

# Meteorologische Vorgänge im Spiegel der Lufterktrizität

H. ISRAEL - Aachen

Ricevuto 20-VII-1460

*“ The study of turbances in the potential gradient shows that all turbances can be correlated with local meteorological conditions ” (\*)*.

## I. - EINFÜHRUNG

Die Anschauungen über die atmosphärisch-elektrischen Erscheinungen und ihre Verknüpfung mit anderen Vorgängen haben wie bekannt mehrfach grundlegende Wandlungen durchgemacht. Vor allem hat über die Verbindung zur Meteorologie lange Zeit Unklarheit bestanden: Obwohl sich einerseits von Anfang an immer wieder auffallende Parallelen zum Wettergeschehen erkennen liessen, erwies es sich andererseits als ungewöhnlich schwierig, die Mechanismen zu erkennen, aus denen sich diese Zusammenhänge kausal begründeten. So pendeln die Anschauungen über diese Dinge bis in die nahe Vergangenheit hinein zwischen den beiden extremen Möglichkeiten, in den meteorologischen Einflüssen grundlegende Phänomene oder störende Zusatzercheinungen zu sehen — eine Unsicherheit, die gelegentlich noch bis heute nachwirkt.

Der Grund dafür ist nicht zuletzt darin zu sehen, dass die atmosphärischen Erscheinungen mehrdeutig sind und dass sie in ihren Einzelheiten in gleicher Weise sowohl durch Vorgänge in der näheren Umgebung wie auch durch solche von globalen Ausmassen bedingt sein können: Ist einerseits das Wettergeschehen in mehr oder weniger ausgeprägtem Masse lufterktrisch wirksam, so kommen andererseits bei Abstraktion vom Wettereinfluss hinter diesem andere, weltweit wirkende Einflüsse zum Vorschein.

Nun sind, wie heute einwandfrei feststeht, *beide* Einflussbereiche meteorologischer Art, auch die weltweit reichenden, die ihren Ursprung

---

(\*) D. C. ROSE, *The atmospheric potential gradient at Ottawa, Canada.* « Canad. Journ. Res. » Ottawa 15, 119-148, (1937).

in der Gesamtheit der Gewittertätigkeit in allen Teilen der Welt finden. — Damit werden die früheren Überlegungen, ob die meteorologischen Vorgänge luftelektrisch von entscheidendem Einfluss sind oder nicht, gegenstandslos. An ihre Stelle sind heute Fragen anderer Art getreten, die vor allem der meteorologischen Steuerung im Einzelnen gelten. Diese heutige Zielsetzung der luftelektrischen Arbeit strebt die Deutung der zahlreichen noch nicht genügend geklärten Einzelerfahrungen an und vermag damit gleichzeitig einer praktischen Anwendung luftelektrischer Ergebnisse in meteorologischen Diensten, die sich heute anbahnt, den Boden zu bereiten.

Das umfangreiche und z.T. recht uneinheitliche Ergebnismaterial über meteorologisch-luftelektrische Zusammenhänge macht es angesichts der vielgestaltigen Möglichkeiten schwer, darin die ordnenden Grundlinien zu erkennen. Deshalb wird im Folgenden der umgekehrte Weg versucht, zunächst diese Grundprinzipien aufzufinden und diese dann a posteriori aus den Erfahrungen als zutreffend zu beweisen.

## II - GRUNDLAGEN

### A) Stationäre und nichtstationäre Zusammenhänge.

Die atmosphärisch-elektrischen Erscheinungen gehören — abgesehen von den gewittrigen Entladungen — dem Bereich der unselbständigen Gasentladungen an. Man kann den atmosphärisch-elektrischen Raum deshalb folgendermassen darstellen (vergl. Abb. 1):

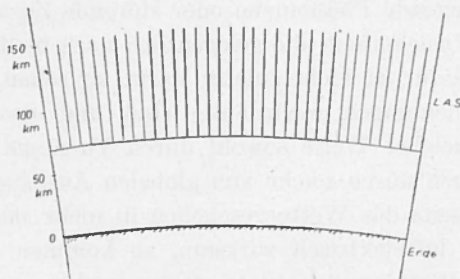


Abb. 1. — Ausschnitt aus dem atmosphärisch-elektrischen Raum.

Zwischen den beiden Elektroden « Erde » (Erdoberfläche) und LAS (luftelektrische Ausgleichsschicht in der hochleitfähigen Hochatmosphäre) besteht eine bestimmte Potentialdifferenz  $V$ . Der Innenraum dieses Kon-

densators besitzt eine gewisse schwache Leitfähigkeit  $\lambda$ , wird also von einem Strom der Dichte  $i$  durchflossen. Die Leitfähigkeit  $\lambda$  nimmt vom Boden nach oben erheblich zu. Dies hat, wie man sich leicht überzeugt, eine entsprechende Modifikation des Feldverlaufes zwischen den beiden Elektroden zur Folge, die sich wie folgt darstellen lässt (<sup>1</sup>): Es gilt

$$V = i \cdot R \quad [1]$$

wo  $R$ , der sog. «Säulenwiderstand» («columnar resistance») (Widerstand einer vertikalen Luftsäule von Einheitsquerschnitt zwischen Erdoberfläche und LAS), gegeben ist durch

$$R = \int_0^H w(h) \cdot dh \quad [2]$$

und  $w(h) = 1/\lambda(h)$  den spezifischen Widerstand der Luft in der Höhe  $h$  darstellt.

Für die Feldstärke  $E(h)$  in der Umgebung der Stelle  $h$  gilt:

$$E(h) = i_h \cdot w(h) \quad [3]$$

Besteht im Gesamtbereich stationärer Zustand, ist also die Stromdichte an allen Stellen zwischen dem Boden und LAS die gleiche, nämlich gleich  $V/R$ , so ergibt sich aus den Gleichungen 1 bis 3 die Beziehung

$$E(h) = V \cdot w(h)/R. \quad [4]$$

Die Bedeutung dieser Gleichung lässt sich am besten aus der Schemadarstellung der Abb. 2 ablesen:

Danach entspricht der zur Messung gelangende Wert des atmosphärisch-elektrischen Feldes  $E(h)$  dem potentiometrischen Abgriff über den Teilbetrag  $w(h)$  der am Gesamtwiderstand  $R$  liegenden Spannung  $V$ .

Sind die drei Größen  $V$ ,  $w(h)$  und  $R$  zeitlich nicht konstant, so ergeben sich im hier betrachteten Stromkreis für die Reaktionen des luftelektrischen Feldes  $E(h)$  grundsätzlich die folgenden 7 Möglichkeiten: Es können

1. Änderungen von  $V$  allein,
2. » »  $w(h)$  allein,
3. » »  $R$  allein
4. » »  $V$  und  $w(h)$  gleichzeitig,
5. » »  $V$  und  $R$  gleichzeitig,
6. » »  $w(h)$  und  $R$  gleichzeitig, oder
7. » »  $V$ ,  $w(h)$  und  $R$  gleichzeitig

auftreten und  $E(h)$  beeinflussen.

Das atmosphärisch-elektrische Feld kann mit seinen Reaktionen diesen Änderungen nicht momentan sondern nur mit einer gewissen Trägheit folgen. Dies hat die Konsequenz, dass man bei jeder Änderung

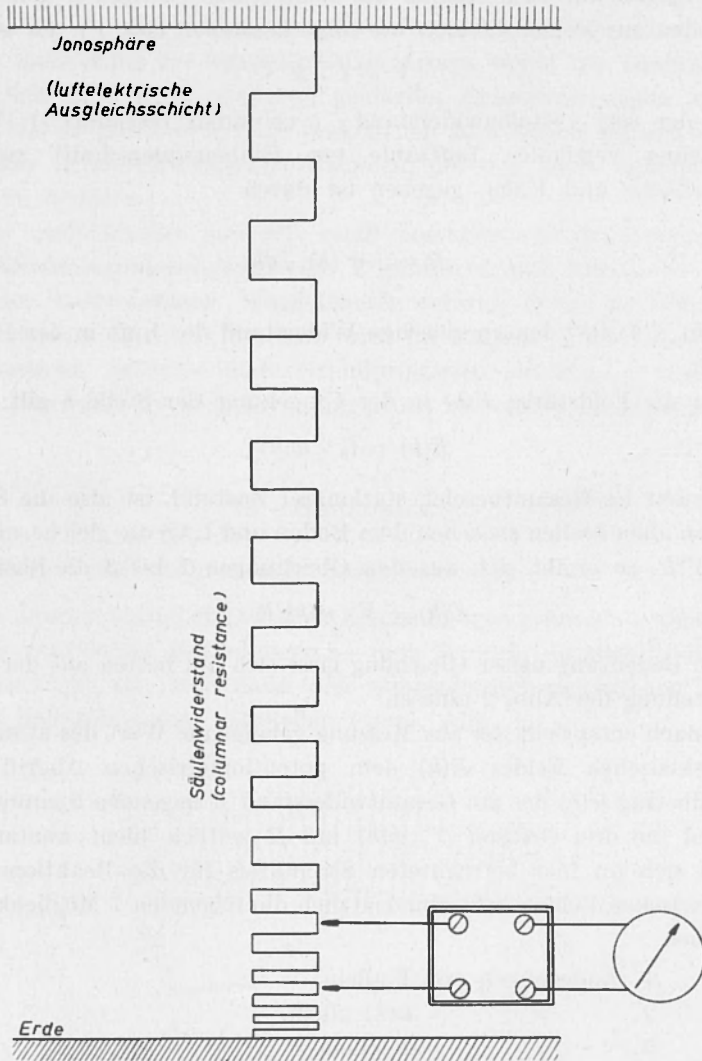


Abb. 2 - Schemadarstellung zum elektrischen Aufbau der Atmosphäre.

den sog. « Einschaltvorgang » berücksichtigen muss. — Form und Verlauf dieses « Einschaltvorganges » hängen im Einzelnen vom zeitlichen Verlauf des Änderungsvorganges von  $V$ ,  $w(h)$  bzw.  $R$  ab.

Wir wollen im folgenden einige dieser Möglichkeiten besprechen und wählen zunächst als besonders einfaches Beispiel ff. Spezialfall:

An einen Luftkondensator, dessen Innenraum unter einer von der einen Elektrode zur anderen zunehmenden Ionisierung stehen soll, werde zur Zeit  $t = 0$  eine Spannung  $V$  angelegt. Diese erzeugt im ersten Moment im ganzen Raum eine Feldstärke des Betrages  $E = V/H$  ( $H =$  Elektrodenabstand). Infolge der Leitfähigkeitszunahme von einer zur anderen Elektrode muss dann ein Umformungsprozess des Feldes einsetzen, der solange fortschreitet, bis die Dichte  $i$  des Leitungsstromes überall die gleiche ist. Dies ist der Fall, wenn das Produkt aus Feldstärke  $E(h)$  und Leitfähigkeit  $A(h)$  an der Stelle  $h$  des Kondensators für alle  $h$ -Werte zwischen 0 und  $H$  den gleichen Betrag — und zwar den Betrag  $i$  — angenommen hat. Es findet also — um es anschaulich auszudrücken — eine Umbildung des zunächst «geometrischen» Feldaufbaues (Feldstärke längs der Feldlinien überall  $= V/H$ ) in den durch die Leitfähigkeitsverteilung vorgeschriebenen Endzustand des Feldaufbaues statt.

Der Verlauf dieses Umbildungsprozesses («Einschaltvorganges») lässt sich wie folgt beherrschen:

Ist  $E_a$  der Anfangswert ( $V/H$ ) der Feldstärke und  $E_s(h)$  ihr stationärer Endwert an der Stelle  $h$ , so gilt für den zeitlichen Verlauf  $E_t(h)$  der Feldstärke

$$\frac{d}{dt} (E_t(h) - E_s(h)) = - \frac{A(h)}{c} (E_t(h) - E_s(h)) \quad [5]$$

mit der Lösung

$$E_t(h) = E_a \cdot \exp[-(A(h)/\varepsilon) t] + E_s(h) [1 - \exp[-(A(h)/\varepsilon) t]]. \quad [6]$$

Die Annäherung an den stationären Endzustand  $E_s(h)$  erfolgt also exponentiell mit der Halbwertszeit  $(\ln 2) / (A(h)/\varepsilon)$  (\*).

Erfolgt die Änderung der Kondensatorspannung  $V$  nicht sprunghaft sondern stetig in Gestalt einer Funktion  $V(t)$  so gilt, wie man leicht

---

(\*) Zugleich mit dem Feldumbau erfolgt im Inneren der Kondensators ein Raumladungsaufbau, für den sich eine zu Gleichung (6) völlig analog gebaute Gleichung ergibt. — Für den stationären Endzustand ergibt sich nach der Poisson-schen Gleichung folgende Raumladungsverteilung:

$$q_s(h) = \varepsilon \cdot i \cdot \frac{dw(h)}{dh} \quad [7]$$

sieht, für die zeitliche Variation  $E_t(h)$  der Feldstärke an der Stelle  $h$  die Differentialgleichung

$$\frac{d}{dt} (E_t(h) - E_t^s(h)) = - \frac{\Lambda(h)}{\varepsilon} (E_t(h) - E_t^s(h)) \quad [8]$$

wo  $E_t^s(h)$  derjenige stationäre Endwert ist, der sich in der Höhe  $h$  einstellen würde, wenn die Änderung von  $V(t)$  im Zeitpunkt  $t$  aufhören würde. Nach Gleichung (4) ergibt sich dafür der Wert

$$E_t^s(h) = \frac{w(h)}{R} V(t) = \frac{1}{\Lambda(h) R} V(t) \quad [9]$$

Setzt man

$$w(h) \cdot \varepsilon = \frac{\varepsilon}{\Lambda(h)} = \tau(h) , \quad [10]$$

so können wir [8] überführen in

$$\frac{d}{dt} E_t(h) + \frac{1}{\Lambda(h)} E_t(h) = \frac{1}{\tau(h)} \left[ \frac{d}{dt} \frac{V(t)}{R} + \frac{1}{\tau(h)} \frac{V(t)}{R} \right] ; \quad [11]$$

was, wenn man so will, eine erweiterte Form des Ohmschen Gesetzes darstellt. Für einfache Formen der Funktion  $V(t)$  lässt sich das leicht integrieren.

Für das weitere ist es nun von grundsätzlicher Bedeutung, ob der Änderungsvorgang zum stationären Endzustand führt oder nicht:

Hat  $V(t)$  z.B. Sinusform, so führt Gleichung (11) zum Endzustand der erzwungenen Schwingung mit leicht berechenbarer Amplitudenveränderung und Phasenlage. Die « Anlaufzeit » (Zeit bis zum Abklingen des « Einschaltvorganges ») ergibt sich aus der Zeitkonstante  $\tau(h)$ .

Ist  $V(t)$  eine periodische Funktion beliebiger Gestalt, so führt Entwicklung nach Fourier und getrennte Behandlung der Einzelglieder in gleicher Weise zum Ziel.

Zeigt  $V(t)$  jedoch unregelmässigen Verlauf, so hängt die Auswirkung auf  $E_t(h)$  von der zeitlichen Änderungsgeschwindigkeit der Variationen ab. Eine allgemeine analytische Behandlung dessen ist in der Regel nicht mehr möglich. Man kann in diesem Fall nur so vorgehen, dass man die beiden Grenzfälle sehr langsamer und sehr rascher Änderungen (« langsam » und « rasch » im Vergleich zur Zeitkonstante  $\tau(h)$ ) behandelt und das tatsächliche Verhalten durch Annäherung an den einen oder anderen Grenzfall zu beherrschen versuchen:

Der erste Grenzfall ist der, dass die Variationen von  $V(t)$  im Vergleich zur Zeitkonstante  $\tau(h)$  so langsam erfolgen, dass sich  $E_i(h)$  im ganzen Kondensator-Inneren stets mit den durch  $V = f(t)$  vorgeschriebenen Werten in stationärer Relation befindet. In diesem Fall gilt:

$$E_i(h) = \frac{1}{A(h)R} V(t). \quad [12]$$

Im anderen Grenzfall ändert sich  $V(t)$  so rasch, dass in den Variationen von  $E_i(h)$  nur noch die zu  $V(t)$  gehörigen « Anfangswerte » zum Vorschein kommen.  $E_i(h)$  zeigt somit in allen Punkten unabhängig von  $h$  die gleiche Variation:

$$E_i = V(t)/H. \quad [13]$$

Die Grenzen, innerhalb deren der eine oder andere Fall gilt, lassen sich aus der Zeitkonstante  $\tau(h)$  herleiten (vergl. den nächsten Abschnitt).

Treten anstelle der bisher behandelten Variationen von  $V$  solche von  $R$  oder solche von  $A(h)$  ein, so lassen sich die Reaktionen von  $E_i(h)$  in entsprechender Weise leicht auffinden:

Sprunghafte Änderungen von  $R$  wirken sich durch Abwandlung des  $E_i(h)$  in den Gleichungen (5) und (6), solche von  $A(h)$  ausserdem durch Abwandlung der Zeitkonstanten  $\tau(h)$  aus. Die Lösungen behalten bei Einsatz dessen ihre in Gleichung (6) gegebene Gestalt bei.

Stetig verlaufende Änderungen führen zu Ansätzen entsprechend Gleichung (6). Folgt  $R$  einer Funktion  $R(t)$ , so ist anstelle des in Gleichung (6) definierten  $E_i^s(h)$  der folgende Ausdruck einzusetzen:

$$E_i^s(h) = \frac{V}{A(h)R(t)} \quad [14]$$

Zeigt  $A(h)$  den zeitlichen Verlauf  $A(h, t)$ , so tritt für  $E_i^s(h)$  der Ausdruck

$$E_i^s(h) = \frac{V}{A(h, t)R} \quad [15]$$

und anstelle der Zeitkonstante  $\tau(h)$  die « Zeitfunktion »  $\tau(h, t)$ .

Ändern sich entsprechend der einleitend gegebenen Aufzählung zwei der drei steuernden Grössen  $V$ ,  $A(h)$  (bzw.  $w(h)$ ) und  $R$  oder alle drei gleichzeitig, so lässt sich das Verhalten von  $E_i(h)$  durch ähnliche Differentialansätze beschreiben.

Im allgemeinsten Fall sei das Verhalten der drei Grössen gegeben durch

$$\begin{aligned} V &= V(t) \\ R &= R(t) \\ \Lambda(h) &= \Lambda(h, t). \end{aligned} \quad [15]$$

Dann ist für einen beliebigen Zeitpunkt  $t$  das «stationäre Endglied»  $E_t^s(h)$ , dem  $E_t(h)$  in diesem Zeitpunkt zustrebt, gegeben durch

$$E_t^s(h) = \frac{V(t)}{R(t)\Lambda(h, t)} = Z(h, t) \quad [16]$$

Die Differentialgleichung für  $E_t(h)$  lautet also:

$$\frac{d}{dt} (E_t(h) - Z(h, t)) = -\frac{1}{\tau(h, t)} (E_t(h) - Z(h, t)). \quad [17]$$

Sie ist ebenso aufgebaut wie Gl. [11] und dürfte ebenfalls in geschlossener Form nur für einfache Zeitfunktionen in [15] lösbar sein.

Als Spezialfall ergibt sich auch hier der Grenzfall, bei dem die zeitlichen Änderungen der drei Grössen  $V$ ,  $R$  und  $\Lambda(h)$  so langsam erfolgen, dass der Verlauf von  $E_t(h)$  als Aneinanderreihen von stationären Endzuständen aufgefasst werden kann. In diesem Fall gilt

$$E_t(h) = E_t^s(h) = \frac{V(t)}{R(t)V(h, t)} \quad [18]$$

m.a.W. also Gleichung (\*) in zeitlich veränderlicher Form. In diesem Fall lässt sich der prozentuale Änderungsbetrag  $dE(h) \cdot (1/Z(h))$  der Feldstärke in der Höhe  $h$  während einer gewissen Zeitspanne in Abhängigkeit von den prozentualen Änderungsbeträgen der Einzelgrössen  $V$ ,  $R$  und  $w(h)$  wie folgt angeben:

$$\frac{dE(h)}{E(h)} - \frac{dw(h)}{w(h)} + \frac{dV}{V} - \frac{dR}{R} \quad [19]$$

Weitere Einzelheiten zur Behandlung der oben genannten 7 Möglichkeiten des Feldverhaltens bei Variationen von  $V$ ,  $w(h)$  und  $R$  im stationären Fall s. bei H. ISRAEL (2<sup>3</sup>).

#### B) Die Zeitkonstante.

Die Zeitkonstante der oben betrachteten Vorgänge ist gegeben durch den Quotienten  $\varepsilon/\Lambda(h)$  der Dielektrizitätskonstanten  $\varepsilon$  und der Leitfähigkeit am Messort, wobei der ersteren hier die Bedeutung der

Kapazität der Raumeinheit zukommt (<sup>5 6</sup>). — Meteorologische Einwirkungen gründen sich auf Änderungen der Aerosol-Eigenschaften der atmosphärischen Luft, die sich über die Wiedervereinigungsgesetze auf (*h*) bzw. *w*(*h*) und *R* auswirken. Es gilt:

$$A(h) = \frac{1}{w(h)} = e n^+(h) \cdot k^+(h) + e n^-(h) \cdot k^-(h) \quad [20]$$

*e* = Elementarladung

$n^+(h)$  = Anzahl der  $\frac{\text{positiven}}{\text{negativen}}$  Kleinionen in der Höhe *h*

$k^+(h)$  = Beweglichkeit der  $\frac{\text{positiven}}{\text{negativen}}$  Kleinionen in in der Höhe *h*,

wo die Ionenzahlen  $n^+(h)$  und  $n^-(h)$  durch das Zusammenwirken von Ionenbildung und Ionenvernichtung gesteuert werden. Unterscheiden wir der Einfachheit halber nur die zwei Ionenarten der Kleinionen und der Grossionen, so gilt die Wiedervereinigungsbeziehung.

$$\frac{dn(h)}{dt} = q(h) - \alpha \cdot n^2(h) - \beta \cdot n(h) \quad [21]$$

*q* = Ionisierungsstärke in Ionenpaaren pro cm<sup>3</sup> und Sekunde

*α* = Wiedervereinigungskoeffizient der Kleinionen unter sich =  $1,6 \cdot 10^{-6}$

*β* =  $\eta N(h) + \eta_0 N_0(h)$

wo *η* bzw. *η*<sub>0</sub> die Wiedervereinigungskoeffizienten zwischen Kleinionen und Grossionen umgekehrten Vorzeichens bzw. ungeladenen Suspensionen dieser Grösse und *N*(*h*) und *N*<sub>0</sub>(*h*) deren Zahl pro cm<sup>3</sup> bedeuten

aus der sich durch Integration leicht Grösse und Geschwindigkeit der Änderungen von *n*(*h*) in Abhängigkeit von Variationen der Ionisierungsstärke *q*(*h*) und des Suspensionsgehaltes *N*(*h*) bzw. *N*<sub>0</sub>(*h*) ableiten lassen. Einzelheiten dazu s.u.a. bei H. ISRAEL (<sup>1 3 7</sup>) und bei C. G. STERGIS (<sup>8</sup>).

C) *Separierung der Einzeleinflüsse.*

Die Betrachtungen des vorigen Abschnittes lassen einige wesentliche Mechanismen für die Steuerung des atmosphärisch-elektrischen Geschehens durch meteorologische Einwirkungen erkennen. Die bis jetzt

betrachteten Reaktionen des luftelektrischen Feldes lassen sich danach entweder:

1. aus der Beeinflussung der Gesamt-Potentialdifferenz  $V$  des atmosphärischen Kondensators bzw;
2. aus Änderungen der Leitfähigkeits- und Widerstandswerte  $A(h)$ ,  $w(h)$  und  $R$  der Atmosphäre

oder aus gleichzeitig erfolgenden Veränderungen in beiden Bereichen herleiten. Dies legt eine Separierung der beiden Einflussbereiche in folgender Weise nahe:

Da die Variationen von  $V$  weltweiter Natur sein müssen — innerhalb der luftelektrischen Ausgleichsschicht bzw. der Ionosphäre sind bei den hohen Leitfähigkeiten in diesen Schichten keine horizontalen Potentialunterschiede denkbar — haben wir die Ursachen für den erstgenannten Steuerungsbereich in den weltweit wirkenden Generatoren der Gewittertätigkeit in den verschiedenen Teilen der Welt zu sehen.

Demgegenüber können Änderungen von  $A(h)$  bzw.  $w(h)$  und  $R$  nur in enger begrenztem Raum Bedeutung haben. Denn sie würden, wie man sich leicht überzeugt, selbst dann, wenn sie an einem Ort bzw. in einem Gebiet erhebliche Wandlungen erfahren, für den Widerstand des Gesamtsystems Erde — Ionosphäre keine spürbare Änderung bedingen können.

Wir können also grundsätzlich eine Separierung der beiden Einflussbereiche in der Weise vornehmen, dass wir einerseits die  $V$ -Variationen, andererseits die  $A(h)$ -,  $w(h)$ - oder  $R$ -Variationen voneinander zu trennen versuchen.

Ein erster Annäherungsschritt dazu ist der, bei  $V$ , also im weltweit wirkenden Steuerungsbereich, nur die langsam verlaufenden Variationen zu behandeln, bei den Änderungen von  $A(h)$ ,  $w(h)$  und  $R$  dagegen nur die kurzzeitigen Vorgänge in Betracht zu ziehen. Eine solche Gruppierung ist weniger willkürlich, als es auf den ersten Blick scheinen mag, da man im ersten Bereich vor allem den Tages- und Jahresgängen, im zweiten vor allem der luftelektrischen « Unruhe » begegnet.

Man kann so in anschaulicher — wenn auch nicht strenger — Weise bis zu einem gewissen Grade die Begriffe der « globalen » und der « lokalen » Steuerung identifizieren mit den Begriffen der stationär verlaufenden und der nichtstationär verlaufenden Variationen auf atmosphärisch-elektrischem Gebiet.

Eine angenäherte Abgrenzung der beiden Bereiche gegeneinander ergibt sich aus dem mittleren Wert der Zeitkonstante:  $A(h)$  hat in den

unteren Atmosphärenschichten im Mittel einen Wert von etwa  $3 \cdot 10^{-14} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$  <sup>(9)</sup>; daraus lässt sich eine mittlere Zeitkonstante von  $A(h)/\varepsilon = 3,4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{sec}}$  bzw. eine Halbwertszeit von etwa 200 sec ableiten. Änderungsvorgänge, die sich über *wesentlich* grössere Zeiträume erstrecken, ermöglichen ein stationäres Folgen des  $E_t(h)$ , solche, die in kürzeren Zeiträumen ablaufen, dagegen nicht.

Für sprunghafte Änderungen in den steuernden Elementen lässt sich danach sagen, dass sich das atmosphärisch-elektrische Feld in der Regel im gesamten atmosphärischen Bereich (\*) dem durch die Änderung vorgeschriebenen stationären Endzustand bis auf 10% (1%) innerhalb von rund 11 Minuten (rund 22 Minuten) annähert.

Bei stetigen Änderungen kann eine Aussage über die Abgrenzung des quasistationären und des nicht-stationären Bereiches gegeneinander dadurch versucht werden, dass man vom Ohm-schen Gesetz ausgeht (vergl. 10):

Das allgemeine Ohm-sche Gesetz («Wechselstromform») lässt sich hier wie folgt schreiben:

$$i = E \sqrt{A^2 + \omega^2 \varepsilon^2} \quad [22]$$

$i$  = Stromdichte (Leitungsstrom plus Verschiebungsstrom)

$E$  = Feldstärke

$A$  = Leitfähigkeit

$\omega = 2\pi/T$  ( $T$  = Periodendauer der sinusförmigen Schwankung)

$\varepsilon$  = Dielektrizitätskonstante = Kapazität des Einheitswürfels («spezifische Kapazität») <sup>(5 6)</sup>.

Bestimmt man nun auf Grund von Gleichung (22) die Frequenz, für die der zweite Summand unter der Wurzel ( $\omega^2 \varepsilon^2$ ) weniger als 10% des ersten Summanden ( $A^2$ ) ausmacht, so kann dies als Frequenzgrenze für die Erfüllung stationärer Variation gewertet werden.

Unter Verwendung der oben erwähnten mittleren Zeitkonstante von  $\tau(h) = 3,4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{sec}}$  ergibt sich danach für die unteren Atmosphärenschichten eine Höchsfrequenz von  $1,7 \cdot 10^{-4}$  entsprechend einer Mindestperiodendauer von etwa  $1 \frac{3}{4}$  Stunden. Wir wollen dies als Grenze zwischen dem stationären und dem nicht-stationären Bereich werten.

(\*) Da die atmosphärische Leitfähigkeit in der Regel monoton mit der Höhe zunimmt <sup>(1)</sup>, kann man sagen, dass der stationäre Endzustand überall in der Säule erreicht ist, wenn die Umbildungsvorgänge in den bodennahen Schichten ihr Ende gefunden haben.

D) *Ergänzungen.*

Das bisher entwickelte Bild der luftelektrisch-meteorologischen Zusammenhänge stellt eine vereinfachende Abstraktion dar und muss zur Verallgemeinerung noch in einem wesentl. Punkt ergänzt werden: Wir haben bisher nur den weltweiten luftelektrischen Stromkreis betrachtet und dabei seinen globalen « Generatorteil » zu den stationär verlaufenden Feldreaktionen, seinen vom lokalen Modifikationen durchsetzten « Verbraucherteil » zu den nichtstationären Änderungen in Beziehung gesetzt — vergleiche dazu das in Abb. 3 gegebene Ersatzschaltbild.

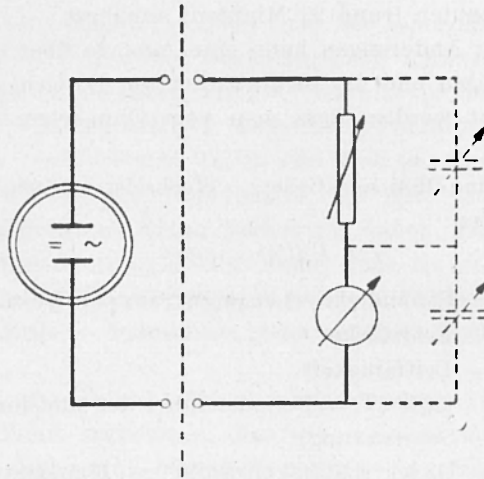


Abb. 3 - Ersatzschaltbild des weltweiten luftelektrischen Stromkreises. Links: « Generatorteil »; Recht: « Verbraucherteil » (11).

Wir müssen diese Aufgliederung der atmosphärisch-elektrischen Vorgänge in « Generatoren » und « veränderliche Schaltelemente » (\*) in der Weise verallgemeinern, dass wir Entsprechendes auch in engerer räumlicher Begrenzung zulassen (12): Damit ergeben sich grundsätzlich eine Reihe weiterer Kombinationsmöglichkeiten, die wir etwa nach Art der in Abb. 4 dargestellten Ersatzschaltbilder klassifizieren können.

(\*) Wir bezeichnen dabei als « Generatoren » alle Ladungsbewegungen durch nichtelektrische Kräfte, während die Atmosphärenteile, in denen der Widerstand bzw. die Leitfähigkeit Änderungen erfahren, als veränderliche Schaltelemente zu bezeichnen sind.

Dem dynamischen Charakter des luftelektrischen Geschehens entsprechend lässt sich das elektrische Verhalten der Atmosphäre durch das von entsprechenden « CR-Gliedern » (Widerstände mit parallel geschalteten Kapazitäten) ersetzen, wie dies in der Abbildung für verschiedene Atmosphäreneigenschaften zwischen dem Erdboden (schräg schraffiert) und der luftelektrischen Ausgleichsschicht in der hohen Stratosphäre (vertikal schraffiert) dargestellt ist.

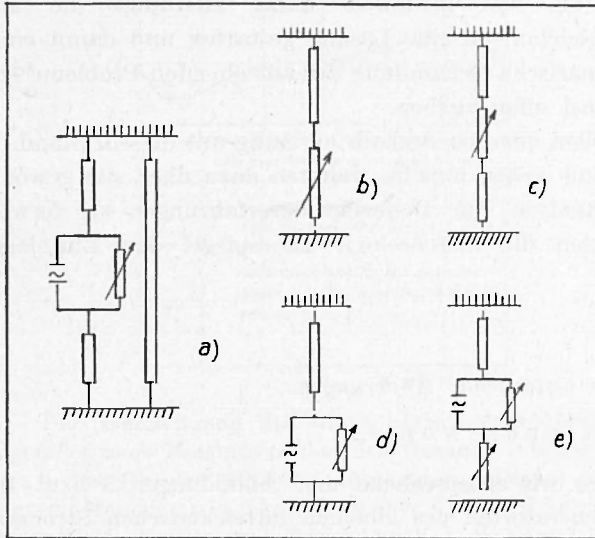


Abb. 4 - Schematische Ersatzbilder für luftelektrisch-meteorologische Verbindungen im Zusammenwirken von Generatoren und veränderlichen Schaltelementen nach H. ISRAEL (3, 12).

Die Teilbilder *a...e* der Abb. 4 stellen zunächst nochmals die bereits behandelten weltweiten Zusammenhänge zwischen Weltgewittertätigkeit und luftelektrischem Geschehen dar: Im Fall *a* wären nur  $V$  variabel, während in den Fällen *b* und *c* noch Variationen von  $w(h)$  und  $R$  durch wetterbedingte Aerosoländerungen in Bodennähe (*b*) oder in höheren Schichten (*c*) hinzukommen, die das Ersatz-CR-Glied ändern. Wir haben also in beiden Fällen den weltweit wirkenden Generator mit veränderlichen Schaltelementen kombiniert.

In den Teilbildern *d* und *e* ist noch die angedeutete Verallgemeinerung durch den Einbau weiterer Generatoren in Bodennähe (*d*) bzw. in der Höhe (*e*) vorgenommen.

### III. – METEOROLOGISCHE STEUERUNGEN IM ATMOSPHERISCH-ELEKTRISCHEN BEREICH. (*Beispiele, Probleme und Folgerungen*).

Mit den oben skizzierten grundsätzlichen Möglichkeiten für luftelektrische Reaktionen auf meteorologische Steuerungsvorgänge sind die Mechanismen, die diese Koppelung verursachen, weitgehend zu verstehen. Ob und inwieweit dabei allerdings die auftretenden Differentialgleichungen eine Lösung gestatten und damit eine geschlossene mathematische Behandlung der anstehenden Probleme ermöglichen, muss zunächst offen bleiben.

Wir wollen uns hier deshalb vorläufig mit diesem Stand der Theorie begnügen und gehen nun im weiteren dazu über, die gewonnenen Ansätze zur Analyse von Beobachtungserfahrungen zu verwenden, also gewissermassen die Meteorologie im Spiegel der Luftelektrizität zu betrachten.

#### A) *Stationär verlaufende Änderungen.*

##### 1. VARIATIONEN VON $V$ .

Beginnen wir entsprechend den Abbildungen 3 bzw. 4a zunächst mit dem Generatorteil des globalen luftelektrischen Stromkreises, d.h. mit den Variationen von  $V$ . Sie treten als Tagesgänge, interdiurne Veränderlichkeiten und Jahresgänge in Erscheinung und resultieren, wie bekannt, aus Schwankungen der Weltgewittertätigkeit im Laufe des Tages, von einem Tag zum anderen und im Laufe des Jahres. Sie bestimmen das luftelektrische Verhalten massgeblich in den Zeiten und Gebieten, in denen aerosoländernde meteorologische Einflüsse und örtliche Generatoren fehlen bzw. zurücktreten, wie dies vor allem auf den Ozeanen und in höheren Atmosphärenschichten bei klarem Wetter der Fall ist.

Wir kennen die luftelektrischen Reaktionen auf Tagesschwankungen von  $V$  als die auf der ganzen Erde phasengleich verlaufende sog. « Weltzeitperiode » des luftelektrischen Potentialgefälles bzw. Vertikalstromes, wie sie zuerst in den bekannten Messfahrten der Carnegie-Institution auf den Ozeanen entdeckt und inzwischen auch für Bergstationen<sup>(13 14)</sup> und kürzlich für die freie Atmosphäre<sup>(15)</sup> bestätigt worden sind (vergl. zum letzteren Abb. 5). Weitere ausführliche Untersuchungen über die Korrelation zwischen der globalen Gewittertätigkeit und dem luftelektrischen

Vertikalstrom sind in den letzten Jahren im Küstengebirge Kaliforniens und über dem pazifischen Ozean von R. E. HOLZER und seinen Mitarbeitern ausgeführt worden (16).

Untersuchungen zur interdiurnen Ionenveränderlichkeit von  $V$  von H. ISRAËL und E. THEUNISSEN (17 18 19) zeigen, dass es erwartungsgemäss

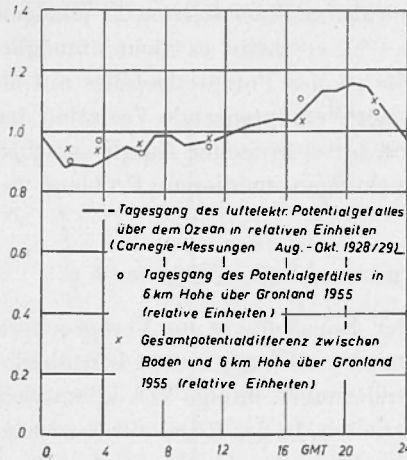


Abb. 5 - Der Weltzeitgang des atmosphärisch-elektrischen Potentialgefälles nach Messungen über den Ozeanen (Carnegiefahrten August bis Oktober 1928/29, ausgezogene Kurve) und nach Flugzeug-Messungen in 6 km Höhe über Grönland (August/September 1955, Kreuze und Kreise) nach J. F. CLARK (15).

durchaus möglich ist, aufgrund von luftelektrischen Beobachtungen zu Aussagen über die Gewitteraktivität und ihre Änderungen von einem Tag zum anderen zu kommen, dass aber die Vorbedingungen dazu wegen der örtlichen meteorologischen Einflüsse an Landstationen nur verhältnismässig selten gegeben sind. — Da andererseits an solchen Angaben zur Gesamtgewitteraktivität sowohl wissenschaftliches wie auch praktisches Interesse besteht und da das meteorologische Beobachtungsnetz dafür viel zu weitmaschig ist, bietet sich hier eine wichtige Aufgabe für die Luftelektrizität. Wegen der « Anfälligkei » der Boden-Beobachtungen rückt die Durchführung dessen in den luftelektrisch-aerologischen Bereich. Spezialuntersuchungen dazu sind auf weltweit-synoptischer Basis (19) erstmals im AGI begonnen worden.

Der Jahresgang von  $V$ , in dem die jahreszeitliche Schwankung der Gesamt-Gewitteraktivität zum Ausdruck kommt, spiegelt sich in einem

Jahresgang des luftelektrischen Potentialgefalles wieder, der bei etwa 30% Amplitude auf der ganzen Erde seinen grössten Wert im Nord-Winter und seinen kleinsten im Nord-Sommer durchläuft <sup>(20)</sup>.

In diesem Zusammenhang ist auch die von L. A. BAUER aufgefundene — allerdings noch umstrittene (s.z.B. <sup>(3)</sup>) — 11-jährige Periode des luftelektrischen Potentialgefalles zu erwähnen <sup>(21)</sup>. Da auch in der Gesamt-Gewitteraktivität Ansätze zu einer solchen 11-jährigen Periode zu erkennen sind (vergl. z.B. <sup>(22)</sup>), erscheint es nicht unmöglich, dass auch diese langperiodische Variation des Potentialgefalles auf eine von der Gewittertätigkeit her gesteuerte entsprechende Variation der Potentialdifferenz  $V$  zwischen Erde und luftelektrischer Ausgleichsschicht zurückzuführen ist. Weitere Untersuchungen zu diesem Problem wären erwünscht.

## 2. Variationen von $R$ und $w(h)$ .

Die Mehrzahl der Einzeleffekte im Verbraucherteil findet ihre Erklärung in Änderungen der atmosphärischen Leitfähigkeitsverhältnisse, die sich aus Aerosolveränderungen infolge von klimatischen und meteorologischen Einflüssen herleiten. In der Regel werden durch solche Wirkungen sowohl der spezifische Widerstand  $w(h)$  der Luft am « Wirkungsort »  $h$  wie auch gleichzeitig der Säulenwiderstand  $R$  beeinflusst. Man kann deshalb keine scharfe Trennung zwischen diesen beiden Möglichkeiten durchführen, sondern muss immer ihre durch die Beziehung

$$R = \int_0^H w(h) dh \quad [2]$$

gegebene Koppelung im Auge behalten.

Trotzdem wird man häufig je nach Art, Erstreckung und Lage des aerosoländernden Einflusses bezüglich des Messortes in der Einzelreaktion des Potentialgefalles  $E_i(h)$  mehr den Einfluss einer Veränderung des Gesamtwiderstandes  $R$  einer vertikalen Luftsäule oder mehr den einer Veränderung des spezifischen Widerstandes  $w(h)$  am Messort erkennen können. Im folgenden sind für beide Grenzfälle Beispiele gegeben:

### a) Änderungen von $R$ .

Abb. 6 zeigt den bekannten *Breiteneffekt* des luftelektrischen Potentialgefalles, wie er sich aus den Messungen der Carnegie-Insitution ergibt <sup>(23)</sup>. Seine Deutung lässt sich leicht geben: Die Ionisationswirkung der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre zeigt als Folge der Wir-

kung des erdmagnetischen Feldes auf die geladenen Primarteilchen eine deutliche Abnahme vom Pol zum Äquator. Dies wirkt sich als entsprechende Zunahme der Werte des columnar resistance vom Pol zum Äquator hin aus. Ermittelt man danach die Potentialgefällewerte für verschiedene Breiten unter Zugrundelegung eines für die ozeanische Äquatorialzone anzunehmenden Wertes von 120 V/m, so erhält man die in der Abb. 6 eingetragene Linie, die mit dem Messbefund (Kreise) in guter Übereinstimmung ist.

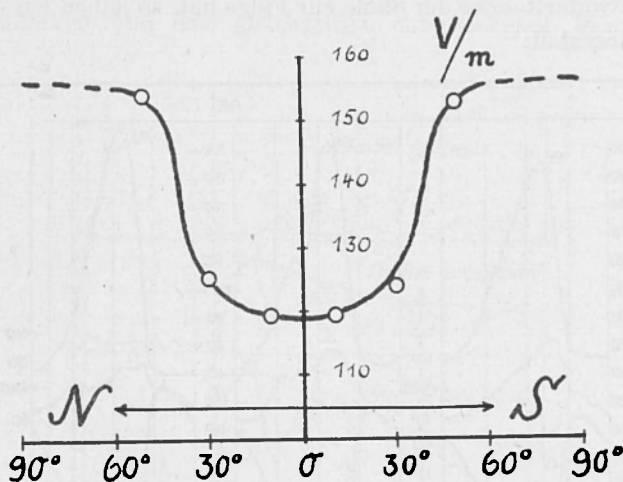


Abb. 6 - Der « Breiteneffekt » des luftelektrischen Potentialgefälles über den Ozeanen. Kreise: Mittelwerte der Carnegie-Messungen <sup>(24)</sup>. Linie: Berechnete Werte (berechnet unter Berücksichtigung der Breiteneffektes der kosmischen Strahlung) <sup>(3)</sup>.

In entsprechender Weise sind Reaktionen des luftelektrischen Potentialgefälles auf den Vorbeizug vulkanischer Eruptionswolken zu deuten, wie sie von H. HATAKEYAMA <sup>(25)</sup> beschrieben sind. Auch hier dürfte es sich vor allem um Veränderungen des columnar resistance im Bereich einer solchen Wolke handeln — wenn natürlich auch die Möglichkeit eines eventuellen zusätzlichen Ladungseinflusses einer solchen Wolke dabei nicht ausgeschlossen ist.

In den gleichen Zusammenhang gehört die Beobachtungserfahrung, dass das luftelektrische Potentialgefälle bei Vorhandensein von nicht regnender Bewölkung im Mittel um 10-20% niedriger ist als bei klarem Himmel <sup>(2)</sup>. Die Leitfähigkeitsverminderung im Bereich der

Wolken wirkt vergrößernd auf den Säulenwiderstand  $R$  ein, was ebenso wie in den oben besprochenen Fällen bei gleichem  $V$  und unverändertem  $w(h)$  am Messort eine Verminderung des Potentialgefalles bedingt.

b) *Änderungen von  $w(h)$ .*

Werden der Ionisationszustand, die Aerosolverhältnisse oder beide am Messort berandert, ohne dass dies einen nennenswerte Änderung des Gesamtwiderstandes der Saule zur Folge hat, so haben wir damit den anderen Grenzfall.

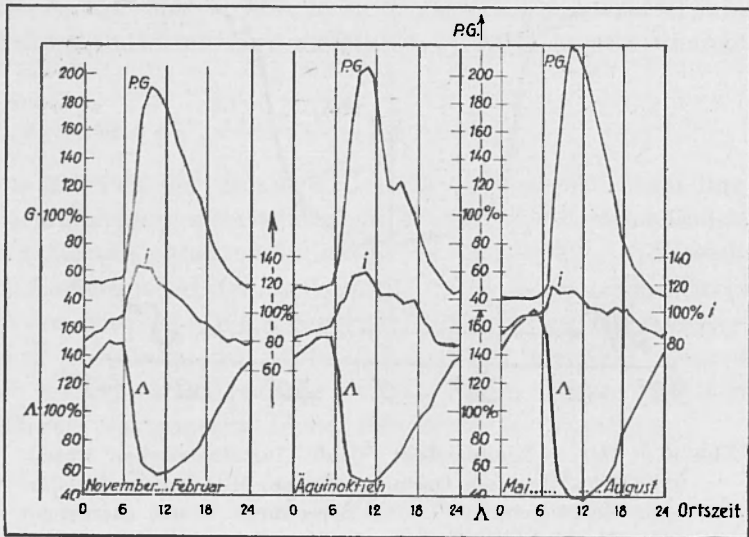


Abb. 7 - Mittlere Tagesgänge von Potentialgefälle, Leitfähigkeit und Vertikalstrom in Huancayo im Winter, während der Äquinoktien und im Sommer (Prozentualdarstellung) (berechnet nach <sup>(26)</sup>).

Abb. 7 zeigt als erstes Beispiel für diesen Fall die Tagesgänge der drei luftelektrischen Elemente Potentialgefälle, Leitfähigkeit und Vertikalstrom in Huancayo/Peru. In allen drei Jahreszeiten (Winter, Äquinoktien und Sommer) stehen sich überraschend grosse Tagesvariationen von Potentialgefälle und Leitfähigkeit und nur ganz geringe Variationen des Vertikalstromes gegenüber. Da letzterer den Quotienten aus Gesamtpotentialdifferenz  $V$  und columnar resistance  $R$  darstellt, ist daraus auf nur geringe Tagesvariation von  $R$  zu schliessen. Da sich die starken Variationen von  $A$  und damit von  $w$  also offenbar auf  $R$  nicht merklich

auswirken, müssen sie auf eine nur dünne Schicht über dem Boden beschränkt sein, was auch mit der orographischen Situation in Einklang steht<sup>(26)</sup>. Der Verlauf von  $E$  wird in diesem Fall also praktisch allein durch den von  $w$  bestimmt.

Andere Beispiele dessen bieten die Änderungen des Potentialgefälles, die heute gelegentlich im Zusammenhang mit radioaktiven Veränderungen beobachtet werden:

1) So berichtet D. L. HARRIS über eine markante Erhöhung der Luft-Leitfähigkeit und eine gleichzeitige entsprechende Verminderung

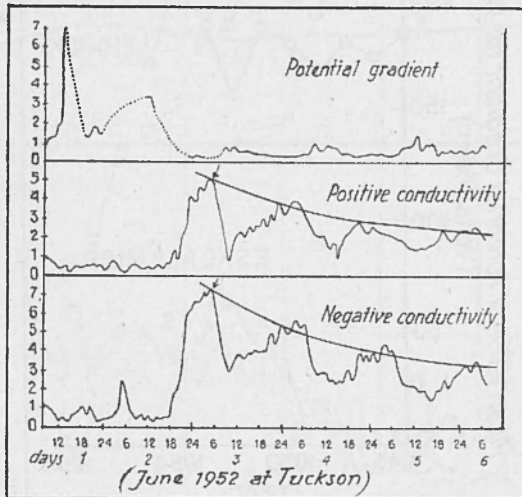


Abb. 8. – Verlauf von Potentialgefälle, positiver und negativer polarer Leitfähigkeit in Tucson, Arizona, in der Zeit vom 1.-6. Juni 1952<sup>(27)</sup>.

des Potentialgefälles in Tucson, Arizona infolge ungewöhnlich hoher Werte des radioaktiven «Fallout» nach Kernwaffenversuchen in Nevada<sup>(28)</sup>. Abb. 8 zeigt den Verlauf der genannten Elemente während eines Zeitraumes von 6 Tagen und lässt die allmähliche «Erholung» der luftelektrischen Elemente im Zuge des Zerfalls der abgelagerten Radioaktivität erkennen.

2.) E. T. PIERCE<sup>(29)</sup> berichtet über eine Abnahme des mittleren Potentialgefälles in Eskdalemuir (Schottland) auf etwa die Hälfte seines früheren Wertes, die auf eine entsprechende Vermehrung der radioaktiven Strahlung in diesem Gebiet hindeutet (vergl. Abb. 9). Da an den zum

Vergleich herangezogenen Stationen Lerwick (Shetlands-Inseln) und Kew (London) diese Potentialgefälleverminderung nicht (Lerwick) bzw. nur in geringfügigem Masse (Kew) beobachtet wird, vermutet E. T. PIERCE, dass die Verminderung in Eskdalemuir mit einer vom englischen Atomwerk Windscale (ca 100 km sudwestlich, d. h. im Luv der vorherrschenden Windrichtung gelegen) ausgehenden radioaktiven Verseuchung zusammenhängen könnte (\*).

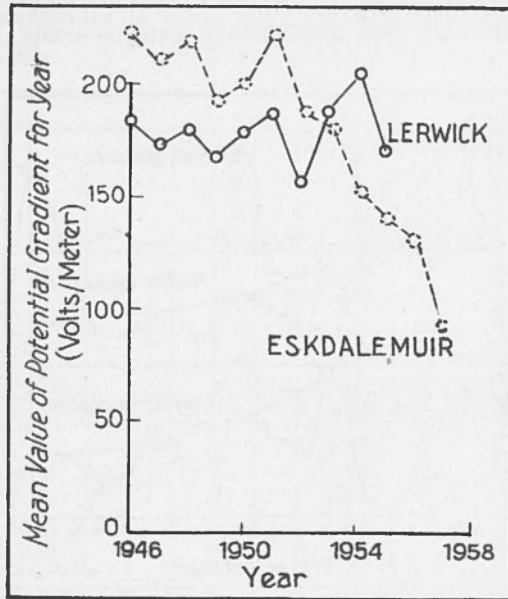


Abb. 9. – Verlauf der Jahresmittel des atmosphärischelektrischen Potentialgefälles von 1946 bis 1958 in Lerwick (Shetlands-Inseln) und Eskdalemuir (Schottland) nach E. T. PIERCE (28).

3.) A. OSTER (29) findet in Aachen eine deutliche Beeinflussung von Potentialgefälle und Leitfähigkeit in Bodennähe durch die von Niederschlägen zum Boden gebrachte Radioaktivität (Erhöhung der Leitfähigkeit, Verminderung des Potentialgefälles). Die beiden Abbildungen 10 und 11 zeigen im unteren Teil den Verlauf der genannten

(\*) (Anm. b. d. Korrektur) Vergleiche indes hierzu die inzwischen erschienene Arbeit von N. G. STEWART (48), in der eine andere Erklärung versucht wird.

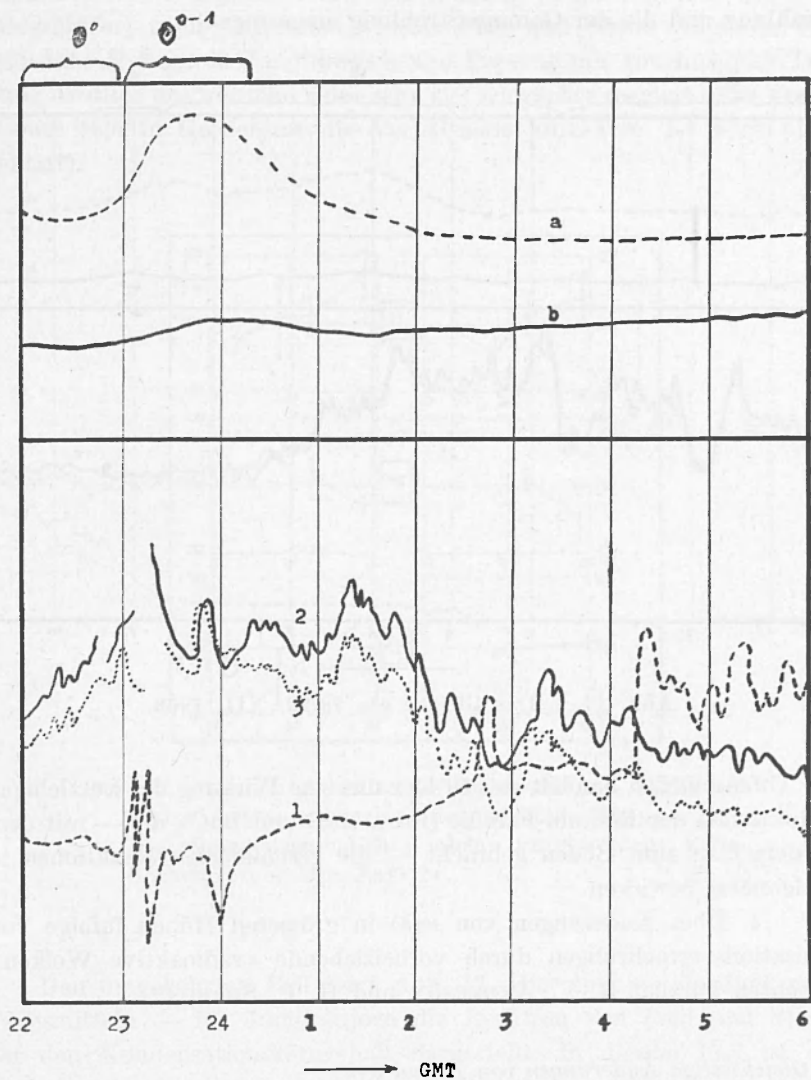


Abb. 10. - Das Verhalten von Potentialgefälle (Kurve 1), den beiden polaren Leitfähigkeiten (Kurve 2 und 3), der  $\beta + \gamma$ -Strahlung (Kurve a) und der  $\gamma$ -Strahlung (Kurve b) bei und nach Regen (Aachen, den 12/13. XII. 1958).

Elemente. Zum Vergleich sind im oberen Teil die Regenzeiten sowie die mit frei exponierten Zählrohren bestimmten Werte der  $\beta + \gamma$  - Strahlung und die der Gamma-Strahlung eingetragen.

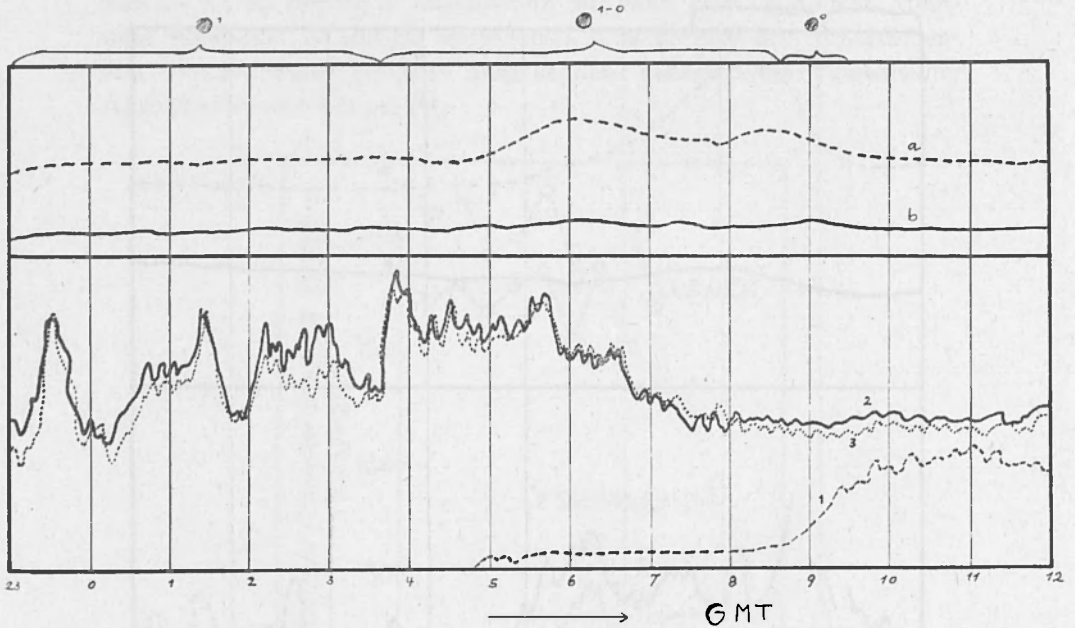


Abb. 11. - Das Gleiche am 28/29. XII. 1958.

Offensichtlich handelt es sich hier um eine Wirkung der kurzlebigen Induktionen der Radium-Familie (RaA, RaB und RaC), die — mit dem Niederschlag zum Boden gebracht — die geschilderten Reaktionen in Bodennähe bewirken.

4. Über Änderungen von  $w(h)$  in grosseren Hohen infolge von Ionisationsvermehrungen durch vorbeiziehende «radioaktive Wolken» berichten kürzlich R. V. ANDERSON und G. P. SERBU<sup>(30)</sup>.

c) *Gleichzeitige Änderungen von  $R$  und  $w(h)$ .*

Sind Variationen der beiden Widerstandsgrössen  $R$  und  $w(h)$  gleichzeitig anzunehmen, so lässt sich in der Regel ein Weg finden, um festzustellen, welche der beiden Möglichkeiten in ihren Wirkungen überwiegt.

Ein anschauliches Beispiel dafür bietet das Verhalten von Potentialgefalle und Vertikalstromdichte im Hochgebirge im Zusammenhang mit dem Trübungsfaktor und dem Kondensationskerngehalt<sup>(31)</sup>:

Abb. 12 zeigt das mittlere Verhalten von Potentialgefälle und Vertikalstromdichte gegenüber der Lufttrübung (definiert durch den Trübungsfaktor) nach Tagesmittelwerten. Feld und Strom reagieren verschieden:  $E$  steigt in Jungfraujoch und Payerne mit zunehmender Trübung deutlich an, während  $i$  nur sehr viel schwächer reagiert. (Die Frage, warum sich in Gornergrat die Verhältnisse umkehren, ist noch nicht geklärt).

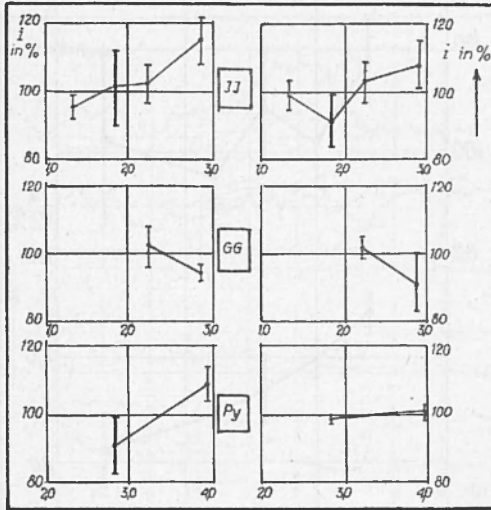


Abb. 12. — Potentialgefälle, Vertikalstrom und Trübungsfaktor; dick ausgezogen: Potentialgefälle; dünn ausgezogen: Vertikalstromdichte; oben: Jungfraujoch; Mitte: Gornergrat; unten: Payerne.

Den umgekehrten Fall zeigt Abb. 13. Hier sind — ebenfalls nach Tagesmitteln — für Jungfraujoch die Reaktion von Feld und Strom auf den Kondensationskerngehalt dargestellt. In diesem Fall ist die Reaktion des Potentialgefälles uneinheitlicher (nur schwache Abnahme bei starker Streuung) während sich beim Vertikalstrom eine eindeutige Abnahme mit zunehmendem Kondensationskerngehalt ergibt.

Zur Deutung dessen ist folgendes zu sagen: Da hier stationäre Verhältnisse bzw. stationär verlaufende Änderungen anzunehmen sind, dürfen die Gleichungen 1-4 angewandt werden. Aus dem Vergleich des Verhaltens von  $E$  und  $i$  ist also zu folgern:

1. Ändern sich  $E$  und  $i$  gleichsinnig und gleichartig, so rührt dies in der Regel von einer Änderung von  $V$  bei unverändertem  $R$  und  $w$  her, zeigt also eine Globaländerung an. (Der Fall, dass sich  $V/R$  ändert bei konstantem  $w$  ist zwar möglich, aber sehr unwahrscheinlich).

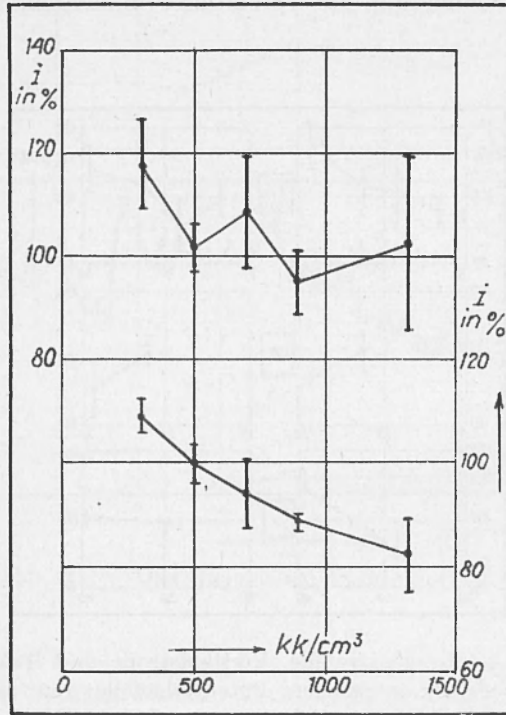


Abb. 13 – Potentialgefälle, Vertikalstromdichte und Kondensationskernzahl auf Jungfrauoch (nach Tagesmittelwerten).

2. Verhalten sich dagegen  $E$  und  $i$  verschieden, so liegt der Grund in Änderungen von  $w$  und  $R$ , also im lokalen Bereich.

Danach sind in beiden Fällen örtliche, d.h. meteorologische Einflüsse für die in den Abbildungen 12 und 13 dargestellten Variationen verantwortlich. Der Vergleich des Verhaltens von  $E$  und  $i$  lässt ausserdem den Schluss zu, dass im ersten Fall (Trubungsfaktor) offensichtlich  $w$  stärker als  $R$  reagiert, dass die störenden Einflüsse also von Aerosolanänderungen in einer relativ dünnen unteren Schicht herrühren müssen. Im anderen Fall dagegen (Kondensationskerngehalt) werden offenbar  $w$

und  $R$  gleichzeitig und in ähnlicher Weise modifiziert, *m.a.W.* also die Widerstandsverhältnisse einer verhältnismässig mächtigen Schicht verändert.

In entsprechender Weise lassen sich alle von Aerosoländerungen herrührenden luftelektrischen Variationen verstehen, wie sie in den bekannten Zusammenhängen zu Windstärke und-richtung, Sicht, Luftmassenwechsel, Fohn, Ostwetterlage u.a. Erscheinungen ihren Ausdruck finden (s.z.B. (1)). Ferner schliesst hier das heute stark im Fluss befind-

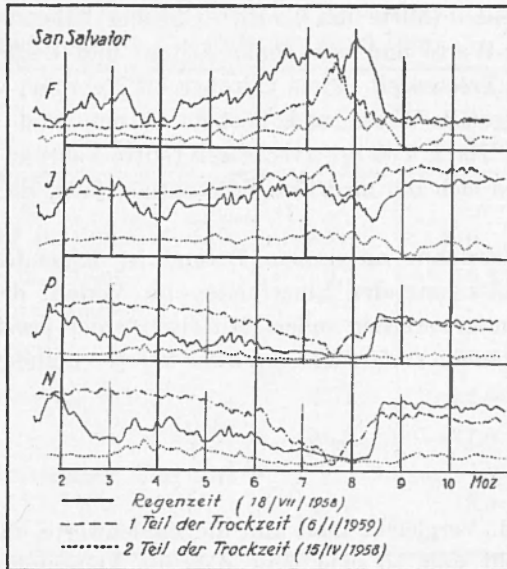


Abb. 14. – Typische Registrierungen von Potentialgefälle (F), Vertikalstrom (J), positiver (P) und negativer (N) Leitfähigkeit in San Salvador, jeweils für die Zeit von 2.00 bis 10.00 Uhr.

Ausgezogene Kurven: Regenzeit (Registrierungen von 18.7.1958).  
 Gestrichelte Kurven: Trockenzeit, 1. Teil (Registrierungen vom 6.1.1959).  
 Punktierte Kurven: Trockenzeit, 2. Teil (Registrierungen vom 15.4.1958).

liche Gebiet der luftelektrischen Aerologie an, das den luftelektrischen Aufbau in der Vertikalen in seiner Abhängigkeit von der atmosphärischen Schichtenbildung und vom Austausch untersucht (s.z.B. (13<sup>10</sup> 32 32 31)).

Ein anderes Beispiel, das aus dem Bereich unserer luftelektrischen Erfahrungen während einer AGI-Expedition nach San Salvador stammt (35) Erfahrungen während einer AGI-Expedition nach San Salvador stammt, bringt gleichzeitig eine neue Variante in die Betrachtung: Die in San

Salvador erhaltenen Registrierungen lassen auf eine deutliche jahreszeitlich gebundene Dreiteilung im luftelektrischen Verhalten schliessen:

Abb. 14 zeigt drei Registrierungen, die diese Dreiteilung deutlich erkennen lassen. Ausgewählt sind ein typischer Tag aus der Regenzeit (18.7.1958, ausgezogene Kurven), ein Tag aus dem 1. Teil der Trockenzeit (6.1.1958, gestrichelt) und ein Tag aus dem 2. Teil der Trockenzeit (15.4.1958, punktiert) (\*).

Dargestellt ist jeweils die Zeit von 2.00 bis 10.00 Uhr vormittags, weil diese auch in der Regenzeit in der Regel wolken- und gewitterfrei ist.

*In der Regenzeit* (Mitte Mai bis Mitte Oktober) haben wir die höchsten Potentialgefälle-Werte und mittelhohe Strom- und Leitfähigkeitswerte. *Im 1. Teil der Trockenzeit* (Mitte Oktober bis Februar) werden mittelhohe Potentialgefälle-Werte und höchste Strom- und Leitfähigkeitswerte gefunden. *Im 2. Teil der Trockenzeit* (Mitte Februar bis Mitte Mai) dagegen ergeben sich die niedrigsten Potentialgefälle, Strom- und Leitfähigkeitswerte.

Das überraschende an diesem Befund ist folgendes: Bildet man unter Vernachlässigung der Einzelheiten im Verlauf der Kurven, die hier nicht diskutiert werden sollen, Mittelwerte der jeweiligen Kurvenstücke, so darf man erwarten, dass diese Werte einander entsprechend der Beziehung

$$E = \frac{w}{R} \cdot V \quad [4]$$

zugeordnet sind. Vergleicht man nun die Zahlenwerte, die in Tabelle 1 zusammengestellt sind, so sieht man, dass die Änderung von Regenzeit zu Trockenzeit I durchaus im erwarteten Sinn erfolgt: Das Potentialgefälle nimmt ab bei Zunahme der Leitfähigkeit und Zunahme des Stromes. Allerdings sollte man erwarten, dass  $w$  etwa um den gleichen prozentualen Betrag abnimmt wie  $J = V/R$  zunimmt, da  $F$  praktisch unverändert bleibt. — Bei der Änderungen der Werte von Trockenzeit I zu Trockenzeit II gehen nun Potentialgefälle, Strom und Leitfähigkeit erheblich zurück, was nach Gleichung (4) *nicht* zu verstehen ist.

---

(\*) In den Tropen ist der Wetterablauf bekanntlich sehr viel gleichmässiger als bei uns. Das gleiche zeigt sich für das luftelektrische Verhalten, das sich in der betreffenden Jahreszeit Tag für Tag fast unverändert wiederholt. Deshalb kann dort ein einzelner Tagesgang zur qualitativen Charakterisierung des Jahreszeitentypus herangezogen werden, was in unseren Breiten bekanntlich nicht entfernt in diesem Masse möglich ist.

Über die mittleren Sichtverhältnisse während der drei betrachteten Jahreszeiten ergibt die Beobachtung, dass während der Regenzeit in der Regel klare Luft mit einer Sicht von ca. 100 km herrscht. Im 1. Teil der Trockenzeit nimmt die Sicht noch zu auf ca. 150 bis 250 km Sichtweite, um sich dann im 2. Teil der Trockenzeit auf 3 bis 5 km Sichtweite zu verschlechtern.

Tabelle 1 - MITTELWERTE DER LUFTELEKTRISCHEN ELEMENTE WAHREND DER JAHRESZEITEN: REGENZEIT; TROCKENZEIT, 1. TEIL; TROCKENZEIT, 2. TEIL; IN SAN SALVADOR (NACH TYPISCHEN REGISTRIERUNGEN, JEWEILS FÜR DIE ZEIT VON 02.00 BIS 10.00 UHR).

	Regenzeit	Trockenzeit	
		1. Teil	2. Teil
Potentialgefalle in V/m . . . . .	304	210	83
Vertikalstrom in pA/m <sup>2</sup> . . . . .	9,7	15,6	2,7
Leitfähigkeiten in 10 <sup>-15</sup> Ω <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>			
positiv polar . . . . .	19,1	35,0	7,1
negativ polar . . . . .	27,1	42,0	9,7
total . . . . .	46,2	77,0	16,8
Spezifischer Widerstand der Luft in 10 <sup>12</sup> Ω·m . . . . .	21,7	13,0	59,5

Der starken Vergrößerung von  $w$  (s. Tabelle 1) unterste Zeile, die natürlich auch eine Vergrößerung von  $R$  zur Folge hat, *müsste* also eine Zunahme — und nicht Abnahme (!) — von  $F$  gegenüberstehen.

Versucht man eine Erklärung für dieses Verhalten zu finden, so lassen sich dazu — vorbehaltlich der genaueren Auswertung des Gesamtmaterials — vorläufig nur Vermutungen aussprechen (\*).

Die eine Möglichkeit für eine Erklärung wäre die, anzunehmen, dass die Gesamtpotentialdifferenz  $V$  zwischen dem Erdboden und der luft-

(\*) Da die Registrierungen während der ganzen Messperiode in San Salvador mit der gleichen Apparatur, an der gleichen Stelle und unter gleicher äusserer Situation wie z.B. der Anbringung der Messfühler durchgeführt wurden, muss eine triviale Erklärung durch Messfehler oder Veränderung der Messumstände ausgeschlossen werden.

elektrischen Ausgleichsschicht im Bereich eines grossen Gewitterzentrums höher liegt als in seiner naheren und weiteren Umgebung.

Dies würde allerdings *wesentlich* andere Widerstandsverhältnisse im Gebiet der luftelektrischen Ausgleichsschicht und damit eine *wesentlich* grössere Zeitkonstante im globalen luftelektrischen Stromkreis bedingen, als wir nach bisherigen Erfahrungen annehmen. Diese Möglichkeit ist also auszuschliessen.

Eine zweite Möglichkeit bietet die Annahme, dass der Stromfluss von der luftelektrischen Ausgleichsschicht zur Erde nicht rein vertikal geschieht, sondern dass über der dem Erdboden aufliegenden Dunsthaube ein seitlicher Stromabfluss erfolgt. Auch das ist unwahrscheinlich, da die von H. Dolezalek<sup>(59)</sup> gegebene Formel für den «Übersprecheffekt» ein seitliches Ausweichen nur über eine sehr geringe Entfernung hin ermöglicht, während doch die Dunsthaube der Trockenzeit 2 mindestens die ganze mittelamerikanische Landbrücke überdeckt.

Eine dritte Möglichkeit ist grundsätzlich gegeben, wenn wir berücksichtigen, dass Gl. [4] nichts über das Vorhandensein eventuelier lokaler Generatoren aussagt (siehe oben, Abschnitt II D). Es wäre dann anzunehmen, dass — etwa im Zusammenhang mit der Ausbildung der Dunsthaube — in einiger Höhe über dem Erdboden negative Ladungen von einem lokalen Generator stationär gebildet werden. Diese würden entweder die natürlichen positiven Raumladungsschichten (s. o., Fussnote zu Gl. [6]) schwächen oder deren Vorzeichen geradezu umkehren. Der experimentelle Beweis für das Vorhandensein einer solchen Schicht steht allerdings noch aus.

#### B) *Instationäre Erscheinungen.*

Besonderes Interesse verdient und findet heute das Gebiet der instationären Variationen im luftelektrischen Bereich. In diesem Bereich treten zwei Erscheinungsgebiete in den Vordergrund, die ihrem Verhalten nach auf verschiedene Ursachen zurückgehen: Die luftelektrische Unruhe und die durch Entladungen hervorgerufenen Variationen.

Als *luftelektrische Unruhe* werden im allgemeinen alle Schwankungserscheinungen der luftelektrischen Grossen bezeichnet, die sich dem allgemeinen Verlauf dieser Grossen in mehr oder weniger unregelmässiger Art überlagern<sup>(36)</sup>. Es handelt sich dabei offensichtlich um die gleiche Erscheinungsart, die wir im meteorologischen Bereich z.B. beim Wind als Böigkeit oder bei der Temperatur als Temperatur-Unruhe kennen und hier wie dort als Turbulenzwirkung anzusprechen haben.

Die folgenden Abbildungen 15 und 16 zeigen Beispiele der Erscheinung bei verschiedenen luftelektrischen Elementen.

Abb. 15 gibt Registrierungen des luftelektrischen Potentialgefalles an vier aufeinanderfolgenden klaren Tagen in Buchau a. F. wieder, dabei

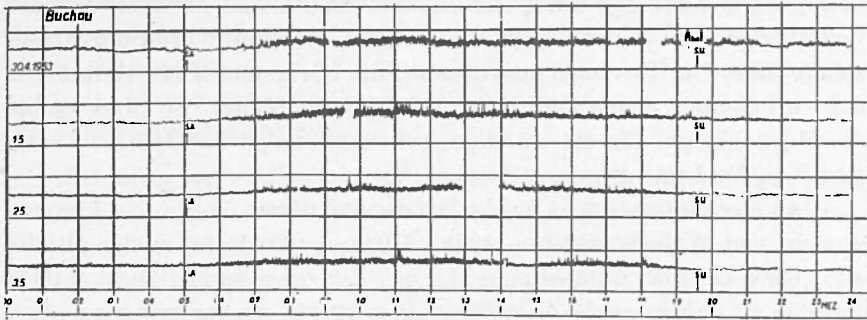


Abb. 15. - Registrierungen des luftelektrischen Potentialgefalles in Buchau a. F. an vier aufeinanderfolgenden klaren Tagen (30.4 bis 3.5.1953) nach H. W. KASEMIR (37).

ist der allgemeine Duktus der Tagesgänge von ständigen kleinen Schwankungen — eben der Unruhe — überlagert. Diese zeigt ausserdem einen deutlichen Tagesgang mit geringsten Werten bei Nacht und grössten bei Tag. — Bei Vertikalstromregistrierungen zeigt sich die gleiche Art der

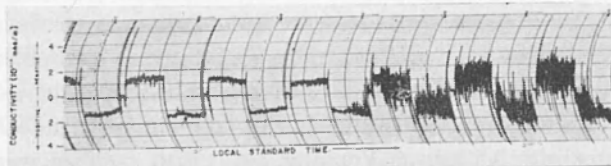


Abb. 16. - Registrierung der polaren atmosphärischen Leitfähigkeit (alternierend in halbstündigem Wechsel) in Argentinia, Neufundland, nach G. P. SERBU und E. M. TRENT (38). Dauer der Registrierung von 1.30 (links) bis 8.20 (rechts) Ortszeit.

Unruhe. Werden beide Registrierungen (Feld und Strom) am gleichen Ort ausgeführt, so ergeben sich in der Regel amplituden- und phasengleiche Unruhe-Variationen (38 37).

Abb. 16 zeigt die gleiche Erscheinung bei der Leitfähigkeit. Auch hier springt eine deutliche Unruhe-Änderung (Zunahme im Verlaufe der Registrierung) in die Augen.

Es liegt auf der Hand, diese Erscheinungen in folgender Weise mit der atmosphärischen Turbulenz in Verbindung zu bringen:

Luftkörper verschiedenen Ursprungs lassen sich bekanntlich in verschiedener Hinsicht luftelektrisch charakterisieren und unterscheiden<sup>(39 40)</sup>. Die entscheidende Rolle spielt dabei der Aerosolgehalt, der unter den jeweils gegebenen Ionisationsverhältnissen zu verschiedener Leitfähigkeit und damit zu verschiedenem Ladungsaufbau in der Atmosphäre führt<sup>(37)</sup>. Überträgt man dies auf die Klein- und Kleinstluftkörper der turbulenten atmosphärischen Bewegungsvorgänge, so sind damit die Möglichkeiten für die ständige Aufeinanderfolge der kleinen Variationen in Feld und Strom gegeben.

Der Mechanismus der Unruhe-Entstehung dürfte danach bei Vorhandensein von Wolken und bei klarem Himmel grundsätzlich der gleiche sein. Da jedoch bei wolkenlosem Himmel der die Raumladung « stabilisierende » Einfluss der Wolkentröpfchen fehlt<sup>(37)</sup>, ist zu erwarten, dass der Effekt in diesem Fall geringer ist als bei Vorhandensein von Wolken — wie es die Erfahrung auch zeigt<sup>(36)</sup>.

Die oben geschilderten Erfahrungen geben einen eindeutigen Hinweis auf die Ursachen für die unruheerzeugenden Mechanismen:

Eigenschaften der beschriebenen Art sind typische Charakteristika des allgemeinen Turbulenzcharakters atmosphärischer Vorgänge und speziell des atmosphärischen Massenaustausches. Diese Austauschvorgänge erzeugen Turbulenzkörper verschiedener Grösse, die bei verschiedenem Aerosolgehalt Bereiche unterschiedlicher Leitfähigkeit bilden und deshalb zu Trägern verschiedener Raumladungen werden, die dann bei ihrem Vorbeizug an der Station die Variationen von Feld und Strom hervorrufen. Damit findet auch die systematische Änderung der Unruhe-Frequenz im Laufe des Tages und Jahres eine einleuchtende Erklärung: Je wirksamer ein Austausch-Vorgang ist, umso rascher werden seine Turbulenzkörper aufeinander folgen; die Frequenz muss also mit zunehmender Unruhe kurzer werden — wie es auch der Fall ist.

Näheres zum Unruhe-Problem siehe bei H. ISRAEL<sup>(36)</sup>.

Die Unruhe-Erscheinungen der luftelektrischen Elemente bedürfen zu ihrer Erklärung der gleichzeitigen Berücksichtigung von Aerosolveränderungen *und* Generatorwirkungen (Ladungsbewegungen durch nichtelektrische Kräfte). Da eine eingehende Behandlung der Generatoren im atmosphärisch-elektrischen Bereich einer späteren Veröffentlichung vorbehalten ist, brechen wir die Behandlung dieses Zweiges der meteorologisch-luftelektrischen Verknüpfungen hier zunächst ab.

## IV. — ANWENDUNGEN.

Zum Abschluss mögen noch einige Bemerkungen angefügt werden zu der naheliegenden Frage, ob und in welcher Weise luftelektrische Untersuchungen im Rahmen praktisch-meteorologischer Aufgaben Anwendung finden können.

A) *Luftelektrische Synopsis.*

Die oben an zahlreichen Beispielen aufgezeigte enge Bindung der atmosphärischen Elektrizität an die Meteorologie hat nicht nur eine engere arbeitsmässige Verbindung zwischen beiden Gebieten zur Folge, sondern bringt auch die Notwendigkeit zur sinngemässen Übertragung von Arbeitsmethoden und Begriffen, die sich in der Meteorologie gebildet und bewährt haben, auf die luftelektrische Arbeit mit sich.

Diese Erweiterung der Tätigkeit auf luftelektrischem Gebiet vom «Einstationenbetrieb» zur «vergleichenden Netzarbeit», die sich seit einigen Jahren vollzieht, stellt sich in vieler Hinsicht in Analogie zur «synoptischen Betrachtung» des Wettergeschehens und wird deshalb auch als «luftelektrische Synopsis» bezeichnet.

Wesen und Grenzen einer solchen Analogie ergeben sich aus einer Analyse der betreffenden Begriffe: Es ist die Aufgabe der synoptischen Arbeit in der Meteorologie, durch vergleichbare Beobachtungen der meteorologischen Elemente einen möglichst weiträumigen Überblick über den atmosphärischen Zustand zu gewinnen und daraus die vermutlichen Änderungen dieses Zustandes für die nächsten Stunden oder Tage abzuleiten — *m.a.W.* also das Wetter zu analysieren und auf Grund korrelativer, dynamischer und thermodynamischer Erfahrungen und Überlegungen seine Weiterentwicklung vorherzusagen. Zur Analyse ist natürlich die gleichzeitige Erfassung möglichst vieler Einzelgrössen an möglichst vielen Stationen notwendige Voraussetzung.

Auf luftelektrischem Gebiet steht nur der erste Teil dessen zur Bearbeitung: Die Analyse. Eine Prognose atmosphärisch-elektrischer Erscheinungen und Veränderungen steht — wenigstens vorläufig — *nicht* zur Debatte. Dafür aber wird hier in ganz anderem Masse als in der synoptisch-meteorologischen Tätigkeit die erklärende Deutung und kausale Verknüpfung der zur Beobachtung gelangenden Erscheinungen angestrebt, also das, was im meteorologischen Bereich Aufgabe des Theoretikers und Thermodynamikers ist.

Vorstufen dieser luftelektrischen Synopsis sind in den Simultanuntersuchungen mehrere Elemente am gleichen Ort oder eines Elements an mehreren Orten gleichzeitig zu sehen, wie sie — wenn auch vereinzelt — schon früher gelegentlich zur Durchführung gekommen sind. Ein erster Hinweis auf die Notwendigkeit so gearteter Untersuchungen findet sich bereits 1859 bei W. THOMSON — dem späteren LORD KELVIN. Der entscheidende Schritt zur *systematischen* Erweiterung der luftelektrischen Arbeit in Richtung auf eine luftelektrische Synopsis hin geschieht aber erst in letzter Zeit und zwar vor allem durch R. E. HOLZER und Mitarbeiter<sup>(18)</sup> in den USA und durch den Verfasser und seine Mitarbeiter<sup>(19)</sup> in Deutschland.

Im einzelnen ist zu dieser Arbeitsrichtung folgendes zu sagen:

Wesen und Ziel einer solchen luftelektrischen Synopsis besteht in der Erkennung lokaler, regionaler und globaler Bindungen, wie sie im luftelektrischen Geschehen nebeneinander bestehen, mit dem Ziel ihrer Separierung *und* kausalen Deutung.

Die luftelektrische Synopsis ist ebenso wie ihr meteorologisches Vorbild grundsätzlich auf *grossraumige Betrachtung* gerichtet.

Kleinräumiges Geschehen, wie es z.B. durch rein lokale und auf engen und engsten Raum begrenzte Wirkung mikrometeorologischer Vorgänge auf das luftelektrische Verhalten zustandekommen kann, fällt deshalb nur in Ausnahmefällen in das Gebiet der luftelektrischen Synopsis.

Man muss übrigens den Begriff Synopsis im atmosphärisch-elektrischen Bereich den hier besonderen Verhältnissen entsprechend weiter fassen als im meteorologischen Bereich:

Entsprechend den beiden Einflussbereichen des Wetters und der Weltgewittertätigkeit auf das atmosphärisch-elektrische Geschehen sind synoptische Studien sowohl bezüglich der vom Wetter modifizierten atmosphärisch-elektrischen Prozesse wie bezüglich der weltweiten Wirkungen der Gewittertätigkeit erforderlich. Die erstgenannte Richtung kann man sinngemäss noch einmal in einen auf das Grosswettergeschehen gerichteten *regionalen Zweig* und einen auf den Wirkungsbebereich der « lokalen Generatoren » (Austausch, Niederschlag u. a.) gerichteten *lokalen Zweig* unterteilen.

Es liegt ausserdem nahe, eine Verbindung zwischen dieser synoptischen und der klimatologischen Arbeitsmethode in der Luftelektrizität herzustellen. Dies erscheint in der Weise möglich, dass auch das zeitliche Verhalten — etwa in der Gliederung « langfristig » (« säkular »), « mittelfristig », « kurzfristig » synoptisch betrachtet wird.

Auf diese Weise kommt man dann — zunächst rein schematisch — zu der Aufgliederung der luftelektrischen Synopsis in neun Einzelzweige gemäss Tabelle 2. — Es ist nicht schwer für jede dieser Einzelrichtungen Beispiele anzugeben:

Tabelle 2. — ÜBERSICHT BER ARBEITEN UND AUFGABEN DER « LUFTLEKTRISCHEN SYNOPSIS » (MIT BEISPIELEN).

Betrachtungsweise		Raumlich		
		global	regional	lokal
Zeitlich	langzeitig (« säkular »)	I <sub>1</sub> <i>Beispiel:</i> Änderungen der luftelektrischen Verhältnisse als Folge von Änderungen des Aerosol-Gehaltes oder der radioaktiven Verhältnisse.	II <sub>1</sub>	III <sub>1</sub>
	mittelzeitig	I <sub>2</sub> <i>Beispiel:</i> Sonnenfleckenperiode und Potentialgefälle	II <sub>2</sub> <i>Beispiel:</i> Luftmasseneinflüsse	III <sub>2</sub> <i>Beispiel:</i> Austausch-Untersuchungen
	kurzzeitig	I <sub>3</sub> <i>Beispiel:</i> Kosmische Wirkungen; Aktivitätsschw. d. Gewitter	II <sub>3</sub> <i>Beispiel:</i> Luftelektrizität und Grosswetter	III <sub>3</sub> <i>Beispiel:</i> Untersuchung örtlicher « Generatoren »

Es stellt sich hier die naheliegende Frage, ob und inwieweit von dieser Erweiterung der luftelektrischen Arbeit in synoptischer Richtung auch der Meteorologie Nutzen erwächst im Hinblick auf Ergänzung und Verbesserung der Beobachtung und Analyse meteorologischer Erscheinungen. Die Antwort ist so zu formulieren, dass die Erfassung meteorologischer Phänomene durch ihre elektrischen Begleiterscheinungen hier nur soweit sinnvoll ist, als sie dem Meteorologen Kenntnis vermittelt, die ihm nicht auf andere Weise besser zugänglich sind. Diese Feststellung, die an sich selbstverständlich sein sollte, schliesst triviale Arbeiten wie etwa die Erkennung von Niederschlagsbeginn, Frontdurchgängen, Nebelansatz u. ä. für sinnvolle luftelektrische Arbeit im Dienste der Meteorologie aus. Andererseits weist sie der atmosphärisch-elektrischen Forschung sowohl in klimatologischer wie in synoptischer Hinsicht eine ständig zunehmende meteorologische Bedeutung zu bei allen Fragen des Austausches und der vertikalen und horizontalen Luftmassenbewegungen.

B) *Spezialaufgaben.*

Im Einzelnen lassen sich in diesem Zusammenhang eine Reihe von Spezialaufgaben nennen, bei denen sich luftelektrische Lösungen meteorologischer Probleme anbieten, so z.B. die folgenden:

Austauschuntersuchungen;

radioaktive Messungen zur Lösung von Fragen der Luftverseuchung und des grossräumigen und kleinräumigen Luftmassentransportes; Gewitterwarnung und Vorhersage gewittriger Starkniederschläge; Erweiterung der Wetter-Analyse und -Prognose durch spherics - Untersuchungen;

Vorhersage von Nebelbildung und -Auflösung;

Bestimmungen der Dicke und Ausdehnung von Wolken- und Nebelfeldern;

Blitzschutzaufgaben;

u.a.m.

Im Folgenden soll auf einige dieser Aufgaben kurz eingegangen werden.

Zur erstgenannten Problem liegen ausführliche Arbeiten von japanischer und von russischer Seite vor (s. u. a. (<sup>41 42 43</sup>)). Ausgangspunkt zur Auffindung der theoretischen Zusammenhänge zwischen dem Verhalten der luftelektrischen Elemente und dem Austauschgeschehen ist dabei die Überlegung, dass sich im stationären Zustand die Vertikalbewegung von Ladungen in der Atmosphäre durch elektrische und durch nichtelektrische Kräfte das Gleichgewicht halten muss. *M.a.W.* müssen sich also die beiden Stromanteile  $i_L$  (Leitungsstrom) und  $i_K$  (Konvektionsstrom) im stationären Fall in allen Höhen zum gleichen Wert  $I$  des Gesamtstromes  $I$  ergänzen, d.h. es muss die Beziehung gelten:

$$\begin{aligned} I &= i_L(h) + i_K(h) \\ &= \Lambda E(h) + K \frac{d}{dh} \varrho(h) \end{aligned} \quad [22]$$

wo  $\varrho(h)$  die Raumladungsdichte in der Höhe  $h$  und  $K$  den Scheindiffusionskoeffizienten bedeuten.

Differentiation nach  $h$  führt unter Verwendung der Poissonschen Gleichung zur Differentialgleichung

$$K \frac{d^2 \varrho(h)}{dh^2} = 4\pi\Lambda \varrho(h) \quad [23]$$

für die M. KAWANO eine Lösung angibt, nach der der Scheindiffusionskoeffizient  $K$  unmittelbar aus Registrierungen von Tagesgängen des luftelektrischen Feldes, der Leitfähigkeit und der Raumladung bestimmt werden kann (<sup>41</sup>).

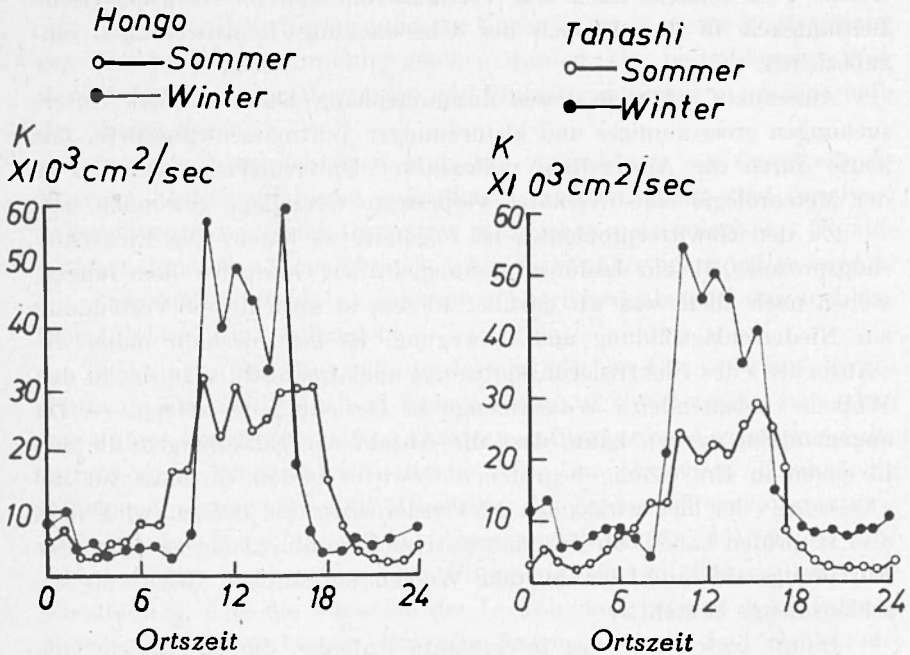


Abb. 17. — Tagesgänge des Scheindiffusionskoeffizienten in der unteren Atmosphäre von Hongo (Stadtinneres von Tokyo) und Tanashi (18 km westlich davon, ausserhalb der Stadt) im Sommer und Winter nach Berechnung aus den Gängen der luftelektrischen Elemente (<sup>41</sup>).

Abb. 17 zeigt als Beispiel die von M. KAWANO für Tokyo und Umgebung aus luftelektrischen Registrierungen abgeleiteten Tagesgänge des Scheindiffusionskoeffizienten  $K$  des atmosphärischen Massenaustausches. Die Werte und Gänge stimmen mit denen überein, die aus Vertikalprofilen der Windgeschwindigkeit abgeleitet wurden.

Auf dem Gebiet der Radioaktivität eröffnet sich, wie schon oben im Abschnitt III. A. 2. b angedeutet, ein Weg zur « summarischen Überwachung » von Atomkraftanlagen auf eine eventuell von ihnen ausgehende radioaktive Verseuchung der Umgebung, der eine erhebliche Bedeutung im Rahmen der Sicherungsmassnahmen für solche Anlagen zukommt. Die Bezeichnung « summarisch » ist deshalb berechtigt, weil

auf diesem Wege der vergleichenden luftelektrisch-klimatologischen Kontrolle die Gesamtwirkung einer eventuellen Verseuchung gewissermassen in räumlicher und zeitlicher Mittelung erfasst werden kann.

Selbstverständlich ist dabei zu empfehlen, nicht nur das luftelektrische Feld sondern auch den Vertikalstrom und die atmosphärische Leitfähigkeit in den Bereich der Überwachungs-Registrierungen einzubeziehen.

Ausserdem gehört in diesen Zusammenhang das Gebiet der Untersuchungen grossräumiger und kleinräumiger Luftmassentransporte, das heute durch die Anwendung radioaktiver Untersuchungsmethoden in der Meteorologie eine *wesentlich* verbesserte Grundlage gewonnen hat.

Zu den Gewitterproblemen ist folgendes zu sagen: Die Elektrisierungsprozesse, die zur Ladungstrennung, in den Gewitterwolken führen, stehen nach allem was wir darüber wissen, in ursächlicher Verbindung zur Niederschlagsbildung und -bewegung. Es liegt deshalb nahe, die « Ausbeute » des Elektrisierungsprozesses auch quantitativ zu der in den Wolken « arbeitenden » Wassermenge in Beziehung zu setzen. — Da angenommen werden kann, dass die Anzahl der Entladungen, die sich in einem in Entstehung begriffenen Gewitter bilden, ein Mass für die « Leistung » der hier wirksamen Elektrisiermaschine liefern, wird man also zu prüfen haben, ob ein quantitativer Zusammenhang zwischen der Entladungszahl und der in den Wolken enthaltenen Gesamtniederschlagsmenge besteht.

Damit bietet sich eine interessante Aufgabe, die gleichzeitig eine neue Variante in der Gewitterforschung und eine Möglichkeit zur kurzfristigen Niederschlagsvorhersage für einzelne Gewitter liefert. — Die Zählung der Entladungen kann in einfacher Weise durch Ermittlung der entladungsbedingten Feldsprünge des atmosphärisch-elektrischen Feldes am Boden erfolgen. Grössere Schwierigkeiten bereitet die sichere Erfassung der in den Wolken « arbeitenden » Wassermenge. Diese kann entweder nachträglich aus der Niederschlagssumme des betreffenden Gewitters oder mittels Radar-Verfahren unmittelbar in den Wolken bestimmt werden.

Über erste Versuche dazu s. H. ISRAEL und G. TEWES (44). Die Versuche ergaben, dass der erwartete Zusammenhang qualitativ vorhanden ist, dass jedoch die dabei angewendeten Messmethoden für eine quantitative Bestätigung noch nicht ausreichten. Die Gründe für diesen zunächst noch nicht befriedigenden Ausfall der Versuche lagen vor allem darin, dass die zuverlässige Ermittlung des Niederschlagsinhaltes einer Gewitterwolke weder mit den normalen Methoden der Niederschlagsmessung

durch ein Netz von Messstationen noch mit der Methode einer Zuflussmengen-Bestimmung zu einer Talsperre so sicher möglich ist, dass über eine Frage wie sie der hier formulierten Hypothese entspricht, entschieden werden kann. — Neuerdings berichtet auch W. PARCZEWSKI (45) über ähnliche Erfahrungen.

Eine natürliche Fortsetzung der Versuche muss in der Verbesserung der Niederschlagsbestimmung gesehen werden. Der bestgeeignetste Weg dazu dürfte in Radar-Messungen und Flugzeuguntersuchungen innerhalb der Wolke liegen.

Spherics-Untersuchungen und ihre Anwendung zur Gewitterlokalisierung, Gewitterwarnung und allgem. Wetterprognose und -analyse, gehören heute zum festen Programm zahlreicher meteorologischer Organisationen des Auslandes und brauchen hier nicht näher behandelt zu werden.

Von den weiteren oben genannten Spezialaufgaben sei nur noch das Nebelproblem kurz behandelt:

Die starke Reaktion, die die luftelektrischen Elemente auf Veränderungen der Sichtweite und insbesondere auf Nebel zeigen, hat schon vor Jahrzehnten zur ersten Ansätzen geführt, eine Verbesserung der kurzfristigen Prognose auf diesem Weg zu erreichen. Unabhängig voneinander kamen dann die Mitarbeiter der Aachener Forschungsgruppe während der Durchführung des Alpenprogramms (46) 1954/55 und wissenschaftliche Institutionen der US-amerikanischen Marine (47) zu der Feststellung, dass die Variation der Leiftfähigkeit bei den verschiedenen Nebeltypen sich so verhält, dass eine Prognose sowohl des Nebelbeginns wie des Nebelendes auf die Dauer von wenigen Stunden ermöglicht wird. Ebenso scheint es möglich, aus den luftelektrischen Registrierungen Informationen über den Charakter des Nebels zu gewinnen. Die physikalische Erklärung dieser Vorgänge ist noch nicht befriedigend gelungen, es hat sich aber durch umfangreiche Statistiken zeigen lassen, dass die Verwendung dieser Erscheinungen für die Nebelprognose Möglichkeiten eröffnet, die auf andere Weise bisher nicht erreichbar waren. Die Untersuchungen werden sowohl in Aachen wie in den USA fortgesetzt (\*).

Eine andere Möglichkeit ergibt sich aus theoretischen Überlegungen von H. ISRAËL und H. W. KASEMIR (1952). Danach muss es grundsätzlich möglich sein, aus luftelektrischen Registrierungen im Innern des Nebels Aussagen über seine räumliche Erstreckung zu gewinnen.

---

(\*) Eine Zusammenstellung auch der früheren Versuche und der amerikanischen bisher veröffentlichten Ergebnisse befindet sich in einem Bericht von H. DOLEZALEK 1959 (48).

## ZUSAMMENFASSUNG

*Die elektrischen Erscheinungen in der Atmosphäre können nur gedeutet werden, wenn man sie als Begleiterscheinungen der meteorologischen Vorgänge betrachtet. Um dies an der Erfahrung demonstrieren zu können, sind in der vorliegenden Arbeit zunächst die hier benötigten Grundlagen aus der Physik der Gasentladungen behandelt, aus denen sich dann die einzelnen Zusammenhänge ableiten. Die erwarteten Effekte werden dann an einer Reihe von Beispielen demonstriert und erläutert. Ausserdem werden die luftelektrische Synopsis sowie die Möglichkeiten zur praktischen Verwandung luftelektrischer Erfahrungen für meteorologisch-aerologische Probleme (z. B. Austausch-Untersuchungen), für Starkniederschlag-Prognose, Nebeluntersuchungen und radioaktive Überwachung besprochen.*

## RIASSUNTO

*Le variazioni dell'elettricità atmosferica possono essere interpretate solo come fenomeni secondari. Al fine di dimostrare ciò per via sperimentale, questo lavoro tratta dapprima la fisica delle scariche elettriche nei gas come un fenomeno base, e quindi cerca di trarne eventuali correlazioni. Gli effetti previsti sono dimostrati e discussi mediante una serie di esempi. Oltre a ciò sono trattate la sinossi dell'elettricità atmosferica e le possibilità per uso pratico dei risultati di tali studi nel campo dei problemi meteorologici ed aereologici, per la previsione di forti precipitazioni, per lo studio dei vari tipi di nebbia e per il controllo del contenuto radioattivo nell'atmosfera.*

## ABSTRACT

*The atmospheric electric variations can only be interpreted if we consider them as secondary phenomena. In order to demonstrate that by experiences this paper firstly treats the physics of electric discharges in gases as a basic phenomenon and then tries to derive the individual connections. The expected effects are demonstrated and discussed in form of a series of examples. Besides, this, the atmospheric electric synopsis and the possibilities for a practical use of atmospheric electric results in the field of meteorologic and aerologic problems (e. g. austausch-investigations), for the forecast of strong precipitation, for the investigation of fog and mist, and for the surveillance concerning radioactive content in the atmosphere are discussed.*

## LITERATUR

- (1) ISRAEL, H., *Atmosphärische Elektrizität*, Teil I: *Grundlagen, Leitfähigkeit, Ionen*. IX und 370 S. «Probleme der kosmischen Physik», 29, Akad. Verl. Ges., Leipzig 1957.
- (2) ISRAEL, H. und LAHMEYER, G., *Studien über das atmosphärische Potentialgefälle*. I. *Das Auswahlprinzip der luftelektrisch «ungestorten Tage»*. «Terr. Magn.», 53, 373-386, (1948).
- (3) ISRAEL, H., *Atmosphärische Elektrizität*, Teil II: *Felder, Ladungen, Ströme* (im Druck).
- (4) WESTPHAL, W., *Physikalisches Wörterbuch*. S. 376 und 708. Springer 1952.
- (5) KASEMIR, H. W., *Studien über das atmosphärische Potentialgefälle IV: Zur Strömungstheorie des luftelektrischen Feldes I*. «Arch. f. Met., Geophys. u. Bioklim.», (Reihe A), 3, 84-97, (1950).
- (6) DOLEZALEK, H., *On Antennas for Atmospheric Electrical Measurements*. ARDC, Contract Nr. AF 61 (514)-640, Techn. Note No. 4, Aachen (1956).
- (7) ISRAEL, H., *Zum Ionisationsgleichgewicht in der Atmosphäre*. «Meteorolog. Rundschau» 1, 344, (1948).
- (8) STERGIES, C. G., *Study of Atmospheric Ions in a Nonequilibrium System*. «Geophys. Res. Papers», Nr. 26, April 1954.
- (9) ISRAEL, H., *Luftelektrizität*. *Landolt-Bornstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik*. 6. Aufl. Bd. III, 704-717, Springer 1952.
- (10) DOLEZALEK, H., *Zur Berechnung des luftelektrischen Stromkreises II: Über die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes in der Atmosphäre*. «Geof. pura e appl.» 45, 273-297, (1960).
- (11) ISRAEL, H., *Luftelektrizität und Radioaktivität*. «Verständliche Wissenschaft», Bb. 62 62, 125 S., Verlag Springer, 1957.
- (12) ISRAEL, H., *Die atmosphärische Elektrizität im Rahmen der Meteorologie*. «Meteorol. Rundschau», 9, 80-84, (1956).
- (13) ISRAEL, H., KASEMIR, H. W. und WIENERT, K., *Die luftelektrischen Verhältnisse am Jungfrauojoch (3470 m)*. I. Mitteilung: *Luftelektrische Tagesgänge und Luftzirkulation*. «Arch. f. Meteorol., Geophys. u. Bioklim.», (Reihe A) 3, 357-381, (1951).
- (14) ISRAEL, H., *Luftelektrizität im AGI (Atmospheric electricity during IGY)*. *Bericht über die Tagung in Aachen am 11./12.5.1956*. (Zusammenstellung von Vorträgen und eigenen Berichten) 126 S., Aachen, April 1957.
- (15) CLARK, J. F., *The Fair Weather Atmospheric Electric Potential and its Gradient*. (Thesis University of Maryland, 1956).
- (16) HOLZER, R. E., *Studies of the Universal Aspects of Atmospheric Electricity*. Final Report, Contract AF 19 (122)-254. University of California, Inst. Geophys., 76 p. (1955).
- (17) ISRAEL, H. und THEUNISSEN, E., *Luftelektrisches Potentialgefälle und Weltgewittertätigkeit — ein Beitrag zur grossräumigen luftelektrischen Synopsis*. (Vorläufige Mitteilung). *Naturwiss.* 44, 8, (1957).

- (18) THEUNISSEN, E., *Potential Gradient and Sferics (Atmospheric electric Results and Global Thunderstorm Activity; A Contribution to Large Area Synoptical Investigations)*. ARDC, Contract No. AF 61 (514)-640, Technical Note 10, Aachen, 59 p., (1957).
- (19) ISRAEL, H. und MITARBEITER, *Atmospheric electric and meteorological investigations in high mountain rangers*. Final Report to Contract 61 (514)-640, 175 S., Aachen (1957).
- (20) PARAMANOFF, N. A., (*Über die jährliche Variation des atmosphärisch-elektrischen Potentialgradienten*) (russisch). « Dokl. Akad. Nauk. SSSR », 71, 39-40, (1950).
- (21) BAUER, L. A., *Sunspot and annual variations of atmospheric electricity, with special reference to the Carnegie-Observations, 1915-1921*. « Res. Dept. Terr. Magn. Carnegie » Inst. Washington, D. C., Publ. 175, 359-384, (1926).
- (22) BROOKS, C. E. P.: *The variation of the annual frequency of thundrestorms in relation to sunspots*. « Quart. Journ. Royal Met. Soc. », 60, 153-165, (1934).
- (23) GISH, O. H., *Evaluation and Interpretation of the Columnar Resistance of the Atmosphere*. « Terr. Magn. », 49, 159-168, (1944).
- (24) MAUCHLY, S. J., *Studies in atmospheric electricity based on observations made on the Carnegie 1915-1921*. « Res. Dept. Terr. Magn. . . Carnegie » Inst. Washington D.C., 175, 385-424, (1926).
- (25) HATAKEYAMA, H., *On the disturbance of the atmospheric potential gradient caused by the smokecloud on the volcano Yakeyama*. « Journ. Geomagn. Geoelectr. » (Japan) 1, 48-51, (1949).
- (26) TORRESON, O. W., and WAIT G., R., *Atmospheric electric results from Huancayo observatory* « Res. Dept. Terr. Magn. Carnegie » Inst. Washington, D.C., XIX, Publ. 175, (1948).
- (27) HARRIS, D. L., *Effects of Radioactive Debris from Nuclear Explosions on the Electrical Conductivity of the Lower Atmosphere*. AFCRC (AFCRC-TR-55-222) Geophysical Research Papers 42, 140-146, (1955).
- (28) PIERCE, E. T., *Some calculations on radioactive fallout with especial references to the secular variations in potential gradient at Eskdalemuir, Scotland*. « Geof. pura e appl. », 42, 145-151, (1959/I).
- (29) OSTER, A., *Radioaktivität und atmosphärische Elektrizität*. Diplomarbeit Aachen 1960 (Veröffentlichung in Vorbereitung).
- (30) ANDERSEN R. V. and SERBU, G. P., *Airborne Measurement of Atmospheric Conductivity in Fifteen-Day-Old Thermonuclear Debris*. « Journ. Geophys. Res. » 65, 223-226, (1960).
- (31) ISRAEL, H., *Luftelektrische Erfahrungen in den Schweizer Alpen*. « Ber. d. Dt. Wetterd. » 8, Nr. 54 (5. Internat. Tagg. f. Alpin. Meteorol. Garmisch-Partenkirchen, 14.-16.9.1958), S. 33-36, (1959).
- (32) ROSSMANN, F., *Luftelektrische Messungen mittels Segelflugzeugen*. « Dtsch. Wetterd. in der US-Zone ». Ber. 15, (1950).
- (33) SAGALYN, R. C. and FAUCHER, G. A., *Aircraft investigation of the large ion content and conductivity of the atmosphere and their relation to meteorological factors*. « J. Atmosph. Terr. Physics », 5, 253-272 (1954).

- (34) ISRAEL, H., KASEMIR, H. W. and WIENERT, K., *Luftelektrische Tagesgänge und Massenaustausch im Hochgebirge der Alpen II*. « Arch. Meteorol. Geophysik. und Bioklim. », (Reihe A) 8, 72-94, (1955).
- (35) ISRAEL, H. und KUNKIS, A., *Über einige luftelektrische Erfahrungen in Mittelamerika* (vorl. Mitteilung). Vorträge u. Ber. d. gemeins. Tagung der Arbeitsgem. Ionosphäre u. d. Dt. URSI-Landesaussch., Kleinheubach 1959, S. 103-106.
- (36) ISRAEL, H., *Atmospheric electrical agitation*. « Quart. Journ. Royal Meteorol. Soc. », 85, 91-103, (1959).
- (37) ISRAEL, H., *Condensation nuclei as connecting link for meteorological-electrical relations*. Part. II. ARDC, Contract No. AF 61 (514)-640, Technical Note 11, 40 S., Aachen, 1956.
- (38) SERBU, G. P. und TRENT, E. M., *A study of the use of atmospheric electric measurements in fog forecasting*. « Trans. Am. Geoph. Union » 39. 1034-1042, (1958).
- (39) ISRAEL, H., *Luftelektrische Tagesgänge und Luftkörper* (Studien über das atmosphärische Potentialgefälle III). « Journ. Atm. Terr. Phys. » 1, 26-31, (1950).
- (40) ISRAEL, H., *Zum Tagesgang des luftelektrischen Potentialgefälles*. « Meteorolog. Rundschau » 1, 200-204, (1948).
- (41) KAWANO, M., *The local anomaly of the diurnal variation of the atmospheric electric field*. « Res. Electrotechn. Lab. », Tokyo, Japan, Nr. 569, (1958).
- (42) MILIN, W. B., (*Neue Methoden zur Bestimmung des Turbulenz-Koeffizienten in der bodennahen Luftschicht*). « USSR Glavnoe Upravlenie Gicrometeorologicheskoi Sluzhby », Informatsionni Sbornik, 1, 28-36, (1951).
- (43) TVERSKOY, P. N., *L'état électrique de l'atmosphère par rapport au mélange turbulent*. « Int. Un. Geod. Geoph. », XIth Gen. Assembly Toronto 1957, Int. Ass. Met. Atm. Phys., Rep. of Proc., S. 69-70.
- (44) ISRAEL, H. und TEWES, G., *Niederschlags- und Ladungsbildung im Gewitter* (Versuche zur Niederschlagsvorhersage). « Geofisica pura e applicata » 37, 197-204, (1957).
- (45) PARCZEWSKI, W., *Intensity of precipitation and frequency of electric discharges in thunderstorms*. « Idöjárás » 62, 189-193, p (1958).
- (46) ISRAEL, H., DOLEZALEK, H. und FRIES, G. (†), *The Atmospheric Electrical Climate at Four Selected Stations in the Swiss Alps*. ARDC, Contract No. AF 61 (514)-640, Technical Note 13, Aachen, 51 (1957).
- (47) SERBU, G. P. and TRENT, E. M., s. Zit. Nr. (33); siehe auch MINTON, D. H., *Fleet Weather Central, U. S. Naval Station, Argentina*, « Newf. Let. Rep. ser. ». 82, (1955).
- (48) STEWART, K. H., *Some recent changes in atmospheric electricity and their cause*. « Quart. Journ. Royal Met. Soc. », 86, 399-405, (1960).
- (49) DOLEZALEK, H., *Luftelektrische Wirkungen des Nebels*, (in Vorbereitung).
- (50) DOLEZALEK, H., s. Zitat Nr. (10).