

Schwankungen der Konzentration und des Verhältnisses der Radon- und Thoronabkömmlinge in der Luft nach Messungen in den Nordalpen

Von REINHOLD REITER *

(Z. Naturforsch. 12 a, 720—731 [1957]; eingegangen am 20. Mai 1957)

Vom 24. April 1956 bis 6. April 1957 wurden in einem nord-südlich orientierten Tal der Nordalpen (675 m NN, Loisachtal) insgesamt 672 Relativmessungen der natürlichen Radioaktivität der Luft bzw. des Aerosols ausgeführt.

Es ergab sich eine enge Beziehung zwischen Radioaktivität am Meßort und Richtung der mittleren Höhenströmung über den Alpen. Erhöhte Radioaktivität herrscht stets bei südlichen Höhenströmungen. Die Strömungsrichtung im Tal ist ohne systematischen Einfluß. Durch thermische Konvektion wird jedoch der Zustrom hoch radioaktiver Luft aus der Höhe in die Täler begünstigt.

Der Einfluß der Jahreszeiten und Tagesgänge wurde untersucht, und dabei nach Aktivität aus der Radium- und aus der Thoriumreihe unterschieden. Der Einfluß der Bodenbedeckung mit Schnee und Eis auf den Gehalt der Luft an Thoronabkömmlingen ist sehr groß. Das Verhältnis Radonfolgeprodukte/Thoronfolgeprodukte korrespondiert im Sommer mit dem Verhältnis Uran/Thorium im Herkunftsbereich der Luftströmung.

Es besteht kein störender Einfluß der Windgeschwindigkeit und der relativen Feuchtigkeit am Meßort auf die ermittelten Radioaktivitätswerte. Bei Druckfall steigt die Radioaktivität an. Hauptursache ist nicht der Zustrom von Bodenexhalationen, sondern eine gleichzeitige Drehung des Höhenwindes auf südliche Richtungen.

Die angewendete Aktivierungsmethode wurde an die Filtermethode angeschlossen. Die sich hieraus ergebenden absoluten Gehalte der Luft an radioaktiven Stoffen stehen in Übereinstimmung mit anderen Messungen. Im Gegensatz zur Aktivierungsmethode zeigt die Filtermethode bei der Messung junger radioaktiver Aerosole ein Defizit, das auf einem Nachlassen des Filterwirkungsgrades beruhen dürfte.

Der Einfluß der schwankenden natürlichen Luftradioaktivität auf die Ionisation von 700—3000 m NN wird an Hand der luftelektrischen Registrierungen von 7 Stationen während 8 Monaten diskutiert.

Eine frühere Untersuchung¹, welche in 2600 m auf dem Zugspitzplatt während 5 Sommerwochen ausgeführt worden war, ergab, daß eine eindeutige Beziehung zwischen Windrichtung auf der Zugspitze und natürlicher Radioaktivität der Luft besteht, die sich auf meteorologische und geologische Bedingungen zurückführen läßt. Stark erhöhte Aktivität wurde bei Wind aus dem Südsektor gemessen.

Dieser Befund ließ noch nicht mit Sicherheit eine Verallgemeinerung zu, nämlich ob und inwieweit solche Variationen der natürlichen Radioaktivität der Luft auch *in den besiedelten Gebirgstälern* beobachtet werden und ob es sich dabei wirklich um eine *häufige* und auffallende Erscheinung handelt. Weiter war noch zu klären, welche Lokalfaktoren eine Rolle spielen, wie sich das Bild im Verlauf der Jahreszeiten verändert und welchen Einblick man in die Verhältnisse bekommt, wenn die Aktivität aus der Radiumreihe und die aus der Thoriumreihe getrennt betrachtet werden.

Um diese Fragen beantworten zu können, wurden in Farchant, 5 km nördlich Garmisch, vom 24. April 1956 bis 6. April 1957 insgesamt 672 Relativmessungen der natürlichen Radioaktivität der Luft ausgeführt, eingehend ausgewertet und analysiert. Über das Ergebnis dieser Untersuchung sei nachfolgend berichtet.

1. Durchführung der Untersuchungen und Auswertungen

Es wurde dieselbe Meßmethode² angewandt wie sie bei unserer ersten Untersuchung¹ Verwendung fand. Der 10 m lange Sammeldraht aus Kupfer wurde im Freien in ca. 80 cm Höhe über dem Boden isoliert ausgespannt. Die elektrische Spannung des Drahtes gegen Erde betrug während den Expositionen stets —1750 Volt. Folgende Expositionzeiten wurden in der Regel eingehalten (MEZ): 04—08, 08—12, 12—16 und 16—20 Uhr. Es kamen nur praktisch niederschlagsfreie Expositionintervalle zur Auswertung. Die Aktivitätsmessung erfolgte wie früher durch Abpräparieren der

* München, Ravennastr. 62.

¹ R. REITER, Z. Naturforsch. 11 a, 411 [1956].

² J. ELSTER u. H. GEITEL, Phys. Z. 3, 305 [1902].



oberflächlichsten Oxydhaut mittels Ammoniaklösung und Auszählung der so gewonnenen Präparate unter einem Glimmerfensterzähler (Membran: $1,5 \text{ mg/cm}^2$) in Verbindung mit einem Dekadenzähler³.

Jedes Präparat wurde mindestens zweimal ausgemessen. Die erste Messung erfolgte stets genau 1 Stunde nach Ende der Exposition, die zweite Messung 5 bis 12 Stunden nach Ende der Exposition. Die beim 1. Termin gemessene Gesamtaktivität setzt sich aus der Aktivität der Produkte $\text{RaB} + \text{RaC}$ und der Aktivität der Produkte $\text{ThB} + \text{ThC}$ zusammen, während beim 2. Termin nur noch die letzteren erfaßt werden⁴. Es wurden zahlreiche Zerfallskurven der Präparate aufgenommen, welche in Übereinstimmung mit den bekannten Gesetzen und Messungen anderer Autoren^{5, 6} stehen. Aus Zeitpunkt und gemessenem Aktivitätswert des 2. Termins wurde berechnet, wie groß die Aktivität der Produkte $\text{ThB} + \text{ThC}$ 1 Stunde nach Ende der Exposition gewesen war. Diesen Relativwert bezeichnen wir mit „ R_{Th} “. Aus der Differenz zwischen Meßwert beim 1. Termin und R_{Th} folgt der Relativwert „ R_{Ra} “, welcher allein der Aktivität der Produkte $\text{RaB} + \text{RaC}$ zukommt. Weiter wurde das Verhältnis $R_{\text{Ra}}/R_{\text{Th}} = „V“$ gebildet. Dieser Wert gibt selbstverständlich nicht das wahre Verhältnis der Konzentration der betreffenden radioaktiven Stoffe in der Luft an, da ja – von anderen Gründen abgesehen – nach 4 Stunden noch kein Gleichgewicht zwischen Sammlung und Zerfall der Folgeprodukte des Thorons am Sammeldraht eingetreten ist. Zeitliche Schwankungen des wahren Konzentrationsverhältnisses drücken sich aber in zeitlichen Schwankungen des Relativwertes V aus. Diese zu erfassen, reichte für unsere Betrachtungen aus. Alle Meßergebnisse stellen Relativwerte dar, da ja während der Exposition nur ein nicht näher angebarer, aber annähernd konstanter Bruchteil der vorhandenen Gesamtaktivität am Sammeldraht akkumuliert wird. Über eine überschlagsmäßige Eichung siehe Abschnitt 6. Wir sprechen weiterhin besser ganz allgemein von der Relativmessung der Radioaktivität des Aerosols und nicht der Luft, da radioaktives Gleichgewicht zwischen Emanationen und Folgeprodukten nicht immer vorausgesetzt werden kann⁷.

Die Messungen wurden 5 km nördlich Garmisch, auf der Sohle (675 m NN) des etwa nord-südlich streichenden Loisachtals ausgeführt. Am gleichen Ort wurden neben verschiedenen luftelektrischen Größen relative Feuchte, Temperatur, Windgeschwindigkeit und Luftdruck registriert.

Die Radioaktivitätswerte haben wir zu der von uns berechneten „mittleren Windrichtung“ und „mittleren Windgeschwindigkeit“ über dem Alpenkamm in Bezie-

hung gesetzt. Als Grundlage dienten uns hierzu die mit unseren Meßterminen korrespondierenden Meldungen der Hochgebirgsstationen: Jungfraujoch, Säntis, Zugspitze, Patscherkofel, Wendelstein, Sonnblick und Vilacher Alpe. Durch diese Mittelung wurden orographische Windablenkungen an einzelnen Stationen ausgeglichen und wir erhielten ein recht zuverlässiges Bild von Strömungsrichtung und -geschwindigkeit der Luft über den Alpen in einer Breite von ca. 450 km.

2. Beziehung zwischen Windrichtung über dem Alpenkamm und Radioaktivität im Tal. Einfluß der Jahreszeiten

Die Berechnung der oben definierten mittleren Windrichtung über den Alpen erfolgte in Stufen von 10 zu 10 Grad. Für jede dieser Richtungen haben wir die korrespondierenden mittleren Aktivitätswerte R_{Ra} und R_{Th} , sowie die mittleren Windgeschwindigkeiten (nach Angaben der 7 Hochstationen) errechnet. Dabei wurde nach Jahreszeiten aufgeschlüsselt. Da sich keine wesentlichen Unterschiede beim Vergleich von Sommer und Herbst ergaben, wurden die Zahlen für diese beiden Jahreszeiten zusammengelegt. Abb. 1 zeigt die Ergebnisse für die Werte R_{Ra} und Abb. 2 für die Werte R_{Th} (Zahl der Einzelmessungen siehe Legenden).

Abb. 1 sagt aus, daß eine klare Beziehung zwischen Richtung der Höhenströmung und Aerosol-Radioaktivität aus der Radiumreihe besteht, und zwar unabhängig von der Jahreszeit (siehe auch REITER⁸). Während *Höhenströmung* aus dem Südsektor ist die Aktivität im Mittel 2- bis 2,5-mal größer als während *Nordströmung* in der Höhe⁹. Die Windrichtung *im Tal* ist nicht ausschlaggebend, was folgende Untersuchung zeigt: Die Kreise in den Abbildungen enthalten schwarze Sektoren. Diese geben an, in wieviel % der beobachteten Fälle (● = 100%) im Tal Nordwind geherrscht hat¹⁰. Wir sehen, daß im Frühjahr, Sommer und Herbst hohe Aktivitätswerte auch während Nordwind im Tal beobachtet werden. Im Winter hingegen überwiegen im Tal während hoher Aktivität die Südwinde. Die Erklä-

³ Sämtliche Geräte Fabrikat Tracerlab, Boston (E. Leybolds Nachf., Köln).

⁴ Die außerdem bei 3. Messungen im Abstand von einigen Tagen gefundenen „Restaktivitäten“ – Folgen von Kernreaktionen – waren, soweit sie beobachtet wurden, stets so klein, daß sie keine Berücksichtigung erforderten.

A n n. b. d. K o r r.: Etwas ab Mitte 1957 erwies es sich allerdings als unumgänglich, die Restaktivitäten laufend zu berücksichtigen, um die R_{Th} -Werte genau erfassen zu können. – Der Spiegel der mittleren künstlichen Radio-

aktivität der Luft beträgt nach unseren Messungen derzeit etwa $1,5 - 2 \cdot 10^{-12} \text{ Curie/m}^3$, die höchste Spitze: $14 \cdot 10^{-12} \text{ Curie/m}^3$.

⁵ O. HAXEL, Z. angew. Phys. **5**, 16 [1953].

⁶ G. SCHUMANN, Z. angew. Phys. **8**, 361 [1956].

⁷ W. JACOBI, K. AURAND u. A. SCHRAUB, Phys. Verh. **7**, 234 [1956].

⁸ R. REITER, Vortr. 3. Dtsch. Aerosoltagung 1957; im Druck.

⁹ In Einzelfällen fanden wir Anstieg bis Faktor 10.

¹⁰ Es kommt praktisch nur Süd- oder Nordwind im Tal vor.

rung ist folgende: Während der Jahreszeiten mit mäßiger bis starker Sonneneinstrahlung entwickelt sich bekanntlich zwischen Alpenvorland und Nordalpen ein Konvektionssystem. Erwärmte Luft steigt an den heißen Hängen hoch und bewirkt dabei eine nord-südwärts gerichtete Sogströmung in den Tälern. Im Vorland erfolgt Absinken und Rückführung in den Talsog. Enthält nun die Höhenströmung radioaktives Aerosol (unsere Beobachtung am natürlich radioaktiven Aerosol gilt dabei als Modellfall für

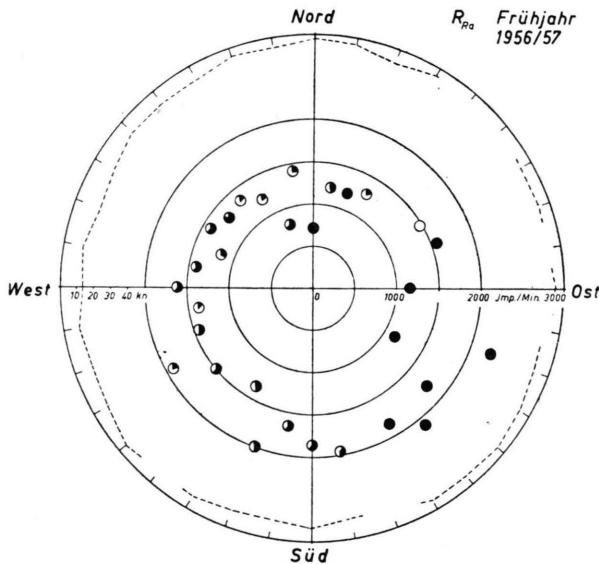


Abb. 1 a.

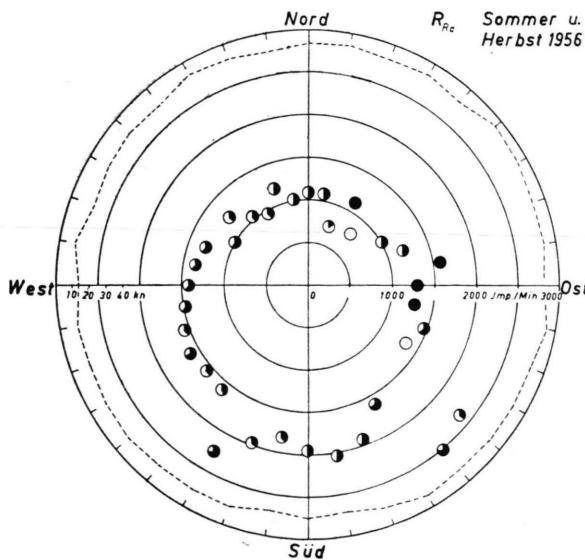


Abb. 1 b.

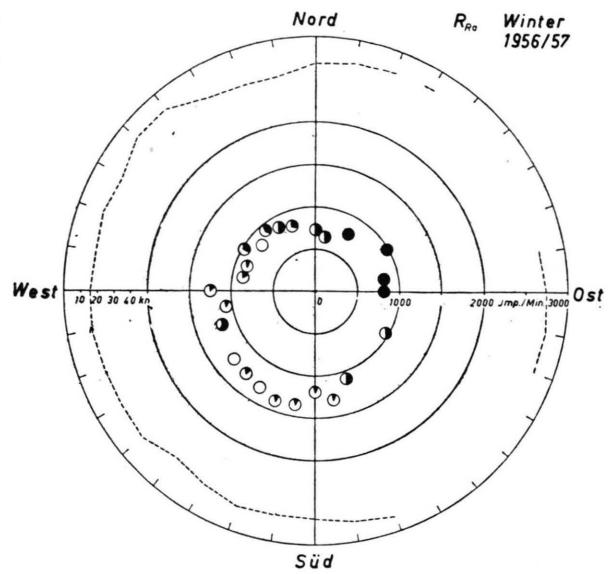


Abb. 1 c.

Abb. 1. Relativewerte der Radioaktivität des Aerosols, Komponente $RaB+RaC$. Abhängig von der mittleren Windrichtung über dem Alpenkamm. Ausfüllung der Kreise: Häufigkeit der Nordströmung im Tal ($\bullet=100\%$). Gestrichelte Linie: mittlere Windgeschwindigkeit über dem Alpenkamm (in Knoten). a) Frühjahr 1956 und 1957, 172 Messungen; b) Sommer und Herbst 1956, 362 Messungen; c) Winter 1956/57, 137 Messungen.

künstlich radioaktive Aerosole aus Kernreaktionen; siehe Abschn. 7), so wird durch die Konvektionsströmung ein Teil davon abgezweigt und in die Täler gepumpt.

Im Winter ist die strahlungsbedingte Zirkulation zu schwach, um die Höhenströmung anzuzapfen. Es kommen dann, wie Abb. 1 c zeigt, überwiegend die Südwindeinbrüche (Föhnlagen) in das Tal zur Wirkung. Vergleicht man nun die „Radioaktivitätsrosen“ in den Abb. 1 a, b und c miteinander, so sieht man, daß die höchsten R_{Ra} -Werte im Sommer und Herbst, die weitaus geringsten aber im Winter erreicht werden. Das winterliche Abfallen ist auf den Einfluß der Bedeckung des Bodens mit Schnee und Eis zurückzuführen, während die sommerlichen und spätsommerlichen Höchstwerte wahrscheinlich eine Folge der verstärkten Zirkulation sind.

Betrachten wir nun die R_{Th} -Werte an Hand der Abb. 2, so stellen wir fest, daß auch diese eine Abhängigkeit von der Richtung der Höhenströmung zeigen, zwar weniger ausgeprägt als die R_{Ra} -Werte, jedoch im gleichen Sinne. Hinsichtlich der Tal-Windrichtungen gilt dasselbe wie oben. Beachtlich ist nun das besonders starke Einschrumpfen der R_{Th} -Rose

im Winter. Wegen der Kurzlebigkeit des Thoron (54,5 sec) gegenüber dem Radon (3,8 d) spielt die Erhöhung des Diffusionswiderstandes bei gefrorenen und schneedeckten Böden eine besonders große Rolle, worauf wir noch zurückkommen werden. Die höchsten R_{Th} -Werte finden wir im Frühjahr, worauf ebenfalls noch eingegangen wird.

Eine Mitführung von Radon und Folgeprodukten mit dem Wind innerhalb der „Reibungsschicht“ ist angesichts der „Halbwertshöhe“ für Radon (1,7 km,

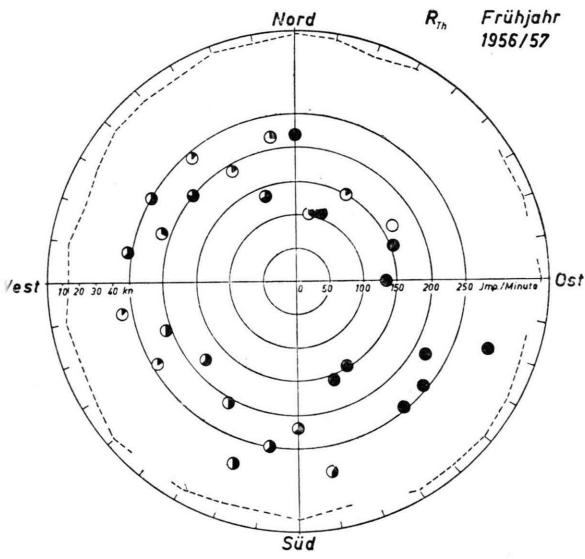


Abb. 2 a.

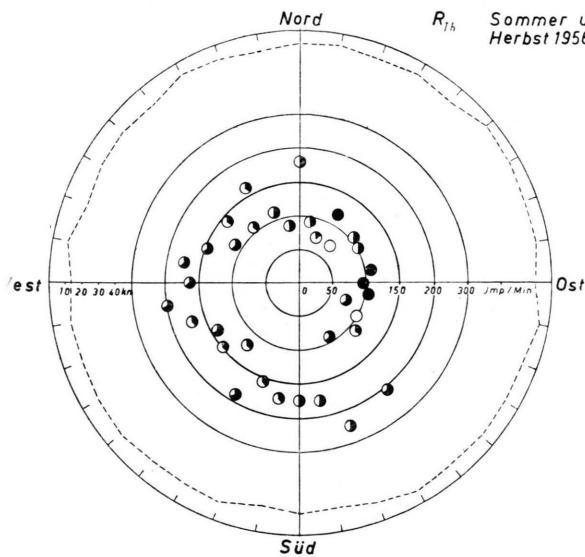


Abb. 2 b.

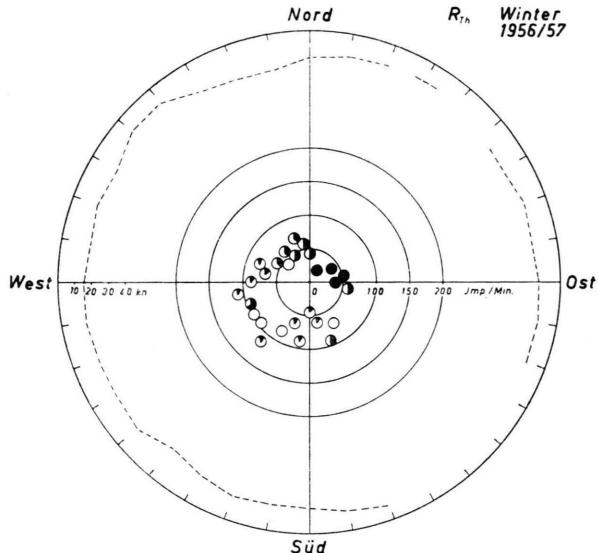


Abb. 2 c.

Abb. 2. Relativwerte der Radioaktivität des Aerosols, Komponente ThB+ThC. Erklärungen und Zahl der Messungen siehe Abb. 1.

nach ¹¹⁾ nicht verwunderlich. Für Thoron beträgt die Halbwertshöhe nur 2–3 m, für ThB aber bereits 100–150 m (nach ¹¹⁾). Im ersten Fall haben wir somit sicher eine echte Verfrachtung von Rn, im zweiten wohl nur noch eine solche des relativ langlebigen ThB (10,6 h). Wegen der geringen Halbwertshöhe der Thoron-Folgeprodukte ist außerdem die Filterwirkung des Pflanzenwuchses und des Baumbestandes von größerem Einfluß als bei den Rn-Abkömmlingen. Es sind also die Bedingungen für eine großräumige Verschiebung von Th-Abkömmlingen durch *meteorologische Prozesse* nicht mehr so günstig wie bei den Ra-Abkömmlingen, während andererseits im zu betrachtenden geographischen Gebiet die *geologischen Voraussetzungen* für eine Windrichtungsabhängigkeit für beide Elemente dieselben sind, nämlich höherer Gehalt an U und Th in den Gesteinen südlich des Inntals gegenüber denen nördlich davon (siehe geologische Karte in Arbeit Anm. ¹⁾).

Wie die Abb. 1 und 2 zeigen, besteht keine merkliche Beziehung zwischen mittlerer Windgeschwindig-

¹¹⁾ St. MEYER, Handbuch der Physik, 2. Aufl., Band XXII/I, Springer-Verlag, Berlin.

A n m. b. d. K o r r.: Ergebnisse einer Untersuchung von G. SCHELLENBERGER (Z. Meteorol. 6, 225 [1952]) aus jüngerer Zeit:
Halbwertshöhe für Radium A, B und C: 1100 Meter;
Halbwertshöhe für Thorium A, B und C: 300 Meter.

keit der Höhenströmung (gestrichelte Kurve) und den gemessenen Aktivitäten. Die Beziehung zwischen Strömungsrichtung und Aktivität kann somit nicht durch eine Richtungsabhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit vorgetäuscht sein.

Schließlich betrachten wir noch kurz die Richtungsabhängigkeit des Verhältniswertes $V = R_{Ra}/R_{Th}$ an

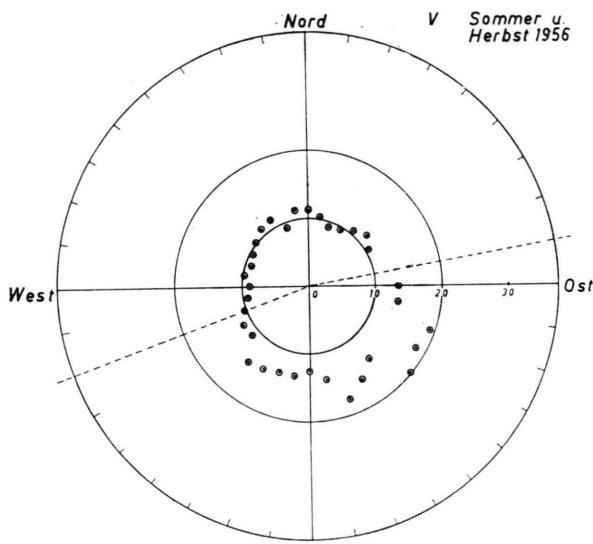


Abb. 3 a.

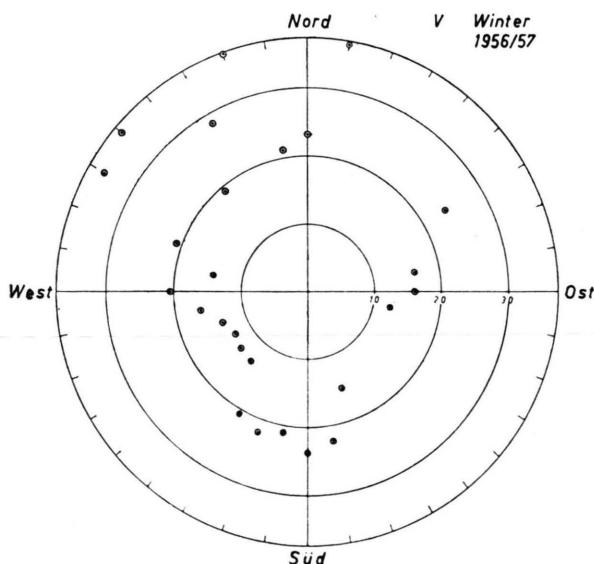


Abb. 3 b.

Abb. 3. Verhältnis $V = R_{Ra}/R_{Th}$ in Abhängigkeit von der Windrichtung über dem Alpenkamm.

a) Sommer und Herbst 1956; b) Winter 1956/57.

Hand der Abb. 3 a und 3 b. Der Kürze halber übergehen wir das Frühjahr. Im Sommer und Herbst ist in der Abb. 3 a das Verhältnis südlich der gestrichelten Trennungslinie deutlich größer als nördlich davon. Die Ursache hierfür finden wir im Verhältnis von Uran/Thorium in den Gesteinen der näheren und weiteren Umgebung, wie sie Abb. 4 darstellt. (Diese Daten gehen auf die schon früher¹ genannten Quellen zurück. Jedoch für Uran- und Thoriumgehalt der Kalke und Dolomite wurden die Ergebnisse sehr genauer Untersuchungen von LAHNER¹² an *alpinen Gesteinen* herangezogen, die uns erst in jüngster Zeit bekannt geworden sind.) In der Tat ist das Verhältnis U/Th in der schraffierten Zone wesentlich größer als im Gebiet der Kalke und Dolomite. Die gestrichelte Trennungslinie ist aus Abb. 3 a in Abb. 4 übertragen und verdeutlicht die gute gegenseitige Übereinstimmung.

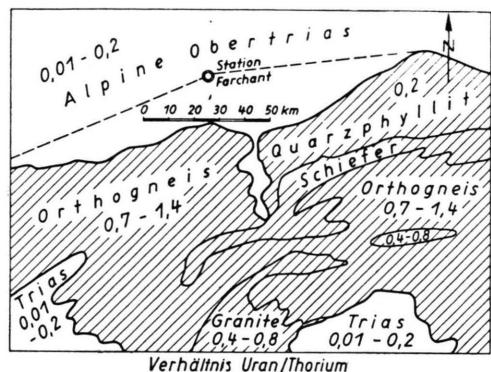


Abb. 4. Verhältnis von Uran/Thorium im Gestein in der Umgebung des Meßorts. Schraffiert: Kristalline Gesteine, Weiß: Sedimente (Kalk, Dolomit).

Im Winter (Abb. 3 b) steigt das Verhältnis V bei Luftzufuhr aus Nord sehr stark an. Dies röhrt daher, daß sich im Winter im nördlichen Vorland eine geschlossene Schne- und Eisdecke ausbilden kann, so daß der Nachstrom von Thoron aus dem Boden dort praktisch unterbunden, ein Radon-Nachstrom aber noch möglich ist (Halbwertszeiten!). In Zonen mit schroffem Fels, also südlich der Station, kann hingegen im Hochwinter, wenigstens stellenweise, auch Thoron weiterhin in die bodennahe Luftsicht übergehen.

Wir schließen diese Betrachtungen mit Abb. 5 ab. Diese enthält in zeitlicher Folge von Ende Septem-

¹² I. LAHNER, Mitteilungen des Instituts für Radiumforschung Nr. 428, Wien 1939.

ber 1956 bis einschließlich Februar 1957 die Dekadenmittel der Bodentemperatur in 2 cm Tiefe, die Dekadenmittel V_m , berechnet aus den Verhältniswerten R_{Ra}/R_{Th} , und die Dekadenmittel der Schneehöhe¹³. Bei der Berechnung von V_m haben wir alle jene Werte fortgelassen, die während Höhenwind aus dem Südsektor gemessen wurden. Der sommerliche Mittelwert für V_m ist durch die horizontale gestrichelte Linie dargestellt, die darüber hinausragenden V_m -Säulen sind schraffiert. Die Darstellung läßt den Einfluß des Bodenfrostes und der Schneebedeckung auf das Verhältnis R_{Ra}/R_{Th} deutlich erkennen.

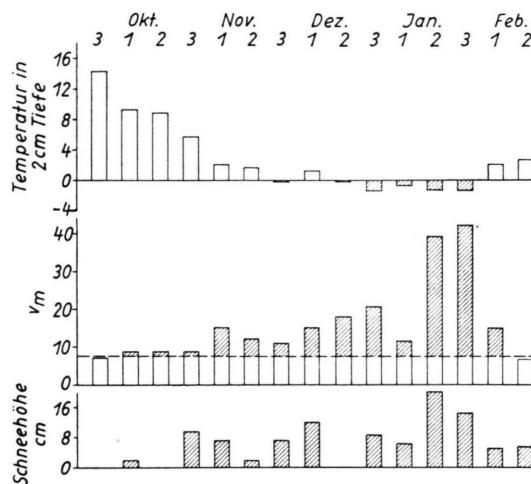


Abb. 5. Dekadenmittel der Bodentemperatur in 2 cm Tiefe, des Verhältnisses $V = R_{Ra}/R_{Th}$ und der Schneehöhe (Winter 1956/57).

Tritt Schneeschmelze ein, so kann angenommen werden, daß durch das in die Bodenkapillaren eindringende Sickerwasser vor allem der Austritt des kurzlebigen Thoron aus dem Boden begünstigt wird. Darauf dürften die hohen Frühjahrswerte von R_{Th} in Abb. 2 zurückzuführen sein.

3. Abschätzung des Einflusses von Nebenbedingungen

Zur Bestätigung der Gültigkeit der unter 2. dargelegten weiträumigen Zusammenhänge ist es notwendig zu zeigen, daß lokale Einflüsse auf jeden Fall vernachlässigbar sind. Als solche müssen vor

¹³ Die meteorologischen Daten stammen von der Wetterstation Garmisch.

allem Windgeschwindigkeit, relative Feuchte und Luftdrucktendenz am Meßort betrachtet werden. Die ersten beiden Größen könnten bis zu einem gewissen Grad den Anlagerungsprozeß am Sammeldraht beeinflussen: Die Windgeschwindigkeit wegen unregelmäßiger Zufuhr der zu untersuchenden Stoffe, die relative Feuchte wegen unterschiedlicher Größe und damit Diffusion der Aerosolteilchen. Abb. 6 zeigt nun deutlich, daß weder von einem systematischen

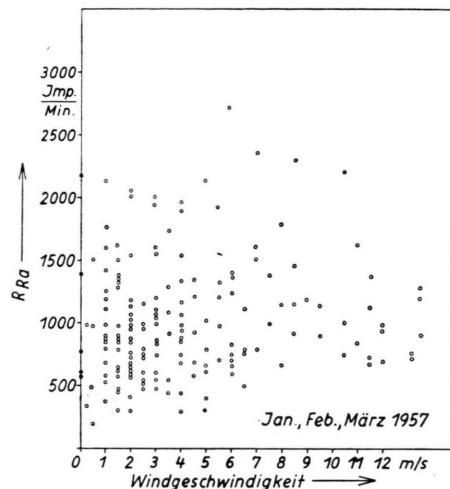


Abb. 6a.

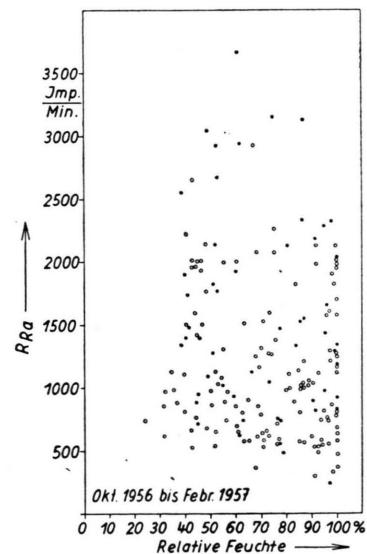
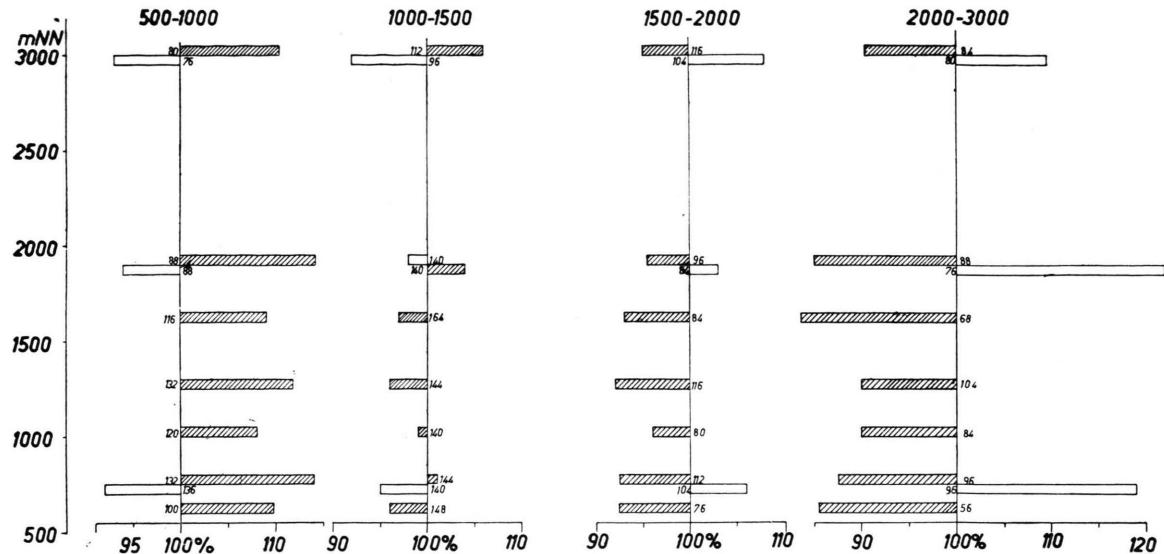


Abb. 6b.

Abb. 6. a) R_{Ra} ist unabhängig von der Windgeschwindigkeit am Meßort; b) R_{Ra} ist unabhängig von der relativen Feuchte am Meßort. ● Nordwind, ○ Südwind bzw. Stille im Tal.



Einfluß der lokalen Windgeschwindigkeit, noch von einem solchen der relativen Feuchtigkeit auf die gemessenen Aktivitätswerte R_{Ra} gesprochen werden kann. Dasselbe gilt für R_{Th} , auf den Nachweis sei verzichtet. Es handelt sich jeweils um repräsentative Abschnitte aus unseren Meßreihen.

Eingehende Beachtung haben wir der *Luftdrucktendenz* zu schenken. Bei fallendem Druck ist bekanntlich mit einem Ansteigen der natürlichen Luftpadioaktivität zu rechnen, weil die den Bodenkapillaren entströmende Luft („Exhalation“) mehr radioaktive Stoffe enthält als die Freiluft.

gehörigen mittleren Verhältniswerte V_m heranzuziehen. Auch diese sind bei Druckfall höher als bei Druckanstieg. Dies spricht aber gegen einen überwiegenden Beitrag der Exhalation. Denn sollte letztere den Effekt hervorrufen, so müßte in unserem Gebiet ein stärkeres Ansteigen der R_{Th} -Werte gegenüber den R_{Ra} -Werten, also ein *Fallen der V-Werte*, eintreten, d. h. genau der umgekehrte Vorgang wie beim Einfrieren des Bodens. Das Verhalten der V -Werte weist hingegen darauf hin, daß der Luftdruck-Einfluß ein scheinbarer sein dürfte. Als Ursache müssen wir die prä-cyclische Drehung des Höhenwindes auf südliche Richtungen, die ja in unserem Gebiet bei Westwetterlagen fast regelmäßig mit einem Druckfall verbunden ist, annehmen. Denn nur auf Grund dieses Vorganges können R_{Ra} , R_{Th} und V (siehe Abb. 1, 2, 3 und 4) ansteigen.

4. Tages- und Jahresgänge

Tab. 2 zeigt die Schwankungen der R_{Ra} und R_{Th} -Werte von Meßtermin zu Meßtermin, aufgeschlüsselt nach Jahreszeiten. Es sind nur jene Messungen enthalten, die genau zu den Hauptterminen ausgeführt worden sind.

Im Frühjahr und Sommer ist die Aktivität — vor allem auf Grund der R_{Ra} -Werte — am frühen Morgen größer als in den Nachmittagsstunden und steigt am Abend wieder etwas an. Im Herbst und Winter werden die Höchstwerte mittags und nachmittags festgestellt. Diese Unterschiede sind eine Folge der

	Druckfall (1 mm in 4 Std.)	Druck- konstanz	Druckanstieg (1 mm in 4 Std.)
R_{Ra} (Imp./Min.)	1725	1421	1238
R_{Th} (Imp./Min.)	175	163	159
V_m	9,9	8,7	7,8
Zahl der Fälle:	186	340	102

Tab. 1. Beziehung zwischen R_{Ra} , R_{Th} , V_m und Tendenz des Luftdruckes am Meßort während der Exposition.

Tab. 1 zeigt das Ergebnis einer Aufschlüsselung unserer Meßwerte nach Drucktendenzen. Tatsächlich sind während Druckfall sowohl die R_{Ra} - als auch die R_{Th} -Werte gegenüber jenen während Druckanstieg erhöht. Zur Erklärung haben wir außerdem die zu-

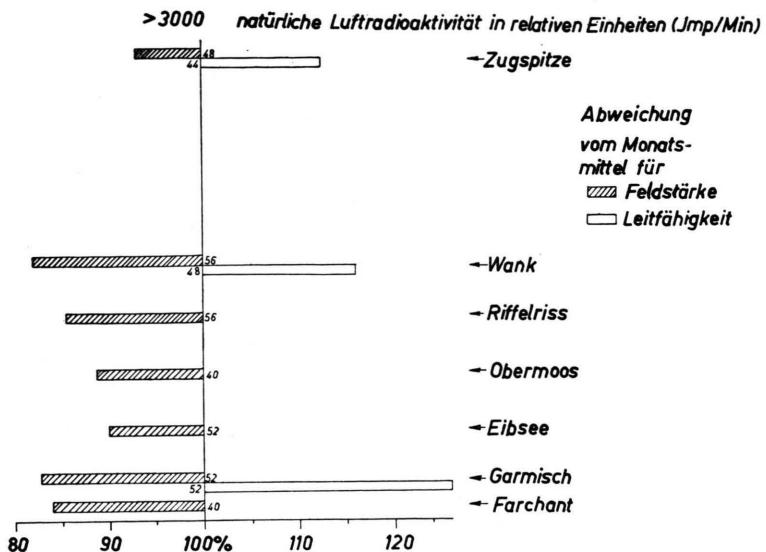


Abb. 7. Prozentuale Abweichung von Potentialgradient und Leitfähigkeit an Schönwettertagen vom Schönwetter-Mittelwert (=100%) als Funktion der natürlichen Radioaktivität des Aerosols (in Schritten von links nach rechts ansteigend).

Jahreszeit	Exposition-intervall	R_{Ra}	R_{Th}	W_1	W_2	n	N
Frühjahr	04—08	1566	296	12	5	44	169
	08—12	1504	242	12	66	43	
	12—16	1208	254	10	80	40	
	16—20	1469	328	10	49	42	
	04—08	1641	161	14	6	36	155
	08—12	1502	152	13	80	42	
	12—16	1325	185	11	82	41	
	16—20	1519	181	12	65	36	
Sommer	04—08	1388	109	10	8	39	148
	08—12	2162	127	11	51	41	
	12—16	2081	168	12	80	35	
	16—20	1108	130	10	12	33	
	04—08	1150	79	18	4	23	129
	08—12	1142	64	18	14	34	
	12—16	1214	84	16	40	38	
	16—20	756	73	17	9	34	

Tab. 2. Tagesgang von R_{Ra} und R_{Th} , aufgeschlüsselt nach Jahreszeiten.

R_{Ra} : Mittelwert in Imp./Min.,

R_{Th} : Mittelwert in Imp./Min.,

W_1 : Mittlere Windgeschwindigkeit am Alpenkamm in Knoten,

W_2 : Häufigkeit von Nordwind am Meßort (im Tal) in %,

n : Anzahl der Messungen pro Exposition-intervall,

N : Anzahl der Messungen pro Jahreszeit.

jahreszeitlichen Verschiedenheiten hinsichtlich atmosphärischer Schichtung, Turbulenz und Strömung (vgl. vor allem die W_2 -Werte in Tab. 2!), worauf aber im einzelnen hier nicht eingegangen werden kann.

5. Einfluß der natürlichen Radioaktivität des Aerosols auf Mittelwerte des Potentialgradienten und der elektrischen Leitfähigkeit der Luft

Über den Einfluß der schwankenden natürlichen Radioaktivität der Luft und des Aerosols auf luft-elektrische Größen wurde an Hand von Einzelmessungen der elektrischen Leitfähigkeit und der Kondensationskernzahl bereits berichtet¹. Wir wollen heute unter Benutzung unserer kontinuierlichen Registrierungen des Potentialgradienten (E) und des Antennenstromes (i) an 7 Stationen im Wettersteingebirge¹⁴ zeigen, wie sehr eine Beeinflussung der „Schönwetterwerte“ durch die schwankende natürliche Radioaktivität der Luft und des Aerosols erfolgt. Nach allgemein üblichen Prinzipien werden pro Monat eine Reihe von Tagen ausgewählt, die als ungestörte Schönwettertage anzusprechen sind.

Dank einer Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft ist es uns möglich, für diese Tage laufend den mittleren stündlichen Gang der luftelektrischen Größen pro Station und Monat zu berechnen.

¹⁴ Namen und Höhenlagen der Stationen (in Klammern: Art der registrierten Elemente): Farchant, 675 m (E); Garmisch, 705 m (E, i); Eibsee, 1005 m (E); Obermoos, 1250 m (E); Riffelriß, 1585 m (E); Wank, 1780 m (E, i); Zugspitze, 2963 m (E, i).

Die Durchführung dieser Registrierungen ermöglicht eine finanzielle Unterstützung durch Geophysics Research Directorate of the Air Force Cambridge Research Center, ARDC, US Air Force, under Contract AF-61(514)-949 through the European Office, ARDC.

Wir haben nun untersucht, wie groß – jeweils während unserer Expositionszeiten – die prozentuale Abweichung der Stundenmittelwerte der luftelektrischen Größen am betreffenden Schönwettertag vom korrespondierenden monatlichen Schönwetter-Stundenmittelwert (= 100% gesetzt) ist. Diese Rechnungen wurden für die Werte des Potentialgradienten und für die Leitfähigkeit, letztere berechnet aus Potentialgradient und Vertikalstrom, durchgeführt und nach Stufen der relativen Radioaktivität des Aerosols (bzw. der Luft) aufgeschlüsselt. Abb. 7 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung für die Monate Mai bis November 1956. Die liegenden Säulen zeigen die Abweichungen vom Schönwettermittelwert (Zahl am Fuß der Säulen: Summe der ausgewerteten Stunden) an der jeweiligen Station (Ordinate: Höhenlage der Station). Wir sehen: bei unterdurchschnittlicher Radioaktivität (500 bis 1000 Imp./Min.) ist die Feldstärke an allen Stationen gegenüber dem Mittelwert erhöht und die Leitfähigkeit vermindert. An den Tagen mit durchschnittlicher Radioaktivität (1000 – 1500 Imp./Min.) schwanken die Potential-Werte unsystematisch um den Mittelwert. Bei hoher und stark erhöhter Radioaktivität hingegen ist die Feldstärke an allen Stationen deutlich bis stark vermindert und die Leitfähigkeit entsprechend erhöht.

6. Vergleich zwischen Aktivierungsmethode und Filtermethode

In der Zeit vom 15. März bis 6. April 1957 wurden insgesamt 70 Vergleichsmessungen zwischen der einangs beschriebenen Aktivierungsmethode und der bekannten^{5, 6} und heute allgemein angewandten Filtermethode ausgeführt, um einen Anschluß unserer Daten an absolute Einheiten zu gewinnen. Während der Expositionsdauer des Drahtes wurden insgesamt 5 – 8 m³ Luft durch ein Schwebstofffilter¹⁵ von 30 mm Durchmesser gesaugt. Die Aktivität haben wir stets 10 Min. und 5 – 8 Stdn. nach Ende des Absaugens mit dem Stirnzähler gemessen. Unter Zugrundelegung von Eichmessungen mit K⁴⁰ und Umrechnungen an Hand der Luftmenge sowie der bekannten Zerfallsgesetze der am Filter aufgefangenen Stoffe der Radium- und Thoriumreihe (wir können hier nicht näher darauf eingehen) wurde die absolute Menge des RaB in Curie pro Volu-

men ungefilterter Freiluft berechnet. Kann Gleichgewicht zwischen Radon und RaB über RaA angenommen werden, so ist dieser Wert identisch mit dem Radongehalt der Luft.

Beim Vergleich der Werte R_{Ra} (Aktivierungsmethode) und der gleichzeitig bestimmten Konzentration RaB fiel auf, daß die Werte zwar periodenweise sehr gut parallel gehen, daß aber oft auch starke Abweichungen voneinander auftreten. Diese beobachteten wir stets dann, wenn während der Messungen extrem geringe oder extrem starke Lufttrübung herrschte. Bei schwächster Trübung z. B. und Zustrom stark radioaktiver Luft aus Süd (Talföhn) stiegen die Werte nach der Aktivierungsmethode erwartungsgemäß an, während die Filterwerte zunächst sogar absanken. Nach Alterung des Aerosols, z. B. über Nacht, holten schließlich die Filterwerte auf. Um diese Erscheinung zu klären, haben wir die dem Gehalt der Luft an Verunreinigungen etwa entsprechende Graufärbung der Filter photometrisch bestimmt und in % Schwärzung/m³ umgerechnet.

In Abb. 8 a ist das Ergebnis des Vergleiches der beiden Methoden als Funktion der Luftverunreinigung dargestellt. Es ist die Filterschwärzung gegen das Verhältnis: Aktivität am Filter durch Aktivität am Draht aufgetragen. Eine der beiden Meßreihen wurde dabei mittels eines konstanten Faktors so umgerechnet, daß der Quotient der arithmetischen Mittel beider Reihen 1 wird. Der Quotient der Wertepaare ist, wie man sieht, eine lineare Funktion der Filterschwärzung. Stellt man eine entsprechende Beziehung zwischen der Differenz: Aktivität am Draht minus Aktivität am Filter (Differenz der arithmetischen Mittel gleich 0) und dem Schwärzungsgrad auf, so erhält man wiederum eine lineare Beziehung bei etwa gleicher Streuung der Punkte.

Da nun die Radioaktivität der Luft bzw. des Aerosols nicht eine direkte Funktion des Verschmutzungsgrades sein kann (Föhnlagen!), muß eines der beiden Meßverfahren (oder beide) einem methodischen Fehler unterliegen. Es ist einerseits möglich, daß das Filter kleinstes, jüngstes radioaktives Aerosol nicht quantitativ festhält oder daß andererseits die Anlagerung kleinsten Teilchen an den Sammeldraht begünstigt wird (höhere Beweglichkeit). Es läßt sich nun zeigen, daß die beiden oben erwähnten linearen Funktionen, die von den Messungen gut erfüllt werden (Abb. 8 a), zu Ungunsten der Filtermethode sprechen. Dagegen ist ein *überwiegendes* Versagen der Aktivierungsmethode *nicht* mit dem Verlauf der beiden Funktionen in Einklang zu brin-

¹⁵ Am besten hat sich bis jetzt die Filterqualität 9747 von Schleicher und Schüll bewährt, mit welcher diese Messungen ausgeführt sind.

Anm. b. d. Korr.: Nach neuesten Erfahrungen besitzen Glasfaserfilter einen noch höheren Abscheidegrad. Glasfaserfilter Nr. 8 von Schleicher und Schüll haben sich dabei besonders gut bewährt.

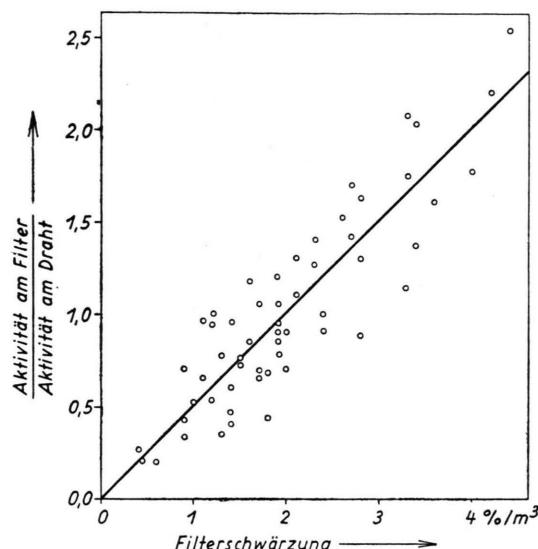


Abb. 8 a.

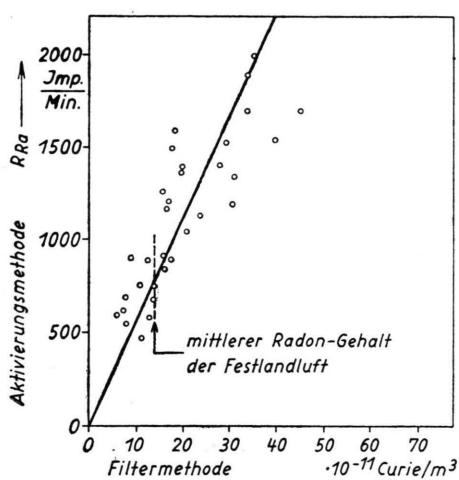


Abb. 8 b.

Abb. 8. a) Relatives Verhältnis der Meßwerte, gewonnen nach der Filtermethode bzw. nach der Aktivierungsmethode, als Funktion der Luftverunreinigung, ausgedrückt durch den Schwärzungsgrad der Filter ($\%/\text{m}^3$); b) Anschluß der Aktivierungsmethode an die Filtermethode.

¹⁶ Die Messung künstlich radioaktiver Spuren, die sich wohl überwiegend auf gealtertem Aerosol befinden, wird davon wenig berührt. Ein Minimum des Abscheidegrades bei Zellulosefiltern wird nach W. JACOBI (mündliche Mitteilung) im Gebiet zwischen 1 und $0,01 \mu$ Teilchendurchmesser beobachtet.

¹⁷ E. POHL u. J. POHL-RÜLING, Ber. Österr. Akad. Wissenschaften, Math.-Naturw. Klasse, Abt. II, 163, 5, 147 [1954].

gen, ein kleiner Fehler allerdings – wenn auch von geringerem Gewicht gegenüber dem bei der Filtermethode – ist dabei nicht auszuschließen. Wir können also sagen, daß bei der Erfassung *junger natürlicher radioaktiver Aerosole mittels Filter gewisse Vorsicht geboten ist*, weil deren Wirkungsgrad von der Teilchengröße – insbesondere im Gebiet feinstter Aerosole – abhängen kann¹⁶. Dafür spricht außerdem unsere Feststellung, daß beim Filter – im Gegensatz zur Aktivierungsmethode (Abb. 6 c, d) – die Meßwerte stark von der relativen Feuchte abhängen, wobei hohe Werte während hoher Feuchte gemessen werden.

Schließt man nun auf Grund Abb. 8 a solche Meßpaare aus, die einen Quotienten unter 0,5 bzw. über 1,5 liefern (Beschränkung auf das Schwärzungsintervall $1 - 3\%/\text{m}^3$), so bekommt man eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Aktivierungsmethode und Filtermethode. Der Relativwert $R_{Ra} = 1000 \text{ Imp. pro Min.}$ entspricht dabei einer absoluten Konzentration von $18 \cdot 10^{-11} \text{ C/m}^3$ ($\text{Curie/m}^3 = \text{Mikrocurie/cm}^3$; letztere Bezeichnung ist heute allgemeiner üblich) RaB bzw. Rn.

Aus der Abb. 8 b folgt eine gute Übereinstimmung zwischen mittlerer Impulszahl R_{Ra} während Nordströmung (900 – 1000 Imp./Min.) und mittlerem Rn-Gehalt der Festlandluft. Unsere Maximalwerte während Luft aus Süd, nämlich $R_{Ra} = 6000 - 8000 \text{ Imp./Min.}$, entsprechend $108 - 145 \cdot 10^{-11} \text{ C/m}^3$, stehen schließlich auch im Einklang mit den Messungen^{17, 18} des Radongehalts der Freiluft in der Umgebung von Bad Gastein, welche zum Wert 130 bis $300 \cdot 10^{-11} \text{ C/m}^3$ führten¹⁹. Dies bestätigt unsere entsprechende Folgerung in Arbeit Anm.¹.

7. Schlußfolgerungen

Als wesentliches Ergebnis ist zunächst festzuhalten, daß es systematische Beziehungen zwischen Rich-

¹⁸ J. POHL-RÜLING u. E. POHL, Ber. Österr. Akad. Wissenschaften, Math.-Naturw. Klasse, Nr. 11, 190 [1955].

¹⁹ Wir haben an dieser Stelle zu korrigieren, daß die Toleranzgrenze für Dauereinatmung von Rn-Folgeprodukten nicht $10 \cdot 10^{-12} \text{ C/l}$, wie in Anm.¹ infolge Übernahme eines Druckfehlers angegeben, sondern $100 \cdot 10^{-12} \text{ C/l}$ beträgt (B. RAJEWSKY u. Mitarb., Strahlendosis und Strahlenwirkung, 2. Aufl., Thieme-Verlag, Stuttgart).

tung²⁰ der Höhenströmung über den Alpen und natürlicher Radioaktivität der Luft bzw. des Aerosols auf der Talsohle gibt, und weiter, daß es sich hier nicht um eine kleinräumige Zufälligkeit handelt, sondern daß in der Tat die mittlere Windrichtung über dem Gebirge in einer Breite von mindestens 450 km entscheidend ist. Die beobachteten starken Schwankungen der Luftradioaktivität – im Mittel um 100 bis 200%, im Einzelfall bis zum Faktor 10 – gehören sicherlich zur Eigenheit zumindest aller nord-südwärts orientierten Täler in den Nordalpen. Es sind somit eine Reihe von Kur- und Badeorten davon betroffen und es wird nötig sein, diese – vielleicht von Ort zu Ort verschieden große – Schwankungsbreite der Luft- und Aerosol-Radioaktivität in den Kreis der kurortklimatischen Heil- bzw. Reizfaktoren einzubeziehen. Dies besonders deshalb, da man, wie schon bemerkt¹, neuerdings auch kleinsten Konzentrationen von Radon und Folgeprodukten biologische Wirkung sowie Heilkraft zuschreibt und unsere Ergebnisse zeigen, daß hohe Radioaktivitäts spitzen sehr häufig sind und in allen Jahreszeiten vorkommen. So wurde während unserer 255 Meßtage umfassenden Untersuchungsperiode die Aktivität an mindestens 136 Tagen um 50 Prozent gegenüber dem jahreszeitlichen Mittelwert überschritten. Da man heute die Festlegung der Toleranzdosis für eingearmte radioaktive Stoffe auf die Erfahrungen der Balneologen, gewonnen an natürlichen radioaktiven Aerosolen, stützt (siehe z. B. Anm. ^{22, 23}), sind derartige Feststellungen über Häufigkeit und Höhe der in besiedelten Gebieten vorkommenden Radioaktivitätsspitzen ebenfalls von Wert.

Die Untersuchungen zeigen ferner, daß es mit Hilfe natürlicher radioaktiver Aerosole möglich ist,

²⁰ In diesem Zusammenhang sei auch auf die Untersuchungen von E. BAGGE²¹ hingewiesen, welcher in Hamburg ebenfalls eine Beziehung zwischen Windrichtung und natürlicher Radioaktivität der Luft bzw. des Aerosols nachweisen konnte. Seine Untersuchung bestätigte die Erfahrung, daß ozeanische Luftkörper geringere Aktivitäten mit sich tragen als kontinentale Luftmassen.

A n m. b. d. K o r r.: Untersucht man die Zuordnung der in Farchant gemessenen Radioaktivitätswerte zu den jeweiligen Luftkörpern, so stellt man fest, daß tropische und tropisch-maritime Luftkörper höhere Werte liefern als etwa polare oder polar-maritime. Die Analyse zeigt aber, daß bei der ersten Gruppe über den Alpen südliche Windrichtungen überwiegen. Es handelt sich also sehr wahrscheinlich nicht um eine echte Luftkörpereigenschaft, sondern um den Zusammenhang mit der Geologie auf dem Anmarschweg. Merkwürdigerweise zeigen aber die tropischen Luftkörper auch die höchste Restaktivität.

²¹ E. BAGGE, Z. Atomkerntechnik, Nr. 11/12, 393 [1956].

²² P. R. ARENDT, Z. Atomkerntechnik, Nr. 9, 317 [1956].

Studien über die Strömungsvorgänge, z. B. im Gebirge, auszuführen. Da bekanntlich der Vertikalaustausch bis zur Erdoberfläche im Flachland schwächer ist als im Gebirge oder dessen Einflußbereich, muß im Falle radioaktiv verseuchter Höhenströmungen mit erheblichen Unterschieden der Bodenwerte je nach der Topographie des Geländes gerechnet werden. In gebirgigen Gegenden können also im Falle einer künstlichen Verseuchung der Höhenströmung sehr wohl erhöhte Bodenwerte der Luftradioaktivität erwartet werden, die dann weitgehend unabhängig von der Richtung der Höhenströmung (im Gegensatz zu unserem Modellfall mit nahegelegenen Quellgebieten der natürlichen Radioaktivität) sein werden*.

Einige Folgerungen, welche aus den gemessenen Schwankungen der natürlichen Luftradioaktivität in bezug auf luftelektrische Zustände und Prozesse gezogen werden können, wurden – früher¹ bereits diskutiert – im Abschnitt 5 noch einmal besonders an Hand luftelektrischer Dauerregistrierungen beleuchtet. Aus der gegebenen Übersicht ist zu sehen, wie sehr die Schwankungen der natürlichen Luftradioaktivität und damit der Ionisation in das luftelektrische Geschehen eingreifen. Es ist wichtig, solche regionale Besonderheiten – wie in unserem Fall der Alpen – zu kennen, wenn man weltweite Vergleiche anstellt, wie es im Rahmen des Internationalen Geophysikalischen Jahres vorgesehen ist. Hier sei auch auf die eingehenden Arbeiten einer Schweidischen Gruppe über Beziehungen zwischen Ionenhaushalt und Gehalt der Bodenluft an radioaktiven Gasen verwiesen^{24–28}.

Die ausgeführten Vergleichsmessungen zwischen Aktivierungsmethode und Filtermethode²⁹ zeigen, daß

²³ K. AURAND, W. JACOBI u. A. SCHRAUB, Radioaktive Isotope in Klinik und Forschung. Sonderband II zur Strahlentherapie, S. 267, Urban & Schwarzenberg, München.

* A n m. b. d. K o r r.: Diese Annahme wird erhärtet durch die Feststellung, daß die Höchstwerte der künstlichen Radioaktivität mittags und nachmittags, die Minimalwerte aber nachts auftreten.

²⁴ R. SIKSNA, Ark. Geophys. I, 123 [1950].

²⁵ H. NORINDER u. R. SIKSNA, Arch. Met. Geophys. Biokl. A 3, 29 [1950].

²⁶ H. NORINDER u. R. SIKSNA, Tellus 2, 168 [1950].

²⁷ H. NORINDER, A. METNIEKS u. R. SIKSNA, Ark. Geophys. I, 571 [1952].

²⁸ H. NORINDER, R. SIKSNA u. A. METNIEKS, Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 74, 450 [1952].

²⁹ Die auf Grund der Aktivierungsmethode gewonnenen, vorstehend dargelegten Ergebnisse konnten inzwischen an Hand von 450 Messungen nach der Filtermethode bestätigt werden.

erstere durchaus brauchbare Relativwerte liefert und daß sie sogar in gewissen Fällen der Filtermethode überlegen ist. Es ist heute vielfach üblich, die exponierten Filter schon 1–2 Tage nach Ende der Exposition auf Spaltprodukte zu untersuchen. Es befindet sich aber dann noch ein Rest von maximal 20% der

Thoron-Folgeprodukte auf dem Filter. Da, wie unsere Untersuchungen zeigen, der Thorongehalt der Luft und die Konzentration von ThB in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren stark schwanken, wäre ein zeitlicher Abstand von mindestens 2–3 Tagen wünschenswert.

Zur dielektrischen Relaxation polarer Flüssigkeiten*

Von ROLF SCHRÖDER

Aus dem II. Physikalischen Institut der Freien Universität Berlin
(Z. Naturforsch. **12 a**, 731–735 [1957]; eingegangen am 12. Juli 1957)

Es wird der Verlauf der dielektrischen Konstanten $\epsilon'(\omega)$ und $\epsilon''(\omega)$ von Lösungen von α -Bromnaphthalin in Tetrachlorkohlenstoff bei 4 Konzentrationen (1, 5, 10 und 20 Gewichtsprozenten) im Wellenlängenbereich von 1 cm bis 35 cm gemessen. Dieser Bereich umfaßt den wesentlichen Teil des anomalen Dispersionsgebietes. Die gemessenen Kurven zeigen eine mit steigender Konzentration wachsende Abweichung von den aus der DEBYE-Theorie folgenden. Von 4 diskutierten Deutungsmöglichkeiten eignet sich eine von FRÖHLICH¹ angegebene Erweiterung der DEYESCHEN Theorie am besten zur quantitativen Beschreibung des gemessenen Dispersionsverlaufes.

Der niederfrequente Dispersionsverlauf einer polaren Flüssigkeit läßt sich in seinen wesentlichen Zügen bekanntlich recht gut durch die DEBYE-Gleichungen² beschreiben:

$$\epsilon'(\omega) - \epsilon_\infty = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (1)$$

$$\epsilon''(\omega) = (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}. \quad (2)$$

ϵ' und ϵ'' sind der Real- bzw. Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätskonstanten (DK). Die 3 Parameter

ϵ_s = statische DK, τ = Relaxationszeit,

ϵ_∞ = Grenzwert der DK jenseits der reinen Rotationsdispersion,

sollten also den Dispersionsverlauf auf der niederfrequenten Seite des Spektrums vollständig beschreiben. Genaue Messungen zeigen jedoch systematische Abweichungen von dem durch die Gl. (1) und (2) gegebenen Verlauf. Besonders deutlich sind diese Abweichungen an den Absorptionskurven zu erkennen; sie verlaufen breiter und flacher als die nach Gl. (2) berechneten^{3, 4, 5} (Abb. 1).

Der wesentliche Frequenzbereich, in dem Absorption und anomale Dispersion beobachtet werden, ist relativ groß; er umfaßt 6 Oktaven. Für einen ge-

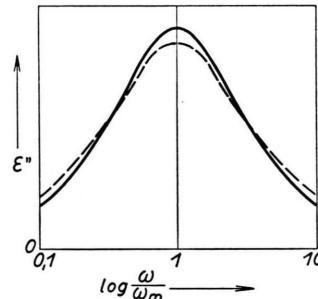


Abb. 1. $\epsilon''(\omega)$ nach Gl. (2) (ausgezogen) und typische experimentell ermittelte Kurve. $\omega_m = 1/\tau$.

nauen Vergleich der experimentellen Meßwerte mit theoretischen Kurven sollte der gesamte Absorptionsbereich durch möglichst dicht liegende Meßpunkte überdeckt werden. Bisher liegen nur sehr wenige derartige Messungen vor. Es ist das Ziel dieser Arbeit, den genauen Absorptions- und Dispersionsverlauf einer speziellen polaren Moleköl auszumessen. Um zwischen mehreren Deutungsmöglichkeiten

* Auszug aus einer der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Freien Universität Berlin eingereichten Dissertation.

¹ H. FRÖHLICH, Theory of Dielectrics, Clarendon Press, Oxford 1949.

² P. DEBYE, Polare Moleküle, S. Hirzel, Leipzig 1929.

³ K. S. COLE u. R. H. COLE, J. Chem. Phys. **9**, 341 [1941].

⁴ E. J. HENELLY, W. M. HESTON jr. u. C. P. SMYTH, J. Amer. Chem. Soc. **70**, 4102 [1948].

⁵ W. MECKBACH, Z. Phys. **131**, 331 [1952].