

Die Bedeutung der Radioaktivität für kosmische Prozesse.

Von Prof. Dr. LISE MEITNER, Dahlem.

(Eingeg. 25./11. 1922.)

Die Eigenschaften, die man am Radium und anderen radioaktiven Stoffen beobachtet, haben eine so große Umwälzung in den Grundvorstellungen der Physik und Chemie hervorgebracht, daß es berechtigt erscheint, von ihnen die Erschließung noch ganz neuer Erkenntniswege zu erhoffen.

Ich will hier von diesen Eigenschaften nur einige, allerdings die wesentlichsten, herausgreifen und an Hand derselben zeigen, wie im engen Rahmen der Laboratoriumsarbeit und mit winzig kleinen Mengen Erfahrungen gewonnen wurden, die unsere Erkenntnisse des allgemeinen Weltgeschehens erweitert und uns einen vertieften Einblick in den Haushalt des Weltalls gegeben haben.

Die radioaktiven Substanzen sind bekanntlich dadurch ausgezeichnet, daß sie nicht unveränderliche Stoffe wie die gewöhnlichen chemischen Elemente darstellen, sondern daß spontan und andauernd die Umwandlung eines Elementes in ein anderes vor sich geht. Alle radioaktiven Substanzen, die wir kennen, entstehen entweder aus dem Uran oder aus dem Thorium, und alle diese Substanzen führen schließlich zum Blei. Das Uran bildet über eine Reihe von Zwischenstufen das Radium, und das Radium zerfällt über eine Reihe von Zwischenprodukten zu Blei. Diese Umwandlung erfolgt zum Teil sehr langsam. Beispielsweise entsteht aus 1 kg Uran erst in 10 Millionen Jahren etwa 1 g Blei. Da das Uranatom beträchtlich schwerer ist als das Bleiatom, ist es klar, daß die Umwandlung von Uran in Blei unter ständiger Massenabgabe erfolgen muß. Diese Massenabgabe findet nun in der Weise statt, daß das Uran ebenso wie das Radium und andere Zwischenprodukte zwischen Uran und Blei bei ihrer Umwandlung ungeheuer schnell bewegte Teilchen aussenden, die sogenannten α -Strahlen, die, wie wir heute wissen, nichts anderes sind als die Atome oder richtiger Atomkerne eines seit langem bekannten Gases, nämlich des Heliums. Das Uran zerfällt also schließlich in Blei und Helium. Diese Heliumteilchen unterscheiden sich von den gewöhnlichen Heliumatomkernen nur in derselben Weise, wie sich etwa ein aus einem Geschütz herausfliegendes Metallgeschöß von dem gewöhnlichen ruhendem Metallstück unterscheidet, d. h. lediglich durch ihre große Geschwindigkeit. Und ebenso wie das schnellfliegende Geschöß von einer genügend starken Wand in seiner Bewegung aufgehalten wird und dann die Stelle der Wand, an der es auftrifft, erwärmt, so werden auch die α -Strahlen, d. h. die schnell bewegten Heliumteilchen, von den verschiedenen Substanzen in ihrer Bewegung gehemmt und erwärmen dabei etwas diese Substanzen. Tatsächlich hat man schon bald nach der Entdeckung des Radiums beobachtet, daß alle radiumhaltigen Präparate immer eine etwas höhere Temperatur haben, als der umgebenden Zimmertemperatur entspricht. Wir sehen also, daß bei dem Zerfall von Uran und allen anderen radioaktiven Substanzen ständig Blei und Helium entstehen und außerdem in dem Maße, wie die schnell bewegten Heliumteilchen festgehalten werden, auch Wärme erzeugt wird.

Da man dank der empfindlichen radioaktiven Methoden die Zahl der Heliumteilchen, die 1 g Uran im Jahr abgibt, und die Geschwindigkeit, die diese Teilchen haben, bestimmen konnte, so kennt man die in einem Jahr pro Gramm Uran erzeugte Heliummenge, sowie die produzierte Wärmemenge. Man hat festgestellt, daß aus 1 g Uran in 10 Millionen Jahren 1 cm³ Helium entsteht, und daß die in derselben Zeit (durch die in der Substanz vernichtete Geschwindigkeit der α -Strahlen) entwickelte Wärmemenge rund 7 l Wasser zum Sieden erhitzen würde.

Betrachtet man also ein beliebiges Uranmineral, das natürlich alle Zerfallsprodukte des Urans und daher auch Radium enthält, so wird dasselbe gewisse Mengen an Blei und Helium enthalten, und außerdem eine permanente Wärmequelle darstellen. Das gleiche gilt natürlich von Thormineralien. Diese Resultate gewinnen ein erhöhtes Interesse, wenn man berücksichtigt, daß auf der Erde und auch auf anderen Gestirnen sehr große Mengen radioaktiver Gesteine vorhanden sind.

Wir wollen zunächst die Bedeutung der Wärmeentwicklung für die Erde betrachten.

Man hat die verschiedensten Gesteinsarten aus allen Gegenden der Welt untersucht und gefunden, daß durchschnittlich in 1 g Gestein etwa $\frac{1}{200\,000}$ g Uran und ein etwa dreimal so großer Gehalt an Thorium vorhanden ist. Der Gehalt an Radium ist um mehr als eine Million mal kleiner. Das sind an sich winzig kleine Mengen, die aber in der Gesamtheit der Erdmasse doch sehr ins Gewicht fallen. Wenn man annimmt, daß die Verbreitung des Urans und Thoriums auch im Innern der Erde dieselbe ist wie in den untersuchten oberflächlichen Gesteinen, so findet man, daß die Gesamtmenge an Uran 60 000 Billionen Tonnen und die von Thorium 180 000 Billionen Tonnen ausmacht. Selbst das äußerst seltene Element Radium, von dem heute auf der ganzen Welt nur etwa 200 g hergestellt sind, muß, wenn man sein Gesamtvorkommen auf der Erde aus den untersuchten Gesteinen errechnet, viele Millionen Tonnen betragen.

Angew. Chemie. 1923. Nr. 2.

Nun haben wir ja gesehen, daß jedes Mineral, das Uran oder Thorium enthält, eine ununterbrochen Wärme spendende Quelle darstellt, und es wurde auch schon die Wärmemenge angegeben, die von 1 g Uran in bestimmter Zeit erzeugt wird. Man kann danach die Wärmemenge berechnen, welche von den im Erdkörper vorhandenen radioaktiven Stoffen in jedem Moment geliefert wird.

Andererseits weiß man seit langem, daß die Temperatur im Innern der Erde viel höher ist als an der Oberfläche und kennt auch genau die Wärmemenge, die vom Innern der Erde an die Oberfläche und von da in den Außenraum hinausgestrahlt wird. Diese von der Erde ständig abgegebene Wärmemenge ist mehr als 100 mal kleiner als die von den berechneten radioaktiven Stoffen andauernd nachgelieferte Wärme, und wenn daher die radioaktiven Substanzen über den ganzen Erdkörper in der gleichen Weise verbreitet wären wie in den oberflächengesteinen, müßte die Temperatur der Erde ständig zunehmen. Da aber alle geologischen Tatsachen dafür sprechen, daß der Temperaturzustand der Erde ein stationärer ist, so ist man zu der Annahme gezwungen, daß der Gehalt der Erde an radioaktiven Substanzen mit der Tiefe abnimmt. Manche Forscher sind der Ansicht, daß nur eine etwa 16 km tiefe Schicht vorhanden ist, die bezüglich des Uran- und Thoriumgehaltes die gleiche Zusammensetzung hat wie die oberflächengesteine, und daß das Erdinnere frei von radioaktiven Substanzen ist. Andere, wie beispielsweise Holmes, Rutherford, Joly nehmen an, und vielleicht ist diese Voraussetzung plausibler, daß der Gehalt an radioaktiven Substanzen bis in die innersten Schichten reicht, aber nach einem ganz bestimmten Gesetz, etwa nach einem Exponentialgesetz immer geringer wird. Nach dieser Annahme gelangt man auch zu wahrscheinlicheren Temperaturen für das Erdinnere, nämlich von rund 1500° C. Dieser Wert widerspricht zumindest nicht den aus vulkanischen Erscheinungen abgeleiteten Daten. Beispielsweise hat die Lava des Ätna eine Temperatur von ungefähr 1060° C. Man hat versucht, diese Frage experimentell zu entscheiden, indem man Gesteinsarten aus verschiedenen Tiefen untersucht hat. Aber der Tiefenbereich, der diesbezüglich zur Verfügung steht, ist im Verhältnis zum Erddurchmesser außerordentlich klein. Die untersuchten Gesteine stammten im allgemeinen aus Tiefen von 10–860 m, und bei diesen konnte keinerlei Abhängigkeit des Radium- oder Uran-gehaltes von der Tiefe des Fundortes festgestellt werden. Ein aus 2 km Tiefe stammendes Material, aus Freiburg, ergab den allgemeinen Durchschnittsgehalt, während ein aus der gleichen Tiefe stammendes amerikanisches Mineral sogar einen höheren Wert aufwies. Lava aus verschiedenen Vulkanen ergab sehr wechselnde Werte, im ganzen aber niedrigere als der allgemeine Durchschnittsgehalt. Interessant ist von diesem Standpunkt aus auch die Untersuchung eines im Jahre 1870 in Ovikaf auf Grönland gefundene Meteoriteisens, von dem von verschiedenen Forschern behauptet wurde, daß es aus dem Innern der Erde stamme. Zwei verschiedene Proben dieses Eisens, deren eine von Strutt in England, die andere von Büchner in Deutschland untersucht wurde, ergaben ganz verschiedene Resultate, indem die eine Probe einen außerordentlich geringen Gehalt an Uran, die andere einen höher n als den Durchschnittsgehalt zeigte.

Daß lokale Konzentrationen von radioaktiven Substanzen in der Erde vorkommen, die lokale Temperaturerhöhungen hervorgerufen, wurde im Simplontunnel beobachtet. Die Messungen des Temperaturgradienten hatten daselbst beträchtlich höhere Werte ergeben als an anderen Stellen gleicher Tiefe. Die Untersuchung der radioaktiven Strahlung im Haupttunnel sowie in verschiedenen Querstellen zeigte nun, daß eine fast doppelt so intensive Strahlung vorhanden ist wie an anderen Orten. Es liegt sehr nahe, diese beiden Beobachtungen miteinander in Verbindung zu bringen und ganz allgemein die Temperaturunterschiede der Gesteine aus ihrem verschiedenen Gehalt an radioaktiven Substanzen zu erklären.

Joly hat versucht, auf dieser Tatsache eine Theorie der Gebirgsbildung aufzubauen. Durch lokale Konzentrationen stark radioaktiver Gesteine, die etwa von Sedimentablagerungen herrühren, sollen lokale Temperaturerhöhungen eintreten, wobei gleichzeitig durch die überlagerten Sedimentschichten eine verringerte Wärmeableitung stattfindet. Dadurch wird die Widerstandsfähigkeit der Erde inde geschwächt, und es können Hebungen und Faltungen viele Kilometer weit unter Gebirgsbildung hervorgerufen werden.

Wenn auch die vorliegenden Beobachtungen durchaus noch keine eindeutige Erklärung der Erscheinungen ermöglichen, so zeigen sie doch immerhin die große Bedeutung der radioaktiven Wärmeentwicklung. Insbesondere folgt aus ihnen auch ein sehr wichtiger Schluß für die Altersbestimmungen der Erde. Unter dem Alter der Erde versteht man die Zeit, die verflossen ist, seitdem die Erdoberfläche zu einer festen Rinde erstarrt ist. Aus der in tieferen Schichten vorhandenen höheren Temperatur und der bekannten durchschnittlichen Wärmeleitung der Gesteine hatte man berechnet, daß das Alter der Erde etwa 30 Millionen Jahre betragen könnte. Diese Zahl war viel kleiner als der Wert, zu dem man aus geologischen Tatsachen geführt wird. Der Nachweis, daß in den Gesteinen durch die radioaktiven Substanzen ständig Wärme erzeugt wird, zeigt, daß eine Alters-

bestimmung der Erde aus dem in tieferen Schichten beobachteten Temperaturgradienten nicht zulässig ist.

Aber die Radioaktivität der Gesteine bietet dafür andere Methoden der Altersbestimmung, denen ein sehr beträchtlicher Grad von Zuverlässigkeit zugeschrieben werden darf. Es wurde schon erwähnt, daß jedes Uran- und Thoriummineral bestimmte Mengen von gasförmigem Helium und festem Blei enthalten muß, und zwar kennen wir genau die Mengen, die beispielsweise von 1 g Uran pro Jahr erzeugt werden.

Bestimmt man also in verschiedenen Gesteinen die auf 1 g Uran kommenden Helium- und Bleimengen, so kann man die Zeit berechnen, die nötig war, diese Mengen zu bilden, d. h. man kann das Alter der Gesteine bestimmen. Allerdings ist dabei angenommen, daß die radioaktiven Umwandlungsprozesse durch alle geologischen Zeiten hindurch unverändert geblieben sind, eine Annahme, die nach unserer Kenntnis von der Unbeeinflussbarkeit der Zerfallsvorgänge wohl berechtigt ist. Legt man für die Altersbestimmung die gefundenen Heliummengen zugrunde, so muß man die Voraussetzung machen, daß das seit dem Erstarren des Gesteins gebildete Helium vollständig in dem Gestein zurückgehalten worden ist. Da aber sicher je nach der Struktur des Gesteins etwas Helium entweichen kann, so stellt das aus dem Heliumgehalt gefolgerte Alter nur eine untere Grenze dar, d. h. die Gesteine können sicher nicht jünger, aber vielleicht älter sein, als sich aus der gefundenen Heliummenge ergibt. Eine zweite mit der Heliumbildung aus Uran verknüpfte Methode zur Altersschätzung der Mineralien beruht auf folgenden Tatsachen. Das entsprechende Helium wird, wie schon erwähnt, von den radioaktiven Substanzen in Form sehr schnell bewegter Strahlen abgegeben. Treffen diese Strahlen auf verschiedenen Substanzen, beispielsweise auf Glas auf, so rufen sie eine Verfärbung hervor. Daher sind auch Glasröhrchen, in denen längere Zeit Radium aufbewahrt worden ist, stets ganz dunkelblau oder braun gefärbt. Die Färbung hängt von der Zusammensetzung des Glases ab. Nun hatte man schon seit langem beobachtet, daß die Dünnschliffe mancher Mineralien, vor allem Glimmer, im Mikroskop kleine gefärbte, meist kreisförmige Gebilde aufweisen, deren Ursprung die Mineralogen nicht zu erklären vermochten. Joly konnte nun zeigen, daß diese als pleochroitische Höfe bezeichneten Erscheinungen radioaktiven Ursprungs sind. In das Mineral ist ein winzig kleines radioaktives Körnchen eingesprengt, das nach allen Richtungen α -Strahlen aussendet, und diese α -Strahlen rufen längs ihres Weges, der in dem dichten Mineral nur sehr klein ist, eine Verfärbung hervor, die als Hof erscheint. Kennt man nun die Zahl der α -Strahlen, die notwendig ist, um eine bestimmte Schwärzung in dem Mineral zu erzeugen, und bestimmt man die Zahl der α -Teilchen, die das eingesprengte Körnchen pro Zeiteinheit aussendet, so kann man ausrechnen, wie lange diese α -Strahlung eingewirkt haben muß, um die beobachtete Verfärbung hervorzurufen, d. h. man erhält so wieder eine Altersschätzung des betreffenden Minerals. Die Einsprenglinge, die meistens aus uranhaltigem Zirkon bestehen, sind natürlich winzig klein. Die uranhaltigen Kerne haben $\frac{1}{100}$ – $\frac{2}{100}$ mm Durchmesser, und der Durchmesser der Höfe beträgt $2\frac{1}{2}$ – $3\frac{1}{2}$ mm. Die Zahl der ausgesendeten α -Teilchen ist bei den am stärksten ausgebildeten Höfen 1 α -Teil in 10 Stunden, es sind aber noch Höfe beobachtet worden, die durch die Emission von nur 80 α -Teilchen pro Jahr entstanden sind. Die dabei wirksame Menge Uran beträgt weniger als ein Milliardstel Gramm, also eine Menge, die sich jedem chemischen Nachweis selbstverständlich entziehen würde. Und doch lehrt sie uns die Geschichte des Minerals kennen und zeigt, daß dieses winzige Stückchen Glimmer seit Hunderten von Millionen Jahren in derselben Form vorgelegen haben muß wie heute.

Benützt man das Blei zur Altersbestimmung, so erhebt sich zunächst die Schwierigkeit, daß ja beim Erstarren des Gesteins gewöhnliches Blei mit auskristallisiert sein kann, so daß das Gestein nicht nur das durch die Umwandlung des Urans oder Thoriums entstandene Blei, sondern schon ursprünglich mit ausgeschiedenes Blei enthält, und die Altersbestimmung würde daher zu große Werte liefern. Indes kommt hier der Umstand zu Hilfe, daß das aus Uran entstehende Blei ein etwas geringeres Atomgewicht, das aus Thorium entstehende Blei ein etwas höheres Atomgewicht besitzt als das gewöhnliche Blei. Das Uranblei hat das Atomgewicht 206, das Thorblei 208, während das Atomgewicht des gewöhnlichen Bleis 207,1 beträgt. Wählt man daher zur Altersbestimmung einerseits thoriumfreie Uranmineralien, andererseits uranfreie Thormineralien und bestimmt das Atomgewicht des gefundenen Bleis, so kann man mit großer Genauigkeit feststellen, wie viel von der vorhandenen Bleimenge durch allmähliche radioaktive Umwandlung entstanden ist, und wieviel gewöhnliches Blei ursprünglich beim Erstarren des Gesteins mit ausgeschieden worden war. Man gelangt so zu einer fehlerfreien Altersbestimmung des betreffenden Gesteins. Wird nur eine Bestimmung der vorhandenen Bleimenge ohne Kontrolle des Atomgewichts ausgeführt, so stellt das berechnete Alter einen oberen Grenzwert dar.

Die ausgeführten Untersuchungen haben nun die Brauchbarkeit der beiden Methoden durchaus erwiesen.

Es hat sich gezeigt, daß Helium in merklicher Menge tatsächlich nur in radioaktiven Gesteinen auftritt, und daß die auch geologisch als älter definierten Gesteinsproben stets auch mehr Helium enthalten als die jüngeren. Bei diesen Untersuchungen war man natürlich darauf bedacht, nach Möglichkeit Mineralien zu wählen, die eine besonders dichte und feste Struktur zeigen, um den durch etwa entwichenes Helium bedingten Fehler möglichst gering zu machen. Das höchste

Alter, das sich nach dieser Methode ergab, war 600 Millionen Jahre und wurde an einem Zirkonmineral aus dem ältesten Präkambrium gefunden. Dieser Wert stellt nach dem früher gesagten die untere Grenze für das Höchstalter der Gesteine dar. Die Untersuchung nach der Methode der pleochroitischen Höfe führte für verschiedene Glimmer aus dem Devon zu einem Wert von etwa 400 Millionen Jahren. Die Bestimmungen nach der Bleimethode ergaben, daß Mineralien, die geologisch als gleichaltrig aufzufassen sind, auch sehr nahe das gleiche Mengenverhältnis von Uran und Blei aufweisen, und daß eine enge Beziehung zwischen den in den Gesteinen vorhandenen relativen Bleimengen und ihrem geologischen Alter besteht. Der höchste Wert, der nach dieser Methode an einem aus den ältesten Graniten stammenden afrikanischen Zirkonmineral gefunden wurde, betrug 1500 Millionen Jahre. Da bei dieser Bestimmung keine Kontrolle des Atomgewichts des vorhandenen Bleis gemacht wurde, so stellt dieser Wert eine obere Grenze dar. Wie zu erwarten, liegt er erheblich höher als der aus den Heliumbestimmungen gefundene größte Wert.

Eine absolut eindeutige Altersbestimmung wurde an dem sogenannten Morogoroerz, einem Thormineral aus Deutsch-Ostafrika, ausgeführt. Das aus diesem Gestein abgeschiedene Blei wurde nämlich sorgfältig auf sein Atomgewicht geprüft, und es ergab sich genau der Wert, der dem aus Uran gebildeten Blei zukommt, nämlich der Wert von 206. Somit ist für dieses Erz sichergestellt, daß das ganze darin vorhandene Blei durch Umwandlung des Urans entstanden ist, und daß das daraus berechnete Alter von 700 Millionen Jahren das wirkliche Alter des Gesteins darstellt.

In neuester Zeit ist im Belgischen Kongo ein Uranmineral aufgefunden worden, das ganz reines Uranblei enthält und zwar in so großen Mengen, daß sich sein Alter zu etwa 3000 Millionen Jahren ergibt.

Jedenfalls sieht man, daß die radioaktiven Untersuchungsmethoden ein viel höheres Alter der Erde liefern, als man es früher aus thermischen Berechnungen erschlossen hat, ja sogar ein nicht unbeträchtlich höheres als aus den geologischen Methoden gefolgert wird. Joly hat daher geschlossen, daß die Zerfallsgeschwindigkeit des Urans in Urzeiten größer war, als sie jetzt ist, so daß mehr Blei in kürzerer Zeit entstanden wäre, wodurch ein größeres Alter der Gesteine bei der Uranbleibestimmungsmethode vorgetäuscht würde; aber wirklich zwingende Beweise für diese Annahme liegen nicht vor, und man ist wohl berechtigt, die radiologischen Methoden zur Zeitmessung als die heute zuverlässigsten zu betrachten.

Es ist nun klar, daß die radioaktiven Substanzen nicht auf unsere Erde begrenzt sein können, sondern auch auf anderen Himmelskörpern vorkommen werden. Tatsächlich hat die Untersuchung von außer-terrestrischen Meteorsteinen einen etwa gleichen Gehalt an Uran ergeben, wie er auf der Erde gefunden wird. Dagegen hat sich in den eisenreichsten Meteoriten, die nach Wichert aus dem Innern der Himmelskörper stammen sollen, kein Radium nachweisen lassen, und man hat darin auch eine indirekte Bestätigung gesehen für die früher erwähnte Annahme, derzufolge das Innere der Erde frei von radioaktiven Substanzen ist. Strutt hat gezeigt, daß, wenn man für den Mond den gleichen Gehalt an Uran und Thor voraussetzt, wie er auf der Erdoberfläche gefunden wird, eine starke Erhitzung des Mondinnern eintreten muß, die vielleicht die Ursache der vulkanischen Erscheinungen auf dem Mond bilde.

Für die Sonne wurde versucht, durch Spektraluntersuchungen die Existenz von Radium nachzuweisen, ein eindeutiger experimenteller Nachweis ist indes nicht gelungen. Andererseits muß die Sonne, wenn sie aus demselben Urmaterial stammt, auch die auf der Erde vorhandenen radioaktiven Elemente enthalten. Die große Menge Helium, die auf der Sonne beobachtet wird — bekanntlich ist Helium zuerst spektralanalytisch auf der Sonne aufgefunden worden, bevor es von Ramsay in uranhaltigen Mineralen entdeckt wurde — spricht für das Vorhandensein radioaktiver Stoffe. Man ist auch durch gewisse Erscheinungen in der Erdatmosphäre gezwungen, auf eine außerterrestrische Radioaktivität zu schließen. Die in der Erdoberfläche vorhandenen radioaktiven Substanzen entsenden ihre durchdringenden Strahlen in die umgebende Atmosphäre, was sich durch Ionisationsmessungen nachweisen läßt. Diese Strahlung muß natürlich mit wachsender Entfernung vom Erdboden abnehmen. Die Untersuchungen haben aber gezeigt, daß eine solche Abnahme nur bis etwa 700 m über dem Erdboden erfolgt, dann tritt eine zunächst langsame, hierauf schnellere Zunahme der Strahlungsintensität auf. Schon in 1600 m Höhe ist die Strahlungsstärke wieder dieselbe wie auf der Erde, und von 4000 m an tritt eine sehr beträchtliche Zunahme der Strahlung auf, die bis 9000 m Höhe verfolgt wurde. In dieser Höhe ist die Strahlung bereits fast 6mal so groß wie auf der Erde. Es ist klar, daß diese Strahlung, die außerdem etwa 7mal durchdringender ist als die durchdringendste γ -Strahlung der uns bekannten radioaktiven Elemente, nicht von der Erde herrühren kann, sondern kosmischen Ursprungs sein muß. Irgend-einen Anhaltspunkt über die Quelle dieser Strahlung besitzen wir heute noch nicht. Nernst verweist mit Recht darauf, daß es von außerordentlicher Wichtigkeit wäre, festzustellen, ob die Strahlung im Weltraum gleichmäßig verteilt oder in bestimmten Richtungen, etwa von der Milchstraße her, stärkere Intensitäten zeige. Aber zur Ausführung solcher Messungen müßten erst besondere, sehr verfeinerte Methoden ausgearbeitet werden.

Die Tatsache, daß diese Höhenstrahlung viel durchdringender ist als sie an den uns bekannten radioaktiven Elementen beobachtet wird, kann man entweder mit Nernst durch die Annahme erklären,

daß sie von höheratomigen Elementen herstamme, die sich vereinzelt im Weltraum bilden sollen. Oder man muß die Annahme machen, daß die radioaktiven Umwandlungsgesetze, wie wir sie auf der Erde beobachten, unter den auf manchen Himmelskörpern vorhandenen Temperaturbedingungen nicht mehr gelten. Allerdings haben Laboratoriumsversuche gezeigt, daß die radioaktiven Prozesse durch die höchsten herstellbaren Temperaturen nicht beeinflussbar sind. Aber dieser experimentelle Befund ist selbstverständlich, denn wie Nernst gezeigt hat, ist aus energetischen Gründen eine Beeinflussung der Zerfallsgeschwindigkeit erst bei etwa 10000 Millionen Grad zu erwarten. Diese Temperatur ist beträchtlich höher als selbst die höchsten von den Astronomen angenommenen Sterntemperaturen. Indessen verweist Joly vielleicht nicht ganz mit Unrecht darauf, daß lokal möglicherweise doch so hohe Temperaturen eintreten könnten, daß radioaktive Prozesse hervorgerufen würden. Diese durch die äußere Temperatur erzeugten Zerfallsprozesse würden dann nach Joly nicht mehr nach den uns bekannten Zerfallsprozessen ablaufen müssen, denn während die normale radioaktive Umwandlung so vor sich geht, daß von vielen vorhandenen Atomen nur ein bestimmter Bruchteil, der durch irgendeine uns unbekannt aber notwendige Kernkonstellation ausgezeichnet ist, zerfällt, ist der äußere Temperatureinfluß für alle betreffenden Atome der gleiche. Es würden also hierbei Atomumwandlungen nach Art vulkanartiger Ausbrüche stattfinden, die zu viel durchdringenderen Strahlen Anlaß geben könnten, als wir sie bei den radioaktiven Prozessen auf der Erde beobachten.

Begreiflicherweise hat man auch versucht, die radioaktiven Vorgänge für die Erklärung der Sonnenenergie nutzbar zu machen. Die Sonne verliert ja durch die ausgestrahlte Wärme ständig außerordentlich große Energiemengen, und es ist ein seit langem diskutiertes Problem, ob und wie eine Nachlieferung von Energie stattfinden kann. Alle bisher herangezogenen Energiequellen haben kein genügendes Alter der Sonne ergeben. Indes läßt sich leicht zeigen, daß auch die gewöhnlichen radioaktiven Prozesse keine ausreichende Energiequelle liefern können. Denn selbst, wenn die Sonne ganz aus Uran bestehen würde, würde die durch den radioaktiven Zerfall in jedem Zeitmoment erzeugte Energiemenge nur die Hälfte der in der gleichen Zeit von der Sonne ausgestrahlten Wärmeenergie decken. Es muß also eine noch viel größere Energiequelle wirksam sein, als sie der gewöhnliche radioaktive Zerfall darstellt. Die Möglichkeit einer solchen Energiequelle ist nun merkwürdigerweise durch einen Prozeß geboten, der gerade der umgekehrte Vorgang der radioaktiven Prozesse ist, nämlich, nicht der Zerfall schwerer Atome in leichtere, sondern das Zusammenschließen leichterer Atome zu einem schwereren.

Rutherford ist es bekanntlich gelungen, verschiedene Elemente wie Stickstoff, Phosphor, Aluminium u. a. zu zertrümmern, indem er diese Elemente mit sehr schnellen α -Strahlen radioaktiver Substanzen bombardierte, d. h. er hat gewissermaßen eine künstliche radioaktive Umwandlung dieser Elemente erzeugt, wobei in allen Fällen die Umwandlung unter Abgabe von Wasserstoff erfolgte. Beim Helium, von dem wir heute mit großer Sicherheit annehmen, daß es aus vier Wasserstoffteilchen aufgebaut ist, gelang die Zertrümmerung nicht, und Rutherford schloß daraus, daß die Wasserstoffteilchen im Helium besonders fest aneinander gebunden sind. Diese Annahme erhält eine Stütze durch die Tatsache des sogenannten Massendefektes. Das Atomgewicht des Wasserstoffs beträgt 1,0077, ein aus vier Wasserstoffteilchen aufgebautes Heliumatom müßte daher das Atomgewicht 4,031 haben, es hat aber das Atomgewicht 4,00, d. h. ein geringeres Atomgewicht. Nun weiß man heute, daß, wenn bei der Bildung eines komplexen Systems aus einzelnen Teilen eine gewisse Energiemenge abgegeben wird, die Masse des entstandenen Systems um einen dieser Energie entsprechenden Betrag geringer sein muß als die Summe der Masse der einzelnen Teile. Diese Massenabnahme wird als Massendefekt bezeichnet. Der Massendefekt des Heliumatoms gegenüber der Masse von vier Wasserstoffatomen besagt also, daß bei der Bildung von Helium aus Wasserstoff eine entsprechende Energiemenge frei wird. Umgekehrt, will man Helium zu Wasserstoff zertrümmern, so muß man ihm diese Energie zuführen, und die Rechnung ergibt nun, daß diese Energie tatsächlich etwa dreimal so groß ist als sie die schnellsten α -Strahlen besitzen. Es ist daher begreiflich, daß eine Zertrümmerung von Helium durch α -Strahlen nicht erreicht wurde.

Nimmt man nun an, daß unter gewissen Umständen eine Bildung von Helium aus Wasserstoff vor sich gehen kann, so wird dabei eine ganz außerordentlich große Energie erzeugt, und diese Energie würde ausreichen, um die Sonne mehrere tausend Millionen Jahre in ihrem jetzigen Strahlungszustand zu erhalten.

Ob auch der Aufbau komplizierterer Atome stattfinden kann, ist eine Frage, die schon an die Grenze unserer Erkenntnismöglichkeit führt. Das menschliche Empfinden wehrt sich mit aller Macht gegen einen Erschöpfungstod des Weltalls, mag derselbe auch noch so ferne liegen, und sucht nach einem Mittel der Regeneration. Ob Zerfall und Aufbau der Materie — man denkt dabei unwillkürlich an das alte mystische Symbol der Schlange, die in ihren Schwanz beißt — die erwünschte Lösung zu bringen vermag, muß erst die Zukunft lehren.

[A. 275.]

Entwicklung und Fortschritte in der Urteergewinnung und -verarbeitung.

Von Dr. ALFRED FABER, Leipzig.

(Schluß v. S. 3.)

Der modernen Technik stehen zur Durchführung der Urteergewinnung die Schwelochächtfen und die Drehtrommel zur Verfügung, die in zahlreichen konstruktiven Ausarbeitungen vorliegen. Die schonendere Entgasung liefert Urteer, Schwelgas, -wasser und Halbkoks: die restlose Vergasung im Generator Urteer, Heiz- und Kraftgas und Schlacke. Die Einwirkung der Temperatur auf die Koble beginnt mit der Abspaltung des physikalisch gebundenen Wassers bei 100°, in manchen Fällen, so bei nasser Rohbraunkohle mit z. T. kolloidal gebundenem Wasser entweichen die letzten Reste Wasser erst bei 250° und darüber. Chemische Vorgänge setzen mit 150–200° ein; bei 250–300° erfolgt die Gasbildung, wobei sich zuerst Kohlensäure, Methan, schwere Kohlenwasserstoffe, Wasserstoff und Kohlenoxyd bilden. Die Hauptmenge der Urteers tritt bei 350–460° auf, gleichzeitig vermehren sich die Methan- und Wasserstoffmengen. Flüchtige Schwefelverbindungen finden sich von 300–350°. Die Urgase bestehen unterhalb 450° hauptsächlich aus Methan, Äthan, Propan, Butan; über 700° tritt starke Wasserstoffentwicklung auf, die durch teilweise Zersetzung der Kohlenwasserstoffe erklärt wird. Die Arbeitstemperaturen der Schwel- und Entgasungsprozesse liegen für die Drehtrommel bei 450–500°, für Rolleschmelöfen bei 400–900°, für Generatoren verschiedenster Bauart bei 500–600° (Generatorabgastemperatur unter 300°), für Schieferretorten bei 450–700°, für Torfcarbozit bei 250–300°.

Um die technische Durchbildung der Drehtrommelöfen machten sich besonders die Firmen Thyssen, Mülheim (Ruhr) und Fellner & Ziegler, Frankfurt (Main), verdient²⁵⁾. Erstere Gesellschaft begann ihre großtechnischen Versuche an einem Trommelofen mit 100 t Tagesdurchsatz im Jahre 1919²⁶⁾; die Drehtrommel ist 20 m lang bei einem Durchmesser von 2–3 m; Heizung und Antrieb erfolgen von außen. Während des Entgasungsvorgangs strömt zum Schutze des sich bildenden Urteers vor Zersetzungen überhitzter Wasserdampf über die Beschickung. Die Brühdämpfe werden mit etwa 100° abgesaugt; Teerdämpfe und Schwelgase entweichen am oberen Ende der Trommel. Der in einer Ausbeute von 70–75% anfallende Steinkohlenhalbkoks hat 7000 Cal. Heizwert; bei Arbeitstemperaturen von 450–500° gibt der gewonnene Steinkohlenurteer 75% Destillate und 25% Pech. Er unterscheidet sich von den Braunkohlenurteeren durch höheren Gehalt an leicht siedenden Benzinen (rund 28%, bis 200°). Das Schwelgas²⁷⁾ führt noch 0,5% niedrig bis etwa 100° siedende Benzine (berechnet auf Koble), die zusammen mit vorhandenen schweren Kohlenwasserstoffen seinen hohen Heizwert von 8000–9000 Cal. bedingen. Nachteilig scheinen bei der Drehofenschwelung die durch die Rotation bewirkte stärkere Zernahlung des Halbkoks und Staubbildung; der feine Halbkoksstaub wird mit den entweichenden Gasen und Dämpfen in die Kühler mitgerissen und verunreinigt den Teer stark. Da der zugeleitete Wasserdampf nur die Oberfläche der heißen Beschickung bestreicht, sind lokale Überhitzungen des Kohlebitumens an den geheizten Trommelwänden nicht ausgeschlossen. Die bis heute vorliegenden Betriebserfahrungen lassen diese Schwelöfen trotz anfänglicher konstruktiver Schwierigkeiten als durchaus betriebssicher für Steinkohleentgasung erscheinen; ob sie sich auch für malmige, wasserreiche Braunkohlen eignen, ist meines Wissens nicht erwiesen. Nach Berechnungen von Holzwarth²⁸⁾ zeigt ein Vergleich der Braunkohleverarbeitung durch direkte Vergasung der Rohkoble, Vergasung von Briketts, Verschmelzung im Rolleofen mit anschließender Grudekoksvergasung und Verschmelzung im Drehofen mit anschließender Grudekoksvergasung im Generator die bedeutende Überlegenheit der Drehtrommel über die genannten Verfahren.

Der in der sächsisch-thüringischen Schwelindustrie in Betrieb befindliche Rolleofen arbeitet mit stückiger, bitumenreicher Kohle oder Briketts bei Temperaturen bis zu 900°. Bei geringem Tagesdurchsatz von 4–5 t sind seine Anlagekosten relativ hoch und sein Betrieb teuer. Von dem anfallenden Schwelteer werden im Ofen selbst 40–45% wieder zersetzt und in Gase gespalten, so daß der Rolleofen bei nur 60%iger Urteerausbeute der Schwelanalyse zur großtechnischen Durchführung der Urteerversorgung nicht geeignet ist. Sein Schwelteer wird in bekannter Weise²⁹⁾ auf Paraffin, Heizöle, Treiböle, Schmieröle weiter veredelt.

Im Kriegsjahr 1916 schritt die Deutsche Erdöl-Aktiengesellschaft unter dem Druck der täglich fühlbarer werdenden Not an Treibölen und Schmiermitteln zur Erbauung einer umfangreichen Schwelgeneratoranlage in Rositz (S.-A.). Ging früher das Bestreben des

²⁵⁾ Siehe auch D.R.P. 362535, 363265. Eine neue Drehretorte unter dem Namen „fusion retort“ führte 1921 Goodwin in England ein. Besonderen Wert legte der Konstrukteur auf eine exzentrisch in der inneren Schwelretorte angeordnete Schaufelradwelle. Diese Vorrichtung soll das Anbacken der Beschickung an der Trommelwand und die Bildung von Koksstücken verhindern. Technische Betriebsergebnisse mit der fusion retort liegen nicht vor (vgl. Glückauf 1922, 1154).

²⁶⁾ Roser, Stahl u. Eisen 40, 741.

²⁷⁾ Roser, Gas- u. Wasserfach 64, 686 [1922].

²⁸⁾ Braunkohle 19, 189.

²⁹⁾ Vgl. Scheithauer, Die Schwelteere, 1922.