

## Werk

**Jahr:** 1930

**Kollektion:** fid.geo

**Signatur:** 8 GEOGR PHYS 203:6

**Digitalisiert:** Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

**Werk Id:** PPN101433392X\_0006

**PURL:** [http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X\\_0006](http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0006)

**LOG Id:** LOG\_0072

**LOG Titel:** Gammastrahlen an Kaliumsalzen

**LOG Typ:** article

## Übergeordnetes Werk

**Werk Id:** PPN101433392X

**PURL:** <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

**OPAC:** <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

## Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

## Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen  
Georg-August-Universität Göttingen  
Platz der Göttinger Sieben 1  
37073 Göttingen  
Germany  
Email: [gdz@sub.uni-goettingen.de](mailto:gdz@sub.uni-goettingen.de)

## Gammastrahlen an Kaliumsalzen

Von **Werner Kolhörster**, Meteorologisch-Magnetisches Observatorium Potsdam

An Kalisalzen wurde eine schwache, sehr harte  $\gamma$ -Strahlung gefunden. Ihr Durchdringungsvermögen ist etwa das Doppelte, ihre Intensität nur  $5 \cdot 10^{-11}$ fache der Radium- $C\gamma$ -Strahlen, an der Ionisierungsstärke gleicher Substanzmengen gemessen. Die Strahlung geht dem Kaliummetallgehalt direkt proportional, ist dem Kaliumatom, vielleicht  $K_{41}$  zuzuschreiben. Dadurch ist in den Kalisalzen wegen der verhältnismäßig hohen Konzentration ihres Vorkommens und der allgemeinen Verbreitung ein neuer geophysikalischer Faktor gefunden, dessen Bedeutung dem Radiumvorkommen in der Erdkruste entspricht.

Schon seit etwa 1906 sind Kaliumsalze als radioaktiv erkannt worden\*). Jedoch konnten im Gegensatz zu den hochatomigen Radioelementen der Uran-, Radium-, Aktinium- und Thoriumreihe bisher nur  $\beta$ -Strahlen festgestellt,  $\gamma$ - bzw.  $\alpha$ -Strahlen oder Emanationsentwicklung\*\*) bzw. Umwandlungsprodukte aber nicht nachgewiesen werden. Man dachte daher zunächst an eine andere Art von Aktivität, als sie den hochatomigen radioaktiven Elementen zukommt. Doch hat man diese Vermutung in der Folgezeit mehr und mehr aufgegeben, zumal die weiteren bis in die neueste Zeit fortgesetzten Untersuchungen immer wieder Proportionalität der  $\beta$ -Aktivität mit dem Kaliummetallgehalt sowohl bei der Ionisations- bzw. photographischen Messung\*\*\*), Unabhängigkeit von der verschiedenen Herkunft der Kalisalze†) und Unabhängigkeit von der Temperatur im Bereich zwischen  $+20$  bis  $-180^\circ \text{C}$  ††) gezeigt hatten.

Handelt es sich also um eine wirkliche Atomverwandlung — der inzwischen gelungene Nachweis der Aktivität †††) des Kaliumisotop 41 läßt nunmehr mit großer Wahrscheinlichkeit auf eine Kern- $\beta$ -Strahlung, also auf einen Vorgang im Atomkern schließen —, so war wegen der nahen Beziehungen zwischen  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen bei Kalium auch  $\gamma$ -Strahlung zu erwarten. Daß sie bisher selbst bei den feinsten Messungen nicht gefunden worden war, konnte einfach in ihrer geringen Aktivität neben der viel stärkeren  $\beta$ -Ionisation begründet sein.

\*) I. Elster und H. Geitel: Jahrb. d. Radioakt. u. El. **10**, 323 (1913); St. Meyer und E. Schweidler: Radioaktivität, S. 531ff., 2. Aufl., Leipzig 1927; K. W. F. Kohlrausch: Radioaktivität, S. 776ff. Leipzig 1928.

\*\*) B. Kracke: Phys. Zeitschr. **27**, 290 (1926).

\*\*\*) G. Hoffmann: Zeitschr. f. Phys. **25**, 177 (1924); M. Kuban: Wiener Ber. **137**, 241 (1928).

†) W. Biltz und E. Markus: Zeitschr. f. anorg. Chem. **81**, 369 (1913); S. Iimori und J. Yoshimura: Bull. Chem. Soc. Jap. **1**, 215 (1926).

††) S. Geiger: Wiener Ber. **132**, 69 (1923).

†††) G. v. Hevesy: Nature **120**, 838 (1927); W. Biltz und H. Ziegert: Phys. Zeitschr. **29**, 197 (1928).

Direkte Veranlassung zur Untersuchung von Kaliumsalzen auf  $\gamma$ -Strahlen gaben Beobachtungen über Reststrahlung. Man bezeichnet hiermit die geringe Ionisation im geschlossenen Gefäß, welche allein von Strahlen aus dem Gefäßinneren herrührt, wenn also alle Strahlungen, die von außen eindringen können, durch genügend dicke Schirme ferngehalten werden. Als Schirmmaterial, das merklich strahlungsfrei sein muß, benutzt man außer Metallen meist Wasser oder Steinsalz. Letzteres gilt seit den Untersuchungen von Elster und Geitel\*) und Bergwitz\*\*) als besonders geeignet, da im Steinsalz bisher die geringsten Reststrahlungswerte (Bergwitz erhielt 0.8J) gefunden worden sind.

Indessen ist hiermit noch keineswegs ausgemacht, daß Steinsalz überhaupt nicht strahlt. Schon der geringe Heliumgehalt von 0.0233 cm<sup>3</sup> in 100 g NaCl\*\*\*), sowie das Auftreten von blauem Steinsalz weisen auf irgendwelche Strahlungsvorgänge, vielleicht zu einer früheren Zeit hin. Daneben läßt das verhältnismäßig geringe Alter der Steinsalzformation von höchstens 10<sup>8</sup> Jahren Steinsalz auch heute noch strahlungsverdächtig erscheinen. Denn der Uranradiumgehalt des ehemaligen Steinsalzmeeres müßte bei einer Halbwertszeit des Urans von 4.5 · 10<sup>9</sup> Jahren noch beinahe ungeschwächt erhalten sein. Es war also bei Reststrahlungsbestimmungen mindestens mit der Möglichkeit zu rechnen, daß nicht jedes Steinsalz dieselbe Inaktivität zeigt, so daß von Fall zu Fall vielleicht geringe Unterschiede in den Werten der Reststrahlung bei Beobachtung im Steinsalz auftreten.

Dank dem besonderen Entgegenkommen der Preußischen Bergwerks- und Hütten- Aktiengesellschaft, Berginspektion Staßfurt†), konnten derartige Messungen im Berlepschschacht in Staßfurt ausgeführt werden. Dabei ergaben sich sogleich schwache, jedoch merkliche Unterschiede der Strahlungsstärke zwischen älterem und jüngerem Steinsalz, und zwar höhere Werte merkwürdigerweise im älteren Steinsalz, dessen aktive Verunreinigungen doch bereits weiter abgeklungen sein sollten als im jüngeren Steinsalz. Der vielleicht etwas größere Kaliumgehalt der älteren Steinsalze (etwa 1.5% K-Metall gegenüber 0.5% bei jüngerem Steinsalz, wie erst später festgestellt wurde) schien hierfür zunächst ohne Bedeutung, da ja Kalium nur als  $\beta$ -Strahler galt und  $\beta$ -Strahlen bereits von den Wandungen der Meßinstrumente absorbiert worden wären. So wurde zunächst an irgendeine andere aktive Substanz gedacht, die möglicherweise auch die Blaufärbung des Steinsalzes herbeigeführt haben konnte. Daher wurde nunmehr an einer Stelle gemessen, an welcher das in Staßfurt selten gefundene blaue Steinsalz etwas häufiger aufzutreten pflegt, nämlich an der Hartsalzregion. Hier zeigte sich sofort eine erhebliche Aktivität, welche etwa 10<sup>-11</sup> g Radium im Gramm

---

\*) I. Elster und H. Geitel: Phys. Zeitschr. 6. 733 (1905).

\*\*\*) K. Bergwitz: Elster und Geitel-Festschrift, S. 585, Braunschweig 1915.

\*\*\*\*) R. I. Strutt: Proc. Roy. Soc. London (A) 81, 278 (1908); s. auch S. 352.

†) Herrn Oberbergat Dr.-Ing. Schreiber sowie seinen Beamten bin ich für die tatkräftige und dauernde Unterstützung im Verlaufe dieser Versuche zu aufrichtigem Danke verpflichtet.

Substanz entsprach und in Anbetracht der Wandstärke der Ionisationszylinder als  $\gamma$ -Strahlung anzusprechen war. Das bestätigte die sogleich an Ort vorgenommene Bestimmung ihres Schwächungskoeffizienten.

Zu diesem Zwecke wurde ein Panzer aus 100 kg eisernen Schienenlaschen an dieser entlegenen Stelle im Schacht aufgebaut, der eine mittlere Dicke von 3.75 cm Eisen hatte. In ihm sank die Strahlungsstärke der benutzten Instrumente ungefähr auf die Hälfte des Wertes ohne Panzer, so daß  $\mu_{\text{Fe}} = 0.196 \text{ cm}^{-1}$ ,  $(\mu/d)_{\text{Fe}} = 0.025 \text{ cm}^2/\text{g}$  betrug. Hartsalz besteht aus Steinsalz (NaCl), Kieserit ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) und Sylvin (KCl). Der Vermutung, daß etwa der hohe Kaliumgehalt des Sylvins für die  $\gamma$ -Strahlung in Betracht kam, stand die bereits erwähnte Annahme entgegen, daß bisher nur  $\beta$ -Strahlung beim Kalium beobachtet worden war, für deren härteste Komponente Bergwitz\*) seinerzeit im Carnallit ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ) einen um eine Zehnerpotenz größeren Absorptionskoeffizienten gefunden hatte ( $\mu_{\text{Zn}} = 1.6 \text{ cm}^{-1}$ ). Dies würde  $\mu_{\text{Fe}} = 1.8 \text{ cm}^{-1}$  bzw.  $(\mu/d)_{\text{Fe}} = 0.275 \text{ cm}^2/\text{g}^{-1}$  bedeuten.

Der hier gemessene Schwächungskoeffizient entspricht dagegen größenordnungsmäßig eher demjenigen der harten Komponente der RaC- $\gamma$ -Strahlen (nach Kohlrausch bei 4 cm Bleifilterung  $\mu_{\text{Fe}} = 0.356 \text{ cm}^{-1}$  oder  $(\mu/d)_{\text{Fe}} = 0.0451 \text{ cm}^2/\text{g}^{-1}$ ), ist aber nur halb so groß. Man muß jedoch berücksichtigen, daß bei diesem Versuch der Schwächungskoeffizient kleiner ausgefallen sein dürfte, weil ein wesentlicher Teil der im Absorber erzeugten Streustrahlung mitgemessen wurde.

Während also der Schwächungskoeffizient mehr auf Radium als Strahler deutete, ließ die Gehaltsbestimmung, die zu dem für Hartsalz unwahrscheinlich hohen Wert einer Radiumbeimengung von ungefähr  $10^{-11}$  im Gramm Hartsalz führte, eher eine  $\gamma$ -Strahlung von Kalium vermuten. Die weiteren Versuche wurden deshalb zunächst über Tag an technischem Sylvin (KCl) durchgeführt. Dies Produkt ist bereits unkristallisiert, so daß mit einem negativen Ergebnis zu rechnen war, wenn die Strahlung nicht vom Kalium herrühren sollte.

Zu den Beobachtungen stellte die C. A. F. Kahlbaum A.-G. in dankenswerter Weise 200 kg technisch reines KCl zur Verfügung. Dies wurde in eine Holzkiste von  $50 \times 60 \times 90 \text{ cm}^3$  geschüttet und das Meßinstrument so hineingebracht, daß es allseitig von mindestens 20 cm dicken KCl-Schichten umgeben war. Auch hier zeigte sich sofort wieder die Strahlung, deren Stärke dem höheren Kaliumgehalt des Sylvins gegenüber dem Hartsalz ungefähr entsprach, jedoch deswegen nicht ganz, weil bei dieser verhältnismäßig geringen Menge die Sättigungsdicke der aktiven Schicht noch nicht erreicht war.

Die Bestimmung des Schwächungskoeffizienten dieser Sylvinstrahlung wurde nun in der Weise ausgeführt, daß bei einem Abstand von 42 cm zwischen Apparatmitte und Mitte der Salzmasse zwischen deren Oberfläche und dem Instrument genügend Raum blieb, um Eisenplatten von  $50 \times 50 \times 0.4 \text{ cm}^3$  einschieben zu können.

\*) K. Bergwitz: Elster und Geitel-Festschrift, S. 585, Braunschweig 1915.

Die Strahlung erwies sich, wie immer bei Absorptionsmessungen dieser Art beobachtet wird, als inhomogen. Die Schwächungskoeffizienten sind in beistehender Tabelle 1 eingetragen, zunächst die direkt an Eisen gemessenen Werte und dann in der folgenden Spalte für Wasser, umgerechnet unter der Voraussetzung der bei  $\gamma$ -Strahlen im weiten Bereich als gültig erwiesenen Konstanz des Quotienten  $(\mu/d)^*$ . Die Strahlung ist von 0 bis 8 mm weicher, von 8 bis 16 mm etwa gleich und über 16 mm Eisen härter als die harte Komponente der Radium-C- $\gamma$ -Strahlung nach Kohlrausch\*\*), der hierfür die Werte  $\mu_{Fe} = 0.356 \text{ cm}^{-1}$ ,  $(\mu/d)_{Fe} = 0.0451$  angibt.

Tabelle 1.

Dicke des Fe-Absorbers cm	$\mu_{Fe}$ $\text{cm}^{-1}$	$(\mu/d)_{Fe}$ $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$
0.0 bis 0.8	1	0.127
0.8 „ 1.6	0.36	0.045
1.6 „ 6.0	0.20	0.025

Wollte man annehmen, daß Radium im Sylvin die Strahlung erzeugt, so müßte der Radiumgehalt des technischen KCl, an der Strahlungsstärke gemessen, rund  $10^{-11}$  g Radium im Gramm betragen und sich leicht durch Aufschluß nachweisen lassen. Die chemische Analyse des benutzten Sylvins, die mir die C. A. F. Kahlbaum A.-G. freundlichst zur Verfügung stellte, lautete „ $\text{NH}_3$  und  $\text{SO}_4$  in Spuren, Fe in Spuren, frei von As. fremden Metallen und Erden“. Zur Radiumanalyse wurden zweimal je 1 kg des benutzten Sylvins gelöst, zum Kochen gebracht, stark salzsauer gemacht und in der Siedehitze eine Bariumfällung vorgenommen, worauf noch einige Stunden gekocht und insgesamt so verfahren wurde, wie derartige Arbeiten im Radiumlaboratorium der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt bei Prüfungen ausgeführt werden. Der abfiltrierte Niederschlag wurde verascht, mit Carbonat aufgeschlossen, mit HCl in Lösung gebracht und zur Emanationsmessung in Kölbchen eingeschmolzen. Der geringe Filtrerrückstand vom Aufschluß (im wesentlichen Kieselsäure und Nickelpuren vom Nickeltiegel) wurde getrocknet und gesondert untersucht. Die Ausgangssubstanz von je 1 kg hätte eine Radiummenge von  $1000 \cdot 10^{-11} = 10^{-8}$  g Radium zum mindesten ergeben müssen. Es fand sich jedoch in den Lösungen und den Filtraten der Bariumfällungen weniger als  $10^{-10}$  g Radium, auf den Filtern noch weniger, so daß alle Gehaltsbestimmungen unter 1% der zu erwartenden Mindestmenge an Radium blieben\*\*\*).

Die Strahlung rührt also nicht vom Radium her.

Sollte es sich um Thoriumstrahlung handeln, so müßten in 1 kg KCl etwa 0.2 g Thorium vorhanden sein, da nach McCoy und Henderson†) 1 g Radium

\*) St. Meyer und E. Schweidler: Radioaktivität, 2. Aufl., S. 151. Leipzig 1927.

\*\*) Dieselben: ebenda, S. 644.

\*\*\*) Herrn Bothe möchte ich auch an dieser Stelle für die Überlassung der Mittel des Radium-Laboratoriums und seine Mühewaltung besonders danken.

†) H. N. McCoy und L. M. Henderson: Journ. Amer. Chem. Soc. **40**, 1316 (1918).

seiner  $\gamma$ -Strahlung nach  $6.85 \cdot 10^6$  g Thor äquivalent ist. Bei den Emanationsmessungen ergaben sich keinerlei Andeutungen, die auch nur auf Spuren von Thoremanation, also Radiothor, hätten schließen lassen, und da das Vorkommen von Mesothor in den unkristallisierten Salzen im höchsten Grade unwahrscheinlich ist, so dürfte auch Thorium als  $\gamma$ -Strahler außer Ansatz bleiben.

Schließlich sind bei den anderen bekannten radioaktiven Elementen (Uran, Ionium, Aktinium) Strahlen von der hier beobachteten Härte bisher nicht gemessen worden, so daß die Herkunft der Strahlen von Gliedern der hochatomigen Zerfallsreihen als praktisch ausgeschlossen gelten kann.

Infolgedessen mußte nunmehr versucht werden, den direkten Nachweis für Kalium als Strahler dadurch zu erbringen, daß die Ionisierungsstärke in ihrem Verhältnis zum Gehalt an Kaliummetall bestimmt wurde. Erweist sich dieser Quotient bei möglichst verschiedenen Kaliumverbindungen dabei als konstant, so ist mit erheblicher Sicherheit auf Kalium als Strahler zu schließen. Denn die noch mögliche Annahme, ein bisher unbekanntes Radiumelement erzeuge die Strahlung, würde in dem vorliegenden Falle nur zu dem Schluß führen, daß dies radioaktive Element in irgendeinem, wahrscheinlich genetischem Zusammenhang mit Kalium stehen müßte. Nach einem solchen Element ist aber bisher vergeblich gesucht worden.

Es werde vorausgesetzt, daß ein unendlich ausgedehntes Medium der Dichte  $d$  in der Volumeneinheit die Menge  $\rho$  der strahlenden Substanz enthalte, deren Strahlen mit dem Absorptionskoeffizienten  $\mu$  von dem Medium absorbiert werden. Dann ist die Strahlungsstärke  $q$  in einem Ionisationszylinder inmitten des Mediums

$$q = 4\pi \mathfrak{K} \cdot \frac{\rho}{\mu},$$

wo unter  $\mathfrak{K}$  ein Zahlenfaktor zu verstehen ist, der nur von der Strahlenart und den instrumentellen Bedingungen abhängt. Dieser ist bei den analogen Messungen mit Radium unter der Bezeichnung Evesche Zahl  $K$  bekannt\*).

Setzt man den Absorptionskoeffizienten proportional der Dichte der absorbierenden Substanz, also  $(\mu/d) = \text{const}$ , was für  $\gamma$ -Strahlen ein und derselben Art zumindest in erster Näherung zulässig ist\*\*), so wird  $q = 4\pi \mathfrak{K} \cdot \frac{\rho/d}{\mu/d}$  oder, da  $\rho/d = G$  den Gehalt des Mediums an strahlender Substanz in g/g bedeutet:

$$q = \frac{4\pi \mathfrak{K}}{\mu/d} \cdot G, \quad \text{also } G = q \cdot \frac{\mu/d}{4\pi \mathfrak{K}} = q \cdot F, \quad F = \frac{\mu/d}{4\pi \mathfrak{K}}.$$

Für eine inhomogene Strahlung, wie sie hier gefunden wurde, läßt sich diese Formel dadurch verallgemeinern, daß man

$$\frac{1}{\mu} = \int_0^{\infty} J(x) \cdot dx$$

\*) A. S. Eve: Phil. Mag. **12**, 189 (1906); **22**, 551 (1911); **27**, 394 (1914).

\*\*) St. Meyer und E. Schweidler: Radioaktivität, 2. Aufl., S. 151. Leipzig 1927.

definiert, wo  $J_{(x)}$  die Strahlungsintensität bei der Absorberdicke  $x$  bedeutet und  $J_{(0)} = 1$  gesetzt ist.

Hiernach tritt an Stelle von  $\mu$  in obigen Formeln  $\bar{\mu}$ , so daß

$$F = \frac{G}{q} = \frac{\bar{\mu}/d}{4\pi\mathfrak{R}}, \quad \mathfrak{R} = \frac{\bar{\mu}/d}{4\pi} \cdot \frac{q}{G}$$

die Werte der oben definierten Konstanten sind.

Um von den besonderen instrumentellen Bedingungen ( $C$  Kapazität,  $V$  nutzbares Luftvolumen) unabhängig zu werden, gibt man die Ionisierungsstärke gewöhnlich in  $J = \text{Ionen cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$  an, setzt also bei Sättigungsstrom  $q = \frac{C \cdot d v}{300 \cdot e V}$ , wobei  $e$  das Elementarquantum und  $d v$  den Voltverlust in der Zeiteinheit bedeuten, so daß schließlich folgt

$$\mathfrak{R} = \frac{\bar{\mu}/d}{4\pi} \cdot \frac{C d v}{300 \cdot e V} \cdot \frac{1}{G}$$

Es erschien am einfachsten, die hierauf bezüglichen Untersuchungen zunächst wieder unter Tage auszuführen. Denn dort ist durch Ausschluß der Höhenstrahlung jede Unsicherheit wegen der Reststrahlungskorrektur der Instrumente unter den verschiedenen Absorptionsbedingungen vermieden. Ferner sind im Bergwerk die bei der geringen Aktivität benötigten großen Substanzmengen und meist auch Salzarten von genügend verschiedenem Kaligehalt viel bequemer als anderswo zur Verfügung. Indessen ist es nicht ganz leicht, zuverlässige Werte für den Kaligehalt der Meßstellen aus der chemischen Analyse zu gewinnen, die ja immer nur den Gehalt einzelner Proben, dagegen nicht wie die Strahlungsmessung ohne weiteres einen mittleren Gehalt ergeben kann. Bei der Auswahl der Meßstellen muß deshalb auf möglichst homogenes und nicht zu geringwertiges Material besonders geachtet werden. Zur Kontrolle können dann später Vergleichsmessungen über Tag an einem einzigen gut analysierten Kalisalz hoher Konzentration dienen, da hochwertige Salze bereits so aktiv sind, daß die genauere Reststrahlungskorrektur nicht mehr von Bedeutung ist.

Zu den Beobachtungen sind drei Strahlungsapparate der früher beschriebenen Konstruktion\*) verwendet worden, deren Ionisationsgefäße sich nach Form und Material unterscheiden. So beträgt das nutzbare Luftvolumen von Nr. 10 und 15 je etwa 2 Liter, von Nr. 14 rund 4 Liter. Das Wandmaterial für Nr. 14 und 15 ist Walzisen von 2.5 mm Dicke, das elektrolytisch verzinkt wurde, während das Ionisationsgefäß von Nr. 10 aus 3 mm starkem Zinkblech besteht, das innen mit 0.9 mm dickem Wolframblech ausgelegt war. Zur chemischen Analyse des Kaliumgehaltes der verschiedenen Salze wurden je fünf etwa gleich große Proben von Boden, Decke und Seitenwänden der einzelnen Meßstellen, also insgesamt 30 Stücke benutzt, welche wahllos entnommen, gemischt und vermahlen als Ausgangsmaterial dienten. Damit dürfte ein einigermaßen zutreffender Mittel-

\*) W. Kolhörster: Phys. Zeitschr. **27**, 62 (1926).

wert für die höherprozentigen Kalisalze gewonnen sein, während für das geringwertige Material die chemische Analyse naturgemäß weniger zuverlässig ist.

In der Tabelle 2 sind die gemessenen Ionisierungsstärken nach Abzug der Reststrahlung der betreffenden Instrumente in  $J\text{ cm}^{-3}\text{ sec}^{-1}$  eingetragen. Dabei gilt als Reststrahlung die im „Großen Festsaal“ des Berlepschschachtes auf der vierten Sohle in 406 m Tiefe bestimmte Ionisierungsstärke nach Korrektur auf den geringen, etwa 0.5% betragenden Kaligehalt dieses jüngeren Steinsalzes.

Zum Nachweis der Konstanz des Quotienten  $F = G/q$  (siehe S. 346) sind die Einzelwerte für jedes Instrument angeführt. Sie zeigen, daß unter wohldefinierten Verhältnissen die gemessene Strahlungsstärke dem atomaren Kaliumgehalt direkt proportional geht (Versuch Nr. 1 bis 6). Aber auch unter ungünstigen Bedingungen, wo z. B. infolge der Schachtanlage (Versuch Nr. 7) die Strahlung nicht allseitig oder, wie bei den Versuchen Nr. 8 bis 10, wegen des geringen Kaliumgehalts der Meßstellen von etwa 1% zu einem exakten Nachweis zu klein war, ist diese Konstanz nahezu erfüllt. Wie empfindlich die Ionisationskammer auf Kaliumstrahlung reagiert, erhellt daraus, daß z. B. der hier angeführte Kieserit (Versuch Nr. 8) zunächst nur aus dem Grunde gemessen wurde, um an einer Stelle Beobachtungen zu machen, die bisher als fast kaliumfrei galt. Erst die neue nach der Strahlungsmessung ausgeführte chemische Analyse bestätigte mit dem Nachweis von 1.4% Kalium den radioaktiven Befund. Schließlich wurden noch gelegentlich anderer Untersuchungen mit den Apparaten 15 und 14 an künstlichem Kaliumsulfat bzw. an Kaliumchlorid Messungen ausgeführt\*).

Zu diesen Versuchen dienten je etwa 14 Tonnen des Ausgangsmaterials, das in Säcken zu einem Würfel gestapelt war, in dessen Mitte die Strahlungsapparate beobachtet werden konnten. Das Ergebnis dieser Messungen über Tag (Versuche Nr. 1 und 2) war in vollkommener Übereinstimmung mit den Beobachtungen im Bergwerk im anstehenden Gestein und ist inzwischen auch mit anderen Strahlungsapparaten bestätigt worden.

Es stellt sich also heraus, daß die an verschiedenen Instrumenten für den zwischen 9 bis 51% schwankendem Gehalt gemessenen Strahlungswerte dem Kaliumgehalt direkt proportional sind und daß selbst noch bei geringwertigen Salzen (bis etwa 1% herab) die Proportionalität ungefähr gewahrt ist.

Die Herkunft der Strahlung von Kalium kann damit wohl als sichergestellt gelten.

Die Ionisationswirkung des Kaliums in den hier benutzten verschiedenen Instrumenten, d. h. der Umsetzungsfaktor  $\mathfrak{R}$ , liegt zwischen 0.273 und 0.316  $J$ . Die Strahlung von 1 g Kalium in 1 cm Abstand von der Mitte des betreffenden Apparats erzeugt also nur 0.27 bis 0.31 Ionen  $\text{cm}^{-3}\text{ sec}^{-1}$ .

Unter denselben Verhältnissen beträgt die Wirkung von 1 g Radium  $K = 5.3$  bis  $6.2 \cdot 10^9 J$ , so daß also die Kaliumstrahlung rund  $5 \cdot 10^{-11}$  mal unwirksamer als die Radiumstrahlung ist (Quotient  $\mathfrak{R}/K$  der Tabelle 2).

---

\*) Herrn Generaldirektor Dr. Feit sowie dem Kaliwerk Aschersleben verdanke ich die Gelegenheit zu diesen Versuchen. Die Untersuchungen an Kaliumchlorid ermöglichte die Kaliforschungsanstalt, Berlin.

Tabelle 2.

Nr.	Salzart	Apparat Nr. 15		Apparat Nr. 14		Apparat Nr. 10	
		K-Gehalt-% (chem. An.)	Ionisierungs- stärke $q$	$F = \frac{G}{q} \cdot 10^2$	Ionisierungs- stärke $q$	$F = \frac{G}{q}$	Ionisierungs- stärke $q$
1	KCl techn.	51.2	—	—	70.2 J	—	—
2	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> techn.	40.6	56.5 J	0.718	—	—	—
3	Sylvinit IV, NaCl · KCl · MgSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	14.3	—	—	—	—	22.8 J
4	Sylvinit II	13.6	18.9 J	0.720	18.8 J	0.724	21.4 J
5	Kainit, K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · MgSO <sub>4</sub> · MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	12.7	17.7 J	0.717	17.4 J	0.730	20.3 J
6	Carnallit III, KCl · MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	9.0	12.5 J	0.720	12.3 J	0.731	14.3 J
Mittel:		$F_{15} \cdot 10^2 = 0.719$	$F_{14} \cdot 10^2 = 0.729$	$F_{10} \cdot 10^2 = 0.629$	$F'_{10} \cdot 10^2 = 0.629$	$F_{10} \cdot 10^2 = 0.629$	$F_{10} \cdot 10^2 = 0.629$
		$\mathcal{R}_{15} = 0.277 J \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$	$\mathcal{R}_{14} = 0.273 J \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$	$\mathcal{R}_{10} = 0.316 J \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$	$\mathcal{R}_{10} = 0.316 J \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$	$\mathcal{R}_{10} = 0.316 J \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$	$\mathcal{R}_{10} = 0.316 J \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$
		$K_{15} = 5.5 \cdot 10^9 J \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$	$K_{14} = 5.3 \cdot 10^9 J \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$	$K_{10} = 6.2 \cdot 10^9 J \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$	$K_{10} = 6.2 \cdot 10^9 J \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$	$K_{10} = 6.2 \cdot 10^9 J \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$	$K_{10} = 6.2 \cdot 10^9 J \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$
		$(\mathcal{R}/K)_{15} = 5.03 \cdot 10^{-11}$	$(\mathcal{R}/K)_{14} = 5.15 \cdot 10^{-11}$	$(\mathcal{R}/K)_{10} = 5.10 \cdot 10^{-11}$			
7	Carnallit IV	8.3	12.2 J	0.741	—	—	13.4 J
8	Kieserit, MgSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	1.4	1.9 J	0.737	1.9 J	0.738	0.637
9	Anhydrit, CaSO <sub>4</sub>	1.0	1.4 J	0.715	1.2 J	0.831	0.625
10	Älteres Steinsalz, NaCl	1.2	—	—	—	—	1.8 J

Tabelle 3.

	Mittlerer Gehalt	Kalium g/g	Berechnetes Radiumäquivalent	Beobachteter Radiumgehalt	Ionisierungsstärke in J			
					4 Liter Nr. 14		2 Liter Nr. 10	
			Kalium	Radium	Kalium	Radium	Kalium	Radium
10 Meilen Erdkruste	0.0258*	1.29 · 10 <sup>-12</sup>	2.3 · 10 <sup>-12</sup> **	1.78	1.63	3.41	2.05	1.90
Granite	0.0399	2 · 10 <sup>-12</sup>	3.1 · 10 <sup>-12</sup>	2.75	2.20	4.95	3.17	2.57
Sandsteine	0.0109	0.55 · 10 <sup>-12</sup>	1.4 · 10 <sup>-12</sup>	0.75	0.99	1.74	0.87	1.17
Kalksteine	0.0027	0.13 · 10 <sup>-12</sup>	0.9 · 10 <sup>-12</sup>	0.19	0.64	0.83	0.21	0.74
Meerwasser	0.345 · 10 <sup>-3</sup> †	17.25 · 10 <sup>-15</sup>	19 · 10 <sup>-15</sup>	0.024	0.013	0.037	0.027	0.016
Höchstwert	0.385 · 10 <sup>-3</sup>	19.25 · 10 <sup>-15</sup>	42 · 10 <sup>-15</sup> ***	0.026	0.030	0.056	0.031	0.035
Niedrigster Wert	0.305 · 10 <sup>-3</sup>	15.25 · 10 <sup>-15</sup>	0	0.021	—	0.021	0.024	—

\*) Clarke u. Washington: U. S. Geol. Survey Profess. Pap. 127. Washington 1927. — \*\*) St. Meyer u. E. Schweidler: Radioaktivität, 2. Aufl. S. 549, Leipzig 1927. — \*\*\*) Dieselben: ebenda S. 566. — †) Kummel, Handb. d. Oceanographie I, 218. Stuttgart 1907

Für die Natur dieser Kaliumstrahlung als Wellenstrahlung spricht ihre hohe Durchdringungsfähigkeit, welche den Radium-C- $\gamma$ -Strahlen gleichkommt, ja diese sogar noch übertrifft. Auch das Verhältnis der Ionisierungsstärke der beiden Strahlenarten läßt sich in diesem Sinne deuten. Nach der Tabelle 2 verhalten sich die aus den maßgeblichen Versuchen berechneten  $\mathfrak{R}$ -Werte  $\left(\mathfrak{R} = \frac{\bar{\mu}/d}{4\pi F}\right)$  für Kalium ebenso wie die Eveschen Zahlen für die Radiumstrahlung der betreffenden Instrumente ( $K$ ). Ihre Quotienten  $\mathfrak{R}/K$  sind nahezu gleich trotz der recht verschiedenen Ionisationsbedingungen, welche die Apparate bieten. Da die Instrumente im gleichen Verhältnis auf die beiden Strahlenarten ansprechen, so sollten Kalium- und Radium- $\gamma$ -Strahlen nicht allzu verschieden ihrem Wesen nach, wahrscheinlich also vom gleichen Charakter sein.

Bisher hat man mangels anderer Unterscheidungsmöglichkeiten derart durchdringende Strahlen ohne weiteres als Wellenstrahlen angesprochen, weil ein solches Verhalten an Korpuskularstrahlen viel schwerer vorstellbar erschien und überhaupt noch nicht beobachtet worden war. Die neuen Ergebnisse über Höhenstrahlung\*) haben aber gezeigt, daß sogar Korpuskularstrahlen von noch viel geringerer Absorbierbarkeit existieren. Es wäre daher wünschenswert, einen direkten Beweis für die Wellennatur der Kaliumstrahlung zu haben, ebenso wie die stark durchdringenden Strahlen der bereits bekannten Radioelemente daraufhin nachzuprüfen wären.

Wegen der geringen Strahlungsintensität könnte man hierzu an die Beobachtung diskreter Strahlen denken, etwa an Aufnahmen mit Wilsonkammer unter gleichzeitiger magnetischer Ablenkung, wie sie Skobelzyn\*\*) ausgeführt hat. Experimentell einfacher dürfte ein Verfahren sein, mit welchem Bothe und Kolhörster\*\*\*) einige Versuche an der Radium-C- $\gamma$ -Strahlung gemacht haben. Läßt man nämlich  $\gamma$ -Strahlen eines Radiumpräparats auf zwei hintereinandergestellte Geiger-Müllersche Zählrohre †) fallen, so beobachtet man unter den einzelnen Stromstößen auch solche, die gleichzeitig erfolgen. Diese Koinzidenzen rühren von den Sekundärelektronen, nicht von der primären  $\gamma$ -Strahlung her. Denn schaltet man Metallfolien zwischen die beiden Zählrohre, so nimmt die Koinzidenzenzahl entsprechend der Absorption der Sekundärelektronen in solcher Weise ab, wie sie von den Ionisationsmessungen her schon bekannt ist. Vor den Zählrohren absorbieren dieselben, verhältnismäßig dünnen Folien nur einen ganz geringen Bruchteil der primären  $\gamma$ -Strahlung, was sich in der Zahl der Koinzidenzen nicht bemerkbar macht. Bei  $\gamma$ -Strahlen ergibt sich also ein ganz erheblicher Unterschied in dem Absorptionsvermögen ein und derselben Metallfolie, je nachdem sie vor oder zwischen die Zähler geschaltet wird.

\*) W. Bothe und W. Kolhörster: Zeitschr. f. Phys. **56**, 751 (1929); D. Skobelzyn: ebenda **54**, 686 (1929).

\*\*) D. Skobelzyn: ebenda **54**, 686 (1929).

\*\*\*) W. Bothe und W. Kolhörster: ebenda **56**, 751 (1929).

†) H. Geiger und W. Müller: Phys. Zeitschr. **29**, 839 (1928); **30**, 489 (1929).

Ist dagegen die Primärstrahlung eine hochgeschwinde  $\beta$ -Strahlung, so sollte die Absorbierbarkeit derselben Folie vor oder zwischen den Zählrohren nicht so wesentlich verschieden sein. Versuche nach dieser Methode konnten mit den bisher verfügbaren Mitteln noch nicht durchgeführt werden, sie würden auch eine eigene, recht langwierige Arbeit erfordern.

Aus den experimentell bestimmten Absorptionskoeffizienten der Kaliumstrahlung läßt sich größenordnungsmäßig eine Wellenlänge schätzen, die zwischen 10 bis 30 X-Einheiten liegen dürfte.

Der hier gefundenen Kaliumstrahlung kommt deswegen eine allgemeinere Bedeutung zu, weil es sich wahrscheinlich um eine Kernstrahlung handelt aus Gründen, wie sie für die ihr ähnliche harte Komponente der Radium-C- $\gamma$ -Strahlung geltend gemacht werden\*). Danach könnte man weiter vermuten, daß diese  $\gamma$ -Strahlung von den  $\beta$ -Strahlen im Atomkern des Kaliums ausgelöst wird, damit wäre ein neuer Hinweis auf die Kalium- $\beta$ -Strahlung als Kernemission gegeben. Gerade diese Frage hat besondere Schwierigkeiten bei der Erklärung der Aktivität der Alkalien gemacht. Müßte sich doch, ebenso wie bei den hochatomigen Radiosubstanzen, nach den Verschiebungsregeln Kalium von der Atomnummer 19 durch den Verlust eines Kern- $\beta$ -Teilchens in ein Element der Atomnummer 20, also in ein Calciumisotop umwandeln. Indessen sind alle bisherigen Untersuchungen, die eine sichere Entscheidung in dieser Frage durch den Nachweis eines Umwandlungsprodukts erbringen wollten, stets negativ ausgefallen. Man könnte dies vielleicht mit den nicht besonders günstigen Verhältnissen bei der chemischen Analyse erklären. Denn selbst, wenn man geologische Zeiten zu Hilfe nähme und nach dem Vorschlage von Lachs\*\* bzw. Meyer-Schweidler\*\*\*) bei Calcium aus geologisch sehr alten Kalilagern ein anderes Atomgewicht erwarten kann, als Calcium aus kalifreiem Vorkommen aufweist, so wären die Aussichten für eine praktische Ausführung einer derartigen chemischen Untersuchung nach Hahn und Rothenbach †) doch sehr gering.

Mit dem Massenspektrographen wären eher positive Ergebnisse zu erwarten, denn bei dem Übergang von Kalium 41 auf Calcium 41 würde die seit Verfestigung der Erdkruste gebildete maximale Menge von Calcium 41 etwa 1% betragen, die nachweisbar sein sollte ††). Indessen hat Aston †††) für die Atomgewichte bisher nur die Isotopen 39 und 41 für Kalium, für Calcium 40 und 44, aber kein gemeinsames Isotop gefunden.

---

\*) K. W. F. Kohlrausch: Radioaktivität, S. 20. Leipzig 1928.

\*\* H. Lachs: Chem. Centralbl. **1**, 872 (1916).

\*\*\*) Stefan Meyer und E. Schweidler: Radioaktivität, 1. Aufl., S. 429. Leipzig 1916.

†) O. Hahn und M. Rothenbach: Phys. Zeitschr. **20**, 194 (1919). Man vergleiche hierzu: A. V. Frost und O. Frost: Nature **125**, 48 (1930); A. Holms und R. W. Lawson: ebenda **125**, 48 (1930); O. Hönigschmid: ebenda **125**, 91 (1930).

††) G. v. Hevesy: Nature **120**, 838 (1927).

†††) F. W. Aston. Phil. Mag. **45**, 944 (1923).

Wegen der unbefriedigenden Ergebnisse der experimentellen Arbeiten griff man daher immer wieder auf Überlegungen über die Kernstruktur zurück.

Die Ansicht, das hohe Atomvolumen der Alkalien für ihre Aktivität verantwortlich zu machen\*), also die Ring- nicht Kernelektronen als Ausgang der  $\beta$ -Strahlung zu betrachten, sei erwähnt, ebenso die Annahme der sogenannten Tauchbahnen der Elektronen (sehr exzentrische Bahnen, die bis dicht an den Kern heranführen und dann eine Wechselwirkung mit den Kernelektronen gestatten\*\*). Dadurch wäre die sonst notwendige Bildung eines Calciumisotops umgangen. An Hand des Rutherford'schen Kernmodells haben schon recht früh Swinne und Kossel\*\*\*) auf folgendes aufmerksam gemacht: Denkt man sich die Atomkerne der Elemente aus Heliumkernen aufgebaut, so würden die ersten Kernelektronen etwa vom Atomgewicht 40 an auftreten, also an einer Stelle, wo Kalium als erster  $\beta$ -Strahler erscheint. Auch die Neigung zur Stufenbildung in der Zahl der Kernelektronen (aus der Beziehung zum Atomgewicht) wird bereits von Kossel hervorgehoben.

Unter Hinweis auf die ausführlichen Erörterungen bei Kohlrausch, Radioaktivität, Leipzig 1928, Kapitel X, „Der Atomkern“, seien daher hier nur die letzten Ergebnisse skizziert. So hat G. Beck†) nachgewiesen, daß für Elemente, die keine freien Protonen enthalten (Atomgewicht 4 n), Elektronen nur paarweise vorhanden sind und daß ihre Paarzahl vom Atomgewicht stufenweise abhängt. Hierauf gründete dann Gamow††) die Ansicht, daß selbst ein stabiler Kern an solchen Stufenstellen zwei Elektronen verlieren kann, womit die Kalium- $\beta$ -Aktivität als Kernemission verständlich erscheinen würde.

Im Verlauf solcher Untersuchungen setzte sich dann immer mehr die Ansicht durch, daß nicht K 39, sondern sein höheres Isotop aktiv sein müsse†††). Der Nachweis hierfür ist vor kurzem von Hevesy und Lögstrup§) im Verein mit Biltz und Ziegert§§) gelungen. Die beiden ersten Autoren konnten ein Kaliumpräparat herstellen, in welchem nach Ausweis der Atomgewichtsbestimmung, die von Hönigschmidt und Goubeau vorgenommen wurde, das schwere Isotop um etwa 4.8% angereichert war. Die darauf von Biltz und Ziegert ausgeführten Messungen der  $\beta$ -Aktivität dieses Präparats ergaben, daß es tatsächlich um 4.2% stärker strahlte als gewöhnliches Kalium, so daß nur das Isotop K 41 als aktiv angenommen werden kann. Damit ist auch ohne Nachweis eines Folgeprodukts mit großer Wahrscheinlichkeit die Kalium- $\beta$ -Aktivität

\*) St. Meyer und E. Schweidler: Radioaktivität. 1. Aufl., S. 429 (1916).

\*\*) S. Rosseland: Zeitschr. f. Phys. **14**, 173 (1923); F. H. Loring: Nature **117**, 448 (1926).

\*\*\*) W. Kossel: Phys. Zeitschr. **20**, 265 (1919). Dort Hinweis auf Swinne.

†) G. Beck: Zeitschr. f. Phys. **47**, 407 (1928); **50**, 548 (1928).

††) G. Gamow: Phys. Zeitschr. **30**, 718 (1929).

†††) W. Kossel: ebenda **20**, 265 (1919); W. D. Harkins: Proc. Nat. Acad. Soc. **11**, 630 (1925); A. Holmes und R. W. Lawson: Phil. Mag. **2**, 1218 (1926).

§) G. v. Hevesy: Nature **120**, 838 (1927).

§§) M. Biltz und H. Ziegert: Phys. Zeitschr. **29**, 197 (1928).

als Kernemission festgestellt, und es erhebt sich nunmehr die Frage, ob nicht die hier gefundene  $\gamma$ -Aktivität ebenfalls nur K 41 zukommt. Die Versuche würden sich wahrscheinlich in ähnlicher Weise durchführen lassen, jedoch dürfte infolge der viel geringeren  $\gamma$ -Aktivität manche Schwierigkeit zu erwarten sein, die bei den zurzeit verfügbaren Mengen von K 41 kaum eine andere als die Zählmethode überwinden kann.

Wenn also in Analogie mit der  $\beta$ -Aktivität von K 41 auch die  $\gamma$ -Strahlen allein von K 41 ausgehen sollten, dann wäre die hier bestimmte Aktivität für K 39.1 nur 5% der wirklichen des K 41, da K 41 zu 5%, K 39 zu 95% im gewöhnlichen Mischelement K 39.1 vorkommt. Die äquivalente Radiummenge wäre, auf K 41 bezogen,  $\mathfrak{R} 41/K = 9.5 \cdot 10^{-10}$ , während für  $\mathfrak{R} 39.1/K = 5 \cdot 10^{-11}$  ermittelt wurde.

Dann wäre auch der Unterschied zwischen der Aktivität der hochatomigen Elemente Uran und Thor und der sonst so viel kleineren der Alkalien schon nicht mehr so beträchtlich, und wenn man zudem berücksichtigt, daß Kalium nicht nur eine  $\beta$ -, sondern auch eine  $\gamma$ -Kernstrahlung aussendet, so ist die Analogie zwischen Kalium und den hochatomigen Radiumelementen doch schon so viel enger geworden, daß man die früher gemachte Differenzierung im Wesen der Aktivität von leicht- und hochatomigen Elementen kaum mehr aufrecht erhalten wird.

In diesem Zusammenhange ist noch auf Folgendes hinzuweisen: Heliumgehaltsbestimmungen verschiedener Salzarten, wie sie von Strutt\*) ausgeführt worden sind (die erste Spalte der folgenden Übersicht), haben zu der Vermutung geführt, daß vielleicht Kalium an diesem Heliumvorkommen irgendwie beteiligt sein könnte. Einer solchen Annahme widersprach jedoch völlig das Fehlen einer  $\alpha$ -Strahlung bei Kalium. Indessen hat Kirsch\*\*) gezeigt — Spalte 2 und 3 —, daß das Verhältnis Helium : Uran in sehr weiten Grenzen von 0.3 bis 256 schwankt, also die Uranradium- $\alpha$ -Strahler nur von untergeordneter Bedeutung für das Heliumvorkommen sein können.

Wenn man überlegt, wie außerordentlich schwach die Kalium- $\gamma$ -Aktivität gegenüber der  $\gamma$ -Wirkung von Radium ist, so könnte man Entsprechendes auch bei einer  $\alpha$ -Strahlung des Kaliums erwarten. Bildet man daher das Helium-Kaliumverhältnis bei hochprozentigen Kalisalzen — Spalte 4 —, so ergibt sich eine überraschende Konstanz ( $1.05$  bis  $1.07 \cdot 10^{-5}$ ) und berechnet man hieraus sowie aus dem Heliumvorkommen den Kaliumgehalt von Steinsalz bzw. Kieserit — Spalte 5 —, so kommt man auf Zahlen, die den tatsächlichen Verhältnissen durchaus entsprechen. Daß, soweit mir bekannt, hierauf noch nicht hingewiesen wurde, mag seine Erklärung darin finden, daß Steinsalz und Kieserit wohl meist als völlig kalifreie Mineralien angesprochen werden, und daß das Heliumvorkommen in Gesteinen allen möglichen Zufälligkeiten unterworfen sein kann. [Man vgl. hierzu z. B. G. Kirsch\*\*).]

\*) R. I. Strutt: Proc. Roy. Soc. London (A) **81**, 278 (1908).

\*\*\*) G. Kirsch: Geologie und Radioaktivität, S. 190. Wien und Berlin 1928.

Aus letzterem Grunde wird man den hier dargelegten Verhältnissen zunächst nur soviel Gewicht beilegen können, daß sie zu einer Untersuchung von Kalium auf  $\alpha$ -Aktivität ermutigen. Dazu wären weitere Heliumgehaltsbestimmungen an analysierten Kaliumsalzen verschiedenster Konzentration auszuführen und vielleicht auch ein direkter Nachweis zu versuchen. Eine  $\alpha$ -Strahlung von schätzungsweise einigen  $\alpha$ -Teilchen in der Sekunde von 1 g Kalium dürfte neben der  $\beta$ -Strahlung allerdings nur sehr schwer nachzuweisen sein. Sie wäre aber vielleicht noch gerade mit dem Geigerschen  $\alpha$ -Strahlenzähler zu fassen.

Salzart	$\frac{\text{mm}^3 \text{ He}}{100 \text{ g Mineral}}$	$\frac{\text{g U}_3\text{O}_8}{100 \text{ g Mineral}}$	$\frac{\text{cm}^3 \text{ He}}{\text{g U}_3\text{O}_8}$	Mittl. Kaligehalt $\frac{\text{cm}^3 \text{ He}}{100 \text{ g Mineral}}$	$\frac{\text{cm}^3 \text{ He}}{\text{g K}}$
Steinsalz, NaCl . . . . .	0.0233	$7 \cdot 10^{-6}$	3.3	2.2 errechnet	
Sylvin, KCl . . . . .	0.55	$2.15 \cdot 10^{-6}$	256	52.3	$1.05 \cdot 10^{-5}$
Carnallit, KClMgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.151	$3.23 \cdot 10^{-6}$	47	14.1	$1.07 \cdot 10^{-5}$
Kieserit, MgSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O . . .	0.0179	$6.47 \cdot 10^{-5}$	0.277	1.8 errechnet	

Trotz ihrer verhältnismäßig geringen Strahlungsstärke werden die Kalisalze wegen ihrer relativ hohen Konzentration und allgemeinen Verbreitung zu einem wichtigen geophysikalischen Faktor für den Ionisationshaushalt, da Kalium ja selbst gesteinsbildend in der Erdkruste auftritt.

Über die Ionisierungsstärke in Kaligesteinen gab Tabelle 2 bereits Aufschluß. Man kann bei 1% Kaligehalt und allseitiger Strahlung aus sattdicker Schicht mit 1.4 bis 1.6 *J* rechnen, je nach Art des verwendeten Instruments. Aber auch sonst ist Kalium in einer Verbreitung von  $10^{-2}$  bis  $10^{-4}$  g/g an der Erdoberfläche anzutreffen, so daß es sich lohnt, die Wirkung kalihaltiger mit denen radiumhaltiger Substanzen auf Strahlungsapparate für bestimmte Fälle zu vergleichen, worüber die Tabelle 3 unterrichtet.

In dieser sind Angaben über den mittleren Kalium- und Radiumgehalt der 10-Meilen-Erdkruste und des Meerwassers von der Oberfläche zusammengestellt und zur Kennzeichnung der Extremwerte auch für einige Gesteinsarten angeführt.

Zunächst ergibt sich, daß die aus dem Kaligehalt mit dem Faktor  $5 \cdot 10^{-11}$  berechnete äquivalente Radiummenge der Größenordnung nach mit dem experimentell ermittelten Radiumgehalt ungefähr übereinstimmt. Ferner ist in der

Tabelle 3 die Ionisationswirkung beider Elemente aus  $J = \frac{2 \pi \cdot R \cdot G}{\mu/d}$  für ein

4- und 2-Liter-Instrument mit den experimentell für beide bestimmten Konstanten berechnet. Dabei wird angenommen, daß die strahlende Substanz vom Gehalt *G* aus einem halb unendlich strahlenden Raum auf die an ihrer Oberfläche beobachteten Strahlungsapparate unmittelbar wirkt. Hieraus läßt sich dann für andere Fälle die Strahlungsintensität ableiten, z. B. wenn der Apparat in bestimmtem Abstand von der Begrenzungsfläche aufgestellt ist oder allseitig bestrahlt wird\*). Die Zahlenangaben können natürlich nur zur ersten Orientierung

\*) Stefan Meyer und E. Schweidler: Radioaktivität, 2. Aufl., S. 82 und 602. Leipzig 1927.

dienen, da der ganzen Sachlage nach die Verhältnisse von Fall zu Fall viel zu verschieden liegen.

Auch aus diesen für bestimmte Instrumente, also spezielle Fälle, berechneten Werten geht hervor, daß der Kaligehalt des Erdbodens ungefähr dieselbe Ionisationswirkung wie sein Radiumgehalt liefert, während über dem Meere die Kaliumstrahlung überwiegt oder in Landferne sogar ganz allein wirksam ist. Allerdings werden bei Beobachtungen über See die wenigen Hundertstel Ionen meist ohne Bedeutung sein. Sie können aber bei Reststrahlungsmessungen im Meere eine Rolle spielen, weil beim Versenken, also bei allseitiger Bestrahlung, die doppelten Beträge zu erwarten sind.

Für die Ionisierung über festem Boden erscheinen die hier gegebenen Werte der Tabelle 3 vielleicht deswegen etwas hoch, weil sich die Gehaltsangaben, nach denen sie berechnet sind, auf frische, unverwitterte Gesteine beziehen dürften. Diesen gegenüber sind jedenfalls die obersten Bodenschichten, die bei Erdstrahlungsmessungen wegen der Absorption überwiegen, viel ärmer an Kalium und Radium. Jedoch fehlen im allgemeinen Anhaltspunkte darüber, wie man dem Verwitterungsfaktor genauer Rechnung tragen könnte, ohne immer wieder nur Schätzungen zu bringen. Zu einer einigermaßen gesicherten Ionisierungsbilanz sind sowieso die Angaben über die Wirkungen der anderen aktiven Substanzen, insbesondere von Thorium und Uran, aber auch von Ionium und Aktinium zurzeit noch immer zu unbestimmt. So liegen z. B. analoge Messungen des Ionisierungsvermögens der  $\gamma$ -Strahlen (Ermittlung der  $K$ -Werte) noch nicht einmal für Thorium und Uranium vor, obwohl doch bei ihnen keinerlei Unsicherheiten (z. B. bezüglich der Reindarstellung) wie bei Aktinium und Ionium mehr bestehen. Bisher schätzte man den Betrag der Thorium- und Uraniumionisation etwa von gleicher Größe wie den der Radium- und damit der Kaliumionisation auf Grund der mittleren Gehaltsangaben.

Um wenigstens ein Bild von den in Betracht kommenden Zahlen zu geben, sei die folgende kleine Übersicht angeführt, obwohl deren Werte zum Teil kaum der Größenordnung nach als sicher zu betrachten sind. Sie weisen wohl besonders deutlich auf die Notwendigkeit exakter Bestimmungen bei Thorium und Uran hin.

	K	Th	U	Ra
Granite . . . . .	0.04	$2 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-12}$ g/g
Meerwasser . . . . .	$0.35 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$20 \cdot 10^{-15}$ „

Nach diesen Schätzungen sollten also die Erdstrahlungswerte ungefähr zu je ein Viertel von den hier angeführten Elementen herrühren, wobei man noch die Aktinium- und Ioniumionisation vernachlässigt. Wenn daher mit dem 4- oder 2-Liter-Instrument bei Abschirmung mit 13.5 cm Eisen direkt über Gartenerde (Sandboden) 1.42 bzw. 1.62  $J$  bestimmt wurden, so wären ungefähr je 0.36 bzw. 0.40  $J$  jedem der vier Ionisatoren zuzuschreiben.

Man sieht, daß diese Zahlenwerte zwischen denen für Sand- und Kalkstein berechneten der Tabelle 3 liegen, was durchaus plausibel bei den norddeutschen

Sandböden erscheint. Bei Gesteinsböden sind natürlich vielfach höhere Erdstrahlungswerte gemessen, aber auch solche sind mit den hier gegebenen Zahlen verträglich; sie werden teilweise überhaupt erst durch die bisher unbeachtete Wirkung der Kaliumkomponente verständlich. So erklärt sich beispielsweise, zumindest qualitativ, die früher vielfach allein als Sekundärstrahlung gedeutete Differenz zwischen gemessenen und berechneten Erdstrahlungswerten.

Die bodennahen Luftschichten werden von der Kaliumstrahlung etwa in demselben Betrage ionisiert wie von der Radiumstrahlung. Wegen ihres höheren Durchdringungsvermögens reicht jedoch deren Ionisationswirkung höher hinauf — etwa doppelt so hoch — als die von Radium. Damit dürfte zusammenhängen, daß bei Messungen in Luftfahrzeugen die Abnahme der Erdstrahlung meist geringer gefunden wurde, als sie nach der Absorbierbarkeit der Radium- bzw. Thorium- $\gamma$ -Strahlen allein zu erwarten ist.

Tabelle 4.

Prozente des Bodenwertes . . .	100 %	50 %	20 %	10 %	5 %	1 %
Bodenwert über Festland . . .	2 J	1 J	0.4 J	0.2 J	0.1 J	0.02 J
Bodenwerte über dem Meere . .	0.025 J	0.012 J	—	—	—	—
$h$ Radium- $\gamma$ -Strahlung . . . . .	0 m	60 m	170 m	280 m	390 m	650 m
$h$ Kalium- $\gamma$ -Strahlung . . . . .	0 m	140 m	420 m	670 m	940 m	1580 m
$\Phi$ ( $\mu' h$ ) . . . . .	1.00	0.50	0.20	0.10	0.05	0.01
( $\mu' h$ ) . . . . .	0	0.27	0.80	1.28	1.78	3.00

Über die hier obwaltenden Verhältnisse gibt Tabelle 4 einen Überblick. In ihr sind die Höhen angeführt, in welchen die Radium- bzw. Kaliumstrahlen auf bestimmte Prozente ihres Bodenwertes geschwächt auftreten.

Sei  $q_{(0)} = \frac{2\pi \cdot K}{\mu' d} \cdot G$  die Ionisierungsstärke in einem auf dem ebenen Erdboden aufgesetzten Strahlungsapparat (siehe S. 345), so beträgt in der Höhe  $h$  in demselben Instrument die Ionisierungsstärke  $q_{(h)} = q_{(0)} \cdot \Phi(\mu' h)^*$ , wenn  $\mu'$  den Absorptionskoeffizienten der betreffenden  $\gamma$ -Strahlung in Luft von Atmosphärendruck bedeutet und  $\Phi(\mu' h) = e^{-\mu' h} + (\mu' h) \cdot Ei(-\mu' h)$  die aus Absorptionsproblemen her bekannte Funktion ist\*\*).

Dann ergeben sich für Werte zwischen 0.01 und 1 von  $\Phi(\mu' h) = \frac{q_{(h)}}{q_{(0)}}$  aus den Tabellen\*\*) die zugehörigen ( $\mu' h$ ) und mit  $\mu'_{\text{Ra}} = 4.6 \cdot 10^{-5}$ \*\*\*) bzw.  $\mu'_{\text{K}} = 1.9 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$  die angeführten Höhen. Die Änderung des Absorptionskoeffizienten mit abnehmender Luftdichte bei wachsender Höhe würde die Höhen vergrößern. Da diese Korrektur hier unter 10% bleibt, ist sie bei der Schätzung nicht berücksichtigt worden.

\*) L. v. King: Phil. Mag. **23**, 242 (1912).

\*\*) Tabelliert, z. B. bei St. Meyer und E. Schweidler: Radioaktivität, 2. Aufl., S. 625 (1927); man vgl. Niels Nielsen: Theorie des Integrallogarithmus. Leipzig 1906.

\*\*\*) V. F. Hess: Wiener Ber. **120**, 1205 (1911).

Man sieht, daß über Festland die Kaliumstrahlung bei einem Bodenwert von  $2J$  noch im ersten Höhenkilometer wirkt, während die Radiumstrahlung bereits in 400 m auf denselben Betrag ( $0.1J$ ) geschwächt ist. Diese gegenüber der Annahme reiner Radiumstrahlung verzögerte Abnahme der Erdstrahlung stimmt durchaus mit den Ballonbeobachtungen über Festland überein\*). Bei Messungen in Luftfahrzeugen über See dagegen kommen, wie man sieht, die aktiven Substanzen des Meeres nicht in Betracht.

Eine experimentelle Bestätigung für die Unterschiede in der Wirkung der Erdstrahlung über Festland und See wurde soeben von Běhounek\*\*) erbracht. Er findet für eine mittlere Höhe von rund 500 m eine Differenz zwischen Land- und Seewerten von  $0,5J$  in guter Übereinstimmung mit den hier gegebenen Schätzungen. In Anbetracht der geringen Reishöhe von Luftschiffen erfordern diese Verhältnisse also Beachtung.

Über die Wärmeentwicklung der Kalium- $\gamma$ -Strahlung lassen sich vorerst nur folgende rohe Angaben machen, indem man von ihrem Radiumäquivalent ( $5 \cdot 10^{-11}$ ) ausgeht. Die  $\gamma$ -Strahlen von 1 g Radium + Ra B + Ra C erzeugen 9.5 cal/Stunden\*\*\*). Die ihnen etwa gleichen Kalium- $\gamma$ -Strahlen würden entsprechend  $9.5 \cdot 5 \cdot 10^{-11} = 4.75 \cdot 10^{-10}$  cal/Stunden =  $4.16 \cdot 10^{-6}$  cal/Jahr für 1 g zu liefern vermögen. Die Wärmeentwicklung von 1 g Kalium durch seine  $\beta$ -Strahlung beträgt dagegen nach Holmes und Lawson†)  $1.24 \cdot 10^{-4}$  cal/Jahr, ist also rund 30 mal größer als die Wärmeentwicklung durch Kalium- $\gamma$ -Strahlung. Die Energie der  $\gamma$ -Strahlung des Kaliums würde mithin nur 3% der Energie seiner  $\beta$ -Strahlung betragen. Vergleicht man damit die Verhältnisse bei ausgesprochenen  $\beta$ -Strahlern der hochatomigen Radioelemente, wie z. B. Radium D und Radium E, deren  $\gamma$ -Wirkungen zwischen 17 bis 35% ††) bzw. unter  $3\%_{\infty}$  †††) der  $\beta$ -Wirkung liegen, so hat dieser Befund nichts Auffälliges.

Man kann ungezwungen annehmen, daß die nach der Aussendung des  $\beta$ -Strahles im Kern notwendig werdende Umgruppierung nur geringfügig ist, was ja auch durch andere Überlegungen beim Kaliumatom (z. B. Stufenstelle) nahegelegt wird, so daß nur wenig Energie in Form einer Kern- $\gamma$ -Strahlung nach außen abgegeben zu werden braucht. Ob hiermit allerdings die hohe Durchdringungsfähigkeit des einzelnen Kalium- $\gamma$ -Strahles zu vereinbaren ist, läßt sich noch nicht recht entscheiden, so daß man zu mancherlei Spekulationen (z. B. in Analogie mit Ra D und Ra E zur Annahme zweier  $\beta$ -Strahler bei Kalium) verleitet werden könnte. Indessen sind bei dem heutigen Stande unserer Kenntnisse vom Atomkern solche Spekulationen wohl doch noch nicht angebracht.

---

\*) W. Kolhörster: Die durchdringende Strahlung in der Atmosphäre. Hamburg 1924.

\*\*\*) F. Běhounek: Terr. Magn. u. Atm. El. **34**, 173 (1929).

\*\*\*) St. Meyer und E. Schweidler: Radioaktivität, 2. Aufl., S. 228. Leipzig 1927.

†) A. Holmes und R. W. Lawson: Phil. Mag. **2**, 1218 (1926).

††) J. Szmids: Phil. Mag. **28**, 527 (1914).

†††) E. Rutherford und H. Richardson: Phil. Mag. **26**, 324 (1913).

Die Schätzungen von Holmes und Lawson\*) beruhen auf der experimentell der Größenordnung nach gesicherten Halbwertszeit  $T_{K39} = 1.5 \cdot 10^{12}$  Jahre und dem Vergleich der  $\beta$ -Strahlung mit der des Urans. Aus der  $\gamma$ -Strahlung im Vergleich mit Radium würde, mit den hier ermittelten Konstanten entsprechend bestimmt,  $T_{K39}$  etwa  $10^{14}$  Jahre betragen bzw.  $T_{K41}$  etwa  $5 \cdot 10^{12}$  Jahre.

Um ein einigermaßen vergleichbares Bild zu gewinnen, in welchem Maße die Kalium- $\gamma$ -Strahlung zur Erdwärme beiträgt, muß man wegen der hohen Konzentrationsunterschiede im Kalium- und Radiumvorkommen die in 1 g Erdsubstanz von beiden Strahlenarten entwickelte Wärmemenge vergleichen. Mit den früher in der Tabelle 3 angeführten Werten für den mittleren Radium- und Kaliumgehalt der „10-Meilen-Erdkruste“ ergibt sich für Radium eine Wärmemenge von  $1.9 \cdot 10^{-7}$  cal/Jahr, für Kalium von  $1 \cdot 10^{-7}$  cal/Jahr in 1 g Erde, oder rund 50% der Radiumwirkung. Im Seewasser würden etwa  $1.4 \cdot 10^{-9}$  cal/Jahr von der Kalium- $\gamma$ -Strahlung erzeugt. Die Zahlen sind mit dem Äquivalent  $5 \cdot 10^{-11}$  berechnet.

Auf die Bedeutung der Kaliumstrahlung für Zwecke der praktischen Geologie sei hier noch kurz hingewiesen. Man hat vor einiger Zeit begonnen, zu Mutungs- und damit zusammenhängenden Fragen sogenannte radioaktive Profile nach der  $\gamma$ -Strahlenmethode aufzunehmen. Da man bei ihrer Deutung die hier gefundene Kalium- $\gamma$ -Strahlung naturgemäß noch nicht in Erwägung ziehen konnte, so bedürfen die seinerzeit aus ihnen abgeleiteten Schlüsse einer entsprechenden Korrektur. Sie könnten ferner, sobald man Anhaltspunkte für die von den Kaliumsalzen hervorgerufene Intensität hat, für kulturchemische Zwecke der Landwirtschaft von Bedeutung werden, da sie Unterlagen für den Gehalt des Ackerbodens an Kalisalzen, mithin für seine Ertragsfähigkeit zu geben vermögen. Auch wäre im Zusammenhang hiermit die Kaliumaktivität in bezug auf ihre pflanzenphysiologische Wirkung weiter zu studieren, für welche vielleicht die Kaliumstrahlung geradezu spezifisch ist. Schließlich bietet die  $\gamma$ -Strahlenmessung die Möglichkeit einer neuen Analysenmethode zur Ermittlung des Kaliumgehalts beliebiger Kaliprodukte. Gegenüber der chemischen Analyse, die sich immer nur auf die Untersuchung einer beschränkten Anzahl einzelner Proben beziehen kann, bietet sie den Vorteil, ohne weiteres einen über eine verhältnismäßig große Masse sich erstreckenden Mittelwert allein aus einer einzigen Analyse zu gewinnen. Für bergbautechnische Fragen, insbesondere für die Untersuchung der Abbauwürdigkeit von Kalilagern, wird die Methode bei dem reichlichen Kalivorkommen in Deutschland allerdings weniger Bedeutung haben als in der kaliverarbeitenden Industrie, wo seit langem nach einem solchen Verfahren ein Bedürfnis vorhanden ist.

Die Untersuchungen sind mit Mitteln der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Charlottenburg, ausgeführt worden, wofür auch an dieser Stelle aufrichtig gedankt sei.

\*) A. Holmes und R. W. Lawson: Phil. Mag. 2, 1218 (1926).