

Zeitschrift: Prisma : illustrierte Monatsschrift für Natur, Forschung und Technik
Band: 6 (1951)
Heft: 9

Artikel: Wie sind die chemischen Elemente entstanden?
Autor: Oehlinger, S.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-654311>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Wie sind die

chemischen Elemente entstanden?



Von S. Oehlinger

DK 539.15,,71": 541.2

Genauer ausgedrückt müßte die Frage eigentlich lauten: Wie ist die Entstehung der chemischen Elemente aus dem Tatsachenmaterial der Kernchemie zu erklären? Im Gegensatz zum natürlichen Zerfall der chemischen Elemente durch Radioaktivität, der eingehend erforscht werden konnte, gibt es zur Zeit keine Möglichkeit, die natürliche Entstehung der Elemente aus ihren Bausteinen experimentell zu verfolgen. Dies hat seinen Grund darin, daß die Entstehung der Elemente durch Aufbau in den oberen Schichten der Erdkruste im wesentlichen abgeschlossen zu sein scheint und im Erdinnern keiner direkten Beobachtung zugänglich ist.

Eine Ausnahme hiervon bildet die künstliche Erzeugung der auf der Erde nicht existierenden Transurane, d. s. Elemente mit höheren Kernladungszahlen als 92 (Uran), nämlich die Elemente Neptunium (93), Plutonium (94), Americium (95), Curium (96), Berke-
lium (97) und Californium (98) sowie die Herstellung der ebenfalls in der Erdkruste nicht vorkommenden Elemente Nr. 43 (Technetium) und 61 (Prometheum). Hier kennt man die Entstehungsprozesse natürlich sehr genau und kann sie daher auch durch kernchemische Gleichungen ausdrücken.

Um z. B. das bei der Atombombenproduktion wichtige Plutonium 94 Pu 239 zu erhalten, wird das Uran-Isotop mit der Massenzahl 238 einem (n,γ)-Prozeß unterworfen. Dabei wird ein Neutron in den Kern des 92 U 238 hineingeschossen, wodurch ein um eine Masseneinheit schwereres Isotop des Urans, nämlich das 92 U 239, entsteht. Dieses ist radioaktiv und verwandelt sich unter Aussendung eines negativen Elektrons (e^-) in einen Atomkern des Elementes Nr. 93, d. i. das Neptunium 93 Np 239. Aber auch dieses Element ist radioaktiv und verwandelt sich als Beta-Strahler unter Aussendung eines e^- in einen Kern mit der Ladungszahl 94 und gleichbleibender Massenzahl 239, der das gesuchte Plutonium darstellt. Dieses hat mit einer Halbwertszeit von $2,41 \times 10^4$ Jahren eine sehr lange Lebensdauer.

Bei der natürlichen Entstehung der chemischen Elemente durch Aufbau sind drei Fragen von grundsätzlichem Interesse:

1. Wo entstehen die chemischen Elemente?
2. Aus welchen Grundstoffen werden sie gebildet?
3. Wie ist der Verlauf des Entstehungsprozesses?

Auf die erste Frage gibt die spektralanalytische Untersuchung des Lichtes der Sonne und der Fixsterne Antwort. Im Inneren dieser Himmelskörper herrschen jene hohen Temperaturen (zirka 20 Millionen Grad), bei denen Kernreaktionen möglich sind, die zur Entstehung chemischer Elemente führen. Nach einer Arbeit von M. Waldmeier, „Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung“¹⁾ (Leipzig 1941), sind in der Sonne folgende 43 Elemente sicher nachgewiesen worden:

1 Wasserstoff	28 Nickel
2 Helium	29 Kupfer
3 Lithium	30 Zink
4 Beryllium	31 Gallium
5 Bor	32 Germanium
6 Kohlenstoff	37 Rubidium
7 Stickstoff	38 Strontium
8 Sauerstoff	39 Yttrium
11 Natrium	40 Zirkonium
12 Magnesium	41 Niobium
13 Aluminium	42 Molybdän
14 Silizium	44 Ruthenium
16 Schwefel	45 Rhodium
19 Kalium	46 Palladium
20 Kalzium	47 Silber
21 Scandium	48 Cadmium
22 Titan	49 Indium
23 Vanadium	50 Zinn
24 Chrom	51 Antimon
25 Mangan	55 Caesium
26 Eisen	56 Barium
27 Kobalt	

Die Existenz weiterer 14 Elemente mit Kernladungszahlen zwischen 57 (Lanthan) und 82 (Blei) ist noch unsicher. Neben Wasserstoff, Helium und Sauerstoff sind in der Sonnen-

¹⁾ Zitiert aus L. Kober „Vom Bau der Erde zum Bau der Atome“, Universum-Verlagsgesellschaft Wien 1949.

Wenn man der Theorie folgt, wonach die Erde aus Sonnenmaterie entstanden ist, so kann die Erde von der Sonne einen Bestand von höchstens 43 bzw. 57 Elementen mitgeliefert bekommen haben. Wahrscheinlich aber dürfte diese Zahl wesentlich kleiner sein, da seit der Entstehung der Erde vermutlich noch weitere Elemente in der Sonne gebildet worden sind. Die restlichen der bekannten 92 auf der Erde vorkommenden Grundstoffe, darunter die schweren radioaktiven Elemente, müssen also erst auf der Erde entstanden sein, wobei zu bemerken wäre, daß die Elemente Nr. 43 (Technetium) und Nr. 61 (Prometheum), falls sie überhaupt je auf der Erde existiert haben sollten, infolge ihrer radioaktiven Instabilität bereits wieder ausgestorben sind, d. h. sich in die benachbarten Elemente Nr. 42 (Molybdän) und 44 (Ruthenium) bzw. Nr. 60 (Neodym) und 62 (Samarium) umgewandelt haben. Ebenso ist es fraglich, ob die künstlich herstellbaren Transurane jemals als natürliche radioaktive Elemente auf der Erde vorhanden waren.

75% Wasserstoff ${}^1_1\text{H}$ (Protonen), 1,5% schwerem Wasserstoff ${}^2_1\text{H}$ (Deuteronen) und 23,5% Helium ${}^4_2\text{He}$ (Alpha-Teilchen) besteht.

Zur Beantwortung der zweiten Frage ist die Aussage der Astrophysiker von Bedeutung, wonach die Sonne in der Hauptmasse aus Wasserstoff besteht. Aus diesem Wasserstoff müssen sich nun die schwereren Elemente gebildet haben. Zunächst einmal das auf Wasserstoff im System der Elemente folgende Helium, das diesen Namen erhielt, weil es zuerst in der Sonne entdeckt wurde.

Bethe stellte auf Grund von Kernreaktionen, die sich im Laboratorium durchführen lassen, unter Berücksichtigung der dabei ausgelösten Energiebeträge einen Reaktionszyklus auf, bei dem die Bildung von Helium aus Wasserstoff erfolgt.

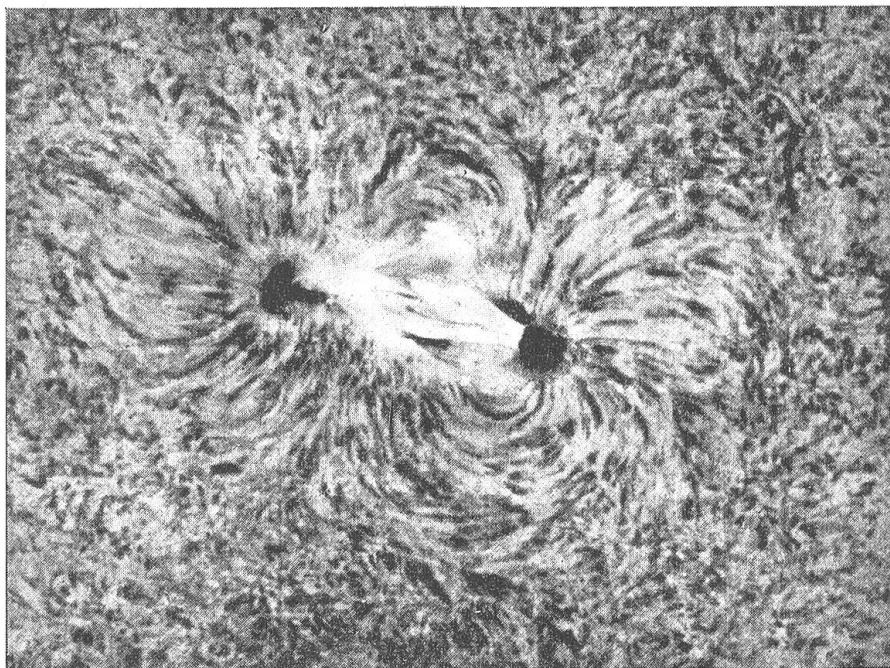
Da bei der Bildung von Helium aus Wasserstoff infolge des eintretenden Massendefektes große Energiebeträge (bei Bildung von 1 Mol = 4 g Helium 648.000.000 Kal = 750.000 kWh) in Freiheit gesetzt werden, müßte eine gleich große Energie aufgewendet werden, um die in 4 g Helium enthaltenen Atomkerne wiederum in Protonen und Neutronen zu zerlegen. Der Atomkern des Heliums stellt demnach ein außerordentlich stabiles Gebilde dar und kann daher als ein Atombaustein höherer Ordnung angesprochen werden. Die Tatsache, daß die radioaktiven Alpha-Strahler, wie z. B. das Radium, Heliumkerne als Zerfallsprodukte aussenden, rechtfertigt diese Annahme. Man könnte daher gedanklich die Atomkerne aller Elemente mit geraden Kernladungszahlen aus Heliumkernen + einer bestimmten Anzahl von „überschüssigen“ Neutronen aufgebaut denken, z. B. das

Kalziumisotop ^{20}Ca aus 10 Alpha-Teilchen; die Kalziumisotopen ^{42}Ca , ^{43}Ca , ^{44}Ca , ^{46}Ca und ^{48}Ca aus 10 Alpha-Teilchen + 2, 3, 4, 6 und 8 Neutronen.

Mit dieser Annahme wäre jedoch noch nichts über den eigentlichen Entstehungsprozeß der chemischen Elemente ausgesagt. Will man sich in dieser schwie-

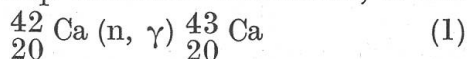
1. Periode:	H ¹																				He ²	K-Schale			
2.	"	Li ³	Be ⁴	B ⁵	C ⁶																N ⁷	O ⁸	F ⁹	Ne ¹⁰	L-Schale
3.	"	Na ¹¹	Mg ¹²	Al ¹³	Si ¹⁴																P ¹⁵	S ¹⁶	Cl ¹⁷	Ar ¹⁸	M-Schale
4.	"	K ¹⁹	Ca ²⁰	Sc ²¹	Ti ²²	V ²³	Cr ²⁴	Mn ²⁵	Fe ²⁶	Co ²⁷	Ni ²⁸	Cu ²⁹	Zn ³⁰	Ga ³¹	Ge ³²	As ³³	Se ³⁴	Br ³⁵	Kr ³⁶					N-Schale	
5.	"	Rb ³⁷	Sr ³⁸	Y ³⁹	Zr ⁴⁰	Nb ⁴¹	Mo ⁴²	Tc ⁴³	Ru ⁴⁴	Rh ⁴⁵	Pd ⁴⁶	Ag ⁴⁷	Cd ⁴⁸	In ⁴⁹	Sn ⁵⁰	Sb ⁵¹	Te ⁵²	I ⁵³	X ⁵⁴					O-Schale	
6.	"	Cs ⁵⁵	Ba ⁵⁶	(57*)	Hf ⁷²	Ta ⁷³	W ⁷⁴	Re ⁷⁵	Os ⁷⁶	Ir ⁷⁷	Pt ⁷⁸	Au ⁷⁹	Hg ⁸⁰	Tl ⁸¹	Pb ⁸²	Bi ⁸³	Po ⁸⁴	At ⁸⁵	Rn ⁸⁶					P-Schale	
7.	"	Fr ⁸⁷	Ra ⁸⁸	Ac ⁸⁹	Th ⁹⁰	Pa ⁹¹	U ⁹²	Np ⁹³	Pu ⁹⁴	Am ⁹⁵	Cm ⁹⁶	Bk ⁹⁷	Cf ⁹⁸											Q-Schale	
*		= Seltene Erden:	La ⁵⁷	Ce ⁵⁸	Pr ⁵⁹	Nd ⁶⁰	Pm ⁶¹	Sm ⁶²	Eu ⁶³	Gd ⁶⁴	Tb ⁶⁵	Dy ⁶⁶	Ho ⁶⁷	Er ⁶⁸	Tm ⁶⁹	Yb ⁷⁰	Cp ⁷¹								

Die Sonne als Geburtsstätte der chemischen Elemente: Sonnenfleckengruppe mit deutlich erkennbarer Granulation der Sonnenoberfläche. Während das Chromosphärenspektrum der Sonne im wesentlichen aus Wasserstoff-, Kalzium- und Heliumlinien besteht, zeigt das Spektrum der Sonnenflecke und der nur in ihren Zonen vorkommenden „metallischen“ Protuberanzen das Vorhandensein von Metaldämpfen in größerer Konzentration an, als auf der übrigen Sonnenoberfläche (Aufnahme: Mount-Wilson-Sternwarte)

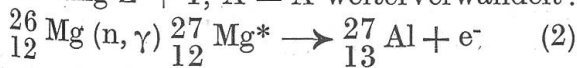


rigen Frage nicht in unbeweisbare Spekulationen verlieren, so kann sich ein begründeter Erklärungsversuch zur Zeit nur auf die experimentell erwiesenen Kernreaktionen stützen, die einen Aufbau der Atomkerne zur Folge haben. Es sind dies die Reaktionen (n, γ), (d, n), (α , n) und (α , p), bei denen Neutronen (n), Deuteronen (d) und Alpha-Teilchen (α) mit Atomkernen in Reaktion treten, wobei Gamma-Quanten (γ), Neutronen und Protonen (p) ausgesandt werden können.

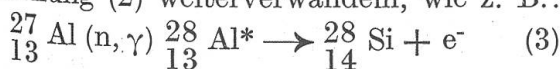
Wie aus nachfolgenden Reaktionsbeispielen ersichtlich wird, führt der (n, γ)-Prozeß bei Elementisotopen mit geraden Kernladungszahlen meist gemäß der Reaktionsgleichung $Z^2 = Z, A^2 + 1$ zu einem um eine Masseneinheit schwereren Isotop desselben Elementes, z. B.:



Der (n, γ)-Prozeß aber kann in seltenen Fällen auch zu dem nächst höheren Element führen, wenn zunächst ein radioaktiver Zwischenkern (*) entsteht, der sich als Beta-Strahler gemäß der Gleichung $Z + 1, A = A$ weiterverwandelt:



Bei Elementisotopen mit ungeraden Kernladungszahlen führt der (n, γ)-Prozeß stets zu radioaktiven Zwischenkernen, die sich analog der Gleichung (2) weiterverwandeln, wie z. B.:

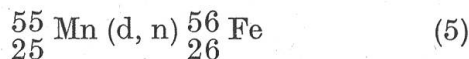


Bei Isotopen mit geraden Kernladungszahlen führt der (d, n)-Prozeß nach der Gleichung $Z + 1, A + 1$ über einen radioaktiven Zwischenkern zu einem um eine Masseneinheit schwereren Isotop desselben Elementes:

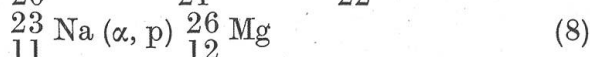
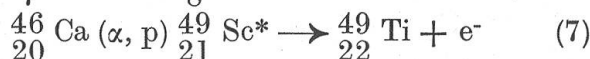
^{*)} Z = Kernladungszahl = Protonenzahl
^{*)} A = Massenzahl = Protonen- + Neutronenzahl



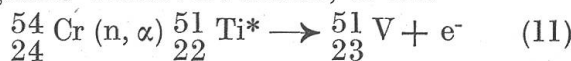
Bei Isotopen mit ungerader Kernladungszahl gelangt man über den (d, n)-Prozeß stets zu stabilen Isotopen des nächst höheren Elementes, z. B.:



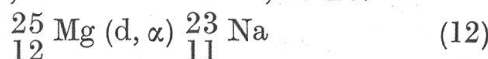
Ganz analog liegen die Verhältnisse bei Isotopen mit geraden bzw. ungeraden Kernladungszahlen, die einem (α , p)-Prozeß (Gleichung $Z + 1, A + 3$) bzw. (α , n)-Prozeß (Gleichung $Z + 2, A + 3$) unterworfen werden, z. B.:



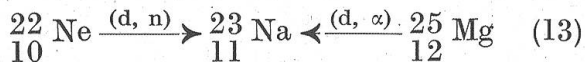
Es ist nicht nur denkbar, sondern sogar wahrscheinlich, daß bei der Entstehung ungerader Elemente auch der kernabbauende Prozeß (n, α) eine Rolle spielt, so daß sich aus stabilen Isotopen gerader Kernladungszahl nach der Gleichung $Z - 2, A - 3$ radioaktive Isotopen bilden, die sich durch Beta-Strahlung in stabile Atomkerne mit ungerader Kernladungszahl weiterverwandeln, z. B.:



Daneben könnten sich möglicherweise auch (d, α)-Reaktionen abspielen, die nach der Gleichung $Z - 1, A - 2$ verlaufen, z. B.:



Die auffallend geringere Häufigkeit der Elemente mit ungeraden Kernladungszahlen in der Erdkruste sowie in der Sonne legt die Vermutung nahe, daß Elemente mit ungeraden Kernladungszahlen ausschließlich oder doch vorwiegend sekundär aus Elementen mit gerader Ladungszahl entstanden sind, und zwar nach den Gleichungen (9) und (11) sowie dem Schema:

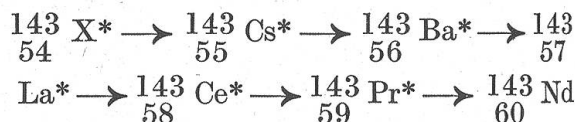


Eine Hypothese des Elemente-Aufbaues muß, wenn sie Anspruch auf Wahrscheinlichkeit erheben will, auch dem Tatsachenmaterial der Paragenese, d. i. dem gemeinsamen Vorkommen der Elemente gerecht werden können. Prüft man die paragenetischen Verhältnisse, so findet man in so zahlreichen Fällen von Paragenese eine überzeugende Übereinstimmung mit den Ergebnissen, die sich aus den hier aufgezeigten Kernreaktionen ableiten lassen, hier aufgezeigten Kernreaktionen ableiten lassen, daß man schwerlich daran vorbeisehen kann. Besonders klar treten diese Beziehungen bei den Zusammenvorkommen folgender Elemente zutage: Stickstoff — Sauerstoff (${}^7\text{N} - {}^8\text{O}$), Natrium — Magnesium (${}^{11}\text{Na} - {}^{12}\text{Mg}$), Aluminium — Magnesium (${}^{13}\text{Al} - {}^{12}\text{Mg}$), Kalium — Kalzium (${}^{19}\text{K} - {}^{20}\text{Ca}$), Silizium — Phosphor (${}^{14}\text{Si} - {}^{15}\text{P}$), Titan — Vanadin (${}^{22}\text{Ti} - {}^{23}\text{V}$), Kupfer — Zink (${}^{29}\text{Cu} - {}^{30}\text{Zn}$), Zink — Gallium (${}^{30}\text{Zn} - {}^{31}\text{Ga}$), Germanium — Arsen (${}^{32}\text{Ge} - {}^{33}\text{As}$), Rubidium — Strontium (${}^{37}\text{Rb} - {}^{39}\text{Sr}$), Cadmium — Indium (${}^{48}\text{Cd} - {}^{49}\text{In}$), Zirkon — Niobium (${}^{40}\text{Zr} - {}^{41}\text{Nb}$), Caesium — Barium (${}^{55}\text{Cs} - {}^{56}\text{Ba}$), Platin — Gold (${}^{78}\text{Pt} - {}^{79}\text{Au}$), Thallium — Blei (${}^{81}\text{Tl} - {}^{82}\text{Pb}$) u. v. a.

Aus den hier mit einigen charakteristischen Beispielen angedeuteten Kernreaktionen läßt sich zwar keine Aussage darüber machen, nach welcher dieser Kernreaktionen die chemischen Elemente im Kosmos nun tatsächlich entstanden sind; sie geben jedoch Hinweise auf Möglichkeiten, die sich auf gesicherte Ergebnisse kernchemischer Forschung stützen und denen daher ein gewisses Maß von Wahrscheinlichkeit zukommt. Man wird aber dabei nicht übersehen dürfen, daß diese Reaktionsmöglichkeiten für den Versuch, die Entstehung der Elemente zu veranschaulichen, nur grobe Schemata darstellen und der wirkliche Reaktionsverlauf ungleich komplizierter vor sich gegangen sein konnte, etwa nach dem Beispiel des Reaktionszyklus für die Entstehung von Helium.

So sind z. B. unter den Spaltprodukten des Uran 235 radioaktive Isotopen mit so hohen

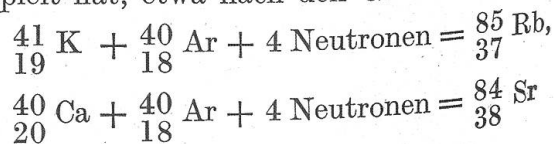
Neutronenüberschüssen bekannt, daß mehrere Beta-Teilchen (e^-) ausgesandt werden müssen, ehe eine in der Natur vorkommende stabile Atomart erreicht wird, wie z. B. beim Xenon ${}^{143}\text{X}^*$, das über Caesium, Barium, Lanthan, Cer, Praseodym nicht weniger als fünf betastrahlende Isotopen durchlaufen muß, ehe es im Neodym mit der Kernladungszahl 60 seinen stabilen Zustand erreicht:

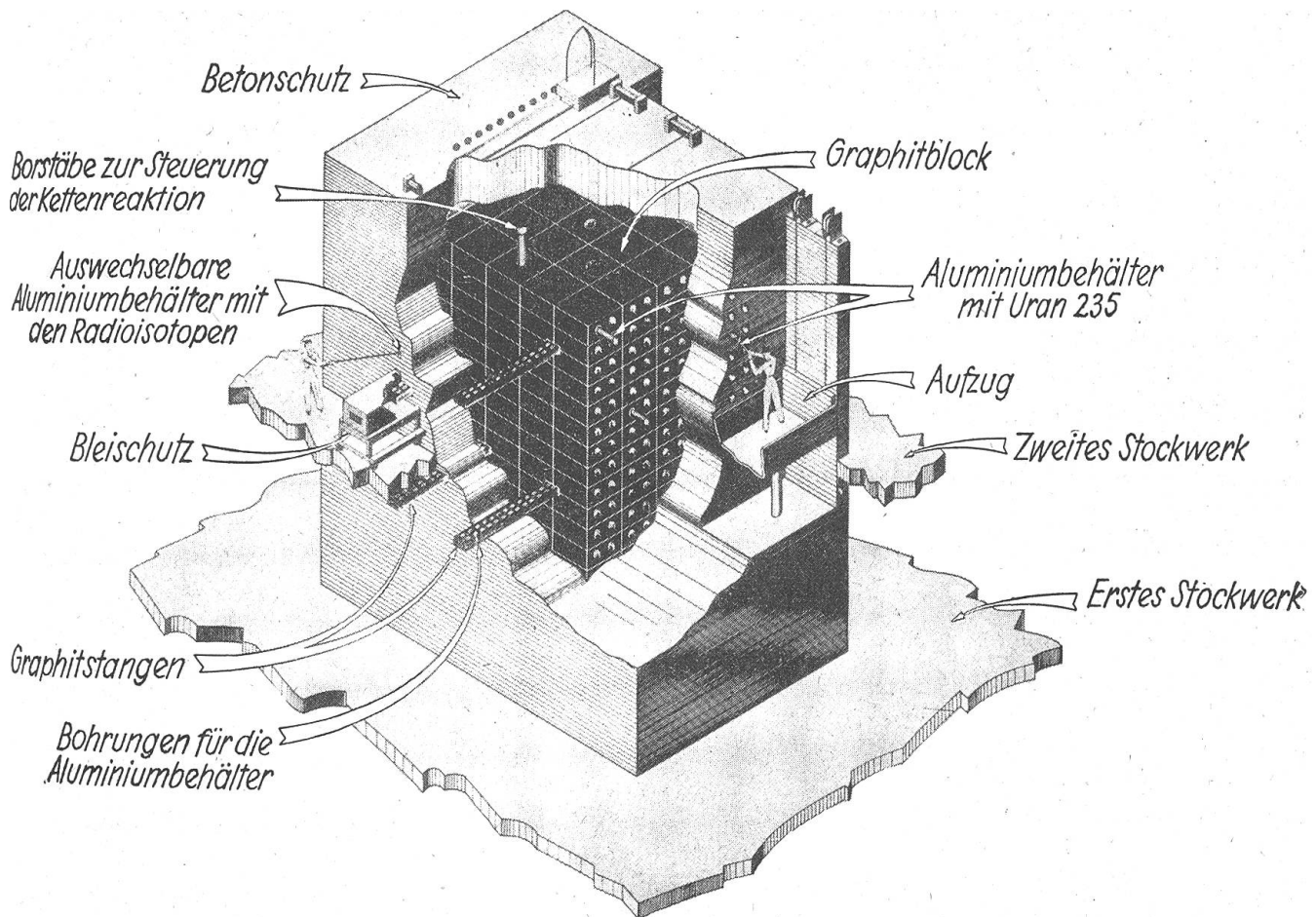


Es liegt hier somit ein kernchemischer Aufbauprozeß vor, der im Endeffekt zu einem gleich um 6 Kernladungszahlen höheren Element führt.

Es ist weiter bemerkenswert, daß nicht nur beim radioaktiven Zerfall α -instabiler Isotopen Alpha-Strahlen = Heliumkerne ausgesandt werden, sondern auch unter den Spaltprodukten des Uran 235 eine auffallend große Zahl von Xenon- und Krypton-Isotopen nachgewiesen wurden. Dies legt den Gedanken nahe, daß ganz allgemein die Atomkerne von Edelgasen nicht nur beim natürlichen Zerfall und der künstlichen Kernspaltung, sondern auch beim Aufbau der Atomkerne eine bevorzugte Rolle spielen. Prof. Efremov hat diesen Gedanken aufgegriffen und zu einer neuen Interpretation des periodischen Systems ausgebaut. In seiner „genealogischen Tabelle der chemischen Elemente“ bilden die Edelgase Helium, Neon, Krypton, Xenon und Radon sowie die Elemente der Gruppe VIII des periodischen Systems (${}^{26}\text{Fe}$, ${}^{27}\text{Co}$, ${}^{28}\text{Ni}$; ${}^{44}\text{Ru}$, ${}^{45}\text{Rh}$, ${}^{46}\text{Pd}$ und ${}^{76}\text{Os}$, ${}^{77}\text{Ir}$, ${}^{78}\text{Pt}$) die Mittelpunkte, von denen sich nach links und rechts die Elemente ableiten.

Das paragenetische Vorkommen homologer Elemente, die im periodischen System untereinander stehen, wie z. B. die Alkali- und Erdalkalimetalle, ferner ${}^{22}\text{Titan} - {}^{72}\text{Hafnium}$, ${}^{46}\text{Palladium} - {}^{78}\text{Platin}$, ${}^{47}\text{Silber} - {}^{79}\text{Gold}$, ${}^{30}\text{Zink} - {}^{48}\text{Cadmium}$, ${}^{31}\text{Gallium} - {}^{48}\text{Indium}$, ${}^{33}\text{Arsen} - {}^{51}\text{Antimon}$, ${}^{16}\text{Schwefel} - {}^{34}\text{Selen}$ u. a., läßt die Vermutung zu, daß sich der Aufbau der Elemente nicht nur von Kernladungszahl zu Kernladungszahl, in waagrechter Richtung fortschreitend, vollzogen, sondern sich auch in der senkrechten Richtung homologer Elemente abgespielt hat, etwa nach den Gleichungen:

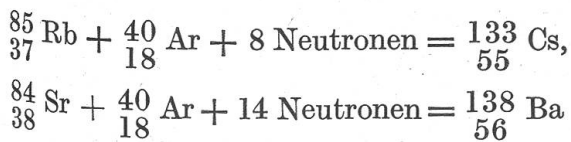




URANBRENNER

Die Werkstätte künstlicher Elementerzeugung. Im Uranbrenner finden künstlich eingeleitete Elementumwandlungen durch Atomkernreaktionen statt. Der Uranbrenner besteht im wesentlichen aus einem Graphitblock, in dessen Bohrungen Aluminiumbehälter eingeschoben werden, die Uran 235 enthalten. Durch verschieden weit in den Graphit einschiebbare Borstäbe wird der Neutronenstrom und damit der Verlauf der Kettenreaktion gesteuert. Die umzuwandelnden Elemente befinden sich in Aluminiumbehältern, die in die Bohrungen langer Graphitstangen eingelegt werden. Die Entnahme der umgewandelten Elemente aus diesen Graphitstangen erfolgt hinter Schutzvorrichtungen aus Blei. Der ganze Graphitblock ist von einem massiven Betonschutz umgeben. Es ist wissenschaftlich durchaus vertretbar, den Verlauf der im Uranbrenner oder den Cyclotronen stattfindenden Atomkernprozesse auch für eine Entstehungserklärung der chemischen Elemente in der Natur heranzuziehen.

(Skizze: Isotopes Division US-Atomic Energy Commission, Oak Ridge, USA.)



Es hat geradezu den Anschein, als ob homologe Elemente, wie z. B. Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium und Caesium, verschieden weit fortgeschrittene Stadien einer bestimmten Entwicklungsrichtung im Aufbau der Elemente darstellen würden. Der genetische Zusammenhang homologer Elemente kommt ja auch im analogen Bau ihrer Elektronenhüllen zum Ausdruck, worauf wiederum ihre ähnlichen chemischen Eigenschaften beruhen.

Daß es im Laboratorium noch nicht gelungen ist, homologe Elemente nach den angedeuteten Kernprozessen synthetisch aufzubauen, wie dies möglicherweise in der Natur geschehen sein konnte, darf uns nicht verwundern. Man wird dazu bedenken müssen, daß den Kernphysikern nur ein verschwindend kleiner Querschnitt experimenteller Möglichkeiten zugänglich ist und viele grundlegende Voraussetzungen überhaupt fehlen, über welche die Natur in ihren großen kernchemischen Laboratorien, den Sonnen, den Novae und Supernovae, diesen Geburts- und zugleich wieder Vernichtungsstätten der Materie verfügt.