Vs. 2025-01-26 S. 1

## Die Entstehung der Elemente (Nukleosynthese)



Im Anfang war der Wasserstoff: Primordiale Nukleosynthese

Innerhalb der ersten 3 Minuten nach dem Urknall, vor etwa 14 Milliarden Jahren, vereinigten sich die Protonen und Neutronen zu den ersten Atomen. Diese allererste Bildung von Atomen wird als **primordiale Nukleosynthese** bezeichnet. Die Fusionsprozesse fanden einheitlich im gesamten damaligen Universum statt. Nach 3 Minuten war das Universum so stark abgekühlt und expandiert, dass diese Reaktionen nicht mehr weiter stattfinden konnten. Es kann berechnet werden, dass bei den Fusionen dieser primordialen Nukleosynthese ca. 75% <sup>1</sup>H und ca. 25% <sup>4</sup>He entstehen sollten, neben Kleinstmengen anderer leichter Atome (z.B. <sup>2</sup>H).

## Elemententstehung in Sternen: Stellare Nukleosynthese

Die Bildung aller schwereren Elemente begann erst ab einem später Zeitpunkt in Sternen und anderen massereichen Himmelskörpern. Solche gab es in den ersten Minuten nach dem Urknall noch nicht. Die Himmelskörper entstanden erst ca. 10 Milliarden Jahre später aus der Atomwolke (Urwolke), durch Anziehungskräfte zwischen den Teilchen. Massen ziehen sich gegenseitig an: Gravitation. Dieser Effekt verstärkt sich selbst: Immer schwerere Massezentren üben immer stärkere Gravitationskräfte aus. In der ursprünglich einheitlichen Urwolke entstanden Sterne. Zwischen ihnen liegen nahezu leere interstellare Räume.

Die Verdichtung von Massen zu Sternen führt zu einer Aufheizung, die Kernreaktionen in Gang setzen. In Sternen, beispielsweise unserer Sonne, verschmelzen bei mehreren Millionen Grad und hohem Druck je vier H-Atomkerne, also Protonen, über mehrere Zwischenstufen zu Heliumatomkernen <sup>4</sup>He (aus 2 p<sup>+</sup> 2 n<sup>0</sup>).

Bei diesen Reaktionsfolgen, zusammengefasst als **Wasser-stoffbrennen** bezeichnet, wandeln sich letzten Endes vier Protonen unter Abgabe von zwei positiven Ladungen (*Positronen*) und viel Energie in einen Heliumkern (<sup>4</sup>He = *alpha*-Teilchen) um:

4 
$$^{1}$$
H → .... → ..... →  $^{4}$ He + 2 Positronen + Energie

Das *Wasserstoffbrennen* ist die dominante Energiequelle normaler Sterne. Der Heliumkern ist dabei ein wenig leichter als die vier Protonen zusammen. Die Massendifferenz wird als Energie frei (Massendefekt). Sie kann mit der Energie-Masse-Äquivalenz-Formel von EINSTEIN (E = mc²) berechnet werden.

 Bei unserem Stern, der Sonne, verschmelzen jede Sekunde 564 Millionen Tonnen H, zu 560 Millionen Tonnen He. Berechnen Sie die freigesetzte Energie in J/sec. Literaturwert (wikipedia): Leuchtkraft Sonne: 3,8·10<sup>26</sup> Watt.

Es gibt einen natürlichen zeitlichen Verlauf der Fusionsvorgänge. Durch die Verschmelzung entstehen Atomen immer höherer Ordnungszahl: Mit zunehmendem Alter bilden sich immer massereichere Fusionsprodukte im Stern. Das geht bis zur Bildung von Eisen (Fe), dem Atomkern mit der höchsten Bindungsenergie, unter Abgabe von Energie. Die Fusionsreaktionen zu noch schwereren Kernen würde eine Zufuhr von Energie erfordern. Fusionsprozesse finden ab Eisen (Fe) nicht mehr statt.

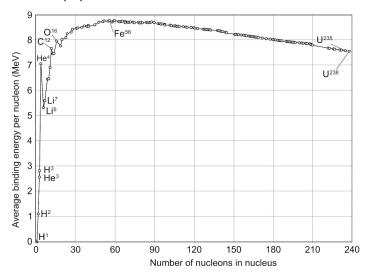


Abb. 1: Bindungsenergie pro Nukleon (wikipedia.de, fastfission)

Merke: Vom Helium (<sub>2</sub>He) bis zum Eisen (<sub>26</sub>Fe) entstehen die Elemente durch Fusionsprozesse in Sternen (Stellare Nukleosynthese). Ausnahmen (siehe unten): Li, Be und B

Schwerere Elemente als Eisen entstehen durch den weitaus selteneren Neutroneneinfang. Beispiel:

$$^{197}_{79}Au + n^0 \rightarrow ^{198}_{79}Au \xrightarrow{\beta-Zerfall} \stackrel{198}{\longrightarrow} ^{198}_{80}Hg$$

2. Weshalb nimmt die Ordnungszahl von Au zu Hg zu?

Die entstandenen und entstehenden Elemente gelangen kontinuierlich durch Sonnenwind oder explosiv in einer Supernova in das interstellare Medium und stehen für die Bildung anderer astronomischer Objekte zur Verfügung. Vs. 2025-01-26 S. 2

Häufigkeit der Elemente

## Die Häufigkeit der chemischen Elemente unterscheidet sich je nach dem betrachteten Bereich.

Wird das gesamte Universum betrachtet, ist Wasserstoff das mit Abstand häufigste Element. Danach folgt Helium, das teilweise schon durch die *primordiale Nukleosynthese* entstanden ist, aber auch beim *Wasserstoffbrennen* in Sternen entsteht. Alle weiteren Elemente zusammen machen nur einen kleinen Teil der im Universum vorhandenen Materie aus.

Auch in unserem Sonnensystem sind Wasserstoff und Helium die dominierenden Elemente. Die nächst häufigen Elemente sind Kohlenstoff und Sauerstoff. Lithium, Bor und Beryllium sind interessanterweise (vgl. Abb. 3) selten. Die Seltenheit dieser drei Elemente erklärt sich dadurch, dass sie keine Produkte der stellaren Kernfusionen sind, die zur Elemententstehung führen. So führt das Wasserstoffbrennen zu Heliumatomen, das darauffolgende Heliumbrennen, (auch Drei-Alpha-Prozess genannt), schon zu den protonenreicheren Kohlenstoffatomen.

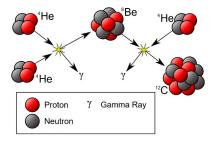


Abb. 2: Drei-Alpha-Prozess. Q: wikipedia.de

Helium, Kohlenstoff und Sauerstoff sowie alle anderen Atomsorten wurden und werden hauptsächlich durch Kernfusion in Sternen gebildet. Dabei entstanden und entstehen häufiger Atome mit gerader Protonenzahl, wie Sauerstoff, Neon, Eisen oder Schwefel, während Elemente mit ungerader Protonenzahl seltener sind. Diese Regel wird nach ihren Erstbeschreibern auch **Oddo-Harkins-Regel** genannt. Man vermutet, dass gepaarte Protonen aufgrund der gegenseitigen Kompensation des Spins (**Spinpaarung**, ähnlich der Spinpaarung von Elektronen!) zu stabileren Atomkernen führt. Markant ist auch die besondere Häufigkeit des Eisens als Endpunkt der möglichen Kernfusion in Sternen.

Auch Blei (Pb) sticht in seiner Häufigkeit heraus (vgl. Abb. 4 und 5). Es handelt sich um das schwerste Element mit nichtradioaktiven, also stabilen Nukliden (≈ "Isotope"). Blei sammelt sich als Endprodukt mehrerer radioaktiver Zerfallsreihen an. Beispiele:

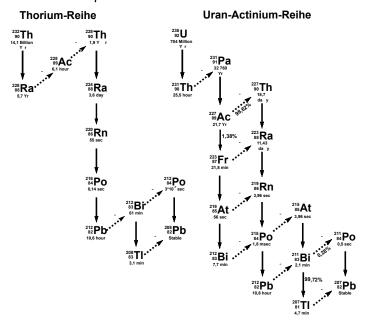


Abb. 3: Beispiele für Zerfallsreihen. Q: openclipart. Juhele, veraendert

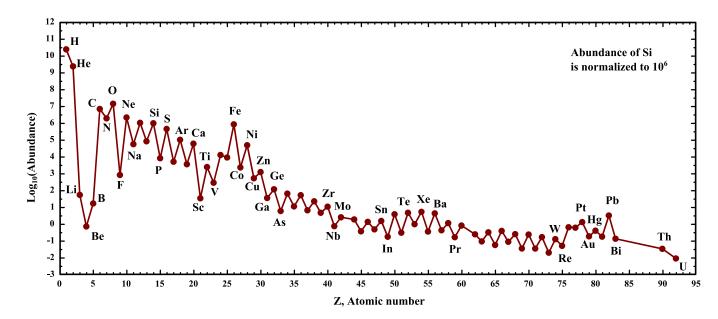
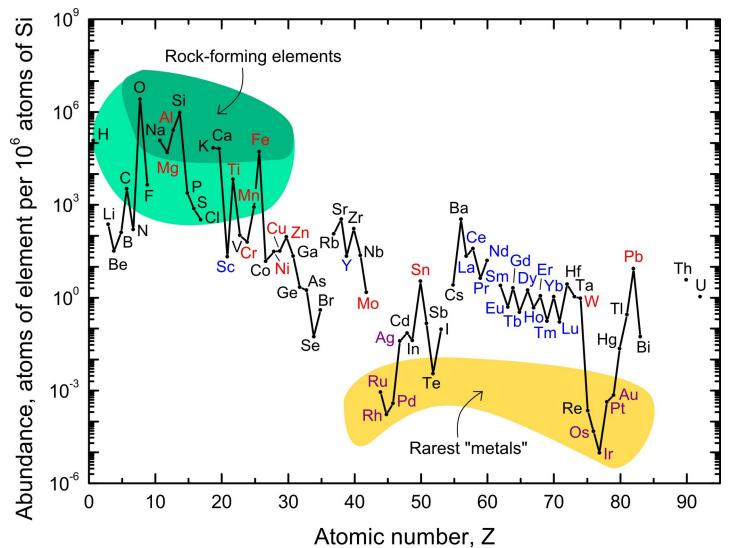


Abb. 4: Estimated abundances of the elements in the solar system. Li, Be and B are rare because they are poorly synthesized in fusion reactions in stars and Big Bang. Trends: (1) alternation of abundance as they have even or odd atomic numbers, and (2) a general decrease in abundance, as they become heavier. Q: commons.wikimedia.org . A: MHz'as

Vs. 2025-01-26 S. 3

Die Verteilung auf der Erde unterscheidet sich von derjenigen, die im gesamten Universum vorherrscht. Insbesondere sind auf der Erde im Vergleich zum Universum nur geringe Mengen Wasserstoff und Helium vorhanden, weil diese Gase vom Schwerefeld der Erde nicht festgehalten werden können. Erst das dritthäufigste Element des Universums, der Sauerstoff, ist deshalb das häufigste Element auf der Erde und macht ungefähr die Hälfte der Masse der Erdkruste und der Erdhülle (= Erdkruste + Atmosphäre + Gewässer) aus. Weiterhin dominiert auf der Erdhülle und der Erdkruste das Silicium, mit ungefähr ¼ der Masse. An dritter Stelle folgt das Aluminium. Alle anderen Elemente machen zusammen nur ca. ¼ der Masse aus!

Betrachtet man die Erde als Ganzes mit ihrem Erdkern, der aus einer Fe/Ni-Legierung besteht, so ist auch Eisen sehr häufig.



**Abb. 5:** Häufigkeitsverteilung der Elemente auf der Erde. Quelle: http://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/ (gemeinfrei), bearbeitet In dem jeweils betrachteten Bereich sehr häufig vorkommende Elemente bezeichnet man als **Mengenelemente**, sehr seltene als **Spurenelemente**. **Quelle:** Verschiedene wikipedia-Artikeln. verändert.