**Zeitschrift:** Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen =

Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

**Band:** 28 (1948)

Heft: 1: Festschrift P. Niggli zu seinem 60. Geburtstag den 26. Juni 1948

Artikel: Atomhäufigkeit und Strukturperioden im Kernbau

**Autor:** Sonder, Richard A.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-23061

### 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:** 18.11.2025

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

## Atomhäufigkeit und Strukturperioden im Kernbau

Von Richard A. Sonder, Oberrieden (Schweiz)

## Bemerkungen zur Tafelbeigabe

Die ersten Feststellungen, dass die Atomhäufigkeit gewissen Gesetzmässigkeiten unterworfen ist, machte Oddo (1914) unmittelbar gefolgt von Harkins (1915). Während die ersten beiden Autoren sich hauptsächlich mit der Feststellung beschäftigten, dass Elemente mit gerader Atomziffer häufiger sind als ihre Nachbarn mit ungerader Atomziffer, wies Nigoli (1920) an Hand der Häufigkeit der verbreitetsten Elemente der Erdkruste nach, dass in einer graphischen Darstellung der Elemente 1—32 bei O 8, Si 14, Ca 20 und Fe 26 Häufigkeitsmaxima auftreten, welche durch die konstante Differenz 6 voneinander getrennt sind (siehe Fig. 1).

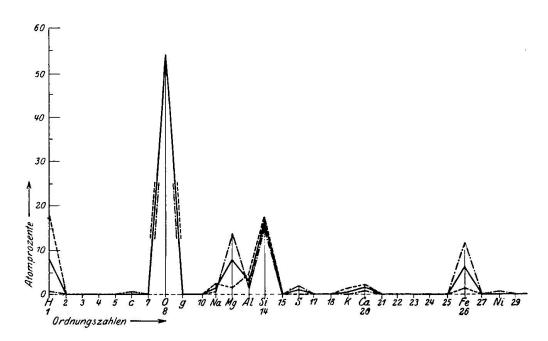


Fig. 1. Absolute Atomhäufigkeit der Elemente 1—29. Die restlichen Elemente sind so selten, dass sie in dieser Art der Darstellung nicht mehr zur Geltung kommen. (Gestrichelt Erdkruste, strichpunktiert Steinmeteoriten, ausgezogen Mittelwerte)

Mir selber fiel später auf (Sonder 1923), dass auch in den Atomgewichten gesetzmässige Zusammenhänge enthalten sind, welche sich mit den Häufigkeitsregeln in Beziehung setzen liessen. Dies führte zu einem Versuch, die Atomkernhäufigkeit aus strukturellen Packungsgesetzmässigkeiten zu erklären. Das Resultat war überraschend. Sobald man annahm, dass die komplexeren Atomkerne aus Subgruppen von Deuteronen und Neutronen bestanden, konnte gezeigt werden, dass an Hand eines solchen Atomkernmodells alle damals bekannten Eigentümlichkeiten der Atomhäufigkeit, sowie der isotopen Variation erklärt werden konnten. Deuteronen und Neutronen waren allerdings noch nicht bekannt und wurden demnach in der zitierten Arbeit anders benannt. In den Hauptergebnissen griff die Strukturtheorie ausserdem weit über die damaligen Kenntnisse hinaus, indem sie ein eigentliches periodisches System für die Atomhäufigkeit postulierte, von welchem die Niggli'sche Periode nur die Anfangsglieder wiedergab. Untersuchte man damals die existierenden Häufigkeitsschätzungen der selteneren Elemente, so ergab sich ein ziemlich wildes Auf und Ab, sodass die Behauptung, es sei darin ein periodisches System enthalten, reichlich gewagt erscheinen musste. Über die Häufigkeit der Isotopen war überhaupt fast nichts bekannt.

Seither haben Geochemie und chemische Meteoritenkunde gewaltige Fortschritte gemacht. Es zeigte sich sehr bald, dass weitgehende Korrekturen der älteren Häufigkeitsschätzungen nötig wurden. Schon 1928 konnte Niggli an Hand besserer Daten meine Annahme bestätigen, dass auch für die selteneren Elemente das sechser Zahlenschema tatsächlich seine Berechtigung haben dürfte. Ähnliche Betrachtungen und neue Schätzungskorrekturen enthielt meine Arbeit von 1930. Einen weiteren Fortschritt brachte die Publikation der umfangreichen Analysenresultate von I. und W. Noddack (1930), welche den periodischen Charakter der Häufigkeitsfluktuationen als Funktion der Atomziffer vollauf bestätigten. Es erübrigt sich, hier auf die vielen weiteren Publikationen von Analysenergebnissen einzutreten, da V. M. Goldschmidt 1938 darüber eine umfassende Zusammenstellung veröffentlicht hat. Auch dieser Autor bestätigt die Existenz von periodischen Gesetzmässigkeiten, welche in diesem Zahlenmaterial enthalten sind. Die Forschung nach der quantitativen Verbreitung der einzelnen Isotopenarten ist heute weitgehend abgeschlossen (Aston 1942).

Es scheint deshalb gerechtfertigt, bei Anlass dieser Festschrift eine neue Tabelle der natürlichen mittleren Atomhäufigkeit zu publizieren, da Zusammenstellungen über die Atomhäufigkeit allein in den Meteoriten oder allein in der Erdkruste, wie sie z. B. bei Gold-SCHMIDT angeführt sind, gewisse Verzerrungen enthalten müssen. Differenzen betreffs der Häufigkeitsbewertung der einzelnen Elemente können sowohl chemisch-analytische Gründe haben, wie auch Gründe mit spekulativerem Einschlag. Es ist zu hoffen, dass die chemisch-analytischen Diskrepanzen, welche heute noch für viele seltenere Elemente innerhalb eines gewissen Rahmens auftreten, in Zukunft weiter eingeengt werden. Sobald die relative Häufigkeit von zwei Elementen einigermassen gleich wird, ist es schwer, sie in einen genauen Häufigkeitsrang einzustufen. Theoretisch interessant ist z. B. der Fall von Sr und Zr. Während nach der zitierten sechser Periode Sr etwas häufiger sein sollte als Zr, haben Analysen im allgemeinen eher ein Überwiegen von Zr ergeben, sobald man auf Direktanalysen abstellt. Sucht man dagegen die Häufigkeit von Sr an Hand des Verhältnisses 0,5:100 für Sr: Ca nach Noll zu ermitteln, so erhält man ein leichtes Überwiegen von Sr gegen Zr, wie es beispielsweise in der nachfolgenden Darstellung angenommen wurde. Solche Unsicherheiten chemisch analytischer Natur existieren noch bei manchen andern selteneren Elementen.

Vorläufig und vielleicht auch für eine weitere Zukunft ist es nicht möglich, ohne unkontrollierbare spekulative Annahmen eine Berechnungsmethode über die Rekonstruktion der kosmischen Urmischung aufzustellen. Wir kennen 4 kosmische Hauptdifferentiate der Materie, nämlich:

- 1. Die Siderosphäre, repräsentiert durch die Eisenmeteoriten.
- 2. Die schwere Lithosphäre, repräsentiert durch die Steinmeteoriten.
- 3. Die leichte Lithosphäre, repräsentiert durch die Erdkruste, resp. die Plateaubasalte.
- 4. Die Atmosphäre (auf der Erde in ihrer ursprünglichen Mischung abgewandert).

Wir wissen, dass von diesen Mischungen vermutlich die Steinmeteoriten noch am ehesten der Urmischung nahekommen, dass aber daraus gewisse Bestandteile stark in die andern Sphären abgewandert sein können. Es hat kaum einen Zweck, tiefgründige Betrachtungen über die mögliche Urmischung anzustellen, die wir doch nicht kontrollieren können. Man kann nur versuchen, ein formelles Mischungsverhältnis einfacher Natur festzulegen, das einigermassen der natürlichen "Urmischung" entsprechen könnte. Wahrscheinlich wird man dem steinmeteoriden Differentiate soviel "Erdkruste" zu-

mischen müssen, dass die typisch periphilen Elemente der Lithosphäre, wie Alkalien und Erdalkalien, in der Gesamtkurve der Elementhäufigkeit eine einigermassen normale Stellung einnehmen. Die Bewertung des Eisenmeteoritenanteils ist weniger leicht kontrollierbar, aber auch weniger entscheidend, da dadurch hauptsächlich die Bedeutung des Eisenmaximums und einiger Metalle nach oben oder unten verschoben wird. Was endlich den atmophilen Anteil der Mischung anbelangt, so kann man denselben überhaupt nur interpolieren. Man kann z. B., wie ich es 1930 getan habe, den Anteil der Edelgase aus der relativen Bedeutung der Nachbarelemente schätzen. Vielleicht kann man auch die Spektraluntersuchungen der Sonnenatmosphäre beiziehen, wenn die Methoden dieser Analyse noch sicherer geworden sind.

In der nachstehenden Zusammenstellung wurde weitgehend auf die Analysenzusammenstellung von Goldschmidt Rücksicht genommen, was die Zusammensetzung der einzelnen Differentiate an selteneren Elementen anbelangt. Die häufigeren Elemente wurden nach den bekannten Mittelwerten berechnet (NIGGLI). In bezug auf Steinmeteoriten sei auch auf die neuere Zusammenstellung von Brown und Patterson (1947) verwiesen. Als Mischungsverhältnis wurde angenommen 1 Teil Eisenmeteoriten\*), 1 Teil Erdkruste (resp. Plateaubasalt, Niggli 1928) und 5 Teile Steinmeteoriten mit darin vorhandenem freien Eisen. Soweit die so erhaltenen Resultate noch einer atmophilen Korrektur bedurften, wurde eine solche vorgenommen. Es wurde dabei vermutet, dass auch Elemente wie O, F, Hg, ja sogar Se und Te mit korrekturbedürftig seien. Natürlich ist es besonders schwer für atmophile Elemente wie H und He, ja vielleicht auch noch für O usw. eine solche Korrektur zu geben. Würde man z. B. auf die bisherigen Ergebnisse der Spektralanalyse von Sonne und Sterne abstellen, so könnte man die Zahlen für H und He usw. noch viel höher ansetzen, als es in der Tabelle geschehen ist. Es fragt sich aber, ob in diesen Sternatmosphären die leichten Elemente nicht besonders angereichert sind. Auch für U und Th kommt eine Korrektur in Frage, welche in ihren Details wiederum zweifelhaft ist. Es muss das Alter von Erde und Meteoriten bei den radioaktiven Elementen berücksichtigt werden. Es bestehen also so mancherlei Quellen zu spekulativer Variation einiger Werte bei der Festlegung der "kosmischen" Häufigkeitszahlen. Es ist nicht möglich, irgend eine Darstellung zu geben, von der wir sagen könnten, sie sei abso-

<sup>\*)</sup> Siehe jedoch Fussnote Seite 532.

lut richtig. Man erkennt aber, dass alle diese spekulativen Variationsmöglichkeiten nicht in der Lage sind, den Grundcharakter der Häufigkeitsverhältnisse und die darin enthaltenen periodischen Gesetzmässigkeiten wesentlich zu ändern, weil die absoluten Häufigkeitsfluktuationen viel zu gross sind. Es ist deshalb richtig, die Häufigkeitszahlen in auf- oder abgerundeten Werten anzuführen, wie dies in der beigelegten Tabelle geschehen ist und nicht mit mehreren Dezimalen, welche nur eine nicht existierende Genauigkeit vortäuschen könnten.

Die Darstellung der Atomkernhäufigkeit bedarf dreier Häufigkeitszahlen wie folgt:

a) Die Elementhäufigkeitszahl Qe gibt die relative atomare Häufigkeit der Elemente wieder. Als Bezugselemente wählt man zweckmässig Fe und Si. Gemäss der gewählten Formel ergibt sich praktisch eine gleich grosse atomare Häufigkeit von Si und Fe, welche somit als gleich zu je 1 000 000 angenommen wurde 1). Die seltensten Elemente haben dann eine atomare Häufigkeit von 0,1 bis 1. In der graphischen Darstellung der Abhängigkeit der Häufigkeit von der Atomziffer Z (Kurve I der Tabelle) muss der Logarithmus der Häufigkeitszahl aufgezeichnet werden, angesichts der starken Häufigkeitsvariation. Man erkennt deutlich ein periodisches An- und Absteigen der Kurve, welches sich der Fluktuation von gerader zu ungerader Atomziffer überlagert. Die Fluktuationen von Element zu Element werden mit steigender Ordnungszahl immer kleiner. In der Regel ist bei Nachbarn das Element mit ungerader Atomziffer immer seltener als dasjenige mit gerader Atomziffer. Die Häufigkeitsvariation von Element zu Element ändert auch innerhalb der Perioden etwas. Diese Variation ist nämlich in der Regel bei und unmittelbar nach den Maxima am grössten. Auffällig ist auch, dass oft das 5. Element einer Periode besonders selten ist oder sogar fehlt (Nr. 43 und 61).

<sup>1)</sup> Dies trifft allerdings nicht zu, wenn man, wie es oft geschieht, die Steinmeteoriten unter Elimination des metallischen Eisens analysiert. In diesem Falle würde Si häufiger als Fe nach der angegebenen Formel. Wenn man somit formell an der Relation festhält, dass Fe gleich häufig werden soll wie Si, gemäss Definition, so bedeutet dies, dass man in der Mischungsformel soviel eisenmeteoride Materie zugibt, dass Fe gleich Si wird. Bei eisenfreiem Meteoritenmittel für Steine wäre die Formel eher 1 Teil Plateaubasalt -

b) Die Isotopenhäufigkeitszahl Qi gibt die relative atomare Häufigkeit der einzelnen Isotopen in einem natürlichen Isotopengemisch des betreffenden Elementes von total 10 000 Einheiten wieder. Diese Zahl wurde gewählt, weil sie ungefähr der Bestimmungsgenauigkeit für die seltensten Isotopen nach heutigen Erfahrungen entspricht. Bei Bedarf könnte natürlich auch ein grösseres Einheitsgemisch gewählt werden. Um die Eigentümlichkeiten der Isotopenverbreitung graphisch zu verdeutlichen, wurden unterhalb der Häufigkeitskurve die Positionen der einzelnen Isotopen aufgezeichnet nach der Methode der Isotopenziffer. Man erhält die Isotopenziffer N gemäss der Formel N = A-2 Z, wobei A das Atomgewicht und Z die Atomziffer bedeutet. So erhält man für jedes Isotop in der Darstellung ein Feld.

Die gewählten Feldsymbole wollen durch mehr oder weniger starke Füllung (siehe Skala) die relative Häufigkeit der verschiedenen Isotopen versinnbildlichen, so dass man sofort sehen kann, welches die Hauptisotopen sind. Würde man statt dieser Signatur in die Quadrate die isotopen Häufigkeitszahlen eintragen, so lassen sich die Gesetzmässigkeiten, welche in diesen Isotopenziffern enthalten sind, auch numerisch verfolgen.

Addiert man z. B. die Isotopenhäufigkeitszahlen pro horizontale Kolonnen und zeichnet die Summe graphisch in einer Kurve auf (Kurve II), so ergeben sich für gewisse Niveaus Maxima. Ordnet man die ungeraden Maxima gemäss den Pfeilen den geraden Nachbarmaxima zu, so findet man für die in erster Linie bevorzugten Isotopenziffern N die Werte 0-4-12-24-40. Es handelt sich um eine gesetzmässige geometrische Reihe, indem die Differenzen zwischen den Gliedern wie folgt sich aufbauen: 1.4, 2.4, 3.4, 4.4,... Daneben gibt es noch andere, weniger ausgeprägte Niveaus (siehe Skala rechts). Auch in diagonaler Richtung, welche durch die gestrichelten Geraden mit dem Symbol z markiert ist, erkennt man deutlich bevorzugte Häufigkeitsrichtungen. Um diese Eigentümlichkeit numerisch zu erfassen, wurden in dieser Richtung wiederum die Summen der Isotopenhäufigkeitszahlen gebildet und in Kurve III aufgezeichnet.

Offensichtlich bestimmen nun diese Gesetzmässigkeiten wiederum in einem gewissen Sinne die absolute Atomhäufigkeit. Stellt man nämlich die Isotopen fest, welche in den Schnittpunkten der z-Achsen mit den bevorzugten Niveaus der Isotopenziffer liegen, so sind es jeweils die Hauptisotopen von Elementen, welche ihrerseits in der Atomhäufigkeitskurve als besonders häufige Elemente, ja

Maxima erscheinen. Dadurch wird eine Verbindung geschaffen zwischen Elementhäufigkeit und Isotopenhäufigkeit.

Der typisch treppenartige Anstieg der isotopen Variation kann noch deutlicher gemacht werden, wenn man für die verschiedenen Kernspezies mit Rücksicht auf Geradzahligkeit resp. Ungeradzahligkeit der Kernbausteine verschiedene Symbole anwendet. In der Tabelle wurden durch Symbole 4 Gruppen a, b, c und d ausgeschieden. Die grösste vertikale Variation weisen jeweils Kerntypen auf, bei denen sowohl Z wie N und damit auch Z + N gerade ist.  $^{3}/_{5}$  aller natürlichen Kernspezies gehören diesem Typus a an (quadratisches Symbol). Ca. 1/5 der Kerntypen haben ungerades Z und ungerades N, dafür aber eine gerade Summe Z + N. Es ist dies die Gruppe b der Tabelle (Kreissymbol). Der restliche Fünftel der Kerntypen gehört einer Kombinationsgruppe c an, bei der Z gerade ist, N und somit Z + N aber ungerade. Die letzte Möglichkeit nämlich, dass N eine gerade Zahl ist, Z sowie Z + N ungerade, scheint keine stabilen Kerntypen zu ermöglichen. Man kennt nur zwei radioaktive natürliche Kerntypen dieser Art nämlich K 40 und Lu 176. Ihr Symbol wurde ähnlich wie das Symbol der Gruppe c gewählt (Kreis mit Kreuz). Für die Periode 1-7 hat vorstehende Klassifikation anscheinend weniger Bedeutung. Deshalb zeigt die Tafel bei diesen Elementen teilweise etwas andere Symbole.

Verfolgt man den Anstieg der b-Typen auf der Tabelle unter gleichzeitiger Berücksichtigung der auftretenden c-Typen, so kann man den Aufstieg der dadurch festgelegten Isotopenziffern mittelst einer Achse versinnbildlichen, welche offensichtlich dem Schwergewicht der isotopen Variation folgt. Diese Isotopenachse zeigt einen deutlich treppenartigen Anstieg. An gewissen Stellen sind Abzweigungen und Verdoppelungen beobachtbar. Studiert man die Details dieser Erscheinung auf den verschiedenen Stufen, so lassen sich wiederum gesetzmässige Details festlegen, worauf ich hier nicht weiter eintreten will. Die Isotopenhäufigkeitszahlen sind so nach ganz bestimmten Gesetzmässigkeiten aufgebaut.

c) Die absolute Häufigkeitszahl oder Kernhäufigkeit Qn erhält man durch die Multiplikation von Atomhäufigkeit mit Isotopenhäufigkeit Qn = Qe · Qi. Man erkennt in der entsprechenden Kolonne der Tabelle, dass zwischen den seltensten und häufigsten stabilen Kerntypen sich annähernd ein Häufigkeitsverhältnis von  $1:10^{12}$  ergibt.

Ich komme nun noch kurz auf die Deutung der periodischen Funktionen der Atomhäufigkeitszahlen zu sprechen. Es ist klar, dass die Kernhäufigkeit und somit die dargestellten periodischen Funktionen nichts anderes wiedergeben als ein Schema der Kernreaktivität, ähnlich wie das natürliche periodische System der chemischen Elemente uns über die Reaktivität der äusseren Elektronenschalen der Atome unterrichtet. Die herrschende Atomtheorie hat sich bisher kaum mit der Deutung dieser periodischen Funktionen der Atomhäufigkeit abgegeben und dieselben wenig beachtet.

Es ist heute aber an Hand der bekannten Analysenresultate eindeutig abgeklärt, dass die Grundprinzipien der Atomkernhäufigkeit sich exakt mit den Erfordernissen einer Häufigkeitstheorie decken, welche einen geordneten Packungsverband der Kernbausteine im engen Raum des "Kerntropfens" annimmt (siehe Sonder 1923, 1932). Die Grundgedanken dieser strukturellen Häufigkeitslehre der Kernarten lassen sich wie folgt zusammenfassen und strukturtheoretisch begründen:

- 1. Die Grundperiodizität der Elementhäufigkeit ab Z 8 (Kurve I) ist eine Strukturperiodizität des zentralsten Kerngebäudes, bestehend aus nucleonen Deuteronen, deren Zahl der Atomziffer Z entspricht.
- 2. Das treppenartige Ansteigen der Isotopenziffer ist die Strukturperiode eines Kernmantels, bestehend aus nucleonen Neutronen, deren Zahl der Isotopenziffer N entspricht. Zu jeder vollständigen Strukturperiode des Innengebäudes aus Deuteronen gehört eine Strukturperiode des entsprechend vergrösserten Aussenmantels aus Neutronen.
- 3. Das Auftreten von z-Achsen im Schema der isotopen Variation erklärt sich als eine symmetrische Kompensationswirkung zwischen nucleonen Deuteronen und Neutronen in den Aussensphären des Kerns. Längs diesen Achsen ist die Summe Z+N konstant.

Die Beziehungen zwischen Kernsymmetrie, Kernreaktivität und Kernhäufigkeit werden wie folgt gedeutet: in einem reagierenden Kerngemisch muss eine Kernspezies umso häufiger werden, je reaktionsträger sie ist. Je geringer die Kernreaktivität, desto geringer die Möglichkeit einer Transmutation, je grösser die Reaktivität, desto grösser diese Chance. Also müssen schlussendlich die reaktionsträgeren Kerne häufiger werden und zwar in Proportion zur bestehenden Reaktionsträgheit. Von der Reaktivität wird angenommen, dass sie neben andern möglichen Faktoren stark von der relativen Ausgeglichenheit der Kernstruktur resp. der Kernoberfläche abhängen wird. Diese Ausgeglichenheit dürfte weitgehend eine Funk-

tion der Kernsymmetrie sein. Je höher die mögliche oberflächliche und interne Bausymmetrie, desto grösser die Reaktionsträgheit des betreffenden Kernes, desto häufiger also der betreffende Atomkern. Die häufigen Atomkerne der Maxima der Kurve I nehmen also im Perdiodenschema der transmutiven Reaktivität gewissermassen die gleichen Stellen ein wie die Edelgastypen im natürlichen System der Elemente (edle Kerne).

Es ergibt sich somit ein einfacher und logischer Zusammenhang zwischen Kernhäufigkeit und möglicher interner Bausymmetrie der Atomkerne, welcher auf alle Fälle auch untersucht werden sollte, wenn man Betrachtungen anstellt über die mögliche Kernstruktur. Es ist relativ einfach, die Möglichkeit zu prüfen, ob die Atomhäufigkeit von einer solchen Bausymmetrie abhängen könnte oder nicht. Nach den dem Kristallographen wohlvertrauten Raumgesetzen ergeben sich je nach dem Charakter der zusammentretenden Bausteine im Falle von so geregelten Packungen von vorneherein bestimmte, zahlenmässig festgelegte Strukturperioden, welche von optimaler zu optimaler Symmetrie führen und welche Unterperioden von geringerer Symmetrie enthalten können. Es müssten also bei einer solchen Abhängigkeit gerade solche Häufigkeitsgraduationen auftreten, wie man sie in der graphischen Darstellung der Elemente und Isotopenhäufigkeit beobachten kann (siehe Tafel). Der Beweis, dass die Atomkerne ein "kristallographisches Moment" enthalten könnten, muss nun offenbar darin liegen, ob gezeigt werden kann, dass die analytisch bestimmten Häufigkeitskurven der Tabelle genau den Symmetriefluktuationen eines solchen rein abstrakt rekonstruierbaren Packungsmodelles folgen. Das heute vorliegende schon recht eindeutige und weitläufige Resultat der Häufigkeitsforschung erweist die Richtigkeit der Häufigkeitsvoraussagungen und Festlegung von Kernperiodizitäten, welche ich an Hand solcher Strukturüberlegung schon 1923 und 1930 gemacht habe. Die Übereinstimmung zwischen Kernhäufigkeitsfluktuationen und den Symmetriefluktuationen der damals vermuteten Packungsordnung sind heute, soweit solche Parallelitäten überhaupt gegenseitig abgewogen werden können, sehr weitgehend und vollkommen bestätigt worden.

Es wäre einigermassen unwahrscheinlich, hierin eine rein zufällige Koinzidenz zu sehen, da es ja nicht weniger als 284 natürliche Kernarten gibt, von welchen wir heute die ungefähren Häufigkeiten meist in guter Annäherung kennen. Ich glaube, dass damit ein ziemlich konkreter Beweis geliefert ist, dass das Problem des Atomund speziell des Atomkernbaues ein fruchtbares Thema auch für die den Kristallographen gewohnten strukturellen Gedankengänge sein dürfte. Sicher ist eine solche Packungstheorie keine vollständige Atomtheorie, indem sie die energetische Seite der Kernphysik offen lässt. Hier haben nun allerdings die Atomphysiker Vorstellungen entwickelt, welche Ausdeutungen in obigem Sinne, wenigstens in der gegenwärtigen Form ziemlich unzugänglich sind. Es wird sich noch zu zeigen haben, wie sich diese mehr energetisch begründeten Ansichten mit den Häufigkeitsverhältnissen der Atomkerne und den sich daraus ergebenden Anhaltspunkten und Hinweisen vereinbaren lassen.

Bemerkungen zur Tabelle. Die Tabelle gibt aus Gründen, die erörtert wurden, nur eine Annäherung der Häufigkeitswerte, welche deshalb in runden Zahlen angeführt sind (siehe S. 532). Teilweise sind die Resultate sicher noch verbesserungsfähig. Es könnten durch Interpolation jetzt schon da und dort vermutliche Fehler eliminiert werden, so z. B. im Bereiche der Atomziffern 44-48. Solche möglichen Fehler, deren Elimination im Bereiche der Analyse liegt, wurden jedoch belassen. In einigen Fällen wurden durch vorgesetzte Pluszeichen Korrekturmöglichkeiten angedeutet. Da wo besondere Fehlerquellen vorliegen, welche auch in der Zukunft durch Analysen nicht eliminiert werden können (z. B. atmophile Verluste), wurde ein Interpolationswert gegeben und darunter der Analysenwert in Klammern beigefügt. (~) bedeutet, dass die Konzentration des betreffenden Elementes in dem zugänglichen irdischen Analysenmaterial sehr klein ist. In bezug auf die Isotopenhäufigkeit wurde auf die von SEABORG (1944) publizierte Tabelle der Isotopenhäufigkeit abgestellt.

### Referenzen

Aston, F. W., Mass Spectra and Isotopes. London 1942.

Brown, H. & Patterson, C., I. The Composition of the Silicate Phase of the Stony Meteorites. Journ. of Geology 55 (1947) 405.

Goldschmidt, V. M., Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente IX. Norske Videnskaps Akad. Oslo 1938.

HARKINS, W. D., The Constitution and Stability of Atomic Nuclei. Phil. Mag. 42 (1921) 305 ff.

- Proceedings of Nat. Acad. Science, I (1915) 276.
- Nigoli, P., Die leichtflüchtigen Bestandteile im Magma. Leipzig 1920, 5.
  - Geochemie und Konstitution der Atomkerne. Fennia 50 (1928).

Noddack I. & W., Die Häufigkeit der chemischen Elemente. Naturwissenschaften 18 (1930) 757.

Noll, W., Die Geochemie des Strontiums. Chemie der Erde 8 (1934) 507. Oddo, G., Zeitschr. f. anorg. Chemie, 86 (1914) 266.

Seaborg, G. T., Table of Isotopes. Review of Modern Physics 16 (1944) 1. Sonder, R. A., Zum Bau der Atomkerne. Zeitschr. f. Kristallographie 57 (1923) 611.

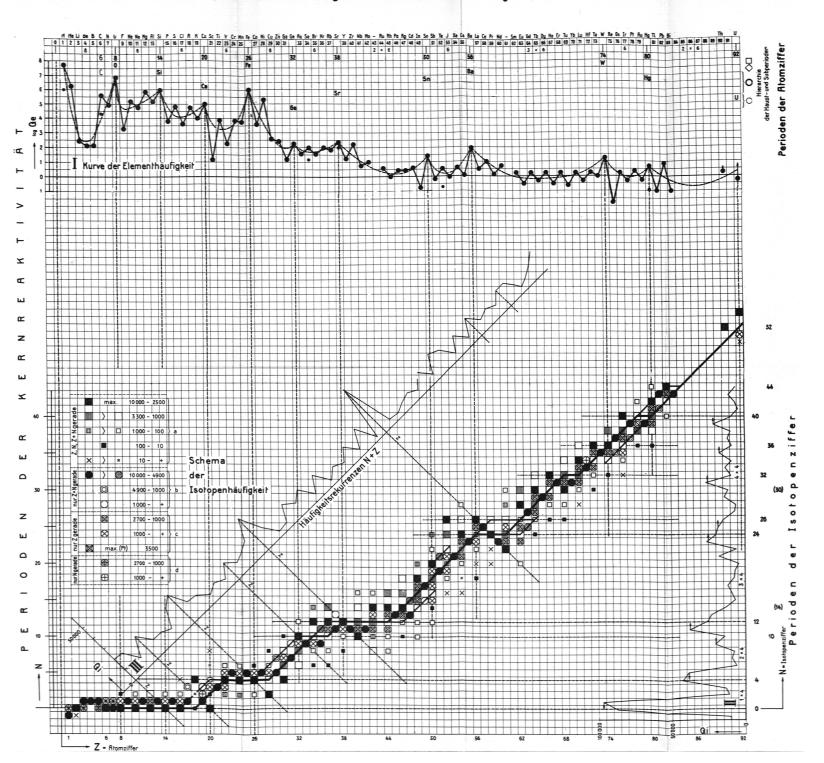
- Die Häufigkeitszahlen der Elemente und die Existenz eines neuen Periodischen Systems. Zeitschr. f. anorg. Chemie 192 (1930) 257.
- Die Häufigkeit der Elemente... Gerlands Beiträge z. Geophysik 136 (1932) 319.

### Explanation of the table and summary

Calculation of abundance. The medium composition of matter must be interpolated from the composition of the iron meteorites, the stone meteorites, the Earth's crust and the atmosphere. The composition of the original atmosphere of the Earth is unknown as well as the exact quantitative relation of the other main differentiates of matter. It can be assumed that this relation is such that those elements which are strongly enriched in one differentiate f. i. the atmosphere will follow the general trend of abundance which can be interpolated from the Earth's crust and the stone meteorites. This leads us to an approximate formula of total composition as follows: 1 part Earth's crust or plateau basalts — 5 parts stone meteorites (including metallic iron normally contained in stone meteorites) — 1 part iron meteorites. Elements strongly enriched in the atmosphere are interpolated, the analytical values for elements strongly corrected by interpolation are given in brackets. (~) means that very small amounts have been analyzed.

Representation of abundance. The "elementary abundance". Qe as well as all given abundances refer to the number of atoms or nuclei. Oxygen is not very useful as a reference element for abundance due to the fact that it may have been abundant in the unknown original atmosphere. For the lithosphere and the siderosphere Si and Fe are better leaders. As we do not know the exact relation of lithosphere and siderosphere and as our method of calculation gives nearly the same abundance for these two elements, it seems convenient to accept by definition the abundance of Si and Fe as equal. The given relative "abundance of elements" has been calculated for a mixture containing 1000 000 atoms each of Si and Fe. The "abundance of isotopes" Qi gives the number of an isotope in a mixture of 10 000 atoms of the given element. The "nuclear abundance" Qn or absolute abundance of nuclear types is obtained by the formula  $Qn = Qi \cdot Qe$ . In the table curve I represents the elementary abundance as a function of the atomic number Z expressed by the logarithm of Qe. The isotopic abundance is presented by using the isotopic number N. (N = A - 2Z) where A is the atomic weight). Curve II and III express periodic functions of the isotopic abundance.

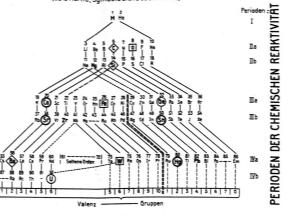
Periodic functions. Niggli noticed in 1920 that apart from the rule of odd and even numbers a period of 6 separates the most abundant elements op to atomic number 26. Today the knowledge of cosmic abundance



# Leere Seite Blank page Page vide

Z	Ae	Qе	N	Ai	Q.i	Qn	z	Ae	Qe I	N F	ı,	Qi	Qn .	z	Ae	Qe	N	A;	Qi	Qn	z	Яe	Qе	N	Ai	Qi	Q.n	z	Яe	Qе	N I	Ai Gi	Qn .
1	H 1.008	50 000 000 (300 000)			9 9 9 8	500 000 000 000			6 000	5	55 10	000	60 000 000		- 5	-	-	-	-		56			24	136	781	62 480 90 560	72		-	34	178 2713	5 4 2 6
2	He	3 000 000	+		(10 <sup>-3</sup> )	100 000 000		54.93 Fe	1 000 000	2	54	504	604 000 000	44	Ru	+ 4	8 10	96 98	568 222	2 272 888				25 26	137 138	1132 7166	573 280				35 36	179 1385 180 3514	2 770 7 028
3	4,003 Li	(~) 300	-	6	0 000 750	30 000 000 225 000					56 9	157	9157 000 000		101.7		11	99	1281	5124		La .				10 000	50 000	73	Ta 180.88	1		181 10 000	10 000
	6.340			7	9 250	2775 000		55.85		6	58	211 28	211 000 000 28 000 000				12 13	100		5 0 8 0 6 7 9 2		138.92 Ce	10	20		<100	<1 000	74	W	20		180 20	400
1	Be 9.02	40		9 1	0000	400 000	27	Co 58.94	4 000	5	59 10	000	40 000 000	П			14 15	102	3134	12536		140.13		22 24	138	<100 8900	<1 000 89 000	- 1	183.92		34	182 2260 183 1730	45 200 34 600
5	8 18.82	40			1 840 8 160	73 600	28	Ni	70 000	2		740	471 800 000	45	Rh	1			10 000	7 308 10 000				26	142	1100	11 000 20 000			-	36	184 3 010	50700
6	C	400 000	1	12	3890	326400 3 956 000 000		58.69				120	186 900 000 8 400 000	15	10291 Pd	+3	10	102	80	240	59	Pr 140.57	2	23	141	10 000		75		+<0.012	35	186 2980 185 3820	59 500 38 52 3.5 318 328 2 660
17	12 01 N	(20 000) 100 000	+	13	110 9962	44 000 000 996 200 000	П			5		380 88	25 500 000		1067		12	104	930		60	Md 144.27		22 23	142	2 5 9 5 1 3 0 0	15570 7800	76	186.31 Os		37	187 5180 184 1.8	52
1	14.008	(~) 7500000	-	15	38	3 800 000		Cu	400	5	53 7	013	5 150 000 2 805 200	П			14	106	2720	8 160	П	144.2/		24	144	2 260	13 560		190.2	•	34	186 159	318
	15.000	(3 500 000)	,	17	9976 4.1	74.810.000.000 3.075.000	30	63.57 Zn	300	7		987	1 194 800				15 18	108	2 580 1 350	8 040 4 050				25 26 28	145 145	920 1650	5 520 9 960	- 1			36	187 164 188 1330	328
9	F	3 000	2	18	20	15 000 000		65.38		6	55 2	730	819 900		Rg		13	107	5190	15570				28	148	580	4 080 3 570	- 1			37	189 1610	
	19.000	(700)	1	19		30 000 000				8		390 740	117 000 522 000	45	107.880 Cd	+4			4.810 140	14430 560	51	-		30	150	595	- 1				40	190 2540 192 -4100	5280 8200
10	Ne 20.183	150 000 (~)	,	20 21	9 000	1 350 000 000 4 050 000	31	6a			70 6	120	15 000		112.41	1 - 1	12	108			52		2	20 23	144	300 1700	500 3400	77	Jr 193.1	0.5	37 39	191 3.850 193 6.150	2310
1	Na	50 000	2	22	973 0 000	145 950 000		69.72		9	71 3	880	91 800 58 200				15	-111	1300	5 200		150.43		24	148	1400	2 800	78	Pt	3	36	192 80	3 690 240 9 060 10 590
	22.997					500 000 000	52	Ge .	+ 200	8		120 730	424 000 546 000				16 17	112		9680 4920				25	149 150		1 000		195.23		38 39	194 3020 195 3530	9050
12	Mg 24,32	740 000		24 25		5 7 27 600 000 851 000 000	П	72 60	1 1	9	73	790	158 000				18	114	2800	11 200				26 28 30	152	2 500	5 2 0 0 4 0 0 0	- 1	.		40	196 2660	7980
Н		-	2	26	1110	821 400 000				12	76	710 650	742 000 130 000		In	+0.2	20 15	113		2 920 90	53	Εψ	0.4	25	154	2 000 4 910	. 1964	79	Au	0.5		198 720 197 10 000	2160 6000
13	RI 26.97	130 000	1	27 1	0000	1 300 000 000	33	As 74.91	40	9	75 10	000	400 000		114.75 Sn		17 12	115	9550	1910 3300		152.0 6d		27	151 153 152	5 090 20	2 036	82	197.2 Hg		36	196 15	90
14	Si	1 000 000		28		8 950 000 000	34	Se			74	90	9 000	50	118.70	30	14	114	80	2400	04	156.9	4	24 25 27	154	285	572	"	200.61	(< 0.1)	38	198 1010	5 0 5 0
	28.06		2	29 30	620 420	620 000 000 420 000 000		78.96				950 830	95 000 83 000				15 16	115 116		1 200 46 500	П			27 28	155 156		3122 4118	- 1				199 1700 209 2330	10 200 13 980
15	P 30.98	8 000	1	31 1	0000	80 000 000			1 1:	10]	78 2	400	240,000				17	117	910	27 300				29	157	1 542	3 284	-			41	201 1 320	7 920
16	5	80 000	+	32	9510	760 800 000			L	14		930	480 000 93 000				18 19	118		67 500 29 400				30 32	158	2 345 2 087	4 690 4 174				42	202 2 960 204 670	17 760
	32.06		1 2	33 34	74 420	5 920 000 33 600 000	35	Br 79.916	40	9	79 5	940	202 400				20	120	2 850	85 500	65		0.6	29		10 000	6000	81	TI 204.39	+< 0.1	41	203 2910	291
Ш			4	36	1,6	128 000		Kr		6	78	35	197 600 3 500				22 24	122 124	550 680	16 500 20 400	66	159.2 Dy	- 2	26	158	10	20	82	204.39 Pb	9		205 7 090 204 150	7 920 17 760 4 020 291 709
17	CI 35,457	4 000	3		7 540 2 460	30160 000 9 840 000		83.7	(~)	8		201 153	20100 115300	51	Sb 121.76	+ 0.7	19	121	5 600 4 400	3 920 3 080		162.46		28 29	160		4400		207.21		42	206 2360 207 2260	21 240 20 340
18	A 39.944	60 000 (~)	2	36 38	30.7	1 842 000 366 000			1 1	11	83 1	153 711	115 300	52	Te	+ 4	16	120	<100	<400				30	162	2400	4 800				44	208 5 230	47 070
			4	40	963.2	597 792 000						747	571 100 174 700		127.61	(0.2)	19			1160				31	163		4 8 0 0 5 6 0 0	83	Bi 209.00	0.1	43	209 10 000	1 000
19	K 39.096	10 000	1 2	39 40	1.2	93 380 000 12 000	37	Rb 85.48	80 1			280 720	582400				20	124 125	450		67	Ho 164,94	0.4	31		10 000	4 000	84 85	-	-	-	= =	-
Ш			3	41	661	6 61 0 000	38	Sr	300	8	84	56	217,600				22	126	1900	7 600	68	Er	- 1	26	162	10	20	86	- 1	-			=
20	Ca 40.08	90 000	2	40	64	872 640 000 5 760 000	П	87.63	(100) 1			986 702	295 800 21 0 600				24 26	128 130		13 120 13 240		167.2		28 30	164	150 3290	300 6 580		-	-	-		
			3	43	15	1 350 000	Ш		1	2 1	88 8	256	2 476 800	53		(-) 1			10 000	10 000				31	167	2 440	4880	89	-	_	-		
			6	46	206 0.35	18,540,000 30,000	39	9 88.92	20 1	"  "	89 10	000	200 000	54	193.1 Xe	+ 4	16	124	9,4	37.6				32 34	168	2 690 1 420	5 380 2 840	90	Th 232.12	(+2)	52	232 10 000	(20 000)
21	Sc	(+) 15	8	48 1	19	1710 000	40	Zr 91.22	200 1		90 4	800	960 000		131 3	(~)	18	126	8.8	35.2	69		0.3	31		10 000	3 000		- "	-	-		-
	45.10		1					91.22	1	2 9	91 1	200	230 000 440 000				20	128 129		760 10492	70	169.4 Yb		28	168	6	12	92	238.07	(0.7)	51	234 0.6 235 71	(04) (50) (6 949)
22	Ti 47.90	9 000	2	46 47	795 775	7 155 000 6 975 000		- 1		4 9	94 1	700 150	340 000			1	22	130		1 628 8 468		173.04		30 31	170 171	421	842 2 852	-			54	238 9928	(6 949)
			4	48	345	66 105 000		Nb	7 1		93 10	000	30 000 70 000			1	24	132	2 696	10 784				32	172	1 426 2 149	4 2 9 8						
			5	50	551	4 959 000 4 806 000		92.91 Mo	10	8	92 1	490	14 900				26 28	134		4 216 3 580				33 34	173 174		3 4 0 4 5 9 1 6						
23	V .	(+) 200	5	51 1		2 000 000			1	0 9	94	940	9400	55	Cs				10 000	10 000				36	176	1 338	2 676	-					
24	50 95 Cr	+ 8 000	2		449	3 592 000		95.95	. 1	2 9	96 1	610 660	16 100 16 600	56	132.91 Ba	80	18	130	10.1	808	71	Lu 174.99	0.5	33 34		9750	4 8 7 5				1		
	52 01		5	52 1	943	67 024 000 7 544 000		-	1	3 9	97	965 410	9650		157 36	1 1	20	132	9.7	776		HF	2	30	174	18	36						
		ľ	6	54	230	1 840 000						925	24 1 00 9 7 5 0				22	134 135		19 360 52 720		178.6		32 33	176	1847	1 060 3 694					1	

Chemisches periodisches System unter Heraushebung der nuclearen Perioden (edle Kerne, Symbole siehe oben rechts)



### Tabelle der natürlichen relativen Häufigkeit der Atomkerne.

Z - Atomziffer

Ge - Elementhäufigkeit

Ae - Atomgewicht

Qi - Jsotopenhäufigkeit

A; - Jsotopengewicht

Q<sub>n</sub> - Kernhäufigkeit

Jsotopenziffer = A - 2Z

 $(Q_n - Q_e \cdot Q_n)$ 

z Häufigkeitsmaxima für Z + N = konstant (in Isotopendiagramm)

# Leere Seite Blank page Page vide

of nuclear species has made it clear, that the relative abundance of nuclei is governed by structural periodicities of the nucleus and its reactivity, which seem in many respects comparable to the structural periodicities of the electronic shells of the atom, expressed by the chemical properties of elements. It is a curious fact that the numerical laws contained in the relative abundance of nuclei correspond very exactly to a crystallographic packing formula used by Sonder in 1923 to explain the relative abundance of the nuclei and the increase of atomic weight. This formula served then to predict the nuclear periodicities shown in the accompanying table, which are today entirely confirmed by the result of the analytical research work. Notwithstanding that such conceptions of packing are partly opposed to modern theories of nuclear structure, this fact merits a careful consideration even today. It would be strange indeed if the very considerable numerical material of nuclear abundance should show such a remarkable and complete parallelism with the laws of polyhedral packing principles by pure coincidence.