zu Zink. Mendelejew erkannte, dass hier drei Elemente noch zu entdecken waren. 1871 veröffentlichte er einen fast 100 Seiten langen Aufsatz in den »Annalen der Chemie und Pharmacie«, in dem er von einer kleinen Periode mit sieben Elementen und einer großen mit 17 sprach. Wieso es gerade diese, nach Entdeckung der Edelgase um eins ergänzten Zahlen sind, konnte erst die Quantenphysik erklären.

Zwischen Dmitri Mendelejew und Lothar Meyer gab es in den Jahren ab 1870 mehrmals Auseinandersetzungen über die Priorität bei der Aufstellung des Periodensystems. Es ging dabei um viele

Details, etwa die Frage, wo es Brüche und Verschiebungen in der Anordnung der Elemente nach aufsteigender Atommasse gab. Besonders plakativ war aber der Zwist um die Frage, wer zuerst von »Periodizität« gesprochen hatte.

Tatsächlich hatte Mendelejew früher als Lothar Meyer den Hinweis notiert, dass es eine periodische Abhängigkeit der Eigenschaften der Elemente von der Atommasse gebe. In seinem ersten zu dieser Frage in Deutschland publizierten Artikel von 1869 gab es jedoch einen Übersetzungsfehler: statt »periodisch« wie in der russischen Vorlage stand dort »stufenweise«.

Lothar Meyer hingegen brachte die Periodizität sehr deutlich in einem Beitrag zur Sprache, den er 1870 in den »Annalen der Chemie und Pharmacie« veröffentlichte. Er erweiterte das Konzept dort mit einer grafischen Darstellung der Atomvolumina, die ebenfalls periodisch mit der Atommasse steigen und wieder fallen. Dieser Aufsatz enthält zudem eine Tabelle

der Elemente, in der Meyer auch schon eine Lösung für die Metalle von Titan bis Zink anbot. Er brachte sie in einer eigenen Spalte unter, versetzte sie aber gegenüber den Elementen der Hauptgruppen um eine Druckzeile nach unten, um einen noch nicht verstandenen Unterschied zu verdeutlichen.

Mendelejew erkannte 1869 wiederum als Erster, dass die Periode der leichtesten Elemente nicht wie in der ersten Fassung von Beryllium bis Natrium, sondern von Lithium bis Fluor reichte (Helium kannten die Chemiker noch nicht und Wasserstoff hatte bereits eine Sonderstellung). Die Quantenphysik zeigte später, dass es sich dabei nicht nur um eine kosmetische Veränderung handelte, sondern sich tatsächlich so verhält.

1869 und 1870 haben daher erst Mendelejew und dann Meyer das Wissen um die Ordnung der Elemente fundamental erweitert, der Deutsche konnte jedoch auf seine Tabelle aus dem Jahr von 1864 verweisen – das war die Vorausset-

AUS MENDELEJEFF: DIE PERIODISCHE GESETZMÄSSIGKEIT DER ELEMENTE. IN: ANNALEN DER CHEMIE UND PHARMACIE. VIII. SUPPLEMENTBAND 1871, S. 133–229

**Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente.** Von D. Mendelejeff. — Ordnet man Elemente nach zunehmenden Atomgewichten in verticale Reihen so, dass die Horizontalreihen analoge Elemente enthalten, wieder nach zunehmendem Atomgewicht geordnet, so erhält man folgende Zusammenstellung, aus der sich etnige allgemeinere Folgerungen ableiten lassen.

|  |  |            |           |            |            |
|--|--|------------|-----------|------------|------------|
|  |  |            | Ti = 50   | Zr = 90    | Y = 180    |
|  |  |            | V = 51    | Nb = 94    | Ta = 182   |
|  |  |            | Cr = 52   | Mo = 96    | W = 186    |
|  |  |            | Mn = 55   | Rh = 104,4 | Pt = 197,4 |
|  |  |            | Fe = 56   | Ru = 104,4 | Ir = 198   |
|  |  | Ni = 59    | Co = 59   | Pd = 106,6 | Os = 199   |
|  |  |            | Cu = 63,4 | Ag = 108   | Hg = 200   |
|  |  |            | Zn = 65,2 | Cd = 112   |            |
|  |  |            | ? = 68    | Ur = 116   | Au = 197?  |
|  |  |            | ? = 70    | Su = 118   |            |
|  |  |            | As = 76   | Sb = 122   | Bi = 210?  |
|  |  |            | Se = 79,4 | Te = 128?  |            |
|  |  |            | Br = 80   | J = 127    |            |
|  |  |            | K = 39    | Rb = 85,4  | Cs = 133   |
|  |  |            | Ca = 40   | Sr = 87,6  | Ba = 137   |
|  |  |            | ? = 45    | Ce = 92    |            |
|  |  | ?Er = 56   | La = 94   |            | Tl = 204   |
|  |  | ?Yt = 60   | Di = 96   |            | Pb = 207   |
|  |  | ?In = 75,6 | Th = 118? |            |            |

DIESE TABELLE GILT ALS PROTOTYP DES PERIODENSYSTEMS. SIE ERSCHIEN IN DEUTSCHLAND 1869 IN DER »ZEITSCHRIFT FÜR CHEMIE«.

Die nach der Größe des Atomgewichts geordneten Elemente zeigen teilweise Abänderung in den Eigenschaften. Chemisch-analoge Elemente haben entweder übereinstimmende Atomgewichte (Pt, Ir, Os), oder letztere nehmen gleichviel zu (K, Rb, Cs). Das Anordnen nach den Atomgewichten entspricht der Wertigkeit der Elemente und bis zu einem gewissen Grade der Verschiedenheit im Verhalten, z. B. Li, Be, B, C, N, O, F.

4. Die in der Natur verbreitetsten Elemente haben kleine Atomgewichte und alle solche Elemente zeichnen sich durch Schärfe des Verhaltens aus. Es sind also typische Elemente und mit Recht wird daher das leichteste Element H als typischer Massstab gewählt.

5. Die Größe des Atomgewichts bedingt die Eigenschaften des Elementes, weshalb beim Studium von Verbindungen nicht nur auf Anzahl



zung für einen langen Streit, der 1880 zum letzten Mal aufflammte. Er wurde erst 1882 mit der Verleihung der britischen Davy-Medaille, der damals höchsten Ehre ihres Fachs, an beide Chemiker beruhigt. Doch auch heute noch gilt meistens nur der Russe als »Vater des Periodensystems«.

Tatsächlich sprechen Mendelejews detaillierte Vorhersagen unbekannter Elemente dafür, seine Leistung höher zu bewerten. Anhand seines Periodengesetzes beschrieb er nicht nur ihre vermutliche Atommasse, sondern beispielsweise auch ihre Salze sowie die Dichte und den Siedepunkt von Verbindungen. Er gab den fehlenden Elementen sogar Namen, zum Beispiel denen, die auf Bor, Aluminium und Silizium folgen sollten: Eka-Bor, Eka-Aluminium oder Eka-Silizium. Eka ist Sanskrit und bedeutet einfach eins. Die Elemente wurden bald gefunden und von ihren Entdeckern Scandium, Gallium und Germanium getauft.

Diese Entdeckungen trugen zum Erfolg des Periodensystems sehr deutlich bei. Manche Historiker meinen, dass gerade die Eignung des Modells zur Vorhersage dessen Rezeption beförderte. Andere sind in ihrem Urteil zurückhaltender. Ralph Cahn sagt: »Mendelejews Vorhersagen sind nirgendwo mathematische Herleitungen, sondern dort, wo er am meisten bewundert wird, eine Mischung aus Extrapolation, Interpolation und vorsichtiger Spekulation.« Eric Scerri von der University of California in Los Angeles ergänzt: »Mendelejew hat 18 Elemente vorhergesagt, von denen nur neun gefunden wurden.« Zu den Fehlprognosen gehören etwa Coronium und Newtonium, die beide leichter sein sollten als Wasserstoff.

Für die Anordnung der Elemente gab und gibt es viele Möglichkeiten. In vielen Lehrbüchern hat sich die auf Seite 4/5 gezeigte zweidimensionale, tabellenartige Darstellung durchgesetzt. Es existieren aber auch Trichter, Pyramiden, Achten, Spiralen oder Sonnen. Bis heute diskutiert die Fachwelt darüber, welche Dar-

stellung am besten geeignet sei. Als man die Edelgase entdeckte, wurden sie zunächst als Gruppe null klassifiziert, weil Mendelejew ein Dutzend Metalle, die nicht in die erste bis siebte Hauptgruppe passten, einer achten zugeordnet hatte – erst später erkannte man Helium, Neon und Co die achte Hauptgruppe zu.


#### ENTDECKUNG DER ATOMORBITALE

Der Erste, der die tabellenartige Darstellung um viele Spalten erweiterte, war 1905 der Schweizer Chemiker Alfred Werner. Sein Langperiodensystem hatte 32 Spalten, genauso viele, wie es Elemente gibt in der sechsten Periode, die mit Cäsium beginnt und mit Radon endet. In der ersten von insgesamt sieben Zeilen gab es nun zwei Einträge, danach je zweimal acht, 18 und 32.

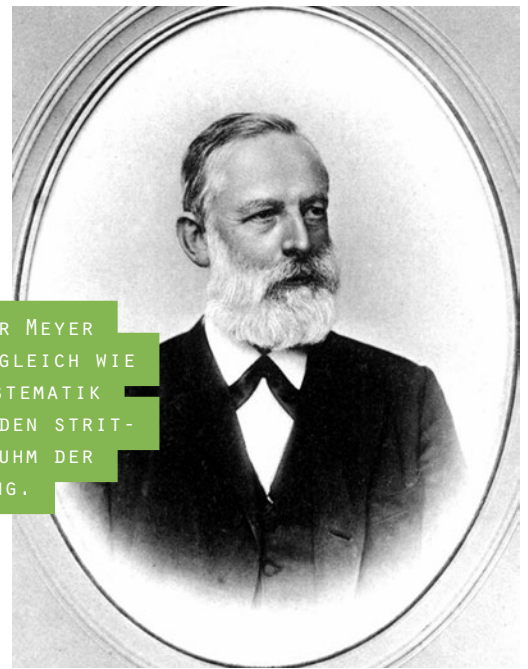
Diese Zahlenwerte – 2, 8, 18, 32 – konnten im Lauf der Zeit die Physik und die Quantenmechanik erklären. Zunächst zeigten Untersuchungen, dass die Reihenfolge der Elemente nicht von der Atommasse, sondern von der Kernladungszahl bestimmt wird. Diese entspricht der Anzahl der positiven Protonen sowie der negativen Elektronen im Atom, heute spricht man von der Ordnungszahl. Ein weiterer Meilenstein war die Erkenntnis, dass die Elektronen in der Nähe des positiv geladenen Atomkerns bestimmte Aufenthaltsräume haben, so genannte

Orbitale. Diese gleichen Kugeln oder Keulen und nehmen je nach Form und Nähe zum Kern maximal zwei, sechs, zehn oder 14 Elektronen auf. Addiert man ihre maximale Belegung, ergibt sich die Zahlenfolge 2, 8, 18, 32.

Von all dem konnte Mendelejew nichts ahnen. Er hätte die Erklärung damals vermutlich abgelehnt, auch den radioaktiven Zerfall betrachtete er höchst kritisch. Der russische Chemiker hatte stets die Individualität und Stabilität der Elemente betont, und nun sollte es welche geben, die zerplatzten und sich in andere wandelten! Stattdessen hing er Bernadette Bensaude-Vincent zufolge der Theorie an, dass die großen »Atom-Planeten« wie Uran auf mechanische Weise »Kometen« aussendeten.

Mendelejew sah sich am Ende selbst als eine Art neuer Isaac Newton und trat mit diesem Anspruch sogar vor die Royal Society, wie der Historiker Michael Gordin von der Princeton University schreibt. Der Russe wollte auf der Basis seines rein empirisch erklärten Periodensystems Chemie und Physik vereinen. In einer gewissen Weise ist das auch gelungen, denn beide Wissenschaften nutzen das Periodensystem, das durch die Physik des 20. Jahrhunderts sein theoretisches Fundament erhielt und Platz hat für die im 20. und 21. Jahrhundert entdeckten und eventuell noch zu entdeckenden Elemente. 

DER DEUTSCHE LOTHAR MEYER ENTWICKELTE FAST ZEITGLEICH WIE MENDELEJEV EINE SYSTEMATIK DER ELEMENTE. DIE BEIDEN STRITTEN LANGE UM DEN RUHM DER ERSTENTDECKUNG.



DER CARINANEBEL: EIN GEBURTSORT DER STERNE. NACH DEM URKNALL GAB ES IM ALL ZUNÄCHST NUR WASSERSTOFF, HELIUM UND LITHIUM. NACHDEM SICH DIE STERNE GEBILDET HATTEN, ENTSTANDEN DURCH DIE FUSION VON ATOMEN IM INNEREN DER STERNE WEITERE, LEICHTE ELEMENTE. FÜR DIE SCHWEREN BEDURFTE ES EINER SUPERNOVA.

# DIE GEBURT DER ELEMENTE

DAS UNIVERSUM BEHERBERGT EINE VIELZAHL CHEMISCHER GRUNDBAUSTEINE. LANGE BESTAND DER KOSMOS JEDOCH NUR AUS EINER HAND VOLL LEICHTER ELEMENTE. DIE SCHWEREN ERSCHUFEN VERGLÜHENDE STERNE.

**A**ller Anfang ist schwer. Nicht so bei der Geschichte der chemischen Elemente. Da fing es ziemlich leicht an: Wasserstoff, Helium, dazu ein Schuss Lithium – die drei leichtesten Vertreter des Periodensystems bildeten die Zutaten des Universums, das vor knapp 14 Milliarden Jahren seinen Ursprung nahm. Erst viel später entwickelten sich schwerere Elemente und eine chemische Vielfalt, die unter anderem die Basis für das Leben auf der Erde schuf.

In einem anderen Sinne war der Kosmos am Anfang jedoch durchaus »schwer«. Gemäß der Urknalltheorie, der bislang plausibelsten Erklärung für die Entstehung des Universums, war alle Materie zunächst in einem winzigen Punkt konzentriert. Dieser Zustand, den Forscher Singularität nennen, ist derart aberwitzig, dass diesbezüglich nicht nur die menschliche Vorstellungskraft versagt, sondern auch die Physik an ihre Grenzen stößt. Dennoch halten es die meisten Experten für äußerst wahrscheinlich, dass Raum, Zeit und Materie tatsächlich mit einem »Big Bang« entstanden sind. Für die Hypothese spricht, dass die weitere Evolution des Universums damit relativ

plausibel erklärt werden kann – auch die der chemischen Elemente.

Das kosmische Spektakel hatte also offenbar einen fulminanten Auftakt. Direkt im Anschluss breitete sich die extrem heiße Ursuppe in einem absurden Tempo im All aus. Schon nach dem Bruchteil einer Sekunde war das Universum so weit abgekühlt – die Temperatur lag immer noch bei unglaublichen 1800 Milliarden Grad –, dass sich die elementaren Bausteine von Materie, die Quarks, zu Protonen und Neutronen zusammenfügen konnten. Damit waren gleichzeitig die ersten Atomkerne geboren: Der Kern des leichtesten Elements Wasserstoff besteht aus einem einzigen Proton. Nur einige Sekunden später begannen sich je ein Proton und ein Neutron zu vereinen und schwere Wasserstoffkerne zu bilden, so genannte Deuteronen. Diese wiederum verschmolzen jeweils mit einem weiteren Proton und einem Neutron zu Atomkernen des zweitleichtesten Elements im Universum: Helium.

Das Massenverhältnis in dem noch jungen Kosmos lag wohl bei rund 75 Prozent Wasserstoffkernen zu 25 Prozent Heliumkernen – mit einer winzigen Prise

Lithium. Kosmologen vermuten: Dieser erste Akt der Elemententstehung war nach maximal 20 Minuten vorbei. Die Ursuppe hatte sich inzwischen so weit abgekühlt und verteilt, dass Temperatur und Dichte nicht mehr für weitere Kernfusionsprozesse ausreichten. Man nennt diese Phase, in der das Universum selbst gewissermaßen als riesiges Fusionskraftwerk agierte, die primordiale Nukleosynthese, also die ursprüngliche Bildung von Atomkernen. Sie gilt als eines der wichtigsten Elemente des kosmologischen Standardmodells, das die Entwicklungsgeschichte des Universums beschreibt.

Obwohl die primordiale Nukleosynthese nur drei Sorten Atomkerne hervorgebracht hatte, war innerhalb weniger Minuten bereits die größte Masse der Elemente entstanden: Noch heute bestehen rund 98 Prozent der herkömmlichen Materie des Universums aus Wasserstoff und Helium. Bis die weiteren 88 Elemente hinzukamen, welche die übrigen zwei Prozent ausmachen, sollte noch einige Zeit vergehen.

Dazu mussten erst die »Stars« der Szene auf die kosmische Bühne treten: die

Sterne. Die ersten bildeten sich vermutlich rund 100 bis 400 Millionen Jahre nach dem Urknall aus dichten Gaswolken, die auf Grund der Gravitationskräfte kollabierten. Bei einem solchen Kollaps verdichtet sich die zunächst diffus verteilte Materie um ein Vielfaches, so genannte prästellare Kerne entstehen. Dieser Sternenvorläufer sammelt weitere Materie an und wird zu einem Protostern, der schließlich zu einem echten Stern heranwächst. In dessen Innerem herrschen nun ein enorm hoher Druck und große Hitze – Bedingungen, unter denen Wasserstoff zu Helium fusioniert. Auf dieser so genannten stellaren Nukleosynthese basiert die riesige Menge an Energie, die Sterne freisetzen und die ihnen ihre Strahlkraft verleiht. Irgendwann geht einem Stern der Brennstoff aus, so dass er den Druck im Inneren nicht mehr aufrechterhalten kann und sich auf Grund der eigenen Schwerkraft zusammenzieht. Die Verdichtung und gleichzeitige Erhitzung setzt weitere Fusionsprozesse in Gang. Leichte Atomkerne können nun schrittweise zu schwereren verschmelzen und bringen so neue Elemente hervor. Dabei gilt: je größer der Druck und je höher die Temperatur, desto schwerer die Elemente.

Der zweite Akt der kosmischen Elemententstehung, die stellare Nukleosynthese, dauert bis heute an. Dabei entstehen unter anderem die für das

Leben auf der Erde essenziellen Elemente Kohlenstoff und Sauerstoff; aber auch Metalle, die etwa in der fertigen Industrie eine wichtige Rolle spielen, wie Aluminium und Eisen.

#### WENN STERNE STERBEN

Alle Elemente, die schwerer sind als Eisen (26 Protonen) – darunter die Edelmetalle Silber, Gold und Platin oder das schwerste bekannte, natürlich vorkommende Element Uran (92 Protonen) –, werden allerdings auf eine andere Art und Weise erzeugt. Denn Atomkerne verschmelzen nur dann, wenn die dafür nötige Menge an Energie kleiner ist als die, die bei der Fusion frei wird. Das ist nur bis zum Element Eisen der Fall. Irgendwann kommen die Fusionsprozesse in einem Stern deshalb zum Erliegen; er erlischt und zieht sich unter seiner eigenen Schwerkraft immer mehr zusammen. Sein weiteres Schicksal hängt nun von seiner ursprünglichen Masse ab.

Sterne in der Größenordnung unserer Sonne enden als schwach leuchtende Weiße Zwerge, die sich langsam abkühlen, mitunter über mehrere Milliarden Jahre. Schwere Sterne ab zirka acht Sonnenmassen kollabieren an ihrem Lebensende sehr schnell, so dass die Temperatur im Inneren nochmals stark ansteigt. Schließlich kommt es zu einer gewaltigen Explosion: einer Supernova, bei der ein Großteil der Masse des Sterns

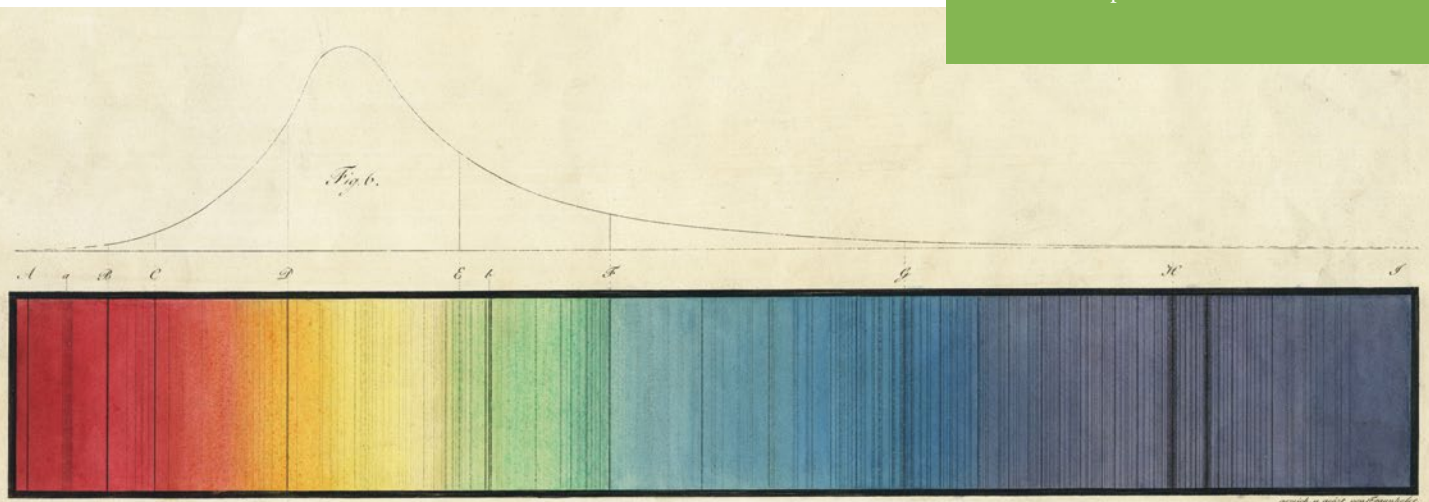
in den interstellaren Raum geschleudert wird. Wissenschaftler vermuten, dass sich bei diesem »finale furioso« auch Elemente mit einer höheren Protonenzahl als Eisen bilden.

Generell entstehen solche schweren Elemente durch das Einfangen von Neutronen. Man unterscheidet dabei zwischen dem schnellen r-Prozess und dem langsamen s-Prozess (»r« und »s« stehen für »rapid« und »slow«). Die langsame Variante läuft in Roten Riesensternen ab, die sich in einem späten Entwicklungsstadium befinden. Astronomen sprechen von Sternen des so genannten Asymptotic Giant Branch (AGB).

In AGB-Sternen ist die Dichte freier Neutronen gering, so dass Atomkerne

#### DAS FRAUNHOFER SPEKTRUM

Die so genannten Fraunhoferlinien sind Absorptionslinien im Spektrum der Sonne – verursacht durch Elemente in der Hülle, die das Licht bestimmter Wellenlängen absorbieren. Mit Hilfe von Spektralanalyse können Astronomen Rückschlüsse ziehen auf die chemische Zusammensetzung von Sternen, da jedes Element ein bestimmtes Muster an Absorptionslinien hervorruft.



jeweils ein einzelnes Neutron einfangen können. Auf diese Weise entsteht ein schwereres Isotop des Elements. Ist der Kern instabil, folgt ein Betazerfall, bei dem sich ein Neutron unter Abgabe eines Elektrons zu einem Proton verwandelt: Das nächst schwerere Element entsteht. Da für den Zerfall genügend Zeit bleibt, bevor ein weiteres Neutron eingefangen wird, spricht man vom langsamen Prozess. Experten schätzen, dass rund die Hälfte aller Elemente, die eine höhere Ordnungszahl als Eisen aufweisen, so geboren werden.

#### VERRÄTERISCHE HÜLLE

Bei der schnellen Variante hingegen fängt ein eben geborener Atomkern umgehend etliche Neutronen ein, bevor es zum Betazerfall kommen kann. Meist sind die daraus resultierenden schweren Zwischenprodukte instabil und bilden anschließend durch mehrere radioaktive Zerfälle stabile, neutronenreiche Kerne. Voraussetzung für einen r-Prozess sind wesentlich höhere Temperaturen und Neutronenflüsse als in den AGB-Sternen. Die notwendigen Bedingungen herrschen vermutlich nur in verschmelzenden Neutronensternen und bei einer speziellen Klasse von Supernovae. Um den genauen Ablauf solcher Reaktionen fernab der Kernstabilität zu klären, erzeugen Forscher neutronenreiche Atomkerne mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern.

Um mehr über die Elemente im Universum zu erfahren, liegt es nahe, deren Geburtsorte genauer zu betrachten. Mit großem technischen Aufwand nehmen Astronomen daher die Sterne unter die Lupe. Wenn man so will, handeln sie dabei ziemlich oberflächlich, interessieren sie sich doch vor allem für das Äußere der Sterne. Denn die Hülle spiegelt im Wesentlichen die chemische Komposition der Gaswolke wieder, aus der ein Stern einst hervorgegangen ist, und lässt Rückschlüsse zu auf die Entwicklungsgeschichte der Elemente.

Astronomen untersuchen die so genannten Absorptions- und Emissions-

linien eines Sterns. Erstere sind dunkle Linien im Lichtspektrum des Sterns, die auftreten, weil Elemente in der Hülle das Licht bestimmter Wellenlängen absorbieren. Die hellen Emissionslinien gehen auf Elemente zurück, die durch das Licht des Sterns angeregt werden und ihrerseits Licht aussenden. Da jedes Element ein ganz bestimmtes Muster an Absorptions- und Emissionslinien hervorruft, lässt sich die Zusammensetzung der Hülle mittels Spektralanalyse relativ präzise rekonstruieren.

So findet man etwa in der äußeren Schale der Sonne neben den Hauptbestandteilen Wasserstoff und Helium auch Hinweise auf schwerere Elemente, wie Calcium, Eisen, Nickel und Titan. Die entsprechenden Absorptionslinien sind nach ihrem Entdecker Joseph von Fraunhofer benannt, der sie bereits Anfang des 19. Jahrhunderts bemerkte, damals allerdings nicht deuten konnte. Erst Jahrzehnte später deckten Robert Bunsen und Gustav Kirchhoff das zu Grunde liegende Prinzip auf und entwickelten daraus die Spektralanalyse, die rasch zu einem der wichtigsten Werkzeuge von Astronomen wurde.

Vor allem spektroskopische Untersuchungen von leichten Sternen verraten etwas über die Zusammensetzung des jungen Universums. Denn die Lebensdauer eines Sterns nimmt ungefähr mit der dritten Potenz seiner Masse ab. Oder anders ausgedrückt: Übergewicht verringert die Lebenserwartung von Himmelskörpern. Ursache ist, dass in schweren Sternen höhere Drücke und Temperaturen herrschen, wodurch ihr Brennstoff, der Wasserstoff, schneller zur Neige geht. Schwere Exemplare bringen es daher nur auf einige Millionen Jahre, während Leichtgewichte, besonders solche, die leichter als unsere Sonne sind, etliche Milliarden Jahre alt werden können. In unserer Galaxis fahnden Astronomen daher nach schlanken Sternen der ersten Generation, aus der Frühzeit des Alls. Allerdings ist unklar, ob diese tatsächlich existieren. Denn laut den Modellen von Kosmologen bildeten sich

im frühen Universum vorrangig Sterne mit großer Masse.

#### DIE HÄUFIGSTEN AUF ERDEN: EISEN, SAUERSTOFF, SILIZIUM

In diesen Sternen herrschten Drücke und Temperaturen, die ausreichend hoch waren, um Elemente bis hin zu Eisen zu erzeugen, so die gängige Meinung. Das Feuerwerk am Ende ihres Lebens verteilte die Elemente dann im interstellaren Raum. Sterne der zweiten Generation, die sich aus der Asche ihrer Vorgänger bildeten, müssen folglich bereits Spuren von Eisen in ihrer äußeren Hülle aufweisen. Und tatsächlich haben Astronomen solche Sterne anhand der Absorptionslinien von Eisen identifiziert. Diese und weitere Erkenntnisse aus spektroskopischen Analysen sehr alter Sterne stützen auch die Theorie der stellaren Nukleosynthese.

Durch die anhaltende stellare Nukleosynthese reicherte sich der Kosmos sukzessive mit schweren Elementen an. Erst dadurch konnten sich irgendwann Planeten wie die Erde bilden. Sie entstand zeitgleich mit der Sonne vor rund 4,6 Milliarden Jahren. Der exakte Ablauf ist unklar, aber Astrophysiker vermuten, dass um einen Protostern herum zunächst calcium- und aluminiumreiche Silikate kondensierten. Aus dem Staub formten sich Brocken von wenigen Metern Größe. Einer davon sammelte nach und nach immer mehr Materie an: Die Erde wurde geboren. Während die schwersten Elemente, vor allem Eisen, zum Erdmittelpunkt sanken, stiegen leichtere wie Sauerstoff, Silizium und Aluminium nach oben. Aus ihnen entstanden Minerale, die das Gestein der Erdkruste ausmachen. Im Gegensatz zum Weltall und den Sternen, wo Wasserstoff und Helium dominieren, sind Sauerstoff, Eisen und Silizium die häufigsten Vertreter auf unserem Planeten. Diese und zahlreiche weitere Elemente haben ein immenses Spektrum an organischer wie anorganischer Materie auf der Erde hervorgebracht. Ihren Ursprung hat die chemische Vielfalt in den Sternen. ☺

# BAUSTEINE DES LEBENS

ALLE ORGANISMEN BESTEHEN IM WESENTLICHEN AUS DEN ELEMENTEN KOHLENSTOFF, WASSERSTOFF, SAUERSTOFF UND STICKSTOFF. ZUDEM ÜBERNEHMEN PHOSPHOR, SCHWEFEL SOWIE ALKALI- UND ERDALKALIMETALLE WICHTIGE FUNKTIONEN BEI BIOCHEMISCHEN PROZESSEN.

Lebewesen gehören zu den komplexesten Materieformen, die uns bekannt sind. Früher wählte man die »vis vitalis«, eine mysteriöse »Lebenskraft«, am Werk. Heute wissen wir, dass der Aufbau von Organismen auf den Gesetzen der Physik und Chemie beruht und sich Biomoleküle aus anorganischen Vorstufen zusammensetzen lassen. Dabei hat das Leben eine deutliche Vorliebe für die leichteren, häufigeren Elemente des Periodensystems.

Die sechs häufigsten Elemente in Biomolekülen sind Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O), Stickstoff (N), Phosphor (P) und Schwefel (S). Allein auf die ersten vier entfallen 99 Prozent der Biomasse der Erde mit den Proteinen und Nukleinsäuren als wichtigsten Biomolekülen. Desoxyribonukleinsäure, kurz DNS oder DNA (englisch: Deoxyribonucleic acid), speichert Informationen, zum Beispiel die Baupläne für Proteine. Letztere übernehmen die operativen Aufgaben in der Zelle wie Stoffwechsel und Signalweitergabe.

Im Zentrum aller Biomoleküle steht Kohlenstoff, der vier Bindungsstellen besitzt und damit vielfältige Verbindungen aufbauen kann, von kleinen

Molekülen wie Methan bis zu großen Polymeren wie komplexen Zuckern. Auch Silizium besitzt vier Bindungsstellen. Allerdings ist hier die Bindung zu Sauerstoff so stabil, dass andere Verbindungen, etwa die zwischen zwei Siliziumatomen, nicht zu Stande kommen. Obwohl lediglich Sauerstoff häufiger in der Erdhülle vorkommt, findet man Silizium in Organismen deshalb nur selten. Bei Kohlenstoff ist das anders, denn hier sind die Bindungsenergien von C-O- und C-C-Verbindungen ähnlich hoch. Auf diese Weise konnte die Evolution Biomoleküle hervorbringen, die auf C-C-Bindungen basieren.

Nukleinsäuren bestehen ausschließlich aus C, H, O, N und P, in Form eines Zuckerbausteins, Phosphat und Nukleobasen, deren charakteristische Abfolge das Alphabet des Lebens darstellt. In Proteinen, den Werkzeugen der Zelle, sind Aminosäuren, die vor allem die Elemente C, H, O und N enthalten, zu Ketten verknüpft. In den Aminosäuren Cystein und Methionin kommt außerdem Schwefel vor, ebenso wie in den B-Vitaminen Biotin und Thiamin. Fette und Kohlenhydrate setzen sich lediglich aus C, H und O zusammen,

Phospholipide enthalten zusätzlich Phosphor.

Am einfachsten lässt sich die Häufigkeit bestimmter Elemente in Organismen mit ihrer Verfügbarkeit am Anfang der Entwicklung des Lebens erklären. So ist die Ionenzusammensetzung des Zellsaftes der des Meerwassers auffallend ähnlich – ein starkes Indiz dafür, dass die ersten primitiven Organismen im Meer entstanden. Seltene Elemente wie Gold oder Platin standen dem Leben nicht zur Verfügung und wurden wahrscheinlich aus diesem Grund nicht in Biomolekülen verbaut. Da chemische Reaktionen, die an der Synthese und dem Abbau organischer Verbindungen beteiligt sind, kontrolliert ablaufen müssen, kommen auch besonders reaktive oder instabile, sprich radioaktive Elemente, nicht in Frage. Ebenso ungeeignet scheinen die sehr reaktionsträgen Edelgase oder Edelmetalle, die nur schwer Verbindungen mit anderen Elementen eingehen. Da sich das Leben in flüssigem Wasser entwickelt hat, bestehen auch heutige Zellen immer noch zu einem Großteil daraus. Wasser ist ein gutes Lösungsmittel für viele organische und anorganische Verbindungen und setzt sich zusammen



DIE DNA VERSCHLÜSSELT ERBINFORMATION UND IST EIN ZENTRALES MOLEKÜL ALLER ORGANISMEN. DAS GERÜST DER DOPPELHELIX BESTEHT AUS ZUCKER UND PHOSPHAT. DIE QUERVERSTREBUNGEN BILDEN NUKLEINBASEN MIT HILFE VON WASSERSTOFFBRÜCKEN.

aus den Elementen Wasserstoff und Sauerstoff, die schon allein deshalb zu den häufigsten in Lebewesen gehören.

Wasserstoff spielt für universelle Vorgänge zur Energiegewinnung eine herausragende Rolle. Einerlei ob Pflanze, Bakterium, Pilz oder Tier, sie alle erzeugen Protonengradienten über eine Membran, indem sie  $H^+$ -Ionen aus dem Zellinneren über die Membran nach außen pumpen. Der Protonengradient treibt dann die Synthese des Energiespeichers Adenosintriphosphat (ATP) an, der übrigens auch aus fünf der »großen Sechs« besteht: C, H, O, N und P.

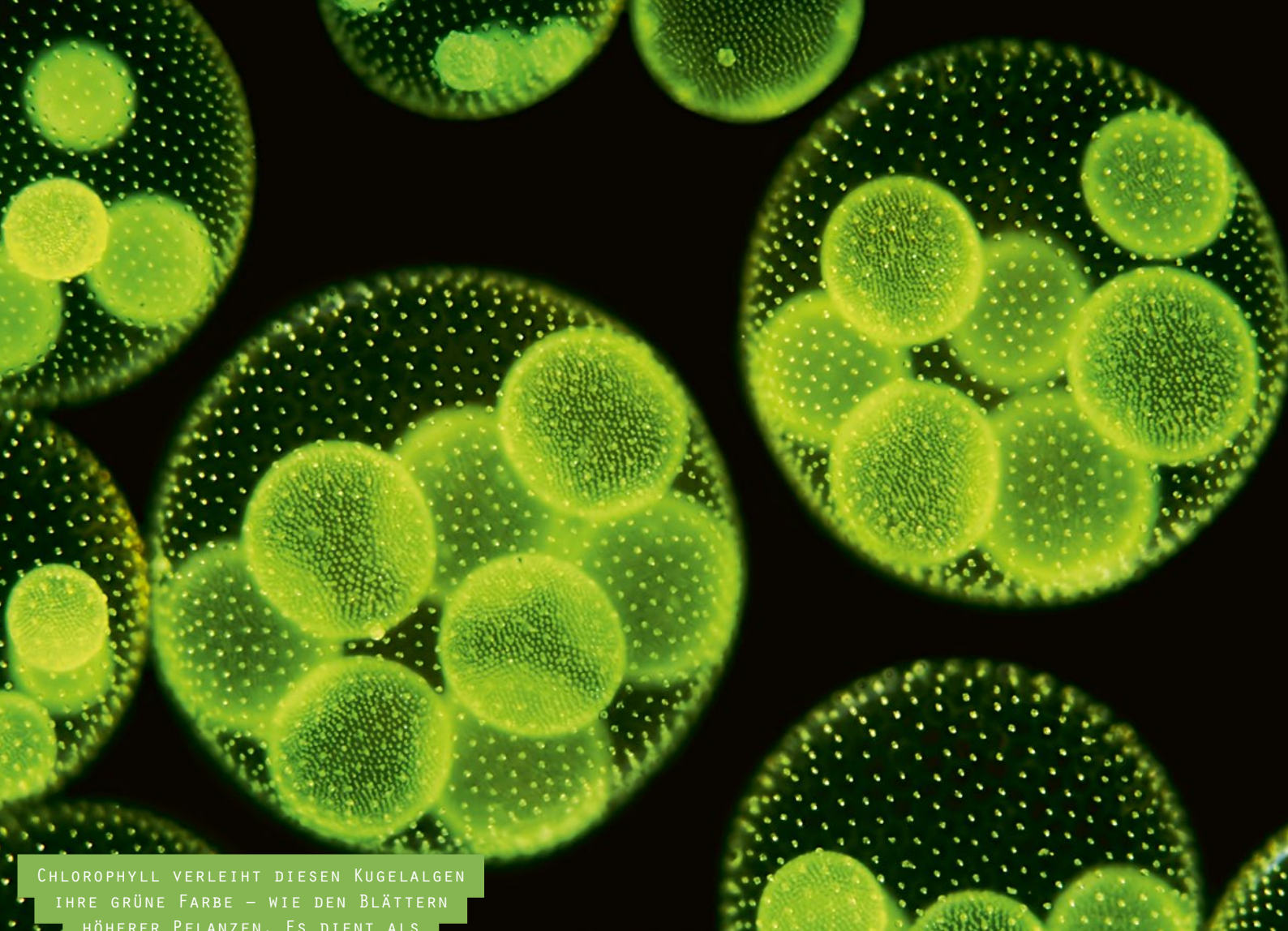
Mengenmäßig bedeutsam sind außerdem die Mineralstoffe Natrium, Kalium, Chlor, Calcium und Magnesium. Im menschlichen Körper haben sie einen Anteil von mehr als 50 Milligramm pro Kilogramm und werden deshalb im Gegensatz zu Spurenelementen, die in deutlich geringeren Anteilen vorliegen, als Mengenelemente bezeichnet. Natrium, Kalium, Calcium und Magnesium liegen

in der Zelle als Kationen vor, Chlor als Anionen. Durch unterschiedliche Konzentrationen an positiv oder negativ geladenen Teilchen innerhalb und außerhalb der Zellen entsteht eine elektrische Spannung, ein so genanntes Membranpotenzial. Auf diese Weise erzeugt und leitet das Nervensystem Impulse weiter. Magnesiumionen stabilisieren außerdem Biomoleküle wie die DNA oder Membranen und regulieren das Elektrolytgleichgewicht. Der menschliche Körper enthält 20 bis 24 Gramm Magnesium; nach Natrium, Kalium und Calcium ist es damit der vierthäufigste Mineralstoff. Chlorid bildet mit Protonen die Magensäure, und Calciumionen sind an der Blutgerinnung sowie an der Aktivierung mancher Proteine beteiligt.

Eine noch wichtigere Rolle spielt Calcium jedoch beim Aufbau harter Strukturen. So bestehen Muschelschalen, Schneckenhäuser und die Skelette von Steinkorallen aus Calciumcarbonat. Die

Knochen der Wirbeltiere wiederum enthalten das Faserprotein Kollagen, an das sich Kristalle aus Hydroxylapatit, einem Calciumphosphat, anlagern. Zahnschmelz, die härteste Struktur im menschlichen Körper, ist ebenfalls daraus gebaut – und fast so hart wie Diamant. Durch Einlagern von Fluorid ( $F^-$ ) wird dieser resistenter gegen säurehaltige Flüssigkeiten wie Fruchtsäfte. Eine andere Verbindung verleiht dem Skelett von Kieselschwämmen und den Zellwänden von einzelligen Kieselalgen eine hohe Stabilität: Siliziumdioxid, die sehr stabile Verbindung aus Silizium und Sauerstoff.

Spurenelemente wie Eisen, Iod, Zink und Kupfer kommen im menschlichen Organismus nur in winzigen Mengen vor, sind aber trotzdem für viele Prozesse lebensnotwendig und müssen mit der Nahrung aufgenommen werden. Andere Lebewesen, vor allem Pflanzen und Mikroorganismen, benötigen zum Teil in anderen Mengen diese Elemente oder



CHLOROPHYLL VERLEIHT DIESEN KUGELALGEN IHRE GRÜNE FARBE – WIE DEN BLÄTTERN HÖHERER PFLANZEN. ES DIEN T ALS LICHTFÄNGER BEI DER FOTOSYNTHESE. IM ZENTRUM DES RINGFÖRMIGEN MOLEKÜLS SITZT EIN MAGNESIUMATOM.

verwenden andere Spurenelemente. Eisen spielt beispielsweise eine wichtige Rolle im Hämoglobin, dem roten Blutfarbstoff der Wirbeltiere. Dieser enthält vier Proteinketten, die jeweils eine so genannte Hämgruppe binden. Letztere besteht aus einem Porphyrinring mit einem zentralen Eisen(II)-Atom. Entscheidend für die Funktion des Blutfarbstoffs ist, dass das zentrale Eisen ein Sauerstoffmolekül reversibel bindet und in Organen oder im Muskelgewebe wieder freisetzt. Durch die Sauerstoffbindung wechselt die Farbe des Hämoglobins von dunkelrot zu hellrot. Arteriell, sauerstoffreiches Blut ist deshalb heller als venöses, sauerstoffarmes.

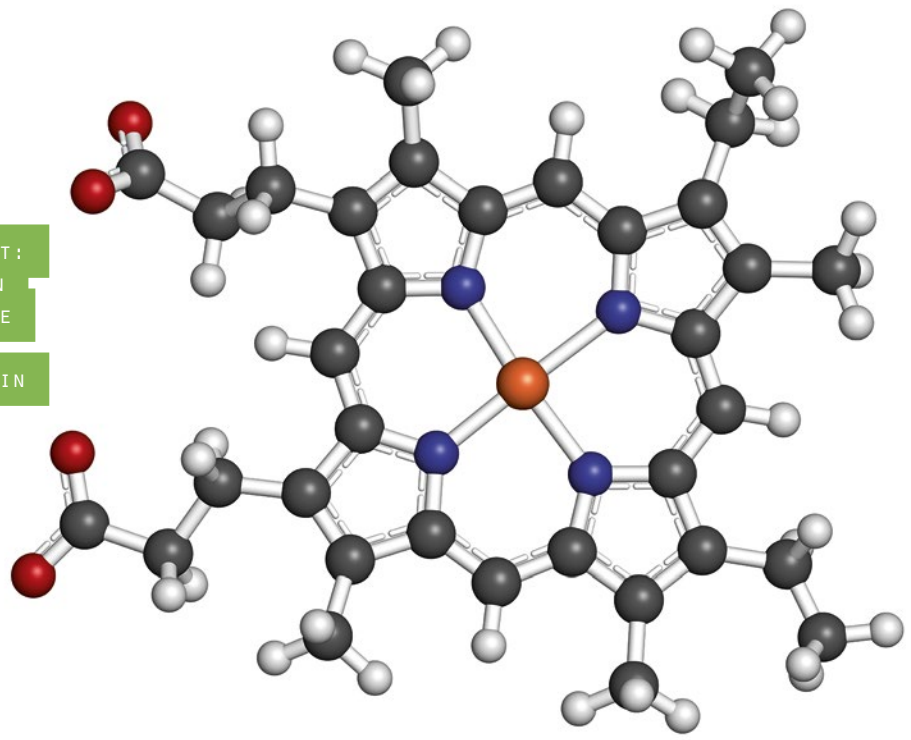
Gliedertiere wie Krebse oder Spinnen und Weichtiere wie Schnecken oder Muscheln nutzen den Blutfarbstoff Häm-

cyanin. Hier bindet ein Sauerstoffmolekül an zwei Kupferatome, die zwischen den Oxidationsstufen +I und +II wechseln. Lebewesen mit Hämocyanin haben im wahrsten Sinne des Wortes blaues Blut. Sowohl Eisen als auch Kupfer spielen außerdem eine Rolle bei Redoxreaktionen. Diese laufen etwa bei der Zellatmung ab und bei der Lichtreaktion der Fotosynthese. Bei beiden Prozessen werden Elektronen von einem Donor über eine Elektronentransportkette auf einen Akzeptor übertragen. Für den Elektronentransfer braucht es Metalle wie eben Eisen oder Kupfer, die leicht verschiedene Oxidationsstufen einnehmen können. Häufig bilden die Metallionen das katalytische Zentrum eines Enzyms oder Proteinkomplexes.

Ein Beispiel hierfür ist die Cytochrom-c-Oxidase, das letzte Enzym der Atmungskette, in der Elektronen von einem reduzierten, energiereichen Substrat – meist Zucker – auf den Endakzeptor Sauerstoff übertragen werden. Fast alle Tiere, Pflanzen, Pilze und aerobe Bakterien nutzen Sauerstoff als Elektronenakzeptor. Anaerob lebende Mikroorganismen verwenden dagegen andere Endakzeptoren wie Nitrat, Sulfat und Kohlendioxid. Gleich bleibt aber das Prinzip, dass die Elektronen über eine Reihe von Redoxproteinen auf ein jeweils höher oxidiertes Akzeptormolekül übertragen werden. Als Redoxproteine dienen meist Cytochrome, die wie Hämoglobin eine Hämgruppe enthalten. Aber auch Eisen-Schwefel- und Kupfer-Proteine können Elektronen weiterleiten.



EISEN IST EIN WICHTIGES SPURENELEMENT: DER ROTE BLUTFARBSTOFF DES MENSCHEN UND VIELER TIERE ENTHÄLT HÄMMEKÜLE MIT EINEM ZENTRALEM EISENATOM (ORANGE), DAS SAUERSTOFF BINDET UND IN MUSKELN UND ORGANEN FREISETZT.



MOLEKUL / GETTY IMAGES / ISTOCK

Mengenmäßig zwischen Eisen und Kupfer liegt im menschlichen Körper Zink vor. Dieses ist Bestandteil wichtiger Enzyme wie der RNA-Polymerase und der Karboanhydrase, die den pH-Wert im Blutplasma und der Magensäure reguliert. In der Pflanzenwelt spielt Magnesium eine wichtige Rolle: Es bildet das Zentralatom des grünen Blattfarbstoffs Chlorophyll, der Hämoglobin strukturell ähnelt. Beim Menschen benötigen über 300 Enzyme Magnesium als Kofaktor, darunter jene, die an der Bildung oder Spaltung von ATP beteiligt sind.

Neben Eisen, Kupfer und Zink kommen auch »exotischere« Spurenelemente wie Molybdän, Mangan, Vanadium und Kobalt als Zentralatome in Enzymen zum Einsatz. In Pflanzen ist Mangan essenziell für den Proteinkomplex des Fotosystems II, welches Wassermoleküle spaltet und den für uns lebenswichtigen Sauerstoff freisetzt. Der Biokatalysator Superoxiddismutase, der reaktive Superoxid-Anionen entgiftet und vor oxidativem Stress schützt, enthält ebenfalls Mangan.

In einer anderen Gruppe dieser Enzyme, die im Zytoplasma aller Lebewesen mit echtem Zellkern und damit auch beim Menschen vorkommt, findet man dagegen Kupfer und Zink. Molybdänhaltige Enzyme kommen bei allen Lebewe-

sen vor und spielen beispielsweise beim Abbau der Purinbasen der Nukleinsäuren eine Rolle. Des Weiteren dient Molybdän als Kofaktor für das Enzym Nitrogenase, das es Mikroorganismen wie Zyanobakterien erlaubt, Luftstickstoff ( $N_2$ ) verfügbar zu machen. Einige Bakterien haben zusätzlich eine Nitrogenase entwickelt, die an Stelle des Molybdäns auf Vanadium setzt. Auch manche Braunalgen und Flechten besitzen Enzyme mit Vanadium als Zentralatom zur Oxidation von Halogeniden mit Wasserstoffperoxid.

Kobalt ist Bestandteil der Cobalamine, zu denen das Vitamin  $B_{12}$  gehört. Dessen biologisch aktive Form ist als Kofaktor von Enzymen an der DNA-Synthese und am Aminosäurestoffwechsel beteiligt. Für Pflanzen, Mikroorganismen und manche Tiere kann auch Nickel essenziell sein. Beispielsweise ist ein Enzym, das an der mikrobiellen Produktion von Methan beteiligt ist, abhängig vom nickelhaltigen Kofaktor  $F_{430}$ . Außerdem tragen manche Wasserstoff bildenden Hydrogenasen und auch das Enzym Urease, das Harnstoff spaltet, ein Nickelatom im Zentrum.

Beim Menschen sind Enzyme bekannt, die positiv geladene Nickelionen enthalten können, etwa die Polynukleotidkinase Clp1. Andere Kationen wie Mangan oder Magnesium scheinen Nickel hier aller-

dings ersetzen zu können. Inwieweit das Element für Menschen essenziell ist, ist deshalb noch unklar. Selen ist Bestandteil der seltenen Aminosäure Selenocystein, die eine ähnliche Struktur wie Cystein aufweist, aber besser mit Sauerstoff reagiert und sich daher als Radikalfänger eignet. Alle tierischen Zellen enthalten Selenocystein in dem Enzym Glutathionperoxidase, die hilft, membranschädigende Moleküle wie Wasserstoffperoxid zu beseitigen.

Da im Universum dieselbe Vielfalt an chemischen Elementen herrscht wie auf der Erde und die Elemente dort denselben Naturgesetzen gehorchen, darf man vermuten, dass außerirdische Lebensformen existieren. Rein statistisch betrachtet müssten sich für die Entwicklung von Leben günstige Bedingungen – moderate Temperaturen, ständige Energiezufuhr durch ein Zentralgestirn und flüssiges Wasser – auf einer Vielzahl fremder Planeten finden lassen. Die wirklich spannende Frage lautet daher vielleicht nicht, ob es woanders Leben gibt, sondern wie diese Organismen aufgebaut sind und wie sie funktionieren. Die Häufigkeiten der Elemente in fernen Welten könnten jedenfalls anders verteilt sein – und damit andere Elemente die Basis extraterrestrischen Lebens bilden. ☺

The background of the page is a collage of disassembled smartphone components. In the top left, there's a gold-colored metal frame with various internal parts like screws and connectors. To its right, a black flex cable with a small yellow LED is visible. In the bottom left, a black plastic component with a gold-colored metal plate is shown. At the bottom right, there are more internal components, including a white battery-like part and various metal and plastic pieces.

# BEGEHRTE METALLE


SMARTPHONES WERDEN IMMER LEISTUNGSFÄHIGER: DIE DISPLAYS SCHÄRFER, DER SOUND KLARER UND DIE PROZESSOREN SCHNELLER. OHNE VERSCHIEDENE TECHNOLOGIEMETALLE WÄRE DAS NICHT MÖGLICH. DEREN ABBAU IST JEDOCH OFT PROBLEMATISCH, UND DIE ROHSTOFFE WERDEN SELTEN RECYCELT.

**E**s geht definitiv etwas hektisch zu in der Zeit vor einem Tag wie diesem. Aber es sind auch magische Tage, denn wir dürfen unsere neuesten Innovationen mit euch teilen.« Mit diesen Worten eröffnet Tim Cook das Apple Event. Es ist der 12. September 2018, und Cook steht auf der Bühne des Steve-Jobs-Theaters im Apple Park in Kalifornien. Cook ist Geschäftsführer von Apple und spricht zu eingeladenen Gästen, unter ihnen Vertreter der Presse und Blogger.

Zu den Innovationen, die Apple an diesem Mittwochmorgen vorstellt, gehört unter anderem die nächste Generation des iPhones. Die aktuelle Modellreihe hatte der Konzern erst ein Jahr zuvor präsentiert. Auch andere große Mobiltelefonhersteller wie Samsung und Huawei bringen regelmäßig neue Geräte auf den Markt. Vor der diesjährigen Vorstellung

der neuen iPhones wurde wie immer viel spekuliert – darüber, wie sie aussehen und welche neuen Funktionen sie haben würden.

Wenig Beachtung finden dagegen die zahlreichen Metalle, ohne die Technologien wie Smartphones nicht auskommen würden. Dabei besteht jedes Mobiltelefon zu etwa 25 Prozent aus Metallen. Sie finden sich in fast allen Komponenten: auf der Leiterplatte, im Gehäuse, im Display und im Akku. Nur ein Bruchteil davon sind recycelte Rohstoffe. Metalle wie Tantal, Kobalt und die so genannten seltenen Erden werden zudem oft unter fragwürdigen Umständen gewonnen. In den Minen herrschen zum Teil unmenschliche Arbeitsbedingungen, der Handel und die Vergabe von Konzessionen begünstigt Korruption, und der Abbau verursacht große Umweltschäden.



Nun hat Apple-Mitarbeiter Phil Schiller seinen Auftritt. Während sich das Smartphone hinter ihm auf der Leinwand dreht, führt Schiller durch dessen Spezifikationen. Er kommt schließlich auf das Herzstück zu sprechen: den Computerchip. Auf ihm befänden sich 6,9 Milliarden Transistoren, mehr als auf allen vorherigen Telefonen der Firma.

Der Chip ist in jedem Smartphone das Bauteil mit den meisten Metallen. Doch welche genau in den jeweiligen Modellen stecken und in welcher Menge, verraten die Hersteller nicht. Der Gehalt an Metallen und deren Zusammensetzung wird daher häufig erst bekannt, wenn ein Smartphone in großer Stückzahl in Recyclinganlagen landet – in der Regel also einige Jahre nach Markteinführung. Genauere Untersuchungen darüber, was in unseren mobilen Begleitern steckt, gibt es kaum, auch weil ständig neue Modelle erscheinen.

#### EIN POTPOURRI AN METALLEN

Eine Ausnahme bildet hier eine Studie der Geologin Britta Bookhagen von der deutschen Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Sie und ihre Kollegen zerlegten die drei im Jahr 2012 meistverkauften Smartphones in ihre Einzelteile. Anschließend analysierten sie die Bestandteile der Leiterplatten, auf denen sich der Chip befindet. Allein dort fanden sie

rund 50 verschiedene Metalle und Halbmetalle. Darunter Alkali- und Erdalkalimetalle wie Lithium und Magnesium, Übergangsmetalle wie Tantal und Kupfer, das Leichtmetall Aluminium, Edelmetalle wie Gold, Silber und Platin sowie die seltenen Erden Neodym und Dysprosium.

Woher stammen diese Metalle? Die kurze Antwort lautet: aus der ganzen Welt. Kupfer etwa wird vor allem in Chile und Peru abgebaut und Aluminium in vielen verschiedenen Ländern, darunter Deutschland, Norwegen und Kanada. Einige Metalle lagern in politisch stabilen Regionen – andere nicht. Ein begehrtes, aber problematisches Element ist Tantal. Man kann aus Tantal besonders kleine Kondensatoren herstellen. In der Erdkruste liegt es vor allem zusammen mit Niob in den Mineralen Columbit und Tantalit vor, die auch als Koltan bekannt sind.

Knapp die Hälfte an Tantal in unseren Smartphones stammt aus Burundi, Ruanda und der Demokratischen Republik Kongo. Die Koltanförderung in diesen Ländern wurde in der Vergangenheit mehrfach kritisiert. Die Minenbetreiber würden ihre Arbeiter ausbeuten und unter menschenunwürdigen Bedingungen schuften lassen. Auch Kinderarbeit ist offenbar keine Seltenheit. Hinzu kommt, dass sich in einigen Regionen Rebellengruppen durch den Abbau von Koltan finanzieren.

MOBILTELEFONE ENTHALTEN  
DUTZENDE METALLE.  
NUR ETWA JEDES ZEHNTE GRAMM  
WIRD IN EUROPA RECYCELT.

Die Europäische Kommission hat deshalb ein Gesetz erlassen, das Unternehmen ab 2021 dazu verpflichtet, so genannte Konfliktminerale nur noch aus verantwortlichen Quellen zu beziehen. Zu den Konfliktmineralen zählen außer Tantal auch Zinn, Gold und Wolfram. Sie alle stecken in Smartphones: Zinn als Lötzinn auf der Leiterplatte, Gold in den Kontakten und Wolfram in der vibrierenden Einheit. In den USA schreibt der so genannte Dodd-Frank-Act Firmen seit 2010 vor, ihre Lieferketten zu überprüfen und offenzulegen, ob ihre Produkte Konfliktrohstoffe enthalten.

Es gibt auch regierungsunabhängige Initiativen, zum Beispiel die ITRY Tin Supply Chain Initiative (iTSCi), die Lieferketten zertifiziert und Smartphoneherstellern so garantiert, dass verbaute Komponenten ausschließlich aus konfliktfreien Mineralen bestehen. Einige große Elektronikhersteller, darunter Apple und Microsoft, sind Partner der Initiative.

»Jetzt komme ich auf die Lebensdauer des Akkus zu sprechen«, kündigt Phil Schiller gegen Ende der Präsentation der neuen iPhones an. »Alle Nutzer von Smartphones wollen mehr Leistung, größere Bildschirme, aber auch eine längere Lebensdauer des Akkus.« Mit dem neuen Smartphone, so Schiller, könne man sich ganze 30 Minuten länger vergnügen, ehe die Batterie schlapp macht.

Der in elektronischen Geräten am weitesten verbreitete Akkutyp sind Lithium-Ionen-Batterien. Beim Entladen bewegen sich Lithiumionen von der Anode zur Kathode und Elektronen in die entgegengesetzte Richtung, so dass Strom fließt. Als Kathodenmaterial dienen in den Akkus häufig Lithiumkohlatoxide.

Ein Großteil des Kobalts für die Kathoden wird im Kongo gefördert. Im Jahr 2016 waren es 66 000 Tonnen, rund die Hälfte der Weltproduktion. Die steigende Nachfrage nach Elektrofahrzeugen, die meist ebenfalls kobalthaltige Lithiumbatterien enthalten, verteuert

Kobalt zunehmend: Seit 2016 hat sich der Preis für das Metall vervierfacht.

Derweil berichtet unter anderem die Menschenrechtsorganisation Amnesty International von prekären Arbeitsbedingungen in den Kobaltminen des Kongo. Ähnlich wie beim Abbau von Koltan schufteten Minderjährige hier für ein paar Dollar bis zu zwölf Stunden täglich – ohne Sicherheitsausrüstungen wie Handschuhe und Gesichtsmasken. Zwischen September 2014 und Dezember 2015 sollen 80 Minenarbeiter beim Abbau von Kobalt gestorben sein. Nach Schätzungen von UNICEF arbeiteten 2014 in den Bergwerken des Kongos rund 40 000 Kinder.

Trotzdem klammern sowohl das neue EU-Gesetz zu Konfliktmaterialien als auch der in den USA wirksame Dodd-Frank-Act Kobalt aus. Die Chinesische Handelskammer für Metalle, Minerale und Chemikalien hat inzwischen auf die Kritik an der Kobaltproduktion reagiert und die »Responsible Cobalt Initiative« angekündigt. Zusammen mit Elektronik- und Automobilherstellern will man daran arbeiten, die Wertschöpfungskette transparenter zu gestalten und Kinderarbeit zu verhindern.

#### VIELE ZWISCHENHÄNDLER

Für die Hersteller ist es oft schwer nachzuvollziehen, woher die Rohstoffe stammen. Zum Beispiel gelangen kobalthaltige Erze, nachdem sie gewaschen und zerkleinert wurden, zunächst auf lokale Märkte. Dort kaufen – oft chinesische – Händler das Rohmaterial und verkaufen es weiter an Raffinerien, die es einschmelzen und so reines Kobalt gewinnen. Das begehrte Metall wird verschifft und an die Hersteller von Batteriekomponenten geliefert. Die wiederum landen bei Firmen, die Akkus produzieren. Rund 90 Prozent der weltweit hergestellten Lithium-Ionen-Batterien werden in China gefertigt. Technologiekonzerne wie Apple und Samsung verbauen die Akkus schließlich in Smartphones und anderen Elektronikgeräten.

Apple gibt an, seit 2016 alle Raffinerien zu überprüfen, die Zinn, Tantal, Wolfram, Gold und Kobalt für die Produkte des Unternehmens liefern. Das soll etwa helfen, Kinderarbeit zu vermeiden. Der US-amerikanische Fernsehsender CNN berichtete im Mai 2018, dass Apple erwäge, Kobalt zukünftig direkt von kongolesischen Minen zu beziehen, um die Arbeitsbedingungen der Minenarbeiter besser kontrollieren zu können.

Die Förderung von für Smartphones unersetzlichen Metallen ist nicht nur aus sozialer Sicht problematisch, sie kann auch für die Umwelt erhebliche Folgen haben. Das zeigt die Produktion von seltenen Erden, zu denen die Lanthanoide sowie die Elemente Yttrium und Scandium gehören.

In Smartphones werden unter anderem die seltenen Erden Neodym und Cer verbaut. Aus Neodym lassen sich leichte und zugleich leistungsstarke Magnete für die Mikrofone und Lautsprecher der Telefone herstellen. Ceroxid dient als Poliermittel für die Touchscreens von Smartphones und Tablets.

Neodym und Cer zählen zwar zu den seltenen Erden, kommen in der Erdkruste aber genauso häufig vor wie Nickel und Kupfer. Sie gelten als selten, weil ihre Förderung schwierig ist. Beim Abbau des Gesteins wird radioaktives Uran und Thorium freigesetzt. Außerdem kommt bei der Aufreinigung von Neodymerzen Fluorwasserstoff zum Einsatz. Zum einen entstehen dabei die extrem schädlichen Treibhausgase Tetrafluormethan und Hexafluorethan, zum anderen ist die Verbindung hochgiftig und stark ätzend. Die Förderung von Neodym birgt daher gesundheitliche Risiken für die Arbeiter.

Mehr als 80 Prozent der Weltproduktion an seltenen Erden entfällt auf China und hat in dem Land bis heute beträchtliche Umweltschäden verursacht. Etwa in Baotou, einer Industriestadt in der Inneren Mongolei, wo die toxischen Abfälle, die beim Erzabbau entstehen, in einen künstlichen See geleitet werden.

Prinzipiell könnte der Bedarf an Rohstoffen verringert werden, indem man



PICTURE ALLIANCE / REUTERS / JONNY HOGG

DIE AKKUS VIELER SMARTPHONES ENTHALTEN KOBALT. OFT KOMMT ES AUS MINEN IM KONGO, IN DENEN AUCH KINDER SCHUFTEN.

die Metalle ausgedienter Mobiltelefone recycelt. Die Wiederverwertung scheitert jedoch unter anderem daran, dass nur die wenigsten ihr altes Telefon an entsprechenden Sammelstellen abgeben. Experten schätzen die Recyclingrate in Europa auf zwölf Prozent. Nach einer Hochrechnung des Bundesverbands Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien (Bitkom) lagen 2015 in Deutschland 100 Millionen ungenutzte Handys in den Schubladen – Tendenz steigend. Die Mobiltelefone, die entsorgt werden, landen meist im Hausmüll, sprich, in der Verbrennungsanlage oder auf der Müllkippe.

Dabei lohnt sich die Wiederverwertung bestimmter Metalle durchaus. Britta Bookhagen und ihre Kollegen errechneten, dass die von ihnen analysierten Smartphones mehr als 6 Gramm Kupfer, 17 Milligramm Gold, 11 Milligramm Silber und 2 Milligramm Palladium enthielten, was einem Gegenwert von zirka 1,15 Euro entsprach. Bei 1,4 Milliarden Smartphones, die im Jahr 2016 weltweit über den Ladentisch gingen, summiert sich der Wert an allein diesen Metallen auf mehr als 1,5 Milliarden Euro!


Für einige Metalle ist die Wiederverwertung allerdings bislang nicht wirt-

schaftlich, und es fehlen entsprechende Recyclingverfahren. Elemente wie Gallium, Indium und die seltenen Erden sind nur in winzigen Mengen in Mobiltelefonen enthalten, was die Rückgewinnung erschwert. Außerdem sind sie oft so verbaut, dass man sie schlecht wieder abtrennen kann.

Das Recycling selbst kann jedoch auch problematisch sein. Um Metalle erneut verarbeiten zu können, müssen sie eingeschmolzen werden. Dafür sind meist sehr hohe Temperaturen nötig – und damit eine Menge Energie. Ein Teil des Elektroschrotts aus reichen Nationen landet zudem in afrikanischen Staaten, in Indien und China – und das nicht immer legal. In der chinesischen Stadt Guiyu, wo alte Geräte ausgeschlachtet werden, hat das dramatische Folgen: Fast alle der dort lebenden Kinder haben erhöhte Bleikonzentrationen im Blut, es gibt mehr Fehlgeburten als in anderen Städten, und die Flüsse und das Grundwasser sind mit Schadstoffen belastet. Die chinesische Regierung hat der massenhaften Mülleinfuhr vor allem aus Europa und der USA nun Einhalt geboten: Seit Anfang 2018 darf unter anderem kein Elektroschrott mehr importiert werden.

Technische Innovationen haben ihren Preis. Trotzdem legen sich mehr als

60 Prozent der deutschen Smartphone-nutzer mindestens einmal im Jahr ein neues Telefon zu. Hersteller wie Apple fördern die Wegwerfmentalität. Sieben Jahre nach dem Kauf eines Produktes bietet das Unternehmen keine Ersatzteile und keinen Service mehr an. Für eine längere Lebensdauer scheinen viele Smartphones ohnehin nicht ausgelegt zu sein.

Dass es auch anderes geht, beweisen das niederländische Unternehmen Fairphone und der deutsche Familienbetrieb Shift. Sie verkaufen modulare Mobiltelefone mit austauschbaren Komponenten. So muss nicht gleich ein neues Telefon her, wenn etwa nur der Bildschirm kaputt ist oder der Akku schwächelt. Beide Firmen bemühen sich zudem, die Lieferketten der einzelnen Komponenten offenzulegen und keine Teile zu verbauen, die Metalle aus ethisch fragwürdigen Quellen enthalten. Das Shiftphone schafft es, auf Konfliktmaterial komplett zu verzichten: Für die Mikro-kondensatoren des Telefons verwendet die Firma Keramik statt Tantal. Zwar hinken die modularen Smartphones den neusten Geräten von Apple, Samsung und Co technisch bisweilen ein wenig hinterher. Dafür aber stehen sie für eine sozial gerechtere und nachhaltigere Produktion von Smartphones. 

# KÜNSTLICHE SCHWERGEWICHTE

IN EINEM TEILCHENBESCHLEUNIGER IN DARMSTADT LASSEN  
WISSENSCHAFTLER ATOMKERNE KOLLIDIEREN UND ERSCHAFFEN  
SO NEUE CHEMISCHE ELEMENTE.

**D**armstadtium, Roentgenium und Copernicium – das sind nicht etwa römische Siedlungen, sondern superschwere Elemente mit den Ordnungszahlen 110 bis 112, die Kernphysiker am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung Mitte der 1990er Jahre in Darmstadt entdeckt haben.


Zur Erschaffung besonders massereicher Elemente nutzen die Forscher am GSI einen 120 Meter langen Teilchenbeschleuniger. In diesem Tunnel beschleunigen sie elektrisch geladene Atome (Ionen) auf etwa zehn Prozent der Lichtgeschwindigkeit – 30 000 Kilometer pro Sekunde. Anschließend lassen sie die Minigeschosse auf Atomkerne prallen, die auf einer Folie aufgedampft sind. Auf

Grund der hohen Geschwindigkeit können die Atomkerne die enorme Abstoßungskraft, die zwischen ihnen wirkt, überwinden und miteinander verschmelzen. So entstehen Elemente, die schwerer sind als Uran, das mit 92 Protonen schwerste natürlich vorkommende Element (Ordnungszahl 92).

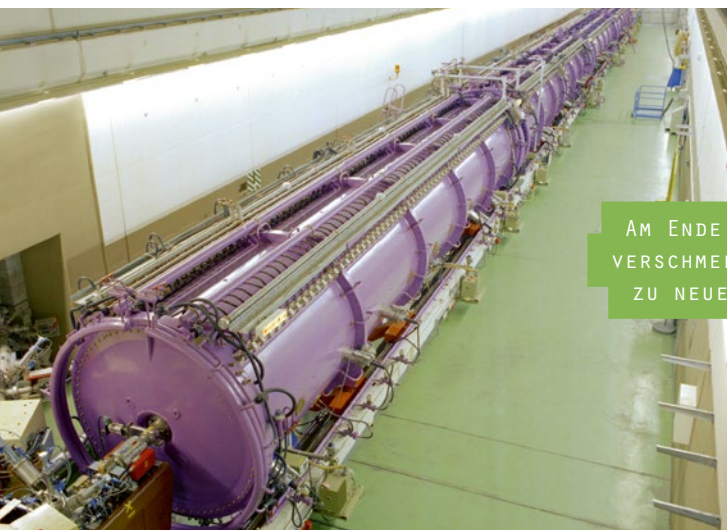
Die Darmstädter Wissenschaftler haben dem Periodensystem auf diese Weise bereits sechs Elemente hinzugefügt. Sie tragen die Ordnungszahlen 107 bis 112. Das Element Darmstadtium mit der Ordnungszahl 110 zum Beispiel ging aus der Fusion eines Nickelkerns (28 Protonen) und eines Bleikerns (82 Protonen) hervor. Aber: Die Schwergewichte sind äußerst kurzlebig. Sie zerfallen innerhalb

von Sekundenbruchteilen in leichtere Atome und lassen sich daher nicht direkt nachweisen. Dass sie dennoch für einen Wimperschlag existieren, können die Forscher nachweisen, indem sie die beim radioaktiven Zerfall ausgesandte Strahlung messen. Zudem bilden sich nach einigen Zerfallsschritten stabilere Atomkerne, die aus früheren Experimenten wohlbekannt sind. Daraus lässt sich auf den am Beginn der Zerfallskette stehenden Atomkern schließen.

Neben den eigenen Entdeckungen gelang es den Forschern am GSI auch die ihrer russischen Kollegen zu bestätigen: Die Elemente mit den Ordnungszahlen 114 bis 117. Das aktuell schwerste, künstliche Mitglied im Periodensystem ist Oganesson, auf Position 118.

Atome mit einer extrem hohen Anzahl an Protonen und Neutronen, die auf der Erde nicht natürlich vorkommen, helfen Wissenschaftlern, Prozesse im Kosmos besser zu verstehen. Darüber hinaus vermuten Kernphysiker auf Basis experimenteller Beobachtungen eine »Insel der Stabilität« im Periodensystem. Dort könnte es superschwere Elemente mit einer vergleichsweise langen Lebensdauer und möglicherweise einzigartigen chemischen und physikalischen Eigenschaften geben. 

A. ZSCHAU, GSI HELMHOLTZZENTRUM FÜR SCHWERIONENFORSCHUNG



AM ENDE DIESER RÖHRE  
VERSCHMELZEN ATOMKERNE  
ZU NEUEN ELEMENTEN.

## LINKS

INTERNATIONAL YEAR OF THE PERIODIC TABLE

[WWW.IYPT2019.ORG](http://WWW.IYPT2019.ORG)

GDCH – INTERNATIONALES JAHR DES PERIODENSYSTEMS

[WWW.GDCH.DE/SERVICE-INFORMATION/JAHR-DES-PSE.HTML](http://WWW.GDCH.DE/SERVICE-INFORMATION/JAHR-DES-PSE.HTML)

IUPAC – INTERNATIONALE UNION FÜR REINE UND ANGEWANDTE CHEMIE

[WWW.IUPAC.ORG/WHAT-WE-DO/PERIODIC-TABLE-OF-ELEMENTS/](http://WWW.IUPAC.ORG/WHAT-WE-DO/PERIODIC-TABLE-OF-ELEMENTS/)

DATABASE OF PERIODIC TABLES

[WWW.META-SYNTHESIS.COM/WEBBOOK/35\\_PT/PT\\_DATABASE.PHP?BUTTON=DATA+MAPPING](http://WWW.META-SYNTHESIS.COM/WEBBOOK/35_PT/PT_DATABASE.PHP?BUTTON=DATA+MAPPING)

WELT DER PHYSIK – ENTSTEHUNG DER ELEMENTE

[WWW.WELTDERPHYSIK.DE/GEBIET/TEILCHEN/HADRONEN-UND-KERNPHYSIK/ELEMENTENTSTEHUNG-UNDERZEUGUNG/](http://WWW.WELTDERPHYSIK.DE/GEBIET/TEILCHEN/HADRONEN-UND-KERNPHYSIK/ELEMENTENTSTEHUNG-UNDERZEUGUNG/)

NEUTRON STARDUST AND THE ELEMENTS OF EARTH

[WWW.NATURE.COM/ARTICLES/S41557-018-0190-9.PDF](http://WWW.NATURE.COM/ARTICLES/S41557-018-0190-9.PDF)

DIE ZEIT - BAUSTEINE DES MENSCHEN

[WWW.ZEIT.DE/WISSEN/2010-07/INFOGRAFIK-BAUSTEIN.PDF](http://WWW.ZEIT.DE/WISSEN/2010-07/INFOGRAFIK-BAUSTEIN.PDF)

EUROPEAN CHEMICAL SOCIETY – ELEMENT SCARCITY

[WWW.EUCHEMS.EU/EUCHEMS-PERIODIC-TABLE/](http://WWW.EUCHEMS.EU/EUCHEMS-PERIODIC-TABLE/)

THE CHEMICAL ELEMENTS OF A SMARTPHONE

[WWW.COMPOUNDCHEM.COM/2014/02/19/THE-CHEMICAL-ELEMENTS-OF-A-SMARTPHONE/](http://WWW.COMPOUNDCHEM.COM/2014/02/19/THE-CHEMICAL-ELEMENTS-OF-A-SMARTPHONE/)

THE MAKING OF MOSCOVIUM

[WWW.NATURE.COM/ARTICLES/S41557-018-0185-6.PDF](http://WWW.NATURE.COM/ARTICLES/S41557-018-0185-6.PDF)

HELMHOLTZZENTRUM FÜR SCHWERIONENFORSCHUNG

[WWW.GSI.DE/FORSCHUNGBESCHLEUNIGER/FORSCHUNG\\_EIN\\_UEBERBLICK/NEUE\\_ELEMENTE.HTM](http://WWW.GSI.DE/FORSCHUNGBESCHLEUNIGER/FORSCHUNG_EIN_UEBERBLICK/NEUE_ELEMENTE.HTM)

A NEW PERIOD IN SUPERHEAVY-ELEMENT HUNTING

[WWW.NATURE.COM/ARTICLES/S41557-018-0191-8.PDF](http://WWW.NATURE.COM/ARTICLES/S41557-018-0191-8.PDF)

## BÜCHER

HUGH ALDERSEY-  
WILLIAMS

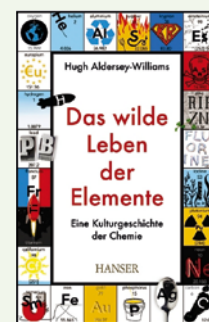
DAS WILDE  
LEBEN DER  
ELEMENTE

2011

Hanser

464 Seiten

€ 24,90



SAM KEAN

TREFFEN  
SICH ZWEI  
ELEMENTE ...

...

2013

Fischer

448 Seiten

€ 9,99



LUITGARD  
MARSCHALL/  
HEIKE  
HOLDINGHAUSEN

SELTENE  
ERDEN

2017

oekom

240 Seiten

€ 24,-



## POSTER

EKKEHARD FLUCK / KLAUS G. HEUMANN  
PERIODENSYSTEM DER ELEMENTE

2017, Wiley-VCH, Weinheim, € 9,90



GESELLSCHAFT  
DEUTSCHER CHEMIKER

IMPRESSUM

HERAUSGEBER: GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER E.V.  
VARRENTRAPPSTRASSE 40-42, 60486 FRANKFURT/MAIN  
PROJEKTKOORDINATION: DR. KARIN J. SCHMITZ,  
MAREN MIELCK

EINE PUBLIKATION VON: SPEKTRUM CP  
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT VERLAGSGESELLSCHAFT MBH  
TIERGARTENSTRASSE 15-17, 69121 HEIDELBERG  
WWW.SPEKTRUM-CP.DE  
LEITUNG: ANN-KRISTIN EBERT  
REDAKTION: DR. TIM KALVELAGE  
TEXTE: DR. JANOSCH DEEG, DR. ANNA CLEMENS,  
CHRISTOPHER SCHRADER, DR. LARISSA TETSCH  
LAYOUT: OLIVER GABRIEL,  
ANKE HEINZELMANN, KARSTEN KRAMARCZIK  
SCHLUSSREDAKTION: SIGRID SPIES, KATHARINA WERLE  
HERSTELLUNG: NATALIE SCHÄFER