Jörg Wetterau, Linsengericht

150 Jahre "Periodensystem der Elemente" – ein Rück- und Ausblick

Ende des 17. Jahrhunderts begann mit der chemischen Reindarstellung des weißen Phosphors die große Zeit der Entdeckung der chemischen Elemente. Nachdem die Messkunst in die Chemie Einzug gehalten hatte, konnten die Mengenverhältnisse von Ausgangsstoffen und Endprodukten bei chemischen Reaktionen bestimmt werden. Auf diese Weise gewann man immer mehr Kenntnisse über die Eigenschaften jener Stoffe, die sich auf chemischem Wege nicht mehr teilen lassen, die Elemente.

Antoine de Lavoisier stellte im Jahr der Französischen Revolution 1789 erstmals eine vorläufige Übersicht von 33 Stoffen vor, und schon bald mehrten sich die Kenntnisse dank neuer Analysemethoden wie der Elektrolyse, mit der Humphrey Davy die Erdalkalimetalle als reine Elemente isolierte. Um die Vielfalt der Elemente zu überschauen, ordnete man sie nach ihrem chemischen Verhalten und ihren physikalischen Eigenschaften. Und man entdeckte Gesetzmäßigkeiten, die eine gewisse Verwandtschaft bestimmter Elemente erkennen ließen. Mitte des 19. Jahrhunderts wurden eine Reihe von Ordnungssystemen vorgeschlagen, von denen das von Mendelejew und Meyer etwa zeitgleich vorgestellte Periodensystem das Überzeugendste war und sich als ausbaufähig erwies, um auch neueste Erkenntnisse und neu entdeckte Elemente zu integrieren.

b als große Wandtafel oder in geknickter, ausklappbarer Form im Chemie-Schulbuch – das Periodensystem der Elemente kennt jeder aus dem Chemieun-

terricht in der Schule. Es gibt es auf der Tapete, Duschvorhang oder Kaffeetasse, manche lassen sich ihr Lieblingselement oder das gesamte Ordnungssystem sogar als Tattoo stechen. Jenes faszinierende Ordnungssystem, in dem alle chemischen Elemente in Zeilen und Spalten nach steigender Kernladungszahl (Ordnungszahl) und ähnlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften sortiert werden: vom Wasserstoff mit der Ordnungszahl 1 bis zum schwersten heute bekannten Element, dem Oganesson mit der Ordnungszahl 118.

Das Periodensystem ist ein Eckpfeiler der Naturwissenschaften. Wissenschaftler verwenden es, um die Eigenschaften von noch unbekannten Elementen vorherzusagen, die im Laufe der Zeit in die Tabelle aufgenommen wurden oder noch werden. Das System wurde nicht von Wissenschaftlern erfunden, sondern als naturgegebene Ordnung der Elemente entdeckt. Der russische Chemi-

ker Dmitri Mendelejew und der deutsche
Chemiker Lothar Meyer haben dieses
Ordnungsprinzip unabhängig voneinander und fast zeitgleich erkannt. Beide veröffentlichten ihre Erkenntnisse im Jahr 1869 in wissenschaftlichen Zeitschriften und gelten daher als Väter des Periodensystems der Elemente (PSE), auch wenn Mendelejew gemeinhin die größeren Ver-

Aus Anlass des 150. Geburtstages des PSE hatten die Generalversammlung der Vereinten Nationen und die UNESCO das Jahr 2019 zum *International Year of the Periodic Table of Chemical Elements*, dem Internationalen Jahr des Periodensystems, ausgerufen, dabei aber lediglich Dmitri Mendelejew für das Logo auserkoren (Abb. 1). Hierfür spricht: Am 18. März

dienste zugeschrieben werden [1].



Abb. 1. Logo zum Internationalen Jahr des Periodensystems der chemischen Elemente. Das PSE etablierte sich nach anfänglichen Vorbehalten rasch, weil es eine rational fassbare natürliche Ordnung adäquat abbildet und Vorhersagen noch nicht entdeckter bzw. experimentell realisierter Elemente ermöglicht. Hierzu gehört auch das Element 101 aus der Actinoidenreihe. Es wurde 1955 aus dem radioaktiven Einsteinium (Es) durch Beschuss mit Heliumionen gewonnen und wurde Mendelejew zu Ehren Mendelevium (Md) genannt [2].

1869 ließ Dmitri Iwanowitsch Mendelejew (1834–1907) der Russischen Chemischen Gesellschaft eine Mitteilung zu einer geplanten Veröffentlichung überbringen, mit dem Arbeitstitel: "Die Abhängigkeit der chemischen Eigenschaften der Elemente vom Atomgewicht". Dies gilt als Geburtsstunde des Periodensystems, denn in der bereits im April folgenden Publikation findet sich erstmals die Wortschöpfung "Periodensystem der Elemente". Darin stellte Mendelejew zudem die wegweisende These auf: Das Atomgewicht bestimmt den Charakter eines Elements.

In Deutschland begleitete vor allem die Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) das Jubiläum ganzjährig mit verschiedenen öffentlichen Veranstaltungen und zahlreichen Veröffentlichungen und Vorträgen zur Geschichte und aktuellen Weiterentwicklung des PSE sowie zur Entdeckung der verschiedenen Elemente. Höhepunkt war das Wissenschaftsforum Chemie im September 2019 in Aachen. Dabei setzten sich einige Fachvorträge zur Geschichte des Periodensystems auch kritisch mit der Frage auseinander, ob denn das Jubiläumsjahr tatsächlich gut gewählt war. Denn bereits vor 1869 und auch später haben zahlreiche Chemiker und Physiker zur Entdeckung der Periodizität der Eigenschaften chemischer Elemente und zur Weiterentwicklung des Periodensystems beigetragen.

Eine kurze Geschichte der Entdeckung der Elemente

Das Nachdenken über die Natur hat bereits in frühen Zeiten zu Vorstellungen eines Aufbaus der stofflichen Welt aus elementaren Bausteinen geführt. Aus der Kombination einer begrenzten Zahl solcher Urstoffe sollte die ganze Vielfalt zu erklären sein. Über Jahrhunderte prägend wurde in Mitteleuropa die von Aristoteles populär gemachte Lehre der vier Elemente Feuer, Wasser, Erde und Luft (vgl. NR 12/2016, S. 622). Auch spekulierten die alten Griechen - allen voran Demokrit - über unteilbare Teilchen, die Atome, was am Ende zu der Vorstellung führte, dass Elemente aus jeweils spezifischen Atomsorten bestehen müssen. Einer der ersten neuzeitlichen Wissenschaftler, die in diese Richtung vorstießen, war der englische Naturforscher Robert Boyle (1627 - 1692). In einer 1661 unter dem Titel The Sceptical Chymist veröffentlichten Schrift definierte er chemische Elemente als Stoffe, "die weder aus anderen Substanzen noch auseinander entstanden sind, sondern die Bestandteile bilden, aus denen gemischte Stoffe bestehen".

Doch bis zur Charakterisierung chemischer Elemente war es noch ein weiter Weg, denn die spekulativen Vorstellungen, die durch die Kanonisierung der aristotelischen Lehre dominierten, mussten erst durch empirische Forschungen überwunden werden. Kennzeichen der neuzeitlichen Chemie, die aus der Alchimie hervorging und sie schließlich überwand, waren präzise Messungen. Auf diese Weise gewann man Einblick in die stoffliche Zusammensetzung von Verbindungen und konnte aus den Gewichts- und Volumenverhältnissen von Reaktanten und entstehenden Produkten stöchiometrische Verhältnisse bestimmen und damit auch relative Massen von Elementen berechnen.

1789 stellte der Mitbegründer der Chemie, Antoine Laurent de Lavoisier (1743–1794), eine erste Übersicht mit 33 "einfachen Substanzen" in seinem Hauptwerk *Traité élémentaire de chimie* vor und ordnete diese auf Basis ihrer chemischen Eigenschaften



Abb. 2. Die berühmte ikonische Darstellung zeigt den Alchimisten Hennig Brand bei seiner Entdeckung des weißen Phosphors im Jahre 1669. Ausschnitt aus dem Gemälde *The Alchimist Discovering Phosphorus* (1771) von Joseph Wright of Derby (1734 – 1797). [Derby Museum and Art Gallery | PD]

in vier Gruppen: Gase, Nichtmetalle, Metalle und Erden. Lavoisier war sich der Vorläufigkeit seiner Liste bewusst, und ihm blieben auch Irrtümer nicht erspart. So führte er Licht und Wärme als Elemente auf und sah Aluminiumoxid, Kalk und Quarz als Elemente an. Immerhin nannte er 21 valide Elemente, darunter Antimon, Blei, Kohlenstoff, Kupfer, Sauerstoff, Wasserstoff und Zinn.

Die grundlegende Idee, die ihn und alle Element-Entdecker leitete, war, dass chemische Elemente Reinstoffe sind, die mit chemischen Methoden nicht in weitere Komponenten zerlegt werden können [2].

Genaue Messungen bei chemischen Experimenten ließen den englischen Naturforscher und Wegbereiter der modernen Chemie, John Dalton (1766-1844), das Gesetz der multiplen Proportionen entdecken: Bilden zwei Elemente verschiedene Verbindungen, so stehen die Massenverhältnisse, mit denen die Elemente in diesen Verbindungen auftreten, zueinander im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen. Dalton sah darin einen Hinweis auf die Existenz von Atomen und entwickelte darauf aufbauend 1804 ein erstes neuzeitliches Atommodell. Ihm zufolge habe man sich die Atome als kleine Kugeln vorzustellen, die je nach Element verschieden sind. 1805 veröffentlichte er zudem eine erste Tabelle mit relativen Atommassen - eine wichtige Voraussetzung zur späteren Aufstellung des Periodensystems der Elemente. Er schlug auch Kürzel zur Benennung von Elementen und chemischen Verbindungen vor, die sich allerdings nicht durchgesetzt haben.

Erfolgreicher war in dieser Hinsicht der Schwede Jakob Berzelius (1779–1848), der zum führenden Chemiker seiner Zeit aufstieg. Für die Bezeichnung der Elemente führte er die chemische Symbolsprache in Form von Buchstabenkürzeln ein, die auch im Periodensystem verwendet wird.

① DIE ENTDECKER DER ELEMENTE

Wer hat die meisten Elemente entdeckt?

Natürliche Elemente:

- Sir Humphry Davy (1778 1829, Chemiker): 7 Elemente: Barium, Bor, Calcium, Natrium, Kalium, Magnesium, Strontium
- Jöns Jakob Berzelius (1779 1848, Begründer der modernen Chemie): 6 Elemente: Cer, Selen, Silicium, Thorium, Titan, Zirconium
- William Ramsay (1852 1916, Chemiker): **5 Elemente** in Form der neuen Hauptgruppe der Edelgase: Argon, Helium (Erstnachweis auf der Erde), Krypton, Neon, Xenon

Künstliche Elemente:

- Glenn T. Seaborg (1912 1999, Kernphysiker): 9 Elemente (1940 – 1958): Americium, Berkelium, Californium, Curium, Einsteinium, Fermium, Lawrencium, Mendelevium, Plutonium
- Peter Armbruster et al. (*1931, Kernphysiker): 6 Elemente (1981 – 1996 am Linearbeschleuniger UNILAC/OZ 107 – 112): Bohrium, Copernicum, Darmstadtium, Hassium, Meitnerium, Roentgenium

Zu Berzelius' Zeit waren rund 50 Elemente bekannt (vgl. Abb. 5), worin sich ein enormer Erkenntniszuwachs seit Lavoisiers Zeiten widerspiegelt. Natürlicherweise kommen nämlich nur 14 Stoffe mehr oder weniger häufig elementar vor: Gold, Silber, Platin, Eisen, Kupfer, Kohlenstoff (Graphit, Diamant), Schwefel, Quecksilber sowie die Elemente Blei, Selen, Tellur, Arsen, Antimon und Bismut, wenn man von den gasförmigen Elementen absieht. Die Elemente waren primär durch Praktiker entdeckt worden. Viele traten beim Schmelzen von Erzen in Erscheinung; hierzu gehört das seit der Antike bekannte Blei, das nur sehr selten in gediegener Form vorkommt. Im Laufe der mittelalterlichen Bergbaugeschichte waren, vor allem im Erzgebirge, in Erzen geringe Beimengungen weiterer Metalle entdeckt worden, so Cobalt und Nickel, die nach Berggeistern benannt wurden. Die spektakuläre Entdeckung des weißen Phosphors 1669 durch Hennig Brand aus Urin (Abb. 2) läutete das Zeitalter der Entdeckung der Elemente ein. 1751 waren bereits 31 bekannt. In den folgenden 50 Jahren kamen noch 13 weitere hinzu, darunter Wasserstoff, Titan, Chrom, Mangan, Yttrium, Zirconium, Molybdän, Wolfram, Uran, Stickstoff, Sauerstoff, Chlor und Tellur.



Abb. 3. Der berühmte Chemiker Justus von Liebig um 1866. Im Jahr 1824 war er knapp davor, das Element Brom zu entdecken, das er als eine lodverbindung fehlinterpretierte. [NIH | PD]

Zwischen 1800 und 1830 wurden weitere 22 Elemente entdeckt: Vanadium, Tantal, Rhodium, Palladium, Cadmium, Osmium, Iridium und Thorium, die im Periodensystem Nebengruppenelemente (s. u.) darstellen, sowie Lithium, Beryllium, Natrium, Magnesium, Kalium, Calcium, Strontium, Barium, Bor, Aluminium, Silicium, Selen, Iod und Brom.

Als Element-Entdecker machte sich zu Beginn des neunzehnten Jahrhunderts vor allem Humphrey Davy (1778–1829) einen Namen (vgl. Textkasten 1). Er setzte die Voltai'sche Säule für Oxidations- und Reduktionsreaktionen ein und schuf damit die Grundlage für die Elektrolyse. Auf diese Weise entdeckte er Natrium und Kalium, deren Existenz von Lavoisier vermutet worden war, und isolierte aus den von diesem als "Erde(n)" bezeichneten Stoffen Kalk (Chaux), Magnesia (Magnésie) und Baryt (Baryte) die Erdalkalimetalle Calcium, Magnesium, Barium und Strontium [2].

Dass es dem berühmten Chemiker Justus von Liebig (1803–1873, Abb. 3) versagt blieb, in die Annalen der Elemente-Entdecker einzugehen, dürfte ihn zeitlebens gegrämt haben: 1824 hatte er bei der Untersuchung einer Salzsole eine neue Substanz entdeckt, die er als Iodchlorid deutete. In Wirklichkeit handelt es sich um Brom, das 1826 von dem französischen Chemiker Antoine-Jerome Balard aus Meeresalgen gewonnen und als neues Element erkannt wurde. 13 Jahre später musste sich Liebig eingestehen, dass ihn seine nachlässige Analyse um die Entdeckung eines neuen Elements gebracht habe [3].

Wie ein Kartenspiel und ein Traum zum Periodensystem führten

Im legendären Jahr der Entdeckung des Periodensystems waren 63 der natürlicherweise vorkommenden 94 Elemente bekannt. Auf dieser Grundlage konstruierte Dmitri Mendelejew (Abb. 4) sein Ordnungssystem.

Er war damals – also im Frühjahr des Jahres 1869 – gerade erst 35 Jahre alt und ein nur in Fachkreisen bekannter Chemiker. Seit 1865 war er Professor für technische Chemie und seit 1867 Professor für reine Chemie an der Universität von Sankt Petersburg. Bereits 1868 machte er sich in Russland einen Namen mit seinem Lehrbuch *Grundlagen der Chemie*, das zu einem Erfolg wurde. Bei dessen Vorbereitung hatte er sich schon grundlegende Gedanken über die Ordnung der Elemente gemacht, wobei er sich, wie er selbst sagte, "nicht durch zufällige, gleichsam instinktive Beweggründe" leiten ließ, sondern durch "ein genau bestimmtes Prinzip" [4].

Unsterblich aber machte ihn das Jahr 1869. Vor diesem epochemachenden Jahr studierte Mendelejew in Sankt Petersburg und verbrachte einige Zeit für seine Studien auch im Ausland. Sein Weg führte ihn für einige Lehrmonate nach Deutschland, unter anderem studierte er bei Robert Bunsen (1811–1899) in Heidelberg. Wie es der Zufall wollte, nahm er in dieser Zeit am Chemiker-Kongress in Karlsruhe teil, der für ihn ein Wendepunkt im Leben werden sollte. Er selbst bezeichnete den Kongress, der vom 3. bis 5. September 1860 stattfand und die führenden Chemiker zusammenführte, als einen Meilenstein auf dem Weg zur Entdeckung des Periodensystems.

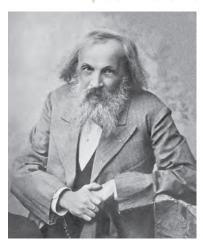


Abb. 4. Dmitri Iwanowitsch Mendelejew (1834 – 1907) hat durch geschickte Positionierung (heute würde man von Marketing sprechen) dafür gesorgt, dass sein Periodensystem "das Rennen" machte und einen festen Platz in der Chemie gefunden hat. Photographie aus den 1890er Jahren, publiziert von der Photographischen Gesellschaft Berlin, 1910.

Ein wichtiges Ziel des Kongresses war es, eine verbindliche Ordnung in die mittlerweile verwirrende Vielfalt der Elemente zu bringen. Auch wollte man zu einer Vereinheitlichung von Anga-

ben zur Atommasse (damals durchweg und auch heute oft – nicht korrekt – als Atomgewicht bezeichnet) kommen, für die es verschiedene Vorschläge gab (vgl. Abb. 5.).

Neben Mendelejew war auch Lothar Meyer Teilnehmer dieses wegweisenden Kongresses. Beide schienen erkannt zu haben, dass die Atomgewichte der Schlüssel zur Ordnung der Elemente ist. Mendelejew soll nach diesem Kongress überzeugt gewesen sein, dass es in der Welt der Elemente eine verborgene Ordnung, eine "Periodizität" geben müsse. Er schrieb: "Die Idee von der Periodizität von Eigenschaften bei ansteigendem Atomgewicht der Elemente war schon damals vor meinem inneren Auge aufgetaucht" [4, 5].

Auch die damals "nur" 63 Elemente (ohne das ein Jahr zuvor im Sonnenspektrum entdeckte Helium) zu ordnen, war eine intellektuelle Herausforderung. Um sich einen Überblick zu ver-

A	B	C	D	E	F	
Sauerstoff	0	8	100	8,01	100	
Wasserstoff	H	1	12,5	0,50	6,2398	
Kohlenstoff	C	6	75	6,13	76,44	
Boron	В	10,5	131,25	10,91	136,20	
Phosphor	P	31,4	392,5	15,72	196,14	
Schwefel	S	16	200	16,12	201,17	
Selen	Se	40	500	39,63	494,58	
lod	I	126	1575	63,28	789,75	
Brom	Br	78.4	980	39,20	489,75	
Chlor	CI	35,4	442,5	17,74	221,33	
Elnor	F	18,7	233,75	9,37	116,90	
Stickstoff	IN	14	175	7,09	88,52	
Kalium	K	39,2	490	39,26	489,92	
Natrium	Na	23,2	290	23.31	290,90	
Lithium	L	6,4	80	6,44	80,33	
Baryum	Ba	68,6	857,5	68,66	856,88	
Strontium	Sr	44	550	43,85	547,29	
Calcium	Ca	20,5	256,25	20,52	256,02	
Magnium	Mg	12,7	158,75	12,69	158,35	
Cerium	Ce	46	575	46,05	574,70	
Yttrium	Y	32,2	402,5	32,25	402,51	
Glycium	G	17,7	221,25		331,26	
Alumium	AI	13.7		13,72	171,17	
Thorium	Th	59,6		59,65	744,90	
Zirconium	Zr	22,4		33,67	420,20	
Silicium	Si	14,8		22,22	277,31	

Abb. 5. Unterschiedliche Bestimmung der Atomgewichte in einer Übersicht aus dem Jahr 1840. A: Elementname, B: Kürzel nach Berzelius, C und E relative Atommasse bezogen auf Wasserstoff (s = 1 bzw. 0,5, Wasserstoff als "Doppelatom", nach Berzelius), D und F relative Atommasse bezogen auf Sauerstoff = 100. Bestimmungen im Wesentlichen von Berzelius. Ausschnitt aus einer Tabelle mit insgesamt 54 aufgeführten Elementen. Aus [6]

schaffen und verschiedene Möglichkeiten durchzuspielen, hat Mendelejew nach eigener Darstellung eine Art chemisches Kartenspiel ersonnen. Jedes Element erhielt ein Kärtchen, auf dem das chemische Symbol, das Atomgewicht und die Eigenschaften vermerkt waren.

Beim richtigen Zuordnen seiner Karten half ihm offensichtlich sein großes Wissen über die chemischen Eigenschaften der einzelnen Elemente. Und möglicherweise – so die Legende – auch ein Traum, den er bei einem kurzen Schlaf gehabt hat [4]: "Im Traum sah ich einen Tisch, auf dem sich alle Elemente wie erforderlich zusammenfügten", erinnerte sich Mendelejew in seinen eigenen Aufzeichnungen [7].

Man darf annehmen, dass er mit seinen Karten zahlreiche erfolglose Ordnungsmöglichkeiten durchspielte, um am Ende eine schlüssige Struktur in das System der Elemente zu bringen. Am Ende resultierte eine Tabelle, in der er die Elemente in senkrechten Spalten nach ansteigender Atommasse auflistete. In den waagerechten Zeilen standen Elemente mit ähnlichen

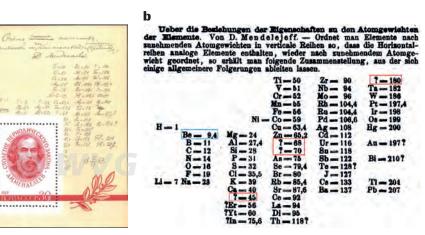


Abb. 6. Von dem Entwurf zur Veröffentlichung. – **a.** Die historische Niederschrift des ersten Periodensystems der Elemente vom 17.2.1869 auf einem Briefmarkenblock der Sowjetunion, 1969. – **b.** Die 1869 publizierte Tabelle mit den 63 bekannten und 4 hypothetischen Elementen (rot umrahmt). Den Wert des Atomgewichts von Be hatte Mendelejew aufgrund von theoretischen Überlegungen von rund 14 auf 9,4 "korrigiert", was sich später als zutreffend erwies. Aus [8]

Eigenschaften ("chemische Familien"). Mendelejew wählte also zunächst noch eine andere, um 90° gedrehte Aufstellung der Elemente als jene, die wir heute in jedem Lehrbuch der Chemie finden können. Der erste Entwurf war eine Tabelle mit 19 Zeilen und sechs Spalten (Abb. 6a). Schließlich betitelte er das Aufgeschriebene in Russisch und Französisch mit "Versuch eines Systems der Elemente, begründet auf deren Atomgewicht und chemischen Gemeinsamkeiten", und datierte es mit dem 17.2.1869 [4]. Der endgültige Titel der im April 1869 parallel auf Russisch und auf Deutsch erschienenen Arbeit lautete: *Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente* (Abb. 6b) [8].

Erst später ordnete Mendelejew seine damalige Darstellung der Elemente noch einmal neu mit senkrecht angeordneten Gruppen und waagerecht, nach steigender Atommasse angeordneten Elementen. Nach Entdeckung der Edelgase kam später eine weitere Gruppe hinzu, in der nun auch das zuvor exotische "Sonnenelement" Helium aufgenommen wurde. Diese Form des Periodensystems bezeichnet man auch als Kurzform des Perio-

densystems. In dieser Darstellung sind z.B. in der ersten Gruppe neben den Alkalimetallen auch die sogenannten Münzmetalle (Cu, Ag, Au) aufgeführt, die sich ähnlich verhalten (s. u. Abb. 12).

Seine Veröffentlichung von 1869 mit der ersten tabellarischen Anordnung der Elemente [8] zählt zu den meistzitierten naturwissenschaftlichen Publikationen. Die Tabelle war naturgemäß bei weitem noch nicht perfekt. So hatte Mendelejew Cobalt und Nickel an derselben Stelle positioniert. Höchst bemerkenswert war aber, dass seine Übersicht vier spekulative Atommassen (45, 68, 70 und 180) enthielt, die er mit Fragezeichen versehen hatte (Abb. 6b). Damit deutete er die Existenz unbekannter bzw. noch nicht entdeckter Elemente an und war daher seinem deutschen "Kontrahenten" Lothar Meyer visionär voraus.

Aus wissenschaftshistorischer Sicht ist zu vermerken, dass Mendelejew in seiner Erstveröffentlichung noch nicht vom "Periodischem Gesetz" sprach. Dieser Begriff findet sich erst in einer im Dezember 1870 abgeschlossenen Abhandlung, die er im Journal der Russischen Chemischen Gesellschaft veröffentlichte [9]. Übersetzt lautet der Titel: "Das natürliche System der Elemente und seine Anwendung zur Vorhersage der Eigenschaften einiger Elemente". Ohne Frage hätte man auch diese Publikation zum Anlass eines Jubiläumsjahres wählen können.

Pioniere, Wegbegleiter

Wie bei vielen wissenschaftlichen Entdeckungen und konzeptionellen Entwürfen, die wir als Durchbruch deuten, hatte auch Mendelejew wichtige Wegbereiter. Im Gefolge von Lavoisiers erster Übersicht der Elemente taten sich vor allem deutsche und englische Wissenschaftler hervor. Als einer der Pioniere des PSE gilt Johann Meinecke (1781 - 1823), ab 1814 Professor für Technologie an der Universität Halle, der schon 1819 in seiner Abhandlung "Ueber den stöchiometrischen Werth der Körper, als ein Element seiner chemischen Anziehung" über sogenannte Diaden-Paare der Elemente schrieb und diese wegen ihres ähnlichen chemischen Verhaltens "Familien der Sippschaften" nannte [10].

Diese Diadenregel entwickelte Johann Wolfgang Döbereiner (1780 - 1849, Abb. 7) weiter zu seiner berühmten Triadenregel.



Abb. 7. Johann Wolfgang Döbereiner - der "Großvater des Periodensystems der Elemente". Der mit Goethe befreundete Chemiker lehrte in Jena Chemie, Technologie und Pharmazie und forschte über die katalytische Wirkung der Platinmetalle. Berühmt wurde er durch die Erfindung seines Feuerzeugs: Eine über ein Ventil fein regulierbare Reaktion von Zink mit verdünnter Schwefelsäure lässt Wasserstoff entstehen, der sich an der Luft unter katalytischer Vermittlung von fein verteiltem Platin entzündet. [Entwurf Stauf/Deutsche Post, DDR 1980]

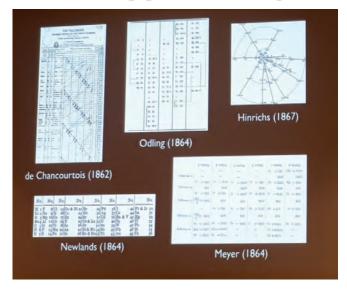


Abb. 8. Verschiedene Vorschläge, die Vielfalt der Elemente nach den ihnen innewohnenden Eigenschaften zu ordnen und übersichtlich darzustellen. Von den hier gezeigten Arbeiten kannte Mendelejew nur die von Odling [12]. [Photo Wetterau]

Diese legte er 1829 in seiner Schrift "Versuch zu einer Gruppierung der elementaren Stoffe nach ihrer Analogie" [11] dar. Ihm gelang es, ein Ordnungsprinzip für Elemente zu finden, das ebenfalls schon Vorhersagen noch unbekannter Elemente zuließ. Döbereiner fand in Dreiergruppen von Elementen - den Triaden - einen Zusammenhang zwischen dem Äquivalentgewicht (Äquivalentgewicht x Wertigkeit ergibt das Atomgewicht) und den chemischen Eigenschaften. Ihm gelang es, mit seiner Methodik des Triadensystems immerhin 30 der damals 53 bekannten Elemente einzuordnen, beispielsweise die Alkalimetalle (Lithium, Natrium, Kalium), die Erdalkalimetalle (Calcium, Strontium, Barium), die Salzbildner (Chlor, Brom, Iod) und die Säurebildner (Schwefel, Selen, Tellur). Die Gesetzmäßigkeit (die er bereits 1817 entdeckte) besteht neben dem ähnlichen chemischen Verhalten u.a. darin, dass der Mittelwert der Atommasse des leichtesten und des schwersten Elementes einer Triade in etwa der Atommasse des mittleren Elements entspricht. Johann Wolfgang Döbereiner legte mit der Triadenregel den Grundstein für die Entwicklung des Periodensystems. Er deckte damit eine gesetzhafte Ordnung auf und wies einen erfolgversprechenden Weg, wie man Elemente systematisieren kann. Man darf ihn daher durchaus als Großvater des Periodensystems bezeichnen.

Neben Döbereiner leisteten auch andere bedeutende Pioniere Beiträge, so dass Michael D. Gordon (Princeton University) in seinem Vortrag, den er auf Einladung der Gesellschaft Deutscher Chemiker im September 2019 in Aachen hielt, monierte, dass das Jubiläum zu spät komme. Namentlich nannte er neben dem bereits erwähnten Lothar Meyer vier weitere Chemiker, die mit verschiedenen Ansätzen Ordnung in das System der Elemente gebracht haben. Der russische Gelehrte war also nicht der erste, wenn auch der erfolgreichste Pionier des Periodensystems (Abb. 8):

• Der französische Chemiker und Geologe Alexandre de Chancourtois (1819-1886) erkannte als Erster eine auffallende

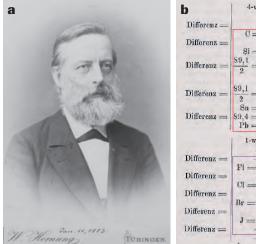
Periodizität bei den chemischen Elementen und entwickelte ein Ordnungssystem, in dem die Elemente entsprechend ihrer Atomgewichte schraubenförmig auf einen Zylinder eingetragen wurden. Auf diese Weise tauchten jeweils Elemente mit ähnlichen Eigenschaften senkrecht übereinander auf [4].

- 1864 präsentierte der britische Chemiker William Odling (1829–1921) einen ersten Vorläufer des PSE in Form einer Tabelle, in der die Elemente bereits in Gruppen nach auffälligen Ähnlichkeiten geordnet wurden [4].
- Fast schon musikalisches Talent bewies der englische Chemiker John Newlands (1837 1898), der das Gesetz der Oktaven in die Elementsystematik einführte. Er hatte bei seinen Untersuchungen festgestellt, dass bei einer Anordnung der Elemente nach aufsteigendem Atomgewicht nach jeweils sieben Elementen ein Element folgte, das wieder dem Anfangselement der Reihe glich. Angelehnt an die Musiktheorie nannte er diese Abfolge daher passend "Oktaven-Gesetz" [12].
- Der im dänischen Lunden geborene und später in die USA emigrierte Gustavus Detlef Hinrichs (1836–1923) schlug ein Periodensystem in spiralförmiger Anordnung vor, um die chemische Verwandtschaft wiederzugeben [13].

Unbestritten sind natürlich die Verdienste des in Varel (Oldenburg) geborenen deutschen Chemikers und Arztes

Lothar Meyer (1830–1895, Abb. 9), der in einem Atemzug mit Mendelejew zu nennen ist, aber bedauerlicherweise von der UNESCO im Jubiläumsjahr vernachlässigt wurde. Wie Dmitri Mendelejew untersuchte er in einer Abhandlung (Natur der Atome: Gründe gegen ihre Einfachheit) analoge Elementgruppen und stellte darin schon 1864 fest, dass deren Atomgewichtsdifferenzen konstant sind. Seinem Naturell entsprechend schrieb er aber dazu: "...ganz sicherlich ist man nicht berechtigt, wie das nur zu oft geschehen ist, um einer vermeintlichen Gesetzmäßigkeit willen die empirisch gefundenen Atomgewichte willkürlich zu corrigieren und zu verändern, ehe das Experiment genauer bestimmte Werthe an ihre Stelle gesetzt hat" [14].

Lothar Meyer war im Gegensatz zu Mendelejew kein Freund von Vorhersagen. Er konnte die Elemente in seinem System zwar treffender zuordnen und mit seinem System die Periodizität der wiederkehrenden Eigenschaften der Elemente besser darstellen, doch ließ er die Lücken ungefüllt. In seiner Abhandlung "Die Natur der chemischen Elemente als Funktion ihrer Atomgewichte" veröffentlichte er in Liebigs Annalen der Chemie 1870 eine verbesserte Anordnung der Elementtabelle in kurzperiodischer Form. Dabei ging er in einigen Punkten über die 1869 von Mendelejew veröffentlichte Form hinaus. Meyer fand bei den Atomvolumina der Elemente Gesetzmäßigkeiten, die es ihm ermöglichten, die vom russischen Chemiker falsch positio-



)	4-we	rthig	3-	wertl	hig	2-we	rthig
Differenz =	1					W. C-	
Differenz =	0=	16,5			14,04 16,96		16,00 16,07
	8i — 89,1	28,5		=	31,0	8 =	32,07
Differenz =	2 =	44,5			44,0		46,7
	89,1	-	As=	=	75,0	8e ==	
Differenz =	2	44,5	100		45,6		49,5
Differenz ==	89.4 = 3	$117,6$ $2 \cdot 44,7$ $207,0$	87,4 =	= 2 .		Te =	128,3
	1-wer	thig	1-we	rthig	.	2-wertl	nig
Differenz ==	_	100	Li=	16	,02		14,7)
Differenz ==		16,46	Na ==	16	,08		16,0
Differenz ==		44,51	K=	46	,13 ,3		40,0 47,6
Differenz ==		46,8	Rb =	47			87,6 49,5
Differenz =	J=1	26,8	0s = (71 = 2)	133		Ba = 1	37,1
			(T1 ==	204	(3)	-	

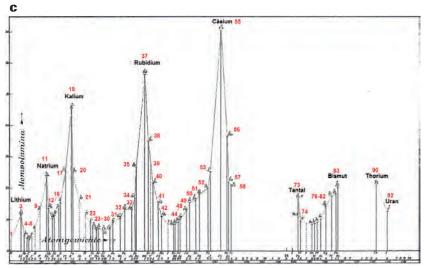


Abb. 9. Lothar Meyer (1830 – 1895): Der deutsche Chemiker und Arzt erdachte eine ähnliche Systematik wie Mendelejew, war aber nicht so mutig und visionär wie dieser. - a. Portrait von 1883. [Photographie von Wilhelm Hornung]. - b. Meyers 1864 publizierte systematische Auflistung der Elemente nach Atomgewichten und Wertigkeit. Die Differenz der Atommassen untereinanderstehender Elemente zeigt im Vergleich mit den benachbarten Reihen weitgehende Übereinstimmung. Die farbigen Umrandungen kennzeichnen die Hauptgruppen 4-6 (obere Reihe) und 7, 1,2 untere Reihe) des heutigen Periodensystems. Verändert aus [14], in Ostwald's Klassiker der exakten Naturwissenschaften. - c. Die von Meyer aufgedeckte Periodizität der Atomvolumina (Ordinate) in Abhängigkeit von den Atomgewichten (Abszisse). Eine vergleichbare Darstellung wurde 1870 publiziert [15]. In der hier gezeigten Abbildung von 1890 [16] sind die Elemente mit den maximalen Volumina namentlich genannt und die Ordnungszahlen des heutigen Systems rot eingetragen. Nicht aufgenommen sind die Edelgase (Elemente 2, 10, 18, 36, 54). Mit einem Fragezeichen versehene Lücken finden sich bei Element 43 (Technetium, Nachweis 1937) und bei Element 75 (Rhenium, Nachweis 1925). Das radioaktive Element Protactinium (91) wurde nicht "vorgesehen"; es wurde 1913 nachgewiesen.

nierten Elemente Gold, Quecksilber, Thallium und Blei richtig einzuordnen (Abb. 9b: Elemente 79–82) [15,16].

Im Gegensatz zu Mendelejew fehlte Meyer möglicherweise der Mut, über die bestehenden Erkenntnisse der periodischen Anordnung der Elemente hinaus eine gesetzmäßige Ordnung zu erkennen. Der russische Chemiker hingegen formulierte in seiner Veröffentlichung 1869 eine wesentliche These: "Das Atomgewicht bestimmt den Charakter eines Elements". Er wagte darin – intuitiv auf Analogien und den Gesetzescharakter seiner Entdeckung vertrauend – Atomgewichte zu "korrigieren" und die Entdeckung neuer Elemente mit zu prognostizieren (Abb. 6b).

In seiner Veröffentlichung im Journal der Russischen Chemischen Gesellschaft [9] berücksichtigte Mendelejew auch die Wertigkeit der Elemente und gab präzise Prognosen über die Eigenschaften noch nicht entdeckter Elemente – mit Erfolg, wie sich eindrucksvoll in den folgenden Jahren bestätigen sollte.

Der Durchbruch des Periodensystems

Nach Publikation seiner grundlegenden Ideen arbeitete Mendelejew weiter an der Verbesserung des Periodensystems. In der 1871 erschienenen fast 100 Seiten umfassenden Abhandlung "Die periodische Gesetzmäßigkeit der Elemente" in den Annalen der Chemie und Pharmacie [17], führte er seinen Grundsatz aus, dass die Eigenschaften der Elemente in naturgesetzlicher Weise periodisch von deren Atomgewichten abhängen. Dieses, "sein Naturgesetz" hatte rund 50 Jahre Geltung, bis die Entdeckung der Radioaktivität (1896) durch Louis Becquerel (1852–1908) eine konzeptionelle Neufassung notwendig machten.

Aus heutiger Sicht mag es verwundern, dass Mendelejews Periodensystem nicht sofort einhellige Zustimmung fand. Viele, darunter auch Robert Bunsen, standen der systematischen, aber abstrakten Anordnung der Elemente distanziert gegenüber und erkannten darin keine Gesetzmäßigkeit. Das Ordnungssystem fand daher nur zögerlich Einzug in die Lehrbücher der Chemie, ausgenommen seinem eigenen, das stets aktualisiert wurde [4]. Bis 1890 nahm erst jedes fünfte Lehrbuch das Periodensystem auf, bis 1910 war es aber schon die Hälfte. Zu diesem Umschwung kam es, als man die von Mendelejew postulierten Elemente entdeckte, und deren prognostizierte Eigenschaften bestätigt fand.

Für die Benennung der vorausgesagten Elemente wählte Mendelejew in seiner Publikation von 1871 den in der betreffenden Spalte darüber stehenden Namen und versah ihn mit der Vorsilbe "Eka". Entsprechend bezeichnete er die bereits in seiner ersten Publikation als Leerstelle vorgesehenen und mit mutmaßlichen Atommassen von 45, 68 und 70 vermerkten Elemente (vgl. Abb. 6b) als Ekabor, Ekaluminium und Ekasilicium [17].

Und tatsächlich wurden diese Elemente sukzessive entdeckt:

- Ekaaluminium 1875 von Paul Émile Lecoq de Boisbaudran, der es Frankreich zu Ehren als Gallium bezeichnete.
- Ekabor 1879 von Lars Fredrik Nilson, der es zu Ehren von Skandinavien Scandium benannte, und schließlich
- Ekasilicium 1886 von dem Deutschen Clemens Winkler, der dieser Tradition folgte und den Namen Germanium wählte (Textkasten 2).

Die Tatsache, dass Germanium in vielen Eigenschaften wie Farbe, Dichte oder Atomvolumen nahezu exakt mit den Vorhersagen von Mendelejew zum Ekasilicium übereinstimmte, war der überzeugende, schlagende Beweis für die Richtigkeit und Stimmigkeit des Periodensystems der Elemente. Winkler sah darin "die Lehre der Periodizität der Elemente" bestätigt und sprach von einem "mächtigen Schritt ins Reich der Erkenntnis" [4].

Selbst die Entdeckung des Edelgases Argon 1894 durch William Ramsey (1852–1916), ließ das PSE nur kurz erbeben. Das neue Element konnte zwar zunächst nicht sinnvoll ins System eingeordnet werden, doch in schneller Folge wurden auch Krypton, Xenon und Neon isoliert und beschrieben, und so schälte sich die neue, achte Hauptgruppe, die Edelgase, heraus, die Mendelejew 1903 zunächst als "Nullte Gruppe" (Inertgase) in sein Periodensystem einfügte. Auch das bereits 1868 im Sonnenspektrum entdeckte Helium fand nun seinen Platz. Wiederum war es Ramsey, der dieses Edelgas 1895 erstmals auf der Erde (durch Erhitzen von Uraninit) nachwies.

Insgesamt hat Mendelejew 18 Elemente vorhersagt, von denen allerdings "nur" neun gefunden und bestätigt werden konnten. Seine als Coronium und Newtonium vorhergesagten Elemente, die beide leichter als Wasserstoff sein sollen, wurden bislang nicht gefunden und werden es vermutlich auch nie. Hier irrte der "Vater des Periodensystems" also einmal ausnahmsweise.

Später kam es zu einem Prioritätsstreit zwischen Meyer und Mendelejew; beide veröffentlichten schließlich 1880 ihre Version über die Geschichte des Periodensystems in den Berichten der Deutschen Chemischen Gesellschaft [18].

Ob sich Mendelejew und Meyer beim Karlsruher Chemiker-Kongress 1860 begegnet sind, ist nicht verbrieft. Immerhin haben sich die beiden entscheidenden Konstrukteure des Periodensystems zumindest einmal persönlich gesehen: Es gibt eine Photo-

② ELEMENTE UND IHRE NAMEN

- Himmelskörper: Helium, Uran, Neptunium, Plutonium
- Kontinente: Americium, Europium
- Länder ("patriotische Elemente"): Francium, Gallium, Germanium, Polonium, Nihonium (von "Nihon" = Japan), Scandium
- Städte: Hafnium (Kopenhagen), Holmium (Stockholm), Lutetium (Paris), Moscovium
- Forschungszentren: Vereinigtes Institut für Kernforschung, Dubna, 120 km nördl. von Moskau, Russland (SU): Dubnium Oak Ridge National Laboratory in Tennessee, USA: Tenness University of California, Berkeley, USA: Berkelium Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt, Hessen: Darmstadtium, Hassium (108, von lat. "Hassia" = Hessen),
- Ehrungen von Persönlichkeiten: Niels Bohr: Bohrium, Marie Curie: Curium, Albert Einstein: Einsteinium, Enrico Fermi: Fermium, Ernest O. Lawrence: Lawrencium, Lise Meitner: Meitnerium, Dmitri I. Mendelejew: Mendelevium, Alfred Nobel: Nobelium, Juri Oganesjan: Oganesson, Ernest Rutherford: Rutherfordium, Glenn T. Seaborg: Seaborgium
- Fundort von Elementen: Gleich 4 Seltenerd-Elemente wurden nach dem schwedischen Ort Ytterby (30 km von Stockholm) benannt: Yttrium, Ytterbium, Erbium, Terbium

Ein Element als Namensgeber: Das Land Argentinien wurde als einziges Land nach einem Element benannt: Argentum = Ag = Silber!



Abb. 10. Die beiden Schöpfer des Periodensystems in der vordersten Reihe beim 52. Kongress der British Association of the Advancement of Science (BAAS) in Manchester, 1887. In der Mitte sitzend Mendelejew, links Lothar Meyer, rechts Sir Henry Roscoe. Stehend, von links nach rechts: Wislicenus, Quincke, Schunk, Schorlemmer und Joule. [Department of Chemistry/The University of Manchester]

graphie, die sie anlässlich eines Kongresses im Jahr 1887 gemeinsam zeigt (Abb. 10). 1882 war Mendelejew und Meyer zudem die damals höchste Auszeichnung für Chemiker, die Davy-Medaille, verliehen worden. Diese Ehrung war besonders passend, gehörte Davy doch zu den erfolgreichsten Elemente-Entdeckern.

In Anbetracht seiner außerordentlichen Verdienste ist es aus heutiger Sicht unbegreiflich, dass Dmitri Mendelejew nie den Nobelpreis erhielt, weder für Physik noch für Chemie, obwohl er drei Mal als Anwärter diskutiert wurde [4] – ohne Zweifel eine der größten Fehlentscheidungen der Schwedischen Akademie. Immerhin war er Mitglied in beinahe 100 Akademien weltweit, allerdings nie in der Russischen Akademie der Wissenschaften. Und sein Name ist in seinem Periodensystem der Elemente verewigt: Das 1955 künstlich erzeugte radioaktive Element mit der Ordnungszahl 101 und dem Symbol Md ist nach ihm benannt.

Umbrüche und Erweiterungen

Als Mendelejew 1907 starb, war das Periodensystem fest etabliert. Doch bereits mit der Entdeckung radioaktiver Elemente im Jahre 1896 kündigte sich ein Umbruch an, den der große Visionär nicht vorhergesehen hatte. Er selbst stand der Theorie des radioaktiven Zerfalls sehr kritisch gegenüber [4].

Die neu entdeckten radioaktiven Elemente mit ihren ähnlichen Atommassen und Eigenschaften ließen sich zunehmend schwerer in das Periodensystem einordnen.

Mendelejew hatte die Elemente nach steigenden Atommassen angeordnet, sie aber noch nicht mit einer (formalen) Ordnungszahl versehen. Doch die so logisch erscheinende Einordnung eines Elements aufgrund seiner Atommasse deckte sich nicht immer mit einer entsprechenden Einordnung anhand seiner chemischen Eigenschaften. In solchen Fällen hatte Mendelejew den chemischen Eigenschaften und nicht der Atommasse den Vorzug gegeben [4]. Bereits in der ersten Fassung seines Periodensystems vom April 1869 war er so verfahren (Abb. 6b): Die Elemente Tellur und Iod (heute Ordnungszahl 52 und 53) müssten eigentlich vertauschte Plätze einnehmen, wenn man strikt dem Prinzip von Mendelejew folgen würde. Denn er gab

für Tellur 128 (?) und für Iod 127 als Atommasse an, und im modernen Periodensystem ist ebenfalls eine mit steigender Ordnungszahl abfallende Atommasse von 127,60 und 126,90 vermerkt (relative Atommasse in g/mol).

Wie lassen sich solche Inversionen (sie finden sich auch bei den im Periodensystem aufeinanderfolgenden Elementen Ar/K, Co/Ni, Th/Pa) erklären und vor allem: Was sind die tieferen Ursachen der Periodizität? Diese Fragen zu erhellen, blieb anderen vorbehalten. Es waren nicht zuletzt Fortschritte der Physik, die zu einer Weiterentwicklung des Periodensystems führten, wie wir es heute kennen.

Wegbereitend waren zum einen Erkenntnisse über die Kernteilchen bzw. den Aufbau der Atome (Entdeckung der Elektronen 1897, der Protonen 1898; über Neutronen wurde ab 1920 diskutiert, die 1932 auch nachgewiesen wurden) und die Entwicklung der Quantenphysik. Viele der an Wasserstoffatomen beobachteten Eigenschaften konnten dann mit dem 1913 von Niels Bohr (1885-1962) vorgestellten Atommodell erklärt werden. Nach diesem (einfachen und) anschaulichen Modell besteht ein Atom aus einem Kern, der die positiv geladenen Protonen enthält und von Elektronen umkreist wird. Da Atome elektrisch ungeladen sind, muss die Anzahl von Protonen und Elektronen immer gleich sein. Zudem ergaben sich durch die Entdeckung der Röntgenstrahlung (NR 7/2020, S. 341) neue Möglichkeiten, die Elemente bzw. die Atome zu analysieren. In demselben Jahr, in dem Bohr sein Atommodell vorschlug, stellte der britische Physiker Henry Moseley (1887-1915, Abb. 11) die Weichen für die heute gültige Anordnung der Elemente im Periodensystem.

Er ließ sich von dem niederländischen Ökonometriker Antonius van den Broek (1870–1926) inspirieren. Dieser hatte aus theoretischen Erwägungen den Vorschlag gemacht, nicht die Atommassen, sondern die Atomkernladung als Ordnungsprinzip des Periodensystems zu wählen. Die Kernladungszahl solle somit die Position jedes Elements im Periodensystem bestimmen. Mosley entdeckte mit Hilfe der Röntgenspektroskopie, dass jedes Element Röntgenstrahlen in einer für es spezifischen, einzigartigen Frequenz emittiert. Zwischen der Quadratwurzel dieser Frequenz und der Kernladungszahl der Elemente konnte er eine lineare Beziehung feststellen. Reiht man die Elemen-



Abb. 11. Mit Henry Moseley übernahmen Physiker die weitere Entwicklung des Periodensystems. Aufnahme in den Balliol-Trinity College Laboratories (1910). [Department of Physics/Oxford University]

te entsprechend ihrer Kernladung auf, so ergibt sich daraus unmittelbar die Ordnungszahl. Letztere war demnach keine willkürliche "Nummer", die bei Bedarf (erforderliche Inversion, s. o.) ausgetauscht wurde, sondern hatte eine physikalische und eindeutig messbare Grundlage.

Nach dem Gesetz von Moseley ist es die Ladungszahl des Atomkerns (gleichbedeutend mit Ordnungszahl) und nicht die Atommasse, die die Reihenfolge im Periodensystem bestimmt. Das von Dmitri Mendelejew 1871 formulierte Gesetz über die periodische Abhängigkeit der Eigenschaften chemischer Elemente von deren "Atomgewichten" musste somit neu formuliert werden: "Die Eigenschaften der chemischen Elemente sowie die Form und Eigenschaften der aus ihnen gebildeten einfachen Stoffe und Verbindungen befinden sich in periodischer Abhängigkeit von deren Kernladungszahl" [4].

Elementeniäger

Zum Zeitpunkt der Entwicklung des PSE waren gerade einmal 63 der heute identifizierten 118 Elemente bekannt. Wurden bis Ende des 2. Weltkriegs vor allem noch zahlreiche neue radioaktive Elemente entdeckt und erhöhte sich die Zahl der natürlich vorkommenden Elemente auf 94, so dauerte es dann doch einige weitere Jahrzehnte, bis eine spezielle Forschergemeinde von wissenschaftlichen Teilchenjägern mit aufwendigen Teilchenbeschleuniger weitere, in der Regel höchst kurzlebige und teilweise nur in Form von wenigen Atomen existierende, künstliche Elemente produzierte bzw. entdeckte. Diese extrem schnell zerfallenden, superschweren Elemente tragen Namen wie Darmstadtium, Hassium, Roentgenium oder Oganesson (Ordnungszahl 118).

Der Nachweis solcher äußerst kurzlebiger künstlicher Elemente ist entsprechend ausgerüsteten Laboratorien vorbehalten. Bedeutende Laboratorien sind in den USA das Oak Ridge National Laboratory in Tennessee sowie das Lawrence Berkeley National Laboratory und in Russland (bzw. in der SU) das Vereinigte Institut für Kernforschung in Dubna. Ferner spielt die Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt eine bedeutende Rolle. Hier taten sich Forschergruppen vor allem in den 1980er und -90er Jahren hervor. In dem rund 120 Meter langen Teilchenbeschleuniger der GSI beschleunigte man elektrisch geladene Atome auf ca. 30000 Kilometer pro Sekunde und ließ sie mit anderen Atomkernen kollidieren. Durch die Verschmelzung der Atome entstehen Elemente, die schwerer sind als Uran (Ordnungszahl 92). Allerdings bestehen diese Transurane nur für sehr kurze Zeit, denn innerhalb von Sekundenbruchteilen zerfallen sie schon wieder. Nachweisen lassen sich die superschweren Elemente in der Regel durch Messung der Strahlung, die beim radioaktiven Zerfall entsteht und durch die Einordung und Interpretation der am Ende der Zerfallskette stehenden stabilen Atomkerne. Die wenigen messbaren Atome reichen den Kernphysikern aus, um die grundlegenden physikalischen Eigenschaften zu ermitteln und die entsprechende Einordnung in das PSE festzulegen.

Mit der Ordnungszahl 118 hat man bislang eine Grenze erreicht. Ob es die sagenumwobene "Insel der Stabilität" mit noch schwereren Elementen und Ordnungszahlen um 170 tatsächlich gibt, gilt es noch zu beweisen. Dort erwarten die Wissenschaftler eine Gruppe von superschweren Elementen, die langlebiger sind als die anderen künstlich erzeugten und möglicherweise außergewöhnliche chemische und physikalische Eigenschaften aufweisen. Sie sollen aus neutronenreichen Isotopen superschwerer Elemente bestehen, die stabiler sind als die umgebenden Atomvarianten. Physiker fanden schon in den 1950er Jahren heraus, dass Atomkerne mit einer bestimmten Zahl von Kernbausteinen stabiler sind als andere. Ein radioaktiver Atomkern, der die "magische Anzahl" von Protonen oder Neutronen enthält, zerfällt viel langsamer als gleich schwere Atomkerne mit anderen Nukleon-Anteilen und ist somit stabiler [19]. Kernphysiker prognostizieren, dass die nächste magische Zahl für Protonen bei 126 und für Neutronen bei 184 liegen könnte - und damit auf der Insel der Stabilität.

Der Traum von der Erweiterung des PSE geht also weiter und wird sicherlich noch Generationen neugieriger Forscher beschäftigen und antreiben. Die Kunst dabei ist es, die Atomkerne verschiedener Elemente miteinander verschmelzen zu lassen, ohne dass sie kollabieren. Heute ergänzen also vor allem Physiker mit superteuren Teilchenbeschleunigern die künstliche Welt der Elemente. Die Welt der natürlichen Elemente und ihrer Anwendungen ist aber weiterhin eine Domäne der Chemiker.

Darstellungen des Periodensystems

Das Erscheinungsbild des Periodensystems, das über die geordnete Vielfalt der Elemente und ihre Eigenschaften informieren soll, hat sich im Laufe der Jahre stetig verändert, vor allem, weil immer mehr Elemente hinzukamen. Zu Lebzeiten von Dmitri Mendelejew sah das PSE in etwa so aus wie auf einer Wandtafel, die man zufällig beim Aufräumen im Keller der schottischen University of St. Andrews gefunden hat (Abb. 12). Diese älteste erhaltene Wandtafel mit dem Periodensystem zeigt die Elemente nur mit Angaben des Atomgewichts. Da der Wiener Verlag, der für den Druck verantwortlich war, nur bis 1888 existierte, Germanium (1886) noch fehlt, dafür aber Scandium (1879) dabei ist, dürfte die Schautafel zwischen 1880 und 1885 hergestellt worden sein [20]. Auch die Edelgase sind natürlich noch nicht aufgeführt (s.u.).

Reihen	R2 0	RO	Gruppe III R ² O ³	Gruppe IV RH ⁴ R O ²	RH3 R ² O ⁵	RH ² RO ³	Gruppe VII RH R ² O ⁷	Gruppe VIII R O 4
2 1	H=I		0.11	C=12	N.IA	0.10	C.10	
2 Li	=7 Na=23						F=19 C1=35.5	
4 K:		Ca-40	Sc-44				Mn:55	Fe=56, Co=59 Ni=59, Cu=63
5	(Cu=63)	Zn=65	Ga=68	-=72	As=75	Se=79	Br=80	
6 Rt	1=85	Sr=87	Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	-=100	Ru=104,Rh=104 Pd=106,Aq=108
7 (Aq=108)	Cd-II2	In-II3	Sn=II8	Sb-122	Te=125	J=127	
			Ce-137	La=139	-	Di=145?		
9 -	(-)		- 100	- Inc	T 100	w 10.	4	D. ID.(0- 10F/M
10 -	165	- 169	Er=170	-1/3	Ta=182	W=184	-	Pt=194, Os=195(?) Ir=193, Au=196

Abb. 12. Diese Wandtafel mit dem Periodensystem wurde 2014 in der schottischen St. Andrews University entdeckt. Auf ihr sind nur die Atomgewichte vermerkt. [St. Andrews University]

Es handelt sich um eine Kurzform des Periodensystems, die bis etwa 1905 üblich war. Beim Kurzperiodensystem sind Haupt- und Nebengruppen-Elemente ineinander verschachtelt dargestellt. Diese Darstellungsform wurde vermutlich aus Platzgründen in älteren Lehrbüchern verwendet, ist aber heute kaum noch zu finden, da sie unübersichtlich ist.

Heute hat sich das Langperiodensystem durchgesetzt, in dem die Nebengruppenmetalle (Übergangselemente) zwischen die zweite und dritte Hauptgruppe eingeschoben sind. Das heutige Periodensystem weist entsprechend acht Haupt- und zehn Nebengruppen auf. Eine besondere Modifikation machten die Lanthanoide oder Seltenerdelemente (Lanthan bis Lutetium, Elemente der Ordnungszahl 57–71) und die durchweg radioaktiven Actinoide (Actinium bis Lawrencium, Elemente der Ordnungszahl 89–103) nötig, die alle der Scandiumgruppe (3. Gruppe) angehören. Sie sind chemisch sehr ähnlich und weisen gruppenspezifische Eigenschaften auf, so dass man – um im Bild des Kartenspiels zu bleiben – die Elementkärtchen aufeinanderstapelt. Diese "Kartenstapelt" werden unten im Periodensystem als Lanthanreihe und der Actiniumreihe aufgeführt.

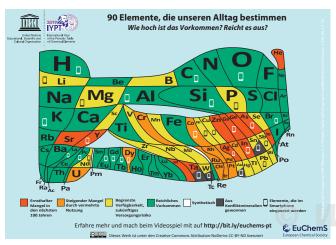


Abb. 13. Ein Periodensystem mit didaktischer Absicht. Im Zeitalter des Anthropozäns haben wir einen immensen Bedarf an Elementen, deren Menge begrenzt bzw. deren Verfügbarkeit eingeschränkt ist. Rund 30 Elemente finden sich in Smartphones (Symbol), bei etwa der Hälfte von ihnen ist das natürliche Vorkommen kritisch zu bewerten. [European Chemical Society | CC-BY-ND]

Ein sehr spezielles Periodensystem (Abb. 13) wurde im Jubiläumsjahr von der European Chemical Society (EuChemS) veröffentlicht und zeigt 90 natürlich vorkommende Elemente. Man könnte es als ein "anthropozentrisches Periodensystem" bezeichnen, denn es zeigt die Verfügbarkeit der für unser heutiges Leben wichtigen Elemente an [21]. Orange und gelb unterlegte Elemente könnten in den kommenden Jahrzehnten knapp werden. Schwarz gekennzeichnet sind Elemente, die unter fragwürdigen Bedingungen gewonnen werden, also in Ländern, in denen Krieg herrscht und/oder Kinderarbeit üblich ist. Das Smartphone-Symbol kennzeichnet 30 Elemente, die in handelsüblichen Mobilfunkgeräten enthalten sind. Mehr als die Hälfte davon könnte in den kommenden Jahren knapp werden: Manche der Elemente kommen nur selten vor bzw. sind schwer zu gewinnen, andere findet man hauptsächlich in Konfliktgebieten, was die Verfügbarkeit fraglich macht, und weitere lassen sich nur schwer oder bislang gar nicht aus Elektroschrott recyceln. Auch wenn in einem Smartphone nur ein paar Milligramm der wertvollen Bunt- und Edelmetalle stecken, so liegt im Recycling ein beträchtliches Potential: Weltweit gibt es inzwischen

mehr Mobiltelefone als Menschen auf der Erde und allein in der Europäischen Union werden jeden Monat (!) etwa 10 Millionen Smartphones entsorgt oder ersetzt.

Literatur

[1] Die Welt der chemischen Elemente - Kuriose Geschichte(n), Rekorde und Anwendungen. Vortrag von Dr. Jörg Wetterau bei der Wetterauischen Gesellschaft in Hanau am 15.1.2020. – [2] L. Trueb: Die Chemischen Elemente. 2. Aufl. S. Hirzel Verlag. Stuttgart 2005. - [3] J. Liebig: Über Laurent's Theorie der organischen Verbindungen. Annalen der Pharmacie 25, 554 (1838). - [4] W. Reschetilowski: 150 Jahre Periodensystem der Elemente - ein historischer Rückblick. Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. 2019. https://www.gdch.de/ $file admin/downloads/GDCh/Preise_und_Auszeichnungen/PDF/hoebrps.$ pdf. - [5] B. M. Kedrow: Der Tag einer großen Entdeckung (russisch). Moskau 1958. Zitate in [4]. - [6] Johann Samuel Traugott Gehler's physikalisches Wörterbuch, neu bearbeitet von Gmelin, Littro, Muncke, Pfaff. Neunter Band, Dritte Abteilung V. E. B. Schwickert. Leipzig 1840. Stichwort: Verwandtschaft (S. 1912). - [7] P. Strathern: Mendelejews Traum. Von den vier Elementen zu den Bausteinen des Universums. Ullstein. München 2000. - [8] D. Mendelejew: Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente. Zeitschrift für Chemie 12, 405 (1869). - [9] D. Mendelejew: Das natürliche System der Elemente und seine Anwendung zur Vorhersage der Eigenschaften einiger Elemente (russisch, 1871). Zitiert in [4]. - [10] O. Krätz: "Meinecke, Johann Ludwig Georg" in: Neue Deutsche Biographie 16 (1990), S. 660 f. - [11] J. W. Döbereiner: Versuch zu einer Eingruppierung der elementaren Stoffe nach ihrer Analogie. Annalen der Physik und Chemie 15, 301 (1829). In: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften. Reprint der Originalausgabe von 1895. Akad. Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G. Leipzig 1983. - [12] W. Reschetilowski: Eine Idee bahnt sich ihren Weg: 150 Jahre Periodensystem. Nachrichten aus der Chemie 67 (7-8), 8 (2019). - [13] J. Falbe, M. Regitz (Hrsg.): Römpp Lexikon der Chemie. Stichwort: Periodensystem. 10. Aufl. Georg Thieme. Stuttgart 1998. - [14] L. Meyer: Natur der Atome: Gründe gegen ihre Einfachheit. In ders.: Die modernen Theorien der Chemie und ihre Bedeutung für die chemische Statistik. Maruschke & Berendt. Breslau 1864. (§ 91, S. 135). Abdruck des Aufsatzes in der Reihe Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 68: Das Natürliche System der chemischen Elemente. Abhandlungen von Lothar Meyer (1864-1869) und D. Mendelejeff (1869 - 1871) herausgegeben von Karl Seubert. Verlag von Wilhelm Engelmann. Leipzig 1895. Darin auch die Arbeiten [8, 15, 17]. - [15] L. Meyer: "Die Natur der chemischen Elemente als Function ihrer Atomgewichte", Annalen der Chemie und Pharmazie, VII. Supplementband (1870). S. 354-364). - [16] L. Meyer: Grundzüge der theoretischen Chemie. Breitkopf & Härtel. Leipzig 1890. - [17] D. Mendelejew: Die periodische Gesetzmäßigkeit der chemischen Elemente, Annalen der Chemie und Pharmazie, VIII. Supplementband, 133-229 (1871). - [18] D. Mendelejeff: Zur Geschichte des periodischen Gesetzes. Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft 13, 1796-1804 (1880) und L. Meyer: Zur Geschichte der Periodischen Atomistik. Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft 13, 259-265 und 2043-2044 (1880). - [19] https://www.scinexx.de/dossierartikel/ die-insel-der-stabilitaet/. - [20] https://news.st-andrews.ac.uk/archive/ worlds-oldest-periodic-table-chart-found-in-st-andrews/. - [21] https:// www.euchems.eu/wp-content/uploads/2018/11/GERMAN-Periodic-Table-Element-Scarcity.pdf.



Dr. Jörg Wetterau (geb. 1966) studierte Chemie an der Justus-Liebig-Universität in Gießen und war bis zu seiner Promotion 1998 als Fachjournalist tätig (Stipendiat für Wissenschaftsjournalismus des VCI). Danach wechselte er als Pressereferent zum Industriegase-Hersteller Messer Griesheim nach Krefeld. Bis 2018 betreute er beim Technologiekonzern Heraeus in Hanau die Technologiekommunikation. Er ist freiberuflich als Moderator und Fachjournalist

für Technologie, Innovation und Wissenschaft aktiv.

Am Schaftrieb 31, 63589 Linsengericht, info@labor-fuer-kommunikation.de (www.labor-für-kommunikation.de)