



150 JAHRE PERIODENSYSTEM DER ELEMENTE – EIN HISTORISCHER RÜCKBLICK

WOLFGANG JOHANNES
HÖNLE - STIFTUNG
KUNST UND CHEMIE

GDCh

GESELLSCHAFT
DEUTSCHER CHEMIKER

Die Herausgabe dieser Schrift wurde durch die Wolfgang Johannes Hönle - Stiftung „Kunst und Chemie“ gefördert. Die Stiftung wird treuhänderisch verwaltet von der Gesellschaft Deutscher Chemiker, Frankfurt a.M.

www.gdch.de/gdch/stiftungen/wolfgang-j-hoenle-stiftung.html

Das Urheberrecht für diese Broschüre liegt beim Verfasser.

© 2019 Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V., alle Rechte vorbehalten.

Titelbild

„Spektralsymphonie der Elemente“ von Roland FUHRMANN, realisiert 2010. Die Spektrallinien der chemischen Elemente von Nr. 1 Wasserstoff bis Nr. 99 Einsteinium schweben als Farbglasröhren im Atrium des Neubaus Chemische Institute der TU Dresden und werden so zur Spektralsymphonie.

(Foto: W. RESCHETILOWSKI)

150 JAHRE PERIODENSYSTEM DER ELEMENTE – EIN HISTORISCHER RÜCKBLICK

von Wladimir RESCHETILOWSKI

WOLFGANG JOHANNES
HÖNLE - STIFTUNG
KUNST UND CHEMIE



GDCh
GESELLSCHAFT
DEUTSCHER CHEMIKER

2019

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
Dmitri Iwanowitsch MENDELEJEW	4
Vordenker und Wegbereiter	4
Julius Lothar MEYER	7
CANNIZZAROS Verdienst	8
Heureka-Moment	9
Das chemische Patience-Spiel	12
Auffinden der Periodizität	14
Siegeszug des „ <i>Periodischen Gesetzes</i> “	18
Erweiterung der Periodizität	22
Nachruhm	26
Danksagung	28
Quellen	28
Bildnachweis	30

Einleitung

Vor 150 Jahren überbrachte der Schriftführer der Russischen Chemischen Gesellschaft Nikolai A. MENSCHUTKIN (1842-1907) am 6. März^{jul.}/18. März^{greg.} 1869 in der März-Sitzung der Gesellschaft eine Mitteilung zu einer beabsichtigten Publikation mit dem Titel „Die Abhängigkeit der chemischen Eigenschaften der Elemente vom Atomgewicht“. Diese stammte von Dmitri I. MENDELEJEW (1834-1907) (Abb. 1, links), der zur gleichen Zeit im Dienste der Freien Ökonomischen Gesellschaft (FÖG) unterwegs war. Darin findet sich zum ersten Mal auch die Wortfügung „das Periodensystem der Elemente“.¹⁾ Anlässlich des Jubiläums dieser epochalen Entdeckung hat die UNESCO das Jahr 2019 zum Internationalen Jahr des Periodensystems – IYPT2019 erklärt.

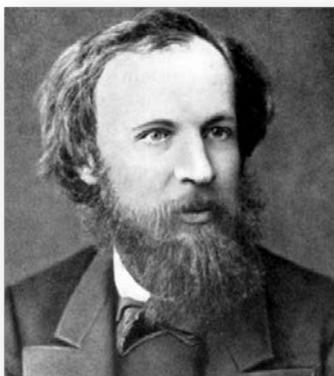


Abb. 1. Dmitri I. MENDELEJEW, Entdecker des Periodensystems der Elemente;
Rechts: handschriftliche Skizze des Periodensystems vom 17.02.1869 (MENDELEJEW-Museum, Sankt Petersburg)

Die Arbeit an seinem „Versuch eines Systems der Elemente, begründet auf deren Atomgewichten“ beendete MENDELEJEW am 17. Februar^{jul.}/1. März^{greg.} 1869. Das geht aus der handschriftlichen Skizze des Periodensystems hervor, die im MENDELEJEW-Museum in St. Petersburg aufbewahrt wird (Abb. 1, rechts). Die mehrfach abgeschriebene Kopie der Skizze hat MENDELEJEW kurz entschlossen an einige seiner angesehenen Kollegen im In- und Ausland verschickt. Zu der Zeit war der 35-jährige Dmitri Iwanowitsch MENDELEJEW ein bestenfalls nur unter Fachleuten bekannter Chemiker aus St. Petersburg.

Dmitri Iwanowitsch MENDELEJEW

Wer war dieser urwüchsig aussehende Mann, der ein begnadetes Gedächtnis für chemische Details hatte? Dmitri kam als 14. Kind in der Familie eines Schuldirektors im sibirischen Tobolsk zur Welt. Bald darauf starb der Vater. Die Mutter erkannte die außergewöhnliche Begabung des Jungen und brachte ihn unter größten Mühen nach St. Petersburg, wo er 21-jährig sein Studium am Pädagogischen Institut der dortigen Universität mit einer Arbeit über „*Isomorphismus*“ erfolgreich absolvierte.²⁾ Nach einem kurzen Intermezzo als Gymnasiallehrer zunächst in Simferopol, später in Odessa, folgte wiederum in St. Petersburg die Magisterdissertation über „*Spezifische Volumina*“, mit der er sich die Lehrbefähigung für Hochschulen erwarb.³⁾

Als überdurchschnittlich begabter Nachwuchswissenschaftler erhielt er die Möglichkeit, seine Studien im Ausland zu vertiefen. MENDELEJEW entschied sich für Deutschland und verbrachte 22 Monate unter anderem bei Robert BUNSEN (1811-1899) in Heidelberg. In diese Zeit fiel auch der berühmte Karlsruher Chemiker-Kongress im Jahr 1860. Die Teilnahme an diesem Kongress bezeichnete MENDELEJEW später als einen Meilenstein auf dem Weg der Entdeckung des Periodensystems. Nach seiner Rückkehr nach St. Petersburg wurde er im Jahr 1864 Professor am Technologischen Institut und nach Abschluss der Doktordissertation zum Thema „*Über die Verbindungen des Alkohols mit Wasser*“^{3,4)} ab 1865 ordentlicher Professor für technische Chemie sowie später Professor für allgemeine Chemie an der St. Petersburger Universität, wo er 25 Jahre lehrte. Nach Studentenunruhen im Jahr 1890 und einem wohl erzwungenen Abschiedsgesuch übernahm er den Vorsitz in der Kammer für Maße und Gewichte. Diesen Posten bekleidete er bis zu seinem Tod im Jahre 1907.

Vordenker und Wegbereiter

Schon weit vor dem Karlsruher Chemiker-Kongress begannen sich die ersten Konturen des künftigen Periodensystems auszubilden. Einer der ersten Vordenker des Periodensystems war der Hallenser Professor für Technologie Johann MEINECKE (1781-1823). Bereits im Jahr 1819 erkannte er in seiner Abhandlung „*Ueber den stöchiometrischen Werth der Körper, als ein Element seiner chemischen Anziehung*“ sog. „*Diaden*“-Paare der Elemente und bezeichnete diese wenig schmeichelhaft als „*Familien oder Sippschaften*“.⁵⁾

Zehn Jahre später ging aus MEINECKES „*Diadenregel*“ die „*Triadenregel*“ des Jenenser Professors für Chemie, Pharmazie und Technologie Johann Wolfgang DÖBEREINER (1780-1849) hervor. Er beschrieb seine Systematik in der Schrift „*Versuch zu einer Gruppierung der elementaren Stoffe nach ihrer Analogie*“.⁶⁾ Sie war auch der erste erfolgreiche Versuch, gewisse Ordnungsprinzipien der Elemente zu finden. DÖBEREINER zeigte, dass in jeder Triade der Elemente, die sich in ihren Eigenschaften ähnelten, der Mittelwert der leichtesten und schwersten Atomgewichte in etwa dem Atomgewicht des mittleren Elements entsprach (Abb. 2). Prinzipiell ließ dieser Ansatz auch eine vorsichtige Vorhersage noch nicht bekannter Elemente zu.

DÖBEREINER - Triaden

$$\frac{\text{Kalk}^{*)} + \text{Baria}^{*)}}{2} = \text{Strontia}^{*)}$$

(*) Äquivalentgewicht

Ca	Cl	Li	P	S
Sr	Br	Na	As	Se
Ba	J	K	Sb	Te

1817
1829



**Johann Wolfgang
DÖBEREINER**

Abb. 2. DÖBEREINER'sche *Triadenregel* – ein wichtiger Schritt auf dem Weg zum Periodensystem der Elemente

Mit zunehmender Anzahl von bekannten chemischen Elementen wurde es jedoch immer schwieriger, die Triaden-Ordnung der Elemente nach DÖBEREINER aufrechtzuerhalten. Zu denen, die unter Berücksichtigung des jeweils aktuellen Elementbestandes neue Ansätze zur Systematisierung der Elemente lieferten und damit als weitere Wegbereiter des Periodensystems gelten⁷⁾, gehörten (Abb. 3):

Der deutsche Chemiker Leopold GMELIN (1788-1853) gab die Begrenzung der Systematisierung auf die Triaden auf und versuchte, diese auf mehr als drei Elemente mit ähnlichen Eigenschaften zu erweitern.

Der bayrische Chemiker Max PETTENKOFER (1818-1901) erweiterte die GMELIN'sche Systematik und legte dieser die Gleichheit der Atomgewichtsdifferenzen in verschiedenen Elementgruppen zugrunde.

Der britische Chemiker William ODLING (1829-1921) veröffentlichte einen Vorläufer des Periodensystems, nämlich eine Tabelle, in der die Elemente in Gruppen hauptsächlich nach ihren chemischen Ähnlichkeiten geordnet waren.

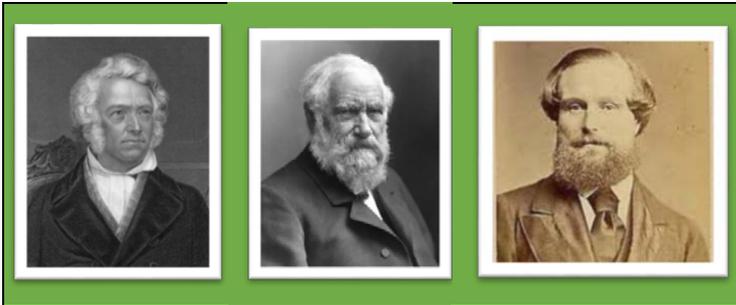


Abb. 3. Vordenker und Wegbereiter des Periodensystems der Elemente: Leopold GMELIN (links), Max Josef PETTENKOFER (Mitte) und William ODLING (rechts)

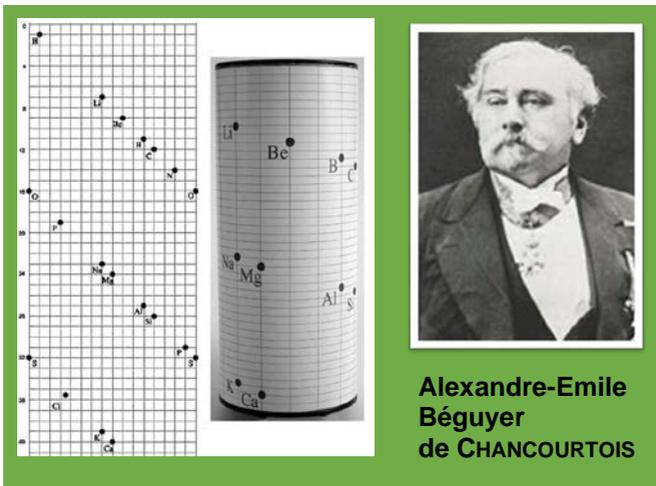
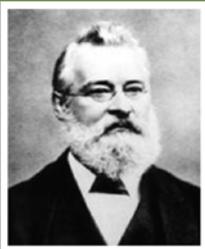


Abb. 4. de CHANCOURTOIS' Anordnung der damals bekannten chemischen Elemente in der Reihenfolge ihrer Atomgewichte auf einer *tellurischen Helix* oder *tellurischen Schraube*

Der französische Chemiker Alexandre de CHANCOURTOIS (1819-1886) erkannte als Erster eine auffallende Periodizität bei den chemischen Elementen und entwickelte ein Ordnungssystem, nach dem die Elemente entsprechend ihren Atomgewichten schraubenförmig auf einem Zylinder eingetragen wurden (Abb. 4). Auf diese Weise tauchten jeweils Elemente mit ähnlichen Eigenschaften senkrecht übereinander auf.

Einen weiteren Schritt in Richtung des künftigen Periodensystems ging der englische Chemiker John NEWLANDS (1837-1898). Er stellte fest, dass bei der Anordnung der Elemente nach steigendem Atomgewicht nach jeweils sieben Elementen ein Element folgte, das sich dem Anfangsglied der Reihe chemisch ähnelte (Abb. 5). Daraus entwickelte er, begrifflich angelehnt an die Musiktheorie, das „Gesetz der Oktaven“.



	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No			
H	1	F	8	Cl	15	Co Ni	22	Br	29	Pd	36	I	43	Pt	50
Li	2	Na	9	K	16	Cu	23	Rb	30	Ag	37	Cs	44	Tl	51
Be	3	Mg	10	Ca	17	Zn	24	Sr	31	Cd	38	Ba V	45	Pb	52
B	4	Al	11	Cr	18	Y	25	Ce La	32	U	39	Ta	46	Tl	53
C	5	Si	12	Ti	19	In	26	Zr	33	Sn	40	W	47	Hg	54
N	6	P	13	Mn	20	As	27	Di Mo	34	Sb	41	Nb	48	Bi	55
O	7	S	14	Fe	21	Se	28	Rh Ru	35	Te	42	Au	49	Th	56

**John Alexander
Reina NEWLANDS**

Abb. 5. NEWLANDS´ches Ordnungsprinzip der chemischen Elemente

Julius Lothar MEYER

Die Verdienste von Lothar MEYER (1830-1895), Arzt und Professor für Physik und Chemie in Eberswalde, Karlsruhe und Tübingen, sind besonders hervorzuheben. Er wird häufig als Mitbegründer des Periodensystems genannt.^{8,9)} Für sein erstes selbständiges Werk „*Moderne Theorien der Chemie*“ untersuchte MEYER die bekannten analogen Elementgruppen und stellte deren konstante Atomgewichtsdifferenzen fest. Dies fasste er in einer Tabelle zusammen, die er bereits 1864 veröffentlichte (Abb. 6). Am Schluss der Abhandlung folgerte er: „[...] und 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“.*¹⁰⁾

Genau hier erfasste MENDELEJEW die Bedeutung seiner Erkenntnisse viel tiefer. In der eingangs erwähnten Mitteilung am 6. März/18. März 1869 in der Sitzung der Russischen Chemischen Gesellschaft stellte er folgende These auf: das Atomgewicht bestimmt den Charakter eines Elements. Durch Kenntnis der Analogien zwischen den Elementen war er sogar so kühn, einige Atomgewichte zu korrigieren und neue Analogien aufzustellen. MENDELEJEW erwartete gar die Entdeckung neuer Elemente, deren Eigenschaften er prognostizierte. Erst im Dezember des gleichen Jahres schloss sich Lothar MEYER in seiner Veröffentlichung *“Die Natur der chemischen Elemente als Function ihrer Atomgewichte“* MENDELEJEWS Vorstellungen vorsichtig an. Dennoch blieb er weiterhin skeptisch und schrieb: *„Es würde voreilig sein, auf so unsichere Anhaltspunkte hin eine Aenderung der bisher angenommenen Atomgewichte vorzunehmen“.*¹¹⁾

	4 werthig	3 werthig	2 werthig	1 werthig	1 werthig	2 werthig
	-	-	-	-	Li = 7,03	(Be = 9,37)
	Differenz =	-	-	-	-	16,02
	C = 12,0	N = 14,04	O = 16,00	Fl = 19,0	Na = 23,05	Mg = 24,0
	Differenz =	16,5	16,96	16,07	16,46	16,08
	Si = 28,5	P = 31,0	S = 32,07	Cl = 35,46	K = 39,13	Ca = 40,0
Differenz =	89,1/2 = 44,55	44,0	46,7	44,51	46,3	47,6
-	As = 75,0	Se = 78,8	Br = 79,97	Rb = 85,4	Sr = 87,6	49,5
Differenz =	89,1/2 = 44,55	45,6	49,5	46,8	47,6	49,5
Sn = 117,6	Sb = 120,6	Te = 128,3	J = 126,8	Cs = 133,0	Ba = 137,1	-
Differenz =	89,4 = 2*44,7	87,4 = 2*43,7	-	-	(71 = 2*35,5)	-
Pb = 207,0	Bi = 208,0	-	-	(TI = 204?)	-	-

Abb. 6. Julius Lothar (ab 1892: von) MEYER und sein System der Elemente aus dem Jahre 1864, sortiert nach dem Atomgewicht und der Wertigkeit in Perioden zu sechs Gruppen

CANNIZZAROS Verdienst

Einen wesentlichen Anstoß zur intensiven Beschäftigung mit der Systematisierung chemischer Elemente gab zweifellos die Rede des italienischen Chemikers Stanislao CANNIZZARO (1826-1910) *„Über Atom- und Molekulargewicht“* auf dem Internationalen Chemiker-Kongress 1860 in Karlsruhe.¹²⁾ Wie MEYER und MENDELEJEW später betonten, war es CANNIZZAROS Verdienst, durch Begriffsklärung der anhaltenden Verwirrung in der Chemie Einhalt geboten zu haben.

Dies ebnete einer einheitlichen chemischen Theorie den Weg. MENDELEJEW hatte CANNIZZAROS „Abriß eines Lehrganges der theoretischen Chemie“ aufmerksam studiert, die auf dem Karlsruher Kongress verteilt wurde. Später schilderte er, dass es ihm nach der Lektüre wie Schuppen von den Augen gefallen sei und das Gefühl ruhigster Sicherheit an die Stelle von Zweifel trat. MENDELEJEW war danach überzeugt, dass es in der Welt der Elemente eine verborgene Ordnung, eine „Periodizität“ geben müsse. Er gestand später: „Die Idee von der Periodizität von Eigenschaften bei ansteigendem Atomgewicht der Elemente war schon damals vor meinem inneren Auge aufgetaucht.“¹³⁾

Schon bei der Vorbereitung seines Lehrbuches „Grundlagen der Chemie“ im Jahr 1868 wandte MENDELEJEW in Grundzügen ein System der Elemente an, obwohl es noch nicht völlig ausgereift war. Dabei musste er sich „[...] für irgendein System der einfachen Körper entscheiden, um bei ihrer Einteilung (sich) nicht durch zufällige, gleichsam instinktive Beweggründe, sondern durch ein genau bestimmtes Prinzip leiten zu lassen.“¹³⁾ Wie MENDELEJEW stets betonte, war gerade das Arbeiten an diesem Buch ausschlaggebend für die Entstehung und Entwicklung des Periodensystems. Jede weitere von insgesamt acht Auflagen dieses Buches in verschiedenen Sprachen (englisch, deutsch, französisch) verzeichnete neue Erfolge und Ergänzungen des Periodensystems.

Heureka-Moment

Der Zeitpunkt sowie die Art und Weise der Entdeckung des Periodensystems blieben jahrelang legendenumwoben. Den Entdeckungsweg schilderte MENDELEJEW selbst als langwieriges Puzzlespiel mit Kärtchen, auf denen er das Atomgewicht und die Eigenschaften der Elemente notiert hatte, wobei ihm der zündende Einfall angeblich im Schlaf kam.¹⁾ Die russische Historiographie der Entdeckung des Periodensystems durch MENDELEJEW war lange durch Bonifatii M. KEDROW (1903-1985) geprägt. Dieser hatte ab den 1940er Jahren die umfangreichen Archivmaterialien analysiert und 1958 sein Buch „Der Tag einer großen Entdeckung“ in russischer Sprache veröffentlicht.¹³⁾ KEDROW zufolge war das Periodensystem das Ergebnis eines plötzlichen Einfalls am 17. Februar^{jul.}/1. März^{greg.} 1869. Später wurde diese Aussage von anderen Historikern zurecht modifiziert, die den Gang der Entwicklung schon in früheren Arbeiten von MENDELEJEW vorbereitet sahen.

Heute lassen sich anhand MENDELEJEWS schriftlicher Notizen und zahlreicher Archivmaterialien die Geschehnisse am Tag der Entdeckung des Periodensystems recht genau rekonstruieren.

Mitte Februar 1869 erhielt MENDELEJEW eine Freistellung von der Universität, um im Auftrag der Freien Ökonomischen Gesellschaft (FÖG) in die Provinz Twer zu reisen. Dort sollte er zunächst bei örtlichen Käseproduzenten über Stand und mögliche Modernisierungen von Produktionsverfahren vortragen. Anschließend sollte er mehrere Bauernhöfe der Umgebung besichtigen, um der FÖG über die Entwicklung der Agrarwirtschaft in dieser Region zu berichten bzw. Vorschläge zu deren Kommerzialisierung zu unterbreiten. Angesichts der Entfernung zwischen St. Petersburg und Twer von ca. 600 km und gemessen an Möglichkeiten der damaligen Verkehrsmittel musste die Reise mit Bedacht und vorausschauend geplant werden.

Just am Tag der Abreise, also am 17. Februar 1869, an dem MENDELEJEW am Frühstückstisch die Details der anstehenden Reise wiederholt im Kopf zu sortieren versuchte, erhielt er zwei Briefe: einen Dankbrief des Vorstandes der FÖG für die Bereitschaft, die Strapazen der Reise auf sich zu nehmen, und einen eher privaten Brief von Professor Aleksei I. CHODNEW (1818-1883), Geschäftsführer der FÖG. CHODNEW schlug MENDELEJEW vor, bei der Reise in die Provinz über den möglichen Einsatz der Stickstoff-, Phosphat- oder Kalium-Einzeldünger in der Landwirtschaft nachzudenken und dazu ebenfalls Vorschläge zu unterbreiten. Anstoß dazu lieferte ganz offensichtlich Justus von Liebig (1803-1873) bedeutendes Werk „*Die Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie*“, kurz „*Agriculturchemie*“ genannt¹⁴⁾, in der er die Mineraldüngung propagierte und ihre Bedeutung für Qualität und Ertrag der Pflanzen erklärte.

MENDELEJEW hatte sich schon mehrere Tage zuvor beim Arbeiten an seinen „*Grundlagen der Chemie*“ mit dem Problem der Systematisierung chemischer Elemente sehr intensiv beschäftigt. Er grübelte über die „*Periodizität*“ als das ordnende Prinzip in der Welt der Elemente. Im Nachhinein gab er zu: „*Alles hat sich im Kopf irgendwie ausgebildet, nur kann ich das Ganze nicht als Tabelle wiedergeben.*“¹³⁾

In Gedanken vertieft drehte MENDELEJEW den Brief von CHODNEW um, und begann chemische Symbole und Atomgewichte darauf zu kritzeln (Abb. 7, links). Er murmelte „*Kalium... Chlor... Chlor... Kalium*“ und schrieb die Symbole von Cl und K auf. Die Atomgewichte beider

Elemente liegen nah beieinander: Chlor 35,5, Kalium 39. Daraufhin begann MENDELEJEV, nach anderen ähnlich „paradoxe“ Paaren zu suchen.

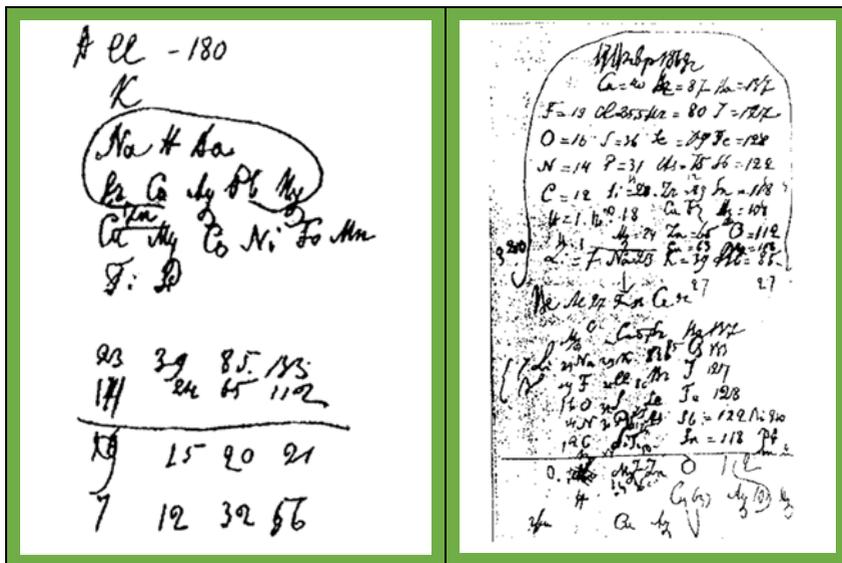


Abb. 7. Links: Notizen MENDELEJEWS auf der Rückseite des Briefes von CHODNEW; Rechts: Notizen MENDELEJEWS auf der Rückseite des Briefes vom FÖG-Vorstand¹⁵⁾

Dabei ging es ihm zuerst offenbar nicht darum, die Ähnlichkeiten zwischen den Elementen in den Vordergrund zu stellen, sondern vielmehr darum, die Differenzen von Atomgewichten zweier Gruppen chemisch unterschiedlicher Elemente zu vergleichen. Der Vergleich der Alkalimetallreihe Na, K, Rb und Cs anhand der Atomgewichte 23, 39, 85 und 133 mit der Reihe der ungleichen Elemente Be, Mg, Zn und Cd mit Atomgewichten 14, 24, 65 und 112 deutete bei ihren Differenzen von 9, 15, 21 und 20 keine Systematik an. Auch andere Anordnungen lieferten kein brauchbares Ergebnis.

MENDELEJEV kamen erste Zweifel bezüglich des damals bekannten Atomgewichts für Be von rund 14, das er auf 9,4 korrigierte. Dieses Atomgewicht für Be wurde durch Bohuslav BRAUNER (1855-1935) erst zehn Jahre später bestätigt.¹⁶⁾

Das chemische Patience-Spiel

Beim Ordnen der Elemente half MENDELEJEW sein enzyklopädisches Wissen über deren chemische Eigenschaften. Dies ermutigte ihn, die Elemente nicht nur nach dem mathematischen Prinzip der einfachen Differenzgleichheit von Atomgewichten zu systematisieren, sondern auch in Bezug auf ihre Eigenschaften zu gruppieren. Dabei suchte er nicht nach der Nachbarschaft der Gruppen aus ungleichen Elementen mit ähnlichen Atomgewichten, sondern ließ vielmehr Metallgruppen einander dicht folgen, die sich in ihren Atomgewichten nur unwesentlich unterschieden, jedoch eine andere charakteristische Valenz eines Atoms aufwiesen.

MENDELEJEWS Gedanken rasten wohl schneller als er schreiben konnte. Als auf dem CHODNEW-Brief kein Platz mehr war, griff er zum Brief des FÖG-Vorstandes, schrieb auf der Rückseite zunächst das Datum und skizzierte dann zwei grobe Tabellenentwürfe (Abb. 7, rechts). Im oberen Tabellenentwurf befanden sich waagerechte Spalten mit Elementgruppen, geordnet nach den Verwandtschaften in den chemischen Eigenschaften und zunehmendem Atomgewicht. Die jeweiligen Elementgruppen schrieb MENDELEJEW untereinander so auf wie bei einer arithmetischen Subtraktion. Es entstanden gut erkennbare senkrechte Spalten in Richtung der abnehmenden Atomgewichte der Elemente. Auf dem Brief bildeten sich schließlich zwei unvollständige Tabellenentwürfe, wobei im oberen Entwurf mehr als die Hälfte und im unteren fast zwei Drittel der damals bekannten Elemente angeordnet waren.

MENDELEJEW begann die Gesetzmäßigkeit hinter den zusammengerückten Gruppen der Elemente zu ahnen, konnte diese aber in dem Augenblick noch nicht vollständig fassen. Um das Sortieren der Elemente zu erleichtern, fertigte er Kärtchen für alle damals bekannten Elemente mit chemischen Symbolen und Atomgewichten an und begann, eine Art „*chemische Patience*“ zu legen. Die Kärtchen schob er je nach Ordnungsansatz immer hin und her und behielt zugleich die nicht verwendeten Kärtchen im Auge, um Lücken passend auszufüllen. Auf einem neuen Blatt notierte MENDELEJEW die Elemente in die Tabelle, die vor seinem geistigen Auge erschienenen, nach dem Prinzip der „*Periodizität*“ der ausgelegten Elementkärtchen. Auch dieser Bogen glich eher einem Bilderrätsel (Abb. 8, links). Dennoch vermerkte er als Randnotiz: „*Da ist was dran!*“.

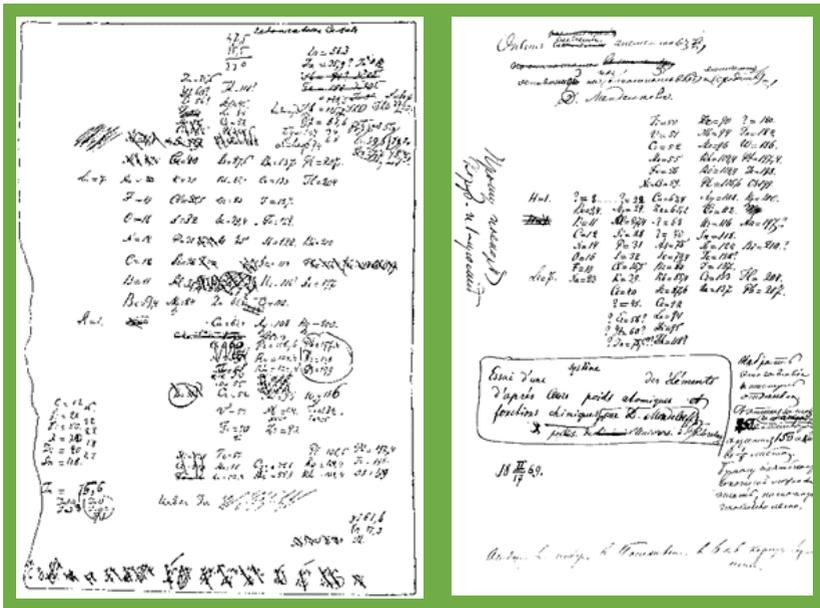


Abb. 8. Links: Notizen MENDELEJEWS nach dem „chemischen Patience-Spiel“ mit Elementkärtchen; Rechts: MENDELEJEWS Manuskript des ins reine aufgeschriebenen Periodensystems¹³⁾

Erschöpft soll MENDELEJEW eigener Aussage zufolge in einen kurzen Schlaf versunken sein. Doch plötzlich erwachte er, weil ihm sein Kartenspiel im Tagtraum viel harmonischer und logischer geordnet erschien. Nun zeichnete er eine neue Tabelle (Abb. 8, rechts), in der er die Elemente in den senkrechten Spalten nicht nach sinkender, sondern nach ansteigender Atommasse aufreichte. Die schwereren Elemente befanden sich jetzt unter den leichteren, wobei die waagerechten Spalten Elemente mit vorwiegend ähnlichen Eigenschaften enthielten.

Schließlich betitelte er das Aufgeschriebene in Russisch und Französisch mit „*Versuch eines Systems der Elemente, begründet auf deren Atomgewicht und chemischen Gemeinsamkeiten*“, datierte es mit 17.02.1869, schickte am späten Nachmittag alles in die Druckerei und trat erst spät am Abend seine Dienstreise nach Twer an.

Auffinden der Periodizität

Als der Schriftführer der Russischen Chemischen Gesellschaft Nikolai A. MENSCHUTKIN in der März-Sitzung der Gesellschaft das von MENDELEJEW entwickelte Periodensystem der Elemente vorstellte, erhielt diese Entdeckung zunächst wenig Beachtung. Selbst der damalige Präsident der Russischen Chemischen Gesellschaft, Nikolai N. SININ (1812-1880) äußerte sich abfällig zum Versuch MENDELEJEWS, eine Ordnungstafel der Elemente aufzustellen, und meinte, MENDELEJEW mache nicht das, womit sich ein echter Forscher beschäftigen sollte. Trotz der Gleichgültigkeit seiner Kollegen erschien der entsprechende Aufsatz und die erste Tabelle noch im April 1869 im ersten Band des *Journals der Russischen Chemischen Gesellschaft* auf Russisch¹⁷⁾ und in der *Zeitschrift für Chemie* auf Deutsch.¹⁸⁾

Diese erste Publikation MENDELEJEWS zum Periodensystem, deren erste Seite aus der *Zeitschrift für Chemie* in Abb. 9 rechts zu sehen ist, gehört zu einer der meist zitierten naturwissenschaftlichen Publikationen und wurde aus diesem Grund von der Abteilung Chemiegeschichte der Amerikanischen Chemischen Gesellschaft mit einer Gedenktafel an der früheren Wirkungsstätte von MENDELEJEWS an der St. Petersburger Universität im Jahre 2012 ausgezeichnet.

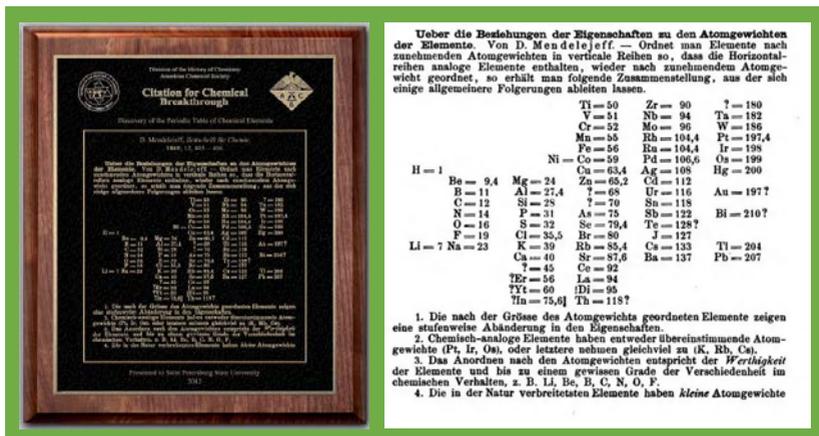


Abb. 9. The Division of the History of Chemistry of the American Chemical Society: Citation for Chemical Breakthrough Award im Jahr 2012 für die Abhandlung in *Zeitschrift für Chemie* 12 (1869) 405-406;¹⁷⁾ (Original siehe in *J. Russ. Phys.-Chem. Soc.* 1 (1869) 60-77¹⁸⁾)

Aus der aufgestellten Tabelle leitete MENDELEJEV acht allgemeine Folgerungen ab. Der erste und wohl wichtigste Grundsatz lautete in der deutschen Übersetzung: „Die nach der Grösse des Atomgewichts geordneten Elemente zeigen eine **stufenweise Abänderung** in den Eigenschaften“. Ein Vergleich mit dem russischen Original offenbart allerdings einen wesentlichen Übersetzungsfehler. Denn im ursprünglichen Text hieß es: „Элементы, расположенные по величине их атомного веса, представляют **явственную периодичность свойств**“, was auf Deutsch richtigerweise bedeutet: „Die nach der Größe des Atomgewichts geordneten Elemente zeigen eine **deutliche Periodizität der Eigenschaften**“. Ob diese fachliche Unkorrektheit bei der Übersetzung durch Friedrich BEILSTEIN (1838-1906) eine Absicht oder ein Zufall gewesen war, lässt sich heute nicht mehr aufklären.

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ, ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.									
				Ti=50	Zr= 90	?=180.			
				V=51	Nb= 94	Ta=182.			
				Cr=52	Mo= 96	W=186.			
				Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,1.			
				Fe=56	Ru=104,4	Ir=198.			
				Ni=Co=59	Pd=106,6	Os=199.			
H=1				Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.			
	Be= 9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112					
	B=11	Al=27,3	?=68	Ur=116	Au=197?				
	C=12	Si=28	?=70	Sn=118					
	N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?				
	O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?					
	F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127					
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204.				
		Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207.				
		?=45	Ce=92						
		?Er=56	La=94						
		?Yt=60	Di=95						
		?In=75,6	Th=118?						

Л. Менделѣевъ

Abb. 10. MENDELEJEV'S ursprüngliche im April 1869 gedruckte Form des Periodensystems der Elemente

Von der Tabelle selbst wurden 150 Exemplare in russischer Sprache (Abb. 10) und 50 Exemplare in Französisch gedruckt.

Die Tabelle enthielt vier Atommassen, die MENDELEJEW aufgrund seiner Periodizitätsregel berechnet und mit Fragezeichen versehen hatte. Sie füllten die Lücken für die noch unbekanntenen Elemente mit Atommassen 45, 68, 70 und 180 auf. Außerdem hatte MENDELEJEW zwei Elemente Au – 197 und Bi – 210 ebenfalls mit Fragezeichen versehen sowie die Elemente Ni = Co = 59 an derselben Stelle platziert, was die Anzahl der Elemente in der Spalte Ti – Cu um eins verringerte. Dadurch enthielt sie genauso viele Elemente wie die Spalte Zr – Ag und ? = 180 – Hg. Tellur und Iod platzierte MENDELEJEW nicht nach steigendem Atomgewicht, sondern ließ sich von der Ähnlichkeit der chemischen Eigenschaften leiten. Sonst wäre Tellur in die Halogengruppe gewandert, und Iod wäre chemisch verwandt mit Selen.

Diese Veröffentlichung von MENDELEJEW wird wohl Lothar MEYER den Anstoß gegeben haben, seine bereits ein Jahr zuvor erstellte Tabelle, die aber nicht gedruckt wurde und nur handschriftlich erhalten geblieben ist¹⁹⁾, in überarbeiteter Form ebenfalls zu publizieren.²⁰⁾ Dabei ging MEYERS Systematisierung der Elemente in einigen Aspekten über die von MENDELEJEW hinaus. Er entdeckte, dass das „Atomvolumen eine periodische Funktion des Atomgewichts ist“ (Abb. 11).

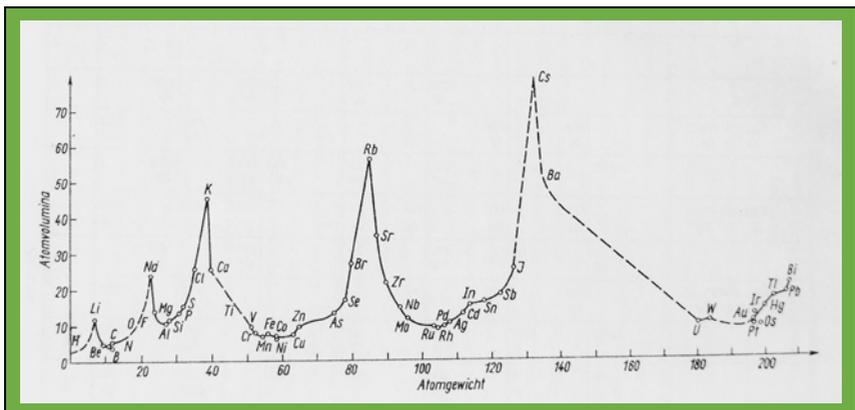


Abb. 11. Die Periodizität der Atomvolumina in Abhängigkeit von den Atomgewichten nach MEYER²¹⁾

Mehr noch, eine gleiche Periodizität konnte MEYER nahezu bei allen physikalischen Eigenschaften der Elemente feststellen. Dies ermöglichte ihm, fußend auf der Abhängigkeit der Atomvolumina (=Atomgewicht dividiert durch spezifisches Gewicht) von den Atomgewichten, die von MENDELEJEV noch falsch eingeordneten Elemente Au, Hg, Tl, und Pb an die richtige Stelle zu setzen und die Elementtabelle zu korrigieren. Im Gegensatz zu MENDELEJEV wagte es MEYER allerdings nicht, Voraussagen bezüglich noch unentdeckter Elemente zu treffen.

MENDELEJEV selbst war von der Richtigkeit seines Systems überzeugt. Sein enzyklopädisches Wissen erlaubte es ihm, chemische Eigenschaften und physikalische Daten der damals bekannten 63 Elemente nach dem ordnenden Prinzip der „*Periodizität*“ geradezu spielerisch zu kombinieren. Der zweiseitigen Ur-Publikation zum Periodensystem im Jahr 1869^{17,18)} folgten ausführliche Publikationen, in denen MENDELEJEV sein System verbesserte und damit dessen Richtigkeit und Ausbaufähigkeit begründete.

Den Terminus „*Periodisches Gesetz*“ verwendete MENDELEJEV erstmals in seiner Abhandlung „*Das natürliche System der Elemente und seine Anwendung zur Vorhersage der Eigenschaften einiger Elemente*“ im *Journal der Russischen Chemischen Gesellschaft*, datiert vom 28. November^{jul.} 1870 (11. Dezember^{greg.} 1870). Darin wies er auch sehr bestimmt auf die Existenz noch nicht entdeckter Elemente hin.²²⁾

Die ursprüngliche systematische Darstellung der Elemente justierte MENDELEJEV im Verlaufe eines Jahres nach und verbesserte sie, sodass schließlich die klassische Kurzform des Periodensystems resultierte (Abb. 12). Diese Form enthielt sieben Hauptgruppen von Elementen, deren Glieder über jeweils ähnliche Eigenschaften verfügten. Zusätzlich legte er die Wertigkeit der Elemente und die von ihnen gebildeten Verbindungen zugrunde. Die Formen, zu denen sich Elemente mit Wasserstoff und Sauerstoff verbinden, nahm MENDELEJEV als gesonderte Reihe in seine Tabelle mit auf. Er begründete dies so: „*Die höchsten Verbindungen eines Elementes mit Wasserstoff und Sauerstoff, folglich auch mit äquivalenten Elementen, werden durch das Atomgewicht desselben bestimmt, von welchem sie eine periodische Funktion sind.*“²³⁾

Reihen	Gruppe I. — R ² O	Gruppe II. — RO	Gruppe III. — R ² O ³	Gruppe IV. RH ⁴ RO ²	Gruppe V. RH ³ R ² O ⁵	Gruppe VI. RH ² RO ³	Gruppe VII. RH R ² O ⁷	Gruppe VIII. — RO ⁴
1	H=1							
2	Li=7	Be=9.4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27.3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35.5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	—
9	(—)	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	—
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	—

Abb. 12. Klassische Kurzform des Periodensystems der Elemente, 1871²⁴⁾

In der im August 1871 erschienenen Publikation „*Die periodische Gesetzmäßigkeit der chemischen Elemente*“, die in den *Annalen der Chemie und Pharmacie* im gleichen Jahr in deutscher Übersetzung gedruckt wurde, formulierte MENDELEJEV schließlich den Grundsatz über die periodische Gesetzmäßigkeit chemischer Elemente²⁴⁾:

„*Die Eigenschaften der Elemente (folglich auch der aus ihnen gebildeten einfachen und zusammengesetzten Körper) befinden sich in periodischer Abhängigkeit von deren **Atomgewichten***“.

Diese von MENDELEJEV als Naturgesetz erkannte Systematik chemischer Elemente blieb gültig für die nächsten 50 Jahre.

Siegeszug des „*Periodischen Gesetzes*“

Außerhalb Russlands stieß das MENDELEJEV'sche Periodensystem der Elemente selbst bei prominenten Chemikern zunächst auf Desinteresse oder gar auf Ablehnung. So behauptete der Physikochemiker und künftige Nobelpreisträger, Wilhelm OSTWALD (1853-1932), es handle sich um kein Gesetz, sondern nur um ein Prinzip zur Klassifikation „*von irgendetwas Unbestimmtem*“. Selbst der Entdecker der Alkalimetalle Cäsium und Rubidium, Robert BUNSEN, bei dem MENDELEJEV 1860/61 mit einem Auslandsstipendium in Heidelberg geforscht hatte, und in

dieser Zeit den bereits erwähnten internationalen Chemiker-Kongress in Karlsruhe 1860 besuchte, schrieb, MENDELEJEV berausche die Chemiker „mit der erdachten Welt reinster Abstraktionen“. Und der Entdecker der Salicylsäuresynthese Hermann KOLBE (1818-1884), nannte das MENDELEJEV'sche Periodensystem „reinste Spekulation“.²⁵⁾

Trotz dieser Skepsis propagierte MENDELEJEV sein System in Vorträgen und Vorlesungen. Das ordnende Prinzip im Reich der chemischen Elemente sei die „Periodizität“, so sein Credo. Diese Überzeugung ermutigte MENDELEJEV sogar – anders als etwa den anderen Vordenker des Periodensystems Lothar MEYER – unbekannte Elemente vorauszusagen: Eka-Aluminium, Eka-Bor und Eka-Silicium. Mit der tatsächlichen Entdeckung dieser Elemente (Abb. 13) begann dann der Siegeszug des MENDELEJEV'schen Periodensystems, sodass sein deutscher Konkurrent vor der Geschichte kaum noch Chancen auf Gleichbehandlung hatte.²⁶⁾

Im Jahr 1875 fand der französische Chemiker Paul Émile Lecoq de BOISBAUDRAN (1838-1912) MENDELEJEV's Eka-Aluminium im Mineral Wurtzit. Er nannte das neue Element *Gallium* – nach Gallien, der lateinischen Bezeichnung Frankreichs. Im Elementnamen versteckt sich allerdings auch eine subtile Anspielung auf den Namen des Entdeckers. Das lateinische Wort „*Gallus*“ bedeutet „Hahn“, und im Französischen heißt der gallische Hahn „*Le-coq*“.

Im Jahre 1879 entdeckte der schwedische Chemiker Lars Fredrik NILSON (1840-1899) das Element *Scandium*. NILSON isolierte ein neues Oxid aus den Mineralen Euxenit und Gadolinit. Das darin verborgene neue Element benannte er zu Ehren seiner nordischen Heimat. Aber erst sein Landsmann Per Teodor CLEVE (1840-1905) erkannte später, dass Scandium das von MENDELEJEV vorhergesagte Eka-Bor war. CLEVE war auch der Entdecker der Lanthanoide Holmium und Thulium; außerdem identifizierte er das vermeintliche Element Didym als Mischung aus Praseodym und Neodym.

Das ebenfalls von MENDELEJEV vorausgesagte Element Eka-Silicium wurde erst 15 Jahre nach seiner Prognose entdeckt. Am 6. Februar 1886 berichtete der deutsche Chemiker Clemens WINKLER (1838-1904), dass er nach viermonatiger Arbeit aus dem Freiburger Mineral Argyrodit ein neues Element isoliert hatte. Aus Liebe zu seinem Vaterland nannte er es *Germanium*.

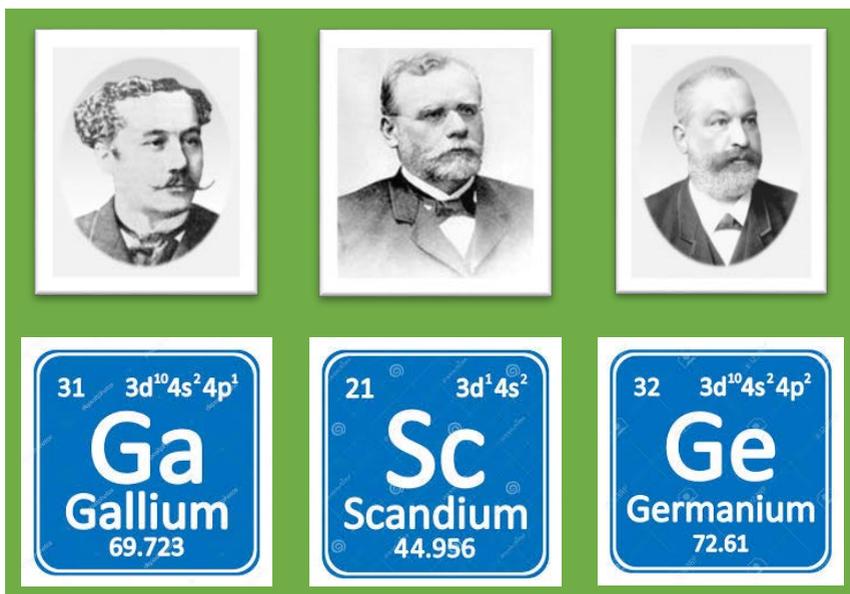


Abb. 13. Entdecker der von MENDELEJEW vorausgesagten Elemente Gallium, Scandium und Germanium: Paul Émile Lecoq de BOISBAUDRAN (links), Lars Fredrik NILSON (Mitte) und Clemens WINKLER (rechts)

Die von MENDELEJEW im Jahr 1871 prognostizierten physikalischen und chemischen Eigenschaften von Eka-Silicium und dessen Verbindungen stimmten mit den tatsächlichen Eigenschaften des Germaniums verblüffend gut überein (Abb. 14). So sollte Eka-Silicium ein fester dunkelgrauer Stoff sein, eine Atommasse von 72 sowie ein Atomvolumen von ca. 13 cm^3 und eine Dichte von $5,5 \text{ g/cm}^3$ haben sowie ein flüssiges Chlorid (GeCl_4) bilden – all dies bestätigte sich.

Daher resümierte WINKLER anlässlich der Entdeckung des Germaniums²⁷⁾: „[...] einen schlagenderen Beweis für die Richtigkeit der Lehre von der Periodizität der Elemente, als den, welchen die Verkörperung des bisher hypothetischen „Eka-Siliciums“ in sich schließt, kann es kaum geben, [...] er bedeutet einen mächtigen Schritt ins Reich der Erkenntnis.“

Das Füllen der Lücken im Periodensystem überzeugte Wissenschaftler auf der ganzen Welt. MENDELEJEWs Tabelle half nicht nur, chemische Elemente zu systematisieren, sondern war auch ein grafischer Ausdruck des grundlegenden Naturgesetzes, der Periodizität.

Eka-Silicium („Es“) und Germanium (Ge)		
	Vorausgesagt (Mendelejew, 1871)	Gefunden (Winkler, 1886)
<u>Element</u>	Es	Ge
Dichte	5,5 g · cm ⁻³	5,35 g · cm ⁻³
Atomvolumen	13 cm ³	13,6 cm ³
Eigenschaften	dunkelgrau, schwer schmelzbar	grau bis silberweiß, sublimiert bei Rotglut ohne zu schmelzen
<u>Oxid</u>	EsO ₂	GeO ₂
Dichte	4,7 g · cm ⁻³	4,70 g · cm ⁻³
Eigenschaften	schwach basisch, leicht reduzierbar	amphoter, reduzierbar beim Erhitzen mit Wasserstoff
<u>Chlorid</u>	EsCl ₄	GeCl ₄
Dichte	1,9 g · cm ⁻³	1,88 g · cm ⁻³
Siedepunkt	57 ... 100 °C	83 °C
<u>Ethylverbindung</u>	EsAe ₄	Ge(C ₂ H ₅) ₄
Dichte	0,96 g · cm ⁻³	0,991 g · cm ⁻³
Siedepunkt	160 °C	163 °C

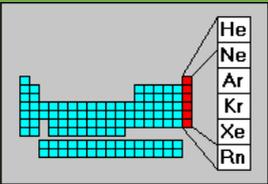
Abb. 14. Vergleich ausgewählter Eigenschaften von Eka-Silicium (Prognosen 1871) und Germanium (Befunde 1886)

Den hohen wissenschaftlichen Wert des Periodensystems erkannten nicht nur die Chemiker-Kollegen. Zu verschiedenen Anlässen musste MENDELEJEW wiederholt über den denkwürdigen Tag der großen Entdeckung erzählen. Er war dessen so überdrüssig, dass er eines Tages anlässlich eines Interviews zu seinem 70. Geburtstag im Jahr 1904 gegenüber einem lästigen Reporter vom *Petersburger Blatt* auf seine Frage hin „*Wie denn der Gedanke des Periodensystems bei Mendelejew geboren war?*“ etwas genervt erwiderte²⁸⁾: „*Nicht so wie bei Ihnen, Väterchen! Kein Fünfer für eine Zeile! Nicht so wie Sie! [...] Darüber habe ich vielleicht fünfundzwanzig Jahre nachgedacht, und Sie denken: ich sitze da und mit einem Mal ein Fünfer für eine Zeile, ein Fünfer für eine Zeile, und fertig! So nicht! [...].*“

Hier übertreibt der große Gelehrte, denn zum Zeitpunkt der Entdeckung des Periodizitätscharakters chemischer Elemente war er gerade 35 Jahre alt gewesen, und damit hätte er ja schon als Schüler am Tobolsker Gymnasium beginnen müssen, über dieses Problem nachzudenken, was nicht der Wahrheit entspricht.

Erweiterung der Periodizität

An der Schwelle zum 20. Jahrhundert schien das MENDELEJEW'sche Periodensystem jedoch an seine Grenzen zu stoßen. Untersuchungen der Seltenen Erden sowie später von radioaktiven Substanzen brachten neue Elemente zum Vorschein, die schwierig in das bestehende Periodensystem einzuordnen waren. Außerdem rief die Entdeckung von Argon durch William RAMSAY (1852-1916) und John Strutt RAYLEIGH (1842-1919) im Jahr 1894 die Kritiker des Periodensystems wieder auf den Plan. Die Existenz dieses Gases konnte MENDELEJEW zum Zeitpunkt der Entdeckung des Periodensystems noch nicht vermuten. Die dadurch entstandene Krise um das Periodensystem endete jedoch bald, als auch Helium, Krypton, Xenon und Neon isoliert wurden (Abb. 15): RAMSAY ordnete sie als „Nullte Gruppe“ in das Periodensystem ein.



Helium	1895	Ramsay & Cleve
Neon	1898	Ramsay & Travers
Argon	1894	Ramsay & Rayleigh
Krypton	1898	Ramsay & Travers
Xenon	1898	Ramsay & Travers
Radon	1900	Dorn

Sir William RAMSAY

Position der Edelgase | Entdeckung der Edelgase im Periodensystem

Abb. 15. Entdeckung und Einordnung der Edelgase im Periodensystem der Elemente (Langformtabelle)

MENDELEJEW folgte dem Vorschlag von RAMSAY bei der Neuauflage seines Lehrbuches "*Grundlagen der Chemie*" im Jahr 1903. Er ergänzte in seinem Periodensystem diese Nullte Gruppe der Elemente, und überschrieb sie mit „*Inertgase*“. Später bildeten sie die 8. Hauptgruppe in der Kurzformtabelle sowie seit 1986 die 18. Gruppe in der durch die IUPAC empfohlenen Langformtabelle (vgl. Abb. 15). 1904 erhielt RAMSAY den Nobelpreis für Chemie für seine Forschungen auf dem Gebiet der Edelgase „*als Anerkennung des Verdienstes, das er sich durch die Entdeckung der indifferenten gasförmigen Grundstoffe in der Luft und die Bestimmung ihres Platzes im periodischen System erworben hat.*“

Als schwierig ins Periodensystem einzuordnen, erwiesen sich die neuentdeckten radioaktiven Elemente und die Elemente mit nahezu gleichen Eigenschaften und ähnlichen Atommassen. MENDELEJEV konnte die sich häufenden Abweichungen vom Periodizitätsgesetz nicht erklären und stand der Theorie des radioaktiven Zerfalls skeptisch gegenüber. Denn nur wenige Chemiker konnten sich damals vorstellen, dass Atome auf chemischem oder physikalischem Wege zerlegbar seien und so Atome anderer Elemente entstehen könnten. Erst im Jahr 1913 gelang es, die Ursachen der Eigenschaftenperiodizität der Elemente widerspruchsfrei zu deuten.

Henry MOSELEY (1887-1915) zeigte mit Hilfe der Röntgenspektroskopie, dass zwischen der Wurzel der Frequenz der charakteristischen Röntgenstrahlung und der Ordnungszahl (=Kernladungszahl) der Elemente eine lineare Beziehung existiert (Abb. 16).

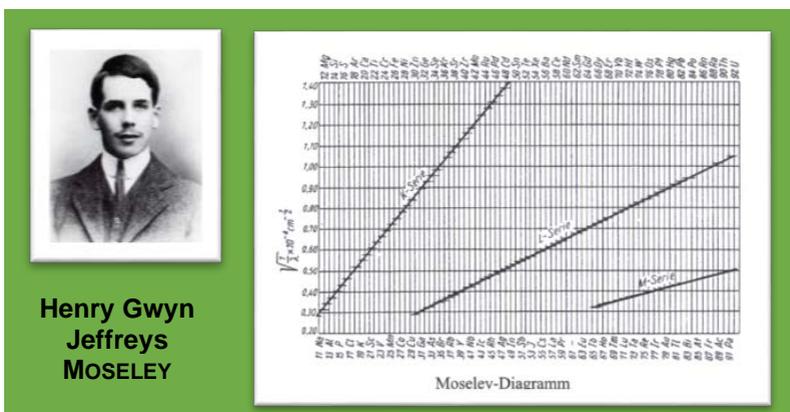


Abb. 16. MOSELEYS Entdeckung der Kernladungszahl der Elemente als Ordnungsprinzip im Periodensystem der Elemente

Das nach ihm benannte MOSELEY'sche Gesetz besagt, dass die Ordnungs- oder Kernladungszahl der Elemente die Reihenfolge der Elemente im Periodensystem bestimmt – nicht die Atommasse. Auf dieser Basis sagte MOSELEY in der Tradition MENDELEJEWS die Existenz von Elementen mit den Ordnungszahlen 43, 61 und 75 voraus. Auch er lag damit richtig: Diese Elemente sind heute bekannt als Technetium, Promethium und Rhenium.

Das von MENDELEJEV im Jahre 1871 formulierte Gesetz über die periodische Abhängigkeit der Eigenschaften chemischer Elemente von deren „**Atomgewichten**“ wurde somit neu gefasst und lautet in der heutigen Fassung:

*„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**.“*

Die Stellung eines Elements im Periodensystem beruht damit auf seiner Elektronenanordnung. Das periodische Auftreten von Elementen mit ähnlichen Eigenschaften liegt in der periodischen Wiederholung gleicher Elektronenkonfigurationen in den äußeren Atomshalen begründet, wie Niels BOHR (1885-1962) in seinen theoretischen Arbeiten zum Atombau Anfang der 1920er Jahre zeigte. Mit der Entdeckung immer neuer Elemente und der Zusammenfügung zu einem Lanthanoiden-Block nach BOHRs Vorschlag im Jahr 1921 sowie zu einem darunter liegenden Actinoiden-Block nach einem Vorschlag von Glenn T. SEABORG (1912-1999) im Jahr 1945 war die physikalische Interpretation des Periodizitätsgesetzes vollendet.

Das faszinierende Ordnungsprinzip des Periodensystems inspirierte immer wieder viele Forscherinnen und Forscher aus verschiedenen Bereichen der Naturwissenschaften, Technik, Kultur und Medien dazu, nach weiteren Zusammenhängen im Reich der Elemente gattungs- und fächerspezifisch zu suchen. Dabei fehlte es nicht an sehr kreativen und zum Teil auch kuriosen Ideen zur Darstellungsform des Periodensystems.⁷⁾ Bildhafte Darstellungen reichen von Fächer- und kreisförmigen Systemen über das Lemniskate- und Arena-System bis hin zu dem mit neuen Medien erstellten spiralförmigen System oder zu dem kunstvollen Blumen-Periodensystem (Abb. 17). Selbst manche Gebäudefassaden werden mit dem Periodensystem der Elemente dekoriert, wie dies am letzten Wohnsitz MENDELEJEWS von 1893 bis 1907, am Moskowskii Prospekt 19, in St. Petersburg geschehen ist (Abb. 18).

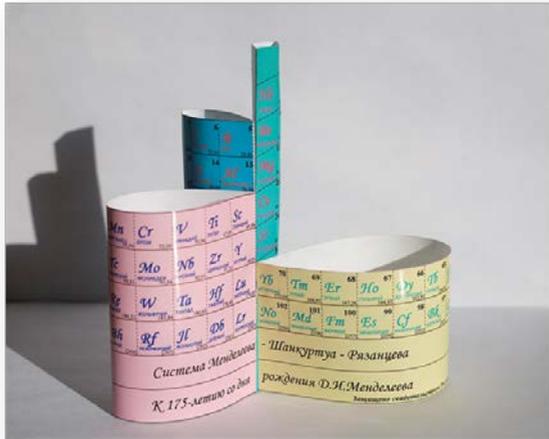


Abb. 17. Blumen-Periodensystem aus dem Jahr 2009. Die Elemente sind nach aufsteigender Ordnungszahl als aufgewickeltes Band dargestellt. Die Nebengruppenelemente sowie die Actinoide und die Lanthanoide bilden jeweils eine Schleife neben den Hauptgruppenelementen



Abb. 18. MENDELEJEV-Denkmal und sein Periodensystem der Elemente in St. Petersburg, enthüllt anlässlich des 25. Todestages von MENDELEJEV am 02.02.1932 (Bildhauer Ilya Ja. GINZBURG (1859-1939))

Nachruhm

Schon zu Lebzeiten erhielt MENDELEJEW hohe Ehrungen: Er war Mitglied in 90 ausländischen Akademien der Wissenschaften, darunter in der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin und der Royal Society. Trotz seines Ansehens im Ausland und obwohl MENDELEJEW Mitbegründer der Russischen Chemischen Gesellschaft war, wurde er allerdings nie Mitglied der Russischen Akademie der Wissenschaften. Gemeinsam mit Lothar MEYER, dem deutschen Vordenker des Periodensystems, erhielt MENDELEJEW im Jahr 1882 die DAVY-Medaille.

Die höchste Auszeichnung für Wissenschaftler, der Nobelpreis, blieb ihm nach insgesamt dreifacher Nominierung – jeweils durch ausländische Wissenschaftler und nicht durch eigene Landsleute – in den Jahren 1905, 1906 und 1907 verwehrt. Im Jahre 1905 befand er sich im engsten Kreis der Kandidaten auf einer „Dreierliste“, den Nobelpreis erhielt jedoch der deutsche Chemiker Adolf von BAEYER (1835-1917) für seine Arbeiten über synthetische organische Farbstoffe. Ein Jahr später schlug das Nobelpreiskomitee mit vier Ja-Stimmen und einer Nein-Stimme der Schwedischen Königlich Akademie die Verleihung des Nobelpreises an MENDELEJEW vor. Doch die Mitglieder der Akademie akzeptierten das Votum des Nobelpreiskomitees nicht und bestanden darauf, vier weitere Mitglieder in das Komitee einzuberufen und die Abstimmung zu wiederholen. Im Ergebnis der Wahlwiederholung ging der Nobelpreis an den französischen Chemiker Henri MOISSAN (1852-1907) für die Untersuchung und Isolierung des Elements Fluor im Jahre 1886. Eine Nominierung MENDELEJEWS zusammen mit Stanislao CANNIZZARO im Jahre 1907 musste zurückgenommen werden, da er am 2. Februar 1907 starb, und eine postum-Verleihung des Nobelpreises laut dem Vermächtnis von Alfred NOBEL (1833-1896) nicht vorgesehen war.

Dafür ist MENDELEJEWS Name im Periodensystem verewigt: das im Jahr 1955 von den Wissenschaftlern der University of California künstlich erzeugte Element mit der Ordnungszahl 101 wurde auf Vorschlag des Nobelpreisträgers und Mitentdeckers des neuen Elements Glenn T. SEABORG *Mendelevium* benannt und erhielt das Elementsymbol Md (Abb. 19). Der Name und das Symbol wurden 1994 endgültig von der IUPAC bestätigt.



Abb. 19. Porträt von Dmitri I. MENDELEJEV im Talar des Ehrendoktors der Edinburgh University (1885), (Maler Ilja J. REPIN (1844-1930), Standort Moskau, Tretjakow-Galerie); Symbol des Elements Mendeleevium

Die jüngsten Zugänge im Periodensystem, die Elemente 113, 115, 117 und 118, komplettieren die siebente Periode. Bis zur offiziellen Anerkennung trugen sie die Platzhalternamen Ununtrium, Ununpentium, Ununseptium und Ununoctium (Abb. 20). Seit November 2016 heißen sie 113 – Nihonium (Nh), 115 – Moscovium (Mc), 117 – Tenness (Ts) und 118 – Oganesson (Og).²⁹⁾

46 Palladium Pd	47 Silber Ag	48 Cadmium Cd	49 Indium In	50 Zinn Sn	51 Antimon Sb	52 Tellur Te	53 Iod I	54 Xenon Xe
78 Platin Pt	79 Gold Au	80 Quecksilber Hg	81 Thallium Tl	82 Blei Pb	83 Bismut Bi	84 Polonium Po	85 Astat At	86 Radon Rn
110 Darmstadtium Ds	111 Roentgenium Rg	112 Copernicium Cn	113 Ununtrium Uut	114 Flerovium Fl	115 Ununpentium Uup	116 Livermorium Lv	117 Ununseptium Uus	118 Ununoctium Uuo

Abb. 20. Die siebente Periode des Periodensystems der Elemente ist komplett

Seit dem 1. Dezember 2018, pünktlich zum 150-jährigen Jubiläum der großen Entdeckung, gab die IUPAC die vollständig komplettierte Langformtabelle des Periodensystems heraus. Man könnte meinen, dass sich das im Verlaufe der Jahrzehnte Geschaffene im Einklang mit dem Bibelwort aus den Apokryphen des König SALOMON befindet: „*Gott hat alles nach Maß, Zahl und Gewicht geordnet*“, gleichsam als Motto für die künftigen Entwicklungen und Erkenntnisse rund um das Periodensystem. Schon im Jahr 1905 hatte MENDELEJEW als weitsichtiger und genialer Chemiker prognostiziert³⁰⁾: „*Offenbar droht dem Periodizitätsgesetz zukünftig keine Zerstörung, sondern verspricht nur Ausbau und Weiterentwicklung [...]!*“

Zur offiziellen Eröffnung des Internationalen Jahres des Periodensystems am 29. Januar 2019 in Paris unterstrich auch die UN-Organisation für Erziehung, Wissenschaft und Kultur (UNESCO) die Lebendigkeit und Aktualität der einstigen Entdeckung:

"Es ist ein einzigartiges Werkzeug, mit dem Chemiker das Vorkommen, das Erscheinungsbild und die Eigenschaften der Materie auf der Erde und dem Rest des Universums vorhersagen können. Damit behalten sie auch die Übersicht über die mittlerweile 118 Elemente – von Wasserstoff mit der Ordnungszahl 1 bis zu Oganesson mit der Ordnungszahl 118“.

Danksagung

Für die Unterstützung mit historischem Bildmaterial und hilfreichen Hinweisen bzw. Skripten gebührt mein besonderer Dank Herrn Professor Dr. Lothar BEYER, Universität Leipzig, Herrn Professor Dr. Guillermo RESTREPO, MPI für Mathematik in den Naturwissenschaften, Leipzig, Herrn Dr. Wolfgang J. HÖNLE, Ettlingen, und meiner Frau Karin RESCHETILOWSKI, Radebeul.

Quellen

¹⁾ P. WALDEN, „*Lothar Meyer (1830-1895), Mendelejeff (1834-1907), Ramsay (1852-1916)*“, In: Das Buch der großen Chemiker (Hrsg. G. Bugge), Band 2, Verlag Chemie, Weinheim, 1961, S. 249

²⁾ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВ, „*Изоморфизм в связи с другими отношениями кристаллической формы к составу*“ [*Isomorphismus in Verbindung zu anderen Beziehungen der Kristallform zur Zusammensetzung*], Abschlussarbeit am Pädagogischen Institut der St. Petersburger Universität, St. Petersburg, 234 S., 1856

³⁾ G. BOECK, R. ZOTT, „*Zum 100. Todestag – Dmitrij Ivanovič Mendeleev (1834-1907)*“, Chemie in unserer Zeit, 41 (2007) 12-20

⁴⁾ D. MENDELEJEV, „*О соединении спирта с водой*“ [*Über die Verbindungen des Alkohols mit Wasser*], Doktordissertation, 1865, 119 Seiten; teilweise in: Annalen der Physik und Chemie von J. C. Poggendorff 1869, 138, 103 und 230 sowie Zeitschrift für Chemie 1 (1865) 257

- ⁵⁾ O. KRÄTZ, „*Meinecke, Johann Ludwig Georg*“ in: Neue Deutsche Biographie 16 (1990), S. 660 f. [Online-Version, aufgerufen am 13.02.2019]
- ⁶⁾ J.W. DÖBEREINER, „*Versuch zu einer Eingruppierung der elementaren Stoffe nach ihrer Analogie*“, In: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Reprint der Originalausgabe von 1895, Akad. Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G. Leipzig, 66 (1983) 1-8
- ⁷⁾ L. BEYER, „*Abbildungsformen des Periodensystems der Elemente*“, Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, 11 (2000) 125-130
- ⁸⁾ H. KLUGE, I. KÄSTNER, „*Ein Wegbereiter der Physikalischen Chemie im 19. Jahrhundert – Julius Lothar Meyer (1830-1895)*“, Shaker Verlag, Aachen, 160 S., 2014
- ⁹⁾ G. SCHWANICKE, (Hrsg. Heimatverein Varel e.V.), „*Aus dem Leben des Chemikers Julius Lothar Meyer*“, Vareler Heimathefte, Heft 8, 80 S., 1995
- ¹⁰⁾ L. MEYER, „*Natur der Atome: Gründe gegen ihre Einfachheit*“, In: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Reprint der Originalausgabe von 1895, Akad. Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G. Leipzig, 68 (1983) 1-8
- ¹¹⁾ L. MEYER, „*Die Natur der chemischen Elemente als Function ihrer Atomgewichte*“, In: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Reprint der Originalausgabe von 1895, Akad. Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G. Leipzig, 68 (1983) 11-17
- ¹²⁾ K. DANZER, „*Dmitri I. Mendelejew und Lothar Meyer*“, BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1974, S. 29
- ¹³⁾ Б.М. КЕДРОВ, „*День одного великого открытия*“ [Der Tag einer großen Entdeckung] Moskwa, Соцэкгиз, 560 S., 1958
- ¹⁴⁾ J.V.LIEBIG, „*Die Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie*“ in zwei Theilen, 7. Auflage, Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 469 S., 1862
- ¹⁵⁾ И.С. ДМИТРИЕВ, „*Научное открытие*“ [Wissenschaftliche Entdeckung], mstatunascendi ВИЕТ 1 (2001) S. 34
- ¹⁶⁾ B. BRAUNER, „*On the atomic weight of beryllium*“, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 11, 65 (1881) 65-71
- ¹⁷⁾ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВ, „*Соотношение свойств с атомным весом элементов*“ [Die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente], Журнал Русского химического общества, 1 (1869) 60-70
- ¹⁸⁾ D. MENDELEJEFF, „*Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente*“, Zeitschrift für Chemie, 12 (1869) 405–406
- ¹⁹⁾ K. SEUBERT, „*Zur Geschichte des periodischen Systems*“, Z. anorg. Chem. 9 (1895) 334-338
- ²⁰⁾ L. MEYER, „*Die Natur der chemischen Elemente als Function ihrer Atomgewichte*“, Annalen der Chemie und Pharmazie, VII. Supplementband (1870) 354-364
- ²¹⁾ siehe ¹²⁾, S. 42
- ²²⁾ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВ, „*Естественная система элементов и применение ее к указанию свойств некоторых элементов* [Das natürliche System der Elemente und seine Anwendung zur Vorhersage der Eigenschaften einiger Elemente]“, Ж. Русс. Физ.-Хим. О-ва. 3, (1871) 25-56
- ²³⁾ siehe ¹²⁾, S. 44
- ²⁴⁾ D. MENDELEJEFF, „*Die periodische Gesetzmäßigkeit der chemischen Elemente*“, Annalen der Chemie und Pharmazie, VIII. Supplementband (1871) 133-229
- ²⁵⁾ Великие ученые: Д.И. МЕНДЕЛЕЕВ и Периодический закон [Die großen Gelehrten: D.I. Mendelejew und das Periodengesetz]
<http://www.alhimik.ru/teleclass/pril/mend01.shtml> (aufgerufen am 13.02.2019)
- ²⁶⁾ U.V.RAUCHNAUPT, „*Ein Darwin der Chemie*“, Frankfurter Allg. Sonntagszeitung, 6. Januar 2019, S. 51-54
- ²⁷⁾ siehe ¹²⁾, S. 47

²⁸⁾ И.В. ПЕТРЯНОВ-СОКОЛОВ, „День открытия. 100 лет назад“ [Der Tag der Entdeckung. Vor 100 Jahren], Химия и жизнь, 3 (1969) 24-27

²⁹⁾ E. SCERRI, G. RESTREPO (Eds.), „Mendeleev to Oganesson – A Multidisciplinary Perspective on the Periodic Table“, Oxford University Press, 2018

³⁰⁾ Tagebucheintrag am 10. Juli 1905, MENDELEJEV-Archiv, Band I, S.34-35

Bildnachweis

Abb. 1. MENDELEJEWS Foto: © Science Photo Library;
Skizze des Periodensystems: By Aljuh - Own work, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57843138>.

Abb. 2-6, 13, 15, 16 und 19. Fotos von Chemiker-Persönlichkeiten:
Freie Onlineenzyklopedie Wikipedia (<http://de.wikipedia.org/>);

Symbole chemischer Elemente: VectorStock®

Abb. 8, links:

http://abcdefghijklmnopqrstuvwxyz.com/wp-content/uploads/2016/01/O_AlexandreSerrano_TablaPeriodica_2.jpg

Abb. 8, rechts: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5946430>

Abb. 10. By NikNaks - Own work,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=39385534>

Abb. 17. Foto ТИМОЧОВА Olga - <http://secology.narod.ru/medflower1.html>.

Abb. 18. Foto W. RESCHETILOWSKI

Abb. 20.

<https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/neue-elemente-periodensystem-waechst-um-vier-elemente-a-1070348.html>.



Der Autor am MENDELEJEV-Denkmal vor dem Chemie-Gebäude der Nationalen Technischen Universität der Ukraine in Kiew anlässlich des Festvortrages "The 150th Anniversary of the Periodic Table of Chemical Elements" zur 7. Internationalen Konferenz "Modeling and simulation for chemistry, technologies and sustainable development systems", 06.-08.05.2019, Kiew, Ukraine.

Vorträge vom Autor im Internationalen Jahr des Periodensystems der chemischen Elemente - IYPT2019:

- 1) „Da ist was dran!": 150 Jahre des Mendelejew'schen Periodensystems der Elemente – eine Entdeckung für die Ewigkeit", Vortragstagung der Fachgruppe Geschichte der Chemie der GDCh, 21.-22.03.2019, Halle/Saale
- 2) "The 150th Anniversary of the Periodic Table of Chemical Elements: The Evolution of the Development of the Great Discovery", 7th International Scientific-Practical Conference "Modeling and simulation for chemistry, technologies and sustainable development systems - MSCT2019", 06.-08.05.2019, Kyiv, Ukraine
- 3) "The 150th Anniversary of the Periodic System of the Elements: A Multidisciplinary View on Discovery and Development", International Scientific Conferences "Mathematical methods in engineering and technology - MMTT-32" and "Cyber-physical systems design and modelling", 03.-07.06.2019, St. Petersburg, Russia
- 4) "150 Jahre Periodensystem der Elemente - ein historischer Rückblick", 43. Clemens-Winkler-Kolloquium am 24.10.2019 an der TU Bergakademie Freiberg
- 5) "The 150th Anniversary of the Periodic Table by Mendeleev: Evolutionary Development of the Great Discovery", International Conference "Tradition and Innovation", 27.-29.11.2019, St. Petersburg, Russia

Beiträge in Zeitschriften und Tagungsbänden:

- 1) Nachrichten aus der Chemie 67(6) (2019) 8-13, „Da ist was dran!": 150 Jahre Periodensystem“
- 2) Nachrichten aus der Chemie 67(7-8) (2019) 8-12, „Eine Idee bahnt sich ihren Weg: 150 Jahre Periodensystem“
- 3) Proceedings of the International Scientific Conference "Mathematical methods in engineering and technology - MMTT-32", (Ed. A.A. Bolschakov), Vol. 11, St. Petersburg, 2019, pp. 3-8

Aus Anlass des 150-jährigen Jubiläums der Entdeckung des Periodensystems der Elemente durch Dmitri I. MENDELEJEV wurde am Alten Gymnasium Oldenburg eine Erinnerungstafel für Lothar MEYER enthüllt, der nahezu zeitgleich und unabhängig eine Ordnung der Elemente erkannte und daher als Mitentdecker des Periodensystems gilt.



Altes Gymnasium Oldenburg 2019 (Foto D. Raschke März 2019)

**AN DIESER SCHULE LEGTE DER
SPÄTERE MITENTDECKER DES
PERIODENSYSTEMS DER ELEMENTE
JULIUS LOTHAR MEYER (1830-1895)
SEIN ABITUR IM JAHR 1851 AB.**

Verein der Ehemaligen des Alten Gymnasiums Oldenburg e.V.

Wolfgang Johannes Hönle-Stiftung „Kunst und Chemie“

Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.

BASF Coatings GmbH

Enthüllt am 14. November 2019

Text der Erinnerungstafel am AGO

Kurzbiografie

Prof. Prof. h.c. Dr.

Wladimir RESCHETILOWSKI

geb. 22.01.1950 in Rjasskoje (Ukraine)



Studium der Chemie an der Kiewer Taras-Schewtschenko-Universität und an der Technischen Hochschule „Carl Schorlemmer“ Leuna-Merseburg. Nach der Promotion im Jahre 1978 und der Habilitation im Jahre 1987 war er von 1988 bis 1990 Hochschuldozent für Technische Chemie an der Karl-Marx-Universität Leipzig. Im Januar 1991 nahm er seine Tätigkeit als Abteilungsleiter am Karl-Winnacker-Institut der DECHEMA e.V. in Frankfurt am Main auf. Es folgte 1994 die Honorarprofessur für Technische Chemie an der Universität Leipzig. Von 1996 bis zu seiner Emeritierung im Jahre 2015 war er C4-Professor für Technische Chemie an der Technischen Universität Dresden. Vom Senat des Sankt Petersburger Staatlichen Technologischen Instituts (Technische Universität) wurde ihm im Jahre 2009 die Ehrenprofessorenwürde verliehen.

Den Weg zur Entdeckung und die Weiterentwicklung des Periodensystems der chemischen Elemente beschrieb er in *Nachr. Chem.* 2019, 67(6), 8-13 und 2019, 67(7/8), 8-12.



Denkmal zur Erinnerung an die Wegbereiter und Entdecker des Periodensystems der Elemente Stanislao CANNIZZARO, Lothar MEYER und Dmitri MENDELEJEW in Varel, Lothar-Meyer-Gymnasium (H. KLUGE, Basis für moderne Chemie gelegt, *Nordwest-Zeitung online*, 26.07.2014).