Cu, und zweitens gibt Ag einen größeren Impuls als Au, weil bei Ag das d-Band tiefer liegt als bei Au, was man aus der verschiedenen Wellenlänge der Lichtabsorption dieser Metalle (Übergänge von d nach s und p) geschlossen hat.

Es scheint danach, daß unsere Methode bei den

schwereren Elementen vor allem Aussagen über die Eigenfunktionen tieferer Schalen in dem Raum außerhalb des Ionenradius liefert. Bei leichten Elementen werden zum Teil einfachere Verhältnisse herrschen. Zu ihrer Untersuchung wird jedoch eine Verbesserung der Methode angestrebt werden müssen.

Zur Methodik der luftelektrischen Potentialmessungen

Einfluß des Windes bei radioaktiven Kollektoren

Von R. MÜHLEISEN

Aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Stuttgart

(Z. Naturforschg. 6 a, 667—671 [1951]; eingegangen am 7. August 1951)

Herrn Professor Erich Regener zum 70. Geburtstag

Durch die Ionisation eines radioaktiven Kollektors wird die Leitfähigkeit der umgebenden Luft in der Windrichtung verändert; dies führt zu Änderungen des Potentials am Kollektor. Zur Untersuchung der Größe dieses Einflusses wurden zwei gleiche Meßanordnungen verwendet, die in geringem Abstand voneinander aufgestellt waren. Sie bestanden aus einer mit Polonium aktivierten Sonde, einem neuen, hochohmigen Röhrenvoltmeter und einem Registrier-galvanometer. Der Vergleich dieser Doppelregistrierungen und Versuche im künstlichen Feld zeigen, daß durch kleine Windgeschwindigkeiten in Richtung des Potentialgradienten Veränderungen des Potentials bis zu 30% möglich sind.

Das Problem des Tagesganges der luftelektrischen Größen besteht nach wie vor. Der Verlauf des luftelektrischen Potentials über den Ozeanen wird durch den täglichen Gang der Weltgewittertätigkeit

Troposphäre bis herab zum bodennahen Klima als Ursache für diese Variationen zu betrachten¹.

Veränderungen des Aerosols können durch ihre elektrische Tönung in verschiedener Weise auf das Potential am Meßort einwirken. Nach Israel¹ kann man das Potential V an einem Punkt über der Erdoberfläche gleich dem Spannungsabfall an einem Teil r des Gesamtwiderstandes R einer Luftsäule vom Boden bis zu der gutleitenden Ausgleichsschicht über dem Meßort setzen, also gemäß Abb. 1

$$V = \frac{r}{R} E,$$

dabei ist R der „spezifische Säulenwiderstand“ gleich etwa $10^{21} \Omega/\text{cm}^2$, r der Widerstand einer fiktiven Luftsäule vom Erdboden bis zum Meßpunkt.

Außerdem wird das Potential durch Raumladungen in der Nähe des Meßortes, also durch Suspensionen in der Luft beeinflusst, die vermehrt Ladungen eines Vorzeichens tragen. Demnach können das Potential V folgende Störungen beeinflussen:

1. Änderung von r , also der Luftleitfähigkeit zwischen Potentialsonde und Erde,
2. Änderung des Säulenwiderstandes R ,

¹ H. Israel, Arch. Meteorol., Geophysik Bioklimatol. A, 3, 1 [1950].

Abb. 1. Ersatzschaltbild zur luftelektrischen Potentialmessung (nach Israel¹).

befriedigend erklärt. Dagegen sind die verschiedenen Typen der Feldverläufe an Stationen auf den Kontinenten Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Es liegt nahe, das meteorologische Geschehen in der

3. Auftreten einer Raumladung über der Sonde, hervorgerufen durch geladene Rauch-, Staub- und andere Teilchen oder aktive Wolken.

In der folgenden ersten Teilarbeit soll untersucht werden, von welcher Größenordnung der Einfluß der durch radioaktive Potentialsonden selbst hervorgerufenen Leitfähigkeitsänderung der Luft auf das angezeigte Potential ist. Es ist beabsichtigt, mit derselben Methode später andere Störungen zu verfolgen.

Die Meßanordnung

Um auf die Art und die Wirksamkeit von Störungen schließen zu können, wurden zwei Meßstellen in geringem, veränderlichem Abstand eingerichtet und die so gewonnenen Registrierungen verglichen. Die beiden Meß-

Abb. 2. Prinzipschaltung des Röhrenvoltmeters.

anordnungen bestanden aus den Sonden, sehr hochohmigen Röhrenvoltmtern und Registriergalvanometern.

Die Sonden trugen an ihren Spitzen je eine durch Polonium aktivierte Silberkugel von 1,5 mm Durchmesser (Sättigungsstrom etwa $2 \cdot 10^{-8}$ A). Die Sonde 1 war an der senkrechten Wand des Beobachtungsstandes auf dem Institutsdach durch einen Bernsteinisolator horizontal nach außen geführt. Der Abstand Poloniumkugel zur Hauswand konnte leicht verändert werden; die Hauswand wurde durch ein übergezogenes Drahtnetz exakt auf Erdpotential gehalten. Die Sonde 2 wurde in 1,3 m, 13 m bzw. 25 m Entfernung angebracht.

Diese Sonden waren direkt verbunden mit je einem Röhrenvoltmeter. Ehmert und Mühleisen² haben nach dem Prinzip des gegengekoppelten Gleichspannungsverstärkers ein sehr hochohmiges Röhrenvoltmeter entwickelt, dessen Prinzipschaltbild in Abb. 2 wiedergegeben ist.

Folgende Eigenschaften machen es für luftelektrische Potentialmessungen besonders geeignet: bei einer Anzeigesteile von $0,25 \mu\text{A/V}$ besitzt das Röhrenvoltmeter einen Meßbereich von +600 V bis -500 V mit völlig gerader Eichkurve. Spannungen bis +800 V werden bei niederohmigem Anschluß noch angezeigt. Ebenso können Spannungen bis -800 V auf gekrümmter Eichkurve gemessen werden.

² A. Ehmert u. R. Mühleisen, Veröffentlichung erscheint demnächst.

sen werden. Wird als Röhre 1 in Abb. 2 z. B. eine RV 2,4 P 700, die einen geringen Gitterstrom aufweist, in Triodenschaltung verwendet, so ergibt sich ein Eingangswiderstand von $2-5 \cdot 10^{13} \Omega$. Da sich nach den bisher gemachten Erfahrungen das Vakuum dieser Röhre im Dauerbetrieb verbessert, erhöht sich dadurch im Laufe der Zeit der wirksame Eingangswiderstand. Die Eingangskapazität beträgt etwa $\frac{1}{3}$ pF. Durch eine Anodenstromkompensation wird einerseits der Anzeigestrom proportional zur Eingangsspannung und andererseits der Einfluß von Netzspannungsschwankungen praktisch aufgehoben.

Der große Meßbereich und der hohe wirksame Eingangswiderstand erlauben den direkten Anschluß des Röhrenvoltmeters an eine radioaktive Potentialsonde, wenn ihr „scheinbarer Übergangswiderstand“ klein gegen den Eingangswiderstand des Röhrenvoltmeters ist. Dies ist bei einem radioaktiven Präparat mit einem Sättigungs-

Abb. 3. Abgeschirmte Potentialsonde zur Verbesserung der Einstellzeit und des Isolierwiderstandes.

strom von mehr als etwa 10^{-9} bis 10^{-10} A der Fall. Es wird dadurch der Nachteil der Belastung der Sonden vermieden, der bei Verwendung bisher üblicher Schaltungen mit Elektrometerröhren³ oder in Röhrenvoltmtern durch die Spannungsteilung mittels Hochohmwiderständen auftritt.

Überschlagsmessungen haben gezeigt, daß an einer Poloniumsonde (Sättigungsstrom etwa $2 \cdot 10^{-8}$ A) in einem künstlichen Feld von etwa 150 V/m bei Belastung mit einem Widerstand von $5 \cdot 10^{11} \Omega$ eine Potentialänderung um 40% entsteht. Derselbe Versuch im natürlichen luftelektrischen Feld ergab für dieselbe Sonde einen Potentialabfall um 15% und für eine etwa 8-mal schwächere Poloniumsonde einen Abfall um 35%. Außerdem sind diese Abweichungen windabhängig.

Der luftelektrische Potentialverlauf wurde photographisch registriert. Die Meßeinrichtung hatte folgendes zeitliche Auflösungsvermögen: Sonde und Röhrenvoltmeter zusammen hatten eine Einstellzeit für Feldänderungen von etwa 0,5 sec. Die Schaltung des Röhrenvoltmeters erlaubt aber für andere Zwecke eine Verkürzung der Einstellzeit auf etwa 0,02 sec, wenn eine um den Sondenstab und seine Zuleitung zum Gitter der Röhre 1 isoliert angebrachte Abschirmung an die Kathode dieser Röhre angeschlossen wird (s. Abb. 3). Diese Abschirmung

³ K. Burkhardt, Z. Meteorol. 1, 212 [1947].

Abb. 4. Potentialverlauf an zwei radioaktiven Sonden im Abstand von 1,3 m bei schwachem Seitenwind.

Abb. 5. Potentialverlauf an zwei radioaktiven Sonden im Abstand von 13 m bei böigem Wind.

liegt dann stets etwa 1 V über dem Potential der Sonde, ändert also den Feldverlauf praktisch nicht. Nach den Formeln für die Gegenkopplung in einem Kathodenverstärker vermindert sich dadurch die Eingangskapazität etwa um den Faktor 100.

Die Einstellzeit des Registriergalvanometers betrug etwa 1 sec. Die Papiergeschwindigkeit der Registriereinrichtung war veränderlich.

Deutung der Doppelregistrierungen

Bei der Betrachtung von Registrierungen des luftelektrischen Potentials mit einer radioaktiven Sonde kurzer Einstellzeit fällt auf, daß die Schwankungen mit Perioden von Minuten und weniger verhältnismäßig groß sind. Je nach der Anordnung der Sonde, den Windverhältnissen und der Tageszeit betragen die Amplituden dieser Schwankungen bis zu etwa 20% des Mittelwertes des Potentials. Zur näheren Untersuchung dieser Schwankungen wurden Doppelregistrierungen bei einem seitlichen Abstand der Sonden von 1,3 m, 13 m und 25 m ausgeführt. Einige davon sind in den Abb. 4, 5 und 6 wiedergegeben. Der Verlauf beim kleinsten Abstand ist im großen und ganzen ähnlich, aber bereits hier weichen die feinsten Schwankungen teilweise voneinander ab. Bei 13 m Abstand ist die Feinstruktur bereits verschiedenartig, wogegen aber die Schwankungen mit größeren Perioden von einigen Minuten und mehr weitgehend parallel laufen. Beim Abstand von 25 m (die Sonden waren an gegenüberliegenden Wänden des Gebäudes in gleicher Höhe, etwa 18 m über dem Erdboden angebracht) ist bereits die gesamte Feinstruktur während eines Tages verschiedenartig.

Abb. 6. Potentialverlauf bei zwei radioaktiven Sonden im Abstand von 25 m an zwei gegenüberliegenden Wänden eines Hauses.

Bei der in Abb. 5 gezeigten Registrierung war die Sonde 2 in einem Abstand von nur 15 cm über einem kleinen Blechdach angeordnet und ergab etwa 5-mal größere Schwankungen als die Sonde 1. Es wurde dabei beobachtet, daß das angezeigte Potential bei Bestrahlung des Blechdaches momentan anstieg, während es beim Verschwinden der Sonne im selben Augenblick absank; es mußte daher die durch die Sonneneinstrahlung hervorgerufene Änderung der

Luftströmung die Ursache für die Potentialschwankungen sein.

Untersuchungen im künstlichen Feld

In einem Plattenkondensator wurde eine elektrische Feldstärke von etwa 200 V/m zwischen zwei eben ausgespannten Drahtnetzen erzeugt. Eine Sonde mit Poloniumspitze wurde einmal in ähnlicher Weise wie bei den bisherigen Registrierungen senkrecht durch das geerdete Drahtnetz geführt (s. Skizze in Abb. 7), in einer zweiten Versuchsreihe von der Seite her in die Ebene einer Äquipotentialfläche verlegt. Die Registrierung der Potentialanzeige erfolgte wie bisher.

Abb. 7. Potentialänderung im künstlichen Feld durch Verschiebung der durch eine radioaktive Sonde gebildeten Ionenwolke bei einem Luftstrom von 1 m/sec in Pfeilrichtung. (Tr Tropfsonde allein; Po Poloniumsonde; Tr (Po) Tropfsonde in der Nähe der Poloniumsonde.)

Wenn man nun durch ein schwaches Gebläse einen Luftstrom von etwa 1 m/sec, entsprechend einer Windstärke 0 bis 1, durch die Drahtnetze in Richtung der Feldlinien erzeugt, dann verändert sich das angezeigte Potential einseitig in der Richtung zum Potential des angeblasenen Drahtnetzes. Die Potentialabweichungen betragen etwa 15 bis 30 V bei einem zu erwartenden Potential von 100 V (s. Abb. 7). Die Erklärung hierfür ist folgende: ein Poloniumpräparat mit einem Sättigungsstrom von z. B. $2 \cdot 10^{-8}$ A wie beim Versuch sendet etwa $7 \cdot 10^5$ α -Teilchen je sec aus; diese erzeugen insgesamt etwa 10^{11} Ionen je sec in der Kugel mit dem Halbmesser der Reichweite. Werden diese Ionen in einer gedachten Röhre mit einem Luftstrom obiger Geschwindigkeit weggeblasen, nimmt die Ionenkonzentration in der Sekunde etwa auf $1/4$ durch Rekombination ab, wogegen die Ionen-

wanderung im elektrischen Feld und die Abnahme durch Diffusion zu vernachlässigen sind. In einer Entfernung von einigen Metern sind deshalb immer noch erhebliche Ionenkonzentrationen vorhanden. Die Leitfähigkeit der Luft wird also im Luftstrom *hinter* der Sonde stark heraufgesetzt und verändert dadurch das Spannungsverhältnis. Werden die Ionen am Sondenstab entlang geblasen, ist die Potentialänderung etwa doppelt so groß wie bei umgekehrter Richtung der Luftströmung. Etwa für die in der oben angegebenen Versuchsanordnung verwendete Luftgeschwindigkeit tritt ein Maximum der Leitfähigkeit im entscheidenden Luftraum und damit der Potentialänderung auf, während dann bei höheren Geschwindigkeiten die Ionenkonzentration und damit die Potentialänderung wieder abnimmt.

Auch der Versuch bei geschlossenem Zimmer und vermeintlicher Luftruhe brachte erhebliche Schwankungen bis zu 15% des zu erwartenden Potentials (s. Abb. 7, rechts). Diese Schwankungen in fast ruhiger Zimmerluft lassen sich durch die durch kleinste Temperaturunterschiede hervorgerufene Turbulenz erklären.

Diese Anordnung läßt sich auch zur Messung kleinster Strömungsgeschwindigkeiten verwenden.

Zur Sicherung des Ergebnisses wurde noch ein Versuch mit einer Tropfsonde im künstlichen Feld ausgeführt. Der Potentialverlauf wird zwar beeinflusst durch den Eingangswiderstand des Röhrenvoltmeters, der etwa gleich dem scheinbaren Übergangswiderstand der Tropfsonde mit nur etwa 2 Tropfen/sec ist und bewirkt, daß das angezeigte Potential an der verwendeten, sehr wenig leistungsfähigen Sonde zu positiven Werten hin verschoben wird; es zeigt aber deutlich, daß der langsame Gang durch die Änderung der Richtung der Luftbewegung *nicht* beeinflusst wird. Erst bei Anwesenheit eines Poloniumpräparates im seitlichen Abstand von 12 cm von der Tropfsonde ist die Anzeige in derselben Richtung wie bei den Poloniumsonden verändert.

Das Bild der Potentialregistrierungen im künstlichen Feld läßt vermuten, daß die von Wigan⁴ beobachtete Feinstruktur des luftelektrischen Potentials durch die Turbulenz an seinem stark ventilierten RaTh-Kollektor hervorgerufen wurde.

Folgerungen

Die Luftbewegung an der Außenseite eines Gebäudes ist meist turbulent. Es werden also sowohl bei

⁴ A. Wigan, Z. Geophysik 5, 319 [1929].

Abb. 8. Großer Unterschied in der Feinstruktur zweier Potentialregistrierungen bei Windstille.

Abb. 9. Wirkung eines konstanten Luftstromes auf Potentialschwankungen.

starker Einstrahlung als auch bei Windstille durch Temperaturunterschiede Komponenten der Luftbewegung senkrecht zu den Äquipotentialflächen auftreten. Dadurch werden die an der radioaktiven Sonde gebildeten Ionen einmal mehr zur Hauswand zu oder

von ihr weg geblasen, und somit werden Leitfähigkeits- und dadurch Potentialschwankungen hervorgerufen. Da das luftelektrische Feld nur einseitig durch die Erde begrenzt ist und der Sondenstab im freien wie im künstlichen Feld Anlaß zu einer Unsymmetrie gibt (s. Abb. 7), kann der zeitliche Mittelwert des infolge der Ionisation schwankenden Potentials nicht mit dem ungestörten Potential identisch sein.

Um diesen Störeinfluß möglichst auszuschalten, sind folgende Richtlinien für die Anbringung und Verwendung radioaktiver Potentialsonden zu empfehlen:

1. Möglichst großer Abstand des Kollektors von der auf Erdpotential befindlichen Fläche. Auch die in Abb. 3 angegebene Schaltung einer Sondenabschirmung ist günstig, da sie auf nahezu demselben Potential wie die Sonde bei verhältnismäßig niederohmigem Anschluß mitgeführt wird.

2. Zweckmäßiger Anbringungsort für Sonden an Stellen mit viel Querwind, also möglichst großen ebenen Hauswänden. Luftbewegungen senkrecht zu den Äquipotentialflächen, z. B. durch geöffnete Fenster, sind zu vermeiden.

3. Bei Windstille empfiehlt sich ein Ventilator zur Erzeugung eines künstlichen Luftstromes in Richtung der Äquipotentialflächen (s. Abb. 8 und 9). Warmluft kann außerdem zur Verhinderung eines Tauniederschlages auf einem offenen radioaktiven Kollektor und zur Verbesserung der Isolation beitragen.

4. Zur Vermeidung des Einflusses starker Sonneneinstrahlung auf die Luftbewegung erscheint eine Nordwand als Meßort am günstigsten.

5. Ein schwaches Präparat ist einem starken vorzuziehen, solange die Einstellzeit dadurch nicht unzulässig groß wird und eine Änderung der Potentialanzeige infolge der Belastung durch das Registriergerät nicht eintritt.

Herrn Prof. Dr. E. Regener danke ich für sein großes Interesse und die stete Förderung dieser Arbeit, Herrn Hildebrand für die Herstellung der Apparate und Herrn Holl für seine bereitwillige Unterstützung bei den Messungen.