

James M. Russell
Das Periodensystem

James M. Russell

DAS PERIODENSYSTEM

118 chemische Elemente einfach erklärt

Aus dem Englischen
von Dietlind Falk

Anaconda

Titel der englischen Originalausgabe:
»Elementary. The Periodic Table Explained«
First published in Great Britain in 2019
by Michael O'Mara Books Limited, London.



Penguin Random House Verlagsgruppe FSC® N001967

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

Lizenzausgabe mit freundlicher Genehmigung
© dieser Ausgabe 2019, 2021 by Anaconda Verlag, einem Unternehmen der
Penguin Random House Verlagsgruppe GmbH, Neumarkter Straße 28, 81673 München
Alle Rechte vorbehalten.
Umschlaggestaltung: Harald Braun, Berlin
Satz und Layout: Achim Münster, Overath
Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck
ISBN 978-3-7306-0771-8
www.anacondaverlag.de

Inhalt

Einführung: Mendelejews brillante Idee	7
Die Elemente 1 – 56	15
Die Lanthanoide	149
Die Elemente 72 – 94	163
Die Elemente 95 – 118	207
Element 119 und weiter	213
Register	215

Einführung: Mendelejews brillante Idee

Das Periodensystem zählt zu den entscheidenden wissenschaftlichen Entdeckungen der letzten zwei Jahrhunderte, und doch waren für seine Konzeption weder Instrumente noch Experimente notwendig – es brauchte lediglich Stift, Papier, und einen talentierten Chemiker, Dmitri Mendelejew (1834–1907). Mendelejew war fasziniert von der Atomtheorie – der Vorstellung, dass die Elemente ausschließlich durch ihre atomare Struktur definiert werden –, und so kam ihm in den frühen 1860er-Jahren die Idee, alle bis dato bekannten Elemente zu einem einfachen Schaubild zu ordnen.

Zu jener Zeit war bekannt, dass die Materie aus »Elementen« besteht, von denen zweiundsechzig bereits entdeckt worden waren. Mendelejew ordnete sie zunächst nach ihrer Atommasse an, die sich aus der Anzahl von Neutronen und Protonen im Atomkern des jeweiligen Elementes ergibt. (Der Kern eines Atoms besteht aus Protonen und Neutronen, er wird umgeben von einer Hülle, in der sich die Elektronen befinden: Sie sind allerdings so

leicht, dass sie für die Berechnung der atomaren Masse keine Rolle spielen).

Zunächst ordnete Mendelejew die Elemente zu einer langen Reihe an. Der Durchbruch gelang ihm jedoch durch die plötzliche Erkenntnis, dass es innerhalb dieser Reihe Muster gab: Elemente mit ähnlichen Eigenschaften tauchten innerhalb der Reihe in bestimmten »Perioden« auf.

Mendelejew trennte die Reihe in einige kürzere Reihen auf, die er übereinander anordnete, sodass Elemente mit ähnlichen Eigenschaften fortan in Spalten (diese werden auch »Gruppen« genannt) übereinander standen: So entstand seine erste Version des Periodensystems. In der Gruppe ganz links befanden sich beispielsweise Natrium, Lithium und Kalium – sie sind bei Zimmertemperatur in festem Zustand (üblicherweise bedeutet dies in etwa 20°C), ihre Oberfläche wird schnell stumpf und sie reagieren heftig, wenn man sie mit Wasser mischt.

So kam Mendelejew auf das »Gesetz der Periodizität«, eine Zusammenfassung seiner Erkenntnis, dass sich die Elemente in Gruppen einteilen lassen, deren Elemente ähnliche Eigenschaften aufweisen und die in regelmäßigen Intervallen auftauchen. Zu jenen Eigenschaften zählen Elektronegativität, Ionisierungsenergie, Metallcharakter und Reaktivität.

Nachdem Mendelejew seine Entdeckung 1869 erstmalig veröffentlichte, feilte er weiterhin an der Anordnung des Periodensystems, und stellte fest, dass die Muster noch deutlicher hervortraten, wenn er gelegentlich seine eigenen Regeln brach, indem er einige Elemente außer-

halb der Reihenfolge anordnete oder eine Stelle freiließ. Arsen beispielsweise befand sich in der ursprünglichsten Version des Periodensystems in Periode 4 Gruppe 13, doch Mendelejew war der Ansicht, es passe besser zu den Elementen in Gruppe 15, sodass er es dorthin verschob und Gruppe 13 und 14 in jener Reihe freiließ.

Wie brillant diese Entscheidung tatsächlich gewesen war, stellte sich erst später heraus, nämlich als Gallium und Germanium entdeckt wurden: Elemente, die perfekt in die beiden Lücken vor Arsen passten. In den darauffolgenden 150 Jahren sind immer mehr Elemente gefunden oder synthetisiert worden: Argon, Bor, Neon, Polonium, Radon und viele andere. Und sie alle wurden ins Periodensystem einsortiert, das derzeit 118 Elemente enthält.

Mendelejews Anordnung des Periodensystems war intuitiv und basierte auf den Eigenschaften der Elemente, doch zu seinen Lebzeiten blieb die Atommasse weiterhin ausschlaggebend. Erst 1913 bewies Henry Moseley, dass das Grundprinzip der Anordnung nicht wie zuvor angenommen die atomare Masse der Elemente war, sondern ihre »Kernladungszahl« oder »Ordnungszahl«, eine etwas andere Eigenschaft. Hierbei handelt es sich ausschließlich um die Anzahl der Protonen im Atom. Protonen sind positiv geladen, die Ordnungszahl gibt also Auskunft über die Menge an positiver Ladung innerhalb des Atomkerns: Seither ist festgestellt worden, dass die Anzahl der negativ geladenen Elektronen, die den Atomkern umgeben, gleich der Anzahl an Protonen im Kern ist, sodass die Ladung eines gewöhnlichen Atoms null beträgt. Und Moseleys

Entdeckung führte wiederum dazu, dass weitere Elemente gefunden wurden, da das neu angeordnete Periodensystem weitere Lücken aufwies (für zusätzliche Informationen zu Moseley siehe S. 163).

Mittlerweile ist bewiesen, dass sich jedes Element allein anhand seiner Ordnungszahl identifizieren lässt. Doch auch die Anzahl an Neutronen ist wichtig, da sie unterschiedliche »Isotope« auszeichnet. So ist beispielsweise jedes Atom mit einem einzigen Proton ein Wasserstoffatom, doch während ein gewöhnliches Wasserstoffatom keine Neutronen hat (man nennt es auch Protium oder H), gibt es zwei weitere Isotope, die in der Natur vorkommen: Deuterium (${}^2\text{H}$), das ein Proton und ein Neutron besitzt, und Tritium (${}^3\text{H}$) mit einem Proton und zwei Neutronen. Auch ist es möglich, weitere Isotope synthetisch herzustellen: Wenn man Tritium mit Deuterium-Nuklei bombardiert, so kann man Wasserstoff-4 herstellen (${}^4\text{H}$), das ein Proton und drei Neutronen besitzt. Dieses Isotop ist allerdings höchst instabil und wird rasch wieder zu einem der natürlichen Isotope zerfallen.

Dank Mendelejews simpler Übersicht ließen sich nicht nur unentdeckte Substanzen voraussagen: Sie führte bei Chemikerinnen und Chemikern auch zu einem tieferen Verständnis von Atomen an sich. Sie begriffen schließlich, dass die Ähnlichkeit der in den Gruppen des Periodensystems angeordneten Elemente von ihrer subatomaren Struktur herrührte. Die Elektronen eines Atoms sind auf unterschiedlichen Bahnen angeordnet, die als Schalen bezeichnet werden. Auf jeder dieser Schalen gibt es für die

Elektronen nur eine begrenzte Anzahl an Plätzen: Zwei auf der ersten Schale, acht auf den beiden nächsten Schalen.

Je höher die chemische Ordnungszahl, desto mehr dieser Plätze werden von Elektronen »besetzt«. Elemente derselben Gruppe im Periodensystem haben dieselbe Anzahl an Elektronen in ihrer äußeren »Valenzschale« – und es ist die Anzahl an Elektronen auf dieser Schale, die vorgibt, wie sich das Atom während einer bestimmten chemischen Reaktion verhalten wird, bei der unterschiedliche Atome Elektronen austauschen und die Moleküle, die aus diesen Atomen bestehen, durch die Reaktion verändert werden. Elemente, deren äußere Schale voll mit Elektronen besetzt ist (dazu gehören die Edelgase Helium, Neon und Argon), sind stabiler und deutlich weniger reaktionsfreudig als Elemente, auf deren äußerster Schale Plätze frei sind.

Wichtig ist auch, dass eine unterschiedliche Anordnung derselben Elektronenzahl zu unterschiedlichen Verbindungen führen kann, die die Atome eines Elementes untereinander eingehen. Wir werden sehen, dass unterschiedliche Verbindungseigenschaften von Kohlenstoff zu sehr unterschiedlichen Substanzen führen können: Diamant, Grafit und Ruß, die alle drei »Allotrope« von Kohlenstoff sind.

Unser derzeitiges Verständnis der chemischen Struktur des Universums ist somit fest in Mendelejews Periodensystem verwurzelt. Als theoretisches Hilfsmittel war es ein Schlüssel zur erstaunlichen Mikro-Welt der subatoma-

ren Teilchen. Doch dieser Durchbruch war nur durch die Entwicklung der Atomtheorie möglich, die im 19. Jahrhundert weitreichende Anerkennung fand.

John Dalton war ein begabter Amateur-Wissenschaftler des frühen 19. Jahrhunderts. Er war Quäker und somit von den meisten britischen Universitäten ausgeschlossen, wurde jedoch von dem blinden Philosophen John Gough unterrichtet. Nachdem er das radikale »New College« in Manchester aus finanziellen Gründen verlassen musste, führte er weiterhin eigene Experimente durch und trug wesentlich zu unserem Verständnis der Wettervorhersage bei, darüber hinaus machte er Entdeckungen zum Verhalten von Gasen und zur Farbenblindheit.

Sein wichtigstes Vermächtnis jedoch waren seine Ergebnisse zu dem, was als »Atomtheorie« bekannt wurde. Während Dalton darüber nachdachte, dass Elemente auf vorhersehbare und regelmäßige Art und Weise miteinander reagieren (beispielsweise teilen sich Verbindungen in bestimmte Mengen ihrer ursprünglichen Elemente auf), entwickelte er die erste Vorstellung von einem »atomaren Gewicht«. 1810 veröffentlichte er eine Liste mit dem atomaren Gewicht von Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenstoff, Schwefel und Phosphor.

Wir verdanken dieser Erkenntnis – dass die einzelnen Atome der jeweiligen Elemente identisch sind und eine festgesetzte Masse haben – die in den darauffolgenden Jahrzehnten erzielten Fortschritte auf dem Gebiet der Chemie, die schließlich zu Mendelejews Periodensystem führten.

EINFÜHRUNG

Nach diesem kurzen Überblick zur Entstehung und der Bedeutsamkeit von Atomtheorie und Periodensystem, begeben wir uns nun auf eine kleine Reise, die uns durch die 118 bisher bekannten Elemente führt, und zwar aufsteigend nach ihrer chemischen Ordnungszahl.

Die Elemente 1 – 56

Wasserstoff

1
H
1,008
Wasserstoff

Kategorie:
Nichtmetall

Ordnungszahl: 1

Farbe: Farblos

Schmelzpunkt:
–259 °C (–434 °F)

Siedepunkt:
–253 °C (–423 °F)

Entdeckt: 1766

Wasserstoff besteht aus nur einem Proton und einem Elektron, und ist somit das Atom mit der einfachsten Struktur überhaupt. Es war eines der ersten Elemente, das nach dem Urknall entstanden ist, und bleibt das am häufigsten vorkommende Element im Universum: Obwohl es auf endlos vielen Sternen verbrennt, wodurch Helium entsteht, besteht das messbare Universum zu mehr als 75 % aus Wasserstoff, und es taucht in mehr Verbindungen auf als jedes andere Element.

Wasserstoff ist ein leichtes, farbloses, leicht entzündliches Gas, das auf unserem Planeten häufig in Form von Wasser vorkommt (das aus zwei Wasserstoffatomen und

einem Sauerstoffatom besteht). Durch die schwachen molekularen Bindungen, die Wasserstoff eingeht, liegt der Siedepunkt von Wasser relativ hoch, sodass es in der Erdatmosphäre in flüssiger Form vorkommen kann, während sich die Wasserstoffverbindungen bei niedrigen Temperaturen anpassen und die Sauerstoffatome zu einer Art Kristallgitter ausdehnen: Die meisten Substanzen haben in fester Form eine höhere Dichte als in flüssiger Form, doch durch diese Gitterbildung ist Eis leichter als Wasser, wodurch sich erklären lässt, dass Eisberge schwimmen.

Auch mit Kohlenstoff geht Wasserstoff Verbindungen zu sogenannten Kohlenwasserstoffen ein, darunter fossile Brennstoffe wie Kohle, Rohöl und Erdgas (Wasserstoff ist ein sehr leicht brennbares Element – wenn irgendwo eine Kerze brennt, liegt das hauptsächlich daran, dass der Wasserstoff aus dem Öl oder Wachs gelöst wird und verbrennt, wenn er in Kontakt mit Sauerstoff kommt). Ohne Wasserstoff gäbe es keine Wärme und kein Licht, da auf der Sonne keine unablässige Kernschmelze stattfinden könnte.

Paracelsus, ein Alchemist aus dem 16. Jahrhundert, beobachtete als Erster, dass sich Bläschen eines entzündlichen Gases bildeten, wenn man Metalle mit starker Säure mischte. 1671 stellte Robert Boyle dies ebenfalls fest, als er Eisenspäne mit Salzsäure mischte (einer Verbindung aus Wasserstoff und Chlor). 1766, beinahe hundert Jahre später, wurde Henry Cavendish klar, dass es sich bei diesem Gas um ein eigenständiges Element handelte, auch wenn er es brennbare Luft nannte und fälschlicherweise als Phlogiston identifizierte. 1781 fand Cavendish heraus,

dass dieses Gas im Brennvorgang Wasser produzierte, so dass er nahelegte, bei dem Sauerstoff, mit dem es sich verbände, handle es sich um »dephlogistierte Luft«.

Phlogiston: Auf dem Holzweg

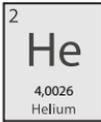
Die Phlogiston-Theorie, die Cavendish auf eine falsche Fährte führte, war die mittlerweile überholte Vorstellung, dass sämtliche brennbaren Stoffe ein feuerähnliches Element enthielten (benannt nach dem altgriechischen Wort für »Flamme«). Die Theorie besagte, dass Stoffe, die Phlogiston enthielten, dephlogistisiert wurden, wenn sie verbrannten. Die Theorie bekam erste Risse, als bewiesen wurde, dass manche Metalle schwerer statt leichter wurden, wenn sie verbrannten, und Lavoisier hebelte die Theorie mehr oder weniger aus, als er mithilfe geschlossener Gefäße bewies, dass jede Verbrennung ein Gas (Sauerstoff) mit messbarer Masse benötigte.

Wasserstoff ist extrem leicht, sodass man ihn in der Luft kaum in Reinform findet (er steigt auf und verschwindet aus der Atmosphäre). Er ist sehr viel leichter als Sauerstoff oder Stickstoff, weshalb die ersten Heißluftballons mit diesem Gas befüllt wurden. Auch bei Zeppelinen wurde es eingesetzt (also Heißluftballons mit festem Gerüst) – doch der anfängliche Boom der Luftschiffahrt Anfang des 20. Jahrhunderts fand 1937 mit dem spektakulären Absturz der *LZ 129 Hindenburg* ein jähes Ende.

Allerdings wird Wasserstoff in einigen NASA-Raketen eingesetzt, auch in den Space-Shuttle-Motoren, die betrieben werden, indem flüssiger Wasserstoff mit purem Sauerstoff verbrannt wird. Auch könnte Wasserstoff der saubere Treibstoff der Zukunft sein und somit fossile Brennstoffe als Autoantrieb ersetzen, entweder direkt oder, was wahrscheinlicher ist, in Form einer Brennstoffzelle, die ausschließlich Wasserdampf als Abgas produzieren würde. Allerdings stehen dem einige Probleme im Weg: Große Mengen eines derart leichtentzündlichen Gases zu verwahren wäre gefährlich, und Wasserstoff wird entweder aus Kohlenwasserstoffen gewonnen, was zu noch mehr Produktion von Treibhausgasen führen würde, oder aus Wasserelektrolyse, für die Elektrizität notwendig ist, die wiederum vermutlich mithilfe fossiler Brennstoffe gewonnen worden ist.

Wasserstoff findet noch viele weitere Anwendungen: Er wird zur Produktion von Ammoniak für Dünger verwendet, um Verbindungen wie Cyclohexan oder Methanol herzustellen (die in der Plastikproduktion und zur Herstellung von Medikamenten gebraucht werden), in der Herstellung von Margarine, Glas und Siliziumchips, um nur einige wenige wichtige Produkte zu nennen.

Helium



Kategorie: Edelgas

Ordnungszahl: 2

Farbe: Farblos

Schmelzpunkt:

–272 °C (–458 °F)

Siedepunkt:

–269 °C (–452 °F)

Entdeckt: 1895

Nahezu alles im Universum, was nicht aus Wasserstoff besteht, besteht aus Helium – alle anderen Elemente ergeben gerade einmal 2 % der Masse des Universums, obwohl sie schwerer sind als diese beiden leichtesten, simpelsten Elemente.

Ungeachtet dessen kommt Helium hier auf der Erde nicht so massenhaft vor – tatsächlich wurde seine Existenz erst 1895 endgültig bewiesen.

Als eines der Edelgase ist Helium das zweitreaktionsunfreudigste Element, sodass es, im Gegensatz zum Wasserstoff, nicht in vielen Verbindungen zu finden ist. Mit Wasserstoff gemeinsam hat es jedoch die Eigenschaft, in reiner Form leichter als Luft zu sein, sodass auch Helium dazu tendiert, aus der Erdatmosphäre aufzusteigen und zu verschwinden. Wir finden Helium in natürlichen Gasvorkommen unter der Erde, wo es durch den Zerfall radioaktiver Elemente wie Thorium und Uran entsteht.

Die Sonne besteht zu etwa 24 % aus Helium: In der extremen Hitze dieses Sterns findet eine Kernschmelze von Wasserstoffnuklei statt, durch die Helium entsteht. So

werden riesige Energiemengen freigesetzt, und potenziell könnte dies ein umweltfreundlicher und unbegrenzter Energielieferant der Zukunft sein, nur sind wir auf der Erde vermutlich noch Jahrzehnte davon entfernt, diesen Kernschmelzprozess künstlich herbeiführen zu können.

Der Micky-Maus-Effekt

Nachdem Helium in Amerika in natürlichen Gasvorkommen gefunden wurde, entstand 1915 in Texas die erste Helium-Fabrik (sie versorgte die Armee mit Gas für ihre Sperrballons). Ab 1919 experimentierte die US-Navy mit verschiedenen Gasmischungen, um dem Problem der Stickstoffnarkose bei Tiefseetauchern beizukommen. In den Aufzeichnungen zu einem 1925 durchgeführten Experiment ist nachzulesen, dass sich die Taucher, die eine Mischung aus Helium und Sauerstoff einatmeten, darüber beschwerten, dass die Stimmveränderung die Kommunikation erschwere. (Die witzige Micky-Maus-Stimme entsteht durch die Schallwellen, die jedes Gas, das leichter ist als Luft, schneller durchdringen). Mit der Zeit wurde die Heliumherstellung ausgebaut, und Partyballons wurden mit dem Gas gefüllt, sodass eine neue Generation von Kindern den Trick mit der witzigen Stimme für sich entdeckte.

Eine Möglichkeit, Elemente zu identifizieren, bietet das sogenannte Spektroskop, ein Instrument, das die unterschiedlich gefärbten Flammen untersucht, die durch die

Verbrennung unterschiedlicher Elemente entstehen, um sozusagen einen »elementaren Fingerabdruck« zu erstellen, in dem das Licht zu farbigen Strahlen gebündelt wird, statt ein ganzes Spektrum zu werfen. Während einer Sonnenfinsternis 1868 bemerkten zwei Astronomen unabhängig voneinander (der Franzose Jules Janssen und der Engländer Norman Lockyer) einige klare Linien im Spektrum der Sonne, die zu keinem bis dato bekannten Element passten. Lockyer schlussfolgerte, es handle sich dabei um ein unentdecktes Element, das er Helium nannte, nach dem griechischen Sonnengott Helios. Die Endung -ium legt nahe, dass er annahm, es handle sich um ein Metall, denn Helium ist das einzige nicht-metallische Element mit dieser Endsilbe. In den folgenden Jahrzehnten wurden keine weiteren Beweise für die Existenz von Helium gefunden, doch Lockyers Annahme wurde 1895 bestätigt, als der Chemiker William Ramsay Spuren von Helium fand, die von einem Stück Uran abgesondert wurden, das mit Säure behandelt worden war. Das Helium hatte sich bereits im Stein gebildet, wurde jedoch freigesetzt, als die Säure teile der Oberfläche auflöste.

Helium ist die Substanz mit dem niedrigsten Siedepunkt überhaupt, sodass es dazu genutzt werden kann, andere Substanzen zu unterkühlen. Es wird beispielsweise im Large Hadron Collider eingesetzt, in supraleitenden Magneten wie MRTs, und um den flüssigen Wasserstoff in einigen NASA-Raketen zu kühlen. (Unterkühlung nennt sich der Vorgang, bei dem die Temperatur einer Substanz unter deren Gefrierpunkt gesenkt wird, ohne

dass sie jedoch fest wird). Manche Airbags enthalten Helium, weil es sich bei einer Dekompression so schnell ausbreitet (wobei auch Stickstoff und Argon zu diesem Zweck verwendet werden).

Es gibt Grund, sich um die Heliumvorkommen auf unserem Planeten zu sorgen. Seit der Privatisierung amerikanischer Aktien in den 1990er-Jahren ist der Marktpreis im Keller, trotzdem ist Helium eine begrenzte Ressource, und die Vorkommen auf unserem Planeten erneuern sich immer nur sehr langsam. Während also niemand bestreiten wird, dass Helium-Ballons Spaß machen, sollte man nicht vergessen, dass das Helium daraus entweichen und die Erdatmosphäre verlassen kann, und sie somit nicht die cleverste Art darstellen, dieses Edelgas zu nutzen.