

CHEMIE

Bausteine der Welt

Von den vier Elementen des Altertums zum Schwerionenbeschleuniger (ein Spaziergang durch die Geschichte der chemischen Elemente)*

Von ULRICH KULL, Stuttgart

Zusammenfassung

Abstract

Vorbemerkung

1. Vom Altertum bis zur Alchemie
2. Von der Alchemie zur Chemie als Naturwissenschaft
3. Der Weg zum Periodensystem
4. Von MENDELEJEV ZU BOHR
5. Suche nach fehlenden Elementen
6. „Transurane“ und Transurane
7. Elemente in Literatur, Satire und ... viele „totgeborene“ Elemente
8. Anfang und Ende des Periodensystems
9. Literaturverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG

An der Geschichte der chemischen Elemente werden – ohne strikt chronologische Darstellung – einige Aspekte der Chemiegeschichte aufgezeigt. Der Elementbegriff des Altertums weicht von dem der wissenschaftlichen Chemie stark ab. Von der Alchemie führt der Weg über die Entdeckung der chemischen Grundgesetze zur exakten Naturwissenschaft. Die Idee eines „natürlichen Systems“ mündete nach allerlei Umwegen im Periodensystem der chemischen Elemente. Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung waren die Entdeckung des radioaktiven Zerfalls und der Röntgenstrahlung. Mittlerweile ist durch die künstliche Herstellung die Zahl der Elemente auf 118 gestiegen. Elemente haben auch in der Literatur, der Satire und Science Fiction ihren Platz gefunden. Die große Zahl ungültiger Namen lässt erkennen, dass der Weg der Wissenschaft nicht geradlinig war. Offen bleibt, wie viele weitere Elemente noch werden hergestellt werden können. **Schlüsselwörter:** Chemische Elemente, Fünftes Element, Alchemie, Chemische Grundgesetze, Allotropie, Triade, Periodensystem, Lanthanoide, Seltene Erde, Radioaktivität, Atommodell, Röntgenstrahlen, Isotope, Transurane, Kernspaltung,

*) Erweiterte Fassung des Vortrags vom 12. 01. 2012 zum Abschluss des Jahres der Chemie 2011; in Erinnerung an HEINZ HESS (vgl. Jh. Ges. Naturkde. Württemberg 167, 459, 2011) und RUDOLF KOLB (vgl. CARLÉ-Gedenkband der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg 2013, S. 317).

Actinoide, Schwerionenbeschleuniger, Relativistische Effekte, Ungültige Elementnamen, Ende des Periodensystems.

ABSTRACT

The history of the chemical elements is used as an example to show some aspects of the history of chemistry. The concept of "element" in antiquity is different from that in chemistry. Alchemy through the Middle Ages is followed by the period during which the fundamental chemical laws were found and the science of chemistry became established. The idea of a „natural system“ of elements eventually led to the Periodic Table. Further developments were primarily influenced by the discovery of radioactivity and of X-rays. Beginning 1940, transuranic elements were produced artificially and now we know 118 elements. Elements also have found a place in literature, in satire, and in science fiction. The many invalid („still-born“) names of elements show the mistakes made during the not yet 250 years of chemistry.

Keywords: Chemical elements, fifth element, alchemy, chemical laws, allotropy, natural system, triad, periodic table, lanthanoids, rare earth, radioactivity, atom modell, X-rays, transuranic elements, fission, actinoids, heavy ion linear accelerator, relativistic effects, invalid names, end of the periodic table.

*„Wer nicht von dreitausend Jahren
Sich weiß Rechenschaft zu geben,
Bleib im Dunkel unerfahren,
Mag von Tag zu Tage leben“*

J. W. V. GOETHE

VORBEMERKUNG

Dieser Aufsatz ist keine chronologische Darstellung, sondern eher eine wissenschaftliche Plauderei, die Lust machen soll auf mehr Chemie – so wie sie dem Verfasser Spaß gemacht hat. Allerlei Abschweifungen, die zum Teil nicht vorgelesen wurden, sowie Ergänzungen, auch aus der aktuellen Chemie, sind in Kleindruck wiedergegeben. Der weniger geneigte Leser kann sie einfach übergehen!

1. VOM ALTERTUM BIS ZUR ALCHEMIE

Aus der Antike sind uns „die vier Elemente“ gut bekannt – sie spuken noch heute in unseren Köpfen. In den damaligen Überlegungen ging es um Grundstoffe, besser Grundprinzipien – aber es war dies ein völlig anderer Elementbegriff als der der neuzeitlichen Chemie. THALES hatte Wasser als das entscheidende Grundprinzip angesehen, denn es kommt nicht nur flüssig, sondern auch fest und gasförmig vor. ANAXIMANDROS (610–546) sah hinter allem das „Unbegrenzte“ (apeiron). ANAXIMENES (585–525) hielt die Luft für das Grundlegende und sah Stoffe als ineinander umwandelbar an. Von HERAKLIT (520–460) wurde das Feuer und daraus resultierend die stete Veränderung als Prinzip angesehen. Es entsteht das

Gegensatzpaar Wasser – Feuer. Da auch ein Gegensatzpaar Luft – Erde leicht zu erkennen war, kam es zur Entstehung eines Gedankenkreises (LEISEGANG 1928). In dessen Nachfolge sieht FREY (1980) in der Denkform des Gedankenkreises die Grundform des mystischen Denkens und stellt diesem die selbstbezügliche Denkform des parmenidischen Seins gegenüber. Diese erscheint bei ANAXAGORAS (499–428); er erklärte, Sonne und Sterne bestünden aus glühendem Gestein.

Die Diskussion des Gegensatzes von Wasser und Feuer lebte in anderem Zusammenhang im 18. Jhdt. in der Geologie als Streit zwischen Neptunisten und Plutonisten wieder auf und wurde von GOETHE in Faust II im Dialog von THALES und ANAXIMANDER verwendet – wobei GOETHE sich als Neptunist zu erkennen gibt:

A: Durch Feuerdunst ist dieser Fels zuhanden

Th: Im Feuchten ist Lebendiges entstanden

A: Hast du, o Thales, je in einer Nacht

Solch einen Berg aus Schlamm hervorgebracht?

Th: Nie war Natur und ihr lebendiges Fließen

Auf Tag und Nacht und Stunden angewiesen.

Sie bildet regelnd jegliche Gestalt;

Und selbst im Großen ist es nicht Gewalt.

(Faust II, 7855–64)

EMPEDOKLES (492–432) und ihm folgend PLATON (428–347) (in Timaios) vertreten die Ansicht der vier Elemente (Tab.1). Nach PLATO sind diese geometrisch fassbar, wie dies übrigens J. KEPLER 1619 in Harmonices Mundi noch angibt. Man sollte wohl besser von vier Prinzipien sprechen, darf aber nicht vergessen, dass die platonische Ideenlehre vom parmenidischen Denken ihren Ausgang nimmt (FREY 1980).

LEUKIPP (5. Jhdt. v. Chr.) und DEMOKRIT (ca. 460–400) postulierten die Existenz von Atomen (nach DEMOKRIT: Es gibt nur Atome und den leeren Raum). Man konnte also leicht den Atomen die durch die platonischen Körper gegebenen Gestalten zuschreiben. Allerdings gibt es als weiteren dieser Körper das Dodekaeder. Daher musste ein fünftes Prinzip oder Element eingeführt werden: Äther oder Kosmos, später auch Quinta essentia = Quintessenz genannt. ARISTOTELES (384–322) übernahm die Lehre von den vier Elementen, die er aber nicht als konkrete Stoffe sah – man müsse z.B. das konkrete Wasser in der Natur vom Element (Prinzip) „Wasser“ unterscheiden. Allerdings leugnete er die Existenz von Atomen mit der Argumentation, dass diese im leeren Raum sein müssten – dieser aber ein Nichts sei, das nicht existieren könne; also gebe es keine Atome. Nach ARISTOTELES liegt den vier Elementen die „prima materia“, die nicht fassbare Materie an sich, ohne Eigenschaften, zugrunde. Die Vierzahl taucht bei Aristoteles auch in der Ursachenlehre (causa materialis, formalis, efficientis, finalis) und in der Ethik (vier Kardinaltugenden: Klugheit, Gerechtigkeit, Tapferkeit, Besonnenheit) auf.

Tabelle 1: Die vier Elemente des Altertums und ihnen zugeordnete Merkmale

Element	platonischer Körper	Qualität	im menschl. Körper	Temperament
Luft	Oktaeder	heiß + feucht	Blut	Sanguiniker
Feuer	Tetraeder	heiß + trocken	gelbe Galle	Choleriker
Erde	Würfel	kalt + trocken	schwarze Galle	Melancholiker
Wasser	Ikosaeder	kalt + feucht	Schleim	Phlegmatiker

Die vier Elemente kommen übrigens auch in GOETHE'S FAUST (diesmal Faust I) vor: beim Auftritt Mephistos als Pudel will Faust diesen durch einen Zauberspruch fassen:

*„Erst zu begegnen dem Tiere
 Brauch ich den Spruch der Viere:
 Salamander soll glühen,
 Undene sich winden,
 Sylphe verschwinden,
 Kobold sich mühen.“*

(Faust I, 1271–76)

GOETHE kannte die Alchemie ziemlich gut; er hatte in seiner Jugend im Zusammenhang mit einer ernsten Erkrankung alchemistische Studien betrieben.

Die spekulative Atomlehre wurde weitergetragen durch EPIKUR (342–271) und LUKREZ (ca. 97–55 v.Chr.), bei dem wir lesen: „Kein Ding wird zu nichts, sondern alle Dinge kehren in ihre Elemente aufgelöst zurück.“ Die Naturgeschichte der folgenden Jahrhunderte bis zum Beginn der Neuzeit wurde von der aristotelischen Lehre dominiert – manchenorts auch noch länger: die Briefmarken der Deutschen Post zum Jahr der Chemie gaben bildlich die vier Elemente wieder! (Man vergleiche: die Schweiz verwendete die Formel von Vitamin C; Frankreich und Spanien verknüpften das Jahr der Chemie mit 100 Jahre Nobelpreis an MARIE CURIE; Israel zeigte das Protein Ubiquitin und das Ribosom und Rumänien den Entdecker des Tellurs, J. MÜLLER VON REICHENSTEIN aus Sibiu = Hermannstadt).

Die Sonderstellung des „fünften Elements“ lässt sich ebenfalls bis heute erkennen: 1997 gab es einen Film „Das fünfte Element“, in dem die Liebe der Quintessenz entspricht. Dies ist immerhin verständlich, während die Nutzung des Begriffs als Reklame für den Touareg-Wagen von VW sich nicht erschließt.

Erstaunlicherweise zeigt auch in der wissenschaftlichen Chemie das fünfte Element eine Reihe von Eigentümlichkeiten: das Bor. Es ist dreibindig, so dass man für die einfachste Verbindung zwischen Bor und Wasserstoff die Formel BH_3 erwarten darf. Jedoch hat schon A. STOCK (1876–1946) gezeigt, dass die richtige Formel B_2H_6 ist; es folgen z.B. B_4H_{10} , $B_{10}H_{14}$. Zur Erklärung ist eine Erweiterung

der Beschreibung chemischer Bindungsverhältnisse erforderlich. W. LIPSCOMB (1919–2011) schuf in den 1950er Jahren das Modell der „Dreizentrenbindung“.

Damit kann die Stöchiometrie der großen Zahl mittlerweile bekannter Borwasserstoffe erklärt werden. Entsprechendes gilt für Aluminiumwasserstoffe; AlH_3 liegt normalerweise allerdings als Polymer $(\text{AlH}_3)_x$ vor; nur unter Extrembedingungen kann man AlH_3 und Al_2H_6 erhalten. Aber auch z. B. in einem komplexstabilisierten Te_{10} -Molekül liegt eine Dreizentrenbindung vor (GÜNTHER et al. 2011). Wasserstoffbrücken sind als Dreizentren-Zweielektronenbindungen aufzufassen.

Das Element Bor wurde erstmals 1807 von H. DAVY (1778–1829) hergestellt; jedoch war seine Existenz schon durch die Beschreibung der Borsäure durch HOMBERG 1702 belegt. Ähnliches gilt für eine Reihe anderer Elemente, die als „Erden“ (Verbindungen, oft Oxide) längst beschrieben waren, bevor die Darstellung des Elements gelang. W. HOMBERG (1652–1715) war ursprünglich Jurist gewesen, wurde dann von O. VON GUERICKE in Magdeburg zu naturwissenschaftlichen Studien angeregt, studierte Medizin und promovierte in Tübingen (nach anderen Quellen in Wittenberg). Er wurde dann in Paris Erzieher und Leibarzt des Herzogs von Orleans.

Bor bildet eine Vielzahl binärer Verbindungen mit Hauptgruppenelementen, darunter auch solche mit nichtstöchiometrischen Zusammensetzungen. (ALBERT u. HILLEBRECHT 2009). Die Zahl der Modifikationen des Elements ist bisher nicht klar, mindestens vier sind zu unterscheiden. Bor-Stickstoff-Verbindungen könnten als Wasserstoffspeicher Bedeutung gewinnen; Metall-Bor-Komplexe werden zunehmend zur Funktionalisierung organischer Verbindungen eingesetzt.

Die Lehren des ARISTOTELES wurden auch in der arabischen Welt verbreitet und dort weiterentwickelt: es entstand die Alchemie (vgl. SUHR 2006). Dieser verdankt man eine Vielzahl von Beobachtungen und Experimenten und bis heute gibt es chemische Begriffe, die diese Herkunft erkennen lassen: Al-kali, Al-kohol usw. Die Alchemie hatte eine Symbolsprache (wie auch die heutige Chemie, nur in anderer Form!), die z. T. auf das Altertum zurückgeht (vgl. WIEDERHOLT 1991) und auf ganz alten Apothekengefäßen manchmal noch zu finden ist (Abb. 1). Im



Abb. 1: Alte Beschriftung eines Gefäßes für Tinctura Antimoni tartarisata (Brechweinstein-Tinktur) (aus WIEDERHOLT 1991)

Tabelle 2: Sieben Metalle – Planeten – Wochentage

Metall	Planet	Wochentag
Gold	Sonne	Sonntag
Silber	Mond	Montag
Eisen	Mars	Dienstag
Quecksilber	Merkur	Mittwoch
Zinn	Jupiter	Donnerstag
Kupfer	Venus	Freitag
Blei	Saturn	Samstag

europäischen Raum wurde das alchemistische Wissen mit einer spekulativen Naturphilosophie verknüpft. Neben die vier „primären“ Elemente treten nun sekundäre – beruhend auf den drei Prinzipien Schwefel – Salz – Quecksilber.

Nun gab es seit dem Altertum sieben Metalle (Tab. 2); diese sollten auf die drei Prinzipien zurückzuführen und daher ineinander umwandelbar sein. Die Metalle wurden mit den sieben Planeten und den sieben Wochentagen verknüpft. Die alchemistischen Symbole für Kupfer = Venus und für Eisen = Mars werden bis heute in der Biologie für weiblich (♀) und männlich (♂) verwendet. Das Zinn wurde mit Jupiter in Verbindung gebracht, weil beim Biegen (durch das Reiben der Kriställchen) ein Geräusch entsteht: dieses „Zinngeschrei“ war das Abbild des Donners. Als flüssiges Metall war naturgemäß das Quecksilber von besonderem Interesse – es ist neben Brom das einzige bei Raumtemperatur flüssige Element. Die Faszination war Grund für die „Mercury Fountain“ von ALEXANDER CALDER im Pavillon des republikanischen Spanien bei der Weltausstellung in Paris 1937.

Quecksilbermetall ist in flüssiger Form für den Menschen ungiftig; giftig sind der Dampf, der aus fein verteiltem Quecksilber fortlaufend freigesetzt wird, sowie die meisten Verbindungen. Daher sollte die Nutzung von Quecksilber heute möglichst vermieden werden – ein Problem sind Energiesparlampen und Knopfzellen vor allem bei der Entsorgung. Hingegen ist es nicht sinnvoll, Amalgamfüllungen in Zähnen zu verbieten; die daraus freigesetzten Quecksilbermengen sind zu vernachlässigen.

Die Alchemie geriet in Verruf durch einen eigentlich unbedeutenden Aspekt, die Goldmacherei. Mischt man Gold mit Quecksilber, so entsteht Gold-Amalgam. Erhitzt man dieses bis knapp unter den Siedepunkt, so bilden sich bäumchenförmige Gebilde: offenbar wachsen Metalle wie Pflanzen. Hat man also Samen von Gold, so muss dementsprechend auch reines Gold wachsen.

In diesem Zusammenhang mag es von Interesse sein, dass man auch ein Amalgam eines gar nicht existenten „Metalls“ herstellen kann. Versetzt man Natrium-Amalgam mit konzentrierter Ammoniumchlorid-Lösung, so bildet sich silberglänzendes

Ammonium-Amalgam (entsprechend dem Alkalimetall-Charakter von Ammonium), das sich bei Zimmertemperatur alsbald aufbläht und unter Freisetzung von Ammoniak, Wasserstoff und Quecksilber zerfällt.

Auch in anderen Fällen zeigen Atomgruppen ein elementartiges Verhalten: Azidion N_3^- und Cyanidion CN^- werden daher auch als „Pseudohalogene“ bezeichnet. Metallcluster können ebenfalls elementartige Eigenschaften haben („Superatome“); so verhält sich Al_7^- ähnlich Ge, Al_{13}^- zeigt Ähnlichkeit zu Argon. Das Quecksilber-reichste Amalgam definierter Zusammensetzung ist $Na_{11}Hg_{52}$ – es kann besonderes Interesse beanspruchen, weil es Anteile kovalenter, ionischer und metallischer Bindung und eine dementsprechend sehr komplexe Struktur aufweist.

2. VON DER ALCHEMIE ZUR CHEMIE ALS NATURWISSENSCHAFT

Im 17. und 18. Jhd. entsteht aus der Alchemie allmählich die Chemie, die deshalb zunächst kaum eine akademische Basis hatte. Chemie galt als „unsaubere“ Disziplin – und bis heute haftet ihr das Odium von Gefährlichkeit, Explosionen, Gestank und Giftigkeit an. Im öffentlichen Bewusstsein wird vielfach nicht wahrgenommen, dass wir ohne Chemie gar nicht existieren könnten. Die Mehrzahl der Leser dieses Textes wären ohne Produktion von Stickstoff-Dünger („Kunstdünger“) auf der Grundlage des Haber-Bosch-Verfahrens gar nicht geboren worden und manch einer müsste ohne Produkte der pharmazeutischen Industrie die Chemie nicht zur Kenntnis nehmen, weil er nicht mehr am Leben wäre.

ROBERT BOYLE (1627–1691) hat sich für seine chemischen Arbeiten noch „entschuldigt“. Sein wichtigstes Werk ist „The Sceptical Chemist“ (1661). Er erkannte, dass die traditionellen vier Elemente keine Elemente sind, wohl aber die Metalle. Allerdings glaubte Boyle durchaus an eine allen Elementen zugrunde liegende Universalmaterie. Die wahren Elemente erhält man durch Zerlegung der Stoffe – solange, bis keine weitere Zerlegung mehr möglich ist. Hier taucht der moderne Element-Begriff auf, der allerdings weniger klar formuliert zuvor schon von J. JUNGIUS (1587–1657) verwendet worden war. Die Zahl der Elemente war aus diesem Grunde nunmehr deutlich größer: Zu den sieben klassischen Metallen treten die seit alters her bekannten Stoffe Kohlenstoff und Schwefel. ALBERTUS MAGNUS (1193–1280) hatte das Arsen gefunden, das aber schon von dem arabischen Arzt und „Alchemisten“ JABIR IBN HAYYAN (= „GEBER“; das Problem seiner Identität wird hier nicht diskutiert) als Bastard von Metallen angegeben worden war. Über die Erkenntnis von Antimon als ein Metall gehen die Ansichten ebenfalls auseinander; von PLINIUS wurde es vermutlich mit Blei verwechselt. Sowohl PARACELUS als auch der hypothetische Mönch BASILIUS VALENTINUS (dieser ist wahrscheinlich eine Erfindung des Berghauptmannes JOHANN THÖLDE im 17. Jhd.) werden als Entdecker genannt. PARACELUS nennt als erster das Zink, dessen Legierung Messing aber schon in der Antike bekannt war. Das Metall wurde rein erst 1746 von MARGGRAF (1709–1782) hergestellt, der übrigens als erster den Zuckergehalt der Rübe erkannte und so zum Vater des Rübenzuckers geworden ist. Bismut wurde schon früh von Bergleuten im Erzgebirge erkannt, erste Beschreibungen des Metalls stammen von PARACELUS und von G. AGRICOLA (1494–

1555), der es als „das alte Metall“ kennzeichnete. Die Reindarstellung erfolgte zwar erst 1753, jedoch sind bemalte Platten aus Bismut aus dem 15. Jhd. bekannt. Platin war zuerst in Südamerika gefunden und als schlechtes Silber angesehen worden (daher der Name: plata = Silber, platina = kleines Silber). Für die Alchemisten hatte es Eigenschaften von Silber und Gold. Als eigenständiges Metall wurde es 1750 durch WARSON (1715–1787) beschrieben; einer der ersten, der Untersuchungen zu seinen Eigenschaften anstellte, war der bekannte Naturforscher BUFFON. Im Jahr 1669 gelang dem Alchemisten H. BRAND(T) (ca. 1630–1692) die Gewinnung von Phosphor aus verfaultem Urin. Er unterwies 1678 auch LEIBNIZ in Hannover in der Darstellung des Phosphors. LEIBNIZ hat dann selbst Phosphor hergestellt und eine Probe an HUYGENS nach Paris geschickt (PETERS 1902). Den Bergleuten waren seit langem Mineralien bekannt, aus denen sich keine Metalle ausschmelzen ließen. Solche Mineralien lieferten jedoch bei Untersuchungen im 18. Jhd. auch Metalle, die entsprechende Namen erhielten: Kobalt 1735, Nickel 1751.

Im Jahr 1766 entdeckte HENRY CAVENDISH (1731–1810) ein brennbares Gas, bei dessen Verbrennung Wasser entsteht. Daher erhielt es den Namen Wasserstoff.



Abb. 2: Eingang des historischen Cavendish-Laboratory, Cambridge U.K.

Ein anderer Angehöriger der Familie CAVENDISH wurde später Kanzler der Universität Cambridge und begründete dort das Laboratorium für Physikalische Chemie. In diesem „Cavendish-Labor“ wurden Ende de 19. Jhdts. die Edelgase und 1953 die DNA-Doppelhelix entdeckt (Abb. 2).

1772 untersuchte der schottische Botaniker DANIEL RUTHERFORD (1749–1819) in Edinburgh die Luft. Dass diese zwei Bestandteile haben müsse, hatte schon LEONARDO DA VINCI festgestellt. RUTHERFORD fand den Stickstoff, den er entsprechend der damaligen in der Chemie herrschenden Phlogiston-Lehre als „phlogistisierte Luft“ beschrieb. Der Wasserstoff wurde übrigens von manchen geradezu als Phlogiston angesehen. Nach der Phlogiston-Lehre wird bei einer Verbrennung Phlogiston frei; viele Metalle werden durch Dephlogistisierung zu „Kalk“ oder „Erde“, Eisen zu Rost. In der gleichen Zeit entdeckten unabhängig voneinander C. W. SCHEELE (1742–1786) aus dem damals schwedischen Stralsund (Abb. 3) und der Engländer J. PRIESTLEY (1733–1804) den Sauerstoff. Beide waren



Abb. 3: Geburtshaus von C. W. SCHEELE, Stralsund

Anhänger der Phlogiston-Lehre. SCHEELE sprach zunächst von Feuerluft – eine Bezeichnung, die auch in GOETHE'S Faust wieder auftritt:

*„Ein bisschen Feuerluft, die ich bereiten werde
Hebt uns behend von dieser Erde“*

(Faust I, 2069–70)

PRIESTLEY nannte das Gas „dephlogistisierte Luft“. Die Einführung der Waage zu Messung der Stoffumsätze führte alsbald zu Problemen. Wenn Eisen zu Rost wird, nimmt, wie A. LAVOISIER (1743–1794) erkannte, die Masse zu. LAVOISIER war von SCHEELE über dessen Experimente unterrichtet worden und stellte nun fest, dass die Feuerluft SCHEELES genau der Massenzunahme entsprach. So wurde er zum Begründer des Gesetzes von der Erhaltung der Masse. Wenn man Nichtmetalle verbrennt, also mit Sauerstoff umsetzt, und dann Wasser hinzufügt, so entstehen Säuren. Dies führte LAVOISIER zu der Ansicht, dass zur Bildung von Säuren der Sauerstoff notwendig sei und gab dem Element 1783 diesen Namen (eigentlich : Säurestoff, oxygène), der sich durchsetzte.

PRIESTLEY war 1791 als Anhänger der Französischen Revolution vom Mob aus Birmingham vertrieben worden und wanderte drei Jahre später in die USA aus. LAVOISIER wurde bekanntlich von der Revolution noch mehr betroffen: als Finanzbeamter und Anhänger der gemäßigten Revolutionäre wurde er 1794 während der Jakobiner-Herrschaft hingerichtet. Die Entdeckung des Sauerstoffs und ihre Problematik wurde von C. DJERASSI und R. HOFFMANN zu einem lesenswerten Theaterstück verarbeitet („Oxygen“).

SCHEELE – von Beruf Apotheker – hatte bei der Untersuchung von Salzsäure bereits erkannt, dass es auch Säuren ohne Sauerstoff gibt und im Rahmen dieser Arbeiten 1774 das Element Chlor gefunden, allerdings als „dephlogistierte Salzsäure“ beschrieben. SCHEELE ist auch Entdecker oder Mitentdecker von Mangan, Molybdän und Wolfram. Barium war zuerst von J.G. GAHN (1745–1818) als „Erde“ (nicht Metall) identifiziert und dann von seinem Schüler SCHEELE bearbeitet worden. Gefunden wurde es im Schwerspat, damals Bologna-Stein genannt: dieser hatte eine hohe Dichte, aber es ließ sich nichts Brauchbares daraus herstellen (Analogien zur aktuellen Hochschulsituation sind zufällig!). Wolfram wurde aus dem Mineral Tungstein (heute: Scheelit) gewonnen; darauf geht der englische Trivialname tungsten zurück. Wolfram ist ein Wort aus der Bergmannsprache.

Nach LAVOISIER kann die Zahl der Elemente nur empirisch ermittelt werden; sie sei nicht vorhersehbar. Seine Liste umfasste insgesamt 33 Elemente, darunter aber z.B. noch den „Wärmestoff“ und das Licht (Abb. 4). Er postulierte bereits die Metalle Natrium und Kalium, konnte sie aber nicht darstellen. Während es in diesen Fällen bis zur Gewinnung des Metalls nur wenige Jahrzehnte brauchte, dauerte es beim Fluor noch mehr als 100 Jahre.

	<i>Noms nouveaux.</i>	<i>Noms anciens correspondans.</i>
<i>Substances simples qui appartiennent aux trois règnes & qu'on peut regarder comme les élémens des corps.</i>	Lumière.....	Lumière. Chaleur. Principe de la chaleur. Fluide igné. Feu. Matière du feu & de la chaleur.
	Calorique.....	Air déphlogistiqué. Air empiréal. Air vital. Base de l'air vital. Gaz phlogistiqué.
	Oxygène.....	Mofete. Base de la mofete.
	Azote.....	Gaz inflammable. Base du gaz inflammable.
	Hydrogène.....	Soufre.
	Soufre.....	Phosphore.
<i>Substances simples non métalliques oxidables & acidifiables.</i>	Phosphore.....	Charbon pur.
	Carbone.....	Inconnu.
	Radical muriatique.	Inconnu.
	Radical fluorique.	Inconnu.
	Radical boracique.	Inconnu.
	Antimoine.....	Antimoine.
	Argent.....	Argent.
	Arsenic.....	Arsenic.
	Bismuth.....	Bismuth.
	Cobolt.....	Cobolt.
<i>Substances simples métalliques oxidables & acidifiables.</i>	Cuivre.....	Cuivre.
	Etain.....	Etain.
	Fer.....	Fer.
	Manganèse.....	Manganèse.
	Mercure.....	Mercure.
	Molybdène.....	Molybdène.
	Nickel.....	Nickel.
	Or.....	Or.
	Platine.....	Platine.
	Plomb.....	Plomb.
<i>Substances simples salifiables terreuses.</i>	Tungstène.....	Tungstène.
	Zinc.....	Zinc.
	Chaux.....	Terre calcaire, chaux.
	Magnésie.....	Magnésie, base du sel d'Epfom.
	Baryte.....	Barote, terre pesante.
	Alumine.....	Argile, terre de l'alun, base de l'alun.
	Silice.....	Terre filiceuse, terre vitrifiable.

Abb. 4: Lavoisiers Liste der Elemente aus *Traité Élémentaire de Chimie* 1789 (wiedergegeben in MARSHALL 2002)

MARGGRAF hatte schon 1764 bei Untersuchungen von Flusssäure einen Hinweis auf dieses Element erhalten; SCHEELE und PRIESTLEY hatten deren Ähnlichkeit zur Salzsäure diskutiert und AMPÈRE 1816 ein hypothetisches Element „Phtor“ eingeführt. Erst 1886 aber gelang H. MOISSAN die Herstellung des gasförmigen Fluors durch Elektrolyse. Fluor ist das reaktivste aller Elemente und kommt daher – laut Lehrbüchern – nicht frei in der Natur vor. Jedoch wurde 2012 in einer Flussspat-Varietät von Wölsendorf/Oberpfalz freies Fluor nachgewiesen. Das Mineral enthält Spuren von Uran, bei dessen Zerfall wird Strahlung frei, die das Fluorit-Gitter örtlich zerstört. Der dortige Flussspat riecht beim Zerschlagen nach Fluor und wird daher als Stinkspat bezeichnet (SCHMEDT AUF DER GÜNNE et al. 2012).

Ein früher Anhänger LAVOISIERS war M.H. KLAPROTH (1743–1817), der als Apotheker mit der Feinwaage gut umgehen konnte und als einer der Begründer der Analytischen Chemie gelten darf. Er untersuchte zahlreiche Mineralien und wurde dabei Entdecker oder Mitentdecker mehrerer Elemente (Abb. 5). Bekannt ist dies vor allem von Uran, das er 1789 fand und nach dem wenige Jahre zuvor (1781) entdeckten Planeten Uranus benannte. Allerdings hat er Urandioxid für das Metall gehalten. Tellur wurde zuvor von MÜLLER VON REICHENSTEIN und wahrscheinlich unabhängig vom ungarischen Botaniker und Chemiker P. KITABEL entdeckt, aber von KLAPROTH genauer erforscht. KLAPROTH hat auch den



Abb. 5: Gedenktafel für M.H. KLAPROTH im Dorotheenstädtischen Friedhof Berlin. Der Originalgrabstein ging bei einer Straßenverbreiterung verloren.

Natrolith vom Hohentwiel erstmals analysiert. Ab 1809 war er der erste Inhaber des Lehrstuhls der Chemie an der neu geschaffenen Universität Berlin.

Im Jahr 1798 entdeckte VAUQUELIN (1763–1829) die ebenfalls von KLAPROTH untersuchten Elemente Beryllium und Chrom. Letzteres erhielt seinen Namen aufgrund der Variabilität der Farbe seiner Verbindungen in Abhängigkeit von der Oxidationsstufe. Dasselbe gilt allerdings auch für das 1801 von M. DEL RIO (1764–1849) entdeckte Vanadium. DEL RIO war Studienkollege (in Freiberg) und Freund ALEXANDER VON HUMBOLDTS. (In Freiberg studiert hatten auch die Gebrüder ELHUYAR, die Entdecker des Wolframs.) Bleichromat war seiner leuchtenden Farbe wegen ein beliebtes Pigment, z.B. wurde es von VAN GOGH in seinen Sonnenblumen-Bildern verwendet. Mittlerweile ist hier durch partielle Reduktion eine Verfärbung nach braun zu beobachten, die den Kuratoren große Probleme macht. Nach einer anderen Quelle soll VAN GOGH auch Cadmiumsulfid (= Postgelb, früher Farbe der Briefkästen) verwendet haben, bei dem Abbauprodukte aus dem Firnis ebenfalls zu Veränderungen führen können. Aus der „Beryllerde“ konnten weder VAUQUELIN noch KLAPROTH das Beryllium-Metall gewinnen – dies gelang erst WÖHLER. Den Namen erhielt es von KLAPROTH nach dem Mineral Beryll, nachdem es zunächst wegen des süßen Geschmacks der (sehr giftigen!) Verbindungen von VAUQUELIN Glucinium genannt worden war. Aus Beryll leitet sich auch unser Begriff Brille ab – die ersten Brillen wurden im Altertum aus Beryll hergestellt; auch von NEROS Monokel wird dies berichtet.

Beryllium findet trotz seiner Giftigkeit und der Cancerogenität des Metallpulvers praktische Anwendung. Es ist sehr hart, aber leichter als Aluminium und daher für Raketenteile ein wichtiger Baustoff. Be-Cu-Legierungen bilden keine Funken und werden deshalb bei Ventilen für brennbare Gase verwendet.

Vanadium gehört zu den Elementen, deren biologische Funktionen lange unterschätzt wurden. Es gibt Enzyme, die V enthalten; auch in Diabetes-Pharmazeutika findet es Anwendung (REHDER 2010).

Der nächste wichtige Schritt in der Entwicklung der Vorstellung von den Elementen war die 1803 von JOHN DALTON (1766–1844) aufgestellte Atomhypothese. Sie war anfangs durchaus umstritten, ist aber die einfachste Erklärung für die Grundgesetze der Stöchiometrie. Das Gesetz der konstanten Proportionen (J.L. PROUST 1754–1826; 1797) besagt, dass die Verbindung von zwei Stoffen miteinander nur in einem ganz bestimmten Massenverhältnis erfolgt. Das Gesetz der multiplen Proportionen (DALTON 1808) gibt an, dass bei Auftreten mehrerer Verbindungen zweier Stoffe die Massenverhältnisse ihrerseits im Verhältnis einfacher ganzer Zahlen stehen. Daraus muss dann das relative Gewicht der kleinsten Teilchen und damit für die Elemente das Atomgewicht (Atommasse) zu ermitteln sein. Die Atome besitzen in den Verbindungen definierte „Wertigkeiten“. Es ist also eine fundamentale Aufgabe der Chemie, die Massen der Atome für alle Elemente zu bestimmen.

ELEMENTS					
	Hydrogen.	1		Strontian	86
	Azote	5		Barytes	68
	Carbon	5		Iron	56
	Oxygen	7		Zinc	56
	Phosphorus	9		Copper	56
	Sulphur	13		Lead	90
	Magnesia	20		Silver	190
	Lime	24		Gold	190
	Soda	28		Platina	190
	Potash	42		Mercury	167

Abb. 6: Elementsymbole und relative Atomgewichte von J. DALTON (wiedergegeben in MARSHALL 2002)

Für die Atommassen-Bestimmung erlangte in der Folgezeit die Regel von DULONG u. PETIT (1819) Bedeutung: das Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und Molmasse (relativer Atommasse) ist bei festen Elementen nahezu konstant.

Die Elemente bzw. ihre Atome stellte DALTON durch graphische Symbole dar und ermittelte (relative) Atommassen (Abb. 6). Die uns geläufigen Elementsymbole aus ein oder zwei Buchstaben führte 1813 J.J. BERZELIUS (1779–1848) ein, selbst auch Entdecker mehrerer Elemente. Mittlerweile hatte 1811 L.A. AVOGADRO, CONTE DE QUAREGNA (1776–1856) die kleinsten Teilchen von Verbindungen Moleküle genannt und bei der Untersuchung der Volumenverhältnisse der Reaktionen von Gasen das nach ihm benannte Gesetz aufgestellt: Gleiche Volumina (idealer) Gase enthalten bei gleichem Druck und gleicher Temperatur gleich viele Moleküle. Da von einigen Gasen die Masse der Moleküle bekannt war, ergab sich ein Molvolumen zu 22,4 l. Die große Bedeutung des Gesetzes wurde aber erst nach 1825 erkannt. Ausgehend von dieser Gesetzmäßigkeit konnte dann ST. CANNIZZARO (1826–1910) die molekularen Atommassen aus molaren Molekül-

massen zahlreicher Verbindungen der jeweiligen Elemente ermitteln und die in 1 mol Verbindung enthaltene Gramm-Menge des Elements durch quantitative Analyse bestimmen.

Die Zahl der Teilchen je Mol ist die Avogadro-Konstante: $N = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Da sie nicht vorstellbar ist, gibt es vielerlei Veranschaulichungen. So hätten z. B. 1 mol Honigmelonen von 15 cm Durchmesser das Volumen der Erde; 1 mol Centstücke, die gleichmäßig auf die Erdbevölkerung verteilt werden, würden es ermöglichen, ein Jahr lang 1 Million Euro je Sekunde zu spenden!

Mit Hilfe des Avogadro'schen Gesetzes war zu erschließen, dass die Teilchen der elementaren Gase aus je zwei Atomen bestehen; H_2 , N_2 , O_2 . Somit besteht ein grundsätzlicher Unterschied zwischen dem vorzeigbaren „elementaren“ Stoff und dem Elementsymbol (PANETH 1931), das für das entsprechende Atom steht. Nur die Edelgase sind einatomig; alle anderen Elemente liegen normalerweise als Moleküle vor und entsprechen daher nicht dem Elementsymbol!

Dies ist besonders gut zu erkennen an der *Allotropie* zahlreicher Elemente. Ein schönes Beispiel liefert der Kohlenstoff. Es gibt die „klassischen“ Formen Graphit (sp^2 -Kohlenstoff, extrem weich) und Diamant (sp^3 -Kohlenstoff). Dieser ist der härteste bekannte Naturstoff; Diamant kann nur mit Diamant geschliffen werden. Dies gelingt, weil das C-Gitter nicht in allen Raumrichtungen gleich stabil ist und die Diamantsplitter der Schleifscheibe zufällig angeordnet sind, so dass infolge der geringen Härteunterschiede ein Schleifeffekt zustande kommen kann. – Nahezu dieselbe Härte wie Diamant erreicht eine Modifikation des isoelektronischen Bornitrids (BN). Rheniumdiborid (ReB_2) kann Diamant ritzen und gilt daher als noch härter.

Zu diesen C-Modifikationen sind mittlerweile weitere getreten, die ganze Gruppen von Allotropen bilden:

Graphen (CHEN et al. 2012) besteht aus einer einzigen Ebene der Graphitstruktur – man spricht daher oft vom „zweidimensionalen Kohlenstoff“. Mathematisch ist das falsch; Graphen besitzt die Dicke einer Atomschicht, ist mechanisch stabil, aber gut biegsam und wenig reaktiv, hat hohe elektrische und Wärme-Leitfähigkeit und ist gasundurchlässig. Daher sind vielerlei Anwendungen in Erprobung (Nanotechnik, Elektroden usw.; MÜLLER 2012). Durch verschiedene Reaktionen kann es chemisch funktionalisiert werden – auch für Derivate sind Anwendungen in der Diskussion. Leider noch nicht vollständig beherrscht ist die vollständige Hydrierung zu Graphan, dem „zweidimensional unendlichen“ Kohlenwasserstoff. Entsprechend zu Graphen konnte mittlerweile auch Silicen hergestellt werden, das allerdings nicht eben gebaut ist (VOGT et al. 2012).

Kohlenstoff-*Nanoröhren* gibt es als einwandige und als mehrwandige („Zwiebelschalenbau“) Strukturen. Die einwandigen Röhren kann man sich als eingerolltes Graphen vorstellen. Je nach Anordnung des Netzes erhält man eine Sessel-, Zickzack- oder helikal-chirale Form der C-Atom-Anordnung – also unterschiedliche Modifikationen. Mehrere Herstellungsverfahren werden bereits technisch genutzt. Auch verzweigte Nanoröhren sind bekannt geworden. Einwandige Sesselform-Röhren sind Leiter, andere Halbleiter und kleiner dimensionierbar als Si-Halbleiter, so dass eine Anwendung in Mikrochips erprobt wird. Mehrwandige Röhren können leicht kleinere Gastmoleküle

aufnehmen. Sie könnten allerdings bei bestimmten Größen (über 29 μm Länge) asbestartige Effekte haben und gelten daher als nicht ungefährlich. – In Nanoröhren eingeschlossen werden können auch nachstehend beschriebene Fullerene, die dann wie Erbsensamen in einer Hülle liegen (VOSTROWSKY u. HIRSCH 2001); es liegen somit supramolekulare C-Allotrope vor.

Fullerene sind Hohlkugel-Strukturen aus Kohlenstoff, die nach dem Architekten BUCKMINSTER-FULLER benannt wurden, der Gebäudekonstruktionen gleichartiger Struktur geschaffen hatte (vgl. KULL 1994). Die erste Verbindung war die zunächst Buckminsterfulleren genannte Kugel mit 60 C-Atomen, die Fünfer- und Sechseringe bilden und zwei unterschiedliche C-C-Bindungen aufweisen. Das Molekül besitzt eine erhebliche Spannungsenergie, die sich aber auf die 60 Atome gleichmäßig verteilt. Bei C_{70} gibt es bezogen auf die Anordnung fünf Typen von C-Atomen. Es folgen C_{74} und weitere bis C_{96} sowie noch größere „Riesenfullerene“, die noch nicht gut charakterisiert sind (beschrieben bis C_{234}). Auch kleine Fullerene wurden hergestellt; das kleinste ist C_{20} mit 12 Fünferingen.

In Fullerene können leicht Fremdmoleküle oder Metallionen eingeschlossen werden. Man kann z. B. in den C_{60} -Käfig ein einzelnes Wassermolekül einbringen: $(\text{H}_2\text{O})_1@C_{60}$ (diese neue Art chemischer Verknüpfung wird durch @ wiedergegeben). Auf diesem Wege gelangte man erstmals zu einem isolierten Wassermolekül. Weiterhin kann man einzelne C-Atome des Käfigs durch ein Heteroatom ersetzen und erhält so Heterofullerene (z. B. $C_{59}\text{B}$, $C_{59}\text{N}$). Viele der Fullerene bilden kolloidale Lösungen und sind dann für den Menschen giftig. Daher sollten C_{60} -Präparate nicht unkontrolliert in die Umwelt gelangen.

Auch eine katalytische Spaltung von Fulleren zu schalenförmigen C-Molekülen ist möglich (WU et al. 2013). Dies leitet über zu weiteren C-Formen, die aus Carbiden durch Hochtemperaturbehandlung unter Chlor-Atmosphäre gewonnen werden. Je nach Herstellung ist die Poren-Größe dieser schlecht definierten „Carbide derived carbons“ (CDC) unterschiedlich (OSCHATZ et al. 2012). Bei dem beschriebenen Allotrop des Kohlenstoffs aus dem Rieskrater (EL GORESY u. DONNAY 1968) handelt es sich wohl um ein Fulleren-Gemisch.

Gut bekannt sind allotrope Formen des Sauerstoffs: neben dem normalen Sauerstoff O_2 gibt es Ozon O_3 . Als kurzlebige Form bei sehr hohen Drücken tritt Tetrasauerstoff O_4 auf; auch von einer metallischen Phase wird berichtet. Die Chemie bei sehr hohen Drücken wird aufgrund der experimentellen Möglichkeiten neuerdings zunehmend untersucht. Dadurch wird die anthropozentrische Situation der klassischen Chemie reduziert: die physikalischen Verhältnisse der Erdoberfläche liefern nur einen kleinen Ausschnitt aus der Chemie! Diesen sehen wir als die „normale“ Chemie an. Beim Sauerstoff ist darüber hinaus der kurzlebige Singulett-Sauerstoff $^1\text{O}_2$ und sind geladene Spezies (Superoxidion O_2^- , Peroxidion O_2^{2-}) auch biologisch von großer Bedeutung.

Beim Schwefel gibt es schon lange bekannte Modifikationen des S_8 (rhombisch, monoklin) und S_8 -Ringe sowie den gummielastischen aus S-Ketten bestehenden μ -Schwefel. Auch hier sind Hochdruckphasen mit z. T. Halbmetalleigenschaften bekannt.

Stickstoff bildet außer dem stabilen N_2 sowohl niedermolekulare, sehr kurzlebige Allotrope, als auch ein unter sehr hohen Drücken entstehendes Polymer N_x , das vermutlich explosiv zu N_2 zerfallen kann – es wäre ein idealer Sprengstoff. Isoelektronisch zum Superoxidion ist das N_2^{3-} (KAIM u. SARKAR 2009).

Von Phosphor gibt es zahlreiche Modifikationen. Der gut bekannte weiße Phosphor P_4 wird jährlich in Millionen t hergestellt. Roter Phosphor (amorph), violetter und schwarzer Phosphor sind Polymere. Auch eine metallische Form ist bekannt; darüber hinaus sind kurzlebige kleinmolekulare und hochmolekulare Allotrope beschrieben. Stickstoff liegt als N_2 vor, Phosphor lässt sich nur mit großer Mühe als P_2 (mit Dreifachbindung) erhalten – gemäß der Regel, dass ab der dritten Periode Einfachbindungen bevorzugt würden. Dies ist aber unzutreffend! In geeigneten Dimetallkomplexen können mit Mo und Cr Fünffachbindungen vorliegen (NGUYEN et al. 2005); dies ist natürlich nur bei Beteiligung von d-Orbitalen, also bei Übergangsmetallen möglich. Ein neuer Typus von Mehrfachbindung liegt bei Verbindungen mit Bor-Bor-Dreifachbindung vor (BRAUNTSCHWEIG et al. 2012).

Auch Metalle können in mehreren Modifikationen auftreten. Bei Zinn gibt es eine metallische Form, das β -Sn. Es kann sich bei $< 13,2^\circ\text{C}$ in eine halbmolekulare mit Diamantgitter, das α -Sn umwandeln. Kommt die Umwandlung in Gang, so schreitet sie fort, das Metall wird dadurch spröde und kann zerfallen („Zinnpest“). Auf diesem Weg sollen der Großen Armee Napoleons vor Moskau 1812 viele Uniformknöpfe verloren gegangen sein.

Im ersten Drittel des 19. Jhdts. wurden zahlreiche weitere Elemente gefunden – bis 1844 waren es bereits 64. Das häufigste Metall der Erdkruste, das Aluminium, war als besondere „Erde“ schon MARGGRAF aufgefallen. Versuche von DAVY, das Metall durch Elektrolyse zu gewinnen, schlugen fehl. Erst 1825 konnte OERSTED unreines Al und WÖHLER (1800–1882) 1827 reines pulverförmiges Al gewinnen. Schließlich gelang es WÖHLER auch, 1845 das Metall in kompakter Form zu erhalten. Aluminium war zunächst wertvoller als Gold, so dass sich NAPOLEON III. ein Essbesteck aus Aluminium anfertigen ließ. Das Washington-Monument in Washington D.C. erhielt eine Aluminium-Spitze; sie bleibt natürlich aus Gründen des Denkmalschutzes bestehen, obwohl immer wieder Reinigungs- und Reparaturarbeiten erfolgen müssen. Nach Entwicklung der Schmelzelektrolyse mit Hilfe von Kryolith 1886 wurde Aluminium eine Massenware. Es ist das am leichtesten zu recycelnde Metall, wodurch der hohe Energieaufwand für die Herstellung vertretbar wird. Offen ist die Frage, weshalb Al-Verbindungen trotz der Häufigkeit in der Erdkruste von Organismen nicht genutzt werden.

3. DER WEG ZUM PERIODENSYSTEM

Zu Anfang des 19. Jhdts. entstand die Idee des „natürlichen Systems“ zunächst für Pflanzen und Tiere und ohne konkreten Bezug zum Evolutionsvorgang. Auch bei den chemischen Elementen bestand die Frage einer verwandtschaftlichen Gliederung.

Ein erster Versuch in dieser Hinsicht wurde von J.W. DÖBEREINER (1780–1849) unternommen, dem Chemiker der Universität Jena. Er stellte Triaden (Dreiergruppen) verwandter Elemente zusammen, konnte aber nur 30 der ihm bekannten 53 Elemente einordnen, da er strikt an den Dreiergruppen festhielt. Als Beispiel seien die Alkali-Metalle Li-Na-K, Erdalkalimetalle Ca-Sr-Ba und Halogene Cl-Br-I genannt.

Na und K waren durch Schmelzelektrolyse von H. DAVY 1807 gewonnen, Lithium, das leichteste aller festen Elemente, war 1817 von J.A. ARFVEDSON (1792–1841) entdeckt worden. Li wird wegen seiner vielseitigen Verwendbarkeit zunehmend gebraucht; Li-Batterien haben (bezogen auf die Masse) eine hohe Energiedichte und sind daher besonders günstig. Derzeit findet intensive Forschung zum Thema der wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Batterien mit Li (-Graphit,-Silicid)-Anode und LiCo_2 -Kathode statt; viele andere Li-Kathoden-Materialien werden geprüft.

Es zeigte sich bald, dass die Zusammengehörigkeit von Elementen sich nicht auf Dreiergruppen beschränkte. Bei den Alkalimetallen war es allerdings erst die Methode der Spektralanalyse, entwickelt von G.R. KIRCHHOFF (1824–1887) und R.W. BUNSEN (1811–1899), die zur Entdeckung von Caesium 1860 und Rubidium 1861 führte. Im gleichen Jahr folgte noch Thallium. Alle diese Elemente erhielten ihren Namen nach der Farbe der charakteristischen Spektrallinie. Durch die Freiburger Chemiker F. REICH (1799–1883) und TH. RICHTER (1824–1898) wurde 1863 in der dortigen Zinkblende das Indium gefunden, das seinen Namen ebenfalls nach der hier leuchtend blauen Spektrallinie erhielt.

Indium findet derzeit in Flachbildschirmen Verwendung, so dass der Preis für 1 kg In innerhalb weniger Jahre von 100 US-\$ (2002) auf über 1000 US-\$ (2005) stieg – mittlerweile hat er sich zwischen \$ 700 und 1000 eingependelt.

Die Spektralanalyse widerlegte die wenige Jahre zuvor vom Philosophen A. COMTE geäußerte Ansicht, dass es der Wissenschaft nie gelingen werde, die chemische Zusammensetzung fremder Himmelskörper zu erfassen. Dies mag eine Warnung sein, in der Wissenschaft „Ignorabimus“ zu sagen, sondern den Worten des Mathematikers D. HILBERT zu folgen: „Es gibt keine unlösbaren Probleme“. (Eine Einschränkung in Mathematik und Wissenschaftstheorie durch das Gödel-Theorem bleibe hier unberücksichtigt).

In der Zeit nach DÖBEREINER hatten verschiedene Chemiker weitere Versuche zur Klassifizierung und Ordnung der Elemente unternommen. LEOPOLD GMELIN (1788–1853), der Begründer des bis heute bestehenden Handbuchs der Anorganischen Chemie, ging von der Triaden-Regel ab und konnte so weitere Elemente in Verwandtschaftsgruppen einordnen. MAX VON PETTENKOFER (1818–1901), uns heute bekannt als Begründer der wissenschaftlichen Hygiene, nutzte 1850 Beziehungen zwischen Äquivalentgewichten der Elemente zur Einteilung, nahm aber aufgrund der Fälle CN^- und NH_4^+ an, dass Elemente durchaus noch teilbar seien. Teilweise ähnliche Überlegungen, Äquivalentgewichte zur Klassifizierung

mit heran zu ziehen, stammen von J.B. DUMAS (1800–1884), der im französischen Kaiserreich Senator und Direktor der Münze war.

Auf Initiative von A. KEKULÉ fand 1860 die Erste Internationale Chemiker-Tagung (in Karlsruhe) statt. Organisatoren waren neben KEKULÉ dessen Freund A. WURTZ und der Karlsruher Chemiker K. WELTZIEN. Ein Hauptthema wurde während der Tagung die Ermittlung der richtigen relativen Atommassen; aufgrund der Darlegungen von ST. CANNIZZARO wurde die „Atomgewichts-Vereinbarung“ getroffen. Damit stand ein weiteres und eindeutiges Ordnungsprinzip für Elemente zur Verfügung und neue Anstrengungen für ein Ordnungsschema folgten.

Die Kenntnis genauer Atommassen war auch einer der Gründe für den Aufschwung der organischen Strukturchemie zu jener Zeit, die wiederum entscheidend für die Entwicklung der chemischen Industrie wurde: innerhalb weniger Jahre entstanden 1863 Bayer (Elberfeld) und 1865 BASF. Von A. W. von HOFMANN wurde 1867 die Deutsche Chemische Gesellschaft (heute: Gesellschaft Deutscher Chemiker, GDCh) gegründet.

Der Mineraloge und Geologe A.E. BÉGUYER DER CHANCOURTOIS (1820–1886) ordnete 1862 die Elemente (und was er dafür hielt) in einer Schraube an, genannt „Vis tellurique“. Dies war die erste Gliederung, bei der man von Perioden sprechen könnte. Die Eigenschaften eines Elements sah er als Funktion seiner Atome an.

Es folgte J.A.R. NEWLANDS (1837–1898) mit dem „Gesetz der Oktaven“ (1863/65). NEWLANDS hatte mit Garibaldis Freischärlern in Italien gekämpft, war aber dann wieder zur Chemie zurückgekehrt. Nach seinem „Gesetz“ wiederholen sich die Eigenschaften jeweils nach sieben Elementen. Er führte eine Art von Ordnungszahl ein und machte erstmals – allerdings fehlerhafte – Voraussagen zu Elementen. Da er seine Regel streng auslegte, entstanden bei der Ordnung der Elemente höherer Atommassen Probleme.

Infolge der Klassifikation durch NEWLANDS blieben die gleichzeitigen Arbeiten von W. ODLING (1829–1921) von 1863/64 weitgehend unbekannt. ODLING wollte eine „natürliche Klassifikation“ erreichen, für die er Beziehungen in seinen Gruppen aufgrund der Wertigkeiten (Oxidationszahlen) heranzog. Auch hat er in seinem System zahlreiche Plätze für noch unentdeckte Elemente freigelassen.

G.D. HINRICHS (1836–1923) äußerte 1867, dass eine natürliche Klassifikation der Elemente möglich sein müsse, weil die Atome unterschiedliche Gestalt hätten.

(JULIUS) LOTHAR MEYER (1830–1895) trat 1864 – damals in Breslau (später in Tübingen) – mit einem Versuch der Gliederung hervor, der ebenfalls die Wertigkeiten der Elemente heranzog (erschieden in „Die moderne Theorie der Chemie“). Dieses System war Ausgangspunkt für das von ihm unabhängig von MENDELEJEW gefundene Periodensystem, in dem er dann vor allem auch die Größe der Atome berücksichtigte und in seiner Atomvolumen-Kurve darstellte (1870).

4. VON MENDELEJEV ZU BOHR

D.I. MENDELEJEV (1834–1907; auf seiner deutschsprachigen Visitenkarte schreibt er sich MENDELEEFF) veröffentlichte 1869 in einer ausführlichen Publikation in russischer und einer Kurzfassung in deutscher Sprache sein Periodensystem der Elemente, das rasch weite Anerkennung fand und gültige Grundlage der Gliederung der Elemente geblieben ist (Abb. 7). Dadurch, dass er Plätze für noch unentdeckte Elemente frei ließ, konnte er alle bekannten Elemente mit ansteigenden Atomgewichten in (Verwandtschafts-)Gruppen einordnen. Ein Problem waren zunächst die „Atomgewichtsanomalien“: die Atommasse von Tellur ist höher als die von Iod, aber die Einordnung war aufgrund der chemischen Eigenschaften eindeutig. MENDELEJEV nahm an, dass die Atommassen nicht richtig bestimmt worden seien – das trifft aber nicht zu. Heute kennen wir die Ursache; es ist der Isotopie-Effekt (s. u.).

Eine gleichartige Anomalie findet man auch bei Co/Ni (von MENDELEJEV ab 1872 richtig eingeordnet) und später nach Entdeckung der Edelgase kam noch K/Ar dazu. K enthält das radioaktive Isotop ^{40}K , dessen Zerfall ^{40}Ar liefert und so die Atommasse von Argon erhöht.

Neben MENDELEJEV lehrte am Chemischen Institut in St. Petersburg (Abb. 8) sein Freund ALEXANDER P. BORODIN (1833–1887). Sie hatten sich beim Studienaufenthalt in

преимущественно найдти общую систему элементовъ. Вотъ этотъ опытъ:

			Ti=50	Zr=90	?=180.
			V=51	Nb=94	Ta=182.
			Cr=52	Mo=96	W=186.
			Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,4
			Fe=56	Ru=104,4	Ir=198.
			Ni=Co=59	Pt=106,6	Os=199.
			Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.
			Zn=65,2	Cd=112	
			?=68	Ur=116	Au=197?
			?=70	Sn=118	
			As=75	Sb=122	Bi=210
			Se=79,4	Te=128?	
			Br=80	I=127	
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204
		Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207.
		?=45	Ce=92		
		?Er=56	La=94		
		?Yt=60	Di=95		
		?In=75,6	Th=118?		

Abb. 7: Erstes von MENDELEJEV publiziertes Periodensystem 1869 (In: Journal der russischen chemischen Gesellschaft Bd. 1, 60–77, 1869; auf S. 70)

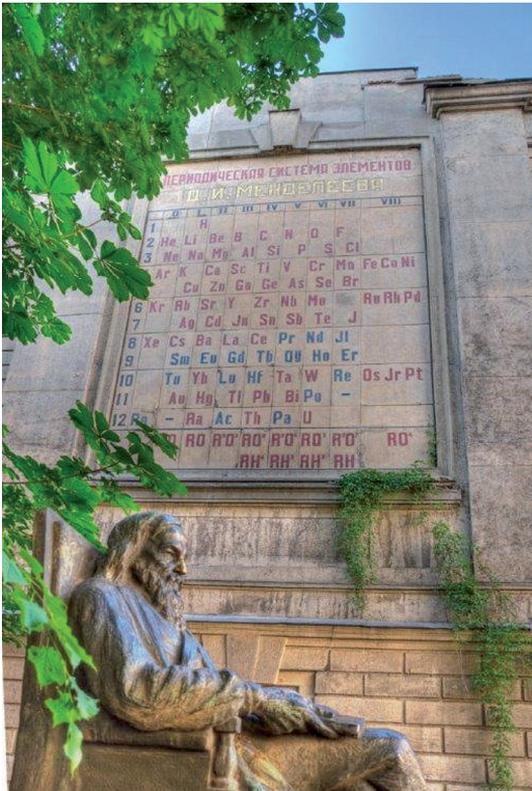


Abb. 8: MENDELEJEV-Denkmal mit Periodensystem an der Wand seiner Wirkungsstätte in St. Petersburg. (Bild aus Wikipedia, Urheber: Heidas)

Deutschland, wohl in Heidelberg, kennengelernt. BORODIN war zunächst Arzt gewesen, dann aber Chemiker geworden und außerdem Musiker (was ihm Mahnungen von Vorgesetzten eintrug) – als solcher ist er heute besser bekannt. Er hatte 1860 an der Tagung in Karlsruhe teilgenommen und hatte dort auch dirigiert. Nach seiner Rückkehr war er ab 1862 Professor der Organischen Chemie in St. Petersburg. Er entdeckte die Aldoladdition, stellte erstmals fluororganische Verbindungen her und wurde mit Arbeiten über Zuckergehalte in Pflanzen und deren jahreszeitliche Veränderung einer der Begründer der chemischen Pflanzenphysiologie. – Von der russischen Post wurde MENDELEJEV bei jeder geeigneten Gelegenheit durch Sonderbriefmarken geehrt, zuletzt anlässlich der 150-Jahr-Feier des Periodensystems 2009 (Abb. 9).

Der zunächst auffälligste Erfolg von MENDELEJEV war die ziemlich genaue Voraussage von Eigenschaften noch unbekannter Elemente, vor allem des Eka-Bor (Scandium), Eka-Aluminium (Gallium) und Eka-Silicium (Germanium). Letzteres

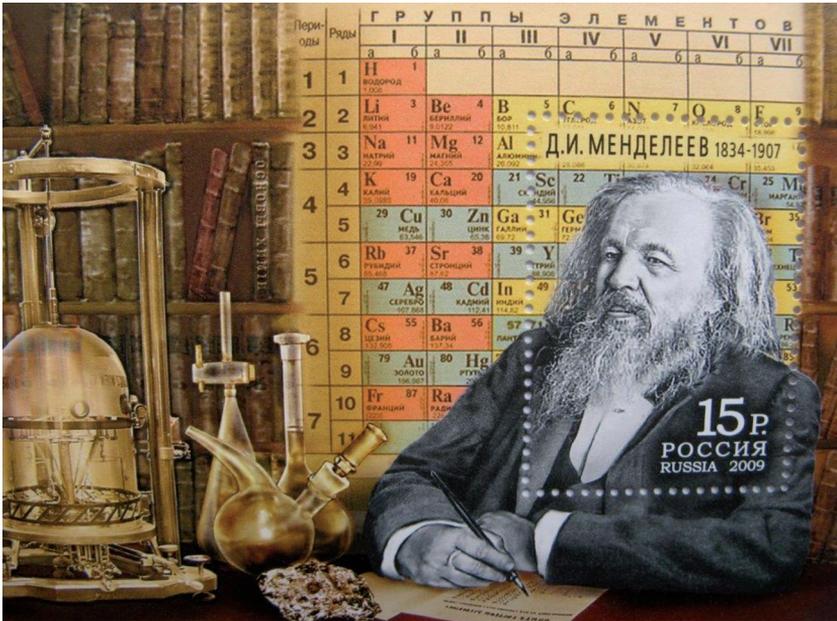


Abb. 9: MENDELEJEV-Block der russischen Post 2009

stand im Zentrum des Interesses von MENDELEJEV, wie aus einem Brief an seinen Freund ERLNMEYER hervorgeht. Tatsächlich konnten innerhalb weniger Jahre einige „Leerstellen“ gefüllt werden – die Benennung erfolgte der Zeit entsprechend mit „nationalen“ Namen: SOMMERFELD hat sie daher als „nationalistischen Elemente“ bezeichnet (CLUSIUS 1962). Zuerst wurde 1875 von F. LECOQ DE BOISBAUDRAN (1838–1912) das Gallium gefunden. Er lebte als Privatgelehrter in Cognac. Die Benennung des Elements wird normalerweise auf gallia = Frankreich zurückgeführt; jedoch heißt es auch, er habe das Element nach sich benannt: gallus = le coq, der Hahn. Gallium schmilzt in der Hand (Schmp. 29°C) und wird in der Legierung Galinstan (Ga/Sn) für Fieberthermometer verwendet.

Im Jahr 1879 folgte das Scandium, entdeckt von L. NILSON (1840–1899) in Mineralien, die auch Lanthanoide enthalten. Die Reindarstellung des Sc-Metalls erfolgte erst 1937! Schließlich wurde 1886 von CLEMENS WINKLER (1838–1902) in sulfidischem Silbererz von Freiberg das Germanium gefunden.

WINKLER ist außerdem bekannt für die Erfindung der Schwefelsäure-Herstellung nach dem Kontaktverfahren. In Freiberg hat er die intensive Labor-Ausbildung der Chemiker eingeführt. Die Studenten durften aber keine Laborkleidung tragen, denn „ein Chemiker muss so sauber arbeiten, dass er das auch im Frack tun kann“.

Unklar blieben im Periodensystem zunächst die Stellung des Wasserstoffs und die der Seltenen Erden. Heute kann aufgrund der Wertigkeit die seit Ende des 19. Jhdts. gebräuchliche Einordnung von Wasserstoff in die 1. Gruppe auch dadurch erhärtet werden, dass flüssiger Wasserstoff bei extrem hohen Drücken metallisch wird (z.B. im Inneren des Jupiters). Fester Wasserstoff wird zwar bei 320 GPa völlig undurchsichtig, aber nicht metallisch (HENSEL u. EDWARDS 1996). Die Chemie unter extrem hohen Drücken ist nicht nur für die Planetologie bedeutsam, sondern auch, um mögliche Reaktionen im Erdkern zu erkennen. So werden oberhalb 30 GPa die Elektronenhüllen von Alkalimetallen komprimiert; es entstehen z.B. die K-Ni-Verbindungen K_2Ni und K_3Ni (PARKER et al. 1996).

Über längere Zeit ein erhebliches Problem war die Einordnung der „Seltenen Erden“. Dies sind vor allem Lanthan und die Lanthanoiden, außerdem werden üblicherweise Sc und Y dazu gezählt. MENDELEJEV waren anfänglich vier dieser Elemente bekannt, aber es wurden fortlaufend mehr (v. HEVESY 1927) und es bestand keine Möglichkeit abzuschätzen, wie viele es geben könnte. In seinem 1891 publizierten ergänzten System ließ MENDELEJEV die Lanthanoiden einfach weg. Die Elemente wurden zunächst vor allem aus Mineralien vom Fundort Ytterby in Schweden isoliert, daher beziehen sich mehrere Namen darauf: Erbium, Terbium, Yttrium, Ytterbium. Ihre chemischen Eigenschaften erwiesen sich als außerordentlich ähnlich und mit Entwicklung der analytischen Trennverfahren entstand ein gewisser Namens-Wirrwarr. Darüber hat schon F. MUCK (1837–1891; Begründer der Kohlechemie) in einem Gedicht über die chemischen Elemente ironisch berichtet (MUCK 1889).

Der finnische Mineraloge J. GADOLIN (1760–1852) hatte im Mineral Ytterbit eine neue „Erde“ gefunden und 1794 Ytterbia genannt. Der Name wurde dann in Ytria geändert und das später isolierte Element erhielt dementsprechend den Namen Yttrium. Die Untersuchung eines Minerals von Bastnäs führte 1803 zur Auffindung von Cer(ium) durch BERZELIUS und HISINGER (1766–1852). Unabhängig von diesen fand auch KLAPROTH in Wolframerz von Bastnäs die neue „Erde“ Ochroit. C. G. MOSANDER (1787–1858) gelang es dann ab 1839 das Yttrium aufzuspalten in Yttrium, Erbium und Terbium und vom Cer das Lanthan und das Didymium abzutrennen. Die Vergabe des Namens Erbium und Terbium wurde erst 1860 aufgrund der Spektraldaten abgesichert und dabei gegenüber der Erstbeschreibung vertauscht. Weitere Untersuchungen durch J. CH. MARIIGNAC (1817–1894) führte zur Abtrennung von Gadolinium und von Ytterbium. Gadolinium war lange Zeit das einzige Element, das nach einer Person benannt war, bis dies bei den Transuranen üblich wurde. In der Gruppe der Ytter-Erden“ wurden dann von CLEVE 1879 das Thulium und das Holmium abgetrennt und LECOQ DE BOISBAUDRAN isolierte 1886 das Dysprosium. Aus Ytterbium gelang NILSON wie oben beschrieben die Gewinnung von Scandium und schließlich 1907 G. URBAIN (1872–1938) und unabhängig davon C. AUER VON WELSBACH (1858–1929) die Isolierung des Elements 71, das von URBAIN den Namen Lutetium erhielt. AUER hatte den Namen Cassiopeium gegeben, der in deutschsprachigen Ländern bis zum 2. Weltkrieg verwendet wurde.

Vom Didymium wurde von LECOQ DE BOISBAUBRAN 1879 das Samarium abgetrennt, das vermutlich schon 1878 von M. DELAFONTAINE (1838–1911) gefunden worden war (er hatte es Decipium genannt); 1880 wurde es von MARIIGNAC im Samarskit nachgewiesen. Das Didymium wurde dann von AUER VON WELSBACH 1885 in zwei Elemente aufgetrennt, denen er die Namen Praseodym und Neodym gab; aus Samarium gelang 1900 E. DEMARÇAY (1852–1903) die Isolierung von Europium.

Die großen analytischen Probleme – erkennbar z.B. daran, dass zur Gewinnung reiner Thulium-Verbindungen das Bromat ca. 15 000 mal umkristallisiert werden musste – führte dazu, dass im 19. Jhd. immer wieder Gemische als neue Elemente beschrieben wurden (z.B. Philippium, Mosandrum). Manche Autoren gingen dazu über, keine Namen zu vergeben, sondern nur lateinische bzw. griechische Buchstaben, so dass man die „Elemente“ leicht wieder verschwinden lassen konnte. AUER VON WELSBACH hat aufgrund von Spektrallinien noch 1911 geglaubt, weitere Lanthanoide gefunden zu haben. Nachdem er die „Entdeckung“ bereits widerrufen hatte, wurden von seinem zeitweiligen Mitarbeiter EDER nach 1915 sogar noch Namen dafür vorgeschlagen!

Die „Seltene Erden“ führten lange Zeit ein Schattendasein in der Chemie – der Student musste noch um 1960 nur die Namen und einige Eigenschaften auf der Grundlage der Oxidationszahlen kennen. Mittlerweile haben sie große technische Bedeutung gewonnen. Die Weltproduktionsrate betrug 1955 insgesamt ca. 1000 t, im Jahr 2011 bereits 140 000 t! Die Bezeichnung „Seltene“ ist eigentlich unzutreffend. Cer ist häufiger als Kupfer und die seltensten Lanthanoide, Europium und Thulium, sind in der Erdkruste immer noch häufiger als Silber. Allerdings ist die Verteilung sehr ungünstig; eine Gewinnung lohnt sich nur aus Mineralien relativ weniger Fundorte. Hauptlieferant ist derzeit China (das die Ausfuhr ab 2011 erheblich verteuert hat), aber nutzbare Lagerstätten gibt es auch in Russland, Brasilien, Kanada, USA und Australien. Kein Handy, kein LCD-Bildschirm, kein Hybridauto kommt ohne Seltene Erden aus. Eu ist in Flüssigkristallanzeigen enthalten, Er wird als Laserverstärker eingesetzt, Pr, Nd, Sm, Dy werden zur Herstellung sehr kleiner Keramik-Magnete benötigt. Keramik-Materialien aus Lanthanoid-Oxiden besitzen eine wasserabweisende Oberfläche. Samariumhexaborid SmB_6 ist ein Isolator, der aber an der Kristalloberfläche leitet. Recycling steht bei den Lanthanoiden immer noch sehr am Anfang (weltweit nur ca. 1%) und muss dringend verbessert werden.

Im Prinzip sind alle Metalle recycelbar; dies geschieht aber in sehr unterschiedlichem Maße, teils weil die verfügbaren Verfahren als ineffizient gelten, teils aber einfach aus „gesellschaftlichen Gründen“ nicht. Erhebliche Verbesserungen wären möglich. RECK u. GRAEDEL (2012) führen neben der Seltenen Erden insbesondere Li, Be, In, Te, Hf, Ta, Tl und Bi an, deren Recycling völlig unzureichend ist.

Mit Hilfe des Periodensystems lassen sich vielerlei Beziehungen zwischen den Elementen erkennen: diejenigen in den Gruppen und den Perioden sind trivial.

Weiterhin gibt es Diagonalbeziehungen: z. B. Li/Mg, Be/Al, B/Si; ferner „Rösselsprung-Beziehungen (entsprechend dem Rösselsprung beim Schachspiel) bei gleicher Oxidationszahl, z. B. Ag/Tl. Interessant sind ferner „Combo-Elemente“: Element aus Gruppe $n - x$ kombiniert mit Element aus Gruppe $n + x$ bilden Verbindungen, die den Elementen von Gruppe n entsprechen (z. B.: BN entspricht C, bei BN gibt es eine Diamantstruktur (Borazon) und eine graphitartige Struktur; GaAs ist ein Halbleiter ähnlich Ge). Durch die heutige Gruppenzählung von 1 bis 18 sind die Beziehungen zwischen Haupt- und Nebengruppen-Elementen weniger gut als früher zu erkennen. (Generelle Ähnlichkeiten bei Al/Sc; Ti/Sn; besonders auffällig aber in den hohen Oxidationszuständen: S^{VI}/Cr^{VI} ; Cl^{VII}/Mn^{VII}).

Im letzten Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts kam es zu mehreren Entdeckungen, die das Wissen über die Elemente und ihre Klassifizierung auf eine neue Grundlage stellten. Die *Entdeckung der Edelgase* führte zu einer ganz neuen Gruppe des Periodensystems, die sich zwanglos einordnen ließ. Den Anstoß gab die Entdeckung von Argon 1894 durch LORD RAYLEIGH (R.J. STUTT, LORD RAYLEIGH 1842–1919), Prof. am Cavendish-Laboratorium in Cambridge, und (Sir) W. RAMSAY (1852–1916). Letzterer konnte dann bis 1898 die weiteren Edelgase nachweisen. Bereits 1895 zeigte er, dass das schon 1868 in der Sonne spektralanalytisch gefundene Helium ebenfalls zu den Edelgasen gehört. Helium ist das einzige Element, das außerhalb der Erde entdeckt worden war. Ein weiteres, radioaktives Edelgas fanden E. RUTHERFORD u. F. SODDY 1898 und nannten es Emanation; auch der Name Niton wurde verwendet, bis 1932 die IUPAC den Namen Radon festlegte.

Der hohe Argongehalt der Atmosphäre ist durch den ^{40}K -Zerfall zu erklären; hingegen machen die Mengenverhältnisse von Kr und Xe noch immer Probleme. Zunächst wurde spekuliert, dass im Erdinneren unter hohen Drücken Xe-Verbindungen gespeichert wären – aber die Bedingungen dort sind eher reduzierend. Daher könnte auch umgekehrt mehr Kr im Mantel verblieben sein, während das Xe aus der Uratmosphäre ins Weltall entwichen sei.

Die Edelgase erwiesen sich als einatomige Gase und erhielten ihren Namen, weil sie keine Verbindungen eingingen. Erst 1962 gelang es, Edelgasverbindungen herzustellen. HOPPE konnte XeF_2 gewinnen; BARTLETT unabhängig davon das $Xe(PtF_6)$ aufgrund der Überlegung, dass die Ionisationsenergien von O_2 und Xe fast gleich sind und somit entsprechend dem $O_2^+ (PtF_6)^-$ eine Xe-Verbindung existieren müsse. Stabil sind Edelgasverbindungen aber nur mit den großen Edelgas-Atomen: von He gibt es bisher keine Verbindungen, von Ne nur sehr kurzlebige und von Ar können sie nur bei tiefen Temperaturen erhalten werden. XeF_2 wird heute als Fluorierungsmittel in der organischen Chemie eingesetzt. Mittlerweile sind außer Fluoriden und Oxiden auch Verbindungen mit Metall-Xenon-Bindung gut bekannt, so z. B. $[AuXe_4]^{2+}([Sb_2F_{11}]^-)_2$.

Die Entdeckung der Radioaktivität bei der Untersuchung der Uransalze durch H. BECQUEREL (1852–1908) führte zu tiefgreifenden Veränderungen im Verständnis der Elemente. Als Schüler von BECQUEREL führten PIERRE CURIE (1859–1906) und seine Ehefrau Marie SKŁODOWSKA-CURIE (1867–1934) weitere Untersuchungen

radioaktiver Substanzen durch. Sie fanden, dass die Strahlung reiner Uransalze viel schwächer war als die des Minerals Pechblende und folgerten, dass in diesem ein weiterer Strahler enthalten sein müsse. Zunächst entdeckte MARIE CURIE 1898 das Polonium, das sie nach ihrem Heimatland benannte, und wenige Monate danach das Radium. Dessen Entdeckung war die Grundlage ihrer Dissertation. Auch der Begriff „radioactivité“ stammt von M. CURIE.

Mit Polonium wurde 2006 der ehemalige KGB-Agent LITVINENKO durch einen Geheimdienst ermordet. ^{210}Po ist ein energiereicher α -Strahler, in der Handhabung daher ziemlich ungefährlich (ein Blatt Papier genügt zur Abschirmung der Strahlung), aber bei Aufnahme in den Körper durch Zerstörung von Zellen tödlich.

Die weiteren Untersuchungen zur Radioaktivität führten zur Entdeckung von Zerfallsreihen der radioaktiven Elemente, wodurch deren Zahl immer weiter zunahm – bis 1911 waren es 30 geworden – und nun ebenfalls zu einem Problem der Einordnung ins System wurden. Als stabiles Element am Ende der Zerfallsreihen steht Blei.

Die Lösung des Ordnungsproblems der Elemente kam durch die Erforschung des Atombaus. E. RUTHERFORD (erster Baron VON NELSON; 1871–1937) hatte 1911 festgestellt, dass die Atome einen sehr kleinen massereichen Kern und eine Hülle (aus Elektronen) besitzen. Atome sind also strukturiert und nicht die kleinsten Einheiten der Materie. Zwei Jahre später veröffentlichte auf dieser Basis N. BOHR (1885–1962) sein Atommodell. Die Elektronen der Atomhülle seien in „Schalen“ angeordnet, da entsprechend der Quantentheorie nur diskrete Energiezustände erlaubt sind. Damit waren die Spektralserien des Wasserstoffs zu erklären. Die Auswertung der Spektraldaten vieler Elemente durch BOHR und SOMMERFELD führten zu noch genaueren Aussagen über Energieniveaus und zu den Bezeichnungen s/p/d/f-Elektronen. Somit war klar, dass das Periodensystem auch etwas über die Struktur der Atome aussagt. In den folgenden Jahren entstand dann durch die Quantenmechanik ein neues, abstrakteres Bild vom Atombau.

Im Jahr 1913 hatte F. SODDY (1877–1956) gezeigt, dass es in der Masse unterschiedliche, aber chemisch nicht trennbare Atome gibt, die also dem gleichen Element zuzuordnen sind und nannte sie Isotope. Der Physiker THOMSON konnte bei genauer Untersuchung des Spektrums von Neon darin die Isotope nachweisen. Damit konnten nun die meisten der „neuen“ Elemente aus den Zerfallsreihen bereits bekannten Elementen zugeordnet werden. Vollständig verstanden wurde die Isotopie erst mit der Entdeckung des Neutrons 1932. Die Chemiker G. VON HEVESY (1885–1966) und F.A. PANETH (1887–1958) entwickelten auf der Basis der Isotopie sofort ein neues Verfahren, um ein Element – auch in seinen Verbindungen – zu verfolgen: Die Isotopen-Markierungsmethode durch Zugabe eines radioaktiven Isotops erlaubt die Erkennung an beliebiger Stelle und in unwägbar Mengen.

Die Entdeckung des Radiums und seiner intensiven Strahlung löste alsbald einen Boom aus: es gab Radium-Zigarren, Radium-Bier, Radium-Schokolade, Ra-

dium-Zahnpasta, Radium-Kondome. Erst in den zwanziger Jahren wurden die Gefahren der Strahlung erkannt, zuerst bei Arbeiterinnen, die Leuchtfarben herstellten. Aber bis um 1955 wurden noch Uhren mit Leuchtziffern auf der Basis eines Ra-Präparats hergestellt.

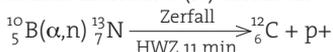
Die Entdeckung der Röntgenstrahlung erfolgte unabhängig von den ersten Forschungen zur Radioaktivität. Es zeigte sich aber rasch, dass bestimmte Strahlen (γ -Strahlen) nur in der Wellenlänge von den Röntgenstrahlen verschieden waren. Man fand dann, dass man durch energiereiche Elektronen von allen Elementen charakteristische Röntgenspektren erhalten kann, wenn durch Energieaufnahme Elektronen aus der Atomhülle freigesetzt werden. Bei Rückkehr eines freien Elektrons auf den energieärmsten möglichen Zustand der Elektronenhülle des Atoms (das 1s-Niveau) wird Röntgenstrahlung einer bestimmten Wellenlänge abgegeben und liefert so die K_{α} -Linie des Röntgenspektrums. Diese zeigt eine charakteristische Gesetzmäßigkeit, die ebenfalls 1913 von H. MOSELEY (1887–1915, gefallen in Gallipoli, Dardanellen) aufgefunden wurde: Die Wurzel aus der reziproken Wellenlänge der K_{α} -Linie ist proportional der Zahl positiver Ladungen im Atomkern. Mit Hilfe dieses Gesetzes konnte nun jedes Element eindeutig eingeordnet werden; die Kernladungszahl entspricht der Ordnungszahl im Periodensystem. Damit wurde erkannt, dass es genau 14 Lanthanoide gibt, die sich einen Platz im üblichen Periodensystem teilen. MOSELEY zeigte, dass URBAINS Celtium nicht Element 72 sein konnte (HEIMANN 1967). Nun konnte man eindeutig angeben, wo das System noch unbesetzte Plätze aufwies. Die unmittelbare Verknüpfung von Moseleys Gesetz mit dem Atommodell erfolgte durch BOHR auf der Basis der Theorie von W. KOSSEL.

5. SUCHE NACH FEHLENDEN ELEMENTEN

Das Element 91 fanden O. HAHN (1879–1968) und L. MEITNER (1878–1968) im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie (Abb. 10 u. 11) in einer Uran-Zerfallsreihe und nannten es Protactinium; es war zuvor schon unabhängig von K. FAJANS (1887–1973) als „Brevium“ beschrieben worden. Die von Hahn untersuchte Chemie in wässriger Lösung legte eine Einordnung in die Niob-Tantal-Gruppe nahe.

Im Jahr 1919 konnte Rutherford zeigen, dass bei Beschuss von Stickstoff mit α -Strahlen ein Sauerstoff-Isotop entsteht: ${}^{17}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$

Es findet eine Kernumwandlung derart statt, dass ein Isotop eines Elements in ein Isotop eines anderen übergeht. Mit dieser „Transmutation“ war der Traum der Alchemisten Realität geworden: man kann Elemente künstlich herstellen. In Fortsetzung derartiger Untersuchungen konnte IRÈNE JOLIOT-CURIE (1897–1956), die Tochter von M. CURIE, im Jahr 1934 erstmals ein radioaktives Isotop eines stabilen Elements (N) erhalten:



Heute kennt man eine riesige Zahl derartiger radioaktiver Isotope. Isotope unterscheiden sich in der Neutronenzahl ihrer Kerne. Solche mit zu wenigen oder zu vielen Neutronen sind instabil. Jedes Jahr werden weitere radioaktive Isoto-



Abb. 10: Ehemaliges Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem, erbaut 1913. Wirkungsstätte von HAHN, MEITNER, STRASSMANN. Die Abteilung Radiochemie befand sich im Erdgeschoss.

pe beschrieben; allein 2011 waren es rund 100. Insgesamt sind derzeit ca. 3000 Nuklide bekannt, davon sind nur 288 stabil oder praktisch stabil (ERLER et al. 2012). Lange galt ^{209}Bi als schwerstes stabiles Isotop; es ist aber ein α -Strahler mit extrem langer Halbwertszeit (ca. 20 Milliarden Jahre). Das schwerste nicht radioaktive Isotop ist nach heutiger Kenntnis ^{208}Pb ; der schwerste derzeit überhaupt bekannte Kern ist $^{294}_{118}\text{Uuo}$. Die protonenreiche Grenze existenzfähiger Kerne (d. h. Kerne mit einer Mindestlebensdauer $> 10^{-14}$ s) ist bis zum Uran hin ziemlich gut bekannt, die neutronenreiche Grenze hingegen kaum. Dies zeigt bereits ein Problem auf: Neutronenüberschuss ist bei der Herstellung von Nukliden schlecht zu erreichen.

Die Untersuchungen der Verteilung natürlicher Isotope haben vielseitige Anwendungen erfahren. Dem Botaniker ist gut bekannt, dass das Verhältnis $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ es ermöglicht, biochemische Vorgänge bei der Photosynthese zu erkennen. Neuerdings machen Archäologie und Geochemie zunehmend von Isotopendaten Gebrauch. Die Isotopenchemie liefert Befunde bis zurück zur Entstehung der Planeten. Die in der Erdkruste angereicherten Elemente sind später als chondritisches Material in die entstehenden Planeten gelangt, nachdem deren Kerne bereits gebildet waren. Die Akkretion des chondritischen Materials erfolgte 5–150 Mill. Jahre nach Entstehung



Abb. 11: Jüngere Physiker und Chemiker in Berlin 1920 anlässlich eines Vortrags von N. BOHR. Von links nach rechts: GUSTAV HERTZ, HANS GEIGER, WILHELM WESTPHAL, LISE MEITNER, GEORG V. HEVESY, OTTO HAHN, OTTO V. BAYER, E. WAGNER, NIELS BOHR (aus dem Ausstellungskatalog „Die Geschichte der Entdeckung der Kernspaltung“ 1989; Ausschnitt aus Bild zu Kat.-Nr. 106)

des Sonnensystems (DALE et al. 2012). An Hf-Isotopen-Muster ist zu erkennen, dass sich vor 3,2 Mia. Jahren auf der Erde die Dynamik des Kontinentwachstums stark verändert hat – vermutlich gab es zuvor keine Plattentektonik heutiger Form (NAERAA et al. 2012).

Die Suche nach den Elementen der noch freien Plätze führte 1923 zur Entdeckung von Hafnium durch D. COSTER (1889–1950) und v. HEVESY. Hf war in Zirkonmineralien infolge seiner großen chemischen Ähnlichkeit, die auf die Lanthanoiden-Kontraktion zurückgeht, zuvor übersehen worden.

Im Jahr 1925 wurde Element 75, Rhenium durch W. NODDACK (1893–1960), seine spätere Frau I. TACKE (1896–1978) und O. BERG (1873–1939) aufgefunden. Es war aber möglicherweise früher schon entdeckt und fälschlicherweise als Element 61 („Nipponium“) beschrieben worden. Für das Element 43 konnte das Ehepaar NODDACK zwar die typische, von MOSELEY vorhergesagte Röntgenlinie finden, aber eine Anreicherung des „Masurium“ genannten Elements gelang nicht. Frühere „Entdeckungen“ des Elements seit 1877 („Davyum, Lucium“) waren bereits lange zuvor als Irrtümer erkannt worden. Element 61 wurde von einer Gruppe in den USA beschrieben und „Illinium“ genannt; an seiner röntgenspektroskopischen Analyse waren auch Angehörige der TH Stuttgart unter GLOCKER und DEHLINGER beteiligt. Jedoch erwies sich die Entdeckung dann als Irrtum, ebenso wie eine weitere, bei der das Element den Namen „Virginium“ erhalten sollte.

In den zwanziger und dreißiger Jahren wurden zahlreiche verschiedene Formen von Periodensystemen entwickelt (Übersicht bei MAZURS 1957, s. auch VAN SPRONSEN 1969); am häufigsten verwendet, vor allem für Unterrichtszwecke, waren jene von von ANTROPOFF und von BOHR. Erinnert sei daran, dass auch ein Mitglied unserer Gesellschaft, F. KIPP (Nachruf Jh. Ges. Naturkde. Württemberg 153, 273–280, 1997), 1942 eine andersartige Darstellung publizierte, in der allerdings um der Schönheit willen die Lanthanoiden weggeblieben sind (Abb. 12).

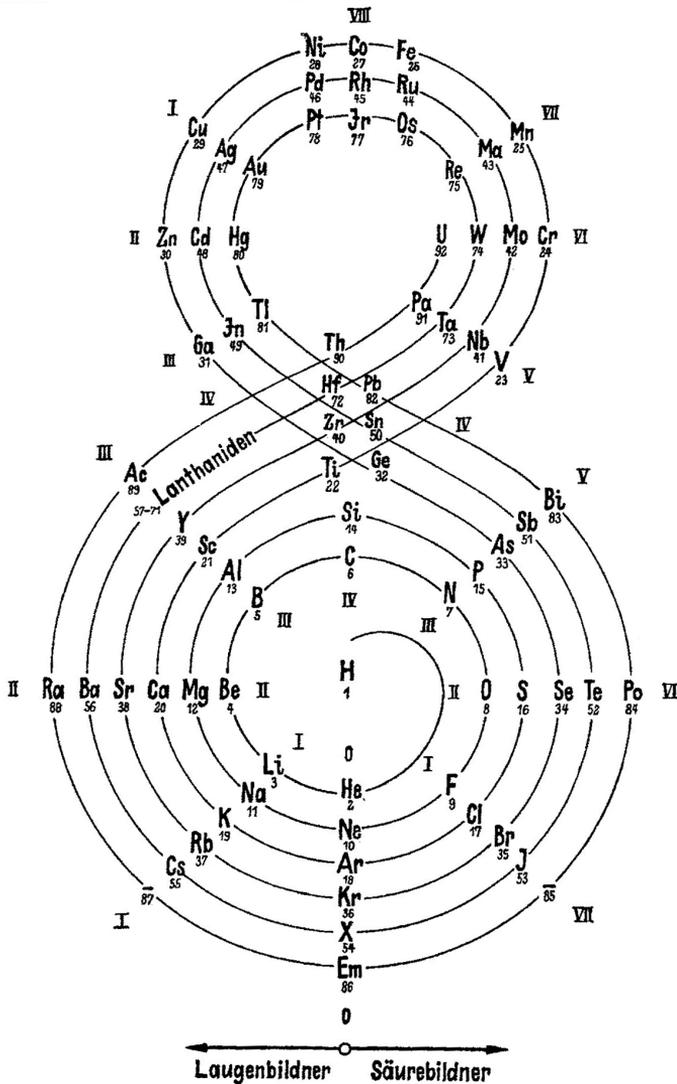


Abb. 12: Periodensystem als Lemniskate von F. KIPP (aus KIPP 1942)

Das geschilderte Problem mit dem Element 43 führte zum Versuch von E. SEGRÈ (1905–1989), es durch Elementumwandlung herzustellen. Von einem Forschungsaufenthalt in Berkeley hatte er bestrahltes Molybdän mitgebracht und arbeitete es nun in seinem Institut in Palermo auf. Dadurch gelang ihm erstmals die Isolierung eines künstlich hergestellten Elements, das daher Technetium genannt wurde – zunächst war der Vorschlag Panormium diskutiert worden. Tc wurde 1961 schließlich auch aus einem natürlichen Vorkommen, der Pechblende, isoliert, allerdings in nicht wägbaren Mengen. Heute fällt Tc in Reaktoren in erheblicher Menge an und wird in der Radiomedizin in großem Umfang eingesetzt. Infolge der Kurzlebigkeit des hierfür eingesetzten Isotops muss dazu ein Reaktor in der Nähe verfügbar sein; in Deutschland ist deshalb zukünftig mit einem Mangel zu rechnen, so dass man auf andere Strahler wird ausweichen oder die Patienten an den wenigen Standorten von Forschungsreaktoren oder in Frankreich wird behandeln müssen.

Von Tc kann es entsprechend der von J. MATTAUCH 1934 aufgestellten Regel kein stabiles Isotop geben. Die Regel besagt, dass von zwei Kernen, die sich nur um ein Proton (eine Kernladung) unterscheiden, bei gleicher Massenzahl einer instabil ist. Da die stabilen Isotope der benachbarten Elemente Mo und Ru die Möglichkeiten komplett abdecken, bleiben für Tc nur instabile Isotope. Dasselbe gilt auch für Element 61.

Im Jahr 1939 konnte MARGUERITE PEREY (1909–1975), eine Mitarbeiterin von I. JOLIO-CURIE, bei der genauen Untersuchung des Ac-Zerfalls das kurzlebige (HWZ 22 min) Alkalimetall Francium (Element 87, mit dem größten bekannten Atomradius!) nachweisen. M. PEREY war die erste Frau, die 1962 in die Académie Française aufgenommen wurde – eine Ehre, die Mutter und Tochter CURIE noch verweigert worden war. Die Gesamtmenge an Fr in der Natur liegt bei ca. 100 g – untersucht wurde es vor allem an künstlich gewonnenen Isotopen.

Das Element Nr. 85 (Astat) konnte in einer Zerfallsreihe erst nachgewiesen werden, nachdem 1940 die künstliche Herstellung gelungen war. Es ist das seltenste Element auf der Erde. Seine Chemie kann nur an einem längerlebigen (HWZ: 8 Std.) künstlichen Isotop untersucht werden und infolge der hohen Strahlungsintensität (2000 Ci/mg) nur an extrem verdünnten Lösungen (ca. 10^{-8} mol), denn bei höheren würde Wasser radiolytisch gespalten. Es ist das schwerste Nichtmetall und hat bereits Halbmetallcharakter.

Das Element 61 wurde erstmals 1941 als Produkt der Urankern-Spaltung in Oak Ridge nachgewiesen. Zunächst sollte es Cyclo(tro)nium heißen, aber 1945 wurde der Name geändert in Promethium. Das Metall wurde erstmals 1963 gewonnen. Es ist ein schwacher Strahler und wird derzeit in kg-Mengen hergestellt und z.B. als Energiequelle in Herzschrittmachern eingesetzt. Auch in der Natur entstehen durch Kernreaktionen Pm-Isotope, die Gesamtmenge in der Erdkruste beträgt ca. 12 kg.

6. „TRANSURANE“ UND TRANSURANE

Im Jahr 1934 wurde eine Entdeckung von Element 93 („Bohemium“) beschrieben, aber von Frau NODDACK rasch widerlegt. Um die gleiche Zeit unternahm E. FERMI (1901–1954) Versuche, durch Bestrahlung von Uran mit Neutronen zu Elementen höherer Ordnungszahlen zu gelangen. Da ein anderer Autor die Ansicht vertreten hatte, es seien dabei Protactinium-Isotope entstanden, nahmen O. HAHN und L. MEITNER entsprechende Versuche in großem Umfang auf. Sie erhielten nach chemischer Trennung Atome, die sie als Transurane mit den Ordnungszahlen 93–96 ansahen, bis sich Ende 1938 herausstellte, dass es Spaltprodukte von Uran waren. Den Befund der Kernspaltung publizierten O. HAHN und F. STRASSMANN (1902–1980) im Januar 1939; die theoretische Erklärung lieferten wenig später die im Sommer 1938 nach Schweden emigrierte L. MEITNER und ihr Neffe O. FRISCH (Bericht dazu schon bei HAHN 1940). Von MEITNER stammt auch die Bezeichnung Kernspaltung. Übrigens hatte Frau NODDACK bereits 1934 spekuliert, dass ein Zerfall des Urankerns möglich sei – man möge daher bei den Produkten auch auf Elemente niedriger Ordnungszahl prüfen.

^{235}U wird durch relativ energiearme Neutronen gespalten. Bei Beschuss von Uran mit energiereichen Neutronen entstehen tatsächlich Transurane. So wurde 1940 von E.M. McMILLAN (1907–1991) und P.U. ABELSON (1913–2004) das erste Transuran, Neptunium, gewonnen (Planet Neptun folgt auf Uranus). HAHN und STRASSMANN konnten dies bestätigen (HAHN 1940, STRASSMANN 1941, STRASSMANN u. HAHN 1942) und zeigen, dass die Chemie des Elements nicht eindeutig einem Homologen des Re entspricht.

Die weitere Forschung in den USA auf diesem Gebiet erfolgte dann geheim und die Ergebnisse wurden erst nach Kriegsende publiziert. Die leitenden Chemiker der Forschergruppe waren G. T. SEABORG (1912–1999) und A. GHIORSO (1915–2010). Vom Element 94, das entsprechend der Abfolge der Himmelskörper den Namen Plutonium erhielt, wurden bis heute Hunderte von Tonnen hergestellt. Es ist das Element mit dem schlechtesten Ruf. Mehrere Isotope zeigen hohe Strahlungsintensität, z. B. erhitzt sich ^{238}Pu dadurch selbst zur Rotglut. Das langlebige ^{239}Pu ist spaltbar und in der überwiegenden Zahl von Atombomben enthalten. Pu ist leicht zu handhaben: eine Bombe mit ^{235}U (Hiroshima) erfordert eine Isotopentrennung, eine Pu-Bombe (Nagasaki) nur die chemische Abtrennung des im Reaktor gebildeten ^{239}Pu .

Eine wägbare Menge wurde erstmals 1942 in Form von 2,77 g PuO_2 hergestellt. Sie wird in der Lawrence Hall of Science in Berkeley aufbewahrt. Auch Verbindungen sehr langlebiger Pu-Isotope sind infolge der hohen Giftigkeit und darüber hinaus bei Aufnahme in Zellen wegen der Strahlung gefährlich (vgl. Polonium). Pu wird über das Eisen-Transportsystem Transferrin in die Zellen aufgenommen. HAHN konnte immerhin noch 1948 schreiben, dass das langlebige Pu chemisch gut handhabbar sein müsse, weil seine Strahlung nur schwach sei. Auch in der Natur kommt Pu vor; in Uranmineralien ist es gerade noch nachweisbar. In der Erdkruste sind insgesamt ca. 25 kg Pu enthalten; weit mehr als das Zehnfache erreichte die Erdoberfläche zusätzlich aus dem *fallout* der Kernwaffenversuche

bis 1963. In der Uranlagerstätte von Oklo/Gabun fand vor ca. 2 Mia. Jahren eine natürliche Kettenreaktion statt, bei der ca. 1 t ^{239}Pu entstand. Dieses ist längst zerfallen, aber an langlebigen Zerfallsprodukten ist die damalige Reaktion gut zu belegen.

Plutonium wurde lange Zeit als Energiequelle für Herzschrittmacher eingesetzt und in gleicher Funktion wird es in Raumsonden verwendet – so auch in der Sonde, die 2015 den Namenspatron Pluto erreichen soll. Eher kurios ist die Nutzung von Plutoniumnitrat als homöopathisches Arzneimittel (von Helios Homoeopath. Pharm.), über die ALDERSEY-WILLIAMS (2011) berichtet. Eine Placebo-Wirkung hält der Verfasser dieser Arbeit bei sicher ungefährlicher D₃₀-Potenzierung nicht für ausgeschlossen – auch wenn man vermutlich heute eher von einem Nocebo-Effekt ausgehen muss. Die Ansicht, Wasser habe ein Gedächtnis (nur dann wären solche Potenzierungen vielleicht sinnvoll), hat es zwar einmal bis in die Zeitschrift Nature gebracht (E. DAVENAS et al. 1988) – es handelt sich aber um reine Scharlatanerie!

Die folgenden Elemente 95 und 96 wurden durch Neutroneneinfang-Reaktionen 1944 erhalten. Ihre chemische Untersuchung belegte die Existenz einer zuerst von SEABORG postulierten Gruppe der Actinoiden, bestehend aus den Elementen 89–103, entsprechend der Lanthanoid-Gruppe. Dementsprechend erhielt Element 95 (homolog zu Europium) den Namen Americium und 96 (homolog zu Gadolinium) die Bezeichnung Curium. Die erste Bekanntgabe der Existenz dieser Elemente erfolgte im November 1945 durch SEABORG in einem Radiointerview. Bei den Actinoiden erfolgt wie bei den Lanthanoiden ein Einbau von f-Elektronen. Ein solcher Einbau war schon von BOHR 1922 angenommen worden; er wollte ihn allerdings aufgrund der Chemie des Urans erst mit dem Element 94 beginnen lassen. Americium wird zumindest in den USA in Rauchmeldern genutzt: die Strahlung ionisiert Luft, deren Verunreinigung führt sofort zu einer Veränderung.

Es folgten die Elemente Berkelium (1949) und Californium (1950). Bei diesen waren zunächst viele Namen diskutiert worden, wie SEABORG später berichtete. Californium ist das schwerste Element, für das es noch eine Anwendung gibt: als starker Neutronenstrahler in der Neutronenaktivierungsanalyse und in der Medizin zur Tumorbehandlung. Die Chemie der Actinoiden in wässriger Lösung wird intensiv untersucht; sie ist auch wichtig im Rahmen der Langzeitsicherung der Endlagerung radioaktiven Materials.

Die folgenden Elemente 99, Einsteinium, und 100, Fermium, wurden zunächst im *fallout* der Wasserstoffbombe Mike (1. 11. 1952) nachgewiesen und erst 1954 hergestellt. Für Element 99 wurde daher auch der Name Phoenicium (aus dem Feuer) diskutiert. Eine Reihe anderer Namen beziehen sich wohl auf Falschmeldungen (99: Athenium; 100: Centurium). Vorwiegend wurden die Elemente von hier ab nach Persönlichkeiten benannt.

Actinoide stellen einen erheblichen Teil der langlebigen Isotope, die ins Endlager für radioaktive Abfälle gelangen müssen. Man könnte durch Neutronenbestrahlung nach einer Aufarbeitung größere Anteile in kürzerlebige Isotope umsetzen und so Einlagerungszeit und – Menge erheblich reduzieren, bis auf weniger als 10 000 Jahre. Die Methode wird bei der technischen Wiederaufbereitung von Pu in La Hague und Sellafield genutzt, ist allerdings für Rest-Abfälle derzeit teurer als die geplante Endlagerung und erfordert auch den Betrieb mindestens eines starke Neutronenstrahlen liefernden Reaktors.

Im Jahr 1955 wurde das Mendelevium als erstes Element atomweise durch Kernfusion hergestellt; dies gilt auch für alle weiteren Transfermium-Elemente. Für die Fusionsversuche gibt es zwei verschiedene Verfahren. Bei der „kalten Fusion“ werden möglichst neutronenreiche Projektile auf ein Target geschossen, um den Neutronenmangel des Fusionskerns möglichst gering zu halten (Beispiel: ^{58}Fe -Kerne auf ^{208}Pb schießen; führt zum angeregten ^{266}Hs -Kern, der dann in ^{265}Hs übergeht). Bei der „heißen Fusion“ werden möglichst neutronenreiche Actinoide als Target eingesetzt und diese mit Projektilen beschossen. Es werden dann vom angeregten Fusionskern Neutronen abgegeben; die gebildeten Kerne sind neutronenreicher, so dass längere Halbwertszeiten zu erwarten sind (Beispiel: ^{26}Mg -Kern auf ^{248}Cm schießen; es entsteht ein angeregter ^{274}Hs -Kern, der durch Neutronenabgabe ^{270}Hs bildet). Mit zunehmender Masse des Projektils wird allerdings die Wechselwirkung mit dem Target immer schwächer. Wird aber der Wirkungsquerschnitt geringer, so erhält man immer weniger Fusionskerne in immer längeren Zeiträumen.

Durch Beschuss eines Cm-Targets mit ^{13}C wurde 1958 das Element 102 gewonnen. Die ersten Versuche dazu fanden in Schweden statt, das Element erhielt so den Namen Nobelium. Allerdings erwies sich die Erstbeschreibung später als zweifelhaft, so dass ein Namensstreit entbrannte; der Name wurde aber letztlich beibehalten. Auch bei Element 103, Lawrencium, und Element 104 entstanden durch Prioritätsstreitigkeiten solche Namensprobleme. Für 104 schlug die russische Forschergruppe Kur(t)chatovium, die amerikanische Rutherfordium vor; später kam noch der Vorschlag Dubnium. Bei den nachfolgenden Elementen gab es weitere Prioritäts- und damit Benennungsprobleme. Aus diesem Grunde hat die IUPAC dann als Regel festgelegt, dass ein Name zunächst nur vorläufig als Zahlbezeichnung mit Dreibuchstaben-Symbol gegeben wird und erst nach einem unabhängigen zweiten Nachweis der definitive Name vergeben werden darf, der dann seinerseits von der IUPAC bestätigt werden muss. So konnte der zunächst bei den Elementen 104–108 entstandene Namenswirrwarr schließlich bereinigt werden (Tab. 3). Ein besonderer Fall war Element 106, Seaborgium: es ist das einzige Element, das nach einer zu diesem Zeitpunkt noch lebenden Person benannt wurde. SEABORG war bei allen Transuranen mit Ausnahme der Elemente 103 und 104 bis zum Element 106 Entdecker oder Mitentdecker und damit bei mehr Elementen als die „klassischen“ Elemententdecker KLAPROTH, DAVY, BERZELIUS und RAMSAY.

Tabelle 3: Benennung der Elemente 104–109

Kern- ladung	Vorschlag USA/D		Vorschlag IUPAC (1994)		Vorschlag IUPAC (1995)		definitiv IUPAC (1997)	
	104	Rf	Rutherfor- dium	Db	Dubnium	Db	Dubnium	Rf
105	Ha	Hahnium	Jl	Joliotium	Jl	Joliotium	Db	Dubnium
106	Sg	Seaborgium	Rf	Rutherfor- dium	Sg	Seaborgium	Sg	Seaborgium
107	Ns	Nielsbohri- um	Bh	Bohrium	Ns	Nielsbohri- um	Bh	Bohrium
108	Hs	Hassium	Hn	Hahnium	Hn	Hahnium	Hs	Hassium
109	Mt	Meitnerium	Mt	Meitnerium	Mt	Meitnerium	Mt	Meitnerium

Die erste Herstellung der Elemente 107–112 erfolgte mit dem Schwerionenbeschleuniger UNILAC in Darmstadt; Element 108 erhielt deshalb den Namen Hassium und 110 wurde Darmstadtium – genannt. (Für letzteres wurde – nicht ganz ernsthaft – der Name Policium vorgeschlagen unter Hinweis auf die Rufnummer 110). Element 110 war auch – allerdings erst später – in Berkeley gefunden worden und SEABORG schlug vor, man möge hierfür den zuvor nicht zum Zuge gekommenen Namen Hahnium diskutieren (HOFFMAN et al. 2000).

Die Elemente 113–118 wurden von Forschergruppen in Russland, Kalifornien und Japan erstmals gewonnen durch Einsatz höherer Energien als am UNILAC möglich war (vgl. BARBER et al. 2011). Die erste Mitteilung über Element 118 im Jahre 1999 wurde schon 2002 als Fälschung von Messdaten erkannt; erst 2006 wurde ein Isotop des Elements mit der Massenzahl 294 und einer Lebenszeit von 0,89 ms gefunden (vgl. OGANESSIAN 2007). Bei den meisten Transactinoiden können infolge der nur wenigen jeweils verfügbaren Kerne keine Halbwertszeiten angegeben werden; hier muss man sich mit Lebenszeitangaben begnügen, die sich bei Vorliegen einiger Messungen näherungsweise in Halbwertszeiten umrechnen lassen (HOFMANN 2002). Für die Elemente 114 und 116 liegen unabhängige Bestätigungen der Existenz vor, so dass sie 2011 benannt werden konnten. Element 114 heißt Flerovium (Fl), nach G. FLEROV (1913–1990), dem Begründer des kerntechnischen Instituts in Dubna; Element 116 ist Livermorium (Lv) nach dem Kernforschungsinstitut in Livermore, Kalifornien. Beim Element 113 darf mit einer baldigen Namensvergabe gerechnet werden.

Die Kenntnis der Chemie dieser Elemente beruht auf Untersuchungen an Einzelatomen, die mit Trägersubstanzen ähnlicher Eigenschaften gemeinsam behandelt und an ihrem Zerfallsvorgang identifiziert werden. Die Elemente bis 110 bzw. 112 verhalten sich – soweit erkennbar – entsprechend ihrer Gruppenzugehörigkeit. So bildet z. B. Hassium ein flüchtiges Tetraoxid HsO_4 analog dem flüchtigen OsO_4 (SCHÄDEL 2006; WANG u. SCHWARZ 2009).

Osmium ist infolge der Bildung von flüchtigem OsO_4 (das sehr giftig ist) das einzige Metall mit Geruch. Nun ist fast jedem bekannt, dass Eisen einen muffelig-metallischen Geruch aufweist. Dieser kommt aber durch organische Verbindungen und den Phosphorgehalt (bei Gusseisen) zustande, nicht durch das Metall selbst. Bei Berührung von Eisenoberflächen erfolgen durch organische Stoffe der Haut Redoxreaktionen und mit Phosphat entstehen Methylphosphine.

Für die Elemente 107–109 sind sehr hohe Dichten zu postulieren, da schon die leichteren Homologen Os und Ir Werte von über 20 haben. Für Hs wurden Werte zwischen 30 und über 40 abgeschätzt. Element 112, Copernicium, ist dem Quecksilber homolog und zeigt ebenfalls hohe Flüchtigkeit. Die Spekulation, dass es das einzige bei Zimmertemperatur gasförmige Metall wäre (wenn man denn größere Mengen herstellen könnte) ist aber wohl doch Phantasie. Bei dem bisher nur anhand weniger Atome bekannten Element 118 könnte es sich um eine „Edelflüssigkeit“ handeln.

Bei den Elementen hoher Kernladungszahlen machen sich *relativistische Effekte* bemerkbar (PYRYKÖ u. DESCLAUX 1979). Bei den Actinoiden ist dies vor allem in der Komplexchemie infolge Beteiligung der f-Elektronen zu bemerken, die viel weniger stark gebunden sind als bei den Lanthanoiden. Allerdings ist nach Untersuchung von TÜRLER et al. (1999) die Chemie von Sg und Bh nur wenig relativistisch gestört. Bei den Lanthanoiden nimmt in der Reihe der Elemente die Kernladung zu; in der Hülle werden die f-Elektronen jedoch in ein tieferes Energieniveau eingebaut, so dass die Atome zunehmend kleiner werden (Lanthanoiden-Kontraktion). Dies hat die große chemische Ähnlichkeit von Zr und Hf zur Folge. Aber das Phänomen wirkt sich auch bei den folgenden Elementen aus. Dann sollten die s- und d-Energieniveaus von Silber ($4d^{10}5s^1$) und Gold ($5d^{10}6s^1$) fast gleich sein. Beim Gold wird nun jedoch der relativistische Effekt wirksam. Elektronen in Kernnähe besitzen Geschwindigkeiten, bei denen der relativistische Massenzuwachs zu berücksichtigen ist. Dadurch werden s- und z.T. auch p-Orbitale kontrahiert und somit die Kernladung besser abgeschirmt; die Energieniveaus der anderen Orbitale liegen daher höher. Bei Gold führt die Kontraktion von 6s und Expansion von 5d zu einer Energiedifferenz, die der Wellenlänge von blauem Licht entspricht – Gold hat daher eine goldgelbe Farbe. Bei Silber hingegen kann nur UV-Strahlung absorbiert werden – daher zeigt es die typische Silberfarbe.

Die Bindungslängen in Goldverbindungen sind verkürzt und die Elektronenaffinität ist erhöht, so dass Au^- -Ionen stabil sind. Lässt man Gold mit Rb oder Cs reagieren, so entstehen Auride mit hohem Ionenbindungsanteil. Bei intermetallischen Verbindungen ermöglicht Gold auch eine Erhöhung kovalenter Bindungsanteile, wie am ternären System Na-Au-Ga gezeigt wurde: $\text{Na}_{13}\text{Au}_{12}\text{Ga}_{15}$ bildet ikosaedrische Quasikristalle mit polaren und kovalenten Na-Au-Wechselwirkungen (SMETANA et al. 2012). Die Elemente Pt-Au-Hg werden als relativistische Triade bezeichnet; die relativistischen Effekte sind hier am deutlichsten zu erkennen; sie bestimmen die katalytische Aktivität von Komplexen dieser Elemente. Dementsprechend werden zunehmend Goldkomplexe als Katalysatoren eingesetzt (LEYVA-PEREZ u. CORMA 2012).

Relativistische Effekte führen auch dazu, dass bei Blei das PbO wesentlich stabiler ist als PbO₂. Das dadurch bedingte Redoxverhalten von Bleiverbindungen ist Voraussetzung für das Funktionieren des Blei-Akkus!

Beim Quecksilber ($5d^{10}6s^2$) sind die beiden s-Elektronen so fest gebunden, dass die metallische Bindung abgeschwächt ist – das Metall ist bei Zimmertemperatur flüchtig und hat außerdem weitgehend edlen Charakter. Für das homologe Copernicium wurde daher spekuliert, dass es möglicherweise infolge starker relativistischer Effekte edelgasartig sei. Nach den bisher erhaltenen Daten scheint dies aber nicht der Fall zu sein. Allerdings ist damit zu rechnen, dass sich bei ausgeprägten relativistischen Effekten die Gruppenzugehörigkeit der Elemente verwischt. Ob dies schon ab Element 114 oder erst um 120 zu erkennen sein wird, ist ungewiss.

7. ELEMENTE IN LITERATUR, SATIRE UND ... VIELE „TOTGEBORENE“ ELEMENTE

Das Periodensystem der Elemente hat als grundlegendes Ordnungssystem der Chemie Ausstrahlung weit über das Fach hinaus gehabt. Bei OLIVER SACKS ist in seinem autobiographischen Werk „Onkel Wolfram“ der Bezug zur Chemie sehr deutlich. In der Autobiographie des Chemikers und Schriftstellers PRIMO LEVI (1919–1987) „Das periodische System“ dienen die Elemente eher als Metapher für die Darstellung der Lebensgeschichte, auch einer völlig hassfreien Beschreibung seiner Erlebnisse in Auschwitz.

Naturgemäß hat die Science-Fiction-Literatur ebenfalls von der Faszination der Elemente und ihrer Eigenschaften Gebrauch gemacht (GELIUS 2012); ein frühes Beispiel ist H. DOMINIKS „Atomgewicht 500“ – ohne Element-Name. Science Fiction-Elemente mit Namen sind in Tab. 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Elemente aus dem Science Fiction Bereich

(Ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Die Angaben stammen überwiegend aus dem Internet)

Adamant, Adamantium (schon seit der griechischen Mythologie häufig verwendet)
Amazonium (Metall der Amazonen-Insel)
Bombastium (in Comics)
Carolinium (bei H. G. Wells)
Cavorit (bei H. G. Wells)
Dilithium (in Star Trek)
Element 115 (in Dark Reign)
Jerktonium (in Spongebomb)
Kommunium (bei St. Lem)
Kryptonit (in DC Comics)
Latinum (in Star Trek)
Mithril (in Herr der Ringe)
Obdurium (in Verlies und Drachen)
Obsidium (in Computerspiel World of Warcraft)
Octiron, Octogen (in Somputerspiel Discworld)

Onnesium (ist Element 118)
Oozium 238 (in Advance Wars)
Ochrialcum (in der Mythologie und Science Fiction mehrfach)
Pergium (in Star Trek)
Parium (in Marooned)
Phlogiston (in Verliese und Drachen übernommen)
Phostlit (in The Adventures of Tintin)
Photonium
Phrik (in Krieg der Sterne)
Pizzazium (in Phineas and Ferb)
Polydenum (in Other Space)
Primum
Promethium (in Warhammer 40 000 verwendeter Name!)
Psitanium (bei Psychonauten)
Purralinium (in der Doona-Serie)
Pyreal (in Asheron's Call)
Quantonium (in Monsters vs. Aliens)
Quassium B (in John Pudney's Adventure)
Radium X (in The Invisible Ray)
Randonium (in Scooby Doo 2)
Raritanium
Relux
Residuum (in Verliese und Drachen)
Resistium (in The Incredible Planet)
Rodinium (in Star Trek)
Russium
Rovolon (in Skylark of Space)
Runit (in Rune Scape)
Sakuradit (in Code Geass)
Saronit (in Computerspiel World of Warcraft)
Shazanium (in Shazam!)
Sheol (in Fury 3)
Silverium (ein Element vom Mars)
Sivanium (in Shazam!)
Solarbonit (in Plan 9 from Outer Space)
Solinium (in Artemis Fowl)
Solium (in Battlestar Galactica)
Solium (in Blake's 7)
Spartanium (in The Space Eagle)
Specium (in Ultraman Dyna, gibt es nur auf dem Mars)
Stravidium (in Dune Universe)
Stygium (in Computerspiel Discworld)
Submarinum (in Kellermann: Der Tunnel)

Supermanium (in Comics)
Supremium (in Supreme)
Synthium (in Marooned)
Tarydium (in Computerspiel)
Thaesium (in Doctor Who)
Theor (Element 183, in Martensson: Virgin planet)
Thiotimolin (bei Isaac Asimov)
Thorium (in Computerspiel World of Warcraft)
Thyrium (in Matthew Reilly: Temple)
Tiberium (in Command and Conquer Serie)
Timonium (in Stardust)
Titanit (in Star Blazers)
Transplutum (Element 137, bei L.Weise)
Triidium (in Deadlock)
Trilithium (in Star Trek)
Trinium (in Stargate)
Tritanium (in Star Trek)
Tronium (in Computerspiel)
Tungit (in The Mysterious Dr.Satan)
Turbidium (in Total Recall)
Tylum (in Battlestar Galactica)
Unobtainium (mehrfach verwendet, auch als Satire)
Upsidaisium (in The Rocky and Bullwinkle Show)
Uridium (Computerspiel)
Uru (in Uru-Thor-Serie)
Veridium (in Metal Men)
Vibranium (in Comics)
Vionesium (in Doctor Who)
Viridium (in Computerspiel)
Vizorium (in Dirty Pair)
Voltairium (in Gene Roddenbery's Andromeda)
Wonderflonium (in Dr.Horrible's Sing-Along Blog)
Xenium (in Serie „Half-Life“)
Xenothium (in Teen Titans)
Xentronium (in Master of Orion)
Zanium (in Riddle of the Gold)
Zexonit (in Earth Bound)
Zortium (in Master of Orion)
Zuunium (in Legion of Superheroes)

Die Satire hat sich des Elementbegriffs ebenfalls bemächtigt: Das Element Administratium (an anderer Stelle Administrontium, BELTZ 1994) ist das schwerste bekannte Element. Sein Kern hat kein Proton, aber ein Neutron, 125 Hilfsneutro-

nen, 75 stellvertretende Neutronen und 111 stellvertretende Hilfsneutronen. Es ist völlig inert, seine Gegenwart verlangsamt aber jede Reaktion, wobei dieser kinetische Effekt mit zunehmender Konzentration von Administratium exponentiell (!) ansteigt. Administrontium wurde es genannt, weil es sich wie Strontium in das Skelett einlagert und dieses irreversibel allmählich ersetzt. Es kann keine Reaktion eingehen, aber dennoch Bindungen ausbilden, die als Netzwerk oder „male bonding“ zu beschreiben sind. Auch kann es zerfallen, wobei das sehr giftige Bureaucratitium entsteht. – Da neuerdings Sponsoren eine Organismen-Art nach sich benennen lassen können, entstand der Vorschlag, bei hinreichend großer Spende auch bei Elementen so zu verfahren: „Gazpromium für Element 113“ (vgl. Tab. 5)

Tabelle 5: Satirisch oder ironisch gemeinte Elementnamen
(Ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Administratium (siehe Text)
Administrontium (siehe Text)
Billclintium (amerikanischer Joke)
Budweisium (wie vorheriges; „hat weder Geruch noch Geschmack“)
Bureaucratitium (siehe Text)
Centium (für Fm, in Anekdote von Seaborg)
Eludium (Element, das jeder Gewinnung entgeht)
Flangium (verwendet wie Unobtainium)
Freedomium (für Fr, aus Gründen der „political correctness“)
Gazpromium (für Element 113, siehe Text)
Illudium (siehe Eludium)
Kosmium (Kosmann 1896, schon von Winkler als Aprilscherz vermutet)
Neokosmium (Kosmann 1896)
Newium (für Element 99, in New Yorker Magazine, bei Namengebung von Bk und Cf)
Offium (für Element 98, wie vorhergehendes)
Percentium (für Md, in Anekdote von Seaborg)
Phlebotinum (verwendet wie Unobtainium)
Policium (für Ds vorgeschlagen: alter Polizeinotruf 110)
Prodani(uki)um (für Element 120, von Roland Prodaniuk mitgeteilt – eigentlich wohl Science Fiction)
Rolandium (für Element 120, von Roland Prodaniuk wie vorhergehendes)
Universitium (für Element 97, in New Yorker magazine)
Unobtainium (für ein Element, das entweder nicht zu erhalten oder viel zu teuer ist oder für Material mit unerreichbaren technischen Eigenschaften, dadurch auch in Science Fiction gelangt.)
Yorkium (für Element 100, in New Yorker Magazine)

Von diesen „Elementen“ zu trennen sind die im Laufe der Geschichte der Chemie entstandenen falschen oder unklaren „Nachweise“ von Elementen, die zu einer

großen Zahl ungültiger Namen geführt haben. BERZELIUS nannte sie die „totgeborenen Elemente“. Ihre große Zahl zeigt, wie viele Irrtümer es in der Geschichte der Elemente gegeben hat. In der Literatur existieren mehrere Tabellen solcher Elemente; ebenso auch eine im Internet. Da keine dieser Tabellen mit den anderen völlig übereinstimmt, wird hier der Versuch gemacht, alle Namen zusammenzuführen – auch diese Tabelle (Tab. 6) ist trotz erheblicher Mühe vermutlich nicht komplett (MUCK 1889, WINKLER 1898, BASKERVILLE 1904, WAGGONER 1975, KARPENKO 1980, FIGUROWSKI 1981, HOLDEN 2001. Bei BASKERVILLE und KARPENKO sind für die meisten Angaben die Originalarbeiten bibliographiert; bei FIGUROWSKI sind durch die Übersetzung aus dem Russischen viele rückübersetzte Namen falsch).

Tabelle 6: Totgeborene Elemente (ungültige Elementnamen)

Nicht aufgenommen sind die Eka- und Dvi- Bezeichnungen, die z.T. schon Mendelejew eingeführt hat, vorläufige Symbole bestehend aus einem lateinischen oder griechischen Buchstaben sowie manche der Bezeichnungen aus Zerfallsreihen radioaktiver Elemente, die sich als Isotope bereits bekannter Elemente erwiesen. Bibliographische Angaben der Originalpublikationen findet man für die meisten Fälle bei Baskerville (1904) und Karpenko (1980).

Accretium (vorgeschlagen für Cf)
Actinium (Phipson 1881, erwies sich als Zn)
Actinium Emanation (Schmidt 1918, ist Rn)
Actinon (An; ist Rn)
Actinouranium (für Ac)
Aetherium (Brush 1898, der „Weltaether“)
Afinium (Af; in russ. Literatur 1955 für Es diskutierter Name)
Agusterde (Trommsdorf 1800, für Be)
Alabarium (Ab oder Am; Allison et al. 1931, für At)
Alcaligène (für N verwendete Bezeichnung)
Alcalinium (Loring u. Druce 1925, für Fr)
Aldebaranium (Ad; Auer von Welsbach 1907, für Yb)
Alumium (statt Aluminium anfänglich verwendeter Name)
Amarillium (Courtis 1903, in Pt-Erz)
Andronia (Wissterl 1800, ein „Urstoff“, männliches Prinzip)
Anglium (Ar)
Anglohelvetium (Ah; Ligh-Smith u. Minder 1942 für At)
Angularium (Raymond 1886, Alternativ-Vorschlag für Ge)
Anodium (Morosoff, Anfang 20.Jhdt., ein „Urelement“)
Antihydrogenium (Radik 1906, zwischen H und He)
Antozon(e) (Schönbein, unklar ob „Element“)
Apulum (Tomo, 18.Jhdt.)
Apyre (Brugnatelli 1821)
Archonium (Lockyer 1900, He oder zwischen H und He)

- Aridium (Ullgren 1850, erwies sich als unreines Fe)
Asterium (Lockyer 1899, wahrschl. He)
Athenium (An; war Vorschlag für Es)
Aurorium (Angström 1867 in Spektrum von Sternen)
Ausonium (Ao; für Np)
Australium (Wedgwood 1790, aus Mineral von Australien, vgl. Sydneium)
Austriacum (Brauner 1889, ist wahrschl. Te, unabhängig auch Grünwald 1889)
Austrium (mehrfach verwendet: Linnemann 1886 für Ga; Przibram 1900 für Selt.Erde)
Austrum (Tondi u. Ruprecht 1785, wohl Mg)
Azote (frz. Name für N)
Barcenium (1879, wohl Fehler bei Erstnennung)
Barytum (alter Name für Ba)
Bauxium (Bayer 1894, der den Namen nicht gegeben hat; von Griner u. Urbain als V+W identifiziert)
Berthollet(ium) (Anfang 19.Jhdt. für Cl)
Berzelium (Bz; Baskerville 1903, Selt.Erde oder Th; von Marks 1994 für Pr vorgeschlagen zur Homologisierung möglichst vieler Namen)
Bicentennium (1976, in Monazit, sollte ein stabiles superschweres Element sein)
Bohemium (Bo; Kobic 1934, für Np aus Pechblende, von ihm zurückgezogen, von Marks 1994 vorgeschlagen statt Md)
Boracium (B)
Borbonium (Tondi, 18.Jhdt., Ba?)
Brevium (Bv, Fajans 1913, für Pa)
Brillium (in Washington Post 1903)
Bythium (Gross 1893)
Canadium (French 1911, in Pt-Erz)
Carolinium (Baskerville 1900, Hofmann u. Strauss 1901, Selt.Erde ?; Name auch für ein Science Fiction Element vergeben)
Cassiopeium (Cp; Auer von Welsbach 1907, Name wurde in Deutschland bis zum 2. Weltkrieg verwendet)
Catium (Cm, von Perey zunächst für Fr in Betracht gezogen)
Celtium (Ct; Urbain 1911, sollte Element 72 sein, erwies sich als Lu)
Centium (Vorschlag für Md, möglicherweise nicht ernst gemeint)
Centurium (Ct oder Cn, war Vorschlag für Fm)
Cererium (Ce, von Klaproth korrigierter Name, setzte sich nicht durch)
Cesium (für Pd)
Chesperisium (Pringle 1887, in Se)
Colonium (Cf, einer der vorgeschlagenen Namen)
Columbium (Cb; für Nb im 19.Jhdt. verwendet, aber auch für Selt.Erde von Smith 1879, von Marks 1994 vorgeschlagen für Am)
Comesium (Kaemmerer 1880)
Coronium (Element leichter als H, Lockyer 1871, Grünwald 1887, Nasini et al. 1898, auch bei Mendelejew; erwies sich als Fe)

Crodonium (Trommsdorff 1820, wohl Mg+Ca)
Cyclonium (Cy; mehrfach diskutiert, für Pm bis 1950, später für Cf und 1994 von Marks vorgeschlagen für No)
Cyclotronium (vorgeschlagen für Cf)
Dacinium o. Dakin (um 1935, At)
Damarium (D; Much 1890, wahrschl. scherzhaft; Lauer u. Antsch 1896, Selt.Erde)
Damonium (Rowland 1894, Selt.Erde)
Danium (Hf)
Danubium (Da; für Tc von Marks 1994 vorgeschlagen)
Davyum (Da oder Dv; als 43 oder 75 beschrieben von Kern 1877 aus Pt-Erz, ist Gemisch von Pt- Metallen)
Decipium (Dp, Delafontaine 1878, Selt.Erde, wahrschl. Sa)
Demogorgon (Bi)
Demonium (Ruland 1894, Selt.Erde)
Denebium (Eder 1916 für Selt.Erde!)
Deuterium (Name für H-Isotop)
Devium (durch Druckfehler entstanden, gemeint war Davyum)
Dianum (von Kobell, 1860, ist Nb)
Didymium (Di; Mosander 1839, von Auer von Welsbach aufgetrennt zu Pr und Nd)
Diplogonium (anderer Name für Deuterium)
Donarium (Bergmann 1851, ist Th)
Donium (Richardson 1836, ist Be oder Be+Al)
Dor (Do; ist At)
Dubhium (Eder 1916 für Selt.Erde!)
Dubnadium (Dn; für Element 118)
Dwiem (postuliertes Element 168)
Emanium (Em; Giesel 1901, ist Ac)
En(ne)actinium (vorgeschlagen für Cf)
Eosium (Kr)
Erebodium (Eb; Pringle 1886, vielleicht ein Scherz)
Erythronium (ist V, vom Entdecker del Rio zunächst so genannt)
Esperium (vorgeschlagen für Pu, Symbol:Es)
Etherion (Brush 1898, siehe Aetherium)
Euprosium (vorgeschlagen für Cf)
Eurosamarium (Eder 1917 für Selt.Erde!)
Euxenium (Ex; Hofmann u. Prandtl 1901, Selt.Erde oder Zr)
Exactinio (Rn)
Exradio (Rn)
Exthorio (Rn)
Extremium (vorgeschlagen für Np und Pu)
Flerovium (jetzt gültiger Name für Element 114, zuvor vorgeschlagen für No)
Florentium (Symbol:Fr; Rolla u. Fernandes 1924, für Pm)
Flyorium (vorgeschlagen für Element 118; jetzt Flerovium = 114)

Francium (Symbolvorschlag zunächst Fa)
Gadenum (Gd; Pringle 1886, vielleicht ein Scherz)
Galoid (Rancev 1906)
Geocoronium (hypothet. Element leichter als He)
Ghiorium (Element 118, Vorschlag 1999; Herstellung zurückgezogen)
Glauco(di)dymium (Chruschtschow 1897, Selt. Erde)
Glucinium oder Glucium (Be, veralteter Name)
Gnomium (Krüss u. Schmidt 1889, in Co-Erz; von Winkler widerlegt)
Gourium (At)
Hahnium (Ha, war vorgeschlagen für Element 105, dann für 108)
Halogenium (alter Name für Chlor)
Helvetium (Hv; Minder um 1940, für At)
Hesper(i)um (Hs; für Pu vorgeschlagen; außerdem Pringle 1886 „ein Nichtmetall“, vielleicht ein Scherz)
Hibernium (für Ar und für Ra vorgeschlagen)
Hydrium (alter Name für Hydrogenium)
Hydrosiderum (Meyer 1780, vgl. Siderum)
Hypon (Andrews 1928 für Element 118)
Idunium (Id; Websky 1884, wahrschl. V)
Illinium (Il; Hopkins et al. 1926, für Pm; von Marks 1994 vorgeschlagen für Bk)
Ilmenium (Il; Hermann 1846, ist Nb)
Incognitium (Ic; Crookes 1905, Selt. Erde)
Infra-Elemente (zwischen H und He hat Stoney um 1895 6 leichte Elemente angenommen:
Infra-Be, -B, -C, -N, -O, -F)
Ion (alter Name für Iod)
Ionium (Crookes 1906, Selt. Erde, außerdem für Th-Isotop in Zerfallsreihe, Soddy 1904/06)
Japonium (Jp; vorgeschlagen für Element 113)
Jargonium (Jg; Sorby 1869, Selt. Erde, Zr oder U)
Joliotium (Jl; war vorgeschlagen für Element 102, dann für 105)
Junonium (J; Thomson 1811 für Selt. Erde, für anderes Element Kersten 1818 aus Zn-Erz)
Kalidium (Palmer 19. Jhdt., ein „Protoelement“)
Kathodium (Morosoff, Anfang 20. Jhdt., vgl. Anodium)
Kiesel (von Berzelius 1810 vorgeschlagener Name für Si)
Klaprothium (John 1817 für Cd, von Leonhardi um 1790 schon für U vorgeschlagen)
Kur(ts)chatovium (Ku; für Element 104 von russ. Forschergruppe 1966 vorgeschlagen)
Lavoesium (Prat 1877, in Pyrit)
Lawrencium (altes Symbol: Lw, jetzt Lr; Name zuvor schon vorgeschlagen für Cf)
Leptin (Martin 1943, At)
Lewisdium (Lw; Vorschlag 2012 für Element 114, bezogen auf G. Lewis)
Lewisium (Vorschlag für Cf)
Littorium (Np)
Lucium o. Lutium (Barrière 1896 als Element 43, war Gemisch Selt. Erden)

Magnium (Mg)
Masrium (Ms; Richmond u. Off 1892, Be oder In ?)
Masurium (Ma; Noddack, Tacke u. Berg 1925, Tc)
Meitnium (von Marks 1994 für Pa vorgeschlagen)
Melinium (Kersten 1818, Cd)
Menachin (McGregor 1791, Ti)
Mendelevium (altes Symbol: Mv; Name auch vorgeschlagen für Bk, von Marks 1994 vorgeschlagen statt Er)
Mercurium (alter Name für Quecksilber)
Mesothorium (Ra)
Metacerium (Brauner 1895, Selt. Erde)
Metaneon (Thomson u. Aston 1913, ist Ne-Isotop)
Metargon (Ramsay u. Travers 1898, die dann erkannten, dass es CO ist)
Moldavium (Ml; Hulubei 1937/39, Fr)
Monium (Crookes 1898, Selt. Erde)
Mosand(r)ium (Ms; Smith 1877, Selt. Erde)
Moseleyum (für Selt. Erde, dann Hamer 1925 für Tc)
Moscovium (vorgeschlagen für Element 118)
Muri(atic)um (von Lavoisier angenommenes Element; er sah Cl als dessen Oxid an)
Muride (Br)
Natronium (Gilbert 1808, gültiger Name Natrium)
Nebulium (Nu; Element zwischen H und He, sollte in Sternennebeln vorkommen, schon vor 1898, vgl. Aurorium, außerdem Emerson 1911)
Neodidymium (verkürzt zu Neodym)
Neoerbium (Urbain 1901, ist Er)
Neomolybdän (Gerber 1917)
Neothulium (Eder 1916, Selt. Erde!)
Neowolfram (Gerber 1917, als Element 75)
Neoytterbium (Ny; Urbain 1905, ist Yb)
Neptunium (Hermann 1877 für Nb, Name 1886 für Ge diskutiert)
Neutronium (von Antropoff 1926, als Element o)
Newtonium (Nw; als Element leichter als H von Mendelejew diskutiert, sollte Edelgas sein; Name für „Weltäther“, vgl. Aetherium; von Marks 1994 statt Ho vorgeschlagen)
Niccolonium (Richter 1805, war unreines Ni)
Nielsbohrium (Ns; vorgeschlagen für Element 105, dann 107)
Nigrium (Church u. Sorby 1866, sollte Element 72 sein)
Nipponium (Np; Ogawa 1908 als Element 43 beschrieben, war viell. aber Re oder Hf)
Nitricum (N; Berzelius vermutete zunächst, Stickstoff sei Oxid dieses Elements)
Nit(r)on (Nt; Loring 1909 für Edelgas Ne?, Gray u. Ramsay 1910 für Rn; 1934 Name in Rn geändert, von Marks 1994 wieder vorgeschlagen)
Nonactinium (für Cf vorgeschlagen)
Norium (No; Svanberg 1845, Zr, als Hf angesehen, von Marks Name 1994 statt Tb vorgeschlagen)

Norwegium (Ng; Dahll 1879, Selt.Erde oder Bi)
Novum (für Ne und für Rh verwendet)
Oceanium (Scott 1923, von ihm selbst zurückgezogen, Ti)
Ochroite (Klaproth 1803, ist Ce)
Odinium (Od; von Marks 1994 statt Sm vorgeschlagen)
Orthohelium (Lockyer et al. wollten in He weiteres Gas gefunden haben)
Ostrantium (Breithaupt 1825, unreines Zr?)
Ouralium (Guyard 1879, Selt.Erde oder Pt-Metall)
Oxydium (Palmer 19.Jhdt., ein „Protoelement“)
Panchromium (V)
Panormium (für Tc zunächst vorgesehener Name 1937)
Pantogen (Hinrichs 1867, leichter als H)
Par(a)helium (Runge u.Pascher 1895, He)
Paulinium (Pl; Vorschlag 2012 für Element 116, bezogen auf L.Pauling)
Pelopium (Pe; Rose 1846 in Columbit, Nb)
Phoenicium (Ph; Es sollte zunächst Ph heißen, da aus thermonuklearer Reaktion)
Philippium (Pp; Delafontaine 1878, Selt.Erde, wahrschl. Ho)
Phtor (Ampère 1816 für F)
Pluranium (Osann 1827 aus Pt-Erz, Te?)
Plutonium (Clarke 1816, für Ba)
Polinium (Osann 1827, aus Pt-Erz, unreines Ir)
Polymnestrum (Pm; Pringle 1886, in Se-Rückstand, vielleicht ein Scherz)
Potassium (K)
Praedicium (vorgeschlagen für Cf)
Pragium (Druce 1925, Re)
Protofluor (Pf; Nicholson 1911, Halogen leichter als F, unabhängig auch als „Urelement“
,vgl. Protoglucinum)
Protohydrogen (Pickering 1896, unabhängig Morosoff 1910, wohl He)
Protoglucinum, Protobor (Jessup 1907, „Urelemente“)
Protyle (Crookes 1886, ein „Urelement“)
Ptene (Fourcroy u. Vauquelin, Ir+Os)
Radioactinium (Th-Isotop)
Radiobismuth (Po)
Radioblei (Pb)
Radiomercurium (Losanitsch 1904)
Radiotellurium (Marckwald 1902, ist Po)
Radium-Emanation (erste Bezeichnung für Rn, Dorn 1900)
Radlabium (vorgeschlagen für Cf)
Rigium (Bergman um 1930, Element 61)
Rikenium (Rk; vorgeschlagen für Element 113)
Rogerium (Smith 1879 , Selt.Erde ?)
Russium (Chruschtschow 1889, Selt.Erde oder Th)
Ruthenium (Osann 1827, Gemisch von Metalloxiden)

Rutherfordium (zuerst für Element 102 vorgeschlagen)
Samarium (altes Symbol: Sa)
Satellite (St; Loring 1909, Edelgas leichter als H)
Saturnum (Monnet, 1784)
Scheelium (Vorschlag von Werner für W, von Berzelius abgelehnt)
Scotium (Ar)
Septon (N)
Sequanium (Sq; vorgeschlagen für Np)
Sergenium (Sg; Element 108, aus russ. Uranerz 1970 beschrieben)
Siderum (Bergmann 1781, ist Eisenphosphid)
Silene (Proust 1802, erwies sich als Uran, von Proust selbst zurückgezogen)
Sirium (West 1818, in Ni-Erzen, von Faraday als Gemisch erkannt)
Sodium (So; ist Na)
Spectrum (Sp; von Marks 1994 vorgeschlagen statt Yb)
Stibium (alter Name für Antimon, daher Symbol Sb)
Suevium (von Marks 1994 statt Dy vorgeschlagen)
Supraberlyllium (Andrews 1895)
Sydneium (Wedgwood 1790, von Klaproth 1796 widerlegt)
Sylvan (früherer Name für Te, Anfang 19.Jhdt.)
Talcium (früherer Name für Mg)
Thalium (Owen 1852)
Thelyke (Wissterl um 1800, ein „Urstoff“, weibliches Prinzip, vgl. Andronia)
Therine (von Marks 1994 vorgeschlagen statt At)
Thorine (Berzelius 1817, später von ihm als YPO_4 erkannt)
Thoron (Tn; ein Rn-Isotop)
Thorium-Emanation (Rn)
Thulium (altes Symbol: Tu)
Thulium II (Auer von Welsbach 1911 als Selt.Erde Element 72)
Treenium (Boase 1836, in Beryll, ist Be)
Triargon (Brauner 1895)
Triem (postuliertes Element 218)
Tritium (Name für H-Isotop)
Tungsten (Bergman, vorgeschlagen für W, im engl.und franz. Sprachraum verwendet)
Tyrium (Ty; von Marks 1994 statt Nd vorgeschlagen)
Ultimum (vorgeschlagen für Pu)
Uralium (Guyard 1879, aus Pt-Erz)
Varine (von van Mons vorgeschlagener Name für I)
Vesbium (Scacchi 1879, aus Lava, wahrschl. V)
Vest(al)ium (West in Ni-Erzen, von Faraday als Gemisch erkannt)
Vestium (Snjadeckij 1806 Metall der Pt-Gruppe, von ihm zurückgezogen)
Victorium (Vc; Crookes 1899, Selt.Erde)
Virginium (Vi oder Vm; Allison 1929, Fr)
Was(m)ium (Bahr 1862; Selt.Erde)

Welsium (Eder 1920; Selt.Erde!)

Wixhausium (Wi, diskutiert bei Benennung von Ds)

Wodanium (Lampadius 1818, ist unreines As-haltiges Ni)

Ytterbium (Name ursprünglich der eines Gemisches, 1907 auf Yb übertragen)

Yttrium (altes Symbol: Yt)

8. ANFANG UND ENDE DES PERIODENSYSTEMS

Bis um 1920 wurde nach Elementen gesucht, die leichter sind als Wasserstoff. MENDELEJEV hatte in sein Periodensystem in späteren Jahren den „Weltäther (oder Newtonium)“ als leichtestes Element eingefügt. Dessen Existenz wurde durch die Relativitätstheorie endgültig widerlegt. Das Elektron wurde nach seiner Entdeckung zunächst als Element angesehen. Auch Protohydrogenium, Coronium und Nebulium waren Namen für postulierte Elemente vor dem Wasserstoff. Coronium war in der Sonnencorona spektroskopisch gefunden worden und erwies sich schließlich als Eisen, Nebulium als Sauerstoff. Als Element Nr. 0, Neutronium, wurde später das Neutron bezeichnet. Man kann sich dann ein gespiegeltes Periodensystem der Antimaterie vorstellen. Tatsächlich wurde Antiwasserstoff (Antiproton und Positron) hergestellt – und mittlerweile bis 15 min stabil gehalten, so dass eine spektroskopische Untersuchung möglich ist. Auch Anti-He-Kerne (Anti- α -Teilchen) sind hergestellt worden.

Für das Ende des Periodensystems gab es im Laufe der Zeit immer wieder neue Annahmen und Vorschläge. Aufgrund des Zerfalls der radioaktiven Elemente ab Nr. 83 wurde zunächst angenommen, dass Elemente erheblich über das Uran hinaus nicht existieren sollten. Theoretische Berechnungen von BOHR und SOMMERFELD besagten dann, dass Kerne bis zum Element 137 möglich seien. Erste Berechnungen von Kernstabilitäten durch C.F. v. WEIZSÄCKER 1935 führten zu der Angabe, dass die Grenze oberhalb Element 100 liegen müsse; spätere Berechnungen (ab 1958) sagten bis Element 147 oder sogar 155 voraus. Allerdings bestanden auch Spekulationen über ein Element Dwiem (168) und Triem (218).

Derzeit dreht sich die Diskussion um die „Superschweren Elemente“. Nach der Theorie der Atomkerne sollten Kerne im Bereich ab Element 114 bis Kernladung 126 bei hinreichend großer Neutronenzahl eine höhere Stabilität besitzen als die Transactinoide mit geringerer Kernladung. Man spricht von der Insel der Stabilität. Erste Spekulationen dazu gab es ab den 1970er Jahren, so dass damals in Erzen danach gesucht wurde: einen Hinweis auf Element 112 wollten MARINOV et al. schon 1971 erhalten haben. In russischen Uranerzen sollte angeblich ein Element 108, Sergenium, vorkommen und 1976 glaubte eine amerikanische Gruppe, in Monazit aus Madagaskar mehrere stabile Elemente 116, 124, und 126 sowie möglicherweise 114, 125 und 127 gefunden zu haben (HODGSON 1976; GENTRY et al. 1976) – und es wurde auch schon ein Namen vorgeschlagen: Bicentennium (da 1976 „gefunden“). Alle diese „Elemente“ erwiesen sich als Irrtum.

Bei den Transuranen sinkt generell die Halbwertszeit mit steigender Kernladung ab. Bei den Transactinoiden ist die Zahl der Neutronen im Kern aufgrund der

Herstellung stets niedrig geblieben. Man kann bisher nur eine gewisse Zunahme der sehr kurzen Halbwertszeiten bei den langlebigen Isotopen der Elemente mit den höchsten Kernladungen erkennen – so hat ^{290}Fl eine Lebenszeit von 21 s. Für ^{298}Fl wird eine relativ hohe Stabilität vorhergesagt, aber auch für ^{294}Ds wird mit „Jahren bis Jahrzehnten“ gerechnet. Um die Insel der Stabilität und hier die nach der Theorie besonders stabilen Kerne zu erreichen (MINAYA RAMIREZ et al. 2012) müssen Methoden zur Produktion hinreichend neutronenreicher Kerne entwickelt werden; diese gibt es derzeit nicht (z.B. wäre für Kernladung $Z=114$ eine hohe Stabilität mit der Neutronenzahl $N=184$ zu erwarten, s.o.). Allerdings muss man damit rechnen, dass bei Kernladungen über 110 Deformationen der Kerne auftreten, die deren Stabilität herabsetzen könnte. Besonders stabil sollte $^{310}_{126}\text{X}$ sein, vielleicht auch $^{302}_{118}\text{Uuo}$.

Dies ist deshalb besonders interessant, weil ab Element 122 (oder 125) erstmals ein Einbau von g-Elektronen erfolgen dürfte. Durch deren Einbau und dem nachfolgenden Einbau von f-Elektronen entstünden die „Super-Actinoide“ von Element 122–153. Die Chemie von g-Elektronen ist ein völlig unbekanntes Gebiet und außerdem wäre es interessant, zu erfahren, wie sich relativistische Effekte auswirken würden (WANG u. SCHWARZ 2009). Theoretische Überlegungen sagen auch für $^{318}_{164}\text{Z}$ und benachbarte Kerne einen Bereich der Stabilität voraus (GREINER 2008).

Derzeit richtet sich die Suche vor allem auf Element 120 – welcher Wirkungsquerschnitt kann mit derzeitigen Methoden erreicht werden? Danach wird sich die weitere Vorgehensweise richten.

Man kann fragen, ob es sinnvoll ist, für derartige Forschungen Geld auszugeben. Sie sind teuer, aber immer noch erheblich billiger als der Betrieb des LHC von CERN. Die Antwort auf die Frage findet man auf dem Grabstein des Mathematikers DAVID HILBERT (1862–1943):

*„Wir müssen wissen
Wir werden wissen.“*

9. LITERATURVERZEICHNIS

(bei mehr als sechs Autoren eines Aufsatzes wird nur der erste genannt, dann folgt „et al.“)

ALBERT, B., H. HILLEBRECHT (2009): Bor – elementare Herausforderungen für Experimentatoren und Theoretiker. *Angew. Chemie* 121: 8794–8824.

ALDERSLEY-WILLIAMS, H. (2011): *Periodic Tales. The curious lives of the elements*. Viking, London.

Ausstellungskatalog (1989): *Die Geschichte der Entdeckung der Uranspaltung*. TU Berlin.

BARBER, R. C., P. J. KAROL, H. NAKAHARA, E. VARDACI, E. W. VOGT (2011): *Discovery of the elements with atomic numbers greater than or equal to 113 (IUPAC Technical Report)*. *Pure Appl. Chem.* doi: 10.1351/PAC-REP-10-05-01.

- BASKERVILLE, CH. (1904): The elements: Verified and unverified. Proc. Amer. Ass. Adv. Science 53: 387–445.
- BELTZ, E. (1994): Physics Non-Department first to photograph new element. J. Irreprod. Res. 39: Heft 5.
- BRAUNSCHWEIG, H., R. D. DEWHURST, K. HAMMOND, J. MIES, K. RADACKI, A. VARGAS (2012): Ambient temperature isolation of a compound with a Boron-Boron triple bond. Science 336: 1420–1422.
- CHEN, L., Y. HERNANDEZ, X. FENG, K. MÜLLEN (2012): Die chemische Synthese von Nanographen, Graphen-Nanobändern und Graphen-Schichten. Angew. Chemie 124: 7758–7773.
- CLUSIUS, K. (1962): Von den Namen der chemischen Elemente. Die BASF 12: 7–12.
- DALE, C.W. et al. (2012): Late accretion on the earliest planetesimals revealed by the highly siderophile elements. Science 336: 72–75.
- DAVENAS, E. et al. (1988): Human basophil degranulation triggered by very dilute anti-serum against IgE. Nature 333: 816–818.
- DJERASSI, C., R. HOFFMANN (2001): Oxygen. (deutsche Ausgabe). Wiley-VCH, Weinheim.
- EL GORESY, A., G. DONNAY (1968): A new allotropic form of carbon from the Ries Crater. Science 161: 363–364.
- ENGHAG, P. (2004): Encyclopedia of the elements. Wiley-VCH, Weinheim
- ERLER, J. et al. (2012): The limits of the nuclear landscape. Nature 486: 509–512.
- ETNOCH, H.: d.i. MUCK, F.
- FIGUROWSKI, N. (1981): Die Entdeckung der chemischen Elemente und der Ursprung ihrer Namen. (Übers. aus dem Russischen). Aulis, Köln.
- FREY, G. (1980): Theorie des Bewußtseins. Alber, Freiburg.
- GELIUS, R. (2012): Chemie und Science Fiction. Chemie uns. Zeit 46: 302–308.
- GENTRY, R.V. et al. (1976): Evidence for primordial superheavy elements. Phys. Rev. Lett. 37: 11–15.
- GREINER, W. (2008): Structure of vacuum and elementary matter: From superheavies via hypermatter to antimatter – The vacuum decay in supercritical fields. Adv. Quantum Chem. 53: 99–150.
- GÜNTHER, A., M. HEISE, F.R. WAGNER, M. RUCK (2011): Ein Iridium-stabilisiertes, formal neutrales Te₁₀-Molekül mit Dreizentren-vier-Elektronen-Bindung. Angew. Chemie 123: 10163–10167.
- HAHN, O. (1940): Atomkernprozesse und die Zerspaltung des Urans. Umschau in Wiss. u. Technik 44: 433–436.
- HAHN, O. (1948): Künstliche neue Elemente. Verl.Chemie, Weinheim.
- Heimann, P.M. (1967): Moseley and Celtium: The search for a missing element. Ann. Science 23: 249–260.
- HODGSON, P. (1976): Discovery of superheavy elements. Nature 261: 627.
- HOFFMAN, D. C., A. GHIORSO, G. T. SEABORG (2000): The Transuranium People. The inside story. Imperial Coll. Press, London.
- HOFMANN, S. (2002): On beyond Uranium. Taylor u. Francis, London
- HOLDEN, N. E. (2001): History of the origin of the chemical elements and their discoverers. 41st IUPAC General Assembly, BNL-NCS-68350-01/ 10-REV.

- HOLLEMAN-WIBERG** (2007): Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 102. Aufl., W. de Gruyter, Berlin
- KAIM, W., B. SARKAR** (2009): N_2^{3-} : eine Lücke in der N_2^n -Reihe gefüllt. *Angew. Chemie* 121: 9573–9575.
- KARPENKO, V.** (1980): The discovery of supposed new elements: Two centuries of errors. *Ambix* 27: 77–102.
- KEAN, S.** (2010): The disappearing spoon. And other true tales of madness, love, and the history of the world from the Periodic Table of the Elements. Little, Brown and Comp., New York.
- KIPP, F.** (1942): Über das periodische System der Elemente. *Naturwissensch.* 30: 679–683.
- KOLB, R.** (o.J., 1932/33): Das Element und Gestalt – Aspekte heutiger Naturwissenschaft. Beilage zur Württ. Schulwarte.
- KULL, U.** (1994): Struktur und Gestalt – Aspekte heutiger Naturwissenschaft. *Jh. Ges. Naturkde. Württemberg* 151: 5–40.
- LEISEGANG, H.** (1928): Denkformen. W. de Gruyter, Berlin
- LEYVA-PEREZ, A., A. CORMA** (2012): Ähnlichkeiten und Unterschiede innerhalb der „relativistischen“ Triade Gold, Platin und Quecksilber in der Katalyse. *Angew. Chemie* 124: 636–658.
- MARINOV, A. et al.** (1971): Evidence for the possible existence of a superheavy element with atomic number 112. *Nature* 229: 464–467.
- MARSHALL, J.L.** (2002): Discovery of the elements. 2nd ed. Pearson, Boston.
- MAZURS, E.G.** (1957): Types of graphic representation of the Periodic System of Chemical Elements. Selbstverlag, LaGrange, IL.
- MEYER, L., D. MENDELEJEFF** (1996): Das natürliche System der chemischen Elemente. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 68. 3. Aufl., Reprint der Originalausgabe Leipzig 1895.
- MINAYA RAMIREZ, E. et al.** (2012): Direct mapping of nuclear shell effects in the heaviest elements. *Science* 337: 1207–1210.
- MUCK, F.** (1889): Die chemischen Elemente. Didaktisch-historisch-teleologische Rhapsodien. 2. Aufl. von HEILEB ETNOCH, R. Barth, Aachen.
- MÜLLEN, K.** (2012): Graphen aus dem Chemielabor. *Spektrum d. Wiss.*, Aug. 2012: 82–89.
- NAERAA, T., et al.** (2012): Hafnium isotope evidence for a transition in the dynamics of continental growth 3,2 Gyr ago. *Nature* 485: 627–630.
- NGUYEN, T., A. D. SUTTON, S. BRYNDA, J. C. FETTINGER, G. J. LONG, P. P. POWER** (2005): Synthesis of a stable compound with fivefold bonding between two Chromium (II) centers. *Science* 310: 844–847.
- OGANESSIAN, Y.** (2007): Synthesis of heaviest elements (Results and prospects). *Int. J. Mod. Physics, E*, 16: 949–956.
- OSCHATZ, M. et al.** (2012): Aus Carbiden abgeleitete Kohlenstoffmonolithe mit hierarchischer Porenarchitektur. *Angew. Chemie* 124: 7695–7698.
- PANETH, F.** (1931): Über die erkenntnistheoretische Stellung des chemischen Elementbegriffs. *Schriften Königsb. Gelehrten Ges., Naturwiss. Kl.* 8: Heft 4.
- PARKER, L.J., T. ATOU, J.V. BADDING** (1996): Transition element-like chemistry for potassium under pressure. *Science* 273: 95–97.

- PETERS, H. (1902): Geschichte des Phosphors nach Leibniz und dessen Briefwechsel. Chemiker-Zeitung 26: 1190–1198.
- PILGRIM, E. (1950): Entdeckung der Elemente. Mundus, Stuttgart.
- PODLECH, J. (2010): „Wünscht lieber, dass ich krank sei“ – der Komponist, Chemiker und Mediziner Alexander Borodin. Angew. Chemie 122: 6636–6642.
- PYYKKÖ, P., J.P. DESCLAUX (1979): Relativity and the periodic system of elements. Acc. Chem. Research 12: 276–281.
- RABINOWITSCH, E., E. THILO (1930): Periodisches System. Geschichte und Theorie. Enke, Stuttgart.
- RECK, B.K., T.E. GRAEDEL (2012): Challenges in metal recycling. Science 337: 690–695.
- REHDER, D. (2010): Bioanorganische Chemie des Vanadiums. Chemie uns.Zeit 44: 322–331.
- ROUVRAY, D.H., R.B. KING (eds.) (2004): The Periodic Table. Into the 21st century. RSP, Bal-dock.
- SCERRI, E. R. (2007): The Periodic Table. The story and its significance. Oxford U.P., Oxford.
- SCHÄDEL, M. (2006): Chemie superschwerer Elemente. Angew. Chemie 118: 378–414.
- SCHMEDT AUF DER GÜNNE, J., M. MANGSTL, F. KRAUS (2012): Elementares Fluor F₂ in der Natur. – In-situ-Nachweis und Quantifizierung durch NMR-Spektroskopie. Angew. Chemie 124: 7968–7971.
- SCHMIDT, C. (1917): Das periodische System der chemischen Elemente. J.A.Barth, Leipzig.
- SMETANA, V. et al. (2012): A sodium-containing quasicrystal using gold to enhance sodium's covalency in intermetallic compounds. Angew. Chemie 124: 12871–12874.
- STRASSMANN, F. (1941): Die Auffüllung und die Erweiterung des periodischen Systems. Naturwissensch. 29: 492–496.
- STRASSMANN, R., O. HAHN (1942): Über die Isolierung und einige Eigenschaften des Elements 93. Naturwissensch. 30: 256–260.
- SUHR, D. (2006): Die Alchemisten. Thorbecke, Ostfildern.
- TRUEB, L.F. (2005): Die chemischen Elemente. 2.Aufl., Hirzel, Stuttgart.
- TÜRLER, A. et al. (1999): Erste experimentelle Bestimmung einer thermochemischen Größe einer Seaborgiumverbindung. Angew. Chemie 111: 2349–2351.
- VAN SPRONSEN, J.W. (1969): The Periodic System of Chemical Elements. A history of the first hundred years. Elsevier, Amsterdam.
- VON HEVESY, G. (1927): Die Seltenen Erden vom Standpunkt des Atombaus. Springer, Berlin.
- VOGT, P. et al. (2012): Silicene:compelling experimental evidence for graphenelike two-dimensional silicon. Phys.Rev.Lett. 108: 15501.
- VOSTROWSKY, O., A. HIRSCH (2004): Molekulare Erbsenschoten als supramolekulare Kohlenstoffallotrope. Angew. Chemie 116: 2380–2383.
- WAGGONER, W.H. (1975): Spurious elements. Chemistry 48: No.4, 18–19; No.9, 23; No.10, 27; No.11, 25; No.12, 21; 49: No.5, 28.
- WANG, S.-G., W.H.E. SCHWARZ (2009): Symbol der Chemie: Das Periodensystem der chemischen Elemente im jungen Jahrhundert. Angew. Chemie 121: 3456–3467.
- WEEKS, M.E. (1945): Discovery of the elements. 5.ed. Vlg. Journal chem. Education, Easton, PA.

WIEDERHOLT, W. (1991): Zeichen und Symbole in der frühen pharmazeutischen Chemie. Pharm. uns. Zeit 20: 201–210.

WINKLER, C. (1898): Discovery of new chemical elements. Popular Science Monthly 52: 825–831.

WU, T.C., N.K. CHEN, Y.W. LEE, M.Y. KUO, Y.T. WU (2013): Bowl-shaped fragments of C_{70} or higher fullerenes: synthesis, structural analysis and inversion dynamics. Angew. Chemie 125: 1327–1331.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. ULRICH KULL

Rütlistr. 51

D 70435 Stuttgart

E-mail: ulrich.kull@bio.uni-stuttgart.de

