
Klaus Danzer

Dmitri I. Mendelejew, Lothar Meyer

**Die Schöpfer des Periodensystems der chemischen
Elemente**

Biografien hervorragender Naturwissenschaftler, Techniker und Mediziner Band 8
1971 BSB B. G. Teubner Leipzig
Abschrift und LaTeX-Satz: 2023

<https://mathematikalpha.de>

Inhaltsverzeichnis

1	Vorgeschichte des Periodensystems	6
2	Dmitri I. Mendelejew, Lothar Meyer und ihr Periodensystem der Elemente	14
2.1	Jugend und wissenschaftlicher Werdegang Mendelejews	14
2.2	Lothar Meyers Jugend- und Studienjahre	17
2.3	Die Aufstellung des Periodensystems durch Mendelejew und Meyer . .	19
2.4	Der Spätere Lebensweg und weitere wissenschaftliche Leistungen Lothar Meyers und Mendelejews	37
2.5	Die weitere Vervollständigung des Periodensystems zu Lebzeiten Meyers und Mendelejews	49
3	Die Entwicklung des Periodensystems bis in unsere Tage	54
4	Zeittafel	63
5	Schrifttum	65

Vorwort des Herausgebers

"Dass ich erkenne, was die Welt im innersten zusammen- hält!" philosophiert Faust nach dem Willen Goethes. Der Drang der Menschen, das materielle Sein zu erkennen, war allerdings älter. Baustein um Baustein wurde in diesem Erkenntnisprozess zusammengetragen.

Immer mehr Wissen um die Realität und Struktur der Materie wurde gespeichert. The- sen, ganze hypothetische Systeme wurden seit der Antike aufgestellt, um von neu- en Antithesen verdrängt zu werden, bis diese ebenfalls wieder verworfen wurden. Der Mensch konnte nicht stehenbleiben. Sein ganzes Dasein ist entscheidend von der Aus- einandersetzung mit der Natur gekennzeichnet. Je exakter er in ihr Wesen eindrang, desto besser musste er sie beherrschen und nutzen lernen.

Die Wissenschaft lernte im Laufe ihrer Geschichte, in die Gesetzmäßigkeiten des Auf- baus der Materie einzudringen. Zwei Menschen waren es schließlich, ein Russe und ein Deutscher, Dmitri I. Mendelejew und Lothar Meyer, die unabhängig voneinander das Periodensystem der Elemente aufstellten und damit eine neue Etappe naturwissen- schaftlicher Arbeit einleiteten.

Von ihrem Ringen um wissenschaftliche Erkenntnis, von ihrem nimmermüden Mühen um neue Ergebnisse handelt dieses Büchlein ebenso wie vom Ringen beider um die pro- gressive Veränderung der gesellschaftlichen Verhältnisse allgemein. Es ist sicher nicht zufällig, dass das Leben Mendelejews und Meyers trotz aller Unterschiedlichkeiten so viel Gemeinsames offenbart.

Sie waren rastlos schaffende Wissenschaftler, aber sie empfanden ebenso die Enge der gesellschaftlichen Verhältnisse ihrer Zeit und trachteten danach, dieselben zu verän- dern. Sie blieben dabei, was sie waren: bürgerliche Humanisten!

Die Wissenschaft für das Volk! - so kann man mit Recht ihr Träumen und Ringen kennzeichnen. Noch sahen sie nicht die gesellschaftliche Kraft, die ihre Vorstellungen verwirklichen konnte. In der Sowjetunion und in der Deutschen Demokratischen Repu- blik sind heute die Bedingungen für die Realisierung auch ihres Anliegens geschaffen. Dmitri I. Mendelejew und Lothar Meyer waren und bleiben beide große schöpferische Menschen, als deren Nachfahren wir die Verpflichtung haben, ihr Vermächtnis zu er- füllen und ihr Werk stets neu zu vollenden.

Eberhard Wächtler

Vorwort des Verfassers



Abb. 1. Dmitri I. Mendelejew ; Abb. 2. Lothar Meyer

Vor 100 Jahren entdeckten Dmitri I. Mendelejew und Lothar Meyer unabhängig voneinander und fast gleichzeitig eines der grundlegendsten Gesetze der Naturwissenschaften, das Periodensystem der chemischen Elemente. Das Jubiläum dieses Ereignisses soll willkommener Anlass zu dem Versuch sein, in der Reihe "Biographien hervorragender Naturwissenschaftler und Techniker" Leben und Wirken der beiden bedeutenden Wissenschaftler sowie die Entstehungsgeschichte ihres Hauptwerkes aufzuzeichnen.

Mendelejew und Meyer lebten in einer Zeit, die durch einen bis dahin nicht gekannten Aufschwung von Naturwissenschaft und Technik gekennzeichnet war. Das Bürgertum, dem beide Wissenschaftler entstammen, spielte in ihren Heimatländern Deutschland und dem feudalen Russland um die Mitte des vorigen Jahrhunderts eine relativ fortschrittliche Rolle und erkannte mehr und mehr den Nutzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisse für die Produktion.

Die zunehmenden Wechselbeziehungen zwischen Wissenschaft und Technik waren die Grundlage einer Reihe bedeutender technischer Erfindungen und wissenschaftlicher Verallgemeinerungen, unter denen die Aufstellung des Periodensystems nur ein Höhepunkt neben vielen anderen war. Es seien hier nur das Energieprinzip, die Begründung der Spektralanalyse, der Elektrodynamik, der Evolutionstheorie, der Genetik und der chemischen Strukturlehre genannt.

Diese Periode war durch eine zunehmende Differenzierung der Wissenschaft gekennzeichnet, für die die Herausbildung neuer Wissenschaftszweige äußerer Ausdruck war; sie verlangte deshalb eine immer stärkere Spezialisierung der Wissenschaftler.

Mendelejew wie Meyer nahmen jedoch in dieser Beziehung noch eine gewisse Ausnahmestellung ein, ihre Arbeiten überspannten alle Teilgebiete der Chemie, von den allgemeinen theoretischen Grundlagen bis zur Laboratoriumspraxis und Technologie, von der anorganischen bis zur organischen Chemie. Die damals entstehende physikalische Chemie zählt beide zu ihren Pionieren.

Das Periodensystem, das aus gegebenem Anlass von ihren Leistungen hier besonders im Mittelpunkt steht, wird in seiner Weiterentwicklung bis in unsere Tage skizziert, wobei sich die Bestätigung, aber auch einige Grenzen der Ideen Mendelejews und Meyers zeigen.

Es ist kein Zufall, dass sich ihre Anordnung der Elemente - seitdem hat es eine Vielzahl von Varianten dazu gegeben - als eine der zweckmäßigsten erwiesen hat.

Die neueren Untersuchungen zum Periodensystem sind auf das engste verknüpft mit der Entwicklung der Atom- bzw. Kernphysik und der Quantenmechanik. Dabei zeigte es sich, dass das System kein starres Gesetz ist, es wurde im Gegenteil ständig verbessert und vervollkommen. Darüber hinaus wurden in den letzten Jahrzehnten in den Reaktoren der Atomforschungszentren neue, in der Natur nicht vorkommende Elemente synthetisiert, die das Periodensystem immer mehr erweitern.

Eine erschöpfende Darstellung dieser Entwicklung, die beinahe gleichzusetzen wäre mit einer Geschichte der Physik und Chemie in unserem Jahrhundert, kann in diesem bescheidenen Rahmen nicht erwartet werden.

Für die Darstellung des Lebens beider Wissenschaftler wurden vor allem die ausführlichen Biographien ihrer berühmten Schüler und Lehrstuhlnachfolger Paul Walden und Karl Seubert herangezogen. Ein Teil der darüber hinaus verwendeten Literatur findet sich neben Mendelejews und Meyers bedeutendsten Werken in der Bibliographie; dem Charakter dieses Bändchens entsprechend ist sie trotz aller Beschränkungen etwas umfangreicher, als es dieser Reihe sonst entspricht.

Die dieser Schrift beigegebenen historischen Tabellen Mendelejews und Meyers sind in die heute gebräuchliche horizontale Darstellungsart gebracht worden, um einen besseren Vergleich zwischen ihnen und dem modernen Periodensystem zu ermöglichen.

Karl-Marx-Stadt, Juni 1970

1 Vorgeschichte des Periodensystems

In einem Rückblick auf die Vorgeschichte des Periodensystems stellte der Chemiehistoriker Paul Walden (1863-1957) als besonders auffallend fest, dass "... seit dem Anbruch der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts ... das Problem über den Zusammenhang der Atomgewichte der Elemente mit den chemischen und physikalischen Eigenschaften ... ein Modeproblem jener Zeit geworden" war [26].

Sicher wollte Walden damit nicht ausdrücken, dass die Beschäftigung mit diesem Problem Launen der betreffenden Wissenschaftler entsprang und einem Selbstzweck diene, sondern dass die Zeit einfach reif war für eine derart umwälzende Verallgemeinerung, wie sie das Periodensystem der chemischen Elemente darstellt. So, wie das auch bei technischen Erfindungen der Fall ist, muss auch bei wissenschaftlichen Entdeckungen oder Verallgemeinerungen zunächst der Weg dahin geebnet werden, d.h., es müssen eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein, ehe die Beschäftigung mit dem Problem Erfolg verspricht.

Vor allem aber muss für die Lösung des Problems ein gesellschaftliches Bedürfnis vorhanden sein; fehlt dieses, so fällt die Erfindung oder Entdeckung in der Regel der Vergessenheit anheim, um zu einem späteren Zeitpunkt, an dem die objektiven gesellschaftlichen Voraussetzungen gegeben sind, aufgegriffen oder wiederentdeckt zu werden.

In der Geschichte der Wissenschaft und der Technik finden sich zahlreiche Beispiele dafür. Auch die Geschichte des Periodensystems ist unter diesen Aspekten zu sehen. Die Voraussetzungen dafür wurden teilweise schon sehr früh geschaffen.

In der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts kam die Herausbildung der Grundlagen der modernen Naturwissenschaften zu einem gewissen Abschluss. Das Zeitalter der Renaissance war nicht nur durch einen hohen Aufschwung der Kultur, sondern auch der Technik und Wissenschaft gekennzeichnet. Mit der Entwicklung des Handels und der Manufakturen erstarkte das Bürgertum immer mehr, wobei es schon bald in den Naturwissenschaften ein Instrument erkannte, das Nutzen versprach und das zu fördern sich lohnte.

Anstelle scholastischer Spekulationen über die Natur, die im religiösen Dogma das Kriterium der Wahrheit sahen, setzten sich immer mehr die rationalen Naturwissenschaften durch, die sich in erster Linie auf Experimente stützten.

In diesem Zusammenhang zeigte sich auch, dass die aus der Antike und dem Mittelalter überlieferten Elementlehren einer experimentellen Prüfung nicht standhielten. Einer der ersten, der die alten Gedanken einer kritischen Prüfung unterzog, war der deutsche Gelehrte Joachim Jungius (1587-1657). Er lehnte die Lehren von den aristotelischen "Vier Elementen" Feuer, Luft, Wasser und Erde und von den alchimistischen drei Urstoffen Quecksilber, Schwefel und Salz, die allesamt als "Prinzipien" galten und nicht mit den konkreten chemischen Substanzen identifiziert wurden, ab und bekämpfte die Ansicht von der Verwandelbarkeit der Metalle ineinander.

Statt dessen gab er eine Definition chemischer Elemente als einheitliche, nicht weiter

zerlegbare Stoffe.

Einen analogen Elementbegriff entwickelte wenig später der Engländer Robert Boyle (1627-1691), der ebenfalls auf Grund von Experimenten feststellte, dass die althergebrachten "Elemente" ihren Namen zu Unrecht trugen. Wie Jungius beschränkte sich allerdings auch Boyle auf die Begriffsbestimmung; beide kennzeichneten noch keines unserer heute bekannten Elemente als solches.

Mit der Überwindung der herkömmlichen Elementlehren und der Begründung des klassischen Elementbegriffs, die den ersten Markstein der Vorgeschichte des Periodensystems darstellen, begann jedoch nun die Suche nach wahren chemischen Elementen.

Die Existenz des ersten Stoffes, den man als Element ansah, des Phlogistons, sollte sich aber als trügerisch erweisen. Dennoch war die Beschäftigung mit ihm so bedeutsam, dass ein ganzes Jahrhundert chemischer Geschichte seinen Namen trägt.

Die von Georg Ernst Stahl (1659-1734) geschaffene Phlogistontheorie war die erste grundlegende Theorie, die die wichtigsten chemischen Vorgänge unter einheitlichen Gesichtspunkten verstehen ließ. Damit brachte sie einen entscheidenden Fortschritt selbst gegenüber den Ansichten von Jungius und Boyle.

Bei der Suche nach dem reinen Phlogiston schenkte man vor allem der Untersuchung von Gasen große Aufmerksamkeit.

Dabei fanden Henry Cavendish (1731-1810) 1766 den Wasserstoff, den er zunächst für Phlogiston gehalten hatte, und wenig später Joseph Priestley (1733-1804) und Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) den Sauerstoff.

Beim Experimentieren mit diesen neuen Stoffen stieß man auf schwerwiegende Widersprüche in der Phlogistontheorie. Dazu kam noch, dass zur Deutung der Gewichtsverhältnisse bei verschiedenen chemischen Reaktionen dem Phlogiston ein negatives Gewicht zugeschrieben werden musste.

Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) gelang es, mit seiner Oxydationstheorie diese Widersprüche zu lösen. Eine Reihe von Versuchen hatte ihn zu der Gewissheit geführt, dass die Gewichtszunahme eines Stoffes beim Verbrennen nicht auf Phlogistonabgabe, sondern auf seine Vereinigung mit Sauerstoff zurückzuführen ist.

Damit stellte er nicht nur die Theorie der Verbrennung vom Kopf auf die Füße, in diesem Zusammenhang leitete er auch das Gesetz von der Erhaltung des Gewichtes ab. Darüber hinaus trug Lavoisier viel zur Festigung des Elementbegriffes bei. Er selbst kennzeichnete neben Wasserstoff und Sauerstoff auch Schwefel, Phosphor, Kohlenstoff sowie alle Metalle als Grundstoffe.

In der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts benötigte die aufblühende Industrie immer mehr die Hilfe der Naturwissenschaften. Die industrielle Revolution, die ihren Ausgangspunkt in der englischen Textilindustrie hatte, dehnte sich auf weitere Gebiete aus. Mit der Ablösung der Wind- und Wasserkraft durch die Dampfmaschine kam es nicht nur zu einem starken Aufschwung der Eisen- und Kohleindustrie, sondern auch zu einer raschen Entwicklung des Maschinenbaus.

Die sprunghafte Ausdehnung der Produktion von Textilien verlangte andererseits auch

die Bereitstellung immer größerer Mengen anorganischer Grundchemikalien.

Die Produktion von Schwefelsäure, Soda, Chlor und Chlorkalk sowie die Anwendung dieser Stoffe vor allem bei der Textilherstellung, darüber hinaus aber auch die erhöhten Anforderungen des Bergbaus und des Hüttenwesens führten zu einem bedeutenden Aufschwung der analytischen Chemie in dieser Zeit.

Neben Fortschritten bei der Analyse von Gasen waren es vor allem systematisch durchgeführte Mineralanalysen unter allgemeiner Einbeziehung von Lötrohruntersuchungen, die in der zweiten Hälfte des 18. und Anfang des 19. Jahrhunderts zur Entdeckung zahlreicher neuer Elemente führten.

In einem Zeitraum von 60 Jahren verdreifachte sich die Anzahl der bekannten Elemente, wozu noch kam, dass man auf Grund neuentdeckter Prinzipien der Metallgewinnung (Reduktion mittels Eisen oder Alkalimetallen bzw. des elektrischen Stroms) viele Elemente, die man vorher nur in ihren Verbindungen kannte, isolieren konnte (Tabelle 1).

Tabelle 1 Elemententdeckungen in der zweiten Hälfte des 18. und zu Beginn des 19. Jahrhunderts

Element	Entdeckung	Isolierung
Wasserstoff	1766 H. Cavendish	
Stickstoff	1772 D. Rutherford	
Chlor	C. W. Scheele	
Mangan	C. W. Scheele	1774 J. G. Gahn
Barium	C. W. Scheele	1808 H. Davy
Sauerstoff	1774 C. W. Scheele, J. Priestley	
Molybdän	1778 C. W. Scheele	1781 P. J. Hjelm
Wolfram	1781 C. W. Scheele	1783 J. J. und F. d'Elhuyart
Tellur	1782 F. J. Müller von Reichenstein	1798 M. H. Klaproth
Uran	1789 M. H. Klaproth	1841 E. M. Peligot
Zirkon	1789 M. H. Klaproth	1824 J. J. Berzelius
Strontium	1790 A. Crawford	1808 H. Davy
Titan	1791 W. Gregor	1824 J. J. Berzelius
Yttrium	1794 J. Gadolin	1827 F. Wöhler
Chrom	1797 L. N. Vauquelin	
Beryllium	1798 L. N. Vauquelin	1828 F. Wöhler, A. Bussy
Vanadium	1801 A. M. del Rio	
Niob	1801 C. Hatchett	1866 C. W. Blomstrand
Tantal	1802 A. G. Ekeberg	1824 J. J. Berzelius
Cer	1803 M. H. Klaproth; Berzelius	
Palladium	1803 W. H. Wollaston	
Rhodium	1803 W. H. Wollaston	
Osmium	1804 S. Tennant	
Iridium	1804 S. Tennant	
Kalium, Natrium		1807 H. Davy
Calcium, Magnesium		1808 H. Davy
Bor		1808 J. L. Gay-Lussac, Thenard
Jod	1811 B. Courtois	
Selen	1817 J. J. Berzelius	
Cadmium	1817 F. Strohmeyer	
Lithium	1817 J. A. Arfvedson	1818 H. Davy
Silicium		1823 J. J. Berzelius
Aluminium		1825 H. C. Oersted, 1827 F. Wöhler
Brom	1826 A. J. Balard.	
Thorium	1828 J. J. Berzelius	

Aber auch in theoretischer Hinsicht wurde der Beginn des 19. Jahrhunderts bedeutungsvoll. Mit der Atomtheorie, die John Dalton (1766-1844) in den Jahren 1803 bis 1808 entwickelte, wurden wertvolle Voraussetzungen für Periodisierungsversuche der Elemente geschaffen.

Dalton hatte seine Theorie zunächst zur Erklärung physikalischer Eigenschaften der Gase erarbeitet, dehnte sie aber bald auf chemische Verbindungen aus.

Nach seinem Gesetz der multiplen Proportionen verbinden sich die für jedes Element spezifischen Atome in einfachen Verhältnissen mit denen anderer Elemente. In diesem Zusammenhang führte Dalton relative Atomgewichte ein, von denen er der Meinung war, dass sie zur Definition eines Stoffes gehören und denen er große Bedeutung beimaß (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2

Atomgewichte einiger Elemente und Verbindungen nach Dalton, bezogen auf Wasserstoff = 1

	Daltons Symbole	Daltons Atomgewichte		Heutige (gerundete) Atom- und Molekulargewichte
		1803	1808	
Wasserstoff	⊙	1	1	1,0
Stickstoff	⊕	4,2	5	14,0
Kohlenstoff	●	4,3	5	12,0
Sauerstoff	○	5,5	7	16,0
Schwefel	⊕	14,4	13	32,1
Wasser	⊙○	6,5	8	18,0
Ammoniak	⊙⊕	5,2	6	17,0
Kohlendioxid	○●○	15,3	19	44,0

Die teilweise krassen Ungenauigkeiten sind auf die Annahme falscher Verbindungsverhältnisse zurückzuführen. Ihre Beseitigung führte in der Folgezeit zu immer genaueren Atomgewichtsbestimmungen.

Das größte Verdienst kommt dabei dem schwedischen Chemiker Jöns Jakob Berzelius (1779-1848) zu. Er erkannte, dass die Atomgewichte aller Elemente, vor allem aber der am häufigsten vorkommenden, mit höchster Genauigkeit ermittelt werden mussten, um praktisch mit ihnen arbeiten zu können. 1818 veröffentlichte er eine Tabelle mit Atomgewichten von 46 Elementen und Angaben über die Verbindungsgewichte von etwa 2000 Verbindungen, die er acht Jahre später noch erweiterte und verbesserte.

Einige Beispiele, die in Tabelle 3 zusammengefasst sind, zeigen die erstaunliche Genauigkeit, die Berzelius dabei schon teilweise erreichte.

Tabelle 3 .

Einige Atomgewichte von Berzelius, bezogen auf Sauerstoff = 16,00, im Vergleich mit den heutigen Atommassen, bezogen auf das Kohlenstoffisotop 12 = 12,0000

Element	Berzelius 1826	Heutige Atommassen
H	1,00	1,008
C	12,2	12,011
O	16,00	15,999
S	32,3	32,064
Cl	35,45	35,453
Pb	207,4	207,19
Cu	63,4	63,54
Hg	202,6	200,59

Die Systematik unserer chemischen Symbole geht ebenfalls auf Berzelius zurück. Statt der geometrischen Figuren Daltons und dessen Vorgänger griff Berzelius zu Buchstaben und Zahlen, die mühelos geschrieben und gedruckt werden konnten.

Mit dieser Zeichensprache erhielt die Chemie das Rüstzeug für weitere Fortschritte, wobei die neue Symbolik das steigende Niveau der Wissenschaft Chemie auch äußerlich zum Ausdruck brachte.

Eine der brennendsten Fragen blieb jedoch nach wie vor die Formulierung chemischer Verbindungen. Berzelius war auf Grund der Fortschritte der Elektrochemie zu der Ansicht gekommen, dass alle chemischen Verbindungen aus je einem elektrisch positiven und negativen Bestandteil zusammengesetzt sind. Diese dualistische Theorie stand jedoch zur Hypothese von Amadeo Avogadro di Quaregna (1776-1856), nach der gleichartige Atome sich miteinander zu Molekülen verbinden können, scheinbar im Widerspruch.

Andere abweichende Ansichten brachte in den dreißiger Jahren die neuentstandene organische Chemie hervor. Justus Liebig (1803-1873), Friedrich Wöhler (1800-1882) und andere versuchten in die ständig größer werdende Zahl organischer Verbindungen zunächst mit Hilfe der Radikaltheorie Ordnung zu bringen.

Diese wurden danach als Oxide, Hydride usw. sogenannter Radikale angesehen, die als eine Art Elemente der organischen Chemie galten (z. B. Äthyl, Methyl, Phenyl).

Als die Ansicht von der Unveränderlichkeit der Radikale aufgegeben werden musste, fand man einen Ausweg in der Typentheorie, nach der die organischen Stoffe auf sogenannte Typen (Wasser, Ammoniak, Chlorwasserstoff, Methan) zurückgeführt wurden. Aus ihnen konnte man die wichtigsten Verbindungsklassen (Alkohole, Amine usw.) durch Substitutionen ableiten.

Diese und andere Ansichten standen in der organischen Chemie teilweise gegeneinander, teils wurden sie miteinander verknüpft. Da mit ihnen jeweils spezifische Vorstellungen über Atom- und Äquivalentgewichte verbunden waren, herrschte auf diesem Gebiet um die Mitte des vorigen Jahrhunderts geradezu ein Chaos.

Besonders krass wurden diese Widersprüche zwischen den beiden Grunddisziplinen, denn in der organischen und anorganischen Chemie waren nicht nur verschiedene Atomgewichte gebräuchlich, sondern wurden auch die Begriffe Atom und Molekül unterschiedlich interpretiert. Das führte schließlich soweit, dass eine ganze Reihe von Chemikern die Atom- und Molekulartheorie selbst ablehnte.

Ebenso negativ wirkten sich die Meinungsverschiedenheiten in theoretischen Grundfragen auf die Formulierung chemischer Verbindungen aus. Für die wichtigsten anorganischen Verbindungen waren zwei oder mehr Summenformeln in Gebrauch, und noch extremere Folgen zeigten sich in der organischen Chemie. Allein für die Essigsäure waren um 1860 mindestens 16 verschiedene Formeln gebräuchlich.

Zwischen 1850 und 1860 schien, wie Lothar Meyer es später ausdrückte, "die Verwilderung den Gipfel erreicht zu haben" [15]. Eine Möglichkeit, die strittigen Fragen zu klären, sah man damals in der Einberufung eines internationalen Chemikerkongresses. Diese Tagung, die für die wissenschaftlichen Ideen Mendelejews und Meyers so bedeutsam werden sollte, fand 1860 in Karlsruhe statt.

Zunächst glaubte kaum jemand daran, dass eine Systematisierung der Elemente auch bei der Klärung umstrittener theoretischer Grundfragen mithelfen könne. Der erste erfolgreiche Versuch des deutschen Chemikers Johann Wolfgang Döbereiner (1780-1849), gewisse Ordnungsprinzipien der Elemente aufzufinden, wurde 1829 in der Fachwelt nicht beachtet.

Döbereiner hatte festgestellt, dass sich chemisch ähnliche Elemente zu Triaden zusammenfassen lassen, deren Atomgewichte annähernd arithmetische Reihen bilden:

Lithium 7 - Natrium 23 - Kalium 39;
Calcium 40 - Strontium 88 - Barium 137;
Schwefel 32 - Selen 79 - Tellur 127.

Das gerade erst entdeckte Element Brom ordnete er folgerichtig zwischen dem Chlor und dem Jod ein. Da Döbereiner jedoch ausschließlich nach Dreiergruppen suchte, entgingen ihm allgemeinere Zusammenhänge.

Döbereiners Ideen gelangten erst 1843 in breitere Kreise, als Leopold Gmelin (1788-1853) sie in sein Handbuch der Chemie aufnahm. Gmelin vermutete aber, dass solche Elementgruppen nicht immer nur aus drei Elementen gebildet sein müssten. Ein allgemeines Echo blieb auch jetzt aus. Vereinzelte Wissenschaftler wurden jedoch angeregt, sich mit dieser Problematik ebenfalls zu beschäftigen.

1850 bestätigte Max Pettenkofer (4818-1901), dass chemisch ähnliche Elemente größere Gruppen als Triaden bilden können. Er stellte z. B. zusammen:

Magnesium - Calcium - Strontium - Barium;
Stickstoff - Phosphor - Arsen - Antimon - Wismut;
Sauerstoff - Schwefel - Selen - Tellur.

Diese Elementreihen verglich er mit den homologen Reihen organischer Verbindungen, deren Radikale konstante Gewichtsunterschiede zeigten:

Methyl 15 - Äthyl 29 - Propyl 43 - Butyl 57 - Amyl 71 usw.

Da Pettenkofer glaubte, die Atomgewichtsunterschiede seiner Elementgruppen als Multiple der Zahlen 8 oder 5 bzw. Kombinationen davon darstellen zu können, hielt er es für wahrscheinlich, "dass in einiger Zeit ... auch unsere Metalle als zusammengesetzte

Radikale" erkannt würden.

Zu ähnlichen Elementanordnungen kamen Anfang der fünfziger Jahre auch andere Wissenschaftler, darunter Jean Baptiste Dumas (1800-1884), Josiah Parsons Cooke (1827-1894), Peter Kremers (1827-?) und Ernst Lenssen (1837-?).

Der Engländer John Hall Gladstone (1827-1902) ordnete 1853 als erster alle bekannten Elemente nach ihren Atomgewichten in einer fortlaufenden Reihe und fand dabei an manchen Stellen Lücken bzw. Häufungen. Der Mathematiker August de Morgan (1837-1898) zeigte mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie, dass dies kein Zufall sein kann.

Einer der wichtigsten Vorläufer des Periodensystems war der englische Chemiker William Odling (1829-1921). Er beschäftigte sich ab 1857 mit der Systematik der Elemente, wobei er unter Zugrundelegung chemischer und physikalischer Eigenschaften zu Tabellen kam, die den späteren Mendelejews und Meyers bereits sehr ähnelten.

Der Gedanke der Periodizität wurde wohl zuerst vertreten von Beguyer de Chancourtois (1819-1886), der die Elemente nach steigendem Atomgewicht räumlich anordnete, und zwar auf der Schraubenlinie eines Zylindermantels.

Seine *Vis tellurique* fand aber in den Augen der Chemiker ebenfalls keine Gnade, da er im Zusammenhang mit seinen zweifellos wertvollen Gedanken einige unbegründete Spekulationen aussprach.

Mit seinem Gesetz der Oktaven wandte John A. Newlands (1838-1898) das periodische Prinzip konsequent an. Er stellte 1864 fest, dass bei Ordnung der Elemente nach steigendem Gewicht die chemischen Eigenschaften jeweils beim achten Element in abgewandelter Form wiederkehren. In Analogie zu den Tonreihen nannte er diese Gruppen Oktaven.

Sein System war jedoch so starr konzipiert, dass er häufig zwei Elemente auf einen Platz setzen musste, womit es an Wert verlor. Neben anderen, unbegründeten Umstellungen war jedoch bemerkenswert, dass Newlands bereits das Tellur vor dem leichteren Jod einordnete.

Als Newlands 1866 seine Ideen der Chemical Society vortrug, wurde seine Mitteilung nicht nur reserviert aufgenommen; einer der anwesenden Wissenschaftler fragte ihn sogar sarkastisch, ob er nicht versucht habe, die Elemente alphabetisch zu ordnen, sicher ließen sich so ebenfalls Gesetzmäßigkeiten finden.

Wenn auch die meisten der führenden Chemiker den ständig zunehmenden Ordnungsbestrebungen misstrauisch und ablehnend gegenüberstanden, so zeigten diese Bemühungen doch, dass die Zeit für eine derartige Verallgemeinerung inzwischen herangereift war. Mit der Entdeckung des Lanthans und des Didyms¹ (1839 bzw. 1842 durch Carl Gustav Mosander, 1797-1858), des Rutheniums (1845 durch Carl Claus, 1796-1864), des Cäsiums und Rubidiums (beide 1860 durch Robert Wilhelm Bunsen, 1811-1899, und Gustav Robert Kirchhoff, 1824-1887), des Thalliums (1861 durch William Croo-

¹... später als ein Gemisch zweier Elemente, des Neodyms und des Praseodyms, identifiziert (Auer v. Welsbach, 1885).

kes, 1832-1919) und des Indiums (1863 durch Ferdinand Reich, 1799 bis 1882, und Theodor Richter, 1824-1898) war die Zahl der bekannten Elemente inzwischen auf 66 angewachsen gegenüber 30, die man um die Jahrhundertwende kannte.

Mit der Festlegung des Elementbegriffs, seiner Zurückführung auf atomistische Vorstellungen, dem Bekanntwerden einer großen Anzahl von Elementen und ihrer Charakterisierung durch die relativen Atomgewichte waren die wesentlichsten Voraussetzungen für die Erarbeitung des Periodensystems gegeben.

In dem Maße, wie sich die theoretischen Widersprüche innerhalb der Chemie verschärften, wuchs gleichzeitig das Bedürfnis nach einer umfassenden Systematisierung, so dass es nicht wunder nimmt, dass es dann gleich zwei Wissenschaftlern verschiedener Länder fast gleichzeitig gelang, eine Periodizität der chemischen Elemente aufzufinden.

2 Dmitri I. Mendelejew, Lothar Meyer und ihr Periodensystem der Elemente

2.1 Jugend und wissenschaftlicher Werdegang Mendelejews

Dmitri Iwanowitsch Mendelejew wurde am 8. Februar 1834 (nach dem alten Kalender am 27. Januar) in Tobolsk (Sibirien) geboren. Sein Vater war dort Gymnasialdirektor und Schulrat für das Gouvernement, seine Mutter, Maria, geborene Korniljew, entstammte einer alten sibirischen Kaufmannsfamilie.

Das Sibirien jener Zeit war berüchtigt als Verbannungsort. Zahlreiche junge Intellektuelle, die sich die Ideen der französischen Revolution zu eigen gemacht hatten, wurden wegen ihres Auftretens gegen Zarismus und Leibeigenschaft verfolgt und hierher deportiert, Häufige Aufstände, vor allem von seiten der Landbevölkerung, waren ebenfalls Ausdruck des Aufbegehrens gegen einen reaktionären Feudalismus, der der Ausbreitung des Kapitalismus heftigen Widerstand entgegensetzte.

Die Entwicklung der Produktivkräfte vollzog sich auf Grund dessen äußerst langsam. Die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts war durch den Manufakturbetrieb gekennzeichnet. Diese Umstände waren für Fortschritte auf wissenschaftlichem und technischem Gebiet ebenso ungünstig wie das auf Standesunterschieden aufgebaute Bildungswesen.

Auf Grund der hohen gesellschaftlichen Stellung des Vaters und der Persönlichkeit der Mutter, die sich autodidaktisch weitergebildet hatte, war das Elternhaus Dmitris das geistige Zentrum der Stadt.

Er war das vierzehnte und letzte Kind seiner Eltern und der Lieblingssohn der Mutter, die schon früh die guten Anlagen des Jungen erkannte.

Obwohl er als Sechsjähriger bereits lesen, schreiben und rechnen konnte, hatte er in der Schule ständig Schwierigkeiten. Vor allem für Sprachen interessierte sich Mendelejew kaum; seine Abneigung gegen das Lateinische wie überhaupt gegen jede Art von Klassizismus hat er sein ganzes Leben hindurch nicht überwunden.

Trotz guter Leistungen in den naturwissenschaftlichen Fächern und in Geschichte bestand er deshalb seine Reifeprüfung 1849 nur durch Nachhilfestunden.

Die Sorge für die Familie und die Erziehung Dmitris lag inzwischen ganz in den Händen der Mutter. Der Vater war 1847 verstorben, nachdem er bereits einige Jahre vorher völlig erblindet und deshalb aus dem Staatsdienst entlassen worden war.

Um den Lebensunterhalt bestreiten zu können, hatte die Mutter die Nutzung und Verwaltung einer Glasfabrik von ihrem Bruder übernommen. Ein Jahr nach dem Tode des Vaters brannte das Werk jedoch nieder, so dass die Sorgen der inzwischen siebenundfünfzigjährigen Frau auch die materielle Sphäre erfassten.

Um ihren sehnlichsten Wunsch, ein Studium ihres jüngsten Sohnes, zu verwirklichen, liquidierte sie alle Geschäfte und verließ mit ihm die Heimat, um ihm seinen Lebensweg zu ebnen.

Die Tausende Kilometer lange Reise schien zunächst vergeblich. An der Moskauer Uni-

versität konnte er aus formal-bürokratischen Gründen nicht immatrikuliert werden, und die medizinische Laufbahn scheitert daran, dass Dmitri während einer Obduktion an der Medizinisch-Chirurgischen Akademie Petersburg ohnmächtig wurde.

Die letzte Möglichkeit, ein Studium am Pädagogischen Institut der Petersburger Universität, schien verschlossen zu sein, denn infolge von Studentenunruhen durften keine neuen Studenten aufgenommen werden.

Die Mutter, inzwischen erkrankt und auch mit ihren finanziellen Mitteln am Ende, erreichte jedoch über den Direktor der Lehranstalt, der ein Studienfreund ihres Mannes gewesen war, dass der zuständige Minister eine Ausnahmegenehmigung erteilte. Nach bestandener Aufnahmeprüfung wurde Mendelejew im Herbst 1850 als Regierungsstipendiat an der physikalisch-mathematischen Fakultät immatrikuliert.

Der aufopferungsvolle Kampf der Mutter um den akademischen Werdegang ihres Sohnes hatte sich damit unmittelbar vor ihrem Tode noch erfüllt. Sie hat einen bedeutenden Einfluss auf Mendelejew ausgeübt, nicht nur in geistiger Hinsicht, sondern auch in Bezug auf seine Aufgeschlossenheit technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Fragen gegenüber. Auf der Höhe seines Ruhmes widmete er ihr eine bedeutende wissenschaftliche Arbeit mit den Worten:

"Diese Untersuchungen widmet dem Andenken der Mutter ihr Letztgeborener. Sie vermochte ihn nur durch eigene Arbeit aufzuziehen, ... sie erzog ihn durch ihr Vorbild ... und um ihn der Wissenschaft zu übergeben ... (opferte) sie ihre letzten Mittel und Kräfte ... Sterbend hinterließ sie ihm als Vermächtnis: ... in der Arbeit und nicht in den Worten beständig zu sein, sowie geduldig die ... wissenschaftliche Wahrheit zu suchen ...". [10]

Das Pädagogische Institut war Mendelejew nun Elternhaus und Ausbildungsstätte zugleich. Hervorragende Lehrer - Gelehrte von Weltruf, wie der Physiker Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865), der Chemiker Alexander Abramowitsch Woskresensky (1809-1880) und der Mathematiker Michail Wassilewitsch Ostrogradsky (1801-1862) - sowie eine umfangreiche Laboratoriumsausbildung legten den Grundstein seiner umfassenden Kenntnisse.

In den ersten Studienjahren erkrankte er so schwer, dass der Institutsarzt nur noch wenig Hoffnung hatte, ihn am Leben zu erhalten. Er hatte unter häufigen "Blutspeien", wahrscheinlich also unter einer Lungentuberkulose, zu leiden.

Dennoch erreichte er in seinen schriftlichen Arbeiten und Probelektionen glänzende Noten.

Sein besonderes Interesse beanspruchte die Chemie; auf diesem Gebiet publizierte er bereits als Student zwei experimentelle Arbeiten über eine Analyse des Orthits (1854) und über Pyroxen (1855). Als Einundzwanzigjähriger schloss er seine Ausbildung mit einer Arbeit über Isomorphismus und einem glänzenden Examen ab, für das er mit einer goldenen Medaille geehrt wurde.

Seine Lehrer wollten ihn daraufhin an der Hochschule behalten und ihm eine akademische Laufbahn ermöglichen. Mendelejews Gesundheitszustand hatte sich jedoch weiter

verschlechtert, so dass ihm sein Arzt - der seinen Kollegen in einem Überweisungsschreiben darauf hinwies, dass Mendelejew nur noch wenige Monate zu leben habe - einen Aufenthalt im Süden empfahl.

Mendelejew folgte diesem Rat und war als Gymnasiallehrer zunächst in Simferopol, später in Odessa tätig. Hier gesundete er zusehends und fertigte in kurzer Zeit seine umfangreiche Magisterdissertation "Über spezielle Volumen" an. Er verteidigte sie im Frühjahr 1856 in Petersburg und bald darauf auch die Dissertation "Über die Konstitution der Siliciumverbindungen", mit der er sich die Lehrberechtigung für Hochschulen erwarb.

Daraufhin wurde Mendelejew zum Privatdozenten für Chemie an die Petersburger Universität berufen und hielt hier ab 1857 Vorlesungen über theoretische, später auch über organische Chemie,

Es war damals allgemein üblich, überdurchschnittlich begabten Absolventen zur Vervollkommnung ihrer Ausbildung einen Auslandsaufenthalt zu ermöglichen. Auch die zaristische Regierung bot einigen wenigen jungen Hochschullehrern diese Gelegenheit. Im Januar 1859 wurde Mendelejew vorgeschlagen, für zwei Jahre nach Paris zu dem bedeutenden Physikochemiker Henri Victor Regnault zu gehen. Mendelejew entschloss sich jedoch statt dessen, nach Heidelberg zu gehen, wo an der Universität das berühmte Triumvirat Bunsen, Kirchhoff und Hermann von Helmholtz (1821-1894) nebeneinander lehrte.

Er hörte ihre Vorlesungen, arbeitete jedoch nicht im berühmten Bunsenschen Laboratorium, sondern richtete sich ein kleines Privatlabor ein und ging experimentell eigenen Ideen nach.

Als Früchte dieser beiden Jahre (1860/61) in Deutschland entstanden vier Abhandlungen über die Dichten, die "spezifischen Kohäsionen" und die Ausdehnungen artverwandter organischer Flüssigkeiten. Das sind Probleme, die ihn, in vielfältiger Weise variiert, sein ganzes Leben beschäftigten.

"Wenn man von dem Prinzip ausgeht, dass die Ursache chemischer Reaktionen in den physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Moleküle besteht, so müssen alle solche Phänomene, bei denen diese Eigenschaften am deutlichsten hervortreten, einem allseitigen Studium unterworfen werden", schrieb Mendelejew 1861 im ersten Kapitel seiner "Organischen Chemie". Die Eigenschaften der Körper "müssen in mehr oder weniger direkter gegenseitiger Beziehung stehen und vom Gewicht der Molekeln, sowie von der Zusammensetzung derselben abhängen."

Dieses Ziel verfolgte er in seinen Heidelberger Arbeiten, und er erkannte dabei, dass mit steigendem Äquivalentgewicht der Ausdehnungskoeffizient homologer Flüssigkeiten sinkt. Er stellte weiterhin fest, "dass die Ausdehnung der Flüssigkeiten über den Siedepunkt nach demselben Gesetz erfolgt, wie unter dem Siedepunkt, dass der Ausdehnungskoeffizient sich unaufhörlich und allmählich vergrößert mit der Verminderung der Kohäsion der Flüssigkeiten, d.h. mit der Temperatur", und zwar bis zum absoluten Siedepunkt.

Damit nahm Mendelejew den 1869 von Thomas Andrews (1813-1885) geprägten Be-

griff der kritischen Temperatur vorweg.

Den größten Einfluss während seines deutschen Studienaufenthaltes hat zweifellos der später berühmt gewordene internationale Chemikerkongress 1860 in Karlsruhe auf Mendelejew ausgeübt.

An ihm nahmen die berühmtesten Chemiker Europas teil, um gemeinsam zu versuchen, die bestehenden Widersprüche auf theoretischem Gebiet, vor allem im Zusammenhang mit den Atom-, Molekular- und Äquivalentgewichten, zu klären. Hier wurde nicht nur bei Mendelejew der Grundstein zu seinem späteren wissenschaftlichen Hauptwerk gelegt, sondern auch bei Lothar Meyer, der ebenfalls zu den Teilnehmern gehörte.

2.2 Lothar Meyers Jugend- und Studienjahre

Julius Lothar Meyer wurde am 19. August 1830 in Varel an der Jade (Oldenburg) geboren. Sein Vater, Dr. Friedrich August Meyer, war dort Kreisarzt.

Lothar war das vierte von sieben Kindern, seine älteren Geschwister starben jedoch sehr früh.

Er selbst war ebenfalls von Geburt an schwächlich und wurde seine ganze Kindheit hindurch von schweren Krankheiten heimgesucht. Dennoch besuchte er mit gutem Erfolg die Schule, zunächst eine private, später die neugegründete "Bürgerschule" seiner Heimatstadt.

Gegen Ende seiner Schulzeit begann er unter anhaltenden schweren Kopfschmerzen zu leiden, so dass ihm sein Vater jede geistige Tätigkeit untersagen musste und ihm statt dessen dauernden Aufenthalt im Freien empfahl.

Lothar Meyer wurde daraufhin nach Rastedde zu einem Gärtner in die Lehre gegeben. Bereits nach einem Jahr hatte er sich soweit erholt, dass er das Oldenburger Gymnasium besuchen konnte. Hier gehörte er zu den begabtesten und fleißigsten Schülern, wobei seine besondere Liebe den alten Sprachen galt.

Sein ganzes Leben hindurch hat er Entspannung und Freude daran gefunden, die griechischen Klassiker im Original zu lesen. Daneben interessierte er sich außerordentlich für die naturwissenschaftlichen Fächer und für Mathematik.

Dazu mag der stürmische Aufschwung der Naturwissenschaften um die Mitte des vorigen Jahrhunderts entscheidend beigetragen haben. Die industrielle Revolution bestimmte mehr und mehr die wirtschaftliche Entwicklung aller fortgeschrittenen Staaten Europas und Amerikas.

In die Jugendjahre Meyers fielen so bahnbrechende Ereignisse wie die Eröffnung der ersten deutschen Eisenbahnlinien, die Einführung der Telegraphie (P. Schilling v. Canstadt 1832; C. F. Gauß, W. Weber 1833; W. v. Siemens 1846), die Erfindung der Photographie (J. N. Niepce, L. J. Daguerre 1833; W. H. F. Talbot 1841) und die Einführung der mineralischen Düngung (J.v. Liebig 1840).

Das Bürgertum erkannte mehr und mehr den Nutzen der Wissenschaft für die Produktion, die teilweise mit konkreten Aufgaben an bestimmte Zweige der Naturwissenschaften herantrat.

Dabei wurde die Förderung auch auf die Grundlagenforschung ausgedehnt. In vorderer Reihe war dabei Deutschland zu finden, dessen Bourgeoisie hier ein Mittel sah, ökonomisch zu den Kolonialmächten England und Frankreich aufzuschließen.

Diese beschleunigte Entwicklung der Naturwissenschaften wurde um die Jahrhundertmitte durch zahlreiche Verallgemeinerungen gekrönt, und es bildeten sich neue Wissenschaftszweige heraus, neben der angewandten Mechanik und der Thermodynamik unter anderem auch die organische und physikalische Chemie, die später durch Mendelejew und Lothar Meyer, der Ostern 1854 sein Abitur ablegte, in nicht unwesentlichem Maße beeinflusst werden sollten.

Zunächst beschloss Lothar Meyer jedoch, wie sein Vater, der 1850 verstorben war, Arzt zu werden. Im Mai 1851 wurde er als Medizinstudent an der Universität Zürich immatrikuliert.

Hier im Laboratorium des Chemieprofessors Carl Jakob Löwig (1803-1890) lernte er seinen späteren Freund Hans Heinrich Landolt (1831-1910) kennen. Besonderen Einfluss hatten die Vorlesungen des bekannten Physiologen Carl Friedrich Wilhelm Ludwig (1816-1895) auf ihn.

Nach zweijährigem Aufenthalt in Zürich ging Lothar Meyer nach Würzburg und promovierte hier im Februar 1854 zum Dr. med. Die Dissertation "Über die Gase des Blutes" reichte er jedoch erst später, 1857 von Königsberg aus, nach. Sie war entstanden als Ergebnis eines zweijährigen Aufenthaltes in Heidelberg.

Dorthin ging er im Frühjahr 1854, um bei Bunsen spezielle chemische Studien zu betreiben. Insbesondere lernte er dessen gasanalytische Methoden gründlich kennen. Bunsens Laboratorium war damals Anziehungspunkt für Studierende aus aller Welt, und Lothar Meyer lernte hier viele junge Chemiker kennen, die später zu den ganz Großen ihrer Wissenschaft zählten, wie den Mitbegründer der Strukturchemie und Schöpfer der Benzolringformel August Kekule (1829-1896) und den Pionier der Farbstoffchemie Adolf von Baeyer (1835-1917), der 1905 den Nobelpreis erhielt.

Im Herbst 1856 ging Lothar Meyer für drei Semester nach Königsberg, vor allem um bei Franz Ernst Neumann (1798-1895) Vorlesungen über mathematische Physik zu hören. Hier traf er seinen Bruder wieder, den Physiker Oskar Emil Meyer (1834-1909), den die gleiche Absicht dorthin geführt hatte.

Hier stellte er auch weitere physiologische Untersuchungen an, und mit einer Arbeit über die Einwirkung von Kohlenmonoxid auf Blut promovierte er im Frühjahr 1858 in Breslau zum Dr. phil.

Hatte Lothar Meyer, anknüpfend an Versuche von Gustav Magnus (1802-1870), bereits in seiner medizinischen Dissertation den Nachweis geliefert, dass die Sauerstoffaufnahme des Blutes unabhängig vom Druck ist und deshalb auf chemischen Vorgängen beruhen muss, zeigte er nun, dass Kohlenmonoxid genau das gleiche Volumen Sauerstoff aus dem Blut verdrängt, also ebenfalls eine chemische Verbindung mit dem Blutfarbstoff bildet, und ihn damit seiner normalen Funktion entzieht.

Mit seiner Übersiedlung nach Breslau beendete Meyer seine "Lehr- und Wanderjahre"

und entschied sich für die akademische Laufbahn. Im Februar 1859 habilitierte er sich mit einer historisch-kritischen Arbeit "Über die chemischen Lehren von Berthollet und Berzelius" für Physik und Chemie.

Bald darauf wurde er Privatdozent und Leiter des chemischen Laboratoriums am physiologischen Institut der Breslauer Universität. In den folgenden Jahren hielt er Vorlesungen über Biochemie, Photochemie, Gasanalyse und Maßanalyse sowie Repetitorien der anorganischen und organischen Chemie.

Auf Grund der umfangreichen Lehrverpflichtungen musste Lothar Meyer zwar eigene wissenschaftliche Arbeiten zunächst etwas zurückstellen, um seine Vorlesungen dem neuesten wissenschaftlichen und technischen Stand anzupassen, war er jedoch auch gezwungen, sich bei der Vorbereitung mit den neuesten Forschungsergebnissen und Theorien der Chemie zu beschäftigen.

Dieser Reifeprozess ist für ihn sicher ebenso fruchtbar geworden wie seine in diese Zeit fallende Teilnahme am Karlsruher Chemikerkongress.

2.3 Die Aufstellung des Periodensystems durch Mendelejew und Meyer

Der Karlsruher Chemikerkongress

Der berühmt gewordene internationale Chemikerkongress, der im September 1860 von angesehenen Chemikern, Vertretern moderner Richtungen, wie August Kekule, Adolph Wurtz (1817 bis 1884) und Carl Weltzien (1813 bis 1870), nach Karlsruhe einberufen wurde, sollte nicht nur zu einem Markstein in der Geschichte der Atom- und Molekulartheorie, sondern auch zum Ausgangspunkt des Periodensystems werden.

Sein Hauptanliegen war es, durch Begriffsklärung der überhandnehmenden Verwilderung in der Chemie Einheit zu gebieten und einer einheitlichen chemischen Theorie den Weg zu bereiten. Lothar Meyer schrieb über Verlauf und Bedeutung der Karlsruher Tagung:

"Weit über hundert der Geladenen folgten dem Rufe, ... viele von der Hoffnung beseelt, dass eine Einigung wenigstens angebahnt werden könne. (Man kann) ... sagen, dass in den seitdem verflossenen dreißig Jahren niemals mehr eine so glänzende Versammlung von Chemikern irgendwo in der Welt getagt hat.

Für uns junge Dozenten bot die Begegnung mit so vielen hochangesehenen Fachgenossen eine solche Fülle von Anregungen, dass uns die drei Tage, welche wir im Ständehaus zu Karlsruhe tagten, unvergeßlich bleiben mussten.

Die gehoffte Einigung wurde freilich nicht erzielt ... Gleichwohl boten auch die Hauptsitzungen des Interessanten genug. Für die Weiterentwicklung der Atomtheorie besonders wichtig war eine Rede von W. Odling, der nachdrücklich betonte, dass man einem Element nicht verschiedene, sondern nur ein einziges Atomgewicht beilegen dürfe, da nur eines das wirkliche sein könne.

Auch Cannizzaro hielt eine zündende Rede, in welcher er sehr entschieden gegen Du-

mas auftrat. Dumas, der in der letzten Sitzung den Vorsitz erhalten hatte, hielt einen längeren Vortrag, in welchem der Gedanke variiert wurde, dass es zwei Wissenschaften der Chemie gebe, die anorganische und die organische.

Darauf antwortete Cannizzaro, indem er die damals nicht selten befolgte Unsitte geißelte, dass vielfach die organische Chemie mit Benutzung anderer Atomgewichte und nach anderen Regeln vorgetragen wurde als die anorganische, und die Einheitlichkeit der Wissenschaft betonte.

Seine feurig lebhaftete Rede fand allgemein Anklang; aber auch sie vermochte das Ergebnis der ganzen Verhandlung nicht zu ändern, das zum Schluss in Reden von Hermann Kopp und Otto Linne Erdmann seinen Ausdruck fand, dahin gehend, dass man über wissenschaftliche Fragen nicht abstimmen könne, sondern jedem einzelnen Forscher seine volle Freiheit lassen müsse.

War sonach die Verhandlung der Form nach ergebnislos verlaufen, so war sie doch in der Sache sehr nützlich, indem durch vielseitigen Meinungsaustausch die spätere Übereinstimmung vorbereitet wurde." [15]

Der Löwenanteil an dem Verdienst, dass diese Karlsruher Tagung dennoch bedeutungsvoll für die Geschichte der theoretischen Chemie wurde, gebührt zweifellos Stanislaw Cannizzaro (1826-1910). Mendelejew erinnerte sich dreißig Jahre später noch "... lebhaft des Eindrucks seiner Reden, in denen keine Kompromisse und nur die eine Wahrheit vernehmbar war, welche ihren Ausgang von den Prinzipien Avogadros, Gerhards und Regnaults nahm" [11].

Besondere Bedeutung hatte dabei eine kleine Schrift "Abriss eines Lehrganges der theoretischen Chemie, vorgetragen an der K. Universität Genua von Prof. S. Cannizzaro", die bis dahin wenig bekannt geworden war und die der Verfasser nach Schluss der Veranstaltung verteilen ließ.

"Auch ich erhielt ein Exemplar, das ich einsteckte, um es unterwegs auf der Heimreise zu lesen. Ich las es wiederholt auch zu Hause und war erstaunt über die Klarheit, die das Schriftchen über die wichtigsten Streitpunkte verbreitete.

Es fiel mir wie Schuppen von den Augen, die Zweifel schwanden, und das Gefühl ruhiger Sicherheit trat an ihre Stelle. Wenn ich einige Jahre später etwas für die Klärung der Sachlage und die Beruhigung der erhitzten Gemüter habe beitragen können, so ist das zu einem nicht unwesentlichen Teil der Schrift Cannizzaros zu danken."

Die Saat, die auf diese Weise in die Köpfe Mendelejews und Meyers gelangt war, fand einen äußerst günstigen Nährboden, denn beide waren in den folgenden Jahren gezwungen, sich mit diesem Problem ausführlich zu beschäftigen.

Lothar Meyer begann 1862 an seinem ersten selbständigen Werk "Moderne Theorien der Chemie" zu arbeiten. In einem Brief an seinen Bruder O. E. Meyer äußerte er die Absicht, sein Buch eng an Berthollets "Essai de statique chimique" (Paris 1803) anzuschließen:

"Da das ewige Annalenlesen dumm macht, habe ich mich nach einer mehr produktiven

als rezeptiven Arbeit ... umgesehen und mich kurz und gut entschlossen, mit der Bearbeitung von Berthollets Statik den Anfang zu machen. - Mit einer keineswegs kolossalen Mühe wird sich ein Werk herstellen lassen, das von sehr großem Nutzen sein kann. -

Die heutigen Chemiker wissen von Berthollet kaum etwas anderes, als dass er gegen die Verbindungen nach konstanten Gewichten geschrieben habe; um so lächerlicher ist es, dass man unsere moderne Atomistik sehr leicht in seine Schriften einführen kann, ohne tief eingreifende Änderungen zu machen."

Diesen ursprünglichen Plan änderte er jedoch im Verlaufe der Arbeit am Manuskript schrittweise. Im Juli 1864 erschien das Buch in der bekannten Fassung, und es machte seinen Namen sofort weiten Kreisen bekannt.

Nach siebenjähriger Lehrtätigkeit in Breslau erhielt er daraufhin und auf Empfehlung seines Lehrers Löwig eine Berufung an die Forstakademie Neustadt-Eberswalde, zunächst als Dozent, ab 1867 als Professor, und zwar für "das Gebiet der gesamten anorganischen Naturwissenschaften, also insbesondere Mineralogie, Chemie und Physik ...", nach Bedarf jedoch auch Botanik, wie es im Berufungsschreiben hieß.

Hier heiratete er 1866 Johanna Volkmann, die später in seinem Kollegenkreis geschätzte und vielgerühmte "Lothariana", die ihm nicht nur verständnisvolle Lebensgefährtin und Mutter seiner vier Kinder war, sondern auch an seinen wissenschaftlichen Problemen regen Anteil nahm.

Im Frühjahr 1868 nahm Lothar Meyer einen Ruf an das Polytechnikum Karlsruhe als Nachfolger von Weltzien an. Hier bestanden für ihn günstigere Voraussetzungen für die wissenschaftliche Arbeit, und er konnte sich stärker den Problemen zuwenden, die ihn seit langem beschäftigten.

In einem Kapitel seiner "Modernen Theorien" über die Natur der Atome hatte er seine gereiften Karlsruher Erkenntnisse konsequent angewandt, indem er sechs Elementgruppen nach ihren Eigenschaften und Atomgewichten zusammenstellte, und zwar die späteren Haupt- und Nebengruppenelemente bereits getrennt.

Für die zweite Auflage seines Buches, die 1868 erschien, fertigte Meyer eine wesentlich vollständigere Tabelle von 52 Elementen an (Tabelle 4), die dann aber nicht mit gedruckt wurde und nur handschriftlich erhalten geblieben ist [34].

Ehe er sich entschloss, diese Tabelle zu publizieren, erschien im April 1869 Mendelejews epochemachende Arbeit "Über die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente".

Der Anstoß zu einer eingehenderen Beschäftigung mit diesem Problem war für Mendelejew ebenfalls die Arbeit an einem Lehrbuch gewesen. Als er 1861 nach Russland zurückkehrte, umfassten seine Lehrverpflichtungen hauptsächlich die organische Chemie.

Er begann deshalb sofort, ein Lehrbuch dieser Disziplin auszuarbeiten, das noch im gleichen Jahr erschien und das einzige russische Werk der organischen Chemie war, das dem damaligen Wissensstand entsprach. In ihm gab Mendelejew nicht nur die Grundprinzipien der Avogadroschen Molekulartheorie wieder sowie moderne chemische Formeln

und Molekulargewichte, die er nach den Cannizzaroschen Richtlinien erarbeitet hatte, sondern er wies auch schon darauf hin, dass die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Körper "... in mehr oder weniger direkter Wechselbeziehung stehen und vom Gewicht der Moleküle, sowie von der Zusammensetzung der letzteren abhängen" müssen.

In der Folgezeit erklomm Mendelejew die akademische Stufenleiter in relativ kurzer Zeit. 1864 erhielt er eine Professur für Chemie am Technologischen Institut und gleichzeitig eine Dozentur an der Petersburger Universität. Nachdem er sich ein Jahr darauf mit seiner Dissertation "Über die Verbindungen des Alkohols mit Wasser" den chemischen Doktorgrad erworben hatte, berief man ihn zum Professor für technische Chemie an die Universität.

Für diese Lehrtätigkeit brachte er beste Voraussetzungen mit, denn er hatte nach seiner Rückkehr aus Deutschland, teilweise auf Grund von "Nahrungssorgen", zahlreiche technische und technologische Werke herausgegeben und übersetzt. Dennoch ließ sich Mendelejew bereitwillig von diesen und anderen Lehrverpflichtungen entlasten, als ihm 1867 der Lehrstuhl für reine (anorganische) Chemie der Petersburger Universität angeboten wurde. Hier wirkte er ununterbrochen bis zu seiner Verabschiedung im Jahre 1890.

Mit dem Antritt seiner Professur im Herbst 1867 ging er sogleich daran, sich ein eigenes Lehrbuch zu erarbeiten. In diesen "Grundlagen der Chemie" wandte Mendelejew ebenso wie L. Meyer sein System der Elemente, obwohl es noch nicht völlig ausgereift war, erstmals an. Er betonte stets, dass dieses Buch für die Entstehung und Weiterentwicklung des Periodensystems eine ausschlaggebende Rolle gespielt habe; jede weitere der insgesamt acht Auflagen verzeichnete neue Erfolge des Systems und Ergänzungen dazu.

Bis in unser Jahrhundert hinein bildete dieses Werk, das auch in England, Deutschland und Frankreich in Übersetzungen erschien und geschätzt wurde, in Russland tatsächlich die "Grundlage der Chemie"; nach ihm wurden Generationen russischer Chemiker ausgebildet.

"Die periodische Gesetzmäßigkeit der chemischen Elemente"

Die Abfassung seines Lehrbuches war für Mendelejew nur der äußere Anlass für die Aufstellung seines Systems, dessen Grundfragen ihn bereits vorher beschäftigten. Er musste sich bei seinen "Grundlagen", wie er selbst sagte, "... für irgend ein 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."

Von allen Eigenschaften der Elemente schienen ihm dafür die Atomgewichte am geeignetsten. Auf den Erfahrungen einiger seiner Vorgänger aufbauend, von denen er Pettenkofer, Kremers, besonders aber Lenssen und Dumas nannte, überzeugte er sich davon, dass bei einer Anordnung der Elemente nach steigendem Atomgewicht eine Periodizität ihrer Eigenschaften, insbesondere der Wertigkeit, zu beobachten ist:

Tabelle 4
Entwurf eines Systems der Elemente des Lothar Meyer, 1868

Heutige Grup.-Nr.	Ia	IIa	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb		VIIIb		Ib	IIb	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa
Meyers Grup.-Nr.	12	13		14	15	1	2	3	4	5	6	7		8	9	10	11
1																	
2	Li 7,03	Be 9,3						(Al)	Al 27,3					C 12,00	N 14,04	O 16,00	F 19,0
3	Na 23,05	Mg 24,0												Si 28,5	P 31,0	S 32,07	Cl 35,46
4	K 39,15	Ca 40,0		Ti 48	Mo 92	Cr 52,6	Mn 55,1	Fe 56,0	Co 58,7	Ni 58,7	Cu 63,5	Zn 65,0		- 72	As 75,0	Se 78,8	Br 79,97
5	Rb 85,4	Sr 87,6		Zr 90	V 137		Ru 104,3	Rh 104,3	Pd 106,0		Ag 107,9	Cd 111,9		Sn 117,6	Sb 120,6	Te 128,3	J 126,8
6	Cs 133,0	Ba 137,1		Ta 137,6	W 184		Pt 197,1	Ir 197,1	Os 199,0		Au 196,7	Hg 200,2		Pb 207,0	Bi 208,0		
7	Tl? 204																

Li: 7; Be: 9,4; B: 11; C: 12; N: 14; O: 16; F: 19; Na: 23; Mg: 24; Al: 27; Si: 28; P: 31; S: 32; Cl: 35,3.

Auf Grund dessen ging er daran, alle chemischen Elemente nach diesem Prinzip in einem allgemeinen System zusammenzufassen.

Am 6. März 1869 wurde auf einer Sitzung der Russischen Chemischen Gesellschaft die erste Mitteilung Mendelejews über "Die Beziehungen der Eigenschaften der Elemente zu ihren Atomgewichten" verlesen, die kurz darauf im Journal der Gesellschaft veröffentlicht wurde [5].

Ausgehend von der Behauptung, "... dass die Größe des Atomgewichtes den Charakter des Elementes bestimmt", und von seinem damit im Zusammenhang aufgestellten System (Tabelle 5) kam er darin zu folgenden historisch gewordenen Schlussfolgerungen:

- 1.) Die nach der Größe ihres Atomgewichtes angeordneten Elemente zeigen eine deutliche Periodizität ihrer Eigenschaften.
- 2.) Elemente, die in ihrem chemischen Verhalten Ähnlichkeit aufweisen, zeigen entweder sich einander nähernde (so bei Pt, Ir, Os) oder folgerecht und gleichförmig sich vergrößernde (wie bei K, Rb, Cs) Atomgewichte ...

The image shows a handwritten manuscript of Dmitri Mendeleev's periodic table. The table is organized into columns and rows, with elements listed by their atomic weights and chemical symbols. The handwriting is in Russian. The table is titled 'Периодическая система элементов' (Periodic system of elements). The elements are arranged in a way that shows their periodic properties. The table is written on a piece of paper with some other text and a signature at the bottom.

Abb. 3. Faksimileausschnitt eines handschriftlichen Entwurfs Mendelejews für das Periodensystem (vom 17. 2. 1869)

- 3.) Die Zusammenstellung der Elemente oder von Gruppen solcher nach der Größe des Atomgewichts entspricht ihrer sogenannten Wertigkeit und bis zu einem gewissen Grade der Verschiedenheit ihres chemischen Charakters, was aus der Reihe Li, Be, B, C, O, F deutlich zu ersehen ist und ebenso in den anderen Reihen wiederkehrt.
- 4.) Die in der Natur am weitesten verbreiteten Körper besitzen ein kleines Atomgewicht,

Tabelle 5
Allgemeines System der Elemente von D.I. Mendelejew, 1869

	Ia	IIa	IIIb				IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb			Ib	IIb	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa
	14	15	16	17	18	19	1	2	3		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1													H 1							
2	Li 7,03														Be 9,4	B 11	C 12	N 14	O 16	F 19
3	Na 23														Mg 24	Al 27,4	Si 28	P 31	S 32	Cl 35,5
4	K 39	Ca 40	? 45	Er? 56	Y? 60	In? 75,6	Ti 50	V 51	Cr 52		Mn 55	Fe 56	Ni,Co 59	Cu 63,4	Zn 65,2	- 68	- 70	As 75	Se 79,4	Br 80
5	Rb 85,4	Sr 87,6	Ca 92	La 94	Di 95	Th 118?	Zr 90	Nb 94	Mo 96		Rh 104,4	Ru 104,4	Pd 106,6	Ag 108	Cd 122	U 116	Sn 118	Sb 122	Te 128?	J 127
6	Cs 133	Ba 137					? 180	Ta 182	W 186		Pt 197,4	Ir 198	Os 199	Hg 200		Au 197?		Bi 210		
7	T 204	Pb 207																		

aber alle Elemente mit kleinem Atomgewicht sind durch ihre ausgeprägten Eigenschaften charakterisiert und deshalb typische Elemente. Wasserstoff als das leichteste Element ist billigerweise als das typischste von allen zu wählen,

5.) Die Größe des Atomgewichtes bestimmt den Charakter des Elementes wie die Größe des Moleküls die Eigenschaften eines zusammengesetzten Körpers; ...

6.) Es ist die Entdeckung noch zahlreicher unbekannter einfach Körper zu erwarten, z. B. von Elementen ähnlich dem Al und Si mit einem Atomgewicht von 65-75.

7.) Die Größe des Atomgewichtes eines Elementes kann zuweilen berichtigt werden, wenn dessen Analogien bekannt sind. So muss das Atomgewicht von Tellur nicht 128, sondern 123-126 sein?

8.) Einige Analogien werden mittels der Größe des Atomgewichtes aufgedeckt. So zeigt Uran Analogien mit Bor und Aluminium, was auch durch die Vergleichung ihrer Verbindungen Bestätigung findet."

Diese Thesen erschienen zusammen mit der Elementanordnung schon sehr bald in einer Übersetzung von Beilstein in der Zeitschrift für Chemie, die Tabelle auch im Journal für praktische Chemie, so dass auf diese Weise die deutschen Chemiker mit den Ideen Mendelejews in Berührung kamen. Der große Widerhall blieb aber auch hier aus.

Für Lothar Meyer war diese Veröffentlichung jedoch Anlass, seine eigenen fragmentarischen Arbeiten zu diesem Problem zusammenzufassen. 1870 erschien seine Ende 1869 geschriebene Abhandlung "Die Natur der chemischen Elemente als Funktion ihrer Atomgewichte" in Liebigs Annalen.

Darin teilte er eine verbesserte Fassung seiner Tabelle der Elemente mit (Tabelle 7), und zwar in kurzperiodischer Darstellung, die in einigen wesentlichen Punkten über Mendelejew hinausging.

Meyer hatte die Änderungen der Eigenschaften von Element zu Element verfolgt und besonders bei den Atomvolumina (Atomgewicht/spezifisches Gewicht) Gesetzmäßigkeiten gefunden. Eine graphische Darstellung der Änderung der Atomvolumina mit den Atomgewichten (Abb. 4), zeigt Elemente mit analogen chemischen und physikalischen Eigenschaften auf ähnlichen Kurvenstücken.

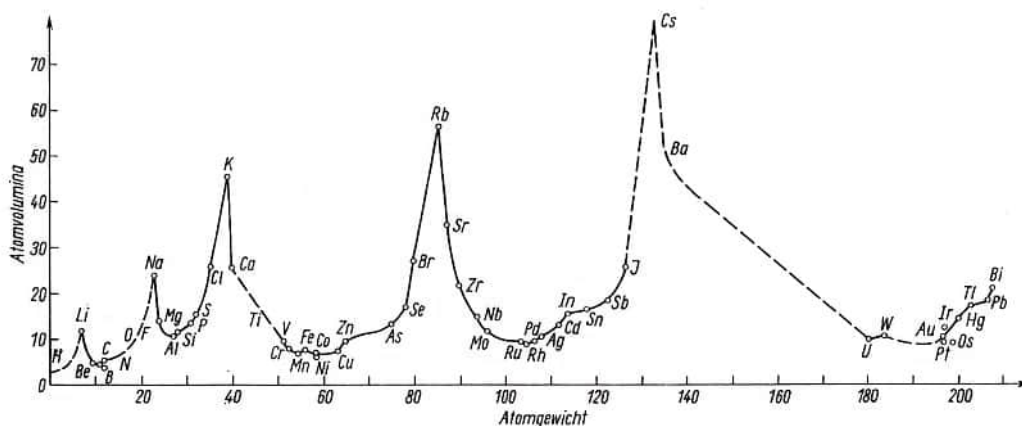


Abb. 4. Atomvolumenkurve Lothar Meyers

Tabelle 6
Periodensystem der Elemente, 1970

	Ia	IIa	IIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb	Ib	IIb	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa
1	1 H 1,008															2 He 4,003
2	3 Li 6,939	3 Be 9,012									5 B 10,811	6 C 12,011	7 N 14,007	8 O 15,999	9 F 18,998	10 Ne 20,183
3	11 Na 22,989	12 Mg 24,312									13 Al 26,982	14 Si 28,086	15 P 30,974	16 S 32,064	17 Cl 35,453	18 Ar 39,948
4	19 K 39,102	20 Ca 40,08	21 Sc 44,956	22 Ti 47,90	23 V 50,942	24 Cr 51,996	25 Mn 54,938	26 Fe 55,847	27 Co 58,933	28 Ni 58,71	29 Cu 63,54	30 Zn 65,37	31 Ga 69,72	32 Ge 72,59	33 As 74,922	34 Se 78,96
5	37 Rb 85,47	38 Sr 87,62	39 Y 88,905	40 Zr 91,22	41 Nb 92,906	42 Mo 95,94	43 Tc 98,908	44 Ru 101,07	45 Rh 102,91	46 Pd 106,4	47 Ag 107,87	48 Cd 112,40	49 In 114,82	50 Sn 118,69	51 Sb 121,75	52 Te 127,60
6	55 Cs 132,905	56 Ba 137,34	57 La 178,49	72 Hf 178,49	73 Ta 180,95	74 W 183,85	75 Re 186,2	76 Os 190,2	77 Ir 192,2	78 Pt 195,09	79 Au 196,97	80 Hg 200,59	81 Tl 204,37	82 Pb 207,19	83 Bi 208,98	84 Po 209,98
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Ku												

Lanthaniden (zu 6)

58 Ce 140,12	59 Pr 140,907	60 Nd 144,24	61 Pm 146,915	62 Sm 150,35	63 Eu 151,96	64 Gd 157,25	65 Tb 158,924	66 Dy 162,50	67 Ho 164,930	68 Er 167,26	69 Tm 168,934	70 Yb 173,04	71 Lu 174,97
-----------------	------------------	-----------------	------------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------	-----------------	------------------	-----------------	------------------	-----------------	-----------------

Actiniden (zu 7)

90 Th 232,04	91 Pa 231,04	92 U 238,03	93 Np 237,05	94 Pu 242,06	95 Am 243,06	96 Cm 245,07	97 Bk 247,07	98 Cf 250,08	99 Es 254,09	100 Fm 255	101 Md 255,09	102 No 254	103 Lw 257
-----------------	-----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	---------------	------------------	---------------	---------------

Die Alkalimetalle (Li, Na, K, Rb und Cs) bilden Maxima, während die Erdalkalimetalle (Be, Mg, Ca, Sr und Ba) an den fallenden, die Halogene (F, Cl, Br, J) dagegen an den steigenden Kurvenästen stehen.

Nicht zuletzt auf Grund dieser Kurve konnte L. Meyer die von Mendelejew noch falsch eingeordneten Elemente Au, Hg, Tl und Pb an die richtigen Stellen setzen. Außerdem war in dieser Tabelle Meyers erstmals die Anordnung nach steigendem Atomgewicht streng durchgeführt sowie infolge der kurzperiodischen Darstellung eine Einteilung in Haupt- und Nebengruppenelemente (die Meyer allerdings noch nicht so bezeichnete).

Diese Veröffentlichung hat nun mit Sicherheit die weiteren Arbeiten Mendelejews zu diesem Problem vorangetrieben und beeinflusst. Im Dezember 1870 legte er der Russischen Chemischen Gesellschaft seine berühmt gewordene Abhandlung "Über das natürliche System der Elemente und seine Anwendung zum Ermitteln der Eigenschaften unentdeckter Elemente" vor [6].

Darin gab er die bis dahin beste Darstellung des Periodensystems (Tabelle 8), indem er, über das Bisherige hinausgehend, die Wertigkeit der Elemente und die von ihnen gebildeten Verbindungen zugrunde legte: "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."

Die Formen, zu denen sich die Elemente mit Wasserstoff und Sauerstoff verbinden können, nahm Mendelejew als gesonderte Reihe in seine Tabelle mit auf. Weiterhin fügte er auf Grund neuer Atomgewichtsbestimmungen bzw. von Analogieschlüssen Ce, In, U und Th in sein System ein.

Von größter Bedeutung waren seine Voraussagen über damals noch unbekannte Elemente. Mendelejew beschränkte sich nicht darauf, wie Meyer nur Lücken für sie im System freizuhalten, sondern er gab ihre zu erwartenden chemischen und physikalischen Eigenschaften, ihr vermutliches Vorkommen, die Begleitminerale und eventuelle Darstellungsmethoden an.

In dieser Arbeit und ihrer wesentlich erweiterten deutschen Fassung "Die periodische Gesetzmäßigkeit der chemischen Elemente" beschäftigte er sich ausführlich mit den Analogen des Bors, Aluminiums und Siliciums, die sein besonderes Interesse beanspruchten. Die von Mendelejew vorausgesagten Daten sind gemeinsam mit den später tatsächlich gefundenen in der folgenden Übersicht einander gegenübergestellt,

Ekabor (21) ²	Scandium, entdeckt 1879 von Lars Fredrik Nilson (1840 bis 1899)
Atomgewicht 45	45,10
Atomvolumen 15	
spezif. Gewicht 3,0	
weist ein scharfes Spektrum auf	spektralanalytisch entdeckt
Chlorid EbCl_3	
Molvolumen 78	63,4

²Sanskrit: eka = eins, dwi = zwei, tri = drei; also das in der jeweiligen Gruppe auf das betreffende Element als nächstes, übernächstes usw. folgende. In Klammern: heutige Ordnungszahl.

Tabelle 7

Tabelle der chemischen Elemente von Lothar Meyer, 1869

Heutige Grup.-Nr.	I		II		III		IV		V			VI		VII	VIII
Meyers Grup.-Nr.	11	12	13	14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1															
2	Li 7,01		Be? 9,3		B 11,0		C 11,97		N 14,01		O 15,96		F 19,1		
3	Na 22,990		Mg 23,9		Al 27,3		Si 28		P 30,9		S 31,98		Cl 35,38		
4	K 39,04		Ca 39,9		-		Ti 48		V 51,2		Cr 52,4				Mn,Fe,Co=Ni 54,8 55,9 58,6
	Cu 63,9		Zn 64,9		-		-		As 74,9		Se 78		Br 79,75		
5	Rb 85,2		Sr 87,0		-		Zr 89,7		Nb 93,7		Mo 95,6				Ru,Rh,Pd 103,5 104,1 106,2
	Ag 107,66		Cd 111,6		In? 113,4?		Sn 117,8		Sb 122,1		Te 128?		J 128,5		
6	Cs 132,7		Ba 136,8		-		-		Ta 182,2		W 183,5				Os,Ir,Pt 198,6 196,7 198,7
	Au 196,2		Hg 199,8		Tl 202,7		Pb 206,4		Bi 207,5		-				
7	-		-												

Tabelle 8
Tabelle der chemischen Elemente von Mendelejew, 1870

Heutige Grup.-Nr.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Mendelejews Grup.-Nr.	11 1	12 2	13 3	14 4	15 5	16 6	17 7	8 9 10
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	-	Ti 48?	V 51	Cr 52	Mn 55	Fe 56 Co 59 Ni 58
	Cu 63	Zn 65	-	-	As 75	Se 78	Br 80	
5	Rb 85	Sr 87	Y? 88?	Zr 90	Nb 94	Mo 96	-	Ru 104 Rh 104 Pd 106
	Ag 108	Cd 112	In 113?	Sn 118	Sb 122	Te 125?	J 127	
6	Cs 133	Ba 137	Di 138?	Ce 140?	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	Er 178?	La? 180?	Ta 182	W 184	-	Os 195? Ir 197 Pt 198?
	Au 199?	Hg 200	Ti 204	Pb 207	Bi 208	-	-	
7	-	-	-	Th 231	-	U 240	-	

spez. Gewicht 2,0	2,39
Oxid Eb_2O_3 nichtflüchtig, in Wasser unlöslich	Sc_2O_3 , fest
spez. Gewicht 3,5	3,86
Doppelsulfat mit K_2SO_4	$\text{K}_6\text{Sc}_2(\text{SO}_4)_6$

Ekaaluminium (31)

Gallium, entdeckt 1875 von
Paul Emile Lecoq de Boisbaudran (1838-1912)

Atomgewicht 68	69,72
Atomvolumen 11,5	11,7
spezif. Gewicht 6,0	5,904 fest; 6,095 flüssig
scharfes Spektrum	spektralanalytisch entdeckt
EaCl_3	GaCl_3
Ea_2O_3 , löslich in KOH	Ga_2O_3 , löslich in KOH

Ekasilicium (32)

Germanium, entdeckt 1886 von
Clemens Winkler (1838-1904)

Atomgewicht 72	72,6
Atomvolumen 13	13,4
spezif. Gewicht 5,5	5,35 fest; 5,47 flüssig
Oxid EsO_2 , schwach basisch	GeO_2 , amphoter
Molvolumen 22	22,2
spez. Gewicht 4,7	4,703
Fluorid EsF_4 , nicht gasförmig	$\text{GeF}_4 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$, fest
Komplexsäure H_2EsF_6	H_2GeF_6
Chlorid EsCl_4 , flüssig	GeCl_4 flüssig
Molvolumen 113	114,0
spez. Gewicht 1,9	1,879
Siedepunkt 90°C	$86,5^\circ\text{C}$
Äthylverbindung $\text{Es}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$	$\text{Ge}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$
Siedepunkt 160°C	$163,5^\circ\text{C}$
spez. Gewicht 0,96	0,991

Darüber hinaus gab Mendelejew ungefähre Atomgewichte und chemische Daten für weitere Elemente an. Im Yttrium und Lanthan vermutete er auf Grund dessen schon, sein Dwibor (39) und Tribor (57) vor sich zu haben, was sich bald bestätigte.

Die für Mendelejew bedeutungsvollsten waren die ausführlich beschriebenen Elemente Ekabor, -aluminium und -silicium, deren Entdeckung dann auch zur schnellen und allgemeinen Anerkennung des Periodensystems führte.

Als Lecoq de Boisbaudran im August 1875 in einer kurzen Mitteilung die spektroskopische Entdeckung eines neuen Elementes, des Galliums, in der Zinkblende beschrieb, vermutete Mendelejew sofort, dass es sich dabei um sein Ekaaluminium handelte, und präziserte seine früheren Voraussagen.

"Um zu ermessen, mit welcher Spannung man damals der Feststellung der Eigenschaften des Galliums entgegenseh", schrieb Clemens Winkler später, "muss man sich ver-

gegenwärtigen, dass ... es ... bis dahin an jedem Beweise für die Stichhaltigkeit und die Tragweite der aus dem Gesetze der Periodizität gezogenen Schlussfolgerungen fehlte".

Nachdem Lecoq de Boisbaudran an einer unsauberen Probe zunächst abweichende Daten gefunden hatte, stimmten seine späteren erstaunlich gut mit Mendelejews Prognosen überein.

Hatte man bisher nur in Deutschland Notiz von Mendelejews Arbeiten genommen, so änderte sich das nun, und auch in Frankreich und England erschienen Übersetzungen seiner grundlegenden Abhandlungen, Das Periodensystem wurde immer mehr zum Allgemeingut der Chemiker.

Als Nilson kurz darauf in dem von ihm entdeckten Scandium die vorausgesagten Eigenschaften des Ekabors bestätigt fand, gestand Mendelejew, dass er einen so glänzenden Erfolg des periodischen Gesetzes zu seinen Lebzeiten nicht erwartet habe.

Man begann nun, einige weitere Annahmen des Periodensystems, die den damaligen Ansichten zu widersprechen schienen, eingehender zu untersuchen. Dazu gehörten die von Meyer und Mendelejew angenommenen Atomgewichte für In (113) und Ce (138), die neue Reihenfolge der schweren Platinmetalle (Os, Ir, Pt) und vor allem die Einordnung des Berylliums in die zweite Gruppe und damit dessen Zweiwertigkeit.

Die Richtigkeit dieser Annahme bewies 1884 Bohuslav Brauner (1855- 1935): Mendelejew rechnete diesen Nachweis später zu den bedeutendsten Bestätigungen seines Systems. Das Bildnis Brauners fand deshalb neben den Porträts Lecoq de Boisbaudrans, Nilsons und Winklers einen Ehrenplatz in seinem Arbeitszimmer, da es vor allem diese Chemiker waren, die den tiefen wissenschaftlichen Wert des Periodensystems bewiesen hatten.

Eine Sonderstellung kam dabei der Entdeckung des Germaniums zu, die die wissenschaftliche Welt, allen voran Mendelejew selbst, als wichtigste Bestätigung dieses Gesetzes empfand.

Von vornherein war Mendelejew klar, "dass am interessantesten unter den unzweifelhaft fehlenden Elementen dasjenige sein wird, welches zur IV. Gruppe der Analoga des Kohlenstoffs gehört, und zwar zur dritten Reihe, Es wird dies ein Metall sein, das sogleich auf Silicium folgt, und daher wollen wir es Ekasilicium nennen."

Für dieses Element gab er präzisere und ausführlichere Hinweise als für die anderen (siehe Übersicht).

Anlässlich der Entdeckung des Germaniums konnte deshalb Winkler mit vollem Recht sagen:

"... einen schlagenderen Beweis für die Richtigkeit der Lehre von der Periodizität der Elemente, als den, welchen die Verkörperung des bisher hypothetischen "Ekasiliciums" in sich schließt, kann es kaum geben, und er bildet in Wahrheit mehr, als die bloße Bestätigung einer kühn aufgestellten Theorie, er bedeutet eine eminente Erweiterung des chemischen Gesichtsfeldes, einen mächtigen Schritt ins Reich der Erkenntnis."

Friedrich Engels (1820-1895) hat diese Leistung Mendelejews verglichen mit der von Urbain Jean Joseph Leverrier (1811-1877), der aus Bahnanomalien bekannter Plane-

ten auf die Existenz eines unbekannten, des kurz darauf entdeckten Neptun, schloss und dessen Größe und Bahn vorausberechnete. Tatsächlich hatte Winkler zunächst vor, diese analogen Tatsachen bei der Namensgebung für sein neues Element zugrunde zu legen.

In einem Vortrag vor der Deutschen Chemischen Gesellschaft 1886 führte er aus: "Meine erste Absicht war, das neue Element Neptunium zu nennen, ... denn so wie der Planet Neptun vorausberechnet worden ist, noch bevor eines Menschen Auge ihn gesehen hatte, gehört das Germanium zu denjenigen Elementen, deren Existenz schon vor 15 Jahren auf Grund des periodischen Systems mit großer Wahrscheinlichkeit vorausgesagt worden ist." [41]

Winkler nahm dann jedoch Abstand davon, da kurz vorher schon einmal ein Element, dessen Existenz sich dann nicht bestätigte, Neptunium genannt worden war.

Die Bezeichnung Germanium ist Winkler im Ausland, insbesondere in Frankreich, sehr verübelt worden. In einem Brief an Mendelejew, mit dem ihn seit der Entdeckung eine herzliche Freundschaft verband, schrieb er, dass nur ein Umstand auf die Entdeckerfreude einen trüben Schatten werfe, "... nämlich die Anfechtung, welche der Name Germanium im Auslande erfahren hat."

Er folgte in der Namensgebung "... dem Beispiel der Herren Lecoq de Boisbaudran und L. F. Nilson und benannte das Element nach dem Lande, in dessen Boden es zuerst gefunden worden war, nach meinem Vaterlande." Es habe ihm ferngelegen, beteuerte Winkler, "... damit Politik in die Wissenschaft tragen zu wollen", wie ihm das verschiedentlich vorgeworfen worden sei [41].

Mendelejew beeilte sich, ihm mitzuteilen: .

"Sie werden mich erfreuen, wenn Sie irgendwo folgende Meinung mitteilen würden. Die Namen Eka-Aluminium, -Bor, -Silicium wurden von mir nur provisorisch zur Zeit ihrer Entdeckung vorgeschlagen, und ich kann stolz darauf sein, dass dieselben durch Namen hochentwickelter und hervorragender Länder wie Gallien, Skandinavien und Germanien ersetzt worden sind; es würde mich weniger schmeicheln, wenn die von mir vorgeschlagenen provisorischen Namen erhalten blieben."

Die hauptsächlich auf dem umfangreichen Briefwechsel beruhende Freundschaft der beiden Wissenschaftler gipfelte 1894 in der persönlichen Begegnung Mendelejews und Winklers.

Anlässlich einer Reise nach Paris und London folgte der russische Gelehrte einer schon lange ausgesprochenen Einladung des Kollegen zum Besuche Freibergs und damit der ersten Fundstätte des Eka-siliciums. Diesen nur einen Tag währenden Besuch Mendelejews bezeichnete Winkler später als die schönste Erinnerung seines Lebens.

Über den Anteil Mendelejews und Meyers am Periodensystem und Prioritätsfragen

Es ist in der Vergangenheit viel über die Anteile Mendelejews und Lothar Meyers am Zustandekommen des Periodensystems gesagt und geschrieben worden, verständlicherweise hauptsächlich in den Heimatländern der beiden Forscher.

Eröffnet wurden die Auseinandersetzungen darüber jedoch in Paris, und zwar Ende 1879 durch Adolphe Wurtz (1817-1884).

In einem Schreiben an die Deutsche Chemische Gesellschaft protestierte er dagegen, dass in der deutschen Ausgabe seines Werkes "Über die atomistische Theorie" zwei Stellen abgeändert wurden, um - wie der deutsche Herausgeber vorausgeschickt hatte - den Arbeiten Meyers gerecht zu werden.

Wurtz erschienen Reklamationen "... zu Gunsten des Hrn. Lothar Meyer ... nicht wohl begründet", und zwar aus folgendem Grunde:

"In der Abhandlung ([17] S. 354), welche dieser ausgezeichnete Chemiker im Jahre 1870 veröffentlicht hat, zitiert er selbst Hrn. Mendelejew als denjenigen, welchem zuerst ([5] S. 405) der Gedanke gekommen sei, die Elemente nach ihren ansteigenden Atomgewichten zu ordnen, und sie in zwei Arten von Reihen zu sondern, ...

Dieser Gedanke gehört mithin Mendelejew an; Hr. Lothar Meyer aber hat ... für die Entwicklung der Mendelejewschen Regel wichtige Momente hinzugefügt."

Diese Bemerkungen waren für Meyer Anlass, bereits vier Wochen darauf in einem Artikel "Zur Geschichte der periodischen Atomistik" die Entstehungsgeschichte des Periodensystems zu skizzieren.

"... um nicht aus allzu großer Bescheidenheit den Anteil, den ich an demselben genommen, der Vergangenheit anheim fallen zu lassen".

Darin würdigte er eingangs die Erstveröffentlichung Mendelejews und erkannte die Priorität der dort angeführten Schlussfolgerungen an. Gleichzeitig schränkte er jedoch ein, "... dass Hrn. Mendelejews Tafel nicht eine einzige nach der Größe der Atomgewichte fortlaufende Reihe, sondern deren drei enthält, die sich nicht aneinander reihen lassen (Tabelle 5: H bis In, Ti bis Th und Zr bis Ph; K. D.) und von sehr ungleicher Länge sind.

Es ist das um so auffallender, als diese Diskontinuität der Reihe nur durch die Einschaltung von sieben unsicher und, wie wir jetzt wissen, unrichtig bestimmten Atomgewichten (Er, Y, In, Ce, La, Di, Th) hervorgebracht wurde. Hätte Hr. Mendelejew damals Wert auf die Herstellung einer einzigen Reihe gelegt, so würde er ohne Zweifel diese Atomgewichte anders angenommen haben."

Tatsächlich enthielt erst Meyers Tabelle die damals bekannten Elemente in einer einzigen Reihe, wobei sie, gegenüber seiner früheren, der Mendelejewschen Anordnung äußerlich angeglichen wurde, indem Vertikalreihen dargestellt wurden. Neben der Berichtigung einiger Atomgewichte ging dieses System vor allem durch die richtige Einordnung der Haupt- und Nebengruppen über Mendelejew hinaus.

"Ich zeigte zugleich an der Hand meiner graphischen Darstellung der Atomvolumina, dass diese von mir eingereihten Elemente nur einen Teil der Eigenschaften der ihnen entsprechend gestellten besitzen, so dass einige Eigenschaften erst in der zweitnächsten Periode wiederkehren, die Periodizität also eine doppelte ist.

Diese Tatsache hat Hr. Mendelejew später, ohne mich zu nennen, verwertet als Unterschied seiner paaren und unpaaren Reihen.

Ich wäre in meiner Arbeit gern auf die Verschiedenheit unserer Tafeln näher eingegangen; aber bei dem damals beschränkten und fest begrenzten Raume der Annalen durfte ich die Freundlichkeit der Redaktion, die mir ganz ausnahmsweise die Veröffentlichung einer keine neuen experimentellen Daten enthaltenden Abhandlung verstattete, nicht missbrauchen und musste mich der äußersten Kürze befleißigen.

Ich sagte daher, meine Tafel sei "im Wesentlichen"(d.h. in der Anordnung nach der Größe der Atomgewichte) "identisch mit der von Mendelejew gegebenen". Dies war vielleicht etwas zuviel Höflichkeit; aber jedenfalls besser, als hätte ich mir zuviel Verdienst zugeschrieben."

Lothar Meyer warf seinem Kollegen aber vor, dass beinahe alles, was er selbst geleistet habe, in der berühmten Abhandlung in den Annalen enthalten sei, ohne dass er oder seine Arbeiten auch nur erwähnt wurden. Ungeachtet dessen erkannte er vorbehaltlos die neuen Gesichtspunkte und Ideen Mendelejews an, ganz besonders die "... kühnen Vorausbestimmungen der Eigenschaften noch unentdeckter Elemente.

... Ich gestehe bereitwillig zu, ... dass mir die Kühnheit zu so weitgehenden Vermutungen fehlte; ... über das Zutreffen seiner Voraussagen hat sich schwerlich irgend jemand mehr gefreut als ich."

Das wird auch durch die Tatsache unterstrichen, dass Meyer einer der ersten war, der Winkler zu einer Zeit, da dieser noch vermutete, das Germanium sei ein Homologes des Antimons, darauf aufmerksam machte, dass es sich bei dem neuentdeckten Element zweifellos um Mendelejews Ekasilicium handele.

Meyer bemerkte abschließend, dass Mendelejews Verdienst auch nach Anrechnung seines eigenen bescheidenen Anteils noch außerordentlich groß sei.

Mendelejew widersprach diesen Ansprüchen Meyers ganz entschieden, ebenso wie er auch denen Newlands entgegentrat, allerdings ohne dessen Arbeiten zu kennen, Er ging dabei von dem Grundsatz aus, dass

"... als Schöpfer einer wissenschaftlichen Idee derjenige zu betrachten (ist), welcher nicht nur die philosophische, sondern auch die reelle Seite eines Gegenstandes erkannt hat, welcher die Sache so zu beleuchten wusste, dass jedermann sich von ihrer Wahrheit überzeugen konnte und sie zu einem Allgemeingut wurde.

Nur dann wird die Idee, wie die Materie, unvernichtbar."

Davon ausgehend, erkannte er zwar an, dass sich vor ihm bereits andere Wissenschaftler mit dieser Frage beschäftigt hatten, und fühlte sich dabei vor allem Lenssen und Dumas verpflichtet, "Hrn. Newlands aber wie Hrn. L. Meyer ist der gegenwärtige Standpunkt der Frage über Periodizität der Elemente nicht im Mindesten verpflichtet".

Er versuchte das zu beweisen, indem er wesentliche Ausschnitte aus seinen bedeutendsten Arbeiten wiedergab und kam auf Grund dessen nicht nur zu dem Schluss, "... dass Hr. L. Meyer vor mir das periodische Gesetz nicht im Sinne gehabt und nach mir nichts Neues hinzugefügt hat", sondern behauptete auch, "... dass Hr. L. Meyer (zwar) von allen deutschen Chemikern zuerst die äußere Seite der das periodische Gesetz betreffenden Ideen sich begriffen, ... jedoch den inneren Sinn des periodischen Systems nach

dem Erscheinen meiner ersten Abhandlungen nicht durchdrungen hat".

Er glaubte, die Ansprüche eines "... So berühmten Gelehrten, wie L. Meyer, ... für nichts anderes, als einen Irrtum ..." halten zu müssen.

Damit hatte Mendelejew die Verhältnisse sicher nicht ganz real eingeschätzt. Bei beiden Forschern finden sich seit dem bedeutsamen Karlsruher Kongress selbständige geschlossene Gedankenreihen, die sie schließlich beide etwa zur gleichen Zeit ans Ziel führten, zur Aufstellung eines Systems der chemischen Elemente, das auf deren Periodizität und Atomgewichten basierte.

Das war durchaus kein Zufall, denn die Entwicklung der Chemie, insbesondere in bezug auf die Erforschung der Elemente selbst wie auch auf die gleichzeitigen Systematisierungsbestrebungen der organischen Verbindungen, hatte einen Stand erreicht, der eine Beschäftigung mit dieser Frage geradezu erforderte.

Das mussten aufgeschlossene Wissenschaftler wie Mendelejew und Meyer, die nicht in althergebrachten Vorurteilen befangen waren und einen Blick für offene Probleme hatten, zweifellos erkennen.

In der Geschichte der Wissenschaft gibt es ja viele Beispiele dafür, dass die Lösung solcher herangereifter Probleme dann von mehreren Seiten kommt. Es sei hier nur an das Energieprinzip, die Spektralanalyse und die Strukturchemie erinnert.

Dass dabei nicht immer mit einer einzigen Arbeit das betreffende Problem umfassend gelöst und verallgemeinert werden kann, hat Mendelejew selbst in seinem oben zitierten Ausspruch anerkannt.

Der Tatsache, dass wir beiden Wissenschaftlern die Aufstellung des Periodensystems verdanken, trug zuerst die Royal Society in London Rechnung, indem sie 1882 Lothar Meyer und Mendelejew dafür gemeinsam die Goldene Davy-Medaille verlieh.

Außer Zweifel steht jedoch ebenso, dass Mendelejew in seinen Schlussfolgerungen weit über Meyer hinausging und damit selbst zum wichtigsten Vorkämpfer des Periodensystems wurde.

Jedoch auch die vorsichtige Haltung Meyers, der davor warnte, Atomgewichte allein auf Grund des Systems abzuändern, hatte ihre Berechtigung; das sollte vor allem die spätere Entwicklung zeigen, in deren Verlauf man die Ursachen der Periodizität erkannte.

Darüber konnten beide Forscher beim damaligen Stand des Wissens nur Vermutungen anstellen. Sie stimmten jedoch im großen und ganzen darin überein, dass ein eventueller Feinbau der Atome bzw. deren "innere Mechanik", wie Mendelejew sich ausdrückte, dafür verantwortlich sei.

Meyer meinte, "dass die Atome der Elemente nicht die letzten, sondern nur die näheren Bestandteile der Moleküle sowohl der Elemente wie der Verbindungen bilden, die Moleküle ... als Massenteile erster, die Atome als solche zweiter Ordnung anzusehen sind, die ihrerseits wiederum aus Massenteilchen einer dritten höheren Ordnung bestehen werden."

Zu Beginn unseres Jahrhunderts sind diese Ideen, die damals nur Spekulationen sein konnten, nicht nur bestätigt worden, sondern sie haben - auf einer höheren Ebene - viel

dazu beitragen können, die Ursachen der periodischen Elementanordnung zu erkennen.

Wurde bereits der Prioritätsstreit maßvoll und ohne die in solchen Fällen oft anzutreffende verletzende Schärfe geführt, so war das Verhältnis zwischen Meyer und Mendelejew später durchaus freundschaftlich. 1887 nahmen beide an einer Tagung der British Association in Manchester teil (Abb. 5), und im Anschluss an dieses harmonische Beisammensein übersandte Mendelejew dem Kollegen seine Photographie mit einer Widmung.



Abb. 5. Lothar Meyer und Mendelejew in Manchester 1887
Reihe von links nach rechts: Wislicenus, Lothar Meyer, Atkinson, Quincke.
Untere Reihe: Mendelejew, Frau Meyer geb. Volkmann, Roscoe

Die Schwierigkeiten in ihren anfänglichen Beziehungen hatte ja schon Lothar Meyer 1880 zum Ausdruck gebracht, als er schrieb: "Es ist nicht leicht, gegen jemanden, der einem die eigenen Lieblingsgedanken unerwartet durchkreuzt, völlig objektiv gerecht zu bleiben, Auch ich hätte, als ich 1869 Hrn. Mendelejews erste Abhandlung fand, ihm gerne zugerufen: 'Noli turbare circulos meos'!).³

Gerade das unbeabsichtigte und teilweise auch unbewusste Wechselspiel der Gedanken hat aber zu dem allgemeinsten Grundgesetz der Chemie geführt, und es ist müßig, darüber zu streiten oder zu spekulieren, ob und wann auch jeder allein an dieses Ziel gelangt wäre.

2.4 Der Spätere Lebensweg und weitere wissenschaftliche Leistungen Lothar Meyers und Mendelejews

Lothar Meyer

Bald nach der Veröffentlichung seiner wichtigen Arbeit über das Periodensystem erhielt Meyer eine Berufung nach Königsberg. Er lehnte jedoch ab, einmal wegen des rauen Klimas und der geographischen Lage der Stadt, zum anderen, weil die badische Regierung, um ihn zu halten, weitgehend auf von ihm vorgebrachte Wünsche einging.

³"Störe meine Kreise nicht"; Archimedes (287-212 v.u.Z.) soll diese Worte ausgerufen haben, als feindliche Soldaten ihn in seinem Haus überfielen, während er mit einem geometrischen Problem beschäftigt war.

Dagegen nahm er im Frühjahr 1876 einen Ruf an die Universität Tübingen als Nachfolger von Rudolf Fittig (1835-1910) mit Freude an, Hier konnte er nicht nur seine Lehrveranstaltungen weitgehend nach eigenen Vorstellungen gestalten, sondern auch die Bearbeitung einer Reihe von wissenschaftlichen Problemen in Angriff nehmen bzw. vollenden, die er bis dahin zurückstellen musste.

In der Neckarstadt fand der sechsundvierzigjährige Lothar Meyer gut ausgestattete Institutsräume vor, innerhalb derer sich auch seine Dienstwohnung befand, darüber hinaus aber auch eine größere Anzahl von Mitarbeitern und von Studenten. Von dieser Seite und von seiner außerordentlichen Begabung her waren die besten Voraussetzungen für ein fruchtbares und erfolgreiches Schaffen gegeben.

Sein Name führte eine große Zahl von Schülern nach Tübingen, unter denen sich zahlreiche Ausländer befanden. Der bekannteste seiner Schüler war sein späterer langjähriger Mitarbeiter Karl Seubert (1851-1942), der auch sein erster Biograph werden sollte. An Meyers Lehrtätigkeit erinnerte er sich mit folgenden Worten:

"Sein Vortrag, wohl durchdacht und nach sorgfältig überlegtem Plane geordnet, wurde an Hand leitender Notizen klar, frei von rhetorischen Verzierungen und Effekthascherei, und ausnehmend deutlich gesprochen, Die Hauptvorlesung, im Winter über anorganische, im Sommer über organische Experimentalchemie, durch zahlreiche Versuche erläutert, wurde fortlaufend durch Einfügen von Neuem bereichert und durch historische und persönliche Erinnerungen, die ihm eine ungewöhnliche Belesenheit und ein ungemein treues Gedächtnis in großer Zahl zu Gebote stellten, belebt.

Besonders galt aber letzteres von seinen kleineren Vorlesungen, die sich auf die verschiedenen Gebiete der physikalischen Chemie, Gasanalyse u. a. m. erstreckten; hier setzte seine eingehende Kenntnis der einschlägigen Literatur, die er überdies meist aus seiner eigenen, mit vielem Fleiße zusammengebrachten, reichhaltigen Bibliothek im Originale vorlegen konnte, geradezu in Erstaunen."

Den größten Teil seiner Zeit, vom Vormittag bis zum Abend, stand Meyer seinen Schülern im Laboratorium zur Verfügung.

Von dem ausgezeichneten wissenschaftlichen, pädagogischen und persönlichen Wechselverhältnis kündeten nicht nur die vielen Publikationen, die sein Institut verließen, nicht nur der gute Besuch seiner Vorlesungen, nicht nur die Tatsache, dass sich seine Schüler auch mit persönlichen Sorgen an ihn wandten, sondern auch die jährlich zu Semesterschluss stattfindenden "Chemikerkneipen", die Lehrer und Studenten vereinten. Die zahlreichen Besuche, die ihm ehemalige Schüler in Tübingen abstatteten, waren Lothar Meyer eine zusätzliche Bestätigung dafür.

Auch an äußeren Zeichen der Anerkennung hat es Meyer nicht gefehlt. Als wertvollste Ehrung betrachtete er selbst die Verleihung der goldenen Davy-Medaille durch die Royal Society, die er 1882 gemeinsam mit Mendelejew erhielt und durch die seine selbständigen Arbeiten zum Periodensystem offiziell und endgültig anerkannt wurden.

Ein Jahr darauf wurde er als auswärtiges Ehrenmitglied in die Londoner Chemical Society aufgenommen; 1888 wählte ihn die Preußische Akademie der Wissenschaften zum korrespondierenden Mitglied.

Die berühmte Manchester Literary and Philosophical Society ernannte ihn 1889 zu ihrem Ehrenmitglied, und zwei Jahre später ehrte ihn die Petersburger Akademie der Wissenschaften durch die Wahl zum korrespondierenden Mitglied.

Von den zahlreichen Ehrenzeichen, die ihm verliehen wurden, sei hier nur das Ehrenritterkreuz des Ordens der Württembergischen Krone genannt, womit der Besitz des Personenadels verbunden war. Lothar Meyer machte selbst jedoch keinen Gebrauch von diesem Titel.

Für das Studienjahr 1894/95 wählten ihn seine Kollegen zum Rector magnificus der Universität Tübingen. Er sollte jedoch diese Amtsperiode nicht mehr beenden.

Am 11. April 1895 verstarb er ganz plötzlich infolge eines Gehirnschlages.

Für seine Freunde und Angehörigen kam sein Tod um so überraschender, als er in seinen letzten Jahren von Krankheiten und Alterserscheinungen verschont geblieben war. Noch zuletzt hatte er in seinem geliebten Garten schwere körperliche Arbeiten verrichtet und sogar noch eine Alpenwanderung in 3000 Meter Höhe unternommen.

Er verschied im Vollbesitz seiner körperlichen und geistigen Fähigkeiten, nachdem er nicht nur das Glück hatte, den Eintritt seiner Kinder in den Beruf und in ein selbständiges Leben mitzuerleben, sondern auch die Genugtuung, sein wissenschaftliches Werk international anerkannt zu sehen. Zahlreiche weitere wissenschaftliche Pläne für die Zukunft mussten unausgeführt bleiben.

Lothar Meyers wissenschaftliche Arbeiten erstreckten sich über das gesamte Gebiet der Chemie. Mit seinen Beiträgen zum Periodensystem hat er ebenso zum Ausbau der theoretischen Chemie beigetragen wie mit seinem Buch "Die modernen Theorien der Chemie".

War es bei seinem ersten Erscheinen 1864 eine nur 147 Seiten starke Schrift, ihrem Charakter nach kritisch-polemisch, "... die den Widerstreit der theoretischen Anschauungen jener Zeit zu schlichten und auszugleichen suchte durch Sonderung des wesentlichsten Inhaltes von dem formalistischen Beiwerk", so wuchs sein Umfang im Verlaufe der notwendig werdenden Nachauflagen 1872, 1876, 1883 und 1884 auf über 600 Seiten an.

Damit wurde es jedoch immer mehr zu einem Lehrbuch der theoretischen Chemie, entgegen der ursprünglichen Absicht Meyers, der oft die erste Fassung als die beste bezeichnete. Aus diesem Grunde verfasste er 1890 seine "Grundzüge der theoretischen Chemie", damit zur Tendenz der Erstauflage der "Modernen Theorien" zurückkehrend, die nicht in erster Linie für den Fachmann, sondern für jüngere Studenten und "Freunde naturwissenschaftlicher Forschung" geschrieben worden waren.

Kurz vor seinem Ableben bereitete Lothar Meyer die sechste Auflage seines Hauptwerkes vor, die in drei Bänden erscheinen sollte. Am Morgen seines Todestages beendete er den ersten Teil, die beiden anderen blieben Fragmente.

Die Bedeutung dieses Werkes kann nicht hoch genug eingeschätzt werden. Die bahnbrechenden Ideen Cannizzaros wurden erst mit seiner Hilfe zum Allgemeingut der deutschen Chemie. Carl Graebe (1841-1927) unterstrich das in seiner "Geschichte der organischen Chemie" mit den Worten:

"Den Namen Avogadro und dessen Hypothese ... lernten wir Chemiker ... erst aus der 1864 erschienenen Schrift Lothar Meyers 'Die modernen Theorien der Chemie' kennen."

Die Experimentaluntersuchungen Meyers, die alle Teilgebiete der Chemie berührten, entstanden einmal aus dem Bedürfnis heraus, sein Buch für jeweilige Neuauflagen zu vervollkommen, experimentelle Grundlagen für bestimmte Fragen im Zusammenhang mit dem Periodensystem zu schaffen und seine Vorlesungen mit sinnvollen und augenfälligen Versuchen zu bereichern, zum anderen aus der Notwendigkeit, für die Vielzahl seiner Schüler Diplom- und Doktorarbeiten zu vergeben.

Allein in Tübingen entstanden unter seiner Anleitung 60 Dissertationen.

Bei den experimentellen Arbeiten kam Lothar Meyer sein außerordentliches handwerkliches Geschick zugute.

"Als Jünger der Bunsenschen Schule", erzählte Seubert, "hatte er auch gelernt, mit einfachen Mitteln den gewünschten Zweck zu erreichen. Die gläsernen Teile seiner Apparate fertigte er ... meist mit eigenen Händen an, für die übrigen Teile mussten, wenn es irgend zugänglich war, die sehr einfachen Hilfsmittel seines Werkzeugschranks ausreichen; 'der Chemiker muss mit der Säge bohren können', meinte er dann mit dem Altmeister Berzelius, wenn irgendein gewagter Notbehelf erforderlich wurde.

An Apparaten für den Gebrauch im Laboratorium hat Lothar Meyer manches angegeben, was sich inzwischen auch in anderen Laboratorien eingebürgert hat, so seine Luftbäder und Trockenschränke, sein verbesserter Baboscher Thermoregulator u. a. m."

Neben seiner experimentellen Geschicklichkeit bewunderten die Schüler seine Ausdauer und Geduld und vor allem seine Verwegenheit bei Versuchen.

"Eine ohne ernsten Schaden abgelaufene Explosion gewährte ihm stets ein gewisses Vergnügen und nicht selten wurden verbogene Metallteile des Apparates als Belegstücke aufbewahrt. Wie manches Mal standen Assistenten und Schüler in respektvoller Entfernung, auch wohl in unauffälliger Weise eine sich anbietende Deckung benutzend, wenn der Meister ruhig das brennende Zündholz der Ausströmöffnung näherte, mit den vertrauenerweckenden Worten 'Wir wollen einmal sehen, ob's brennt, vielleicht fliegt's auch in die Luft'."

Neben den direkten Arbeiten zur Laboratoriumspraxis, der Konstruktion bzw. Verbesserung von physikalischen und chemischen Apparaturen, bildete die Anwendung dieser Geräte zur Ermittlung physikalisch-chemischer Konstanten einen Schwerpunkt der Meyerschen Arbeiten. Im Mittelpunkt standen dabei Bestimmungen von Siedepunkten und deren Abhängigkeit von spezifischen und Molvolumina und die Ermittlung von Atomgewichten.

Um eine höhere Genauigkeit der Atomgewichte begann sich Meyer bereits in Eberswalde zu bemühen. Er führte eine Neuberechnung für alle Elemente durch, die sich von anderen gleichgerichteten Arbeiten dadurch unterschied, dass die Originalzahlen auf einheitlicher Grundlage verarbeitet wurden und dass Wasserstoff gleich 1 bzw. das

Verhältnis O : H = 15,96 zugrunde gelegt wurde.

Dagegen bezog Wilhelm Ostwald (1853-1932) seine Berechnungen auf den Wert O = 16,00.

Nachdem die internationale Atomgewichtskommission, deren Arbeitsausschuss auch Seubert angehörte, jahrelang zwei Tabellen, bezogen auf H = 1 und auf O = 16, veröffentlicht hatte, beugte sie sich 1906 dem Willen der Mehrheit und beschloss, nur noch die Tabelle mit Sauerstoff als Einheit mitzuteilen.

Die mühevollen Atomgewichtsberechnungen beschäftigten Meyer 15 Jahre lang; er beendete sie schließlich gemeinsam mit Seubert.

In diesem Zusammenhang machten sich jedoch auch zahlreiche sorgfältige Analysen, vor allem von Metallchloriden, erforderlich.

Untersuchungen von Halogenverbindungen bildeten gleichzeitig einen weiteren Schwerpunkt seiner Arbeiten. Hier waren es vor allem Interhalogenverbindungen (JCl, JBr, JCl₃, BrCl) und Oxy- bzw. Säurechloride des Molybdäns, Chroms, Schwefels und Phosphors, die in seinem Institut eingehend erforscht wurden.

Weitere Arbeiten beschäftigten sich mit vergleichenden Untersuchungen über die Affinität der Metalle zu Schwefel, Sauerstoff und Chlor, mit der Diffusionsgeschwindigkeit von Salzlösungen, mit der Löslichkeit nicht mischbarer Flüssigkeiten sowie mit Experimentaluntersuchungen zum Massenwirkungsgesetz (1867) von Cato Max Guldberg (1836-1902) und Peter Waage (1833-1900).

Meyers Untersuchungen zur Halogen- und Sauerstoffübertragung stellten wertvolle Beiträge zur Erforschung der katalytischen Erscheinungen dar. Er stellte fest, dass solche Substanzen wie die Chloride oder Sulfate von Mn, Cu, Fe, Co, Ni, Zn, Cd und Mg die Oxydation bestimmter Stoffe mehr oder weniger stark beschleunigen. Diese Erscheinung nannte er "mittelbare Oxydation" bzw. "induzierte Sauerstoffübertragung".

Eines seiner Lieblingsgebiete war von jeher die Gasanalyse gewesen, deren Anwendung eine Reihe der oben angeführten Arbeiten überhaupt erst ermöglichte. Darüber hinaus hat sich Meyer aber auch erfolgreich um eine Verbesserung der gasanalytischen Apparate und Methoden bemüht; auf Grund dessen wurde z. B. die gefahrlose Verpuffung von Acetylen und die Bestimmung sehr kleiner Gasmengen möglich.

Die Anwendung der Absorptionsspektralanalyse auf quantitative Probleme durch seinen Tübinger Kollegen Carl Vierordt (1818-1884) veranlasste ihn, einige Probleme spektralanalytisch zu verfolgen, so die Salzbildung aromatischer Basen, z. B. der Nitraniline, Nitrotoluidine und -naphthylamine, sowie die Untersuchung des Fuchsins und anderer Triphenylmethanfarbstoffe.

Auf dem Gebiet der organischen Chemie beschäftigte er sich hauptsächlich mit den Paraffinen und mit Halogenaustausch- und -substitutionsreaktionen. Gemeinsam mit seinen Mitarbeitern wurde die Bildung der Paraffine aus Alkyljodiden und Aluminiumchlorid (Köhnleinsche Reaktion) untersucht, wurden physikalische Konstanten verflüssigter Kohlenwasserstoffe ermittelt sowie Regelmäßigkeiten bei der Einwirkung von Halogenwasserstoffen auf zusammengesetzte Äther gefunden.

In diesem Zusammenhang verdient seine bekannte Darstellungsmethode von Jodwasserstoff aus Jod, rotem Phosphor und Wasser Erwähnung.

Weitere Arbeiten beschäftigten sich mit Nitrierungsreaktionen von Phenyl- und Benzylverbindungen. Die Nitrierung des Benzols untersuchte Meyer vor allem auf den Einfluss der Konzentrationen und der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeit und Ausbeute hin.

Eingehend wurde der Austausch der Halogene zwischen organischen und anorganischen Verbindungen erforscht, wobei sich als allgemeine Regel ergab, dass die Alkali-, Erdalkali- und Erdmetalle das Chlor bevorzugen. Die Schwermetalle dagegen Jod.

Damit im Zusammenhang stand die Darstellung und Untersuchung metallorganischer Verbindungen wie Cadmiumdimethyl, Magnesiumdimethyl, -diäthyl und -diphenyl.

Die zuletzt genannten Arbeiten zeigen, dass es vor allem die wissenschaftlichen Tagesfragen waren, mit denen sich Lothar Meyer beschäftigte. So hat er auch in die damals hochaktuelle Diskussion um die Konstitution des Benzols eingegriffen.

Er schlug 1865 als erster die sogenannte zentrische Benzolformel vor, bei der die überschüssigen Bindungen der in einem Sechseck angeordneten Kohlenstoffatome nach dem Zentrum hin gerichtet sein sollten.

Sie wurde später in ähnlicher Form auch von Adolf Claus (1840-1900), Henry E. Armstrong (1848- 1899) und A. v. Baeyer vertreten.

Vorträge und Abhandlungen, wie "Die Chemie in ihrer Anwendung auf Forstwirtschaft" (1867), "Über die neuere Entwicklung der chemischen Atomlehre" (1885), "Die Grundlagen der Thermochemie" (1883), "Die bisherige Entwicklung der Affinitätslehre" (1887), zeugen weiterhin von seinem wissenschaftlichen Allgemeininteresse.

Daneben äußerte sich Lothar Meyer auch zu allgemeinen Tagesfragen, hauptsächlich in Bezug auf das Schul- und Hochschulwesen. In Darstellungen wie "Die Zukunft der deutschen Hochschulen und ihrer Vorbildungsanstalten" (1873), "Akademie oder Universität?" (1874), "Über akademische Lernfreiheit" (1879), "Mathematik und Naturwissenschaften in der Einheitsschule" (1887), "Die Reform der höheren Schulen" (1890) u. a. trat er für eine gründliche geistige Vorbereitung der Abiturienten auf einheitlicher Grundlage ein, "... so dass die Schüler zur Ergreifung jeglichen Studienzweiges befähigt werden, ohne die übliche Spaltung in eine humanistische und realistische Richtung."

Mit diesen Forderungen zählte Meyer zu den fortschrittlichen Wissenschaftlern seiner Zeit, die eine Vereinheitlichung des Bildungswesens forderten, und zwar unter Beibehaltung der positiven Elemente der bisherigen Bildungswege unter Einbeziehung progressiver pädagogischer Ideen.

Wir verehren in Lothar Meyer heute nicht nur den Mitschöpfer des hundertjährigen Periodensystems, sondern auch einen Wegbereiter der physikalischen Chemie. Sein Name stand in der Berufungsliste für den ersten deutschen Lehrstuhl für physikalische Chemie an hervorragender Stelle. Auf seine Ablehnung hin wurde schließlich Ostwald berufen, der dann in Leipzig das bis dahin bedeutendste Zentrum der Physikochemie in der ganzen Welt schuf.

Wir verehren in Lothar Meyer aber auch den mit außerordentlichen pädagogischen Gaben ausgestatteten Hochschullehrer, den humanistischen Wissenschaftler und den von seinen Kollegen, Freunden und Angehörigen geschätzten liebenswürdigen Menschen.

Dmitri I. Mendelejew

Nachdem Mendelejew seine grundlegenden Arbeiten zum Periodensystem veröffentlicht hatte, überließ er die Kleinarbeit, die dessen weitere Ausgestaltung erforderte, bereitwillig anderen Wissenschaftlern. Er beschränkte sich darauf, gelegentlich zu besonders aktuellen Problemen in diesem Zusammenhang Stellung zu nehmen.

Dabei hatte er zunächst sicher die Absicht, sein System so weit wie möglich zu vervollständigen, denn er suchte selbst nach den von ihm vorhergesagten Elementen.

Bereits 1870 unternahm er eigens eine Reise nach England und Frankreich, um Mineralien einzukaufen, in denen er Ekabor, -aluminium bzw. -silicium vermutete.

Bei dieser Gelegenheit traf er auf der Durchreise mit Bunsen zusammen, der nie ein Hehl daraus gemacht hatte, dass ihm Meyers und besonders Mendelejews noch viel kühnere Schlussfolgerungen aus dem Periodensystem missfielen.

Dessen ungeachtet hat er sich gründlich mit ihnen auseinandergesetzt und z.B. die Änderungen der Atomgewichte für Indium, Lanthan und Cer experimentell bestätigt. Möglicherweise verargte es Bunsen seinem ehemaligen "Schüler" Mendelejew auch, dass er ihn nie in seinem Labor gesehen hatte, jedenfalls fiel die Begrüßung äußerst kühl aus. Von anderen deutschen Fachkollegen, unter anderen Albert Ladenburg (1842-1911), wurde Mendelejew jedoch sehr herzlich empfangen.

Zurückgekehrt, gab er die Suche nach den Eka-Elementen bald auf, da insbesondere sein Laboratorium nur geringen Ansprüchen genügte.

"Unser Laboratorium muss auf eine Menge .. Anschaffungen und Untersuchungen verzichten, durch welche die ausländischen Laboratorien nicht beengt sind", klagte er in jener Zeit.

"Wir dürfen gar nicht wagen, an die Anschaffung solcher kostbarer Apparate zu denken, wie z. B. eines großen Spektroskops oder einer Normalwaage ... Wir haben weder eine vollständige Kollektion von Naturprodukten, noch auch die Mittel für Arbeiten mit seltenen Stoffen, da hierzu Hunderte von Rubeln erforderlich sind, unser Laboratorium aber am Jahresschluss - ein ständiges Defizit von Tausenden hat."

Nicht zuletzt auf Grund dieser Verhältnisse unter dem Zarismus wandte sich Mendelejew einem neuen Forschungsgegenstand zu, der Elastizität der Gase. Ihre Untersuchung erschien ihm in mancherlei Hinsicht lohnend.

Regnault hatte nämlich gefunden, dass das Boyle-Mariottesche (Gesetz streng nur für ideale Gase gilt, ohne jedoch zunächst allgemeine Aussagen über Größe und Richtung der Abweichungen zu machen.

Mendelejew erkannte nun, dass die "... Zusammendrückbarkeit der Gase, die anfänglich mehr oder weniger nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte verläuft, bei einem gewissen Druck sich verringern wird; demnach müssen alle beständigen Gase bei einem gewissen starken Drucke sich weniger zusammendrücken lassen, als dem Mariotteschen Gesetze

entspricht."

Da er auch die technische Bedeutung solcher Arbeiten, besonders in Bezug auf hochkomprimierte Gase, erkannte, fand er finanzielle Unterstützung, hauptsächlich von Seiten der Russischen Technischen Gesellschaft.

1872 begann Mendelejew gemeinsam mit zahlreichen Mitarbeitern diese Untersuchungen, die ihn beinahe zehn Jahre lang beschäftigten. In rascher Folge erschienen Einzelabhandlungen, die gemeinsam mit dem ersten Band des zusammenfassenden Generalberichtes "Über die Elastizität der Gase" (1875) die erreichten Fortschritte dokumentierten.

Sie bestanden zunächst in einer Festigung der theoretischen Grundlagen über die Kompressibilität der Gase, in einer neuen Gasgleichung, die die Gesetze von Boyle-Mariotte, Gay-Lussac und Avogadro einschloss sowie in zahlreichen apparativen und methodischen Verbesserungen. Eine in weiten Bereichen gültige allgemeine Gasgleichung für reale Gase konnte erst 1880 Johannes Diderik van der Waals (1837-1923) aufstellen.

Mendelejews Fortsetzung der Arbeiten mit noch exakteren Hilfsmitteln verfolgte den Zweck, seine qualitativen Erkenntnisse quantitativ zu fassen und damit möglicherweise auch die Grenzen der Gasausdehnung zu erkennen. Diesem Problem maß Mendelejew große erkenntnistheoretische Bedeutung bei:

"Wenn wir für die Ausdehnung der einfachen Gase eine Grenze annehmen, so werden wir in ihr die Grenzform der Materie erblicken."

Mit der experimentellen Ermittlung dieser Grenze der Gasverdünnung könnte man seiner Meinung nach einen Begriff "... von der Natur des Äthers erhalten ..., des Lichtäthers, der von allen anerkannt, aber noch von niemand begriffen wird."

Die Frage nach der Existenz und der Natur des physikalischen Äthers hat die Wissenschaftler seit alters her bewegt. Besonders aktuell wurde sie mit dem Ausbau der Wellentheorie des Lichtes im 17. und 18. Jahrhundert.

Die Existenz des Lichtäthers als materieller Träger elektromagnetischer Wellen schien mit James Clark Maxwells (1831-1879) Lichttheorie völlig gesichert zu sein; Versuche, ihn experimentell nachzuweisen, scheiterten jedoch immer wieder.

Dieses Problem, das erst von A. Einstein im Rahmen seiner Speziellen Relativitätstheorie auf Grund der Experimente von Albert A. Michelson (1852-1931) und Edward W. Morley (1838-1923) im negativen Sinne geklärt wurde, war eines der brennendsten in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, und wie viele andere Wissenschaftler beschäftigte sich auch Mendelejew mit ihm.

1902 und 1905 unternahm er den "Versuch einer chemischen Erfassung des Äthers", indem er ihn als Element x ("Newtonium") mit einem Atomgewicht von $9,6 \cdot 10^{-7}$ bis $5,3 \cdot 10^{-11}$ in die nullte Reihe der Edelgasgruppe einreichte.

Ein weiteres Element dieser Gruppe nahm er zwischen dem Newtonium und Helium in dem fiktiven "Coronium" an, auf dessen Vorkommen in der Sonnenkorona man spektroskopisch schloss. Dieses und andere Elemente, die man ebenfalls auf Grund unbekannter

Spektrallinien annahm, wie "Nebulium" (in den kosmischen Gasnebeln), "Geocoronium" (im Nordlicht) sowie "Asterium" und "Archonium", zeigten nicht nur damalige Grenzen des Periodensystems (man vermutete, dass alle diese fiktiven Elemente vor dem Helium einzuordnen seien), sondern auch der Spektroskopie.

In den zwanziger Jahren konnten diese unbekannten Spektrallinien dann bestimmten Ionisationsstufen des Sauerstoffs und Stickstoffs zugeordnet werden.

Die Mendelejewischen Gasuntersuchungen, die also nicht zuletzt auch der weiteren Erforschung des Periodensystems dienten, wurden u. a. fortgesetzt mit einer Überprüfung der Gültigkeit des Gay-Lussacschen Gesetzes und mit einer Erforschung der höheren Schichten der Erdatmosphäre.

Dazu wurde die Anschaffung und Ausrüstung eines laboratoriumseigenen Luftballons in Aussicht gestellt.

Der Russisch-Türkische Krieg 1877/78 unterbrach jedoch diese Vorbereitungen. Dazu kam, dass gleichzeitig auch die Experimente im Labor durch ungenügende finanzielle Unterstützung und den Weggang bzw. Tod von Mitarbeitern an einem toten Punkt angelangt waren, so dass Mendelejew diese Arbeiten, deren Umfang ihm mehr und mehr über den Kopf zu wachsen drohte, 1881 aufgab.

Mit seiner Abhandlung "Über die Ausdehnung der Flüssigkeiten" (1884) wandte er sich wieder früheren Untersuchungen zu, wobei seine besondere Aufmerksamkeit dem Wasser galt.

In diesem Zusammenhang kam er auf das Problem der Löslichkeit und der Lösungen zurück, das ihn ebenfalls schon vorher beschäftigt hatte.

Sein zusammenfassendes Werk "Untersuchungen wässriger Lösungen nach dem spezifischen Gewicht" brachte neben einer Fülle experimenteller Daten auch Ansätze zu einer Theorie der Lösungen. Danach beruht die Auflösung "... auf der Fähigkeit des Lösungsmittels, mit dem gelösten Stoff ein dissoziierendes System zu bilden".

Mendelejew war weiterhin der Meinung:

"In der Lösung sind assoziiert die Partikeln des Lösungsmittels und seiner unbeständigen dissoziierten Verbindung mit dem gelösten Stoff, ..." und "Die Lösungen sind chemische Verbindungen, welche durch die zwischen dem Lösungsmittel und gelösten Stoff wirkenden Kräfte bestimmt werden."

Im Rahmen dieser Untersuchungen gelangte er auch zu seiner Hydrattheorie. Bei der graphischen Darstellung der Änderung des spezifischen Gewichtes mit dem Prozentgehalt des gelösten Stoffes erhielt er diskontinuierlich Kurven, deren Unstetigkeiten er auf chemische Verbindungen zwischen Lösungsmittel und gelöstem Stoff zurückführte.

Während diese Ansichten in Russland und Großbritannien viele Anhänger fand, stieß sie insbesondere bei den deutschen Chemikern auf Ablehnung. Die gleichzeitig aufgestellten Theorien von Jacobus Henricus van't Hoff (1852-1911) über Osmose und von Svante August Arrhenius (1859-1927) über elektrolytische Dissoziation schienen Mendelejews Ideen völlig zu widersprechen. Spätere Untersuchungen vor allem von P. Walden, Richard Abegg (1869-1910) und Alfred Werner (1866-1919) haben jedoch die

Mendelejewschen Anschauungen, teilweise modifiziert, wieder aufleben lassen.

Neben seinen chemischen und physikalischen Forschungen hat sich Mendelejew stets bemüht, Wege zu weisen für den wirtschaftlichen Aufschwung seines Vaterlandes.

Russland gehörte auch in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts zu den ökonomisch rückständigsten Ländern Europas. Reste der feudalen Gesellschaftsordnung, besonders die Leibeigenschaft, behinderten das Entwicklungstempo der kapitalistischen Produktionsweise entscheidend.

Erst mit den Verwaltungsreformen Alexanders II. wurden, obwohl sie im Grunde die Interessen des Adels verteidigen sollten, bessere Möglichkeiten für die kapitalistische Entwicklung geschaffen.

Der nach 1861 einsetzende wirtschaftliche Aufschwung führte dann auch zu einer relativ starken Verdichtung des Verkehrsnetzes und zum Ausbau wichtiger Industriezentren, ohne dass diese Fortschritte jedoch mit denen in westeuropäischen Ländern verglichen werden konnten. In der Landwirtschaft kam die Rückständigkeit nach wie vor besonders krass zum Ausdruck, Die Einführung billigen amerikanischen Getreides in Verbindung mit immer wiederkehrenden Missernten führten zu ständigen Agrarkrisen und zu einer immer stärkeren Verelendung der Landbevölkerung.

Diesen Missständen entgegenzutreten war ein Hauptanliegen Mendelejews. Sowohl durch Schriften als auch durch die Bewirtschaftung von Versuchsfeldern auf seinem Landgut bemühte er sich, auf eine Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion hinzuarbeiten. Der Aufschwung der russischen Erdölindustrie in den achtziger und neunziger Jahren war größtenteils auf seine jahrzehntelangen Bemühungen um diesen Zweig der chemischen Industrie zurückzuführen.

1867 lernte er auf der Pariser Weltausstellung die Prinzipien der amerikanischen Erdölgewinnung kennen, die er in seiner Abhandlung "Über die gegenwärtige Entwicklung einiger chemischer Industrien in Anwendung auf Russland" (1867) auswertete. Darin forderte er u. a. die sofortige Aufhebung der Verpachtung der kaukasischen Erdölgebiete, woraufhin die zuständigen Regierungsstellen tatsächlich entsprechende Maßnahmen einleiteten.

Anlässlich der Weltausstellung 1876 in Philadelphia besuchte er die Erdölfelder Pennsylvanien und unmittelbar nach seiner Rückkehr die des Kaukasus. In einem umfangreichen Werk "Die Naphtaindustrie im nordamerikanischen Staat Pennsylvanien und im Kaukasus" (1877) verglich er die Fundorte und Gewinnungsmethoden und kam dabei ebenfalls zu Schlussfolgerungen für die einheimischen Verhältnisse.

1880 besuchte Mendelejew Baku, um sich an Ort und Stelle von den durch ihn angeregten Verbesserungen und dem erzielten Fortschritt zu überzeugen. Gleichzeitig führte er eine Reihe chemisch-physikalischer Untersuchungen des Erdöls durch, die seine Landsleute F. Beilstein und Wladimir Wassilewitsch Markownikow (1838-1904) zu ihren bedeutenden Forschungen anregten.

Als Ergebnis seiner technischen Untersuchungen gelangte er auch zu seiner Hypothese von der mineralischen Entstehung des Erdöls.

Angesichts der Fortschritte dieses Industriezweiges wandte sich Mendelejew einer weiteren Rohstoffquelle seiner Heimat zu, der Steinkohle. 1888 reiste er ins Donezgebiet, um dort die Lagerstätten und die Gewinnung zu erforschen, Auch hier regte er Maßnahmen zur Förderung an.

1889 wurde er zur Mitarbeit an einem Schutzzolltarif herangezogen, der dann 1891 erlassen wurde und die Förderung älterer und die Gründung neuer Industriezweige begünstigen sollte. So wirkte Mendelejew auch auf diesem Gebiet mit aller Energie der industriellen Rückständigkeit Russlands entgegen.

Auch als Siebzigjähriger erklärte er sich noch bereit, im Auftrag der Regierung die Eisenerzvorkommen des Ural zu inspizieren, um die Ursachen für die Rückständigkeit ihres Abbaus und Mittel zur Förderung festzustellen. Sein Werk "Die Uraler Eisenindustrie im Jahre 1899", das als Ergebnis seiner vierteljährigen beschwerlichen Reise entstand, zählt zu seinen umfangreichsten Arbeiten.

Wie L. Meyer hat auch Mendelejew progressive Gedanken zur Veränderung der Mittel- und Hochschulausbildung geäußert. Dabei sah er in dem Petersburger Pädagogischen Institut, in dem er selbst ausgebildet worden war, das Ideal einer Ausbildungsstätte. Darüber hinaus war er ein Verfechter der Frauenbildung und hat auch selbst zahlreiche Vorträge und Seminare in Kursen und Bildungseinrichtungen für Frauen abgehalten.

In seinen letzten Lebensjahren wurden seine Interessengebiete immer umfangreicher und allgemeiner. Ausdruck dafür war vor allem sein letztes Werk "Zur Kenntnis Russlands" (1906), in dem er eine hervorragende Übersicht gab über Bevölkerungszahl und -verteilung, Nationalitäten, Religionen, Schulbildung, Handel und Gewerbe, Industrie, Landwirtschaft, Produktion und Konsumtion, Import und Export von Waren und Kapital sowie über geographische Fakten. Ein Ergänzungsband dazu blieb unvollendet.

Mendelejews Dienstzeit, durch Gesetz auf dreißig Jahre begrenzt, war 1885 abgelau- fen. Mit ministerieller Genehmigung und bei reduziertem Honorar gelang es jedoch der Universität, ihn für weitere fünf Jahre zu verpflichten. In diesem Zeitraum wurde ihm jedoch mehr und mehr deutlich, dass es an der Zeit sei, seinen Platz jüngeren Kollegen freizumachen.

Die zeitraubenden Lehrveranstaltungen und Prüfungen wurden ihm immer lästiger, auch für die Experimentaluntersuchungen erlahmte sein Interesse allmählich.

Dazu kam, dass zwar seine Ideen in Zusammenhang mit dem Periodensystem bestätigt und allgemein anerkannt worden waren, jedoch seine Hauptarbeiten auf dem Gebiete der organischen und physikalischen Chemie durch die umwälzenden Erkenntnisse von van't Hoff, Joseph Achille Le Bel (1847-1930), Johannes Wislicenus (1835-1902) sowie von Arrhenius und Ostwald teilweise überholt bzw. auf ein totes Gleis geraten waren.

Der äußere Anlass für sein Ausscheiden aus dem akademischen Lehrbetrieb waren Studentenunruhen im Frühjahr 1890. Da Mendelejews Versuch, zwischen der Studentenschaft und dem Ministerium zu vermitteln, fehlschlug, reichte er sein Abschiedsgesuch ein.

Er wandte sich nun mit ganzer Kraft praktischen Fragen zu, von denen die bereits

genannten einen breiten Raum einnahmen. Daneben arbeitete er im Auftrage des russischen Heeres an der Herstellung eines rauchlosen Pulvers, 1892 wurde er als Konservator für Maße und Gewichte berufen und ein Jahr später zum Präsidenten des Reichsamtes für Maße und Gewichte ernannt.

1906 wurde er von der Öffentlichkeit als der berufenste Mann für den Posten des Ministers für Volksbildung angesehen. Zu einer Verhandlung darüber kam es jedoch nicht mehr, da Mendelejew seine Kräfte mehr und mehr schwinden sah, Seine "Autobiographischen Notizen" vom August 1906 enden:

"Ich begann meine Bücher und Papiere in Ordnung zu bringen - dies beschäftigt mich sehr - vor dem Tode, obgleich ich mich rüstig fühle ... Im Herbst habe ich die "Chemie" (d.h. die letzte Auflage der "Grundlagen") beendet, begann die vierte Auflage "Zur Kunde Russlands" und fuhr nach Cannes (2. Oktober 1906), weil ich von der Influenza sehr geschwächt bin. Die Geldfragen habe ich geordnet, wie vor dem Tode."

Als er sich im Januar 1907 eine Lungenentzündung zuzog, vermehrten sich seine Schmerzen so sehr, dass er wünschte: "Ich bin des Lebens überdrüssig, ich möchte sterben."

Zwei Tage darauf, am 20. Januar 1907, erlosch sein Leben nach einem Herzschlag,

Das Staatsbegräbnis, das man dem hervorragenden Gelehrten zuteil werden ließ, schilderte sein Lehrstuhlnachfolger und Biograph P. Walden mit folgenden Worten:

"Am 25. Januar a. St. fand - in Begleitung einer vieltausendköpfigen Volksmenge - die Überführung der Leiche von dem Trauerhause (aus der Hauptpalate der Maße und Gewichte) in die Institutskirche des Technologischen Institutes statt; hier hatte einst der junge hoffnungsfreudige Mendelejew als Professor gewirkt, hier kniete jetzt das Volk an seiner Bahre.

Nachdem der Bischof unter Assistenz von sechs Priestern das Totenamt zelebriert hatte, nachdem die ergreifenden Weisen des Archangelskischen Sängerkhores verklungen waren, setzte sich barhäuptig der gigantische Trauerzug in Bewegung zum Wolkowo-Friedhof, - voran zwei Studenten, die eine Tafel des periodischen Systems trugen, ihnen schlossen sich die unübersehbaren Scharen der Zöglinge aller Hoch- und Mittelschulen der Residenz an, die auf ihren Händen den metallenen Sarg hinaustrugen ...

Mit tiefer Erschütterung lauschte die Menge den letzten Abschiedsgrüßen, welche die Universitäten beider Residenzen, die russischen Chemiker, die Petersburger Stadtverwaltung und die Hauptpalate dem Andenken des Toten widmeten ..."

Mendelejews Bedeutung erschöpft sich nicht in seinen chemischen Leistungen, die weltweite Anerkennung fanden; auch auf physikalischem Gebiet hat er Hervorragendes geleistet, allein bei der Konstruktion von Präzisionsmessinstrumenten.

Für die wirtschaftliche Entwicklung seines Vaterlandes hat er im "Glauben an die hohe Mission der Industrie als Kultur- und Machtfaktor" bedeutende Leistungen vollbracht. Er ist deshalb auch mit Auszeichnungen und Ehrungen überhäuft worden.

Mendelejew wurde 1876 zum Staatsrat, 1891 zum Geheimrat ernannt; er war Eh-

renmitglied fast aller russischen Hochschulen und Universitäten, Dr. h. c. zahlreicher ausländischer Universitäten sowie Mitglied der bedeutendsten Akademien der Welt - mit Ausnahme der seiner Heimat.

1880 wählte man an seiner Stelle Beilstein, wobei Bunsens und Kopps Urteil möglicherweise von Einfluss war. Später lehnte er es dann ab, erneut zu kandidieren. Die Russische Physikalisch-Chemische Gesellschaft, die er 1868 mitbegründet hatte, ernannte ihn 1880 zu ihrem Ehrenmitglied und später zum Ehrenpräsidenten.

Nicht nur durch seine Lehrbücher, sondern auch durch seine Vorlesungen wurde er zu einem Lehrer und Erzieher der jungen russischen Wissenschaftler. Er war ein ebenso begeisterter wie erfolgreicher Lehrer, aber obwohl er Scharen von Schülern unterrichtete und man ihn als wahren "Hohepriester der Wissenschaft" bezeichnete, hat er keine eigene wissenschaftliche Schule begründet.

Aus seinen zwei Ehen (1864, 1881) entsprossen drei Töchter und zwei Söhne, denen er ein liebevoller und hilfsbereiter Vater war. Sein Sohn Iwan D. Mendelejew hat nach seinem Tode die "Ergänzungen zur Kenntnis Russlands" vervollständigt und herausgegeben.

Die Sowjetische Akademie der Wissenschaften veröffentlichte 1936 bis 1951 Mendelejews Sämtliche Werke in 25 Bänden und ehrte den großen russischen Wissenschaftler durch die Stiftung des Mendelejew-Preises für hervorragende Leistungen auf dem Gebiete der Physik und Chemie.

Die größte Anerkennung stellte zweifellos die Benennung des 1955 künstlich hergestellten Elementes 101 nach D. I. Mendelejew dar. Das Mendelevium (Md) und das Periodensystem der Elemente sorgen dafür, dass sein Name in den Annalen der Wissenschaft für immer verewigt ist.

Die Bedeutung Mendelejews für Russland geht weit über seine Beiträge zur Entwicklung der Chemie und der Physik hinaus.

Zeitlebens hat er auf den wirtschaftlichen Aufstieg seines Vaterlandes hingearbeitet; dabei ist es ihm gelungen, entscheidend zur Entwicklung der Produktivkräfte beizutragen - sowohl durch seine wissenschaftlichen Leistungen als auch durch sein Bemühen um den gesellschaftlichen Fortschritt.

2.5 Die weitere Vervollständigung des Periodensystems zu Lebzeiten Meyers und Mendelejews

Bei der Aufstellung des Periodensystems waren von den seltenen Erdmetallen nur Cer und Terbium bekannt sowie das Didym, das sich später als Elementgemisch erweisen sollte.

Die Einordnung dieser Elemente war äußerst schwierig. Während L. Meyer sie zunächst noch nicht berücksichtigte, reihte sie Mendelejew bei der heutigen dritten Gruppe ein, wobei er sich der Fragwürdigkeit dieser Entscheidung durchaus bewusst war (siehe Tabelle 5).

War die Problematik an sich schon unbefriedigend gelöst, so sollte sich die Situation bald noch mehr verschärfen, denn ab etwa 1880 nahm die Analyse der seltenen Erden durch die Anwendung der Spektralanalyse einen neuen Aufschwung, wobei zahlreiche weitere Elemente entdeckt wurden.

Ausgangspunkt war die Tatsache, dass sich die von Mosander entdeckten Elemente Erbium und Didym bei der spektralanalytischen Prüfung als uneinheitlich erwiesen. Aus der Erbinerde trennte Jean Charles Marignac (1817-1894) das Ytterbium und ein Jahr später Nilson das Scandium ab. Von dem restlichen "Erbium" stellte Per Theodor Cleve (1840-1905) fest, dass es sich aus drei Bestandteilen zusammensetzt: dem Holmium, dem Thulium und dem (Neo)-Erbium.

Im Didym entdeckte 1879 Lecoq de Boisbaudran das Samarium und 1880 Marignac das Gadolinium. Das Didym selbst wurde 1885 von Carl Auer v. Welsbach (1858-1929) als Gemisch zweier Elemente, des Neodyms und des Praseodyms, erkannt. Mit der Auffindung des Dysprosiums im Holmium durch Lecoq de Boisbaudran wurden diese Entdeckungen vorläufig abgeschlossen.

Für alle diese Elemente schien im Periodensystem kein Platz zu sein. B. Brauner, ein langjähriger Mitarbeiter Mendelejews, befasste sich damals besonders intensiv mit diesem Problem.

Der Versuch, sie in weiteren acht- und zehngliedrigen Perioden unterzubringen, scheiterte. Bei der genaueren Erforschung der Eigenschaften der seltenen Erden überraschte vor allem ihre weitgehende Ähnlichkeit, die schon ihre Erkennung und Isolierung erschwerte hatte.

Brauner ging deshalb von der grundsätzlichen Überlegung aus, dass alle Elemente nur verschiedene Formen einer einzigen Urmaterie sind und sich durch variable Differenzierungsgrade unterscheiden. Diese kamen in den verschiedenen Reihen des Periodensystems sowieso mehr oder weniger stark zum Ausdruck. Die seltenen Erdmetalle stellten nun offensichtlich eine Elementgruppe mit noch geringerer Differenzierung, also großer Verwandtschaft untereinander, dar.

Brauner kam daraufhin zu dem Schluss, dass "... die Elemente der seltenen Erdmetalle eine besondere interperiodische Gruppe bilden, die in bestimmtem Maße der achten Gruppe analog wäre. Diese Sondergruppe würde dann mitten unter den übrigen Gruppen des periodischen Systems untergebracht werden." [40].

Inzwischen hatte 1892 Lecoq de Boisbaudran ein weiteres Element dieser Familie entdeckt, das Europium, dessen Name auf den Anteil von Forschern mehrerer europäischer Länder bei der Erforschung der seltenen Erden hinweist. Damit waren nun zwölf derartige Elemente bekannt, deren Eigenschaften Brauner eingehend studierte.

Auf Grund dessen stellte er fest, dass sie in die sechste Periode hinter dem Lanthan einzuordnen sind. Er gab darüber hinaus die richtige Reihenfolge der seltenen Erden an, wobei er besonders darauf hinwies, dass noch zwei fehlen:

das Element 61 zwischen Neodym und Samarium und das Element 71 nach dem Ytterbium.

Während das letztere tatsächlich schon bald gefunden wurde, und zwar gleichzeitig von Georges Urbain (1872-1934) und Auer v. Welsbach (Lutetium bzw. Cassiopeium), gelang es erst 1945, das Element 61 auf künstlichem Wege herzustellen.

Die Natur der 14 Elemente der seltenen Erden umriss Brauner 1902 folgendermaßen:

"Genau wie im Sonnensystem eine ganze Gruppe von Asteroiden eine ganze Zone anstelle einer elliptischen Bahn einnimmt, wo man nach der Analogie nur einen einzigen Planeten vermutete, so könnte auch eine ganze Gruppe von Elementen der seltenen Erdmetalle nur eine Stelle im System einnehmen ... Mit Rücksicht darauf, dass viele Chemiker zur Meinung neigen, dass alle unsere Elemente aus einer primordialen Materie zusammengesetzt sind, könnte man sich vorstellen, dass bei der Herausbildung der ... seltenen Erdmetalle die Kondensation der primordialen Materie nicht so weit gegangen ist, oder allgemein gesprochen, dass sie auf anderen Wegen erfolgte, als dies bei der Herausbildung der übrigen Elemente der Fall war."

Mit seiner Annahme einer gemeinsamen Urmaterie der Elemente neigte sich Brauner den Ansichten L. Meyers zu und forderte Mendelejews Opposition heraus. Dieser vertrat nach wie vor die Meinung, dass die Individualität und Einzigartigkeit der Elemente den Grundstein der Chemie bilde. Dessen ungeachtet schätzte er die Leistung Brauners, durch dessen Arbeiten das Periodensystem von einer neuen Seite her bestätigt wurde, hoch ein, ebenso die Physikalisch-Chemische Gesellschaft der Sowjetunion, die Brauner 1931 zu ihrem Ehrenmitglied ernannte.

Einen weiteren Triumph des periodischen Systems erlebte Mendelejew in der Entdeckung der Edelgase, obwohl deren Existenz dem Gesetz zunächst ebenfalls zu widersprechen schien.

1894 fand Lord Rayleigh (John William Strutt, 1842-1919) bei ausgedehnten Gasdichtebestimmungen, dass aus Verbindungen dargestellter, sogenannter chemischer Stickstoff stets eine geringere Dichte besitzt (1,2505 g/l) als aus der Luft gewonnener (1,2521 g/l).

Während er selbst dazu neigte, die größere Dichte einer ozonartigen Modifikation des Stickstoffs zuzuschreiben, vertrat William Ramsay (1852-1916) die Meinung, die Ursache sei die Anwesenheit eines noch unbekannten schweren Gases.

Der in Glasgow geborene Physikochemiker, der in Deutschland bei Bunsen und Fittig studiert hatte und Lehrstuhlprofessor zunächst in Bristol, dann in London war, hatte sich bisher mit der Untersuchung der Molekularzustände flüssiger und gasförmiger Stoffe beschäftigt. Das kam ihm zustatten, als er nun gemeinsam mit Rayleigh das Phänomen des atmosphärischen Stickstoffs genauer untersuchte, womit seine fruchtbarste Forschungsperiode ihren Anfang nahm.

Lord Rayleigh erinnerte sich dabei der klassischen Luftanalyse Cavendishs, der bereits Ende des 18. Jahrhunderts festgestellt hatte, dass bei der Verbrennung von Stickstoff mit überschüssigem Sauerstoff mittels eines elektrischen Funkens ein Gasrest von 1/120 des Stickstoffvolumens zurückblieb, der nicht mit Sauerstoff reagierte.

Dieser Befund war rätselhaft, blieb aber über ein Jahrhundert hinweg unbeachtet. Bei

der Wiederholung dieses Versuches untersuchte Rayleigh den Gasrest spektroskopisch und fand Spektrallinien, die keinem bekannten Element angehörten. Gleichzeitig hatte auch Ramsay bei der Umsetzung von Luft mit Magnesium ein schweres Restgas mit unbekanntem charakteristischem Spektrum erhalten.

Daraufhin konnten beide Wissenschaftler auf der Tagung der britischen Naturforscher die Entdeckung eines neuen Bestandteils der Atmosphäre bekanntgeben, eines einatomigen Gases, das sie wegen seiner Reaktionsträgheit Argon nannten.

Die Tatsache, dass ausgerechnet eine so verbreitete und häufig untersuchte Substanz wie die Luft ein neues Element enthalten sollte, erregte viel Aufsehen und ist nicht unwidersprochen geblieben.

Dazu kam, dass für das neue Element scheinbar kein Platz im Periodensystem vorhanden war; auf Grund seines Atomgewichtes 39,9 hätte man es zwischen das Kalium (39,1) und das Calcium (40,1) einschieben müssen, womit die strenge Regelmäßigkeit des Periodensystems durchbrochen worden wäre. Gerade dieser Widerspruch war es jedoch, der Ramsay zu der Vermutung führte, dass noch weitere derartige Edelgase existieren müssten.

Schon bald wurde Ramsay auf eine Entdeckung seines amerikanischen Kollegen William Francis Hillebrand (1853-1925) aufmerksam gemacht, der bei der Auflösung eines Uranminerals in Säure das Auftreten größerer Gasmengen festgestellt hatte.

Ramsay untersuchte dieses Gas ebenfalls spektroskopisch und fand dabei eine sehr charakteristische gelbe Linie, die den Spektroskopikern wohlbekannt war.

Die Astronomen Jules Pierre Janssen (1824-1907) und Joseph Norman Lockyer (1836-1920) hatten nämlich 1868 anlässlich einer Sonnenfinsternis diese Linie im Protuberanzenspektrum der Sonne gefunden und daraufhin die Existenz eines auf der Erde unbekannten Elementes in der Sonnenatmosphäre angenommen.

Das nach seinem Vorkommen Helium genannte Gas fand Ramsay nun 27 Jahre darauf auf der Erde und stellte fest, dass es wie das Argon einatomig und chemisch inaktiv ist. Damit war er einen bedeutenden Schritt bei der Bestätigung seiner Idee vorangekommen. Er war nun davon überzeugt, dass es noch weitere derartige Gase gibt.

"Nach dem Vorbild unseres Meisters Mendelejew beschrieb ich, soweit es möglich war, die zu erwartenden Eigenschaften", führte Ramsay 1897 auf einer Tagung der British Association aus. Besonders wies er auf ein noch unentdecktes Gas mit dem Atomgewicht 20 hin.

Bereits ein Jahr später gelang es Ramsay gemeinsam mit seinem Assistenten Morris W. Travers (1872-1961), mit Hilfe der neuartigen Lindeschen Ammoniak-Kältemaschine (1895 Carl von Linde, 1842-1934) größere Mengen flüssiges Argon herzustellen. Bei dessen Destillation erhielten beide Forscher Fraktionen mit neuen, unbekannten Spektrallinien, die zwei neuen Edelgasen, Krypton und Neon, zugeordnet wurden.

Noch im gleichen Jahr fanden sie in der Kryptonfraktion, ebenfalls spektralanalytisch, das Xenon.

Ramsay hatte damit in beispielloser Weise innerhalb weniger Jahre eine ganze Element-

familie entdeckt und damit eine wesentliche Lücke des Periodensystems geschlossen; eine Lücke allerdings, von der dessen Schöpfer Mendelejew und Meyer nicht das geringste geahnt hatten.

Die Atomgewichte dieser Gruppe und ihre Reaktionsträgheit veranlassten Ramsay, sie zwischen die Halogene und die Alkalimetalle als achte oder nullte Gruppe einzuordnen. 1904 erhielt er den vierten Nobelpreis für Chemie "für die Entdeckung gasförmiger indifferenten Elemente in der Luft und die Bestimmung ihres Platzes im Periodensystem".

Im Jahre 1907, in dem Mendelejew starb, waren 85 der in der Natur vorkommenden 88 chemischen Elemente bekannt und richtig in das Periodensystem eingeordnet. Die Tatsache, dass sich selbst ganze Elementfamilien bzw. -untergruppen schließlich widerspruchsfrei in das System eingliedern ließen, zeigt deutlich die geniale Konzeption Mendelejews und Lothar Meyers.

Sie ist gleichzeitig ein Erfolg der Dialektik, der sich beide so erfolgreich zu bedienen wussten.

3 Die Entwicklung des Periodensystems bis in unsere Tage

Beim weiteren Ausbau des Periodensystems kann man im wesentlichen drei Etappen unterscheiden. Die erste, die beide Schöpfer fast vollständig miterleben konnten, hatte durch die Entdeckung zahlreicher Elemente, insbesondere der seltenen Erdmetalle und der Edelgase, eine glänzende Bestätigung der Mendelejewschen Voraussagen gebracht und dazu geführt, dass das System bis auf wenige Lücken vollständig vorlag.

In der zweiten Etappe wurden schrittweise die Ursachen für die periodische Anordnung der Elemente erkannt. Sie begann mit der Entdeckung und Erforschung der Radioaktivität sowie Erkenntnissen der Röntgenspektroskopie und erreichte mit der Aufstellung des Pauli-Prinzips, das den Aufbau des Periodensystems quantentheoretisch erklärte, ihren Höhepunkt.

In dieser Epoche wurden die Vermutungen über den Zusammenhang der Elementanordnung und des Feinbaus der Atome, die insbesondere Lothar Meyer explizit ausgesprochen hatte, zur Gewissheit.

In der dritten Periode schließlich gingen die Wissenschaftler über das natürliche System hinaus, indem es nicht nur gelang, die letzten Lücken durch eine künstliche Herstellung dieser in der Natur nicht vorkommenden Elemente zu schließen, sondern auch mit Hilfe moderner kernphysikalischer Methoden eine Vielzahl von Elementen mit höherer Kernladungszahl als das Uran, sogenannte Transurane, zu synthetisieren.

Um die Jahrhundertwende war das Periodensystem in der wissenschaftlichen Welt als Regel allgemein anerkannt. Gegen seinen Gesetzescharakter sprachen noch einige Ausnahmen von der Anordnung nach steigenden Atomgewichten (Ar-39,94 vor K-39,10, Co-58,93 vor Ni-58,71 und Te-127,60 vor J-126,90).

Als sich dann Johann Robert Rydberg (1854-1919) berechtigt glaubte, diese "kleinen Schönheitsfehler" durch die Einführung empirischer Ordnungszahlen der Elemente zu beseitigen, war der Widerstand gering, und tatsächlich sollte sich schon bald herausstellen, dass sich hinter diesen Zahlen eine physikalische Realität verbirgt, die viel zum Verständnis für das Periodensystem beitragen sollte.

Zunächst hatte das Periodensystem jedoch eine ernste Bewährungsprobe zu bestehen. Die Entdeckung und erste Erforschung der qualitativ neuartigen Erscheinungen der Radioaktivität hatten zu einer "Krise" der Naturwissenschaften geführt, die sich darin äußerte, dass wohlfundierte Grundanschauungen wie der Energieerhaltungssatz oder die Atomtheorie in Frage gestellt wurden.

Die Entdeckung der radioaktiven Umwandelbarkeit der Elemente schien die Gültigkeit des Periodensystems zu erschüttern.

Mendelejew, der diese Entwicklung zum Teil noch miterlebte, war nicht bereit, eine Elementumwandlung auch nur hypothetisch anzunehmen. Dazu kam, dass man bei der Erforschung der radioaktiven Zerfallsreihen auf radioaktive Elemente wie Radiothor, Mesothor, Uran X, Thorium X, Ionium u. a. stieß, für die im System kein Platz vor-

handen war.

Mit fortschreitenden Erkenntnissen auf dem Gebiete des radioaktiven Zerfalls lösten sich viele der Widersprüche gleichsam von selbst.

Zunächst machte sich eine schärfere Fassung des Atomgewichtsbegriffes notwendig, als Frederick Soddy (1877- 1956) feststellte, dass Uran, Thorium und Actinium beim Zerfall zwar jeweils das gleiche Endprodukt Blei ergeben, dass aber das Atomgewicht von Uranblei 206, von Thoriumblei 208 und von Actiniumblei 207 ist, während natürlichem Blei 207,2 zukommt.

Solche Elemente nannte er Isotope; sie haben verschiedene Atomgewichte, aber die gleichen chemischen Eigenschaften und dieselben Kernladungszahlen; sie stehen demzufolge auf dem gleichen Platz im Periodensystem.

Soddys Begriff der Isotopie erwies sich als sehr fruchtbar. Er machte es zunächst möglich, die zahlreichen Radioelemente in das Periodensystem einzuordnen, z. B. erwiesen sich Radiothor und Mesothor als Isotope des Radiums bzw. Thoriums.

Als sich bald darauf herausstellte, dass nicht nur die radioaktiven, sondern fast alle Elemente Gemische von Isotopen sind, hatte ein weiteres Problem, nämlich die Abweichungen der Atomgewichte von der Ganzzahligkeit, seine Erklärung gefunden.

Etwa gleichzeitig erfuhr das Periodensystem von seiten der neuentstandenen Röntgenspektroskopie die bis dahin wertvollste Bestätigung. Die genaue Erforschung der Röntgenspektrallinien führte Henry Gwyn Jeffreys Moseley (1887-1915) zur Entdeckung eines gesetzmäßigen Zusammenhanges zwischen der Frequenz analoger Linien und den von Rydberg empirisch eingeführten Ordnungszahlen.

Unabhängig vom chemischen Charakter und vom Bindungszustand der Elemente wächst die Frequenz mit dem Quadrat der um eine Konstante verminderten Ordnungszahl (Kernladungszahl) (Moseleysches Gesetz; Abb. 6).

Gruppen Nummer	0	Ib	IIb	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa
6.Periode		Au 197,0	Hg 200,6	Tl 204,4	Pb 207,2	Bi 209,0	Po 210,0	85	Rn 222,0
				AcD 207	ThD ₂ 208	RaE 210	RaF 210	RaB' 218	AcEm 219
				ThD 208	RaD 210	AcC 211	ThC ₂ 212	ThB' 216	ThEm 229
				RaC ₂ 210	AcB 211	ThC ₁ 212	RaC' 214	AcB' 215	RaEm 222
					ThB 212	RaC ₁ 214	AcA 215		
					RaB 214		ThA 216		
							RaA 218		

Tabelle 9
Die Einordnung der radioaktiven Elemente in das Periodensystem

Gruppen	0	Ia	IIa	IIIb	IVb	Vb	VIb		
7. Periode	Rn 222,0	87	Ra 226,1	Ac 227,0	Th 232,0	91	U 238,0		
	AcEm 219	AcK 223	AcX 223	MsThII 228	RaAc 227	UX ₂ 234	UII 234		
	ThEm 220	RaX 223	ThX 224		RaTh 228	UZ 234			
	RaEm 222		MsThI 228		Io 230 UX 234				

Aus Moseleys Untersuchungen ging nicht nur die Realität der Ordnungszahlen hervor und damit die Berechtigung der bereits von Mendelejew und Meyer vorgenommenen Elementumstellungen, sondern auch, dass vom Wasserstoff bis zum damals schwersten bekannten Element, Uran, nur 92 Elemente existieren können, von denen sieben noch unbekannt waren. Gleichzeitig wurde mit der Moseleyschen Kurve die Einordnung der seltenen Erdmetalle und der Edelgase erhärtet.

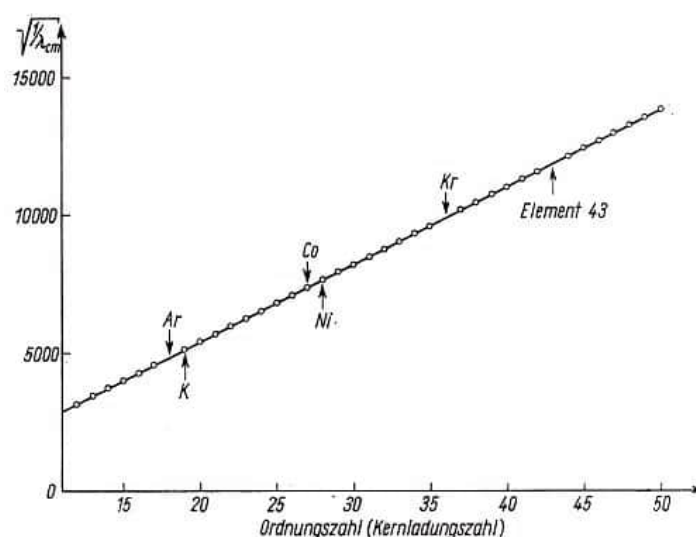


Abb. 6. Graphische Darstellung des Moseleyschen Gesetzes

Insbesondere seit diesen Erkenntnissen wurde das Periodensystem mehr und mehr zu einem der bedeutendsten und umfassendsten Gesetze der Chemie. Zwischen ihm und der Struktur der Atome musste, wie schon Meyer vorausgesehen hatte, ein enger Zusammenhang bestehen. Diese Vermutungen bestätigten sich in dem Maße, wie sich die Vorstellungen über den Atombau immer mehr präzisierten.

Aufbauend auf dem Planetenmodell, das Ernest Rutherford (1871-1937) für das Atom vorgeschlagen hatte, sowie auf der Quantentheorie Max Plancks (1858-1947), gelangte der dänische Physiker Niels Henrik David Bohr (1885-1962) zum ersten stabilen Atommodell.

Danach befinden sich soviel positive Elementarbausteine, sogenannte Protonen, in einem Atomkern vereinigt, wie seine Ordnungszahl (Kernladungszahl) angibt. Um diesen

Kern kreisen auf diskreten Energieniveaus (Bahnen oder Schalen) ebenso viele negativ geladene Elektronen.

Für die chemischen Eigenschaften der Elemente sind nach dem Bohrschen Modell vor allem die Elektronen der äußeren Schale verantwortlich. Die periodische Wiederkehr der Elementeneigenschaften, wie sie das Periodensystem widerspiegelt, ist darauf zurückzuführen, dass sich eine analoge Anordnung der Elektronen in den nächsthöheren Bahnen wiederholt.

Diesen Überlegungen versuchte man auch durch neue Darstellungen des Periodensystems Rechnung zu tragen. Dabei ist vor allem ein Entwurf von Joseph John Thomson (1856-1940) zu erwähnen, den Bohr 1923 vervollkommnete. Dieses System, das die Erkenntnisse des Atombaus berücksichtigte (Tabelle 10), brachte augenfällig nicht nur die Beziehungen der Haupt- bzw. Nebengruppenelemente untereinander zum Ausdruck, sondern auch die häufig zu beobachtenden Ähnlichkeiten einiger Haupt- zu Nebengruppenelementen (Mg - Zn; W - U usw.).

H	Li	Na	K	Rb	Cs	(Fr)
He	Be	Mg	Ca	Sr	Ba	Ra
	B	Al	Sc	Y	La	Ac
	C	Si	Ti	Zr	Ce	Th
	N	P	V	Nb	Pr	Pa
	O	S	Cr	Mo	Nd	U
	F	Cl	Mn	(Tc)	(Pm)	(Np)
	Ne	Ar	Fe	Ru	Sm	(Pu)
			Co	Rh	Eu	(Am)
			Ni	Pd	Gd	(Cm)
			Cu	Ag	Tb	(Bk)
			Zn	Cd	Dy	(Cf)
			Ga	In	Ho	(Es)
			Ge	Sn	Er	(Fm)
			As	Sb	Tm	(Md)
			Se	Te	Yb	(No)
			Br	J	Lu	(Lw)
			Kr	Xe	Hf	(Ku)
					Ta	
					W	
					Re	
					Os	
					Ir	
					Pt	
					Au	
					Hg	
					Tl	
					Pb	
					Bi	
					Po	
					(At)	
					Rn	

Tabelle 10. Periodensystem nach J.J. Thomson und N. Bohr

Bohr hatte die Bahnen, auf denen sich die Elektronen um den Kern bewegen, mit Hilfe der sogenannten Quantenzahlen (heute "Hauptquantenzahlen") beschrieben. Mit der Annahme elliptischer Elektronenbahnen durch Arnold Sommerfeld (1868-1951) machte sich die Einführung der Nebenquantenzahlen erforderlich.

Schließlich schrieben Samuel Abraham Goudsmit (1902 geb.) und George Eugene Uhlenbeck (1900 geb.), um Feinstrukturen gewisser Spektrallinien deuten zu können, dem Elektron zwei weitere Quantenzahlen zu, die sein magnetisches Moment und seine Eigenrotation, den Spin, charakterisieren.

Aus diesen neuen Quantenzuständen erwuchsen für das Verständnis des Atombaus und des Periodensystems wertvolle Erkenntnisse. 1925 kam Wolfgang Pauli (1900-1958) auf

Grund analytischer Untersuchungen der Spektrallinien vieler Elemente zu dem Schluss, dass sich die Elektronen eines Atoms in mindestens einer Quantenzahl unterscheiden müssen.

Mit diesem Ausschließungsprinzip wurde nun auch klar, warum die einzelnen Perioden des Elementensystems gerade 2, 8, 18 bzw. 32 (allgemein: $2 \cdot n^2$) Elemente enthalten. Ihre Länge ist abhängig von den Besetzungszahlen der Elektronenschalen, die ihrerseits eine Funktion der vier Quantenzahlen darstellen.

Mit dem Pauli-Prinzip wurde über 50 Jahre nach seiner empirischen Aufstellung durch Mendelejew und Meyer ein vorläufiger Schlussstrich unter die Entwicklung der Kenntnisse über das Periodensystem gezogen. Indem die Ursachen der Periodizität auf Quantenphänomene zurückgeführt werden konnten, wuchs das Verständnis für das System mehr und mehr, es wurde zu einem der bedeutendsten Eckpfeiler der Chemie und der Physik.

Das bedeutete jedoch nicht, dass damit das System endgültig vollendet gewesen wäre. Ein offenes Problem betraf z.B. die Reihenfolge des Einbaus der Elektronen in die verschiedenen Energieniveaus, die scheinbar nicht regelmäßig erfolgt; es ist heute nach der Erarbeitung detaillierter Energiediagramme für die Elektronenzustände weitgehend gelöst.

Ein anderes Problem war in der Tatsache zu sehen, dass noch immer vier Elemente im natürlichen System fehlten; alle Versuche, sie aufzufinden, waren bis dahin gescheitert.

Mit der Entwicklung der Kernphysik, insbesondere neuen Kenntnissen über die künstliche Elementumwandlung, die Rutherford 1919 entdeckt hatte, versuchte man auch, diese fehlenden Elemente durch Kernumwandlung zu synthetisieren.

1937 gelang es Emilio Gino Segre (1905 geb.) und Carlo Perrier (1886 geb.), beim Beschuss von Molybdän mit Deuteriumkernen das Element 43, das Technetium, künstlich herzustellen. Drei Jahre später konnte Segre gemeinsam mit seinen Mitarbeitern Dale Raymond Corson (1914 geb.) und Kenneth R. MacKenzie (1912 geb.) auch das Astat (Element 85) durch Beschuss von Wismut mit zyklotronbeschleunigten Heliumkernen synthetisieren.

Inzwischen hatte die Französin Marguerite Perey (1909 geb.) bereits das Element 87, Francium, als Abzweigprodukt der Actiniumzerfallsreihe gefunden.

Die Isolierung des letzten noch fehlenden Elementes 61, Promethium, gelang erst 1945; es wurde unter den Kernspaltprodukten des Urans in der Fraktion der seltenen Erden aufgefunden (Jacob A. Marinsky, 1918 geb., Lawrence Elgin Glendenin, 1918 geb., und Charles Dubois Coryell, 1912 geb.).

Als 1934 Enrico Fermi (1901-1954) die kurz zuvor entdeckten Neutronen als Geschossteilchen einsetzte, fand er einen neuen Kernumwandlungsprozess, in dessen Verlauf Elemente entstanden, die teilweise eine höhere Kernladungszahl besaßen als das Ausgangselement.

Damit lag sofort der Gedanke nahe, durch Neutronenbeschuss von Uran Elemente mit höherer Ordnungszahl als dieses, sogenannte Transurane, zu synthetisieren.

Neben Fermi beschäftigten sich unter anderen auch Otto Hahn (1879-1968) und Fritz Straßmann (1902 geb.) mit diesem Problem. Als man bald darauf glaubte, solche schweren Elemente gefunden zu haben, konnten Hahn und Straßmann nach langwierigen Untersuchungen zeigen, dass es unter den gegebenen Bedingungen nicht zur Bildung von Transuranen kommen kann, sondern ein allen damaligen kernphysikalischen Erkenntnissen widersprechendes Ereignis eintritt: die Spaltung des Urankerns in zwei Teile, deren Kernladungszahlen zusammen die des Urans ergeben.

Die Wissenschaft hatte damit nicht nur der kernphysikalischen Forschung neue Wege gewiesen und ihr System vervollkommen, sie stellte damit vielmehr auch unmissverständlich und nachdrücklich unter Beweis, dass sie für die weitere Entwicklung der Gesellschaft immer größere Bedeutung erlangt.

Die riesige Energiemenge, die bei der Urankernspaltung frei wird, legte zwar sofort den Gedanken nahe, diese Reaktion als Energiequelle zum Nutzen der Menschheit anzuwenden, sie ließ aber ebenso deutlich erkennen, dass auf dieser Grundlage ungeheure Vernichtungswaffen möglich sind.

Wissenschaftlich für oder gegen die Interessen der Menschheit zu arbeiten, das wurde nunmehr die Frage, die sich jeder Physiker verstärkt stellen musste. Das humanistische Ethos der Wissenschaft verbietet ihren Missbrauch.

Doch bald zeigte sich, dass das internationale Finanzkapital in seinem Profit- und Machtstreben nicht davor zurückschreckte, Vernichtungswaffen auf der Basis der Kernspaltung gegen die Menschheit anzuwenden.

Vor allem in den USA wurden der Kernphysik im folgenden riesige Forschungsmittel für die Arbeiten an der Atombombe zur Verfügung gestellt. In diesem Rahmen konnte auch das Problem der Transurane intensiv weiterverfolgt werden, denn trotz der Hahn'schen Erkenntnis war man sich darüber einig, dass es prinzipiell möglich sein müsse, Transurane durch Neutronenbeschuss von Uran zu erhalten.

Tatsächlich gelang es Edwin M. McMillan (1907 geb.) 1940. mit hoher Neutronenaktivität ein neues radioaktives Element zu erhalten, das er gemeinsam mit Philip Hauge Abelson (1913 geb.) als Transuran mit der Kernladungszahl 93 identifizieren konnte und Neptunium nannte.

Bald darauf konnte McMillan mit Glenn Theodore Seaborg (1912 geb.), Joseph William Kennedy (1917 geb.), Arthur Charles Wahl (1917 geb.) und Segre auf analoge Weise das Plutonium (94) darstellen.

Die Feststellung, dass Plutonium ebenfalls spaltbar und damit zur Herstellung von Bomben geeignet ist, aktivierte die militärische Forschung weiter und zeigte auch die umfassende Bedeutung der Transuransynthesen in dieser Hinsicht.

1944 begann Seaborg gemeinsam mit Albert Ghiorso (1915 geb.). Ralph Arthur James (1920 geb.) und Leon Owen Morgan (1919 geb.) die Synthese der Elemente 95 und 96, die durch α -Bestrahlung von Plutonium gelang. Die Isolierung dieser beiden Elemente gestaltete sich jedoch schwieriger als erwartet; sie misslang, solange die Abtrennung analog dem Uran versucht wurde.

Erst als sich Seaborg zu der Ansicht durchrang, dass die Transurane sowie Thorium,

Protactinium und Uran im Periodensystem eine Elementgruppe ähnlich den seltenen Erden bilden, und auf dieser Grundlage an die chemische Aufarbeitung heranging, gelang es, das Curium (96) und das Americium (95) abzutrennen.

Aus ihnen wiederum konnten 1949 Seaborg, Ghiorso und Stanley Gerald Thompson (1912 geb.) auf gleichem Wege das Berkelium (97) und das Californium (98) herstellen.

Die im Periodensystem folgenden Elemente 99 und 100 wurden zuerst 1952 in radioaktiver Asche im Pazifik festgestellt, unmittelbar nach dem ersten Wasserstoffbomben-Abwurf. Die Isolierung gelang Seaborg, Ghiorso, Thompson und anderen durch Aufarbeitung großer Mengen von Korallen aus dem Explosionsgebiet; 1954 konnten diese Elemente, Einsteinium und Fermium, auch im Zyklotron durch starke Neutronenbestrahlung von Plutonium erzeugt werden.

Bereits ein Jahr später veröffentlichte die gleiche Forschergruppe die Mitteilung, dass aus Einsteinium durch α -Bestrahlung einige Atome des Elementes 101 hergestellt werden konnten; dieses Element erhielt zu Ehren des Schöpfers des Periodensystems, dessen Methode der Elementvorhersage man sich auch bei der Darstellung der Transurane bedient hatte, den Namen Mendelevium.

Die Herstellung des Elementes mit der Ordnungszahl 102 (Nobelium) wurde 1957 in Stockholm von einer internationalen Forschergruppe bekanntgegeben. 1961 wurde in den USA durch Ghiorso und seine Mitarbeiter das Lawrencium (103) nachgewiesen.

Damit waren alle 14 Elemente der sogenannten Actinidenreihe bekannt, und das nächstschwerere Element 104 beanspruchte als erstes Transactinidenelement das ganz besondere Interesse der Wissenschaftler.

Seine Synthese gelang im Vereinigten Kernforschungsinstitut Dubna einem Forscherteam unter Leitung von Georgi Nikolajewitsch Flerow (1913 geb.) durch Beschuss von Plutonium mit Neonkernen. Das nach dem sowjetischen Pionier der Kernphysik Igor Wassilewitsch Kurtschatow (1902-1960) benannte Element erwies sich als Eka-Hafnium.

1967 konnte Flerow mit seinen Mitarbeitern auf analogem Wege einige Atome des Elementes 105 erhalten, für das inzwischen der Name Bohrium vorgeschlagen wurde. Die Suche nach weiteren Transactiniden-Elementen geht in den Kernforschungslaboratorien der ganzen Welt immer weiter, wobei man sich allerdings im klaren darüber ist, dass ihre Identifizierung oder gar Isolierung wegen der zu erwartenden immer geringeren Halbwertszeiten ständig schwieriger wird.

In den letzten Jahren hat die Diskussion um den weiteren Ausbau des Periodensystems jedoch neue Impulse erfahren. Von den zahlreichen Arbeiten über diesen Gegenstand ist besonders eine von Nobelpreisträger Seaborg, der selbst die ersten Transurane mitentdeckte, interessant, in der er Prognosen für "Das Periodensystem der Zukunft" gibt. Zunächst sagt er darin für die Elemente mit den Ordnungszahlen 105 bis 120 durch Vergleich mit ihren Homologen im Periodensystem die chemischen und physikalischen Eigenschaften voraus. Dabei gibt er für die Atomgewichte, Oxydationsstufen, Schmelz- und Siedepunkte, Atomvolumina, Dichten, Kristallstrukturen, Atom- und Ionenradien,

Ionisierungspotentiale usw. teilweise sehr detaillierte tabellierte Werte an.

Außerdem sagt er, teilweise auf Grund von Computerberechnungen für die zu erwartenden Energieniveaus, die voraussichtlichen Elektronenkonfigurationen für die Elemente bis zur Kernladungszahl 132 voraus.

Danach werden die Elemente bis zur Ordnungszahl 120 Hauptgruppenelemente sein, mit dem Eka-Actinium (124) beginnt eine Nebengruppe, die wieder wie die vorhergehenden Perioden eine Untergruppe, beginnend mit Element 122, enthält. Während jedoch die Lanthaniden- und Actinidengruppe jeweils 14 Elemente umfasst, befinden sich in der von Seaborg "Superactiniden" genannten Gruppe 32 Elemente.

Genaugenommen handelt es sich auch hier um eine Vierzehnergruppe, der wiederum eine 18 Elemente umfassende Untergruppe (voraussichtlich Elemente 125 bis 142) eingeschachtelt ist.

Erst die Elemente von 143 bis 153 wären dann wieder echte Eka-Actiniden, dann folgten von Element 154 bis 162 echte Nebengruppenelemente und anschließend bis 168, einem Edelgas, Hauptgruppenelemente.

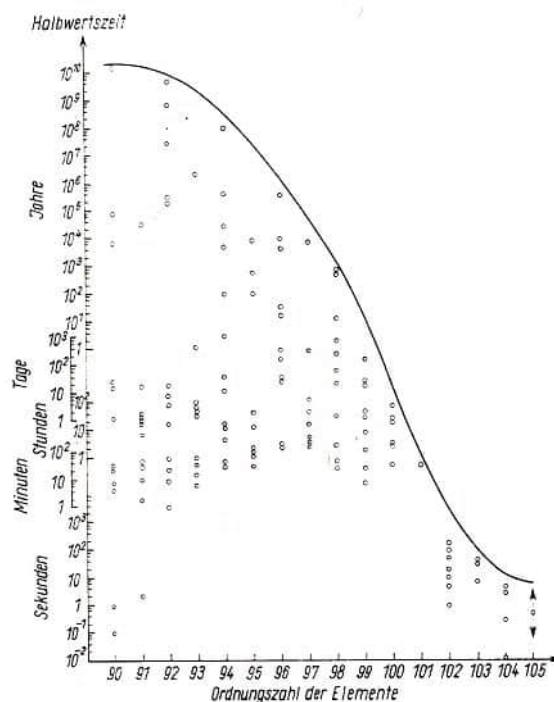


Abb. 7. Halbwertszeiten der Transurane in Abhängigkeit von der Ordnungszahl

Derart ausgedehnte Voraussagen hätten wenig Sinn, wenn keine Hoffnung bestände, wenigstens einige dieser superschweren Elemente eines Tages auch zu synthetisieren. Es gibt heute Anhaltspunkte dafür, dass die Stabilität der Atome keineswegs weiter in dem Maße monoton abnehmen wird wie bei den bisher bekannten Transuranen (Abb. 7).

Zwar werden die abstoßenden Kräfte zwischen den Protonen im Kern immer größer, doch gibt es gewisse magische Zahlen für die Kernbausteine (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, ...), für die die Atomkerne besonders stabil sind.

Diese Zahlen lassen sich aus Modellvorstellungen für den Atomkern, die unter anderem

von Maria Goeppert-Mayer (1906 geb.) und Hans Jensen (1907 geb.) entwickelt wurden, ableiten. Magische Kerne besitzen z. B. Helium (2 Protonen und 2 Neutronen) und Blei (82 Protonen und 126 Neutronen).

Theoretische Überlegungen deuten nun darauf hin, dass auch die Elemente 114 (Eka-Blei) und 164 (Eka-114 bzw. Eka-Eka-Blei) stabile Kerne besitzen.

Seaborg beurteilt die Aussichten, diese und die im Periodensystem benachbarten Elemente synthetisieren zu können, als günstig und unternimmt es schließlich, mögliche Synthesewege vorzuschlagen. Auch darin folgt er dem Vorbild Mendelejews, der sich vor 100 Jahren nicht mit der Voraussage von Elementen begnügte, sondern darüber hinaus ihre Vorkommen und Darstellungsmöglichkeiten anzugeben bemüht war.

Diese neuen Gesichtspunkte der Weiterentwicklung des Periodensystems widersprechen sicher auch nicht der Meinung Mendelejews über den Gesamtcharakter des periodischen Gesetzes.

Insbesondere zur Frage, ob die Zahl der Elemente eine begrenzte oder unbegrenzte sei, hatte er 1871 geschrieben:

"In Erwägung dessen, dasaß das System der bis jetzt bekannten Elemente ein begrenztes und sozusagen geschlossenes ist, dass in Meteorsteinen, auf der Sonne und auf den Sternen dieselben uns bekannten Elemente vorkommen, dass bei hohem Atomgewicht die sauren Eigenschaften allmählich verwischt werden und die meisten Elemente mit hohem Atomgewicht schwer oxydierbare und schwere Metalle vorstellen, ist anzunehmen, dass die Zahl der für uns zugänglichen Elemente eine sehr begrenzte ist ..."

Das gilt heute tatsächlich als einigermaßen sicher. Es lässt sich nämlich eine kritische maximale Kernladungszahl im Bereich zwischen 170 und 210 erwarten, von der an die Bindungsenergien der innersten Elektronen so groß werden, dass sie in den Kern stürzen und damit die Kernladungszahl erniedrigen.

Das Periodensystem der chemischen Elemente ist heute, 100 Jahre nach seiner Aufstellung durch Dmitri I. Mendelejew und Lothar Meyer, zu einem Eckpfeiler der Naturwissenschaften, insbesondere der Chemie und der Kernphysik, geworden.

Während es dem Lernenden Hilfe und Leitfaden beim Eindringen in die genannten Gebiete ist, kann der Fachmann aus ihm nicht nur Informationen über den genetischen Zusammenhang der Elemente und ihre grundlegenden chemischen und physikalischen Eigenschaften ablesen, er kann auch wesentliche Angaben über den Atombau und damit im Zusammenhang stehende quantenchemische Probleme ersehen.

Die Tatsache, dass Mendelejew und Meyer das System empirisch aufbauten, ohne diese Zusammenhänge im einzelnen zu kennen, zeigt das dialektische Denken und den Scharfblick der beiden Wissenschaftler. Seine umfassende Bedeutung für die heutige Wissenschaft rechtfertigt es, wie seine Schöpfer vom Periodensystem als einem Grundgesetz der Chemie zu sprechen.

4 Zeittafel

- 1642 J. Jungius und (1661) R. Boyle vertreten atomistische Ideen und prägen einen neuen Elementbegriff
- 1697 G. E. Stahl entwickelt seine Phlogistontheorie
- 1777 A. L. Lavoisier begründet die Oxydationstheorie
- 1803 J. Dalton stellt das Gesetz der multiplen Proportionen auf und entwickelt in diesem Zusammenhang die Grundlagen der klassischen Atomtheorie
- 1811 A. Avogadro spricht seine Molekularhypothese aus
- 1818ff. J. J. Berzelius führt umfangreiche und genaue Atomgewichtsbestimmungen durch
- 1829 J. W. Döbereiner ordnet die chemischen Elemente nach Triaden
- 1830 Lothar Meyer in Varel/Jade (Oldenburg) geboren (19. 8.)
- 1834 Dmitri I. Mendelejew in Tobolsk (Sibirien) geboren (8. 2.)
- 1834 Mit der Gründung des Deutschen Zollvereins werden die Voraussetzungen zur Entfaltung der industriellen Revolution in Deutschland geschaffen
- 1850 M. Pettenkofer erweitert die Döbereinersche Triadenlehre
- 1850 Mendelejew beginnt sein Studium am Pädagogischen Institut der Petersburger Universität
- 1851 L. Meyer nimmt ein Medizinstudium an der Universität Zürich auf
- 1854 Nach seiner Promotion zum Dr. med. geht Meyer an die Universität Heidelberg zu Bunsen
- 1856 Magisterdissertation Mendelejews "Über spezifische Volumen"
- 1858 Promotion Meyers zum Dr. phil. in Breslau
- 1859 Meyer habilitiert sich zum Privatdozenten für Chemie
- 1859 G. Kirchhoff und R. Bunsen begründen die wissenschaftliche Spektralanalyse
- 1858 bis 1861 A. Kekule, A. Couper und A. Butlerow entwickeln die chemische Strukturtheorie
- 1860 Internationaler Chemikerkongress in Karlsruhe; S. Cannizzaro führt einheitliche Atomgewichte auf der Grundlage der Avogadroschen Molekulartheorie ein
- 1860/61 Studienaufenthalt Mendelejews in Heidelberg
- 1861 Die Verwaltungsreformen Alexanders II. ebnen den Weg für die kapitalistische Entwicklung Russlands und damit für eine raschere industrielle Entwicklung
- 1861 Mendelejews Werk "Organische Chemie" erscheint
- 1862 L. Meyer veröffentlicht sein Buch "Moderne Theorien der Chemie"
- 1864 J. Newlands entwickelt sein Gesetz der Oktaven
- 1865 Nach seiner Doktordissertation erhält Mendelejew eine Professur für technische Chemie an der Petersburger Universität
- 1865 L. Meyer entwickelt seine zentrische Formel und Kekule seine beiden Oszillationsformeln für das Benzol
- 1866 Meyer wird Privatdozent (1867 Professor) an der Forstakademie Neustadt-Eberswalde
- 1867 C. M. Guldberg und P. Waage finden das Massenwirkungsgesetz
- 1867 Mendelejew wird Professor für reine Chemie an der Petersburger Universität
- 1868 L. Meyer entwickelt seine erste unveröffentlichte Tabelle der chemischen Elemente; im gleichen Jahr wird er als Chemieprofessor an das Polytechnikum Karlsruhe berufen
- 1868 Der erste Band der "Grundlagen der Chemie" Mendelejews erscheint; die Russische Physikalisch-Chemische Gesellschaft wird unter maßgeblicher Mitwirkung von Mendelejew gegründet
- 1869 (April) Mendelejew veröffentlicht seine grundlegende Arbeit "Über die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente"

- 1870 Meyers Abhandlung "Die Natur der chemischen Elemente als Funktion ihrer Atomgewichte" erscheint
- 1871 Mendelejew sagt die Existenz und die vermutlichen Eigenschaften einer Reihe noch unentdeckter Elemente voraus
- 1874 J. H. van't Hoff und J. A. Le Bel begründen die Stereochemie
- 1875 P. E. Lecoq de Boisbaudran entdeckt das von Mendelejew vorhergesagte Gallium ("Ekaaluminium")
- 1876 L. Meyer wird an die Universität Tübingen berufen
- 1879 L. F. Nilson findet das Scandium (Mendelejews "Ekabor")
- 1879ff. Entdeckung zahlreicher seltener Erdmetalle
- 1880 Mendelejew stellt die Hypothese von der mineralischen Entstehung des Erdöls auf
- 1882 Mendelejew und Meyer erhalten für ihre Verdienste um das Periodensystem gemeinsam die goldene Davy-Medaille der Royal Society London
- 1884 Mendelejew beginnt seine Untersuchungen der Lösungen, in deren Verlauf er seine Hydrattheorie aufstellt
- 1886 Cl. Winkler entdeckt das Germanium, das Mendelejew als "Eksilicium" beschrieben hatte
- 1887 Meyer und Mendelejew begegnen sich in Manchester auf einer Tagung der British Association
- 1887 van't Hoff stellt die osmotische Lösungstheorie auf; im gleichen Jahr entwickelt S. Arrhenius die Theorie der elektrolytischen Dissoziation
- 1890 L. Meyers "Grundzüge der theoretischen Chemie" erscheinen
- 1890 Emeritierung Mendelejews und Ausscheiden aus dem Lehrbetrieb
- 1892 Mendelejew wird zum Konservator (1893 zum Präsidenten) der Hauptpalate für Maße und Gewichte ernannt
- 1894 L. Meyer wird zum Rektor der Universität Tübingen gewählt
- 1894ff. W. Ramsay entdeckt, teilweise gemeinsam mit Rayleigh bzw. W. M. Travers, die Edelgase und ordnet sie in das Periodensystem ein
- 1895 L. Meyer stirbt am 11. April
- 1895 W. C. Röntgen entdeckt die X-Strahlen
- 1896 H. Becquerel entdeckt die Radioaktivität des Urans
- 1898 Das Ehepaar Curie entdeckt die Elemente Polonium und Radium
- 1900 M. Planck stellt seine Quantentheorie auf
- 1902 B. Brauner gelingt die endgültige Einordnung der seltenen Erden in das Periodensystem
- 1905 A. Einstein veröffentlicht seine Spezielle Relativitätstheorie
- 1907 Mendelejew stirbt am 20. Januar
- 1910 F. Soddy prägt den Begriff "Isotope"
- 1911 E. Rutherford stellt sein Atommodell auf
- 1912 M. v. Laue findet die Interferenz von Röntgenstrahlen an Kristallgittern
- 1913 Atommodell von N. Bohr
- 1913 H. G. J. Moseley findet den Zusammenhang zwischen der Ordnungszahl der Elemente und ihren Röntgenfrequenzen
- 1913 F. Soddy und K. Fajans stellen den radioaktiven Verschiebungssatz auf
- 1915 Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins
- 1916 A. Sommerfeld erweitert das Bohrsche Atommodell durch Einführung elliptischer Elektronenbahnen
- 1916 W. Kossel klärt die Natur der heteropolaren Verbindungen
- 1916 G. N. Lewis: Elektronenvalenz homöopolarer Verbindungen

- 1916 Rutherford gelingt die erste künstliche Elementumwandlung
1919ff. F. W. Aston wendet die Massenspektroskopie zur Isotopenbestimmung an
1923 Bohr stellt ein symmetrisches Periodensystem auf
1925 W. Pauli gelingt die Deutung der periodischen Elementanordnung auf Grund der Elektronenzustände im Atom (Pauli-Prinzip)
1932 J. Chadwick entdeckt das Neutron .
1932 W. Heisenberg und D. Iwanenko: Theorie des Atomkerns
1932 H. C. Urey findet das Deuterium
1934 I. Joliot-Curie und F. Joliot entdecken den ersten Fall künstlicher Radioaktivität
1934 E. Fermi gelingt die künstliche Elementumwandlung durch Neutronenbeschuss
1937 E. O. Lawrence baut das erste Zyklotron
1937 C. Perrier und E. Segre gelingt die künstliche Darstellung des Elementes 43 (Technetium)
1938 O. Hahn und F. Straßmann entdecken die Urankernspaltung
1940 bis 1955 E. McMillan, G. T. Seaborg, A. Ghiorso u. a. stellen Transurane, Elemente mit den Kernladungszahlen 93 bis 101, künstlich dar
1954 Inbetriebnahme des ersten Kernkraftwerkes der Welt in der Sowjetunion
1957 Die Entdeckung des Elementes 102 wird bekanntgegeben
1961 Das Element 103 wird in den USA synthetisiert
1964 G. N. Flerow u. Mitarbeiter stellen in Dubna das Element 104 (Kurtschatovium) her
1967 Flerow und Mitarbeiter veröffentlichen die erste Mitteilung über die Darstellung des Elementes 105
1969 G. T. Seaborg sagt spezielle Eigenschaften der Transactiniden bis zum Element 120 voraus und gibt die Elektronenstrukturen bzw. die Einordnung der Elemente bis zur Ordnungszahl 168 in das Periodensystem an.

5 Schrifttum

1. Die wichtigsten Werke Dmitri I. Mendelejews

- [1] Organische Chemie. Petersburg 1861 (2. Aufl. 1863), 502 Seiten, russisch
[2] Grundlagen der Chemie. 2 Bände, Petersburg 1868/71, 816 und 951 Seiten, russisch (8. Aufl. 1905/06); englische Übersetzung 1891 London, deutsche Übersetzung 1892 Petersburg, französische Übersetzung 1896/99 Paris
[3] Untersuchungen wässriger Lösungen mittels des spezifischen Gewichts, Petersburg 1887, 521 Seiten, russisch
[4] Sämtliche Werke in 25 Bänden, herausgegeben von der Akademie der Wissenschaften der UdSSR. Moskau 1936 bis 1952, russisch

2. Mendelejews grundlegende Veröffentlichungen zum Periodensystem der Elemente

- [5] Zusammenhang zwischen den Eigenschaften und dem Atomgewicht der Elemente. J. russ. physik.-chem. Ges. 1 (1869) S.35, S. 60-77, S.229-230; siehe auch Z. Chem. 5 (1869) S. 405-406, [9], Ber. dtsh. chem. Ges. 2 (1869) S. 553, J. prakt. Chem. 106 (1869) S. 251
[6] Über das natürliche System der Elemente und seine Anwendung zum Ermitteln der Eigenschaften unentdeckter Elemente. J. russ. physik.-chem. Ges. 3 (1871) S. 25-56;

siehe auch Ber. dtsh. chem. Ges. 3 (1870) S. 990-991

[7] Zur Frage über das System der Elemente. Ber. dtsh. chem. Ges. 4 (1871) S. 343-352

[8] Die periodische Gesetzmäßigkeit der chemischen Elemente. Liebigs Ann. Chem. Pharm., Suppl. 8 (1871) S. 133-229; siehe

[9] Das natürliche System der chemischen Elemente. Abhandlungen von Lothar Meyer und D. Mendelejeff, herausgegeben von K. Seubert. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 68, Leipzig 1895

[10] Zur Geschichte des periodischen Gesetzes. Ber. dtsh. chem. Ges. 13 (1880) S. 1796-1804

[11] Periodische Gesetzmäßigkeit chemischer Elemente. Faraday-Lecture, J. russ. physik.-chem. Ges. 21 (1889), S. 233-257; J. chem. Soc. 55 (1889) S. 634-656

3. Die wesentlichsten Werke Lothar Meyers

[12] Die modernen Theorien der Chemie und ihre Bedeutung für die chemische Statik. Breslau 1864, 147 Seiten (5. Aufl. 1884, 626 Seiten)

[13] Grundzüge der theoretischen Chemie. Leipzig 1890

[14] L. M. und K. Seubert: Die Atomgewichte der Elemente aus den Originalzahlen neu berechnet. Leipzig 1883

[15] L.M. (Hrsg.): Die Anfänge des natürlichen Systems der chemischen Elemente. Abhandlungen von J. W. Doebereiner und Max Pettenkofer nebst einer geschichtlichen Übersicht der Weiterentwicklung der Lehre von den Triaden der Elemente, Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 66, Leipzig 1895

[16] L.M. (Hrsg.): Abriss eines Lehrganges der theoretischen Chemie, vorgetragen an der K. Universität Genua von Prof. S. Cannizzaro. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 30, Leipzig 1891

4. Meyers wichtigste Publikationen zum Periodensystem

[17] Die Natur der chemischen Elemente als Funktion ihrer Atomgewichte. Liebigs Ann. Chem. Pharm., Suppl. 7 (1870) S. 354

[18] Zur Systematik der anorganischen Chemie. Ber. dtsh. chem. Ges. 6 (1873) S. 101

[19] Zur Geschichte der periodischen Atomistik, Ebd. 13 (1880) S. 259, S. 2043

[20] L. M. und K. Seubert: Die Einheit der Atomgewichte, Ebd. 22 (1889) S. 872

[21] Über den Vortrag der anorganischen Chemie nach dem natürlichen System der Elemente, Ebd. 26 (1893) S. 1230-1250

5. Biographien über Mendelejew (Auswahl)

[22] B. Brauner: Dmitri Iwanowitsch Mendelejew, Z. Elektrochem. 13 (1907) S. 90-93

[23] P. Walden: Dmitri Iwanowitsch Mendelejeff. Ber. dtsh. chem. Ges. 41 (1908) S. 4719-4800

[24] L. A. Tschugaew: Dmitri I. Mendelejew, Leben und Wirken. Leningrad 1924, russisch

[25] I. A. Mendelejewa: Mendelejews Leben. Moskau 1928, russ.

[26] P. Walden: Lothar Meyer, Mendelejeff, Ramsay und das periodische System der Elemente. In: G. Bugge (Hrsg.): Das Buch der großen Chemiker. Weinheim/Bergstr. 1965 (unveränderter Nachdruck von 1929), 2. Band, S. 241-250

[27] N. A. Figuirowski: D. I. Mendelejew, Leben und Werk. Sammelband, Moskau 1957, russisch

[28] N. A. Figuirowski: Der große russische Gelehrte und Patriot D. I. Mendelejew. Moskau 1959, russisch

[29] G. Fuchs: Dmitri Iwanowitsch Mendelejew. In: K. Heinig (Hrsg.): Biographien bedeutender Chemiker. Berlin 1964, S. 93-99 .

[29 a] A. A. Makarenja und I. N. Filimonova (Hrsg.): D. I. Mendelejew in Erinnerungen von Zeitgenossen. Moskau 1969, russisch

6. Biographien über Lothar Meyer (Auswahl)

[30] K. Seubert: Lothar Meyer. Ber. dtsch. chem. Ges. 28 (1896) S. 1109-1146

[31] Siehe [26], S. 230-241

[32] R. Winderlich: Lothar Meyer und das periodische System. Ein Gedenkblatt zum 100. Geburtstag. Aus d. Heimat, Naturwiss. Monatsschr. Stuttgart 43 (1930) S. 225-234

[33] G. Fuchs: Lothar Meyer, Siehe [29], S. 89-93

7. Literatur zur Geschichte des Periodensystems (Auswahl)

[34] K. Seubert: Zur Geschichte des periodischen Systems. Z. anorg. Chem. 9 (1895) S. 334-338

[35] B. Brauner: Das periodische System der Elemente von Mendelejew. Leipzig 1908

[36] Siehe [26], S. 229-287

[37] E. Rabinowitsch und E. Thilo: Periodisches System, Geschichte und Theorie. Stuttgart 1930

[38] F. Paneth: Die Entwicklung und der heutige Stand unserer Kenntnisse über das natürliche System der Elemente. Naturwissenschaften 18 (1930) S. 964-976

[39] B. M. Kedrow: Der Tag einer großen Entdeckung. Moskau 1958, russisch

[40] J. Celeda: Der Anteil der Chemie an der Entwicklung der Weltanschauung. Reihe Philosophie und Naturwissenschaft H. 3, Leuna-Merseburg 1965

[41] B. M. Kedrow: Die Vorhersage des Ekaasiliziums und die Entdeckung des Germaniums. NTM, Schr.-R. Gesch. Naturwiss. Techn. Medizin 3 (1966) H. 8

[42] H.-D. Hardt: Zur hundertjährigen Geschichte des periodischen Systems der chemischen Elemente. Naturwiss. Rdsch. 19 (1966) S. 313-316

[43] K. Danzer: Das Periodensystem der chemischen Elemente als grundlegendes Strukturgesetz der Chemie. Wiss. Z. Humboldt-Univ. Berlin, Math.-naturwiss. R. 16 (1967) S. 977-978

[44] J. W. van Spronsen: Hundert Jahre Periodensystem der chemischen Elemente, NTM 6 (1969) H. 1

[45] G. T. Seaborg: Das Periodensystem der Zukunft. Chemie in unserer Zeit 3 (1969) S. 131-139

[45 a] H. Cassebaum: Hundert Jahre Periodensystem der Elemente, Z. Chem. 9 (1969) S. 81-87

[46] D. Neubert: Doppelschalenstruktur des Periodensystems der Elemente. Z. Naturforsch. 25a (1970) S. 210-217

[46a] V. I. Goldanskii: Das Periodensystem D. I. Mendelejews und Probleme der Kernchemie. J. chem. Educat. 47 (1970) S. 406- 416, englisch

8. Allgemeine Literatur

[47] W. Ramsay: Die Gase der Atmosphäre und die Geschichte ihrer Entdeckung. Halle/S. 1907

[48] W. Ostwald: Lebenslinien. Eine Selbstbiographie, 3 Bände, Berlin 1926/27

[49] E. Pilgrim: Entdeckung der Elemente. Stuttgart 1950

[50] M. E. Weeks: Discovery of the Elements, Easton, Pa. 1956 (6th Ed.)

[51] W. v. Bonin: Die Nobelpreisträger der Chemie. Ein Kapitel Chemiegeschichte. München 1963

[52] E. Bagge: Die Nobelpreisträger der Physik. Ein Beitrag zur Geschichte der Naturwissenschaften. München 1964

[53] F. Baumgärtner: Geschichte der Entdeckung künstlicher Elemente. Naturwissenschaften 51 (1964) S. 1-8

[54] P. Taube und J. I. Rudenko: Vom Wasserstoff bis zu den Transuranen. Leipzig (1968)

[55] K. Danzer: Historische Einführung. In: C. Weißmantel u.a, (Hrsg.): Kleine Enzyklopädie Atom. Struktur der Materie. Leipzig 1970, S. 1-34

Zu einigen angeführten Fakten finden sich ausführlichere Darstellungen in folgenden Bänden der Reihe "Biographien hervorragender Physiker"

Marie Sklodowska-Curie: Selbstbiographie. Leipzig 1964

W. Beier: Wilhelm Conrad Röntgen. Leipzig 1965

W. Schütz: Michael Faraday. Leipzig 1968

sowie in dem in Vorbereitung befindlichen Band der Reihe "Biographien hervorragender Naturwissenschaftler und Techniker":

K. Danzer: Gustav Kirchhoff - Robert Bunsen