

Die Elemente ordnen.

In seiner Eleganz und Eingängigkeit verbirgt das Periodensystem mühsam errungene Entdeckungen

Michael D. Gordin

Disclaimer: From Michael D. Gordin, "Ordering the Elements", *Science*, 363 (1 Feb 2019), pp. 471–473. Reprinted with permission from AAAS. This translation is not an official translation by AAAS staff, nor is it endorsed by AAAS as accurate. In crucial matters, please refer to the official English-language version originally published by AAAS.¹

Sogar Personen mit nur oberflächlichen naturwissenschaftlichen Kenntnissen können das Standardbild des Periodensystems 2019 erkennen. Seine Umriss sind weitgehend bekannt: links eine dünne Spitze, die von einer breiten Ebene rechts durch ein Tal von Feldern abgetrennt ist, wobei alles über zwei Reihen von ähnlichen Feldern schwebt. Mit nur einer wenig weitergehenden Ausbildung offenbart sich diese asymmetrische Form als natürlich, als die komprimierte bildliche Darstellung einer Serie von mühsam errungenen Entdeckungen über die Atomstruktur, die sich hinter der erstaunlichen Diversität von Materie versteckt, aus der unsere Welt besteht.

1869 hingegen wäre weder der Atomismus noch diese bildliche Darstellung so bekannt gewesen. In der vorangegangenen Dekade hatten fünf Chemiker (vier Westeuropäer und ein in die USA emigrierter Däne) partielle zweidimensionale Anordnungen der Elemente angefertigt, aber keine davon konnte sich durchsetzen.² Offenbar ohne von diesen früheren fehlgeschlagenen Versuchen zu wissen, veröffentlichte Dimitri Iwanowitsch Mendelejew (1834–1907), Professor für allgemeine Chemie an der Universität von St. Petersburg in der Hauptstadt des russischen Zarenreichs, im Februar 1869 seine eigene Einteilung, die alle bekannten Elemente umfasste (Abb. 1).³ Mendelejews Version ist heute anerkannt als der Vorläufer unseres mehrfarbigen Rasters der chemischen Elemente und das Muster, das es darstellt, wird allgemein verbunden mit dem Adjektiv, das Mendelejew von trigonometrischen Funktionen entlehnte, um die Wiederholung von Eigenschaften zu kennzeichnen: „periodisch“.

Es ist schwieriger, die Beziehung zwischen unserer und Mendelejews Tabellen zu sehen, als es auf den ersten Blick erscheinen mag. Die Geschichte, die Mendelejews „Versuch eines Systems der Elemente, begründet auf deren Atomgewichten“ und das heutige, von der International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) anerkannte Periodensystem der Elemente (Abb. 2) verbindet, ist eine

1

**ОПЫТ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ,
ОСНОВАННОЙ НА ИХ АТОМНОМ ВЕСЕ
И ХИМИЧЕСКОМ СХОДСТВЕ**

				Ti = 50	Zr = 90	? = 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	Pd = 106,6	Os = 199.
				Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.
H = 1				Zn = 65,2	Cd = 112	
He = 9,4	Mg = 24			? = 68	Ur = 116	Au = 197?
B = 11	Al = 27,4			? = 70	Sn = 118	
C = 12	Si = 28			As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
N = 14	P = 31			Se = 79,4	Te = 128?	
O = 16	S = 32			Br = 80	I = 127	
F = 19	Cl = 35,5			Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204.
Li = 7	Na = 23	K = 39		Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.
		Ca = 40		? = 45	Co = 92	
		? = 56		? Er = 56	La = 94	
		? Yt = 60		? Yt = 60	Di = 95	
		? In = 75,6		? In = 75,6	Th = 118?	

Д. Менделѣев.

Abb. 1: Die originale Veröffentlichung von Mendelejews Periodensystem aus dem Februar 1869 unter dem Titel „Versuch eines Systems der Elemente, begründet auf deren Atomgewichten und chemischer Affinität“.⁴

ßend von oben nach unten gelesen zu werden, sondern eher umgekehrt: zuerst von oben nach unten, dann von links nach rechts. Um die Orientierung an die IUPAC-Tabelle anzupassen, muss das Bild um 90° im Uhrzeigersinn gedreht und anschließend an der vertikalen Achse gespiegelt werden. Es ist rein kontingent, dass er eine vertikale statt einer horizontalen Anordnung bevorzugte, und Mendelejew übernahm bald die horizontale Anordnung, die wir heute kennen.

Andere Aspekte von Mendelejews Anordnung sind befremdlicher und offenbaren einiges über den Stand des chemischen Wissens seiner Zeit. Die Tabelle besteht aus lateinischen Buchstaben, die mit Nummern gleichgesetzt werden. Die Symbole sind bekannt: Im Wesentlichen sind es die, die der schwedische Chemiker Jöns Jakob Berzelius (1779–1848) im 19. Jahrhundert eingeführt hatte. Einige sind zwar unterschiedlich, jedoch leicht zuzuordnen („J“ statt „I“ für Iod, „Ur“ statt „U“ für Uran), während ein anderes, „Di = 95“, in der heutigen Tabelle nicht mehr zu finden ist.

Die Abkürzung Di repräsentierte Didym, ein angenommenes Metall der Seltenen Erden, das von Carl Mosander 1841 entdeckt worden war und für ein Element gehalten wurde. Ab 1874 begannen einige Chemiker zu vermuten, dass es sich bei Didym um eine Mischung verschiedener Stoffe handeln könnte und 1885 isolierte Carl Auer von Welsbach durch fraktionierte Kristallisation zwei neue Ele-

Geschichte von fundamentalen Transformationen unseres Verständnisses von Materie, nicht nur von Veränderungen in der Darstellung.⁵ In diesem Artikel werden einige der zentralen Merkmale von Mendelejews Klassifikation – der Kurzfassung seines Periodensystems – im Kontext seiner Zeit identifiziert und die Veränderungen bis zu seinem Tod 1907 untersucht, die die Grundlage für unser bekanntes, auf Elektronen basierendes System bildeten.

Mendelejews Tabelle lesen

Bei einem genauen Blick auf Mendelejews 1869er „Versuch“ fällt zunächst die Orientierung auf. Mendelejews Tabelle ist nicht dazu ausgelegt, wie ein Buch zuerst von links nach rechts und anschlie-

IUPAC Periodic Table of the Elements

1																		2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
H Hydrogen 1.00784(7)																		He Helium 4.002602																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
3																		4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Li Lithium 6.941 [2.036 6.937]																		Be Beryllium 9.0122																		Key: atomic number Symbol name (elemental atomic weight)																		5																		6																		7																		8																		9																		10																		11																		12																		13																		14																		15																		16																		17																		18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Na Sodium 22.98976928																		Mg Magnesium 24.30468(8)																		Al Aluminium 26.9815386(8)																		Si Silicon 28.0855(8)																		P Phosphorus 30.973761998																		S Sulfur 32.06(5)																		Cl Chlorine 35.45(3)																		Ar Argon 39.948(4)																		K Potassium 39.0983(1)																		Ca Calcium 40.078(4)																		Sc Scandium 44.955908(6)																		Ti Titanium 47.88(7)																		V Vanadium 50.9415(1)																		Cr Chromium 51.9961(6)																		Mn Manganese 54.938044(1)																		Fe Iron 55.845(2)																		Co Cobalt 58.933194(8)																		Ni Nickel 58.6934(4)																		Cu Copper 63.546(3)																		Zn Zinc 65.38(2)																		Ga Gallium 69.723(1)																		Ge Germanium 72.630(8)																		As Arsenic 74.9216(3)																		Se Selenium 78.9718(8)																		Br Bromine 79.904(3)																		Kr Krypton 83.796(2)																		Rb Rubidium 85.468(4)																		Sr Strontium 87.62(3)																		Y Yttrium 88.90584(2)																		Zr Zirconium 91.224(2)																		Nb Niobium 92.90638(2)																		Mo Molybdenum 95.94(1)																		Tc Technetium 98.9062(1)																		Ru Ruthenium 101.07(2)																		Rh Rhodium 102.9055(3)																		Pd Palladium 106.42(1)																		Ag Silver 107.8682(8)																		Cd Cadmium 112.411(8)																		In Indium 114.818(8)																		Sn Tin 118.710(7)																		Sb Antimony 121.757(3)																		Te Tellurium 127.603(2)																		I Iodine 126.905(5)																		Xe Xenon 131.29(4)																		Cs Caesium 132.91(3)																		Ba Barium 137.327(7)																		La Lanthanum 138.90487(1)																		Ce Cerium 140.12(1)																		Pr Praseodymium 140.90766(2)																		Nd Neodymium 144.24(1)																		Pm Promethium 144.9126(2)																		Sm Samarium 150.36(2)																		Eu Europium 151.964(1)																		Gd Gadolinium 157.25(3)																		Tb Terbium 158.925(3)																		Dy Dysprosium 162.500(3)																		Ho Holmium 164.93032(2)																		Er Erbium 167.259(3)																		Tm Thulium 168.93032(2)																		Yb Ytterbium 173.054(7)																		Lu Lutetium 174.967(1)																		Ac Actinium 227.0337(1)																		Th Thorium 232.0377(1)																		Pa Protactinium 231.03688(2)																		U Uranium 238.02891(3)																		Np Neptunium 237.048173(3)																		Pu Plutonium 244.06422(2)																		Am Americium 243.061361(3)																		Cm Curium 247.070353(3)																		Bk Berkelium 247.070353(3)																		Cf Californium 251.083208(7)																		Es Einsteinium 252.083208(7)																		Fm Fermium 257.10358(2)																		Md Mendelevium 258.10358(2)																		No Nobelium 259.10358(2)																		Lr Lawrencium 262.10358(2)																		Fr Francium 223.0185(3)																		Ra Radium 226.0254(1)																		Ac Actinoids																		Th Thoroids																		Pa Protactinoids																		U Uranoids																		Np Neptunoids																		Pu Plutonioids																		Am Americonioids																		Cm Curionioids																		Bk Berkelonioids																		Cf Californioids																		Es Einsteinioids																		Fm Fermioids																		Md Mendelevioids																		No Nobelioids																		Lr Lawrencioids																	

For notes and updates to this table, see www.iupac.org. This version is dated 1 December 2018.
Copyright © 2018 IUPAC, for International Union of Pure and Applied Chemistry.



Abb. 2: Das IUPAC-Periodensystem.⁶

mente, die bald darauf Praseodym und Neodym genannt wurden. (Sie sind als Pr und Nd, Elemente 59 und 60, im Periodensystem [Abb. 2] zu finden.) Die Metalle der Seltenen Erden haben alle sehr ähnliche chemische Eigenschaften – neben der effektiven Nutzung des Platzes einer der Hauptgründe, weshalb sie auf einer Insel unter der heutigen Repräsentation isoliert sind – und bereiteten Mendelejew einige Kopfschmerzen.⁷

Neben den Symbolen befinden sich Nummern. Die Nummern im IUPAC-System stehen für die Ordnungszahl (Z), die Anzahl an Protonen im Kern jedes Atoms. Diese positiv geladenen Teilchen bestimmen die Anzahl der um den Kern kreisenden Elektronen, deren Anordnung wesentlich verantwortlich ist für die chemischen Eigenschaften.

Die Gestaltung des IUPAC-Systems (Turm, Tal und Ebene) betont die Elektronenkonfiguration: Wenn der Platz eines Elements in der Tabelle bekannt ist, kann diese Eigenschaft direkt abgelesen werden. Die Ordnungszahl zeigt auch, dass es keine Lücke in der Tabelle gibt: Alle Zahlen (Stand 2016: 118) sind besetzt.

Atomgewichte bewerten

Mendelejew wusste nichts über Ordnungszahlen, die erst 1913, also sechs Jahre nach seinem Tod, von Henry Moseley vollständig ausgearbeitet waren. Tatsäch-

lich änderte Mendelejew seine Meinung zur Vorstellung von Atomen im Allgemeinen mehrfach und stand besonders den Elektronen (1897 von Joseph John Thomson entdeckt) misstrauisch gegenüber.⁸ Die Nummern in Mendelejews System sind Atomgewichte, das einzige Ordnungsprinzip für Atome, das er jemals anerkannte.

Atomgewichte zu berechnen, war eine schwierige Angelegenheit. Die meisten Elemente kommen natürlich in Verbindungen vor und komplizierte Trennverfahren zusammen mit einer Schätzung der Valenz einer Substanz konnten Ergebnisse hervorbringen, die um den Faktor zwei oder vier danebenlagen.

Im September 1860 fand ein chemischer Kongress in Karlsruhe statt, an dem Mendelejew als Postdoktorand in Heidelberg teilnahm, und auf dem der italienische Chemiker Stanislao Cannizzaro dafür plädierte, die Ideen seines Landsmannes Amedeo Avogadro zu übernehmen, um die Bestimmung der Atomgewichte zu vereinfachen. Bald wurden fast allen Elementen (abgesehen von den frustrierenden Seltenen Erden) neue standardisierte Atomgewichte zugewiesen. Nicht zufällig stammen alle Versuche, ein Periodensystem zu entwickeln, aus den 1860er Jahren; ohne diese überarbeiteten Gewichte wären die Muster unsichtbar geblieben.

In Mendelejews Klassifikation stellen die Karlsruher Gewichte eine der beiden Achsen dar: Das Atomgewicht nimmt größtenteils von oben nach unten zu. Es finden sich aber auch noch ältere Gewichte – Uran (Ur) sollte demnach ein Gewicht von 116 haben (Mendelejew verdoppelte das Gewicht später, womit er dem heutigen Wert deutlich näherkam) – und er fügte Gewichten, die er für zweifelhaft hielt, Fragezeichen hinzu.

Dies traf insbesondere auf die beiden „Vertauschungen“ von Cobalt und Nickel (beide mit dem Wert 59 aufgeführt) und von Tellur und Iod, bei denen das leichtere Iod wegen chemischen Eigenschaften hinter dem schwereren Tellur stand. (Mendelejew glaubte immer, dass hier ein Fehler im Gewicht von Tellur vorlag. Dies ist nicht der Fall.)

Die Elemente, die – manche mit Fragezeichen, manche ohne – um die eigentliche Tabelle herum positioniert sind, sind nicht nach Gewicht geordnet. Sie befinden sich in einer Art Warteschleife, die auf Mendelejews Entwurf des Systems zurückgeht (Abb. 3), und einen klaren Beweis darstellen, dass dieser „Versuch“ von 1869, wie es der Name bereits nahelegt, noch unfertig war.

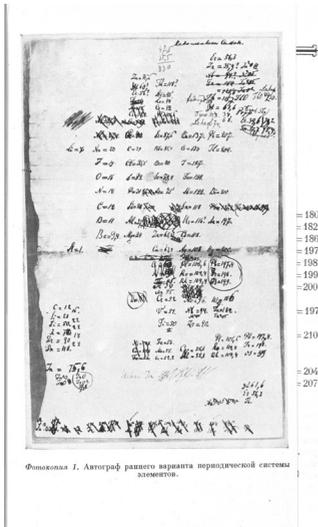


Abb. 3: Mendelejews Rohentwurf seines Periodensystems während der Vorbereitung der Publikation.⁹

Am auffälligsten aber sind die drei Elemente, die nur mit ihrem Atomgewicht und einem Fragezeichen anstelle ihres Elementsymbols angegeben sind: 45, 68 und 70. 1871 nannte Mendelejew diese Eka-Bor, Eka-Aluminium und Eka-Silicium (das Präfix „Eka“ ist Sanskrit und bedeutet „eins“) und machte detaillierte Vorhersagen über ihr chemisches Verhalten. Für alle unerwartet wurden sie bald darauf entdeckt als Scandium (1879), Gallium (1876) und Germanium (1886).

Der beispiellose Erfolg dieser Vorhersagen festigte Mendelejews Reputation in Europa und seinen Status als der Hauptentdecker des Periodensystems trotz der Konkurrenz. (Dennoch teilte er die Davy-Medaille der Royal Society 1882 mit Julius Lothar Meyer für ihre voneinander unabhängigen Bemühungen.)

Es war etwas schwieriger, die zweite Achse – chemische Eigenschaften – genau zu definieren. Mendelejews Erkenntnis, dass diese Eigenschaften sich periodisch wiederholen, wenn die Elemente nach Atomgewicht geordnet sind, verleiht dem Periodensystem seine konzeptionelle Sparsamkeit und Kraft.

Nach außen bauen

Vergleicht man Mendelejews System mit dem der IUPAC fällt noch etwas anderes merkwürdiges an Ersterem auf: Mendelejew platzierte die Alkalimetalle (die Reihe, die mit Li = 7 beginnt) direkt neben den Halogenen (die mit F = 19 beginnen). Im heutigen System befinden sie sich an den beiden entgegengesetzten Enden – abgesehen von den Edelgasen, die erst Mitte der 1890er Jahre entdeckt wurden. Mendelejew nahm diese nur widerwillig in sein System auf, aber er platzierte sie am linken, nicht am rechten Rand, wo sie heute zu finden sind (Abb. 4).

Das Nebeneinander von Alkalimetallen und Halogenen lässt erkennen, wie Mendelejew sein System aufgebaut hat. Er entwickelte die Anordnung von 1869 während er sein zweibändiges Lehrbuch der anorganischen Chemie schrieb, Grundlagen der Chemie¹¹ (in der Erstauflage 1869–1871 erschienen; es gab sieben weitere Auflagen zu Lebzeiten Mendelejews).

Series	Zero Group	Group I	Group II	Group III	Group IV	Group V	Group VI	Group VII	Group VIII			
0	<i>x</i>											
1	<i>y</i>	Hydrogen H=1.008										
2	Helium He=4.0	Lithium Li=7.03	Beryllium Be=9.1	Boron B=11.0	Carbon C=12.0	Nitrogen N=14.04	Oxygen O=16.00	Fluorine F=19.0				
3	Neon Ne=19.9	Sodium Na=23.05	Magnesium Mg=24.1	Aluminium Al=27.0	Silicon Si=28.4	Phosphorus P=31.0	Sulphur S=32.06	Chlorine Cl=35.45				
4	Argon Ar=38	Potassium K=39.1	Calcium Ca=40.1	Scandium Sc=44.1	Titanium Ti=48.1	Vanadium V=51.4	Chromium Cr=52.1	Manganese Mn=55.0	Iron Fe=55.9	Cobalt Co=59	Nickel Ni=59	(Cu)
5		Copper Cu=63.6	Zinc Zn=65.4	Gallium Ga=70.0	Germanium Ge=72.3	Arsenic As=75.0	Selenium Se=79	Bromine Br=79.95				
6	Krypton Kr=81.8	Rubidium Rb=85.4	Strontium Sr=87.6	Yttrium Y=89.0	Zirconium Zr=90.6	Niobium Nb=94.0	Molybdenum Mo=96.0		Ruthenium Ru=101.7	Rhodium Rh=103.0	Palladium Pd=106.6	(Ag)
7		Silver Ag=107.9	Cadmium Cd=112.4	Indium In=114.0	Tin Sn=119.0	Antimony Sb=120.0	Tellurium Te=127	Iodine I=127				
8	Xenon Xe=128	Cesium Cs=132.9	Barium Ba=137.4	Lanthanum La=139	Cerium Ce=140							
9												
10				Ytterbium Yb=173		Tantalum Ta=183	Tungsten W=184		Osmium Os=191	Iridium Ir=193	Platinum Pt=194.9	(Au)
11		Gold Au=197.2	Mercury Hg=200.0	Thallium Tl=204.1	Lead Pb=206.9	Bismuth Bi=208						
12			Radium Ra=224		Thorium Th=232		Uranium U=239					

Abb. 4: Mendelejews Periodensystem von 1904, die die Edelgase als linke Spalte einschließt. Die Elemente x und y an der Spitze der Spalte sind Vorhersagen, die sich auf den angenommenen Äther beziehen.¹⁰

Der erste Band behandelte nur acht Elemente und endete mit den vier Halogenen; Mendelejew musste also die restlichen 55 Elemente im zweiten Band unterbringen. Er begann damit, die Alkalimetalle und die Halogene als extreme Gegensätze in ihren Eigenschaften zu vergleichen. Er bemerkte eine Regelmäßigkeit mit der Zunahme des Atomgewichts und baute die Tabelle darauf auf. Ab 1871 trennte Mendelejew sie auf dieselbe Weise, wie wir es heute gewohnt sind.

Indem wir 2019 zum 150igsten Jubiläum des Periodensystems erklärt haben, erinnern wir an Mendelejews Anstrengungen, Informationen für Studenten zu organisieren. Dass die heutige Version – in ihrer langen Form mit der Insel der Seltenen Erden – jeden Chemieraum der Welt schmückt, ist ein würdiger Abschluss. Das heutige Periodensystem mag weder dem Aussehen noch dem Inhalt nach genau Mendelejews kurzer Form entsprechen, aber es dient noch immer demselben Zweck.

Anmerkungen

¹ Übersetzung: Marcus B. Carrier.

² J. W. van Spronsen, *The Periodic System of Chemical Elements: A History of the First Hundred Years* (New York 1969); Eric Scerri, *The Periodic Table: Its Story and Its Significance* (Oxford 2007).

³ Michael D. Gordin, *A Well-Ordered Thing: Dmitrii Mendeleev and the Shadow of the Periodic Table*, überarbeitete Auflage (Princeton 2019).

⁴ D. I. Mendelejew, *Periodicheskii Zakon. Klassiki Nauki*, hrsg. v. B. M. Kedrov (Moskau 1958), S. 9.

⁵ Edward G. Mazurs, *Graphic Representations of the Periodic System During One Hundred Years* (Alabama 1974).

⁶ IUPAC.

⁷ D. N. Trifonov, *Redkozemel'nye elementy i ikh mesto v periodicheskoi sisteme* (Moskau 1966).

⁸ Gordin, *Well-Ordered Thing*.

⁹ D. I. Mendelejew, *Periodicheskii Zakon. Klassiki Nauki*, hrsg. v. B. M. Kedrov (Moskau 1958), Photokopie 1.

¹⁰ D. I. Mendelejew, *An Attempt Towards a Chemical Conception of the Ether*, übers. von G. Kamensky (London 1904), S. 26.

¹¹ *Osnovy khimii*. Die deutsche Übersetzung *Grundlagen der Chemie* (St. Petersburg 1890) basierte auf der der fünften russischen Auflage. AdÜ.

Michael D. Gordin
Department of History
136 Dickinson Hall
Princeton University
Princeton, New Jersey 08544
mgordin@princeton.edu