

Werk

Titel: Über absolute Zeitmessung in der Geologie auf Grund der radioaktiven Erscheinunge...

Autor: Lawson, Robert W.

Ort: Berlin

Jahr: 1917

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0005|log342

Kontakt/Contact

Digizeitschriften e.V.
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

✉ info@digizeitschriften.de

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

Herausgegeben von

Dr. Arnold Berliner und Prof. Dr. August Pütter

Fünfter Jahrgang.

29. Juni 1917.

Heft 26.

Über absolute Zeitmessung in der Geologie auf Grund der radio- aktiven Erscheinungen¹⁾.

Von Robert W. Lawson, derzeit am Institute für
Radiumforschung in Wien.

I. Einleitung.

Das ausgezeichnete Ziel der Geologie ist seit jeher die Erforschung und die Aufklärung der Geschichte der Erde gewesen. Das systematische und kritische Studium der geschichteten und vulkanischen Gesteinsformationen liefert hierzu wertvolle Anhaltspunkte und an Methoden rein geologischer Natur zur Ermittlung des Alters der Erde oder, genauer gesagt, zur Festlegung bestimmter Zeitmerkmale in der Geologie hat es nicht gefehlt. Aber erst im letzten Jahrhundert wurde die Frage der Zeitmessung in der Geologie Gegenstand wahrhaft wissenschaftlicher Erforschung. In Wirklichkeit ist die Bestimmung des Alters der Erde nach den vorliegenden Methoden unausführbar; wir können nur den Zeitraum bis zu bestimmten kritischen Perioden festsetzen und den Anfang einem noch früheren, aber unbestimmbaren Zeitpunkt zuschreiben. Als Beispiel seien folgende Fälle erwähnt: *Kelvin* verfolgt den thermischen Zustand der Erde bis zu jener Zeit zurück, in der die Erdkugel noch in flüssigem Zustande war; *Darwin* will die Zeit bestimmen, zu welcher der Mond noch sehr nahe die Erde umkreiste; *Joly* will den Zeitpunkt ermitteln, zu dem die Meere noch praktisch frei vom Chlornatrium waren; und *Geikie* sucht den Anfang der langen Reihenfolge der geschichteten Gesteinsformationen, um mittels der Ablagerungsgeschwindigkeit der Sedimente die Zeit zu bestimmen, welcher sie entsprechen. Obgleich die genannten Methoden Zeiten ergaben, die für den Geologen erschreckend klein waren, bieten sie immerhin wertvolle Entwicklungsstufen in der Geschichte der Zeitmessung in der Geologie.

Mit der Entdeckung der Radioaktivität begann eine neue Epoche der geologischen Zeitmessung, die dem Geologen, im Gegensatz zu den alten rein geologischen Methoden, eher viel zu große als zu kleine Zeiten gab. Das Defizit an Zeit, das die Geologen vor einigen Jahren beklagten, war nach den Resultaten der neuen radioaktiven Methoden mit einem Sprunge in einen Überfluß umge-

wandelt. Aber auch die radioaktiven Methoden erlauben es nicht, das absolute Alter der Erde zu bestimmen, sondern nur das Alter bestimmter zur Untersuchung herangezogener geologischer Formationen; und obwohl die Methoden noch in den Anfangsstadien sind, ist Grund zur Hoffnung vorhanden, daß es mit ihrer Hilfe und im Laufe der Zeit ermöglicht werden wird, eine vollständige Zeitskala für die geologischen Epochen aufzustellen. Nach diesen Methoden kann man der Kristallisationsperiode eines jeden vulkanischen Gesteines, in welchem sich zur Untersuchung geeignete Mineralien vorfinden, ein Datum zuschreiben.

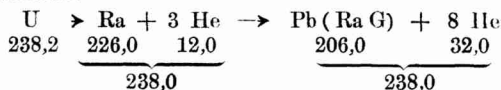
Nachdem *Becquerel* im Jahre 1896 an Uran und seinen Verbindungen das Vorhandensein neuer Strahlenarten entdeckt hatte, zeigte *M. Curie*, daß unter den übrigen Elementen nur Thorium eine der des Urans ähnliche Strahlung (*Becquerel*-Strahlung genannt) aufweist. Ihre weiteren Untersuchungen über die Aktivität der Pechblende führten sie zur Entdeckung des Radiums, und seither ist es den Radiologen gelungen, die Existenz von gegen vierzig Radioelementen einwandfrei festzustellen. Die Strahlen der radioaktiven Substanzen sind von dreierlei Natur. Es sind dies a) die α -Strahlen, oder positiv geladene Heliumatome, die beim Zerfall einiger der Radioelemente mit einer Geschwindigkeit von etwa einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit ausgesandt werden; b) die β -Strahlen in der Form schnellbewegter Elektronen, mit einer Geschwindigkeit manchmal nahezu so groß als der des Lichtes; und c) die γ -Strahlen, die ihrer Natur nach elektromagnetische Impulswellen im Raum sind und sich nur in ihrer Härte und Herkunft von den Röntgenstrahlen unterscheiden. Im folgenden haben wir es lediglich mit den α -Strahlen zu tun; die anderen Strahlenarten berühren unser Thema nur mittelbar.

Zunächst wollen wir uns auf eine Betrachtung der Uranzerfallsreihe beschränken.

In der Zeiteinheit entsteht aus jedem der Elemente dieser Reihe eine gewisse Anzahl von Atomen des darauffolgenden Radioelementes, und zwar so, daß die Zahl der von einem Element in der Zeiteinheit zerfallenden Atome proportional der Zahl der vorhandenen Atome dieses Elements ist. Diese Proportionalität äußert sich für jedes Element einer Zerfallsreihe und wird durch die bekannten Ausdrücke „Zerfallskonstante“ bzw. „Halbwertszeit“ von Element zu Element gekennzeichnet. Für den Fall, daß das Mutterelement sich im Gleichgewicht mit seinen Zerfallsprodukten befindet, ist das Verhält-

¹⁾ In einer vor kurzem in dieser Zeitschrift (4, S. 725, 1. Dezember 1916) erschienenen Abhandlung „Über neuere Versuche einer Zeitmessung in der Erdgeschichte“ behandelte Prof. Dr. O. Abel diese Frage vom biologischen Gesichtspunkte aus.

nis der Atomzahl bzw. Gewichtsmenge eines jeden Einzelements zu der des Urans dauernd konstant. Diese Gleichgewichtsmengen sind den Halbwertszeiten proportional, und diese Tatsache ermöglicht es uns z. B., aus dem stetigen Vorkommen von $3,33 \cdot 10^{-7}$ g Ra mit 1 g Uran in primären unveränderten Mineralien, auf die Halbwertszeit des Urans in bezug auf die des Radiums zu schließen. Für dauerndes Gleichgewicht ist die Zahl der in der Zeiteinheit zerfallenden Atome für jedes Element der Zerfallsreihe die gleiche. Die Aussendung eines α -Teilchens ist mit einer Erniedrigung des Atomgewichtes um vier Einheiten verbunden, wogegen die Abgabe von β - und γ -Strahlen ohne merkbare Änderung des Atomgewichtes vor sich geht, wohl aber eine Änderung des chemischen Charakters im Sinne der bekannten Verschiebungssätze von *Soddy* und von *Fajans* zur Folge hat. Diese besagen, daß bei einer α -Umwandlung eine Verschiebung im periodischen System zu der zweitniedrigeren Gruppe, bei allen β -Umwandlungen eine Verschiebung zur nächsthöheren Gruppe erfolgt. Nach Abgabe von drei α -Teilchen, von Uran angefangen, entsteht das Radium. Die von *Boltwood* 1905 ausgesprochene Vermutung, daß nach weiterer Abgabe von fünf α -Teilchen Radium sich schließlich in Blei umwandelt, wurde durch die Entdeckung der Isotopie und der Verschiebungssätze vollauf bestätigt. Das aus dem Uran entstehende Blei ist vom gewöhnlichen Blei chemisch und spektroskopisch nicht verschieden, besitzt jedoch ein um 1,2 Einheiten niedrigeres Atomgewicht. Wir können die Umwandlung des Urans in das stabile Blei-Isotop (Endprodukt) RaG in folgender Weise ersichtlich machen:



In ganz analoger Weise zerfällt das Thorium mit Abgabe von sechs α -Partikeln (Heliumatomen). Auf die Frage des Endproduktes der Thoriumreihe wollen wir später zurückkommen.

In der Radioaktivität haben wir es also mit dem Zerfall bestimmter instabiler Elemente (Radioelemente) zu tun, und die Geschwindigkeit ihres Zerfalles ist gleichsam eine Uhr, mit welcher wir geologische Zeit messen können. Infolge der Strahlenemission beim radioaktiven Zerfall nimmt die Gesamtenergie der Einzelatomgefüge stufenweise ab. Durch die Bremsung der emittierten Strahlen beim Durchdringen der Materie wird die Energie der Strahlungen allmählich in Wärme umgewandelt. Als Begleiterscheinung des radioaktiven Zerfalles ist die allmähliche Entwicklung der stabilen Endprodukte Helium und Blei anzusehen. Infolge ihrer Stabilität sammeln sich diese zwei Produkte in den Materialien, welche radioaktive Substanzen enthalten, an. Wegen dieser zwei Effekte, d. h. der fortlaufenden Wärmeemission und der langsamen Anhäufung

der Endprodukte, spielen die Erscheinungen des radioaktiven Zerfalles für die Geologie eine bedeutende Rolle. Die Erforschung der Radioaktivität der uns zugänglichen Gesteine und der Meteoriten hat eine Umgestaltung unserer Ideen bezüglich der Frage der Erdwärme mit sich gebracht und bietet wertvolles Material für das Studium der Struktur des Erdinneren, der Evolution der Erdkruste und der Entstehung von vulkanischen Gesteinen. Im folgenden wollen wir uns darauf beschränken, nur diejenigen Gesichtspunkte zu berücksichtigen, die uns Einsicht in die Frage des Alters der Gesteine geben, welche zu verschiedenen geologischen Zeitperioden gehören. Es sind bisher vier Methoden, welche, auf radioaktiver Grundlage fundiert, es uns ermöglichen, dieser Frage näher zu treten. Die zugrundeliegenden Gedanken dieser Methoden sind die folgenden:

- a) Die Wirkung der radiothermischen Energie auf den Wärmehaushalt der Erde;
- b) die Ansammlung von Helium in radioaktiven Mineralien;
- c) die Intensität der Färbung der „pleochroitischen Höfe“ und
- d) das Ansammeln von Blei in radioaktiven Mineralien.

II. Die Wirkung der radiothermischen Energie auf den Wärmehaushalt der Erde.

Die α -Strahlen (und in geringerem Maße auch die β - und γ -Strahlen) werden beim Durchdringen der Materie gebremst und infolge ihrer Energieabgabe wird die durchdrungene Materie erwärmt. Betrachten wir den Fall des Urans, welches eine Halbwertszeit von etwa $5 \cdot 10^9$ Jahren besitzt. Durch Millionen von Jahren wird die Wärmeenergie des zerfallenden Urans mit praktisch unverminderter Heftigkeit und Ausdauer bestehen bleiben, und obwohl die Gesamtwärmeerzeugung von einem Gramm Uran samt Zerfallsprodukten jährlich nur acht Kalorien ausmacht, ist diese kumulative Wärmemenge keine zu unterschätzende Größe. Man bedenke nur, daß von je 7000 Millionen Atomen des in der Erde zu vielen Hunderttausenden von Tonnen vorhandenen Urans im Mittel nur ein Atom im Jahre zerfällt. Es ist ja in allen der uns zugänglichen Gesteinsformationen Uran in größeren oder kleineren Mengen vorhanden, und es muß sofort einleuchten, daß diese stetige Wärmequelle von großer Bedeutung für die Frage des Wärmehaushalts der Erde sein muß. Wir wissen auch aus der Zunahme der Temperatur der Erdkruste mit der Tiefe, daß die Erde durch Ausstrahlung ständig ihre Wärme abgibt. Indem wir die Erde als gegenwärtig in thermischem Gleichgewicht befindlich annehmen, können wir die Menge des Urans, die notwendig wäre, um diese Ausstrahlung zu kompensieren, annähernd berechnen. Ist die Menge der ausgestrahlten

Wärmeenergie ($= k \cdot A \cdot \frac{d\theta}{dx}$) gleich der Menge der von Uran stammenden Wärme, so erhalten wir für die zur Erhaltung des thermischen Gleichgewichtes der Erde nötige Uranmenge etwa $2,4 \cdot 10^{20}$ Gramm. Nehmen wir an, daß der mittlere Urangelalt der Gesteine für das Material des ganzen Erdballs gilt, so erhalten wir für die in der Erde vorhandene Uranmenge den Betrag von $3,6 \cdot 10^{22}$ Gramm. Nun ist diese Uranmenge etwa 150-mal größer als die Menge, die notwendig wäre, um die Wärmeausstrahlung der Erde auszugleichen. Also, entweder geht die Erde einem feurigen Grabe entgegen, oder (nach *Strutt*) was plausibler erscheint, ist die Radioaktivität des Erdmaterials auf eine oberflächliche Kruste von etwa 16 km Tiefe beschränkt. Es wäre natürlich denkbar, daß bei den in größeren Tiefen der Erde bestehenden Drucken und Temperaturen die Geschwindigkeit des radioaktiven Zerfalles verringert, wenn nicht gänzlich verhindert werden könnte. So weit unsere bisherigen Versuche reichen, ist jedoch die Geschwindigkeit des radioaktiven Zerfalles von der Temperatur und vom Drucke vollständig unabhängig (Drucke bis zu 24 400 at, Temperaturen bis zu 2500° C). Der in Klammern angeführte Druck entspricht einer Tiefe von etwa 80 km unter der Erdoberfläche. Innerhalb der ersten 16 km der Erdkruste können wir den Zerfall der Radioelemente daher als unbeeinflusst ansehen. Aber auch die Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Radioelemente in einer 16 km tiefen Kugelschale der Erde führt zu weitaus kleineren Temperaturen des Erdinneren, als sie der Vulkanismus verlangt. Durch Annahme einer Verringerung des radioaktiven Inhalts der Gesteine mit der Tiefe, bis zu einem Minimalwert an der Basis der Kugelschale, ist jedoch diese Schwierigkeit zu beheben. Zumeist wird eine exponentielle Abnahme angenommen.

Offenbar sind die älteren Methoden zur Berechnung des Alters der festen Erdkruste auf Grund der Wärmeleitung durch die Radioaktivität entwertet worden. Über die Verteilung der Radioelemente in der Erdrinde wissen wir wenig (obwohl obige Annahme durch vielerlei Analogien, z. B. mit Meteoriten usw., wesentlich gestützt wird), und da wir nicht wissen, welcher Bruchteil der Erdwärme und der Wärmeausstrahlung der Wirkung der Radioaktivität zuzuschreiben ist, so ist an eine direkte Anwendung der ehrwürdigen Kelvinschen Methode nicht zu denken. Wenn man aber annimmt, daß ein gewisser Bruchteil der durch Ausstrahlung abgegebenen Energie der Erde radioaktiven Ursprunges ist, so läßt sich die Frage des Erdalters unter spezifischen Annahmen und mit Berücksichtigung der Radioaktivität behandeln, allerdings nicht ohne Vorbehalt. Diesbezüglich hat *Holmes* einige interessante Resultate erhalten, die wir hier kurz besprechen wollen. Aus der Kelvinschen Beziehung für das Alter der Erde geht hervor, daß das Temperaturgefälle an

der Erdoberfläche verkehrt proportional der Wurzel aus der Zeit seit Erstarren vom flüssigen Zustande ist. Daraus erhellt sofort, daß, wenn nur ein geringer Bruchteil der Ausstrahlung dem ursprünglichen Wärmehaushalt der Erde zuzuschreiben ist, das „Alter der Erde“ einen viel größeren Wert annehmen würde, als aus den Rechnungen von *Kelvin* folgt. Nach *Holmes* sprechen viele geologische und andere Tatsachen eher dafür als dagegen, daß die traditionelle Ansicht einer ursprünglich flüssigen Erdkruste richtig sein dürfte, und dies nimmt er auch an. Ausgehend von einer flüssigen Oberfläche von 1000° C zeigt er zunächst, daß die Zeit, die nötig gewesen wäre, um zu einer Erde zu gelangen, wie wir sie kennen, um so größer sein würde, je größer der Anteil der radioaktiven Substanzen im Wärmehaushalt der Erde angenommen wird. Es wird vorausgesetzt, daß der Gehalt der Erdschichten an Radioelementen mit der Tiefe nach einem Exponentialgesetz abnimmt — eine Annahme, die sehr plausibel erscheint und die *Holmes* auch vom geologischen Standpunkt zu begründen versucht. Falls man annimmt, daß drei Viertel der Wärmeausstrahlung der Erde radioaktiven Ursprunges wären, so würde die Erde ihren gegenwärtigen thermischen Zustand erst nach einer Zeit von 1600 Millionen Jahren erreicht haben können. *Holmes* findet auch, daß in diesem Falle die vulkanischen Tiefentemperaturen befriedigender erhalten werden können, als unter der Annahme, daß das ganze gegenwärtige Temperaturgefälle der Erde allein durch die Radioaktivität des Erdmaterials erhalten bleibt.

Es sei hier auf einige andere Resultate hingewiesen, die ebenso wie das obige für ein größeres Alter der Erde sprechen, als bisher angenommen wurde. *G. F. Becker* untersucht, ob sich die neueren Entwicklungen der Radiogeologie und der Isostasie nicht aufeinander beziehen lassen. Er nimmt an, daß das in einer Tiefe von 121 km sich befindende Hayfordsche Niveau des hydrostatischen Ausgleiches („Level of isostatic compensation“) der Tiefenschicht entspricht, bei welcher die Temperatur sich dem Schmelzpunkte der Gesteine beim vorherrschenden Druck am meisten nähert („Depth of easiest fusion“). Auf Grund dieser und der weiteren Annahme, daß das Alter der Erde 68 Millionen Jahre beträgt, findet er, daß nur $\frac{1}{7}$ des gegenwärtigen Temperaturgefälles der Radioaktivität zuzuschreiben wäre. In diesem Falle würde sich die Dicke der radioaktiven Schale zu 2,58 km ergeben! Wäre dagegen $\frac{2}{3}$ des Temperaturgefälles der Wirkung der Radioaktivität zuzuschreiben, so ergibt sich nach *Becker* das Alter der Erde zu 1314 Millionen Jahren und die „Tiefe des leichtesten Schmelzens“ würde 300 km betragen. In einer Reihe von Arbeiten hat nun *J. Barrell* gezeigt, daß die „Zone des leichtesten Schmelzens“ unterhalb des „Niveaus des hydrostatischen Druckausgleiches“ liegen muß, und auf Grund von Betrachtungen, die auf der Festigkeit

der Erdrinde und auf Ebbe- und Flutphänomen beruhen, schreibt *Barrell* die Quelle der vulkanischen Tätigkeit ungefähr der Mitte der Asthenosphäre zu, d. h. einer Tiefe von 350 bis 500 km. Dieser Schluß, im Zusammenhang mit den Betrachtungen *Beckers*, würde also dafür sprechen, daß das Alter der sich abkühlenden Erde nicht mit 68 Millionen Jahren, sondern mit *beträchtlich mehr als 1314 Millionen Jahren* anzuschlagen wäre.

III. Die Ansammlung von Helium in radioaktiven Mineralien.

Das beinahe ausnahmslose Vorhandensein von Helium in radioaktiven Mineralien führte *Rutherford* und *Soddy* im Jahre 1903 zur Hypothese, daß hier ein genetischer Zusammenhang mit den Prozessen der radioaktiven Umwandlung vorliegen müsse. In den darauffolgenden Jahren wurde dann von verschiedenen Autoren, und zwar für fast sämtliche α -Strahler gezeigt, daß bei einer α -Umwandlung Helium entsteht, und es wurde in manchen Fällen (z. B. für Radium) die zeitliche Entwicklung dieses Gases gemessen und verfolgt. Hierbei ist das Helium nicht als Zerfallsprodukt in gebräuchlichem Sinne aufzufassen, sondern als Nebenprodukt, das seine Entstehung den emittierten α -Teilchen verdankt. 1909 gelang es *Rutherford* und *Royds*, die unmittelbare Entstehung des Heliums aus den emittierten α -Teilchen experimentell festzustellen. Nachdem die Geschwindigkeit der α -Partikel beim Durchgang der Materie einen bestimmten kritischen Wert unterschritten hat, findet eine Neutralisierung der positiven Ladung der Teilchen statt, und nunmehr haben wir es mit gewöhnlichen Heliumatomen zu tun. Schon im Jahre 1905 hatte *Rutherford* auf die Möglichkeit einer Altersbestimmung der Mineralien auf Grund ihres durch den radioaktiven Zerfall entstandenen Gehaltes an Helium hingedeutet; in den Jahren 1908 bis 1910 wurde dies ja auch in der Tat von *Strutt* verwirklicht. Im Laufe seiner Experimente konnte dieser zeigen, daß sich fast ausnahmslos nicht mehr Helium in einem Mineral befindet als dem radioaktiven (d. h. Uran bzw. Thorium und Actinium samt Zerfallsprodukten) Inhalt entspricht, und auch ziemlich sicherstellen, daß kein Helium aus den nichtradioaktiven Elementen entsteht. Es gelang ihm, die Heliumentwicklung in St. Joachimstaler Pechblende und Thorianit direkt zu bestimmen, und seine experimentell gefundenen Werte stimmen befriedigend mit denen überein, welche *Rutherford* und *Geiger* aus ihren Zählversuchen der α -Teilchen von Uran und von Thorium mit Zuhilfenahme der Loschmidtschen Zahl berechnen konnten. Diese Resultate besagen, daß zur Entstehung von 1 cm³ Helium aus 1 g Uran (im Gleichgewicht mit seinen Zerfallsprodukten) eine Zeit von etwa 10 Millionen Jahren notwendig wäre und im Falle des Thoriums eine Zeit von etwa 30 Millionen Jahren. Da nun *Strutt* in einem

der von ihm verwendeten Thoriummineralien einen gegenwärtigen Heliumgehalt fand, welcher 280-Millionen-mal größer war als die jährliche Produktion dieses Minerals an Helium, konnte er die untere Grenze des Alters dieses Thorianits mit 280. Millionen Jahren angeben.

Warum wir es hier mit einem Minimalwert des Alters zu tun haben, wird durch folgende zwei Fragen sofort klargestellt: 1. Enthielt das Mineral zur Zeit seiner Auskristallisation Helium oder ist sein gegenwärtiger Gehalt allein dem radioaktiven Zerfall im Laufe der Zeit nach dem Erstarrten zuzuschreiben? und 2. Ist kein erheblicher Bruchteil des seit der Kristallisation des Minerals entstandenen Heliums entwichen?

Was die erste Frage anbelangt, wissen wir, daß gewöhnliche Gesteine und Mineralien äußerst geringe Mengen von Helium enthalten — nicht mehr als infolge der vorhandenen sehr kleinen radioaktiven Beimischungen zu erwarten wäre. Eine eventuelle Unsicherheit in dieser Hinsicht kann man dadurch ausschalten, daß man zu Altersbestimmungen nach der Heliummethode nur diejenigen Mineralien der vulkanischen Gesteinsgebilde verwendet, die eine relativ starke Radioaktivität aufweisen. Durch hinreichend lange Zeiten werden die ursprünglichen kleinen Spuren von Helium im Vergleiche zu den Mengen des nachgebildeten Heliums ganz zu vernachlässigen sein. Gerade bei den weitverbreiteten, in geologischem Sinne zu Altersbestimmungen sonst sehr geeigneten Kalkgebilden macht es aber die Ungewißheit über ihren ursprünglichen eventuellen Heliumgehalt unmöglich, solche Gesteine zu diesem Zwecke heranzuziehen; ihr Gehalt an Radioelementen ist so klein, daß die durch den radioaktiven Zerfall nachgebildete Heliummenge fast an der unteren Grenze der Meßgenauigkeit liegt.

Bezüglich der zweiten Frage ist die Antwort eine schwierigere. Daß ein Mineral eine stetige Verminderung seines Heliumgehalts erleidet, sobald es sich, von der Lagerstätte entfernt, offen an der Luft befindet, ist eine experimentell schon festgestellte Tatsache. Durch Zerreibung des Minerals wird bis zu etwa 30 % seines Heliumgehaltes verloren gehen. Die Heliumabgabe nimmt auch mit steigender Temperatur beträchtlich zu. Daraus erhellt, daß das Helium, welches sich gegenwärtig in einem Minerale befindet, nur ein Bruchteil, zumeist weniger als die Hälfte jener Menge sein kann, die auf radioaktivem Wege im Minerale während seiner Geschichte entstanden ist. Diese Tatsache muß man stets in Betracht ziehen, wenn man mittels des Heliumgehalts Schlüsse bezüglich des Alters eines Minerals zu ziehen gedenkt. Die Vermutung *Strutts*, daß in größeren Tiefen der Erdrinde das Entweichen von Helium aus den Mineralien bedeutend langsamer vor sich gehen wird, scheint durchaus plausibel zu sein, da das Mineral, trotz seiner höheren Temperatur, von festem Material umgeben ist. Uns stehen aber leider nur diejenigen Minerale zur

Verfügung, die sich an der Oberfläche befinden und daher durch Berührung mit der Luft eine Verringerung ihres Heliumgehalts erlitten haben.

Es wäre also irreführend, wenn wir annehmen würden, daß für den obenbesprochenen Thorianit die Zeit seit seiner Auskristallisation nur 280 Millionen Jahre betragen würde. In Ceylon kommt der Thorianit in Sand- und Kiesstätten vor und ist seit seiner Ablösung von den Pegmatitgängen dieser Insel durch Jahrtausende der Wirkung der dort herrschenden Witterungen ausgesetzt gewesen. Während dieses langen Zeitraumes hat er einen fortgesetzten Heliumverlust erlitten, und infolgedessen gestatten gegenwärtige Messungen nur eine *Minimalschätzung* des Alters des Minerals. Das wahre Alter ist also noch erheblich größer als der weiter oben angeführte Wert.

Unter anderen Mineralien untersuchte *Strutt* Kopolithen (phosphatische „nodules“) und Eisenerze von Sedimentärgesteinen, so wie auch Zirkone und Sphene von Eruptivgesteinen. Letztere zwei Mineralien sind für solche Versuche besonders geeignet, da sie zu den radioaktivsten der häufiger vorkommenden gesteinsbildenden Mineralien zählen und außerdem eine sehr dichte und harte Konsistenz aufweisen. Die an Eisenerzen und an Zirkonen gewonnenen Resultate sind am wertvollsten und am lehrreichsten; sie entsprechen weit auseinander liegenden geologischen Epochen und zeigen, daß trotz des unvermeidlichen Entweichens von Helium aus dem Minerale die älteren Proben fast stets einen bedeutend höheren Betrag an Helium enthalten als die jüngeren.

Nachfolgende Tabelle gibt einige der höheren Werte des Alters für Mineralien aus den verschiedenen geologischen Zeitepochen wieder. Die geologische Zusammenstellung ist einer Arbeit von *Holmes* entnommen; die Zahlenangaben sind aus den Resultaten von *Strutt* berechnet, unter Heranziehung der Heliumentwicklung des Urans bzw. des Thoriums, wie sie sich aus den direkten an diesen Elementen von *Rutherford* und *Geiger* ausgeführten Zählversuchen der α -Teilchen leicht ermitteln lassen. Wie man sieht, besteht eine enge Beziehung zwischen dem geologischen Alter der Mineralien und den aus den Heliumverhältnissen gefundenen numerischen Werten derselben. Zum Vergleiche sind die Resultate der Altersbestimmungen, soweit sie bisher nach der „Blei“-methode (vgl. Abs. V) gemessen wurden, in Klammern angegeben. Die nebeneinander stehenden Zahlen zeigen deutlich die infolge der ständigen Heliumabgabe bestehende Mangelhaftigkeit der Heliummethode. Letztere lehrt uns nur, daß das Alter eines Minerals *größer* ist als ein bestimmter Minimumwert.

IV. Die Intensität der Färbung von „pleochroitischen Höfen“.

In Dünnschliffen mancher gefärbter Mineralien kommen sehr kleine gefärbte, meistens kreisrunde Gebilde vor, die durch lange Zeit den Mineralogen ganz unverständlich waren. Diese kreisförmigen Gebilde weisen unter der Wirkung des polarisierten Lichtes die Eigenschaft des

Tabelle der wichtigsten Resultate nach der „Helium“-methode.

Geologischer Zeitabschnitt	Mineral	Fundort	Helium-Verhältnis ¹⁾	Alter in Millionen Jahren
Holozän	Zirkon	Somma-Berg, Vesuv	$\leq 0,01$	0,1
Plistozän	„	Mayen, Eifel	0,09	0,96
Pliozän	„	Campbell-Insel, N. Z.	0,146	1,56
Miozän	„	Expailly, Auvergne	0,57	6,1
Oligozän	Siderit	Niederpleis, Rheinprovinz	0,70	7,5
„Post“ Eozän	Hämatit	Co. Antrim, Irland	2,38	25,5
Perm (?)	Zirkon	Nordost-Tasmanien	3,80	40,7
Obercarbon	Limonit	Wald von Dean	12,8	137,0 (320) ²⁾
Carbon bis Kambrium (?) . . .	Zirkon	Green-Fluß, Nord-Karolina	11,7	125,0 (360)
Mitteldevon	„	Brevig, Norwegen	4,31	46,1 (340)
Devon	Hämatit	Caen	11,2	120,0
Silur (?)	Thorianit	Ceylon (Sab.-Prov.)	22,6	242,0 (500)
„ (?)	„	Ceylon (Galle-Prov.)	21,2	227,0 (400)
Ober-Präkambrium	Zirkon	Cheyenne-Schlucht, Kolorado	11,9	127,0
„ „	„	Miasak, Uralgebirge	14,9	159,0
„ „	„	Ceylon	25,0	267,0 (1200)
Mittel-Präkambrium	Sphen	Arendal, Norwegen	32,9	352,0 (1300)
„ „	„	Tweedestrand, Norwegen	38,2	409,0 (1300)
Unter-Präkambrium	Zirkon	Renfrew Co., Ontario, Canada	54,3	581,0 (1500)
„ „	Sphen	„ „ „ „	56,1	600,0 (1500)

¹⁾ Das Verhältnis Helium (cm^3) zu U_3O_8 für cm^3 in Gramm des Minerals. Falls Thorium vorhanden sein sollte, wird es bezüglich seiner Heliumentwicklung in Äquivalent-Uran (U_6) verwertet ($1 \text{ g ThO}_2 = 0,295 \text{ g U}_3\text{O}_8$). Das Alter wird gegeben durch $\frac{\text{He}(\text{cm}^3)}{\text{U}_6} \cdot 10,7$ Millionen Jahre, wobei $\text{U}_6 = (\text{U}_3\text{O}_8 + 0,295 \cdot \text{ThO}_2)$ zu setzen ist.

²⁾ Die eingeklammerten Ziffern geben das entsprechende Alter nach der „Blei“-methode an.

„Pleochroismus“ auf und wurden daher „pleochroitische Höfe“ genannt. Im Jahre 1907 zeigte Joly als erster, daß sie radioaktiven Ursprunges sind und durch die Einwirkung der α -Strahlen eines winzigen radioaktiven Körnchens, das stets in der Mitte eines Hofes zu finden ist, hervorgerufen werden. Man findet solche Höfe z. B. in Turmalin und in manchen Glimmersorten, namentlich im Biotitglimmer.

Die fremden Einschlüsse bestehen sehr oft aus Zirkon und in manchen Fällen auch aus Orthit, Brookit, Thorit u. a. m. Nun ist das aktive Zentralkörnchen als eine Quelle von α -Strahlen anzusehen, die nach allen Richtungen emittiert werden und eine bestimmte Reichweite zurücklegen, um dann endlich in gewöhnliche Heliumatome überzugehen. Die verschiedenen Zerfallsprodukte des Urans bzw. des Thoriums haben in Luft ungleiche Reichweiten, und es wäre mithin zu erwarten, daß auch in homogenen Kristallen dieselbe Eigenschaft Geltung finden würde. Mit Hilfe der von Bragg und Kleeman empirisch gefundenen Beziehung zwischen Reichweite, Dichte und Atomgewicht des durchquerten Materials läßt sich nun leicht berechnen, welche Reichweiten die verschiedenen α -strahlenden Einzelprodukte (inklusive Uran und Thorium selbst) z. B. in Biotitglimmer haben sollten. Die α -Strahlen werden vom fremden Einschlusse aus gleichmäßig in alle Richtungen radial ausgesandt, und danach wäre für Uran im Biotit ein gefärbtes Kügelchen zu erwarten, dessen Durchmesser etwa 0,013 mm betragen würde. Für die darauffolgenden Zerfallsprodukte des Urans sind die Reichweiten größer, die Höfe derselben demzufolge auch von größerem Durchmesser, aber konzentrisch mit denen des Urans. Schließlich wäre für RaC, welches die größte Reichweite der Uranreihe besitzt, der Durchmesser des kugelförmigen Gebildes etwa 0,033 mm. Im Falle von thorhaltigen Kernen würde die Maximalreichweite die des ThC sein und der Durchmesser des äußersten Hofes dementsprechend 0,04 mm betragen.

Tatsächlich hat nun Joly eine derartige Reihe von kugelförmigen Gebilden auffinden können, deren Durchmesser mit den berechneten in guter Übereinstimmung stehen. Durch solche Messungen kann man auch einwandfrei feststellen, ob der Kern Uran oder Thorium enthält. Interessant ist das Aussehen eines gutentwickelten Hofes. Um ein gleichmäßig tiefgefärbtes und sphärisches Zentrum, welches im Falle eines uranhaltigen Kernes einen Durchmesser von 0,016 bis 0,020 mm besitzt, befindet sich eine schwächer gefärbte, von RaA stammende konzentrische Kugelschale mit einem Durchmesser von 0,023 mm. Diese ist wiederum von einem noch schwächer gefärbten, dem RaC zuzuschreibenden Hof (der sogenannten „Korona“) von 0,033 mm Durchmesser umschlossen. Die Ursache der tiefen Schwärzung der innersten Kugel liegt in der Tatsache, daß die

α -Partikel der sämtlichen acht α -Strahler der Uranreihe diesen Raum durchqueren. Ferner, da die α -Teilchen vom Zentralkern demselben Gesetz wie das Licht bezüglich ihrer Ausbreitung folgen, wäre von vornherein zu erwarten, daß die Färbungsintensität für jeden α -Strahler mit der Entfernung vom Zentrum abnehmen würde. Wie die Bilder von Joly zeigen, dürfte jedoch diesbezüglich auch eine entgegengesetzte Wirkung stattfinden. Die Höfe vom RaA bzw. RaC weisen nämlich an der äußeren Peripherie ihre tiefste Schwärzung auf, so daß man in den Verfärbungserscheinungen offenbar einen ganz parallelen Vorgang hat wie im Falle der Änderung der Ionisationswirkung eines α -Teilchens in einem Gase längs seiner Bahn. Die tiefere Schwärzung der äußeren Peripherie dürfte also mit der großen Ionisationsdichte der α -Teilchen am Ende der Reichweite im Biotitglimmer in engem Zusammenhang stehen. Zu erwähnen wäre auch noch, daß Rutherford durch Einwirkung der α -Strahlen von Radiumemanation im Glase künstliche Höfe erzeugt hat, die den natürlichen Höfen sehr ähnlich sind. Stansfield konnte weiter zeigen, daß das gefärbte Glas eine Erhöhung des Brechungskoeffizienten um nahezu ein Promille gegenüber dem des ungefärbten Glases aufwies. Ob diese Erhöhung durch eine chemische Wirkung der α -Strahlen oder durch die Ansammlung von Helium im Glase verursacht wurde, läßt sich nicht mit Sicherheit sagen.

Für ein und dasselbe Stück eines Biotitglimmers wird gefunden, daß, je größer das Zentralkörnchen sowie auch seine Radioaktivität ist, desto stärker die Verfärbung und desto vollkommener die Entwicklung des Hofgebildes wird. (Natürlich verursacht ein zu großer Kern Verschwommenheit des Hofes.) Für manche „unterexponierte“ Höfe, d. h. jene, die noch nicht die äußeren Höfe des RaA bzw. des RaC aufweisen, läßt sich rechnerisch leicht zeigen, daß sie durch eine Radiummenge von etwa 10^{-17} g hervorgerufen werden würden. Diese Radiummenge, die in einem Jahre etwa 80 α -Teilchen aussenden würde, ist weitaus kleiner als die kleinste (10^{-12} g) auf elektrischem Wege derzeit bestimmbare Menge und entspricht einem Körnchen mit etwa 0,001 mm Diametralgröße. Die Farbe eines pleochroitischen Hofes ist also von zwei Faktoren abhängig: a) der Radioaktivität des Zentraleinschlusses und b) dem Alter des Minerals, in welchem sich letzterer befindet. Auffallend ist die Tatsache, daß Höfe nur in geologisch ziemlich alten Mineralien gefunden werden. Sichtbare Höfe sind in Tertiärmineralien fast unbekannt; dagegen in Biotitgraniten von Perm- und Devonalter sind sie nicht nur häufig, sondern auch meist in hohem Grade entwickelt.

Joly und Rutherford haben nun versucht, das Alter von Biotit mittels der Schwärzung dieser Höfe zu bestimmen. Der zu diesem Zwecke verwendete Biotit gehörte dem unteren Devon an