

Sitzung vom 20. Juli 1925.

(Allgemeine Sitzung).

Vorsitzender: Herr Steinmann. 1. Herr v. Antropoff: „Die Verteilung der chemischen Elemente im Kosmos.“ 2. Herr Hopmann: „Die Verteilung der Temperaturen im Kosmos.“

Das Vorkommen der Elemente und ihre Verteilung in der Erde und im Kosmos.

Von A. von Antropoff.

Meine Damen und Herren! Wir wollen uns heute mit einer recht kühnen Aufgabe beschäftigen: Einer qualitativen und quantitativen chemischen Analyse des gesamten Kosmos.

Wenn wir bestimmen wollen, was für Elemente in einer gegebenen Substanz vorhanden sind und wieviel von jedem Element, so stellen wir zuerst das Gewicht der Substanz fest, wozu wir sie auf die Wagschale legen. Wir haben es nun mit der Materie des gesamten Kosmos zu tun, und wir wollen zuerst auch das Gewicht des gesamten Kosmos, oder wenigstens des Milchstraßensystems bestimmen. Das kann annähernd in folgender Weise geschehen: Die Masse der meisten Sterne ist untereinander gleich und beträgt annähernd 10^{34} g. Die Zahl der Sterne im Milchstraßensystem kann auf 1 Milliarde geschätzt werden. Die Gesamtmasse des Milchstraßensystems beträgt also 10^{43} g. Dabei ist die mittlere Konzentration der Materie im Kosmos eine außerordentliche geringe. Bei gleichmäßiger Verteilung würde auf alle 100 Kilometer etwa ein Milligramm Materie kommen. Bei einer Dichte gleich der des Wassers würde die Masse des ganzen Milchstraßensystems in einer Kugel vom Radius der Jupiterbahn enthalten sein. Würden wir aber die Materie soweit zusammenpressen, daß auch die Zwischenräume in den Atomen verschwinden, so würde die Materie der Milchstraße eine Kugel vom Radius nur eines Drittels der Mondbahn ergeben.

Die Vorstellung von der Häufigkeit oder der Seltenheit der Elemente beruht auf zwei ganz verschiedenen Ursachen. Es kann sich einerseits um ein wirkliches Vorhandensein von größeren oder kleineren Mengen der Elemente im Kosmos, bzw. in unserem Planeten handeln, oder es liegt ein häufigeres oder selteneres Vorkommen eines Elementes nur in der uns zugänglichen Oberflächenschicht der Erde vor. Dieses Vorkommen kann sich natürlich vom Gesamtvorkommen durch die Anhäufung oder Verarmung verschiedener Regionen des Kosmos oder der Erde an dem Element wesentlich unterscheiden. Praktisch hat nur die Häufigkeit an der Erdoberfläche eine Bedeutung, weshalb sie auch dem landläufigen Begriff der Häufigkeit entspricht. Wir haben also zwischen einem Gesamt-

vorkommen der Elemente und ihrer Verteilung zu unterscheiden. Diese Unterscheidung hat nicht nur ein praktisches, sondern auch ein sehr großes theoretisches Interesse. Die Verteilung eines Elementes beruht hauptsächlich auf seinen chemischen, in vielen Fällen aber auch auf den physikalischen Eigenschaften, besonders dem spezifischen Gewicht des Elementes und seiner Verbindungen und dem Aggregatzustand, in dem es sich unter gegebenen Bedingungen von Temperatur und Druck befindet. Wir denken uns heute die Atome als aus einem positiv geladenen, im Vergleich zu der Größe des ganzen Atomes sehr kleinen Kern bestehend, der die Hauptmasse des Atomes ausmacht, und einer Anzahl von Elektronen, die auf Planetenbahnen kreisend, in verhältnismäßig weiter Entfernung den Kern umgeben. Da die chemischen Eigenschaften der Elemente unmittelbar nur von der Anordnung der äußersten Elektronen abhängen, so ist die Verteilung der Elemente hauptsächlich eine Funktion der äußersten Elektronen. Der Kern spielt bei der Verteilung nur insofern eine Rolle, als von ihm das spezifische Gewicht abhängt.

Während unter den um den Kern kreisenden Elektronen ein fortwährender Wechsel in den Bahnen und ihrer Zahl und ein Austausch der Elektronen unter verschiedenen Atomen stattfindet, sind nur die Kerne das eigentlich Beständige des Atoms. Das Gesamtvorkommen der Elemente beruht daher nur auf dem Bau ihrer Atomkerne. Denken wir uns die Elemente, wie es höchst wahrscheinlich ist, in fortwährendem Entstehen und Vergehen begriffen, so muß also die Menge des Vorhandenseins eines Elementes auf der Leichtigkeit der Bildung seines Atomkernes aus den Urbaustoffen der Materie, und auf der Stabilität des betreffenden Kernes, oder der Schnelligkeit oder Langsamkeit seines Zerfalles beruhen. Wir haben es also bei dem Gesamtvorkommen der Elemente und ihrer Verteilung, die beide zusammen das ausmachen, was man gewöhnlich unter der Häufigkeit eines Elementes versteht, mit zwei grundverschiedenen Problemen zu tun.

Außerdem können wir aber auch unsere Aufgabe in das Vorkommen der Elemente in der Erde und im Kosmos teilen.

I. Das Vorkommen und die Verteilung der Elemente in der Erde.

Die Forschungen der letzten Jahrzehnte und besonders der letzten Jahre haben uns in den Stand gesetzt, den chemischen Aufbau der Erde annähernd festzustellen. Das ist ein bemerkenswerter Erfolg, denn zu direkten Beobachtungen der Erdkruste sind wir nur bis zu Tiefen von 2 km gelangt, was bei dem Erd-

radius von 6370 km. nicht einmal der Dicke der Schale eines Apfels entspricht

Wir wollen kurz die Wege betrachten, die uns trotzdem über die Zusammensetzung des Erdinnern Aufschluß gegeben haben.

1. Masse, Größe und Dichte der Erde.

Die Masse der Erde ergab sich nach den verschiedenen bekannten geophysikalische Methoden gleich $6 \cdot 10^{27}$ g. Der mittlere Radius beträgt 6370 km. Hieraus ergibt sich für die Erde eine mittlere Dichte von 5,52, während die Dichte unserer häufigsten Oberflächengesteine, wie z. B. Granit, gegen 2,8 beträgt. Hieraus muß direkt geschlossen werden, daß die Dichte der Erde nach ihrer Mitte weit über den mittleren Wert steigt. Diese Dichte ist einem Kern aus gediegenem Metall, wahrscheinlich Eisen, zuzuschreiben.

2. Die Meteorite und die Zusammensetzung der Erde.

Die Meteorite haben nicht nur die Bedeutung, uns das Vorkommen von Elementen im Kosmos außerhalb der Erde anzuzeigen, sondern auch für die Zusammensetzung der Erde selbst geben sie uns gewisse Anzeichen. Rechnen wir mit der Hypothese, daß die Meteorite Trümmer von erkalteten Himmelskörpern sind, deren Zusammensetzung derjenigen der Erde gleich, so können wir die Meteorite auch als Proben des Erdinneren betrachten. Diese Annahmen führen zu Resultaten, die auch mit anderen Beobachtungen auf das beste übereinstimmen. Außer den „Tektiten“ die wahrscheinlich in der Diluvialzeit aus den Mondkratern auf die Erde geschossen wurden, gibt es 2 Arten von Meteoriten: 1. Silicatmeteorite, deren Zusammensetzung annähernd derjenigen der Oberflächengesteine der Erde entspricht. 2. Nickeleisenmeteorite mit ca. 10% Nickelgehalt, deren Zusammensetzung nach obigen Annahmen wohl auch dem Erdkern entspricht.

3. Die Erdbebenforschung und die Tiefengliederung der Erde.

Will man den inneren Aufbau eines Körpers erkennen, so muß man ihn „durchschauen“ oder „durchleuchten“. Dazu braucht man Strahlen, für die der Körper mehr oder weniger durchsichtig ist. Es sind hauptsächlich die grundlegenden Arbeiten von E. Wiechert in Göttingen gewesen, welche gezeigt haben, daß es solche Strahlen für den Erdkörper gibt. Das sind die Erdbebenwellen, welche sich nicht nur in der äußeren Erdkruste, sondern auch durch das Innere der Erde fortpflanzen. Mit Hilfe der über die ganze Erde verteilten Seismographen auf den Erdbebenstationen, können die Erd-

bebenwellen registriert werden, die durch das Innere der Erde hindurchgehen. Hierbei zeigt es sich, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenwellen sich mit der Tiefe im allgemeinen stetig, in bestimmten Tiefen aber auch unstetig ändert, wodurch die Erdbebenwellen von der geraden Richtung abgelenkt und an den Unstetigkeitsflächen gebrochen und reflektiert werden, so daß wir vom Inneren der Erde Schattenbilder von verschiedener Intensität erhalten. Für die Seismographen ist die Erde gerade so durchsichtig, wie eine Glaskugel, die aus optisch verschiedenen Gläsern konzentrisch zusammengesetzt ist, für das Auge. So werden sprunghafte Dichteänderungen in den Tiefen von 120, 1200, 2900 km gefunden, wie es die beistehende schematische Zeichnung nach V. Goldschmidt mit den zugehörigen Dichten zeigt. (Fig 1). Andere For-

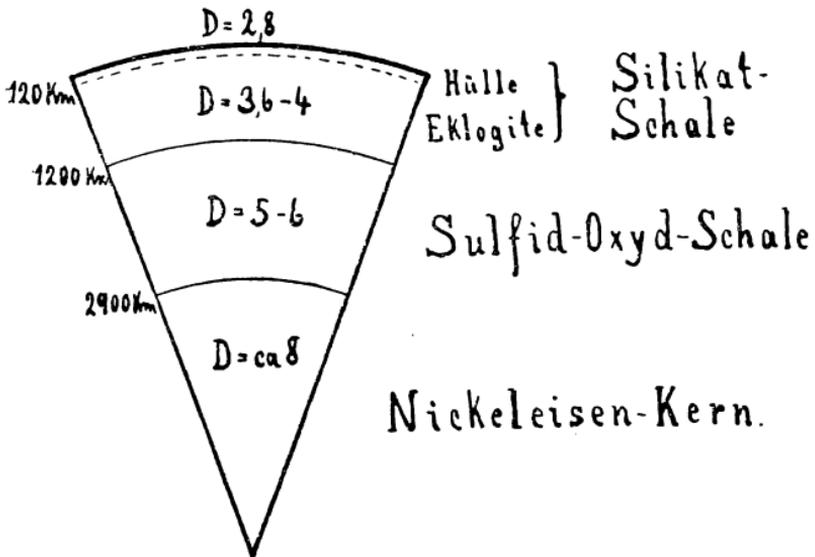


Fig. 1. Die Schichten der Erde nach V. M. Goldschmidt¹⁾.

scher berechnen aus geophysikalischen und astronomischen Daten für den Kern eine Dichte von über 10. Nach dem vorhin Dargelegten ist es klar, daß die äußerste Schale aus dem Oberflächengestein, also hauptsächlich aus Silikaten besteht und der innerste Kern aus Nickeleisen, wobei die hohe Dichte — die Dichte des Nickeleisens unter gewöhnlichen Bedingungen beträgt 7,5 — dem hohen Druck zugeschrieben werden kann, der im Erdmittelpunkt auf etwa drei Millionen Atmosphären steigt. Eine andere Erklärung des Verfassers folgt später. Die Ursachen der Schichtenbildung und die Zusammensetzungen der verschiedenen Schalen sind in den letzten Jahren weitgehend durch physikalisch-chemische Untersuchungen

1) Z. f. Elektrochemie 28, 411, 1922.

hauptsächlich von G. Tammann und V. Goldschmidt aufgeklärt worden.

4. Die Tiefengliederung der Erde auf Grund physikalisch-chemischer Forschungen.

V. Goldschmidt und G. Tammann wiesen darauf hin, daß zwischen der Zusammensetzung und der Verteilung der Materie im Erdinneren und im Hochofen eine weitgehende Analogie besteht. Zunächst sammelt sich im Hochofen das reduzierte und geschmolzene Eisen, mit einem Gehalt an edleren Metallen, die „Eisensau“, an. Darüber befinden sich bei unvollständiger Reduktion und Gegenwart von Schwefel eine Eisenoxyd-Sulfidschmelze, der „Stein“, und auf dieser schwimmt die Schlacke, Silikate der unedleren Metalle, als Eisen. Die Übertragung auf das Innere der Erde gibt eine höchst wahrscheinliche und verblüffend einfache Erklärung der Schichtenbildung in der Erde. Der Nickeleisenkern entspricht der Eisensau des Hochofens. Die darüberliegende Zwischenschale entspricht der Oxyd-Sulfidschicht, wobei allerdings das Vorkommen so großer Schwefelmengen in der Erde von anderen Forschern bestritten wird. Der äußere Mantel schließlich entspricht der Schlacke, deren oberste erstarrte Schicht die feste Erdkruste ist, die auf der zähflüssigen Schlacke oder dem „Magma“ schwimmt. Die Silikatschale teilt Goldschmidt schließlich noch in eine leichtere Silikatschale und eine schwerere „Eklogit-Schale“. Diese Trennung kommt auf folgendem Wege zu Stande: Bei der Abkühlung des Magmas¹⁾ scheiden sich aus diesem die verschiedenen petrographischen Bestandteile aus, wobei ein Teil der Silikate — die Eklogite — schwerer sind, als das Magma und in die Tiefe sinken, während die leichteren Silikate, freie Kieselsäure, Wasserdampf und Gase aufsteigen. So kommt ein beständiges Aufsteigen und Absinken und eine Scheidung in leichtere und schwerere Bestandteile zustande. In den schweren absinkenden Stoffen sind leider auch alle edleren Metalle und deren Verbindungen enthalten, so daß wir armen Schlackenbewohner wohl nichts von den Edelmetallen zu sehen bekommen würden, wenn nicht die aufsteigenden Dämpfe und Gase so freundlich wären etwas von ihnen der Schwerkraft zu entreißen und in Form von flüchtigen Verbindungen in die Erdkruste zu bringen, wo sie sich in Form von Erzgängen ablagern.

Schließlich hat G. Tammann²⁾ gezeigt, wie man auf Grund der Lehre von den heterogenen Gleichgewichten und von ihm an-

1) Niggli, Das Magma und seine Produkte, Naturw. 9, 463, 1921. V. Goldschmidt, Z. f. Elektroch. 28, 411, 1922.

2) Z. anorg. Ch. 131, 96 (1923); 134, 209 (1924).

gestellten Laboratoriumsversuchen, aus der Zusammensetzung der obersten Erdschicht auch auf die Zusammensetzung der tieferen Schichten schließen kann.

Der wichtigste bestimmende Faktor für die chemische Zusammensetzung aller Schichten der Erde, ist der gewaltige Überschuss an freiem, metallischen Eisen in dem ganzen System. Bei der Einstellung eines chemischen Gleichgewichts muß daher das Eisen alle edleren Metalle aus ihren Verbindungen, also Silikaten, Oxyden, Sulfiden u. a., aus denen die äusseren Schichten bestehen, verdrängen, und die edleren Metalle müssen sich im inneren Metallkern ansammeln. Dagegen mußten alle etwa im Metallkern vorhandenen unedleren Metalle, als das Eisen, dieses aus seinen Verbindungen verdrängen. Sie haben daher wohl quantitativ den Metallkern verlassen und sich im Magma oder den Gesteinen der äußeren Schichten angesammelt. Daher brauchen z. B. Platin und Gold, die an der Erdoberfläche zu den seltensten Elementen gehören, im Gesamtvorkommen durchaus nicht selten zu sein. Denn ihre Hauptmengen müssen sich im Metallkern befinden. Dagegen ist z. B. das Zink, von dem an der Erdoberfläche etwa 1000 mal mehr vorhanden ist, als Gold, ein sehr seltenes Element, da der Metallkern kaum Zink enthalten kann.

Berücksichtigt man die chemischen Eigenschaften der Elemente zusammen, so kommt man zum Resultat, daß jedes Element eine „Vorliebe“ für eine bestimmte Schicht der Erde hat, in der es sich hauptsächlich ansammelt. V. Goldschmidt teilt daher die Elemente nach ihrem Hauptvorkommen in 1. siderophile, 2. chalkophile, 3. lithophile und 4. atmophile Elemente ein.

Die siderophilen Elemente sind das Eisen und alle edleren Metalle, als das Eisen, die sich hauptsächlich im Metallkern ansammeln. Die chalkophilen Elemente sind die Erzbildner, die sich hauptsächlich mit Sauerstoff und Schwefel verbinden und als Oxyde und Sulfide die Erze bilden. Die lithophilen Elemente sind die unedleren Metalle und Säurebildner, wie hauptsächlich das Silicium, die zusammen die Schlacken geben, und aus ihnen bei der Erstarrung die häufigsten Gesteine. Zu den atmophilen Elementen gehören schließlich die chemisch inaktiven oder schwach aktiven, gasförmigen Elemente — die Edelgase, Stickstoff und Wasserstoff. Streng läßt sich diese Einordnung natürlich nicht durchführen, da es viele Elemente gibt, die man zu verschiedenen Gruppen rechnen kann.

Eine Übersicht über die geochemische Verteilung nach Goldschmidt¹⁾ gibt die Tafel I. Man sieht einen ausgesprochenen

1) V. M. Goldschmidt, Geochemische Verteilungsgesetze II Kristiania 1924.

Tabelle 1.

		I Erdkruste ¹⁾ Gewichts- prozente	II Ganze Gewichts- prozente	III Erde ²⁾ Atom- prozente	IV Summen aus III bis zum genannten Element
1.	O	46,43	27,7	48,6	48,6
2.	Fe	5,12	39,8	20,0	68,6
3.	Si	27,77	14,5	14,5	83,1
4.	Mg	2,09	8,7	10,0	93,1
5.	Al	8,14	1,9	2,0	95,1
6.	Ca	3,63	2,5	1,7	96,8
7.	Ni	0,019	3,2	1,5	98,3
8.	Na	2,85	0,4	0,5	98,8
9.	S	0,052	0,6	0,5	99,3
10.	Cr		0,2	0,17	
11.	K	2,60	0,14	0,10	
12.	P	0,130	0,11	0,10	
13.	C	0,027	0,04	0,1	
14.	Co	0,001	0,2	0,1	
15.	Mn	0,096	0,07	0,03	
16.	Ti	0,629	0,02	0,01	
17.	H	0,127			
18.	F	0,077			
19.	Cl	0,055			
20.	V	0,021			
21.	Sr	0,018			
22.	Li	0,003			
23.	Cu	0,002			

gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen der Stellung im periodischen System und der geochemischen Verteilung. Die Elemente, welche den Metallkern der Erde bilden, stehen in der Mitte. Rechts davon stehen die Erzbildner. Hauptsächlich links von diesen stehend oder einen Halbkreis um die ersten Gruppen bildend stehen die Gesteinsbildner und den äußersten Halbkreis bilden die atmosphilen Elemente.

5. Das Mengenverhältnis der Elemente in der Erde.

Um die Bestimmung der Mengen, mit denen die Elemente am Aufbau der festen Erdrinde beteiligt sind, hat sich vor Allen der amerikanische Forscher Washington verdient gemacht. Es wurden

1) Nach H. S. Washington, Journ. Franklin Inst. 1920.

2) Nach demselben, Amer. Journ. Science 9, 351, 1925.

hierzu Analysen von Gesteinsproben aus allen Weltteilen ausgeführt. Aus den annähernd geschätzten Mengen der betreffenden Gesteine ergeben sich dann die Mengenverhältnisse der Elemente in der Erdoberfläche, bis zu einer Tiefe von zirka 16 km. Sie sind in Prozenten in der Kolonne I der Tabelle 1 angegeben. Erleichtert wurden die Berechnungen dadurch, daß die chemische Zusammensetzung der Gesteine, welche die Hauptmasse der Erdoberfläche

Die atomaren Mengenverhältnisse in der Erdkruste.

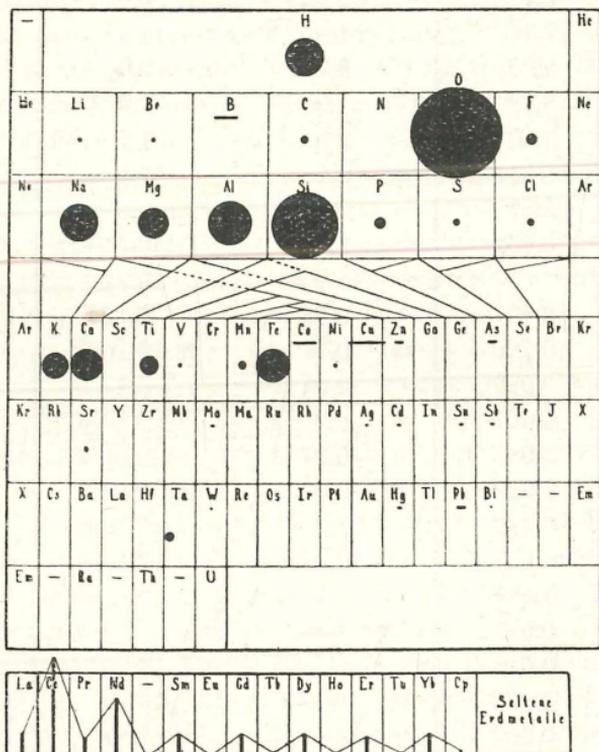


Fig. 2. Atomare Mengenverhältnisse in der Erdkruste.

Die schwarzen Kreisflächen sind als Kugeln zu denken. Die Atom-mengen stehen zu einander im Verhältnis der Inhalte der Kugeln. — Bei seltenen Elementen ist der 20× vergrößerte Kugelradius als wagerechter Strich gezeichnet. — Abweichend (und ohne bestimmtes Verhältnis zu den anderen Elementen) ist das Mengenverhältnis der seltenen Erdmetalle untereinander dargestellt: hier sind die Mengen proportional den senkrechten Ordinaten.

bilden, wie z. B. Granit, Syenit, Gneis, Basalt u. a. sich sehr wenig von einander unterscheiden. Die Mengen der ganz abweichend zusammengesetzten Gesteine, wie z. B. Kalkstein und andere Sediment-gesteine, verschwinden gegen die zuerst genannten vollständig. In Fig. 2 ist die Zusammensetzung der äußeren Erdkruste nach Washington dargestellt.

Zu einer annähernden Berechnung des Vorkommens der Elemente in der ganzen Erde gibt es zwei Methoden: 1. Man berücksichtigt außer der gut bekannten Zusammensetzung der Erdoberfläche auch die annähernd bekannten Massen und Zusammensetzungen der tieferen Schichten. 2. Man nimmt an, daß die mittlere Zusammensetzung der Meteorite der mittleren Zusammensetzung der Erde gleicht und berechnet diese aus den Mengen und der Zusammensetzung der verschiedenen Meteoritenarten. Beide Methoden führen zu annähernd gleichen Ergebnissen, was für die grundsätzliche

Die atomaren Mengenverhältnisse im Kosmos.

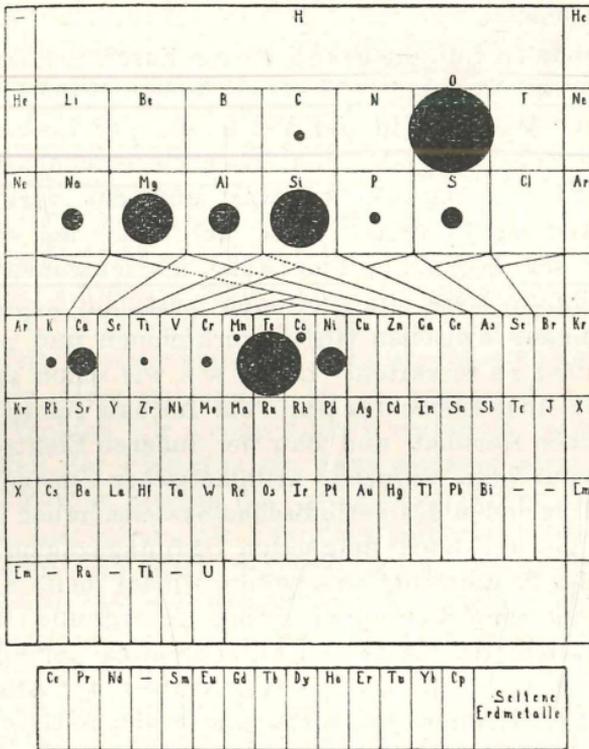


Fig. 3. Atomare Mengenverhältnisse für die ganze Erde.

Richtigkeit der gemachten Annahme spricht. In der Kolonne II der Tabelle 1 sind die wahrscheinlichsten Werte für die Zusammensetzung der ganzen Erde nach Washington angegeben. In Kolonne III stehen dieselben Werte, aber auf Atomprozent umgerechnet, die natürlich für die Theorien des Atombaus und die Entstehung der Elemente eine viel größere Bedeutung haben, als die Gewichtsprozent. Die größte Unsicherheit in diesen Zahlen besteht wohl in Bezug auf die Elemente Schwefel und Kohlenstoff. Denn nach Goldschmidt bildet das Eisensulfid den Hauptbestandteil der Zwischen-

schale zwischen Metallkern und Silikathülle. Andere Forscher, wie z. B. Linck¹⁾ bestreiten dagegen die Möglichkeit des Vorhandenseins so großer Schwefelmengen, da der Schwefel in Meteoriten nur sehr wenig vorkommt. Bezüglich des Kohlenstoffs besteht dadurch eine Unsicherheit, daß er an Eisen gebunden in beträchtlichen Mengen im Metallkern vorhanden sein kann.

Fig. 3 zeigt das Vorkommen der Elemente in der Erde (und wahrscheinlich auch im Kosmos!) in Atomprozenten. Es fällt vor allem auf, wie wenige Elemente die Hauptmasse der Erde bilden. Kolonne IV der Tab. 1 gibt an, einen wie großen Teil der Gesamtmenge ein Element zusammen mit allen vorangehenden Elementen ausmacht.

Es erhebt sich nun die Frage, ob ein Zusammenhang zwischen der Stellung eines Elementes im periodischen System und seiner Menge besteht. Während in der Verteilung der Elemente in den Schichten der Erde ein sehr deutlicher Zusammenhang mit dem periodischen System festzustellen war, und das verständlich ist, weil die Verteilung in erster Linie auf den chemischen Eigenschaften oder der Anordnung der äußeren Elektronen des Atoms beruht, und durch diese die Perioden zustande kommen, so ist ein Zusammenhang zwischen Gesamtvorkommen und periodischem System gar nicht zu erwarten. Denn, wie wir schon sahen, hängt die Häufigkeit eines Elementes nur vom Aufbau seines Atomkernes ab, und zwischen Kernbau und Bau der äußeren Elektronenschalen braucht durchaus kein einfacher arithmetischer Zusammenhang zu bestehen. Die Perioden des periodischen Systems haben ihre Ursache ja darin, daß bei den nach steigenden Ordnungszahlen geordneten Elementen beim 2. Element, und dann wieder beim 8., 8., 18., 18. und 32. Element eine besonders stabile Anordnung der äußeren Elektronen erreicht ist, die in den Eigenschaften der Edelgase zum Ausdruck kommen. Gibt es nun beim Aufbau der Atomkerne aus H-Kernen und Elektronen gleichfalls eine gesetzmäßige Wiederkehr besonders stabiler Etappen, die sich durch eine besondere Häufigkeit der betreffenden Elemente dartun müsste? Tatsächlich gibt es, wie ein Blick auf unsere Tafel zeigt, eine derartige sehr einfache Gesetzmäßigkeit, indem die häufigen Elemente überwiegend in den geradzahligen Gruppen stehen. Und dem liegt noch ein tieferer Zusammenhang zugrunde, indem die Elemente der geraden Gruppen auch mit wenigen Ausnahmen gerade Atomgewichte aufweisen. Die meisten Ausnahmen verschwinden, wenn wir anstatt der praktischen Atomgewichte die wahren Atomgewichte der Isotopen berücksich-

1) Aufbau des Erdballs. Jena, 1924.

tigen. Theoretisch ist hierbei nur eine Ausnahme vorauszusehen: der Wasserstoff. Denn während es für das Bestehen aller anderen Atomkerne zwei Gefahren gibt — den Ausbau zu höheren Atomen und den Zerfall, fällt bei den Wasserstoffkernen die Möglichkeit des Zerfalles fort, und nur der Neigung, sich mit einander und mit Elektronen zu größeren Atomkernen zu vereinigen ist es wohl zuzuschreiben, daß nicht die gesamte Materie aus Wasserstoff besteht. Außerdem muß noch berücksichtigt werden, daß der Wasserstoff in Folge seines geringen Molekulargewichts in unbekanntem Mengen sich von der Erde entfernt haben kann, daß er auf manchen Sternen viel stärker vertreten zu sein scheint und eine Bestimmung seiner Menge auf besonders große Schwierigkeiten stößt. Aus diesen Gründen muß der Wasserstoff am besten aus der Betrachtung ausgeschlossen werden. Unter den nächsten elf häufigen Elementen haben dann nur drei, Natrium, Aluminium und Kalium ungerade Ordnungszahlen und Atomgewichte. Man sieht, daß es sich hier nicht um ein strenges Gesetz, sondern nur um eine Bevorzugung der geraden Atomgewichte handelt. Daß hier aber doch eine ausgesprochene Gesetzmäßigkeit vorliegt, hat V. Goldschmidt¹⁾ besonders deutlich an den seltenen Erden zeigen können, weil bei diesen in Folge ihrer chemischen Ähnlichkeit die Gesamthäufigkeiten und die Häufigkeit in den Oberflächenschichten der Erde am ehesten zusammenfallen müssen. Die Gesetzmäßigkeit ist in unserer Fig. 3 deutlich zu erkennen. Wollten wir streng logisch verfahren, so müßten wir für die Häufigkeit der Elemente ein ganz anderes periodisches System — ein periodisches System der Atomkerne, verwenden, als für die anderen Eigenschaften, die mit dem äußeren Elektronenbau zusammenhängen. Es wäre ein System von lauter Zweierperioden, über die sich vielleicht noch andere noch nicht festgestellte Perioden lagern könnten. Eine Einordnung ins gleiche System erscheint aber doch zweckmäßig, weil die Benutzung des gewohnten Systems uns die Übersicht erleichtert. Eine gewisse Harmonie zwischen beiden Systemen kommt dadurch zustande, daß beide Systeme geradzahlige Perioden haben.

II. Die relative Häufigkeit der Elemente im Kosmos.

Die direktesten Quellen unserer Erkenntnisse über die chemische Zusammensetzung der im Kosmos in den Sternen angehäuften Massen bilden die Spektre der Sterne und die Meteorite.

Die erste Kunde über die Zusammensetzung der Sonne und der Sterne erhielten wir durch die von Fraunhofer 1814 entdeckten und nach ihm benannten dunklen Linien im Spektrum der Gestirne.

1) Geochemische Verteilungsgesetze III, Oslo 1925.

Man war lange Zeit der Ansicht, daß die Intensität der Spektrallinien direkte Schlüsse über die Mengen der in dem Stern vorkommenden Elemente zuläßt. Auf dieser Grundlage schien die Zusammensetzung der Sterne eine sehr verschiedene zu sein. Es ist das große Verdienst von Meg Nā d Saha¹⁾ darauf hingewiesen zu haben, daß bei den auf den Sternen vielfach herrschenden hohen Temperaturen viele Atome vielfach ionisiert sein müssen, d. h. einen Teil ihrer Elektronen verloren haben müssen, und daß sie daher Ionenspektren geben, die uns unbekannt sind, und die dazu so weit im ultravioletten Gebiet liegen, daß sie von der Erdatmosphäre absorbiert werden, und daher gar nicht beobachtet werden können. Saha machte aber noch einen weiteren wichtigen Schritt, indem er die bekannten Gesetze der Dissoziation von Gasen auf die Dissoziation der Atome in Elektronen und Ionen anwandte. Hierdurch konnte er aus der Intensität von Linien eines Spektrums, das von einem bestimmten Ion geliefert wird, auch die Mengen der andersartigen Ionen des gleichen Elementes und seiner undissoziierten Atome, also die Gesamtmengen des Elementes berechnen. Eine ausgezeichnete Zusammenstellung, der auf diesem Gebiet ausgeführten Untersuchungen, enthält das Buch „Stellar atmospheres“ von Cecilia H. Payne (1925). Es zeigt sich zunächst, daß die Zusammensetzung fast aller Sterne annähernd die gleiche ist, oder wenigstens daß die meisten der früher angenommenen Unterschiede bei den Berechnungen nach Saha verschwinden. Die diesem Buch entnommene Tabelle 2 gibt in der dritten Kolonne den Durchschnittswert der Zusammensetzung der äußeren Schichten der Sterne. Daneben befindet sich die Zusammensetzung der Erdkruste. Die Berechnungen der Zusammensetzung der Sterne enthalten natürlich vielfach sehr unsichere Ausgangspunkte, so daß die gefundenen Zahlen nur eine Orientierung über die Größenordnung geben können. Diese stimmt aber auch bezüglich der Sterne und der Erde auffallend überein. Denn die Zahlen innerhalb einer Kolonne unterscheiden sich voneinander bis zu tausendfachen Werten, während sich die gleiche Elemente betreffenden Zahlen beider Kolonnen (mit einer einzigen Ausnahme des Zinks) höchstens um zehnfache Werte unterscheiden. Und auch diese Unterschiede liegen innerhalb der Fehler, welche besonders durch unrichtige Annahmen über Temperatur und Druck entstanden sein können. Es ist daher die Vermutung nicht unberechtigt, daß das relative Vorkommen der Elemente im ganzen Kosmos wenigstens

1) Versuch einer Theorie der physikalischen Erscheinungen bei hohen Temperaturen mit Anwendung auf die Astrophysik, Z. f. Ph. 6, 40, 1922 (vgl. auch Kohlschütter, Naturw. 7, 65, 1919 und Westphal, Naturw. 9, 863, 1922).

Tabelle 2. Mengen der Elemente in Atomprozenten.

	Element	Stern- atmosphären	Erdkruste ¹⁾	Ganze Erde ¹⁾	Silikat- Meteorite ²⁾
1.	Si	5,7	16,2	9,58	11,2
2.	Na	5,7	2,02	0,97	0,6
3.	Mg	4,2	0,42	3,38	2,8
4.	Al	3,6	4,95	2,66	1,1
5.	C	3,6	0,21		
6.	Ca	2,9	1,50	1,08	0,56
7.	Fe	2,5	1,48	46,37	5,92
8.	Zn	0,57	0,0011		
9.	Ti	0,43	0,241	0,12	
10.	Mn	0,36	0,035	0,06	
11.	Cr	0,29	0,021	0,05	0,29
12.	K	0,11	1,088	0,38	0,10
13.	V	0,05	0,0133		
14.	Sa	0,002	0,0065		
15.	Ba	0,005	0,0098		
16.	Li	0,0000	0,0829		

annähernd das gleiche ist. Nur für die leichten Gase Wasserstoff, Helium und Neon scheinen bedeutende Abweichungen vorzuliegen, was darauf beruhen kann, daß diese Gase durch das geringe Molekulargewicht und die chemische Inaktivität physikalisch und chemisch am wenigsten von den Massen der Sterne gebunden werden, und daher im Kosmos eine gewisse Freizügigkeit besitzen können, die anderen Elementen versagt ist³⁾.

Die Möglichkeit der gleichmäßigen Zusammensetzung der Materie des Kosmos wird auch durch die Zusammensetzung der Meteorite bestätigt, wobei allerdings zu beachten ist, daß die Meteorite nicht aus ferneren Gebieten des Kosmos zu stammen brauchen. Immerhin verdient die Zusammensetzung der Meteorite ein sehr bedeutendes Interesse, und sie spricht für die gleichmäßige Verteilung der Elemente. Die 6. Kolonne der Tabelle 2 zeigt die Zusammensetzung der Silikatmeteorite.

1) Die Zahlen stammen von Clarke und weichen von den in Tabelle 1 gegebenen Washington'schen etwas ab.

2) Die Eisenmeteorite (90% Fe. 10% Ni) bilden etwa $\frac{1}{4}$ der gesamten Meteoritenmasse.

3) F. V. Aston, Die Seltenheit der Edelgase auf der Erde, Naturw. 111, 786, 1924.

III. Die absoluten Mengen der Elemente im Kosmos und Schlussbetrachtung über den Ursprung der Elemente.

Die Ergebnisse der hier kurz wiedergegebenen Untersuchungen über das Vorkommen der Elemente in der Erde und im Kosmos bestehen mithin darin, daß wenigstens die größte Zahl der Elemente in der Erde und im Kosmos in gleicher relativen Menge vorkommen, und daß uns diese Mengen annähernd bekannt sind. Wir können daher die Fig. 3, welche zunächst die Zusammensetzung des Erdalles darstellen sollte, wenigstens in grober Annäherung auch auf den ganzen Kosmos beziehen.

Unsere zu Beginn gestellte Aufgabe der Analyse des Kosmos ist mithin in gewissen Grenzen gelöst. Aus der Gesamtmasse des Kosmos und dem prozentualen Vorkommen der Elemente können wir annähernd die Mengen der meisten Elemente im Kosmos berechnen. Sie ergeben sich in Grammen, wenn wir die Zahlen der Kolonne II der Tabelle 1 mit 10^{41} multiplizieren.

Es ist aber nicht möglich, diese Betrachtungen zu schließen, ohne noch eine sich aufdrängende, und dabei eine von den interessantesten Fragen der Naturwissenschaften zu berühren: Haben die festgestellten Mengen der Elemente einen ewigen Bestand gehabt in der Vergangenheit und einen ewigen Bestand für alle Zukunft? Oder ist der gegenwärtige Bestand an Elementen das Resultat eines beständigen Entstehens und Vergehens der Massen der Elemente und einer Umwandlung der Elemente untereinander?

Die Bejahung der ersten Frage, die Unvergänglichkeit der Elemente und der Atome, galt bis vor kurzem als eine der festesten Grundlagen unserer Naturerkenntnis. Die Entdeckungen der letzten Jahrzehnte haben sie jedoch zu Fall gebracht. Von einer großen Zahl von Elementen, den sogenannten radioaktiven Elementen wissen wir, daß sie in beständigem Zerfall begriffen sind. Dabei entstehen aus ihnen fortwährend andere Elemente, — unter ihnen auch ein so beständiges Element, wie das Blei. Dabei ist es natürlich ganz sinnlos anzunehmen, daß gerade nur die Elemente radioaktiv sind und zerfallen, für die die Empfindlichkeit unserer Instrumente noch gerade ausreicht um die Radioaktivität festzustellen. Es ist höchst wahrscheinlich, daß die Zahl der als radioaktiv erkannten Elemente sich erheblich vergrößern — oder sämtliche Elemente bis auf den Wasserstoff umfassen würde, wenn wir die Empfindlichkeit unserer Instrumente, sagen wir, auf das millionenfache steigern könnten. Und während der Nachweis des spontanen Zerfalls bei den schwersten Elementen schon lange geglückt war, und bei den leichteren fehlte, ist es auf künstlichem Wege, durch Bombardement mit α -Strahlen gerade bei einer großen Zahl der leichteren Elemente gelungen, die

Atome künstlich zu zertrümmern. Einem leichten Bombardement mit α -Strahlen sind aber alle Elemente durch die allgemeine Verbreitung des Urans und Thoriums und ihrer Zerfallsprodukte fortwährend ausgesetzt. So steht es wohl fest, daß die Lebensdauer der Atome fast aller Elemente nur eine beschränkte ist. Und daraus folgt das gleiche auch für den Rest der Elemente, denn sonst müßte sich wohl schon alle Materie in diese Elemente verwandelt haben. Theoretisch wird uns dieser Zerfall der Elemente dadurch verständlich, daß es keinem Zweifel mehr unterliegt, daß alle Atome ausschließlich aus Wasserstoffkernen oder Protonen und Elektronen aufgebaut sind. Während aber so ein fortwährender Abbau fast aller Elemente, sei es durch natürlichen Zerfall, sei es durch Atomzertrümmerung durch äußeren Anlaß nachgewiesen ist, ist noch nirgends ein Aufbau der Elemente beobachtet worden. Es erscheint aber als absolut sicher, daß irgendwo und irgendwie besonders die schwersten radioaktiven Elemente Uran und Thorium entstehen müssen, da diese Elemente sonst schon lange restlos verschwunden sein müßten.

Ich möchte zum Schluß eine Hypothese entwickeln, welche einen Versuch darstellt dieses Problem zu lösen. Gleichzeitig hiermit sollen auch zwei andere Erscheinungen, die eben das höchste Interesse der Wissenschaft auf sich lenken, eine Erklärung finden. Diese Erscheinungen sind: die durchdringende „Weltraumstrahlung“, nach ihrem Entdecker auch „Hess'sche Strahlung“ genannt, und die in jüngster Zeit festgestellte abnorm hohe Dichte einiger Sterne, die Werte bis zu 50000 erreicht.

Den Ausgangspunkt für meine Betrachtungen bildet das „Kernmodell“ des Atoms von Rutherford-Bohr, nach welchem die Atome aus einem positiv geladenen Zentralkörper bestehen, der fast die ganze Masse des Atomes bildet und aus einer Anzahl von Elektronen, die in verhältnismäßig großem Abstand den Kern umgeben. Durch die Anziehungskräfte, welche zwischen den positiv geladenen Kernen und den Elektronen bestehen, müßten die Elektronen sofort auf den Kern fallen und sich mit ihm vereinigen. Mit jedem Elektron würde aber die Kernladung um eine Einheit sinken, und das wäre gleichbedeutend mit einer schnellen Verwandlung der Elemente von höherer Kernladung oder Ordnungszahl in solche von niedrigerer Ordnungszahl. Zur Erklärung der Beständigkeit der Elemente, mußte daher eine Ursache gefunden werden, welche das Fallen der Elektronen auf den Kern verhindert. Rutherford nahm als eine der Vereinigung von Kern und Elektron entgegenwirkende Kraft die Zentrifugalkraft der Elektronen an, und diese wurde durch die Annahme erhalten, daß die Elektronen auf Planetenbahnen den Kern umkreisen. Es schien mir aber schwer

einzusehen, warum es nicht zuweilen vorkommen sollte, daß einem Elektron die zur Verhinderung des Falles erforderliche Tangentialgeschwindigkeit fehlt, sei es, daß es in seinem Umlauf durch irgend eine Ursache gehemmt worden ist, oder, daß ein fremdes Elektron in das Anziehungsgebiet des Kernes gerät. Es wäre denkbar, daß die große Zahl von Elektronen, welche den Kern umgeben und auch in ihm selbst enthalten sind, bei den schwereren Atomen die Vereinigung von Kern und Elektron verhindert. Diese Ursache würde aber beim Wasserstoffatom und noch mehr beim Wasserstoffion, welches nur aus einer positiven Ladung besteht, fortfallen. Überall, wo eine Ionisierung des Wasserstoffs durch Strahlungen oder hohe Temperaturen eintritt, muß es aber Wasserstoffkerne und freie Elektronen in so großer Zahl geben, daß nach den hier entwickelten Vorstellungen eine Vereinigung erfolgen müßte.

Anstatt nun eine Erklärung dafür zu suchen, warum diese Vereinigung trotzdem nicht geschieht, nehme ich an, daß sie tatsächlich vorkommt, aber nur so selten, daß sie sich gewöhnlich der Beobachtung entzieht. In einer Veröffentlichung im Oktober 1924 wies ich darauf hin¹⁾, daß solche Vereinigungen von Atomkernen mit Elektronen den Ursprung einer sehr harten γ -Strahlung sein müßte, daß diese besonders durch die Vereinigung von Wasserstoffkernen und Elektronen in einer ionisierten Wasserstoffatmosphäre erfolgen könnte, und daß die Hess'sche Strahlung hierin ihre Erklärung finden könnte. Die Existenz von solchen Komplexen von einem Wasserstoffkern und einem Elektron in dichter Aneinanderlagerung mit einer resultierenden Ladung Null wurde schon von Rutherford und von Nernst für möglich gehalten. Letzterer nannte sie „Neutronen“ und wies darauf hin, daß ein Gas von Neutronen die Eigenschaften des Lichtäthers haben könnte. Hierbei mußte Nernst annehmen, daß die Neutronen keine Schwerkraft haben. Mir schien es jedoch als richtiger anzunehmen, daß sie ein Gewicht besitzen, das sich nicht wesentlich vom Gewicht des Wasserstoffatoms unterscheidet. Meine Annahme führte nun zu folgender merkwürdigen Konsequenz: Die Neutronen, oder Atome des Elementes „Neutronium“ von der Ordnungszahl Null, würden in ihrer Umgebung, wenn man von der allernächsten Umgebung abieht, kein elektrostatisches Feld besitzen. Es wären also keine elastischen, abstoßenden Kräfte vorhanden, wie bei den Molekeln anderer Gase. Es gäbe also auch keine elastischen Stöße, wie sie die kinetische Gastheorie fordert. Das Neutronium könnte daher gar nicht als Gas existieren, sondern es wäre bei jeder Temperatur ein fester Körper mit dem Dampfdruck 0. Die Neutronen, die sich in

1) Z. f. angew. Chem. 37, 827, 1924.

der Wasserstoffatmosphäre der Erde unter dem Einfluß der Sonnenstrahlen bilden, würden daher unter der Wirkung der Schwerkraft der Erde sofort zu fallen beginnen, und zwar nahezu mit der Fallgeschwindigkeit anderer Körper im Vakuum, da die Materie, selbst das Innere der Atome anderer Elemente den Neutronen, wegen ihrer außerordentlich geringen Größe und dem Fehlen eines Kraftfeldes, in der Fallbewegung kaum einen Widerstand bieten würden. Diesen freien Fall müßten sie bis ins Zentrum der Erde oder anderer Sterne fortsetzen, und sie müßten sich in den Mittelpunkten der Weltkörper in dichter Packung ansammeln, dabei sogar die interatomaren Räume der anderen Elemente ausfüllend¹⁾. Eine Überschlagsrechnung zeigt, daß die Dichte dieser Materie billionenfache Werte von den uns bekannten Stoffen haben müßte. Daß meine Hypothese das Vorkommen von Materie von so hoher Dichte notwendig machte, war ein Grund, der mich an ihrer Richtigkeit zweifeln ließ. Eine um so schönere Überraschung war es mir aber, als ich kürzlich von der Entdeckung der Sterne mit mittleren Dichten bis zu 50000 g/ccm erfuhr. Diese Entdeckung kann als eine schöne Bestätigung meiner Hypothese betrachtet werden, und gleichzeitig würden auch diese abnormen Dichten einiger Sterne eine Erklärung finden. Ich würde danach annehmen, daß diese hohen Dichten dadurch zu Stande kommen, daß ein verhältnismäßig kleiner Kern in der Mitte der Sterne aus Neutronium von der Dichte von ca. 4 Billionen besteht.

Sind aber diese Annahmen richtig, so kann es wohl kaum einem Zweifel unterliegen, daß der Neutroniumkern der Weltkörper die Schmiede darstellt, in der die Elemente von höherem Atomgewicht zusammengeschmiedet werden.

Auch die hohe mittlere Dichte des Metallkernes der Erde ist vielleicht auf einen Neutroniumkern zurückzuführen.

Ich möchte aber schließlich noch darauf hinweisen, daß die Wasserstoffatmosphäre der Erde oder der Sterne nicht die einzige Quelle für die Neutronen zu sein braucht. Die Gleichheit der Ladungen der Elektronen und Protonen, und noch mehr deren wahrscheinlich

1) Experimentell wäre ein Nachweis der Bildung von Neutronen auf 2 Wegen denkbar: 1. durch Erzeugung einer sekundären durchdringenden Strahlung, also einer künstlichen Höhenstrahlung durch Ionisierung von Wasserstoff, 2. durch die Gewichtsabnahme eines mit Wasserstoff gefüllten Kolbens, in welchem der Wasserstoff andauernd ionisiert wird, indem die entstehenden Neutronen nach der Annahme des Verfassers sofort aus dem Kolben herausfallen müssten. Fraglich ist es allerdings, ob die Intensität der Strahlung oder der Gewichtsverlust praktisch nachweisbar wären.

gleiche Anzahl im Kosmos, zwingen fast zur Annahme, daß zwischen Elektronen und Protonen ein genetischer Zusammenhang bestehen muß, in der Weise, daß unter irgendwelchen Bedingungen im Kosmos stets gleichzeitig ein Elektron und ein Proton entsteht. Für ihre Entstehung übernehme ich die Hypothese von Nernst, nach der im Weltraum aus der Ätherenergie Materie entstehen kann. Während Nernst aber annimmt, daß aus der Weltraumenergie direkt Atome von höchstem Atomgewicht entstehen, wie Uran und deren Zerfall die durchdringende Strahlung und die Elemente von niedrigerem Atomgewicht liefert, halte ich es für wahrscheinlich, daß sich zuerst aus dem Weltäther die kleinsten Bausteine der Elemente, die Elektronen und Protonen bilden, daß deren Vereinigung zu Neutronen die Hess'sche Strahlung gibt und sich schließlich aus den Neutronen die Elemente von höherem Atomgewicht bilden, nachdem sich die Neutronen in den Zentren der Sterne angesammelt und zu dichtesten Massen zusammengepackt haben.

Sitzung vom 25. November 1925.

Vorsitzender: Herr Steinmann. 1. Herr Krüger hat sein Amt als Schriftführer niedergelegt, an seine Stelle tritt bis zur Neuwahl des Vorstandes Herr Richter. Rückwirkende Erhöhung des Beitrages für 1925 auf M. 3.—, Festsetzung des Beitrages für 1926 auf M. 3.—. 2. Herr Bauer: „Über Farbenanpassung bei Seetieren“. 3. Herr Steinmann: „Tiefseeabsätze der Vorzeit“.

Sitzung vom 18. Dezember 1925.

Vorsitzender: Herr Steinmann. 1. Bericht des Schriftführers über Mitgliederzahl und Kassenbestand. 2. Neuwahl des Vorstandes. Es werden gewählt: Herr Steinmann, Vorsitzender. Herr Maey, stellvertretender Vorsitzender. Herr Richter, Schriftführer. Wegen zu geringer Beteiligung fällt der Vortrag von Herrn Grebe über: „Röntgenstrahlen und Quantentheorie“ aus.



																			He
He	Li	Be	B								N	O		F					Ne
Ne	Na	Mg	Al								P	S		Cl					Ar
Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br		Kr
Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ma	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J		X
X	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi				
			Th			U													

Siderophile, chalkophile, lithophile, atmophile Elemente

Ce	Pr	Nd	—	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tu	Yb	Cp	
----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	--

Die geochemische Verteilung der Elemente (nach V. M. Goldschmidt).

Ann. zu Tafel I. In der Zeichenerklärung über atmophile Elemente ist irrümlich statt des doppelten Ringes ein einfacher dargestellt.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen des naturhistorischen Vereines der preussischen Rheinlande](#)

Jahr/Year: 1926

Band/Volume: [82](#)

Autor(en)/Author(s): Antropoff A. von

Artikel/Article: [Das Vorkommen der Elemente und ihre Verteilung in der Erde und im Kosmos. A017-A034](#)