

D. I. Mendelejew: Gedanken zu seinem Tod im Jahr 1907

M. D. Gordin*

Stichwörter:

Geschichte der Wissenschaft · Mendelejew,
Dimitri Iwanowitsch · Periodensystem · Periodizität

1. Einleitung

Am 2. Februar (20. Januar nach dem Julianischen Kalender) 2007 jährte sich der Todestag von Dimitri Iwanowitsch Mendelejew (1834–1907), dem russischen Chemiker, an den man sich vor allem wegen der Formulierung des Periodensystems der chemischen Elemente erinnert. Mendelejews Andenken wird schon dadurch beschädigt, dass er so auf eine Art und Weise reduziert wird, wie er selbst sich durchaus nicht sah. Russe war er, zweifelsfrei, und stolz war er, aber er sah in sich mehr als den Chemiker: einen Menschen, der für mehr verantwortlich zeichnete als das Periodensystem, das er im Alter von 35 Jahren 1869 eher unbeabsichtigt ins Leben rief. Üblicherweise denken wir bei der Erwähnung von Mendelejews Ableben sehr viel häufiger an das Jahr 1869 als an das Jahr 1907. Er wusste natürlich nicht, wann er sterben würde, aber er ahnte ganz sicher, dass es um seine Gesundheit schlecht bestellt war. Mendelejew lebte sein Leben wie wir alle vorwärts und interpretierte seine Vergangenheit aus dem Blickwinkel seiner Gegenwart. Da sich unsere Gegenwart von der seinigen unterscheidet, erinnern wir uns auf andere Weise an ihn, als er es erwartet hätte.

Mendelejew war sich voll bewusst, dass die Erstellung des Periodensystems eine großartige Leistung war. Er hätte allerdings möglicherweise Einwendungen dagegen vorzubringen, dass es als

seine größte Lebensleistung betrachtet wird. In diesem Essay will ich umreißen, wie Mendelejew sein Leben in den wenigen Momenten in seinen letzten Jahren sah, in denen er über seine Sterblichkeit reflektierte. Überraschenderweise treffen wir auf einen Mann, der sich sehr viel mehr um den Zustand des Russischen Reiches und seinen Staatsdienst sorgte als um seinen Beitrag zum Periodensystem, wobei er das letztgenannte für weniger stabil hielt als das erstgenannte. Um diese Umkehrung unserer heutigen Sichtweise zu verstehen – schließlich hängt in nahezu jedem Chemieunterrichtsraum auf der Welt ein Periodensystem, wohingegen das Russische Reich, wie Mendelejew es kannte, in der Oktoberrevolution von 1917 unterging –, müssen wir Mendelejew im Kontext der Chemie und der Lebensumstände im Russland seiner Zeit betrachten.^[1] Mendelejews letzte Jahre waren geprägt von Aufregung und Umwälzungen, was der alternde Wissenschaftler beides nicht sonderlich schätzte.

2. Autobiographien vom Sterbebett

Bei drei Gelegenheiten in seinen letzten Lebensmonaten trachtete Mendelejew danach, sein Leben in den Blickpunkt der Historiker und Biographen zu rücken. Jeder dieser Anläufe gründet – wie jeder Versuch, das Periodensystem zu Zeiten seiner intensivsten Forschungen (1869–1871) zu verbessern – auf dem, was er vorher aufgebaut hatte, und lässt spezifische Merkmale seines Selbstverständnisses erkennen. Sie werden in diesem Essay nicht chronologisch aufgeführt, sondern in der Reihenfolge wachsender Über-

einstimmung mit unserer heutigen Sicht auf Mendelejew. Dies war aber, alles in allem, nicht Mendelejews Perspektive. Er sah seine Karriere zu Recht als eine Reihe von Erfindungen, von Vorräten, die er entworfen hatte, um Ordnung in das Chaos zu bringen und die bröckelnden Systeme um ihn herum zu erhalten. Als er sein Ende nahen fühlte, wandte er sich seiner größten Erfindung zu: seiner eigenen Person.

Die letzte der drei erwähnten Autobiographien war eine kommentierte Chronologie, begann mit dem 2. September 1906 und war, wie er anmerkte, „gänzlich von mir geschrieben – D. I. Mendelejew“.^[2] Nachdem er einigen Freunden und Kollegen gegenüber wiederholt Andeutungen über seinen bevorstehenden Tod gemacht hatte, unterteilte er sein Leben in Zeitabschnitte und zeichnete die wichtigsten Ereignisse in jedem Abschnitt auf. In der Tat enthielt der Eintrag für 1906 folgenden Kommentar: „habe begonnen, Bücher und Papiere in Ordnung zu bringen vor dem Tod – das hält mich in Atem –, obwohl ich mich wohl fühle.“ Diese Methode war weit davon entfernt, wissenschaftlich oder vollständig zu sein, und die Einträge zu seinen letzten fünfzehn Lebensjahren schienen ausführlicher und detaillierter zu sein.

Dieses letzte Schriftstück fördert viele persönliche Eigenarten zutage. Eines der bemerkenswertesten Merkmale seiner biographischen Aufzeichnungen ist die Tatsache, dass Mendelejew viele wichtige Ereignisse unerwähnt lässt, beispielsweise seinen zweijährigen Aufenthalt in Heidelberg im Anschluss an die Promotion, wo er einige seiner engsten (wenngleich zeitlich begrenzten) Kontakte knüpfte, wie etwa mit Emil Erlenmeyer, Aleksander Borodin und I. M. Sechenov. Gleichzeitig hob

[*] Prof. M. D. Gordin
Department of History
Princeton University
129 Dickinson Hall
Princeton, NJ 08544 (USA)
Fax: (+1) 609-258-5326
E-Mail: mgordin@princeton.edu

Mendelejew die Abschnitte hervor, die zu der klischehaften Vorstellung vom Leben eines großen Wissenschaftlers passen: Er betonte seine provinziellen Wurzeln im sibirischen Tobolsk, seine kränkliche Jugend und seine Scharmützel mit etablierten Persönlichkeiten, die sein Genie nicht erkannten. Aus all diesen Duellen – ganz gleich ob gegen Geographie, Natur oder Autorität – ging er natürlich als Sieger hervor. Seine verheerenden Niederlagen, wie die Ablehnung durch die St. Petersburger Akademie der Wissenschaften im November 1880, bleiben unerwähnt. In Übereinstimmung mit dieser Tendenz fehlen die Details seiner wissenschaftlichen Arbeit nahezu gänzlich (die Jahre 1869–1871 werden in elf Worten abgehandelt, das Periodensystem wird nicht erwähnt), aber seine zaristischen Verdienstorden und seine Auslandsreisen werden liebevoll nach Jahren katalogisiert. Der an dieser Stelle erfundene Mendelejew ist jemand, der von seinem Land für seine Triumphe über die Widrigkeiten gelobt wurde, aber weniger als Wissenschaftler denn als Staatsbeamter, der sich der wirtschaftlichen und technologischen Neuordnung des zaristischen Russland verschrieben hatte.

Die Autobiographie, die wohl als erste geschrieben wurde, aber erst als eine der letzten auftauchte, ist ein privater Brief Mendelejews an seinen früheren Gönner, den Finanzminister Sergei Witte, vom August 1903. Nach einer misslungenen Grundstücksspekulation begann Mendelejew darüber nachzudenken, wie er seine Familie, eine Frau und zwei kleine Kinder, im Todesfall absichern würde. Er schrieb diesen Brief an Witte, der bald darauf, im Jahr 1905, der erste Premierminister Russlands wurde, und versiegelte ihn mit der Anweisung, ihn bei seinem Tod abzusenden. Nachdem er länger überlebt hatte als erwartet, sandte Mendelejew den Brief im September 1906 doch ab.^[3] Mit diesem Brief verfolgte Mendelejew ein Ziel: Er hatte ihn geschrieben, um Witte seine Bedeutung für den russischen Staat ins Gedächtnis zu rufen und staatliche Leistungen für seine Familie als posthume Belohnung zu erwirken. Es war ein sehr zweckgerichtetes Dokument. Während die biographischen Aufzeichnungen zukünftige Historiker zu einer positiven Beurteilung seiner

Person als kaiserlicher Staatsbeamter veranlassen sollten, stellte der Brief an Witte den Versuch dar, einen Mann in der Gegenwart zu einer positiven Beurteilung von sich als Protégé zu bewegen.

In dem Brief beschrieb er drei „Dienste“, die er seinem Vaterland und den Naturwissenschaften während seiner 48-jährigen Karriere erwiesen hatte (folglich setzte er den Zeitpunkt auf 1903 fest). Die ersten Früchte seiner Arbeit waren „wissenschaftlicher Ruhm“, den Mendelejew nicht nur mit dem Periodensystem verband, sondern an seiner Mitgliedschaft in über fünfzig ausländischen und inländischen wissenschaftlichen Gesellschaften und Institutionen bemaß. Sein zweiter Dienst bestand darin, Tausende von Studenten in den Grundsätzen der Wissenschaft ausgebildet zu haben. Und schließlich: „Meinen dritten Dienst für das Vaterland kann man am wenigsten sehen, obwohl er mich seit meiner Jugend bis zur Gegenwart in Anspruch genommen hat. Dieser Dienst besteht in der Ausweitung der Vollmachten und Möglichkeiten für das Wachstum der russischen Industrie ...“ Auch hier sah sich Mendelejew am Ende seines Lebens überwiegend im Dienste seines Staates; sogar seine wissenschaftlichen Leistungen wurden von ihm selbst nur in Form von Ruhm anerkannt und nicht als das, was wir als großartige Entdeckungen erachten würden.

Dachte Mendelejew, als er über seinen Tod nachgrübelte, über sich selbst jemals in den gleichen Kategorien wie wir, nämlich dass er in erster Linie der Vordenker des Periodensystems war? Die Antwort lautet ja, sie ist in der privatesten seiner drei Sterbebett-Autobiographien zu finden, in einem Tagebucheintrag, den er am 10. Juli 1905 inmitten der tumultreichen Ereignisse der ersten russischen Revolution verfasste.^[4] Er formulierte seine Einwände gegen einen persönlichen Angriff in den Zeitungen, indem er schrieb, er hoffe, „dass die Ergebnisse meiner lebenslangen Bemühungen Bestand haben werden, natürlich nicht für Jahrhunderte, aber für einen langen Zeitraum und über meinen nahen Tod hinaus. Lediglich zwei Bereiche meines Lebenswerks sehe ich selbst als beständig an: meine Kinder und meine wissenschaftliche Arbeit“. Er

erhoffte sich natürlich eine gute Gesundheit für seine Kinder, war sich aber weniger sicher, was die Beständigkeit seiner wissenschaftlichen Arbeit anging. Diese gliederte sich seiner Ansicht nach in vier Hauptkomponenten: das Periodensystem, die Untersuchungen über die Ausdehnung von Gasen, das Verständnis von Lösungen als (nichtionische) Assoziate und sein Lehrbuch *Grundlagen der Chemie*. Interessanterweise blieb nur das Periodensystem als Grundlage für Mendelejews heutige Reputation bestehen. Trotz seiner in dieser einzigen Quelle zum Ausdruck gebrachten Hoffnung auf eine langandauernde Anerkennung in vielen Bereichen der Chemie und Physik reduzierte sich sein Ansehen auf eine einzige bedeutende Leistung – das Periodensystem.

Mendelejews Hoffnung in Bezug auf sein Andenken, die er in seinen drei Versuchen, die Zukunft zu beeinflussen, in unterschiedlicher Art und Weise zum Ausdruck brachte, wurde nur in Bezug auf das Periodensystem erfüllt. Die kurios anmutenden Anschauungen Mendelejews hinterlassen zwei Fragen: 1) Warum wurde Mendelejews Beitrag zum Periodensystem als sein gesamtes wissenschaftliches Erbe betrachtet? 2) Warum war er persönlich der Ansicht, dass andere Aspekte seines Lebens gleichermaßen bedeutend waren?

3. Bestätigung für Mendelejews Periodensystem

Mendelejew formulierte als Erster zu Beginn des Jahres 1869 ein Periodensystem, mit dessen Hilfe er die 63 bekannten Elemente zur Darstellung in der Erstausgabe seines Lehrbuchs *Grundlagen der Chemie* ordnete.^[5] Der erste Band des Manuskripts enthielt eine ausführliche Abhandlung über Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff sowie die vier Halogene, sodass über 85 % der Elemente für den zweiten Band verblieben. Es wäre ihm schlichtweg unmöglich gewesen, dort die gleiche Detailgenauigkeit sicherzustellen. So kam er auf den Gedanken, einige Elemente in Familien mit ähnlichen Eigenschaften zusammenzufassen, wobei er (zumindest teilweise) einem bereits akzeptierten Modell folgte. Während er

diese Gliederung für das Buch entwickelte, entdeckte er weitere Familien und fand heraus, dass die Abfolge ihrer Atomgewichte eine gewisse Regelmäßigkeit aufwies. Wenn die Elemente nach steigendem Atomgewicht angeordnet wurden, ergaben sich tatsächlich mit einer gewissen Periodizität (den Begriff entlieh er von den periodischen Funktionen aus der Mathematik) ganz selbstverständlich Familien. Den ersten Entwurf seines Systems legte er am 17. Februar 1869 nieder (Abbildung 1).

Es ist unwahrscheinlich, dass Mendelejew die Allgemeingültigkeit dieses Systems verstand, als er es im Februar 1869 entwickelte. Wäre er sich der Bedeutung des Periodensystems bewusst gewesen, hätte er die Erstpräsentation vor der Russischen Chemischen Gesellschaft im März 1869 mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht seinem Freund Nikolai Menschutkin überlassen, während er auswärts Käserei-Kooperativen inspizierte. Im Laufe der nächsten Monate und Jahre entwickelte Mendelejew sein System weiter und ergänzte es um erste Voraussagen in Bezug auf die Existenz neuer Elemente. Dies gipfelte schließlich in seiner Vorstellung des Periodensystems – und der detaillierten Voraussage dreier bislang unbekannter Elemente (Eka-Aluminium, Eka-Silicium und Eka-Bor) –, die 1872 in den *Annales de Chimie et de Physique* beschrieben wurde.^[6]

Die Entdeckung der Eka-Elemente innerhalb von fünfzehn Jahren verhalf dem St. Petersburger Chemiker zu internationalem Ruhm und festigte den

Status des Periodensystems als Naturgesetz. Persönliche wie wissenschaftliche Zielsetzungen waren für den ambitionierten jungen Chemiker klar vorgezeichnet. (Es ist kein Zufall, dass man wegen der erfolgreichen Entdeckung der Elemente dazu neigte, Mendelejew als dem einzigen der fünf unabhängigen Gestalter des Periodensystems, der solch detaillierte Voraussagen machte, das größte oder das gesamte Verdienst an diesem System zuzusprechen – im Unterschied zu Lothar Meyer oder J. A. R. Newlands.)^[7]

Als erstes wurde das Element gefunden, dem Mendelejew in seinen Voraussagen die geringste Aufmerksamkeit geschenkt hatte: Eka-Aluminium wurde 1875 in Frankreich als Gallium von Paul Émile (François) Lecoq de Boisbaudran entdeckt. Zwei Besonderheiten bei der Entdeckung von Gallium machen es unverwechselbar unter den Eka-Elementen. Erstens lenkte die offensichtliche Ähnlichkeit dieses Elementes mit Eka-Aluminium beträchtliche Aufmerksamkeit auf Mendelejews System von 1871. Zweitens war dies der einzige unter den drei Fällen, bei dem Mendelejew die ausländische Literatur durchstöberte, um mögliche Bestätigungen für seine Voraussagen zu finden, und den Zusammenhang selbst herstellte. Bei Eka-Bor und Eka-Silicium griffen Mittelsmänner ein, die aber Mendelejew das gesamte Verdienst zuerkannten.

Seine Zeitgenossen zögerten verständlicherweise, die beiden anderen Voraussagen auf der Grundlage einer

möglicherweise glücklichen Mutmaßung zu akzeptieren. Als 1879 das zweite Eka-Element entdeckt wurde, war Mendelejews Argumentation mehr als doppelt so wichtig; es hatte den Anschein, als würde sein System tatsächlich einige starke Regelmäßigkeiten widerspiegeln. Dieses Element, Scandium (Eka-Bor), war etwas komplizierter, da es den Seltenerdmetallen weit ähnlicher war als die beiden anderen Eka-Elemente; diese Elemente wiesen in Bezug auf Atomgewicht und chemische Eigenschaften sehr große Ähnlichkeiten untereinander auf und waren somit schwer zu unterscheiden. Scandium wurde von dem Schweden L. F. Nilson in mehreren Seltenen Erden entdeckt. In seiner Originalpublikation, in der er das (gleichfalls) patriotisch benannte Element vorstellt, erwähnte Nilson mit keinem Wort die Übereinstimmung mit Mendelejews Eka-Bor; Mendelejew konnte seinerseits nicht schwedisch lesen und somit selbst keinen Zusammenhang herstellen.^[8] Es war Per Cleve, ein Landsmann Nilsons, der dies tat.^[9]

Am 6. Februar 1886 verkündete der deutsche Chemiker Clemens Winkler seine Entdeckung eines neuen nichtmetallischen Elementes in einem Mineral, das er im Sommer 1885 in der Nähe der Bergakademie in Freiberg gefunden hatte und das er, einem kuriösen Muster folgend, nach seinem Geburtsland als Germanium benannte.^[10] (Keiner der drei Chemiker kannte zum Zeitpunkt seiner Entdeckung den Zusammenhang mit Mendelejews Voraussagen her. Winkler war sofort hellau begeistert. In einem aufschlussreichen Kommentar, der Mendelejews persönliche Ansicht bekräftigen sollte, das Periodensystem eigne sich ebenso zu Voraussagen wie ein physikalisches Gesetz, erwog Winkler kurzzeitig, das Element in Neptinium umzubenennen, da es wie der Planet Neptun durch eine auf Interpolation beruhende Voraussage entdeckt worden war. Darauf, wie etwa Newtons Gesetze bestätigt wurden

H = 1	Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112
B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116
C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118
N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122
O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?
F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	J = 127
Li = 7	Na = 23	Rb = 85,4	Cs = 133
	K = 39	Sr = 87,6	Tl = 204.
	Ca = 40	Ba = 137	Pb = 207.
	? = 45	Ce = 92	
	? Er = 56	La = 94	
	? Yt = 60	Di = 95	
	? In = 75,6	Th = 118?	

Abbildung 1. Die erste veröffentlichte Darstellung von Mendelejews Periodensystem vom 17. Februar 1869. Quelle: siehe Lit. [21].

durch die unabhängige Zuschreibung von Störungen im Orbit des Uranus auf einen hypothetischen Neptun, den John Couch Adams aus England (1843) und Urbain-Jean-Joseph Le Verrier aus Frankreich (1846) postuliert hatten, würde Mendelejew später diese physikalische Analogie beziehen, um sein Periodensystem zu verteidigen. (Der Name des Elements, das wir heute als Neptunium kennen, folgt aus einer anderen astronomischen Analogie.)

So begann der Aufstieg des Periodensystems und seine enge Verknüpfung mit Mendelejews Name. Und doch war die Sichtweise, das Periodensystem markiere den Gipfel von Mendelejews Karriere – die letztlich durch den Chemiker selbst gefördert wurde –, eine retrospektive Konstruktion. Mendelejew war 1869 nicht damit beschäftigt, ein neues chemisches Grundgesetz zu schaffen, sondern vielmehr damit, ein Lehrbuch für junge Chemiker an der St. Petersburger Universität zu schreiben. Von 1871 an sollte Mendelejew jedoch selbst die Periodizität hinterfragen und das Periodensystem wiederholt im Sinne wahrer Wissenschaft interpretieren und für sich in Anspruch nehmen, dass er sich von Beginn an über sein Tun im Klaren gewesen sei.

Mendelejew war um 1871 davon überzeugt, dass das Periodensystem ein Naturgesetz war. Doch was bedeutete das? Er befasste sich mit einem offensichtlichen Musterfall: Newtons drei Grundgesetzen der Bewegung, mit deren Hilfe Physiker seit über anderthalb Jahrhunderten die Bewegung der Himmelskörper mit erstaunlicher Genauigkeit beschrieben. Sie ermöglichten es auch, aus Abweichungen in der Umlaufbewegung der bekannten Planeten auf die Existenz weiterer Planeten zu schließen (und diese zu entdecken). Das Newtonsche Vorbild trat im Laufe von Mendelejews Karriere immer mehr in den Vordergrund. Nachdem durch die Entdeckung der Eka-Elemente sein Zutrauen (und das Zutrauen anderer Chemiker) in das Periodensystem gestärkt worden war, erhob Mendelejew es zu einem Fundamentalgesetz und stellte es auf eine Stufe mit den Newtonschen Gesetzen.

Mendelejew artikulierte seine Newtonschen Ambitionen bei zwei Vorträgen in England im Jahr 1889. Im ersten

Vortrag mit dem Titel „*An Attempt to Apply to Chemistry One of Newton's Laws of Natural Philosophy*“ am 31. Mai 1889 vor der Royal Institution versuchte er, einen direkten Zusammenhang zwischen seinem Werk und dem des früheren Präsidenten der Royal Society herzustellen, wobei er die nahezu universell anerkannte Strukturtheorie der Newtonschen Dynamik gegenüberstellte. Er behandelte die gleichen Themen etwas abstrakter in seinem Faraday-Vortrag „*The Periodic Law of Chemical Elements*“, den er am 4. Juni 1889 vor der gleichen Hörerschaft hielt. Bei diesem Vortrag referierte Mendelejew nicht direkt über Newtons Gesetze, sondern über seine eigenen Errungenschaften. Er hob zwei Aspekte der Chemie hervor: den Versuch, gemeinschaftlich einen Rahmen für Fachwissen zu schaffen, und die Notwendigkeit, Gesetze zu befolgen, um Spekulationen zu vermeiden. Er implizierte dabei, dass Newton diese beiden Idealvorstellungen unterstützt hätte. (Newtons Abneigung gegen Gemeinschaftsarbeit schien Mendelejew unbekannt gewesen zu sein.^[11])

In seinen späteren Lebensjahren sah Mendelejew als seinen historischen Vorgänger stets Newton und nicht einen Chemiker wie Antoine Lavoisier (1743–1794). Dabei wäre Lavoisier das nahe liegende Vorbild gewesen – doch Mendelejew bezog sich nur selten auf ihn. Anstatt sich und das Periodensystem auf diese Weise voll und ganz in die chemische Tradition zu stellen, entschied er sich für Newton, dessen Interesse für Optik, Alchemie, Mechanik, Mathematik, Theologie und so fort mit keinem von Mendelejews Kernbereichen überlappte. Warum? Lavoisiers Bedeutung war in der Wissenschaftsgeschichte zwar immer unbestritten, einen beträchtlichen Teil seines Nachruhms hat er aber der Gedenkfeier anlässlich des einhundertsten Jahrestags seiner Hinrichtung durch die Jakobiner zu verdanken. Dagegen galt Newton seit den Tagen von Voltaire als Genie.^[12] Überdies beruhte Newtons Ruhm in starkem Maße darauf, dass er Gesetze aufgestellt hatte, mit denen Voraussagen getroffen werden konnten (Halley'scher Komet, Uranus, Neptun). Lavoisier sagte lediglich die Ergebnisse einzelner Experimente voraus, nicht aber die Struktur des

Universums. Mendelejews internationales Ansehen gründete zum großen Teil auf seiner Voraussage der drei Eka-Elemente, worin sich eine Analogie mit Newton andeutete.

4. Zwei Prüfungen für das Periodensystem

Mendelejew sah also 1890 sein Periodensystem als ein Naturgesetz an, was ihn in die Rolle eines neuen Newton hob. Wenn dies der Fall war, warum rühmte sich Mendelejew bei der Aufzählung seiner Leistungen zu Beginn des 20. Jahrhunderts nicht des Periodensystems als seines bahnbrechenden Erfolges. Es gibt zwei Antworten auf diese Frage. Zum Ersten hatte Mendelejew der St. Petersburger Universität im April 1890 den Rücken gekehrt und verbrachte die folgenden sechzehnthalb Jahre damit, für den russischen Staat an praktischen Projekten zu arbeiten. Seine Erinnerungen an diese Zeit waren sehr viel ausgeprägter als etwa die an seine Leistungen aus den vier Jahrzehnten zuvor. Zum Zweiten hatte Mendelejew mittlerweile das Gefühl, das Periodensystem sei aufgrund der jüngsten Entwicklungen in der Physik verwundbar geworden. Mendelejew hatte nicht den Vorteil einer nachträglichen Betrachtung, den wir heute genießen; er musste sich selbst einschätzen, und er tat dies aus dem Empfinden heraus, dass er im Staatsdienst erfolgreich gewesen war und in der Wissenschaft Niederlagen erlitten hatte. Es sollte uns daher nicht überraschen, dass sich seine und unsere Sichtweise unterscheiden.

Mendelejew unterrichtete seit den 1850er Jahren an der St. Petersburger Universität und war ab 1867 eine tragende Säule der naturwissenschaftlichen Fakultät. Von Beginn seiner akademischen Karriere an war er als Berater für die Ölindustrie und andere Wirtschaftszweige wie Landwirtschaft oder Chemie tätig, seine eigentliche Heimat aber war immer die Universität. Ein Professor im russischen Kaiserreich war in erster Linie ein Staatsbeamter, und Mendelejew stieg nach seiner Ernennung schnell zum technischen Berater des Finanzministeriums auf. Mendelejew verließ die Universität im Jahr

1890, als die Studenten ihre Rechte im Kampf mit dem Minister für Volksaufklärung durchzusetzen versuchten. Zu dieser Zeit hatte er noch genügend Freunde und Kollegen in anderen Ministerien, die seine Talente in Anspruch nahmen. Unmittelbar nach seinem Weggang von der St. Petersburger Universität arbeitete er beinahe drei Jahre lang für die russische Marine an einer Variante des rauchlosen Schießpulvers, Pyrocollodium genannt. Diese Position war von enormer Bedeutung für die Modernisierung des Militärs im späten Zarenreich,^[13] doch Mendelejew gab sie auf, bevor eine endgültige Entscheidung über die Verwendung seines Schießpulvers gefallen war (es kam letztendlich nicht zur Anwendung), um einen noch wichtigeren Posten zu übernehmen.

1893 wurde Mendelejew zum Direktor des Amtes für Maße und Gewichte ernannt. Diese neu geschaffene Institution hatte den Auftrag, die russischen Maße und Gewichte zu vereinheitlichen und die Einführung des metrischen Systems im Russischen Reich in die Wege zu leiten. Unter der Zuständigkeit des Finanzministers Sergei Witte (der Empfänger der zuvor erwähnten autobiographischen Aufzeichnungen) war dies das höchste Amt, das Mendelejew in der russischen Bürokratie bekleiden sollte. Er machte seine Arbeit außerordentlich gut, und er begründete das Standardisierungsgesetz von 1899. Dieses dritte (und letzte) Gesetz dieser Art in der Geschichte des Russischen Reiches sah erstmals die optionale Verwendung des metrischen Systems vor. Darüber hinaus führte er ein Eichungssystem ein, das die Standardisierung von Messungen und damit das Verfolgen von Betrügereien ermöglichte. Er richtete in seinen Amtsräumen auch ein Labor für wissenschaftliche Metrologie ein. Unter der Herrschaft der Sowjets wurde die Metrologie in den von Mendelejew angelegten Bahnen fortgeführt.^[14] Kurz vor seinem Tod hatte Mendelejew einen größeren Einfluss als je zuvor auf Russlands Wissenschaft und Wirtschaft (Abbildung 2). Den überwiegenden Teil seiner autobiographischen Aufzeichnungen vom Herbst 1906 widmete er den Schilderungen seiner jüngsten Unternehmungen in seinen Amtsräumen. Es erscheint daher logisch, dass er dies kurz vor seinem Tod

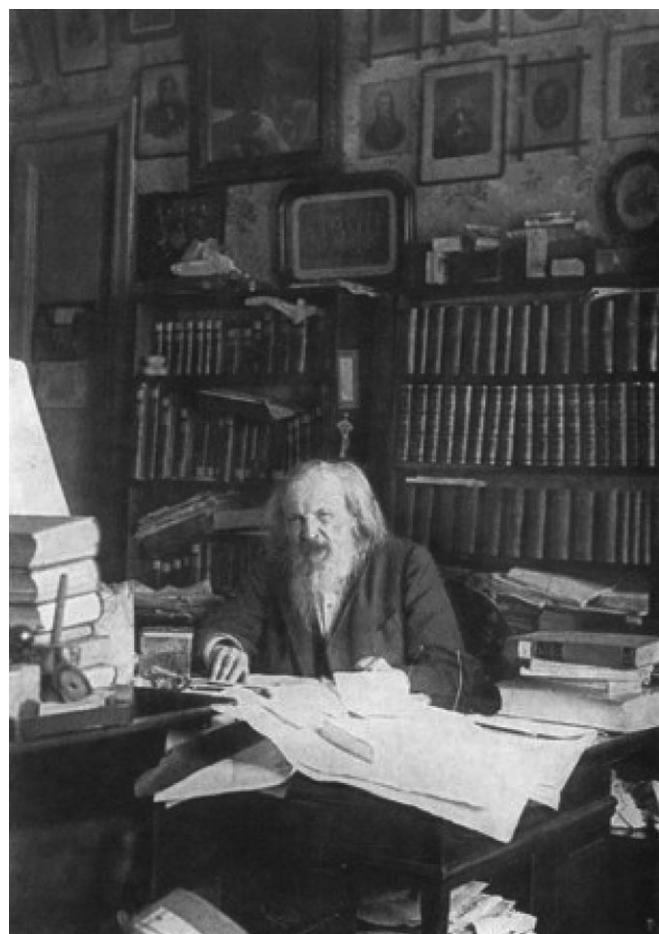


Abbildung 2. Mendelejew 1904 in seinem Arbeitszimmer neben dem Direktionsbüro des Amtes für Maße und Gewichte. Quelle: siehe Lit. [22].

im Jahr 1907 als sein eigentliches Vermächtnis ansah.

Mendelejews Erfolg als Bürokrat stand gegenüber, dass er seine grundsätzlichen Überzeugungen in der Chemie bedroht sah. Sein Verständnis war in starkem Maße vom Periodensystem geprägt. Die Materie hatte, nach Mendelejew, drei wesentliche Eigenschaften: sie war atomar (jedes Atom war unteilbar), sie war unveränderlich (jedes Element hatte eine bestimmte Masse und konnte nicht zu irgendeinem anderen Element werden), und jedes Element besaß eine spezifische Valenz. Abhängig von seiner Masse hatte somit jedes Element einen bestimmten Platz als atomares Individuum (im eigentlichen Sinn unteilbar) im System, der von der periodischen Wiederholung der Valenz bestimmt wurde. Mendelejew sah diese drei Eigenschaften als gleichrangig und charakteristisch für ein chemisches Element an. Doch 1894 wurde ein

neues Phänomen entdeckt, das diese Eigenschaften der Materie direkt infrage stellte, die Grenzen des chemischen Wissens aufzeigte und die Stabilität der ganzen Disziplin bedrohte.

Der Mann, der dadurch internationale Ruhm erlangt hatte, dass er die Eigenschaften von Elementen an freien Stellen seines Periodensystems vorausgesagt hatte, wurde 1894 überrascht von William Ramsays Entdeckung eines neuen chemischen Elements: Argon – das Träger. Er hatte die bestätigenden Entdeckungen von Gallium, Scandium und Germanium freudig begrüßt, doch für Argon war keine freie Stelle im Periodensystem vorgesehen. Es hatte ein Atomgewicht von 40, was einen Platz zwischen Chlor und Kalium bedeutete, und es schien keinerlei Bindungen mit anderen Elementen einzugehen. Mendelejew schickte unverzüglich ein Telegramm an Ramsay (in französischer Sprache): „Entzückt über die Entde-

ckung von Argon. Denke Moleküle enthalten drei durch Hitze gebundene Stickstoffe.“^[15] Er widersetzte sich also einer chemischen Entdeckung, die als Verletzung seines Periodensystems hätte verstanden werden können. Mendelejew bildete sich diese Bedrohung nicht nur ein. Ein amerikanischer Chemiker bemerkte, nachdem er die Eigenschaften der Edelgase, die kurze Zeit nach Argon entdeckt worden waren, überprüft hatte: „Das Auftauchen so vieler neuer Elemente gleichzeitig wird den bestehenden Aufbau des Periodensystems zweifelsohne ins Wanken bringen, und es werden vermutlich Versuche zur Umstrukturierung des Systems unternommen, um diese neuen Entdeckungen einzufügen zu können.“^[16]

Mendelejew änderte seine Haltung dem Element gegenüber rasch. Im Jahr 1903 wurde er ein begeisterter Anhänger der Idee, dass die Edelgase als nullwertige Elemente in einer nullten Gruppe betrachtet und ganz links im Periodensystem platziert werden sollten (und nicht ganz rechts wie in modernen Darstellungen; siehe Abbildung 3). Damit, so argumentierte er, gäbe es eine Struktur des Systems von den reaktion-

trächtigsten Elementen (den Edelgasen) hin zu den reaktivsten (den Halogenen).

Daraus lässt sich ersehen, dass Mendelejew die Edelgase recht schnell einordnen konnte. Ganz anders verhielt es sich mit der Radioaktivität: 1896 führte der französische Physiker Henri Becquerel eine Reihe von Versuchen mit Uran durch, um zu beweisen, dass das Phänomen der Röntgenstrahlen (die Wilhelm Conrad Röntgen ein Jahr zuvor entdeckt hatte) in Zusammenhang mit der Fluoreszenz stand. Durch Zufall entdeckte er, dass Uran Photoplatten eintrübte; eine Reihe weiterer Experimente veranlasste ihn zu der Schlussfolgerung, dass Uran selbst Energie abstrahle. 1898 entdeckten Pierre und Marie Curie in ihrem Pariser Labor die neuen Elemente Polonium und Radium, die Energie in sehr großer Intensität abgaben. Dieses von Marie Curie als Radioaktivität bezeichnete Phänomen wurde sehr schnell eines der am intensivsten erforschten Gebiete der Physik.

Mendelejews kritische Einstellung zur Radioaktivität hat ihren Ursprung in seinem Besuch im Labor der Curies in Paris im Jahr 1902. Der konservative Mendelejew bevorzugte Innovationen,

die auf Altbewährtem beruhten, wie es beim Periodensystem der Fall war. Einen Freund gegenüber bemerkte er: „Sag mir bitte, gibt es eine große Menge Radiumsalze auf der ganzen Welt? Einige Gramm! Und auf einer derart wackligen Grundlage wollen sie unsere gesamten angestammten Vorstellungen von der Beschaffenheit der Materie über den Haufen werfen!“^[17] Eine dieser gefährdeten Vorstellungen war seine Überzeugung, dass ein Element sich nicht in irgendein anderes Element umwandeln könnte. Das wäre moderne Alchemie.

Für Mendelejew war die Masse kein zweitrangiges Merkmal eines Elements, wie die Kristallstruktur. Sie definierte vielmehr als das bedeutendste Charakteristikum die Identität eines Atoms: Durch sie unterschied man ein Sauerstoffatom von einem Cobaltatom. Diese Ansicht kontrastierte sehr stark mit dem heutigen Verständnis der Materie, nach dem jedes Atom aus einer definierten Zahl Protonen, Neutronen und Elektronen besteht, und jedes Proton in einem Cobaltatom identisch ist mit jedem Proton in einem Sauerstoffatom. Ein Sauerstoffatom ist definiert

Series	Zero Group	Group I	Group II	Group III	Group IV	Group V	Group VI	Group VII	Group VIII
0	x								
1	y	Hydrogen H=1·008							
2	Helium He=4·0	Lithium Li=7·03	Beryllium Be=9·1	Boron B=11·0	Carbon C=12·0	Nitrogen N=14·04	Oxygen O=16·00	Fluorine F=19·0	
3	Neon Ne=19·9	Sodium Na=23·05	Magnesium Mg=24·1	Aluminium Al=27·0	Silicon Si=28·4	Phosphorus P=31·0	Sulphur S=32·06	Chlorine Cl=36·45	
4	Argon Ar=38	Potassium K=39·1	Calcium Ca=40·1	Scandium Sc=44·1	Titanium Ti=48·1	Vanadium V=51·4	Chromium Cr=52·1	Manganese Mn=55·0	
5		Copper Cu=63·6	Zinc Zn=65·4	Gallium Ga=70·0	Germanium Ge=72·8	Arsenic As=75·0	Selenium Se=78	Bromine Br=79·95	
6	Krypton Kr=81·8	Rubidium Rb=85·4	Strontrium Sr=87·6	Yttrium Y=89·0	Zirconium Zr=90·6	Niobium Nb=94·0	Molybdenum Mo=96·0		
7		Silver Ag=107·9	Osmium Os=112·4	Indium In=114·0	Tin Sn=119·0	Antimony Sb=120·0	Tellurium Te=127	Iodine I=127	
8	Xenon Xe=138	Ceasium Cs=132·9	Barium Ba=137·4	Lanthanum La=139	Cerium Ce=140	—	—	—	— (—)
9		—	—	Ytterbium Yb=173	—	—	—	—	
10	—	—	—	Thallium Tl=204·1	Tantalum Ta=183	Tungsten W=184	—	Osmium Os=191	
11	Gold Au=197·2	Mercury Hg=200·0	Thallium Tl=204·1	Lead Pb=206·9	Bismuth Bi=208	—	—	Iridium Ir=193	
12	—	Radium Ra=224	—	Thorium Th=232	—	Uranium U=239	—	Platinum Pt=194·9	(Au)

Abbildung 3. Mendelejews korrigiertes Periodensystem. Das x im oberen linken Feld kennzeichnet den chemischen Äther. Quelle: Lit. [23].

als ein Atom mit acht dieser Protonen in seinem Kern. Mit anderen Worten: Mendelejew bestreit entschieden, dass die Atome aus kleineren Teilchen zusammengesetzt sind. Wenn radioaktive Elemente subatomare Teilchen abgaben, dann implizierte das eine Verbundstruktur, und Mendelejew war entsprechend beunruhigt. Die Entdeckung des Elektrons im Jahre 1897 durch J. J. Thomson war der dritte Vorbote kommender Änderungen.

Mendelejew konnte derartige Verletzungen seiner grundsätzlichen Vorstellungen von der Materie, und was noch wichtiger war, seines Periodensystems nicht schweigend hinnehmen. Am fin de siècle sah er die Chemie durch Aberglauben und schlampige Beweisführung bedroht, und es trieb ihn zur Verzweiflung, dass die Menschen sich, wie er meinte, durch irrationale Vorlieben von sauberen wissenschaftlichen Methoden abbringen ließen. Mendelejew entschied sich deswegen zu einer chemischen Interpretation des Lichtäthers, wobei er sich die Edelgase zunutze machte, um die durch Radioaktivität und Elektron drohende Gefahr abzuwenden. Die Vorstellung eines Äthers ist heute kaum mehr geläufig, nachdem er 1905 in Albert Einsteins spezieller Relativitätstheorie für überflüssig erklärt worden war, doch zu Mendelejews Zeit war dieser Äther allgemein anerkannt. Es war nur vernünftig, dass Mendelejew bei der Verteidigung gegen die gefürchtete Instabilität zum tragfähigsten Konzept griff.

1901 wurde Mendelejew gebeten, für die Erstausgabe von *Herald and Library of Self-Education* einen Artikel über den Zustand der zeitgenössischen Wissenschaft zu schreiben. Dieses neue Magazin war die perfekte Bühne, um sein Modell vorzustellen. Mendelejew plante, den Äther als Edelgas in das Periodensystem der Elemente einzugliedern. Genau wie bei der Voraussage der drei Eka-Elemente im Jahr 1871 sollten dann Interpolationstechniken die notwendigen Eigenschaften ergeben.

Er begann mit der Gruppe der Edelgase, indem er deren zunächst unerklärliche chemische Inaktivität zu seinem Vorteil interpretierte. Der Äther musste das leichteste Element sein und an der Spitze der nullten Gruppe stehen

(über einem anderen postulierten Element, Coronium). Mendelejew konnte nun einige seiner Eigenschaften erahnen:

„Somit kann der Weltäther, wie Helium und Argon, als der chemischen Bindung unfähig aufgefasst werden. ... Wenn wir den Äther als ein Gas identifizieren, bedeutet das vor allem, dass wir bestrebt sind, sein Konzept zu dem ordentlichen, wirklichen Konzept der Aggregatzustände in Beziehung zu setzen: Gas, Flüssigkeit und Feststoff. ... Wenn der Äther ein Gas ist, muss er wiegbar sein und sein eigenes Gewicht haben. Wir müssen es ihm zuschreiben, wenn wir nicht in seinem Namen die gesamten Naturwissenschaften, die ihren Ursprung bei Galileo, Newton und Lavoisier haben, aufgeben wollen. Wenn aber der Äther eine derart starke Durchdringungskraft hat, dass er alle Hüllen passiert, dann ist es eine unmögliche Annahme, dass seine Masse in einer bestimmten Menge anderer Körper oder das Gewicht seines spezifischen Volumens unter bestimmten Bedingungen gefunden werden. Somit sollte man nicht vom unwiegabaren Äther sprechen, sondern von der Unmöglichkeit, ihn zu wiegen.“^[18]

Der Äther war zwar unwiegbar, sein Gewicht konnte aber mithilfe des Periodensystems bestimmt werden. Dieses gab nur eine Obergrenze für das Gewicht eines Elements x in Reihe 0 und Gruppe 0 an ($x \leq 0.17$; mit Wasserstoff $H = 1$). Um eine genauere Voraussage treffen zu können, bediente sich Mendelejew der Physik, speziell der kinetischen Gastheorie, und rechnete aus, wie niedrig das Durchschnittsgewicht sein musste, damit das Gas aus der planetarischen Atmosphäre entweichen konnte. Nach einer einfachen Rechnung mit Newtons Gravitationsgesetz folgerte Mendelejew, dass x kleiner als 0.038 oder 0.000013 sein müsse, damit der Äther der Erdatmosphäre bzw. der Sonnenatmosphäre entweichen konnte. Anschließend übertrug er den Wert auf den größeren Stern γ -Virginis mit der 32.7fachen Sonnenmasse. Er kam zu dem Endergebnis $0.00000096 > x > 0.00000000053$. Obwohl die Massen bei allen Fluchtgeschwindigkeitsgleichungen gegeneinander aufgehoben werden können, bediente er sich interessanterweise dieser Vereinfachung nicht, um

die Berechnung verständlicher darzustellen. Er ermittelte schließlich, dass der Äther etwa ein Millionstel eines Wasserstoffatoms wiegen und sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 2250 Kilometern pro Sekunde bewegen müsse. Dieser Äther durchdrang alles und hinterließ sichtbare Ergebnisse bei schwachen Wechselwirkungen mit den Elementen.^[19]

Mendelejew passte sein Konzept eines chemischen Äthers nahtlos in seine neue Selbstdarstellung als Nachfolger von Sir Isaac Newton ein. In den Artikel über den chemischen Äther fügte er eine kurze Fußnote ein: „Vorläufig möchte ich es ‚Newtonium‘ nennen – zu Ehren des unsterblichen Newton.“ In einem Entwurf, der auf einen Papierfetzen gekritzelt war, betonte er diesen Newtonschen Aspekt durch folgende Schlussfolgerung noch weit stärker: „[Der Äther ist] das leichteste Elementargas, das alles durchdringt (Reihe 0, Gruppe 0) und das ich vorläufig Newtonium nennen möchte, da die Überlegungen Newtons alle Bereiche der Mechanik, Physik und Chemie durchdringen.“^[20]

Wie konnten in diesem Sinn die Radioaktivität und das Elektron erklärt werden? Mendelejew bemerkte, dass die wichtigsten radioaktiven Elemente (Uran, Thorium, Radium usw.) die schwersten waren und demzufolge einen großen Anteil leichterer Materie anziehen mussten, genau wie die Sonne Planeten und kosmischen Staub anzog. Selbstverständlich wäre das Uran von einer großen Wolke angezogenen Äthers umgeben, der sich in der Uranmasse einlagert. Dringt nun zuviel Äther in das Uran ein, so wird ein kritischer Punkt überschritten, und durch unbekannte chemische Prozesse wird Äther aus der Probe herausgeschleudert. Radioaktive Energie wäre dann genau die Reaktionsenergie, die durch den winzigen und stark diffundierenden Äther erzeugt wird. Ätheratome, und keine Zerfallsprodukte anderer Atome, werden herausgeschleudert. Es gab keine Umwandlung, keine Urmaterie, aus der alle Elemente aufgebaut waren, und das Periodensystem behielt Gültigkeit.

Trotz einigen anfänglichen Interesses an Mendelejews Theorie konnte sich der chemische Äther natürlich nicht

durchsetzen. Um 1906 war die Radioaktivität als Eckpfeiler der modernen Atomtheorie so fest verwurzelt, dass Mendelejew sich still und leise zurückzog und nie mehr auf sein Lieblingsprojekt zurückkam. Es ist nicht verwunderlich, dass er das Periodensystem mied, als es Zeit wurde, über seine Hinterlassenschaft nachzudenken. – Es war nicht „stabil“ (dieses Wort verwendete er 1905 für seine wissenschaftlichen Leistungen), und mit seiner letzter Unternehmung hatte er sich etwas blaumiert. Er schwelgte in den jüngsten Ruhmestaten des Staatsbeamten Mendelejew und nicht in den vergangenen des Wissenschaftlers.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Mendelejew wäre sicherlich erfreut gewesen, dass sein Name ein Jahrhundert nach seinem Tod von Chemikern noch genannt wird, selbst wenn ihn das unverhofft getroffen hätte. Er rechnete nicht unbedingt damit, dass sein Ansehen in der Chemie lange Zeit Bestand haben würde. Er glaubte viel eher an den Aufstieg des Russischen Reiches hin zu einer kapitalistischen Industrialisierung. Die hundert Jahre seit seinem Tod haben gezeigt, dass Mendelejews Voraussagen in Bezug auf die Entwicklung Russlands und der Chemie nicht so messerscharf waren wie bei den Eigenschaften der Eka-Elemente im Jahr 1871.

Dennoch können wir aus der hier erzählten Geschichte lernen, dass wir an Jahrestagen nicht nur prominenter Persönlichkeiten gedenken, sondern auch versuchen sollten, ihre wissenschaftlichen Leistungen besser zu verstehen. Niemand weiß, was die Wissenschaft in der Zukunft bringen wird, und der Einzelne kann kaum auf einen Nachruhm für eine seiner wissenschaftlichen Entdeckung hoffen. Der Fall Mendelejew zeigt uns, dass sogar eine Einschätzung der eigenen Karriere nicht leicht ist, wenn man die Vergangenheit Revue passieren lässt.

Wir verbinden bedeutende Persönlichkeiten in erster Linie mit ihren größten Erfolgen. In diesem Sinne gedenken wir zum 100. Todestag Mendelejews nicht seines Sterbejahres, sondern seiner Hinterlassenschaft der Jahre 1869–1871, in denen er das Periodensystem der chemischen Elemente gestaltete. Allerdings verläuft der Aufstieg eines Menschen nicht gleichförmig, und oft ist der Karrierezenit im Augenblick des Todes bereits überschritten. Feiern wir also die Leistungen von D. I. Mendelejew, aber gedenken wir auch des Wissenschaftlers, des Bürokraten und des Vater, der in dem Glauben starb, dass er begonnen habe, seine Angelegenheiten zu ordnen.

Online veröffentlicht am 2. Februar 2007

Übersetzt von Charlotte Gentes, Maulbronn

- [1] Zur vollständigen Analyse von Mendelejews Biographie mit weiterführender Dokumentation zu den hier angesprochenen Themen: M. D. Gordin, *A Well-Ordered Thing: Dmitrii Mendeleev and the Shadow of the Periodic Table*, Basic Books, New York, 2004.
- [2] D. I. Mendelejew, „Biograficheskie zametki o D. I. Mendeleeve (pisany vse mnoiu—D. I. Mendeleevym)“, reproduziert in S. A. Shchukarev, S. N. Valk, *Arkhiv D. I. Mendeleeva, t. 1: Avtobiograficheskie Materialy, Sbornik Dokumentov*, Izd. Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta im. A. A. Zhdanova, Leningrad, 1951, 13–30.
- [3] Reproduziert in S. A. Shchukarev, S. N. Valk, *Arkhiv D. I. Mendeleeva, t. 1: Avtobiograficheskie Materialy, Sbornik Dokumentov*, Izd. Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta im. A. A. Zhdanova, Leningrad, 1951, 31–33.
- [4] Reproduziert in S. A. Shchukarev, S. N. Valk, *Arkhiv D. I. Mendeleeva, t. 1: Avtobiograficheskie Materialy, Sbornik Dokumentov*, Izd. Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta im. A. A. Zhdanova, Leningrad, 1951, 34–36.
- [5] Einzelheiten: M. D. Gordin, *A Well-Ordered Thing: Dmitrii Mendeleev and the Shadow of the Periodic Table*, Basic Books, New York, 2004, Kap. 2. Siehe auch: I. S. Dmitriev, *Voprosy istorii estestvoznanija i tekhniki*. 2001, no. 1, 31–82.
- [6] D. Mendelejev, *Ann. Chim. Phys. Ser. VIII* 1872, 133–229.
- [7] Zwistigkeiten zum Thema Vorrang: J. W. van Spronsen, *The Periodic System of Chemical Elements: A History of the First Hundred Years*, Elsevier, Amsterdam, 1969.
- [8] L. F. Nilson, *Ofversigt af Kongl. Vetenskaps-Akademiens Förhandlingar*, 1879, no. 3, 47–51.
- [9] P. Cleve, *C. R. Hebd. Séances Acad. Sci.* 1879, 89, 419–422.
- [10] C. Winkler, *Ber. Deut. Chem. Ges.* 1886, 19, 210–211.
- [11] D. Mendeleev, *J. Chem. Soc.* 1889, 55, 634–656 (Ellipsen wurden eingefügt).
- [12] B. Bensaude-Vincent, *Isis* 1996, 87, 481–499.
- [13] M. D. Gordin, *Technology and Culture* 2003, 44, 677–702.
- [14] M. D. Gordin, *Kritika* 2003, 4, 783–815.
- [15] Mendelejew an Ramsay, 12. Februar 1895, zitiert in: M. D. Gordin, *A Well-Ordered Thing: Dmitrii Mendeleev and the Shadow of the Periodic Table*, Basic Books, New York, 2004, S. 210.
- [16] J. E. Gilpin, *Am. Chem. J.* 1898, 20, 696–699.
- [17] Zitiert in: N. Morozov, *D. I. Mendeleev i znachenie ego periodicheskoi sistemy dlja khimii budushchago*, I. D. Sytin, Moscow, 1908, S. 89.
- [18] D. I. Mendelejew, *Vestnik i Biblioteka Samoobrazovaniia*, 1903, nos. 1–4, 25–32, 83–92, 113–122, 161–176 (Hervorhebung im Original).
- [19] D. I. Mendelejew, *Vestnik i Biblioteka Samoobrazovaniia*, 1903, nos. 1–4, 165–167.
- [20] D. I. Mendelejew, *Vestnik i Biblioteka Samoobrazovaniia*, 1903, nos. 1–4, 163n, und Bruchstücke zitiert in: M. D. Gordin, *A Well-Ordered Thing: Dmitrii Mendeleev and the Shadow of the Periodic Table*, Basic Books, New York, 2004, S. 224.
- [21] „Sootnoshenie svoistv atomnym vesom elementov“: D. I. Mendelejew, *Zhurnal Russkogo khimicheskogo obshchestva* 1869, 1(2–3), 60–77; D. I. Mendelejew in *Periodisches Gesetz. Klassiki nauki* (Hrsg.: B. M. Kedrov), Izd. AN SSSR, Moscow, 1958, S. 9.
- [22] R. B. Dobrotin, N. G. Karpilo, L. S. Kerova, D. N. Trifonov, *Letopis' zhizni i deiatel'nosti D. I. Mendeleeva* (Hrsg.: A. V. Storonkin), Nauka, Leningrad, 1984, S. 477.
- [23] D. Mendeleeff, *An Attempt towards a Chemical Conception of the Ether* (übersetzt von G. Kamensk), Longmans, Green, and Co., London, 1904, S. 26.