Zeitschrift: Mitteilungen der aargauischen Naturforschenden Gesellschaft
Herausgeber: Aargauische Naturforschende Gesellschaft
Band: 27 (1966)

Artikel: Die luftelektrische Station der Kantonsschule Aarau
Autor: Saxer, Leonhard / Sigrist, Werner
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-172527

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

DIE LUFTELEKTRISCHE STATION DER KANTONSSCHULE AARAU

von Leonhard Saxer und Werner Sigrist

In Fortführung und Erweiterung eines während des Internationalen Geophysikalischen Jahres (IGY 1957/58) in Arosa durchgeführten luftelektrischen Forschungsprogrammes (1) wurde von den Autoren eine luftelektrische Station in Aarau aufgebaut, die neben der Erforschung allgemeiner luftelektrischer Probleme vor allem der Untersuchung der Beziehungen zwischen Luftverunreinigung und luftelektrischen Vorgängen dienen soll.

I. Aus der Geschichte der luftelektrischen Forschung

Als am 10. Mai 1752 der französische Physiker T. F. DALIBART in Marly mit einem von BENJAMIN FRANKLIN 1750 vorgeschlagenen Experiment – Franklin selber gelang das Experiment erst einen Monat später – beweisen konnte, daß der Blitz ein elektrischer Funke ist, nahm die luftelektrische Forschung ihren Anfang. Noch im gleichen Jahr erkannte L. G. LEMONNIER, der in St-Germain die Dalibart-Franklinschen Gewitterversuche in verfeinerter Form wiederholte, daß auch an einem vollkommen wolkenlosen und klaren Tag die Luft elektrisch geladen ist. Damit waren zwei grundlegende Tatsachen gefunden: die Gewitterelektrizität und die Schönwetterelektrizität. Der Italiener G. G. BECCARIA (1716–1781), der in Turin die Franklinschen Versuche in 20jähriger sorgfältiger Arbeit weiterführte, fand, daß bei schönem Wetter die Luft «glaselektrisch», d. h. positiv, bei gewittrigem Wetter überwiegend «harzelektrisch», d. h. negativ, geladen ist und daß bei schönem Wetter der elektrische Zustand der Atmosphäre einen täglichen Gang aufweist. In Frankreich entdeckte 1785 C. A. COULOMB, daß auch sehr gut isolierte Leiter ihre Ladung langsam verlieren, und schloß daraus, daß die Luft eine gewisse Leitfähigkeit haben müsse, eine Entdeckung, die keine Beachtung fand und in völlige Vergessenheit geriet, so daß sie 1887 von LINSS neu entdeckt werden konnte.

Ein neuer Abschnitt der luftelektrischen Forschung wurde durch die Untersuchungen *(Voyages dans les Alpes,* Genf 1779) des Schweizer Physikers H.B. DE SAUSSURE (1740–1799) eingeleitet. Durch die Konstruktion eines besseren Elektrometers kam er als erster zu quantitativ vergleichbaren Meßergebnissen, aus denen er Tages- und Jahresgänge fand. Er führte auch eine neue Meßmethode, die Influenzmethode, ein, indem er den Leiter, mit dem er den elektrischen Zustand der Luft maß, beweglich machte und die Wirkung auf das Elektrometer als Influenz der in der Luft vorhandenen positiven Ladungen deutete. Damit kam er dem Begriff des elektrischen Feldes, der damals noch nicht bekannt war, nahe. Auch sein Vorschlag, solche Influenzmessungen mit einem Ballon durchzuführen, und seine Frage, ob der elektrische Zustand der Atmosphäre einen Einfluß auf die Gesundheit habe, wirken recht modern.

Eine erste Theorie der Luftelektrizität stammt von A. VOLTA (1747–1825). Er versuchte die negative Ladung der Erde und die positive Ladung der Luft mit der Annahme zu erklären, daß beim Verdunsten des Wassers mit dem Wasserdampf auch positive Ladung wegtransportiert werde, wodurch die Erde dann negativ geladen werde. Obwohl diese bestechend einfache Theorie durch das Experiment widerlegt wurde – im Laborversuch konnte beim Verdampfen von Wasser keine Ladungstrennung beobachtet werden –, hatte sie trotzdem eine gewisse Bedeutung, weil zum erstenmal versucht wurde, das luftelektrische Geschehen auf einen in der Natur dauernd vor sich gehenden Prozeß zurückzuführen.

Weitere Erklärungsversuche von P. ERMANN und A. PELTIER (1785–1845), die eine feste negative Ladung der Erde und eine weniger stark negative der Luft annahmen, führten zwar grundsätzlich nicht viel weiter, da sie die Leitfähigkeit der Luft nicht kannten und damit die Frage nach der Erhaltung dieser Ladung gar nicht stellten, gaben aber den Anstoß zu einer ersten mathematischen Beschreibung durch W. THOMSON (Lord KELVIN). Dieser bedeutende englische Physiker führte den Begriff des Potentials und der elektrischen Feldstärke in die Luftelektrizität ein und zeigte, daß bei Annahme einer geladenen Erde die Frage, ob die Feldlinien in der Atmosphäre enden oder ob sie sich bis ins Unendliche erstrecken, durch Messungen an der Erdoberfläche nicht zu entscheiden ist. In experimenteller Hinsicht gelang Thomson ein entscheidender Fortschritt, indem er

mit dem Quadrantenelektrometer ein eigentliches Präzisionsinstrument für elektrostatische und speziell luftelektrische Untersuchungen schuf, das erst in den vergangenen dreißig Jahren durch die Elektronenröhre abgelöst wurde. 1861 richtete er in Kew bei London die erste Station ein, in der die luftelektrische Feldstärke registriert wurde. Dieses Observatorium, das diese Messungen bis heute ohne Unterbrechung fortgeführt hat, ist die älteste luftelektrische Station der Welt.

Angeregt durch die Arbeiten von Thomson wurden bald auch in anderen Ländern Registrierungen des luftelektrischen Feldes vorgenommen, und es tauchten die ersten Vorschläge für eine internationale Zusammenarbeit auf. In Österreich konstruierte FRANZ EXNER ein transportables Meßgerät und führte mit seinen Schülern systematische Untersuchungen über das Erdfeld auch auf dem Meer und in den Tropen durch. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, forderte er die Reduktion der Meßwerte auf eine freie Ebene.

Mit der Wiederentdeckung der Leitfähigkeit der Luft durch LINSS im Jahre 1887 und den grundlegenden Arbeiten über die Ionen und die radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre, die ELSTER und GEITEL um die Jahrhundertwende veröffentlichten, trat die luftelektrische Forschung in die moderne Phase ein. Hatte man es bis anhin nur mit einer luftelektrischen Größe, der luftelektrischen Feldstärke oder dem Potentialgradienten, wie man die Feldstärke meistens nannte, zu tun gehabt, so kamen jetzt umfangreiche Messungen über die Leitfähigkeit, die Beweglichkeit der Ionen und über ihre Konzentration und Lebensdauer hinzu. 1905 entdeckte LANGEVIN in Paris, daß in der Luft neben den kleinen Ionen auch noch sehr schwer bewegliche Groß-Ionen vorkommen, und vier Jahre später fand POLLACK in Sydney die zwischen den normalen und den großen Ionen liegenden Mittel-Ionen.

Diese intensive Forschung über die in der Atmosphäre vorkommenden Ionen führte zu einer der bedeutendsten Entdeckungen der modernen Physik. Wenn, wie ELSTER und GEITEL gezeigt hatten, die Leitfähigkeit der Luft auf die Ionisierung durch radioaktive Stoffe in der Erdoberfläche und der in die Luft austretenden gasförmigen Emanationen zurückzuführen ist, dann müßte reine Luft, die gegen diese Strahlen genügend abgeschirmt ist, keine Leitfähigkeit mehr haben. Versuche in dieser Richtung ergaben aber immer eine nicht

erklärbare Restleitfähigkeit; es mußte also eine ionisierende Strahlung vorhanden sein, die auch die dicksten Abschirmungen durchdrang. Die Aufklärung dieser rätselhaften Erscheinung brachten die Untersuchungen von GOCKEL, HESS und KOLHÖRSTER, die kurz vor dem Ersten Weltkrieg mit Ballonen Messungen der Leitfähigkeit in Höhen bis zu 10 km durchführten. Diese Messungen zeigten beim Aufstieg in den ersten tausend Metern die wegen der abnehmenden Wirkung der Bodenstrahlung erwartete Abnahme der Leitfähigkeit, in größeren Höhen aber eine Zunahme auf ein Vielfaches des Wertes am Boden. V. HESS zog daraus den Schluß, daß von außen eine sehr durchdringungsfähige Strahlung in die Erdatmosphäre komme, die auch die am Boden festgestellte Restleitfähigkeit der Luft bewirke. Erst um 1925 setzte die eigentliche Erforschung der Heßschen Strahlung oder, wie sie heute genannt wird, der kosmischen Strahlung ein. Noch jetzt, mehr als 50 Jahre nach ihrer Entdeckung, steht diese unvorstellbar energiereiche Strahlung im Zentrum der physikalischen Forschung, die sich mit den Fragen über den Aufbau der Materie beschäftigt.

Für die luftelektrische Forschung stellte sich mit der Entdeckung der Leitfähigkeit der Luft eine neue, sehr fundamentale Frage, die Frage, wie das luftelektrische Feld aufrecht erhalten wird. Solange man die Luft als nichtleitend annahm, konnte man sich das Feld als von einer festen negativen Eigenladung der Erde herrührend denken, wenn aber die Luft leitet, dann müssen vertikale Ströme fließen und den Ladungsunterschied ausgleichen und damit das Feld zum Verschwinden bringen. Da das Feld aber fortbesteht, muß irgendwo ein Ausgleich erfolgen. Die Suche nach diesem Ausgleichsstrom war die Hauptaufgabe der luftelektrischen Forschung in den letzten Jahrzehnten, und es bedurfte lange dauernder und vor allem weltweiter Messungen, um zu den Vorstellungen zu kommen, die man sich heute über das luftelektrische Geschehen macht.

II. Die heutigen Vorstellungen von den luftelektrischen Vorgängen

Die heutigen Anschauungen über die luftelektrischen Vorgänge sollen anhand der einzelnen Größen und ihrer Beziehungen kurz besprochen werden.

1. Der Potentialgradient

Meistens ist die luftelektrische Feldstärke auf die Erdoberfläche hin gerichtet, d.h. die Luft ist positiv und die Erde negativ geladen. Man spricht in der Luftelektrizität gewöhnlich nicht von der Feldstärke, sondern vom Potentialgradienten oder dem Potentialgefälle $\frac{\partial V}{\partial z}$, nach der Beziehung

$$E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \tag{1}$$

E_z Feldstärke in Richtung der Vertikalen z
V Potential

Der Potentialgradient beträgt bei schönem Wetter in wenig bewohnten Gebieten am Boden im langjährigen Mittel etwa 130 Volt/m. Mit zunehmender Höhe nimmt sein Wert rasch ab; in 3 km Höhe ist er auf etwa die Hälfte, in 6 km auf etwa $^1/_{10}$ des Bodenwertes gesunken, und in 30 km kann er mit den heutigen Meßmethoden kaum mehr nachgewiesen werden. Diesen Sachverhalt kann man so deuten, daß die Erde negativ geladen ist und daß diese Ladung durch positive Raumladungen kompensiert wird, die vorwiegend in den Luftschichten bis 10 km Höhe enthalten sind.

Der tägliche Gang des Potentialgradienten zeigt bei den Landstationen große Unterschiede, je nachdem sich die Station in mehr oder weniger besiedeltem Gebiet befindet. Am einfachsten sind die Verhältnisse auf den Meeren, in arktischen Gebieten und zu gewissen Jahreszeiten auch im Gebirge, wo ein einfachperiodischer Tagesgang vorherrscht mit einem Minimum um 4 Uhr Weltzeit (GMT) und einem Maximum um 19 Uhr GMT (Abbildungen 1a und 1b). Mit diesem auf der ganzen Erde synchronen Gang des Potentialgradienten geht der Tagesgang der Weltgewittertätigkeit parallel (Abb. 1c), was zur Erkenntnis führte, daß die Gewitter die Erzeuger der Luftelektrizität sind. In den Gewittern wird negative Ladung auf die Erde und positive in die Atmosphäre, und zwar bis in Höhen über 30 km, gebracht, wodurch die Luftschicht in dieser Höhe auf eine Spannung von etwa + 300 kV gegen die Erde aufgeladen wird. Da die Leitfähigkeit der Luft in dieser Höhe schon recht groß ist und nach oben immer noch größer wird, kann eine durch ein Gewitter an irgendeiner Stelle der Erde erfolgte Aufladung dieser Schicht sich in kurzer Zeit über die ganze Schicht verteilen und da-

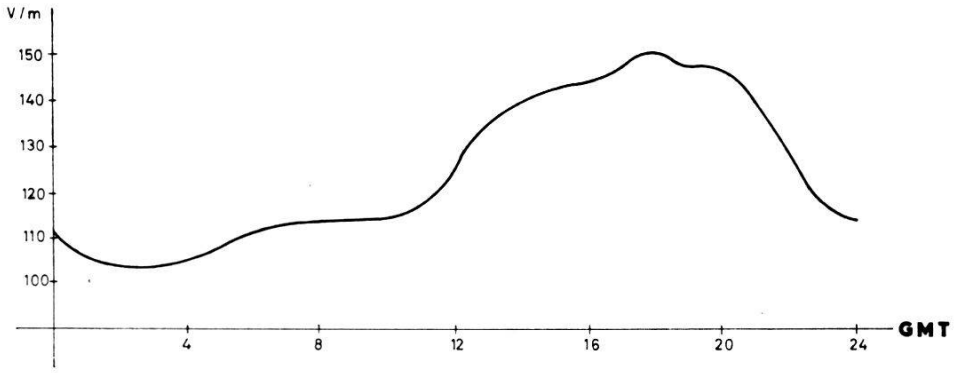

Abb. 1a. Mittlerer Tagesgang des Potentialgradienten auf den Ozeanen

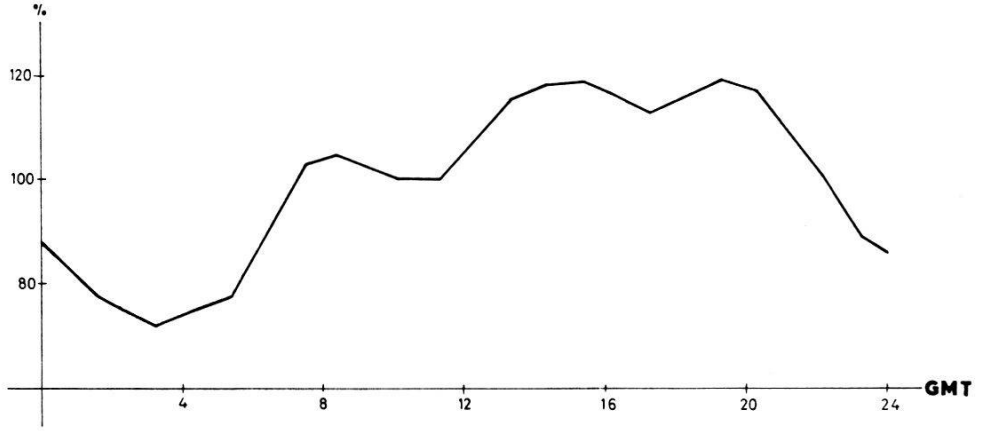

Abb. 1b. Mittlerer Tagesgang des Potentialgradienten auf dem Aroser Weißhorn (2650 m ü. M.) im Herbst

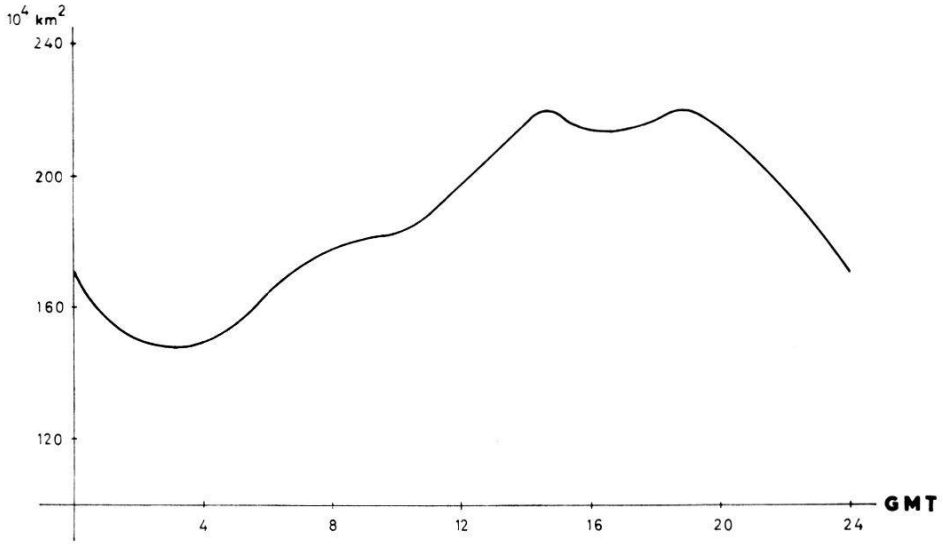

Abb. 1c. Mittlerer Tagesgang der von Gewittern bedeckten Fläche

mit einen mit der Gewittertätigkeit synchronen Gang des Potentialgradienten bewirken. In stärker besiedelten Gebieten und vor allem in Städten ist der Potentialgradient größer, und der tägliche Gang weicht von jenem über den Weltmeeren stark ab. Häufig zeigen diese Tagesgänge ein ausgeprägtes Maximum am Vormittag und ein schwächeres am Abend (Abb. 2). Der Grund für diese Abweichung

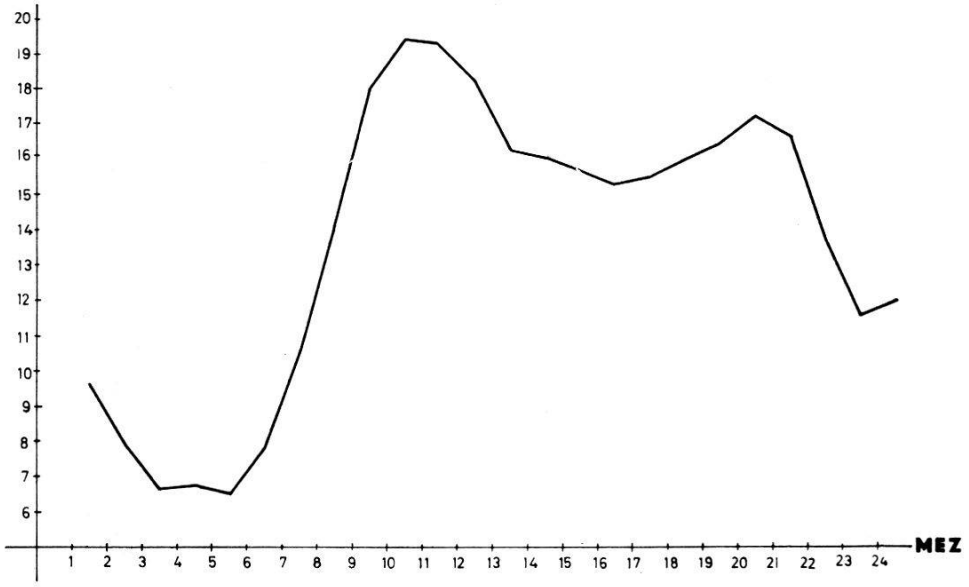

Abb. 2. Mittlerer Tagesgang des Potentialgradienten im April 1966 in besiedelter Gegend (Aarau) (willkürliche Einheiten)

vom weltweiten Gang liegt in der durch die Luftverunreinigungen bewirkten Änderung der Leitfähigkeit der Luft.

Extreme Werte des Potentialgefälles, und zwar positive und negative, treten bei Niederschlag und vor allem bei Gewittern auf, wo man Feldstärken bis zu 100000 Volt/m gemessen hat.

2. Die Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit der Luft entsteht durch die ionisierende Wirkung der radioaktiven Stoffe im Boden und in der Luft und der kosmischen Strahlen. Abb. 3 zeigt die pro Kubikzentimeter und Sekunde von diesen Strahlen erzeugten Ionenpaare in Abhängigkeit von der Höhe. Bei diesem Vorgang werden ein oder mehrere Elektronen aus der Elektronenhülle eines Atoms oder Moleküls herausgeschlagen,

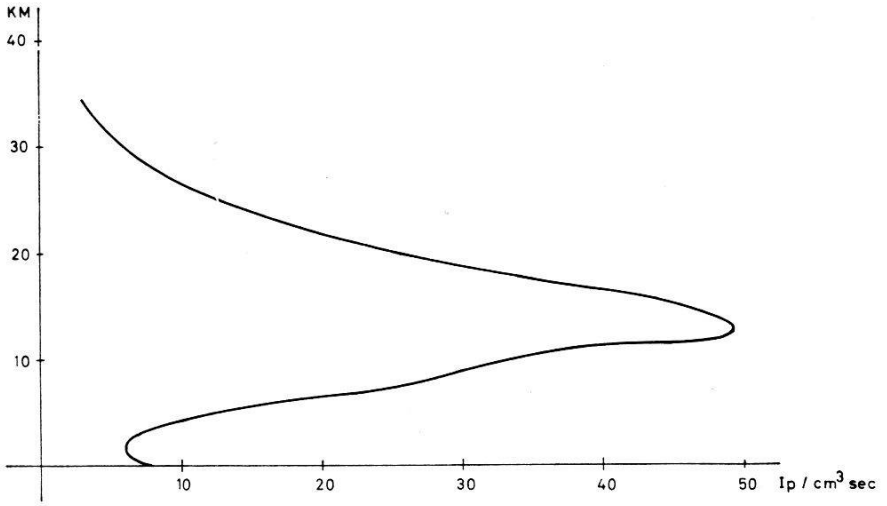

Abb. 3. Die Ionisierungsstärke in der freien Atmosphäre als Funktion der Höhe

die sich nach sehr kurzer Zeit an ein neutrales Atom oder Molekül anlagern. Dadurch entstehen positive und negative Atom- bzw. Molekül-Ionen. Diese Ionen sind in atmosphärischer Luft nicht beständig, sondern ziehen in Bruchteilen von Sekunden neutrale Atome und Moleküle, vor allem polare, z. B. Wassermoleküle, an sich, so daß ein Komplex von etwa 10 bis 12 Molekülen (cluster) entsteht, den man als *Klein-Ion* bezeichnet. Solche Klein-Ionen können auch durch Flammen, Spitzenentladungen und Reibungseffekte erzeugt werden.

Die Leitfähigkeit der Luft kommt fast ausschließlich durch die Bewegung dieser Klein-Ionen zustande, nach der Gleichung:

$$\lambda = (n_1 \cdot k_1 + n_2 \cdot k_2) \cdot e \qquad (2)$$

n_1, n_2 Anzahl positive bzw. negative Klein-Ionen pro m^3
k_1, k_2 Beweglichkeit der positiven bzw. negativen Klein-Ionen in m^2/Voltsec
e Elementarladung $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Coul.
λ Leitfähigkeit in $Ohm^{-1}m^{-1}$

Die Zahl der positiven und negativen Klein-Ionen beträgt in Bodennähe einige Hundert pro cm^3, und sie wird sehr stark durch Luftverunreinigungen beeinflußt. Die Beweglichkeit der Klein-Ionen liegt im allgemeinen zwischen 1 und $2 \cdot 10^{-4}$ m^2/Voltsec, wobei die Beweglichkeit der negativen Ionen durchschnittlich etwa 20% höher ist als jene der positiven. Bei wenig verunreinigter Luft beträgt die Leitfähigkeit in Bodennähe etwa 1 bis $2 \cdot 10^{-14}$ $Ohm^{-1} \cdot m^{-1}$.

Da in der Atmosphäre dauernd neue Ionenpaare gebildet werden, müßte die Zahl der Klein-Ionen immer größer werden, wenn nicht

gewisse Vorgänge diese wieder verminderten. Dafür kommen in erster Linie zwei Vorgänge in Betracht: die Rekombination der Klein-Ionen und ihre Anlagerung an Kondensationskerne.

Durch Vereinigung eines positiven mit einem negativen Klein-Ion verschwinden die Ladungen und damit auch die elektrischen Kräfte, welche den Molekülkomplex zusammenhalten. Für das Verschwinden der Klein-Ionen gilt das Rekombinationsgesetz

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = \frac{\partial n_2}{\partial t} = -\alpha n_1 n_2 \tag{3}$$

wo α der Rekombinationskoeffizient ist. Sein Wert, der von Druck und Temperatur abhängt, beträgt bei Normalbedingungen etwa $1{,}6 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{m^3 sec^{-1}}$.

Die Rekombination spielt für das Verschwinden der Klein-Ionen nur dort eine beträchtliche Rolle, wo entweder die Zahl der Klein-Ionen sehr groß ist oder wo die Luft nur sehr wenig Kondensationskerne enthält, also in großen Höhen und über den Weltmeeren. In Bodennähe dagegen überwiegt bei weitem die Verminderung durch Anlagerung an Kondensationskerne, d.h. an Teilchen mit einem Radius zwischen 10^{-7} und 10^{-5} cm. Kondensationskerne nennt man solch kleine Teilchen deshalb, weil an ihnen schon bei geringer Wasserdampfübersättigung die Bildung eines kleinsten Wassertröpfchens, also Kondensation, erfolgt, während in ganz reiner Luft ohne solche Teilchen eine mehrfache Übersättigung nötig ist. Die Kondensationskerne stammen primär zum größten Teil von Verbrennungsvorgängen her (Rauch und Staub aus Kaminen, Auspuffgase usw.) und koagulieren unter sich und mit andern in der Luft vorhandenen Teilchen, z.B. Salzteilchen aus den Meeren, so daß daraus chemisch uneinheitliche Teilchen, sogenannte Mischkerne, entstehen. Die Zahl der Kondensationskerne ist räumlich und zeitlich sehr großen Schwankungen unterworfen; in sehr reiner Luft (Ozean) sind es einige Tausend pro $\mathrm{cm^3}$, während sie in Großstädten auf einige Hunderttausend, zeitweise sogar auf viele Millionen pro $\mathrm{cm^3}$ ansteigen kann.

Wenn sich ein Klein-Ion an einen Kondensationskern anlagert, entsteht daraus ein elektrisch geladener Kondensationskern, den man als *Groß-Ion* bezeichnet. Diese Groß-Ionen haben wegen ihrer größeren Masse eine 100- bis 10000mal kleinere Beweglichkeit als

die Klein-Ionen und tragen deshalb zur Leitfähigkeit nur mehr sehr wenig bei. Je mehr Kondensationskerne in der Luft vorhanden sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß die Klein-Ionen sich in Groß-Ionen umwandeln können, und desto kleiner wird damit die Leitfähigkeit.

Die Anlagerung der Klein-Ionen an die Kondensationskerne kann man mit einer dem Massenwirkungsgesetz entsprechenden Formel näherungsweise beschreiben. Bedeuten N_0 die Zahl der neutralen Kerne pro m³, N_1 und N_2 die entsprechenden Zahlen für die positiven und negativen Groß-Ionen, so ergeben sich für die Änderung der Klein-Ionen-Zahlen durch Anlagerung die Ausdrücke:

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = -\eta_{10} \cdot n_1 N_0 - \eta_{12} n_1 N_2 - \eta_{11} n_1 N_1 \qquad (4)$$
$$\frac{\partial n_2}{\partial t} = -\eta_{20} \cdot n_2 N_0 - \eta_{21} n_2 N_1 - \eta_{22} n_2 N_2$$

η_{10}, η_{12} usw. sind die Anlagerungskoeffizienten zwischen Klein- und Groß-Ionen bzw. zwischen Klein-Ionen und neutralen Kernen. Diese Koeffizienten, deren Werte in der Größenordnung von 10^{-12} m³sec^{-1} liegen, stehen in Beziehung mit den Diffusionskonstanten, den Beweglichkeiten und den Radien der Groß- bzw. Klein-Ionen.

Durch Zusammenfassung der Gleichungen (3) und (4) erhalten wir die gesamte Änderung der Klein-Ionen $\frac{dn_1}{dt}$ bzw. $\frac{dn_2}{dt}$ zu

$$\frac{dn_1}{dt} = \underset{\substack{\text{Ioni-}\\\text{sierung}}}{q_1} - \underset{\substack{\text{Rekombi-}\\\text{nation}}}{\alpha n_1 n_2} - \underbrace{\eta_{10} n_1 N_0 - \eta_{12} n_1 N_2 - \eta_{11} n_1 N_1}_{\text{Anlagerung}} \qquad (5)$$

und entsprechend für $\frac{dn_2}{dt}$, wo q_1 und q_2 die Anzahl positiver bzw. negativer Klein-Ionen pro m³ bedeuten, die pro sec in der Atmosphäre erzeugt werden. Für den Gleichgewichtszustand, wo sich Ionisierung und Vernichtung aufheben, wo also $\frac{dn_1}{dt} = \frac{dn_2}{dt} = 0$ ist, erhalten wir aus (5) die Gleichungen

$$q_1 = \alpha n_1 n_2 + \eta_{10} n_1 N_0 + \eta_{12} n_1 N_2 + \eta_{11} n_1 N_1 \qquad (6)$$
$$q_2 = \alpha n_1 n_2 + \eta_{20} n_2 N_0 + \eta_{21} n_2 N_1 + \eta_{22} n_2 N_2$$

Berücksichtigen wir noch, daß die Vereinigung der Klein-Ionen mit Groß-Ionen gleichen Vorzeichens verschwindend klein ist und daß die Rekombination der Klein-Ionen in Bodennähe vernachlässigt werden darf, so erhalten wir aus (6)

$$n_1 = \frac{q_1}{\eta_{12} N_2 + \eta_{10} N_0} \qquad (7)$$

$$n_2 = \frac{q_2}{\eta_{21} N_1 + \eta_{20} N_0}$$

Man sieht daraus, daß die Konzentration der Klein-Ionen und damit auch die Leitfähigkeit, da diese ganz überwiegend durch die Klein-Ionen bedingt ist, gegensinnig zur Zahl der Kerne, also zur Stärke der Luftverunreinigung, verläuft.

Eine Verminderung der Ionenzahlen in der Luft kommt auch durch Anlagerung von Klein- und Groß-Ionen an Nebel- und Niederschlagsteilchen zustande, die beim Niederschlag zusammen auch mit neutralen Kernen aus der Atmosphäre entfernt werden (Auswascheffekt).

3. Der Vertikalstrom

Potentialgradient und Leitfähigkeit haben nach dem Ohmschen Gesetz $i = \lambda \cdot E$ einen Leitungsstrom, den *Vertikalstrom,* zur Folge. Er ist normalerweise auf die Erde zu gerichtet und setzt sich aus zwei Teilströmen zusammen: einem abwärtsgerichteten Strom positiver und einem aufwärtsgerichteten Strom negativer Ionen. Die Vertikalstromdichte beträgt über Land etwa $2 \cdot 10^{-12}$ A/m², über Meer etwa $3 \cdot 10^{-12}$ A/m², was für die ganze Erde einen gesamten Vertikalstrom von etwa 1500 A ergibt. Dieser würde genügen, um das luftelektrische Feld in weniger als einer Stunde auf unmeßbar kleine Werte abzubauen, wenn nicht, wie oben schon erwähnt, in den Gewittern ein entgegengesetzter Ladungstransport das elektrische Feld aufrecht erhalten würde (Gewittergenerator).

4. Einige Probleme der Luftelektrizität

Mit der Deutung der luftelektrischen Vorgänge als Kreisprozeß, wo die Gewitter die ladungstrennende Ursache, also den Generator, und die gewitterfreien Gebiete den Arbeitswiderstand bilden, wurde

eine der Hauptfragen der Luftelektrizität beantwortet. Diese Antwort ist aber noch nicht vollständig, da die Bilanz des Elektrizitätsumsatzes in der Atmosphäre erst sehr lückenhaft vorliegt. Ungeklärt ist auch die Frage, welche Vorgänge in den Gewitterwolken die Ladungstrennung bewirken. Man kennt zwar eine ganze Reihe von Prozessen, die zu einer Ladungstrennung führen können, für eine quantitative Erklärung genügen sie aber nicht. Weitere Probleme, mit denen sich die luftelektrische Forschung beschäftigt, sind die Feinstruktur von Feld und Vertikalstrom, die luftelektrisch-meteorologischen Zusammenhänge, das Ionisationsgleichgewicht und die Beziehungen zu den Luftverunreinigungen und in zunehmendem Maße die luftelektrischen Vorgänge in großen Höhen. Auch die Frage nach den biologischen Wirkungen des luftelektrischen Geschehens ist immer noch offen.

III. Meßmethoden und Apparaturen

1. Apparatur zur Messung des Potentialgradienten

a) Das Meßprinzip

Für die Messung des luftelektrischen Potentialgradienten wurde ein Gerät gebaut, das eine Weiterentwicklung eines von den Verfassern in einer früheren Arbeit (2) beschriebenen Apparates darstellt. Abb. 4 zeigt das Meßprinzip. Die Sonde S mit dem radioaktiven Präparat ist mit dem Gitter einer Elektrometerröhre verbunden, die einen sehr kleinen Gitterstrom ($< 10^{-14}$ A) hat. In Serie mit der Elektrometerröhre liegt ein Widerstand R und die an ihm vom Anodenstrom erzeugte Spannung wird zur Steuerung eines Niederfrequenzoszillators verwendet. Die Wechselspannung des Oszillators wird verstärkt und gleichgerichtet und dient als Kompensationsspannung. Steigt z. B. die Sonderspannung V_s, so erhöht sich der Anodenstrom, und die am Ausgang des Verstärkers erzeugte Kompensationsspannung V wächst solange, bis sich wieder nahezu der ursprüngliche Anodenstrom einstellt, d. h. bis die Kathodenspannung um fast gleichviel gestiegen ist wie die Sondenspannung. Die Kompensation ist theoretisch nicht vollkommen, da für die Steuerung des Oszillators ein gewisser Strom erforderlich ist; die Abweichung kann aber so klein gehalten werden, daß sie praktisch nicht ins

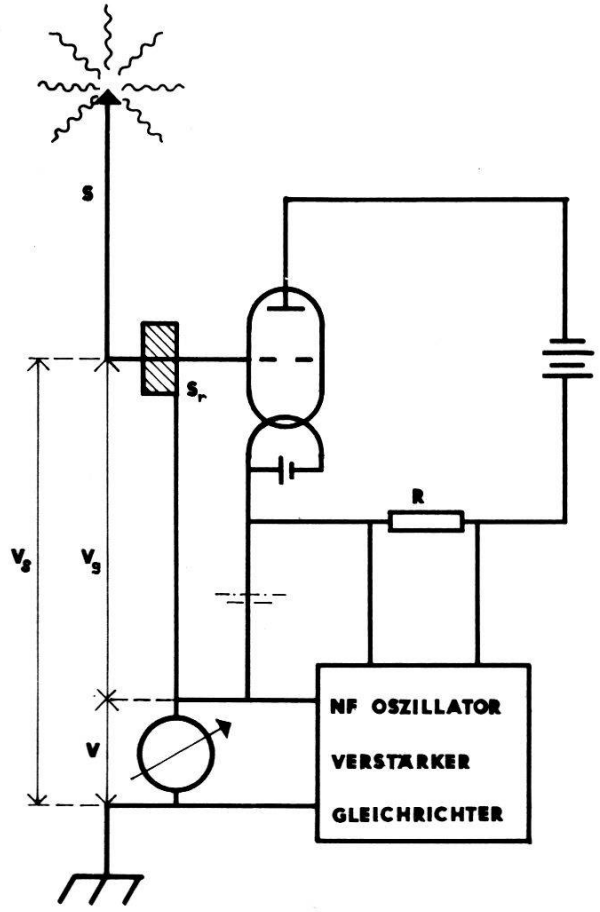

Abb. 4. Prinzipschema der Potentialapparatur

Gewicht fällt. Auf diese Weise kann also das Kathodenpotential der Sondenspannung dauernd automatisch nachgeführt werden, wodurch die Röhre im gleichen Arbeitspunkt verbleibt.

Wenn V_g die Spannung bedeutet, auf welche sich das freie Gitter der Elektrometerröhre auflädt (Schwimmpunkt), so besteht die Beziehung $V_s = V + V_g$.

Die Gitterspannung V_g, die etwa -5 Volt beträgt, kann durch eine in die Kathodenleitung geschaltete Spannungsquelle kompensiert werden (in Abb. 4 gestrichelt gezeichnet), so daß dann $V_s = V$ wird.

Die Spannung V kann leicht gemessen und mit allen üblichen Registrierinstrumenten aufgezeichnet werden.

Das beschriebene Meßprinzip bietet den Vorteil konstanten großen Eingangswiderstandes, da die Röhre dauernd im Schwimmpunkt, also im Zustand kleinsten Gitterstromes, bleibt. Die Sondenbelastung ist deshalb sehr klein und unabhängig von der Sondenspannung. Da nicht nur die Kathode, sondern, wie aus Abb. 4 her-

vorgeht, auch der Schutzring S_r der Sondenspannung nachgeführt wird, besteht zwischen Sonde und Schutzring praktisch keine Potentialdifferenz, wodurch die Isolationsschwierigkeiten erheblich vermindert werden. Die Spannungsnachführung am Schutzring erniedrigt auch die Eingangskapazität, so daß mit sehr schwachen radioaktiven Präparaten noch kurze Einstellzeiten erreicht werden.

Ein weiterer Vorteil dieses Meßprinzips besteht darin, daß die zu messende Spannung V_s gleich der vom Instrument angezeigten Spannung V ist, was eine Eichung unnötig macht und eine lineare Anzeige bzw. Registrierung ermöglicht.

b) Aufbau der Apparatur

Die Apparatur umfaßt den im Freien stehenden Sondenteil und den im Meßraum aufgestellten Kompensationsverstärker. Der Sondenteil besteht aus einem licht- und wasserdichten Gußkästchen, in dem sich die Elektrometerröhre befindet. Die Sonde wird durch einen Teflonisolator, der den geheizten Schutzring trägt, ins Innere des Kästchens geführt und über einen Schutzwiderstand mit dem Gitter der Röhre verbunden. Zum Schutz gegen Staub und Insekten ist der Teflonisolator von zwei konzentrisch ineinandergeschobenen und durch einen schmalen Luftspalt getrennten Isolatoren aus Plexi-

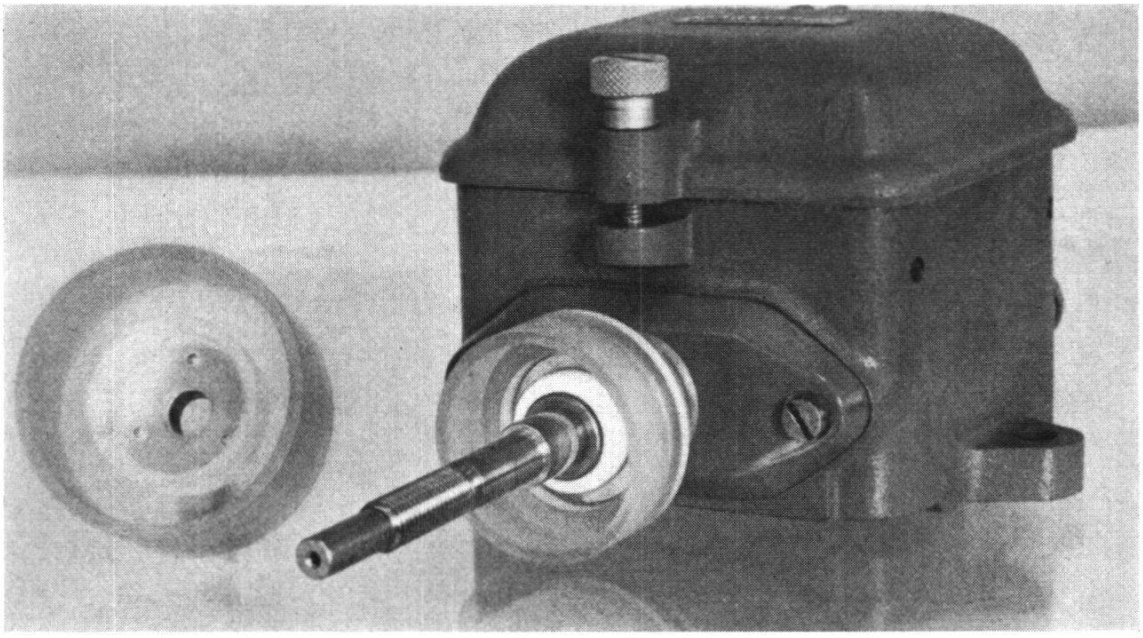

Abb. 5. Sondenkästchen mit Durchführung durch den Teflonisolator und Hüllisolatoren

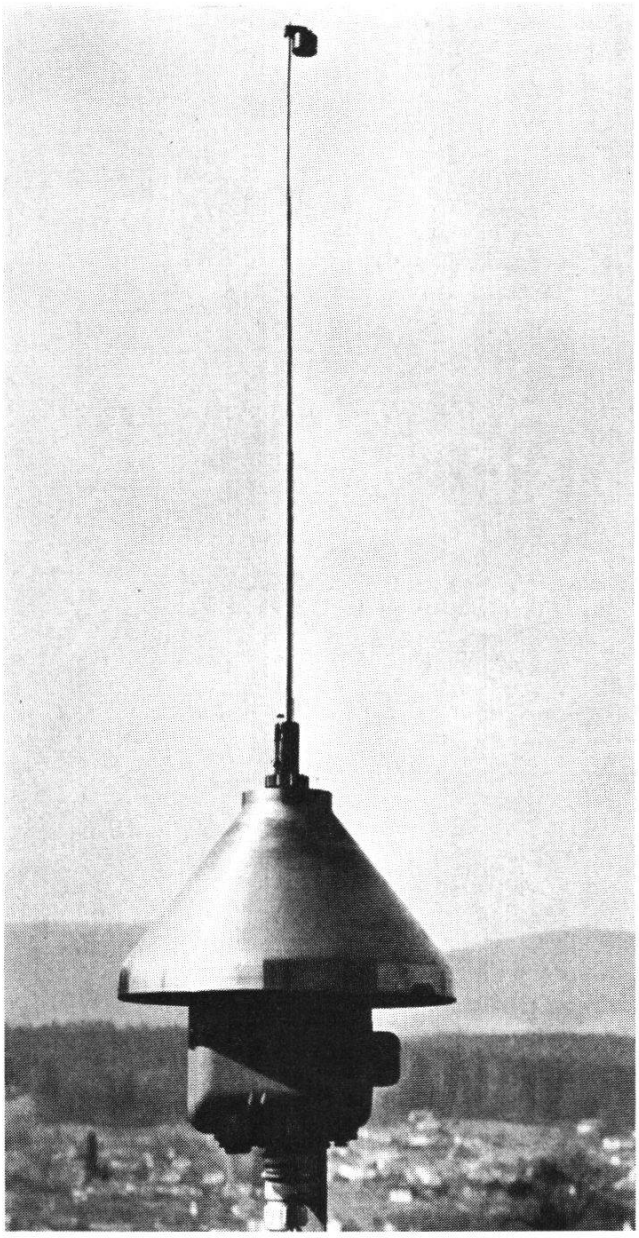

Abb. 6. Betriebsbereiter Sondenteil zur Messung des Potentialgradienten

glas umgeben. Diese Hüllisolatoren haben lediglich Schutzfunktion und sind an der Isolation der Sondendurchführung nicht beteiligt. Abb. 5 zeigt das Kästchen mit der Durchführung durch den Teflonisolator (weiß) und den beiden Hüllisolatoren. Mit der Durchführung leitend verbunden ist die daraufgesetzte Kupferhaube, die als Regenschutz dient. Sie trägt auch die teleskopartig ausziehbare Sonde, an deren oberen Ende das radioaktive Präparat befestigt ist. Durch Veränderung der Sondenlänge kann der Meßbereich den örtlichen Verhältnissen angepaßt werden.

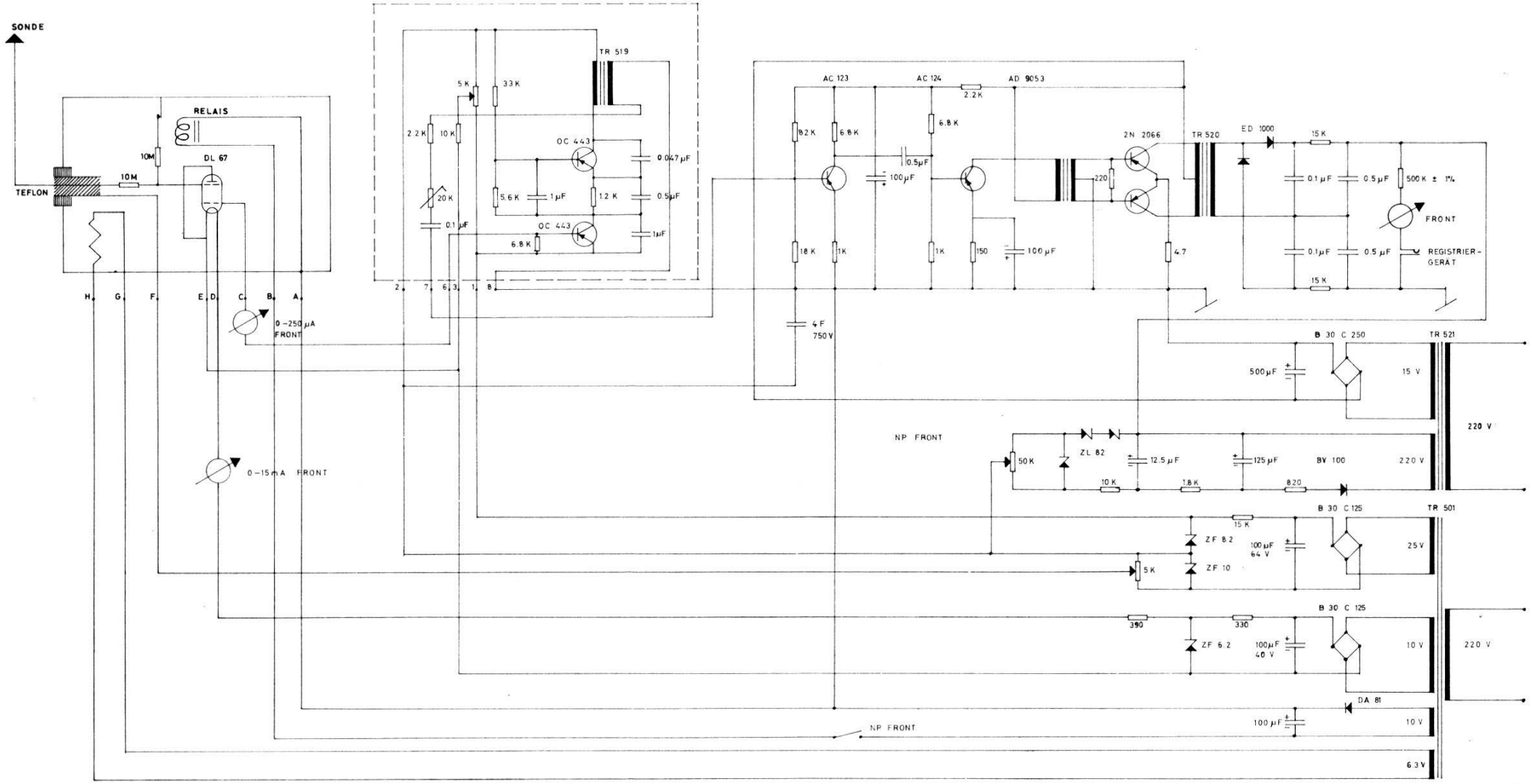

Abb. 7. Kompensationsgerät. Vollständiges Schaltschema der Potentialapparatur

Als radioaktive Substanz werden wenige Microcurie Americium 241 verwendet, das wie das früher häufig verwendete Polonium ein Alphastrahler ist, aber eine viel größere Halbwertszeit hat (T = 461 Jahre). In Abb. 6 ist der betriebsbereite Sondenteil dargestellt.

Das Sondenkästchen ist durch ein wetterfestes Vielfachkabel mit dem im Meßraum aufgestellten Kompensationsgerät verbunden. Da diese Verbindung niederohmig ist, kann die Sonde ziemlich weit vom Meßraum entfernt aufgestellt werden.

Das Kompensationsgerät umfaßt den Niederfrequenzoszillator, den Verstärker und den Netzteil, der alle für den Betrieb der Apparatur nötigen Spannungen liefert und stabilisiert. Das Gerät, das vollständig transistorisiert ist, hat einen Meßbereich von − 200 Volt bis + 300 Volt. Die Sondenspannung kann am Instrument auf der Frontplatte abgelesen und über den 100-mV-Ausgang mit einem Kompensationsschreiber oder über den 1-mA-Ausgang mit einem Drehspulregistriergerät aufgezeichnet werden. Zur Funktionskontrolle sind auf der Frontplatte zwei Instrumente für den Anoden- bzw. Heizstrom der Elektrometerröhre vorhanden. Mit einem im Sondenkästchen eingebauten Relais kann die Sonde zur Nullpunktkontrolle über einen Schutzwiderstand geerdet werden. Abb. 7 zeigt das vollständige Schaltschema.

2. Apparatur zur Messung der polaren Leitfähigkeit der Luft

a) Das Meßprinzip

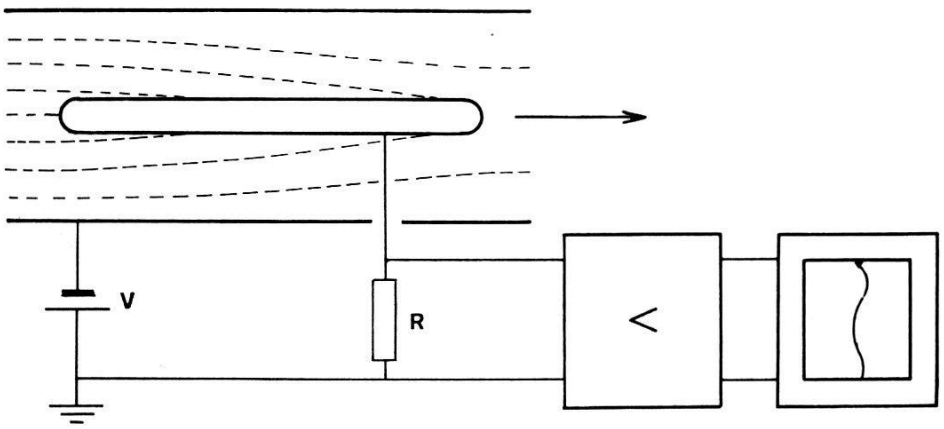

Abb. 8. Prinzipieller Aufbau der Leitfähigkeitsapparatur
Die gestrichelten Linien deuten die Ionenbahnen an

Wir bedienen uns der Methode von GERDIEN (3). Abb. 8 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Die Luft wird durch einen Zylinderkondensator gesaugt; das elektrische Feld trennt die Ionen. Die Ionen eines Vorzeichens gelangen auf die innere, hochisolierte Elektrode, welche über einen Präzisionshochohmwiderstand an Erde gelegt ist. An diesem Widerstand entsteht eine Spannung U proportional zum polaren Ionenstrom J, d.h. proportional zur Zahl der pro Zeiteinheit auf die innere Elektrode gelangenden Elementarladungen eines Vorzeichens. Ein Verstärker mit Vibrationskondensator führt diese Spannung einem Registriergerät zu.

b) Berechnung der polaren Leitfähigkeit

Es gelten folgende Bezeichnungen:

r_a innerer Radius des äußeren Sondenrohres
r_i Radius der Zentralelektrode
L Länge der Zentralelektrode
V Spannung zwischen den beiden Elektroden
i Stromdichte vor der Zentralelektrode
J Strom durch den Hochohmwiderstand R
R Widerstand
$U = RJ$ Spannungsabfall am Hochohmwiderstand
λ polare Leitfähigkeit der Luft

$$E_i = \frac{V}{r_i \cdot \ln \frac{r_a}{r_i}}$$ elektrische Feldstärke bei der innern Elektrode

$$C = 2\pi\varepsilon_0 \frac{L}{\ln \frac{r_a}{r_i}}$$ Kapazität des Kondensators

ε_0 = Influenzkonstante $8{,}86 \cdot 10^{-12}$ A sec/Voltm

Der Ionenstrom beträgt

$$J = i \cdot 2\pi r_i \cdot L \text{ mit } i = \lambda \cdot E;$$

daraus ergibt sich für die polare Leitfähigkeit

$$\lambda = \frac{J}{2\pi r_i LE} = \frac{U}{2\pi r_i LER}$$

oder

$$\lambda = \frac{\varepsilon_0 \cdot U}{VCR}$$

Die Apparatur weist folgende Dimensionen auf:

r_a = 0,035 m
r_i = 0,0115 m
L = 0,40 m

Daraus ergibt sich für die Kapazität der Wert

$C = 20 \cdot 10^{-12}$ Farad in Übereinstimmung mit der experimentellen Bestimmung.

Die Rohrspannung ist fest eingestellt auf $V = 17{,}7$ Volt, und Verstärker und Registrierinstrument zeigen Vollausschlag bei $U = 0{,}1$ Volt.

Durch einen hochisolierenden Stufenschalter können wahlweise drei im Verstärker eingebaute Hochohmwiderstände eingeschaltet werden, zur Kontrolle des Nullpunktes ist ein Schutzwiderstand von 10^7 Ohm vorgesehen. Tabelle 1 zeigt die Ableitwiderstände und die zugehörige polare Leitfähigkeit bei Vollausschlag.

Tabelle 1

Stufe	Widerstand R Ohm	Polare Leitfähigkeit $\text{Ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
NP	10^7	–
× 2,5	10^{11}	$2{,}5 \cdot 10^{-14}$
× 5	$5 \cdot 10^{11}$	$5{,}0 \cdot 10^{-14}$
× 10	$2{,}5 \cdot 10^{11}$	$10{,}0 \cdot 10^{-14}$

Damit keine Sättigung, welche eine zu kleine Leitfähigkeit vortäuschen würde, eintritt, muß die Strömungsgeschwindigkeit v der Luft so groß sein, daß die am äußersten Rand einströmenden Ionen nicht auf die Zentralelektrode gelangen können. Die Rechnung ergibt für die Strömungsgeschwindigkeit die Bedingung

$$v \geq \frac{2kVL}{(r_a^2 - r_i^2) \ln \frac{r_a}{r_i}} = \frac{kVC}{\pi \varepsilon_0 (r_a^2 - r_i^2)}.$$

Für Ionen mit der Beweglichkeit $k = 2 \cdot 10^{-4}$ m²/Voltsec ergibt sich damit bei der Rohrspannung $V = 17{,}7$ Volt eine minimale Geschwindigkeit von $v = 2{,}4$ m/sec. In Wirklichkeit ist die Geschwindigkeit beträchtlich größer, rund 10 m/sec.

c) Konstruktionsdetails

Das Sondenrohr, die äußere Elektrode des Zylinderkondensators, ist in einem massiven Messingrohr isoliert gelagert. Dieses geerdete Schutzrohr trägt auch die Halterung der beiden Teflonisolatoren, welche mittels Bolzen die Zentralelektrode tragen. Ein auf Erdpotential liegender Schutzzylinder greift durch das Sondenrohr hindurch. Dieser Schutzzylinder wird durch einen aufgeschraubten Widerstand leicht geheizt, er schirmt die Bolzen gegen die Rohrspannung ab und verhindert das Verschmutzen des Teflons. Abb. 9 zeigt einen Schnitt durch ein Sondenrohr, und aus Abb. 10 ist der Aufbau eines Isolators ersichtlich. Je zwei Sondenrohre für die positive und die negative polare Leitfähigkeit sind in einem Gehäuse

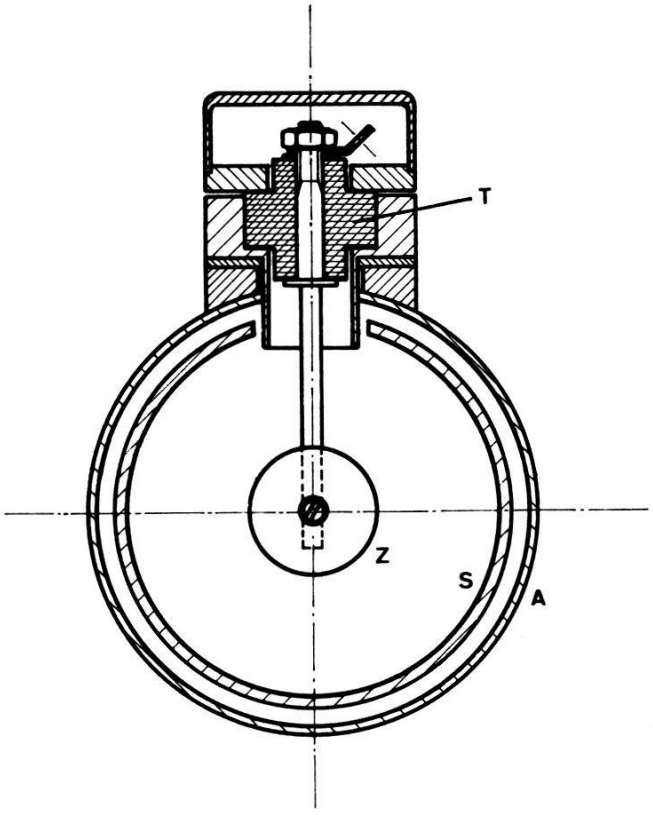

Abb. 9. Querschnitt durch ein Sondenrohr der Leitfähigkeitsapparatur. *Z* Zentralelektrode, *S* äußeres Sondenrohr, *A* geerdetes Abschirmrohr, *T* Teflonisolator

untergebracht, welches auch die stabilisierten Netzgeräte für die Sondenspannung enthält. Eine komplette Apparatur mit aufgeflanschten Ventilatoren und Ansaugstutzen ist in Abb. 11 abgebildet.

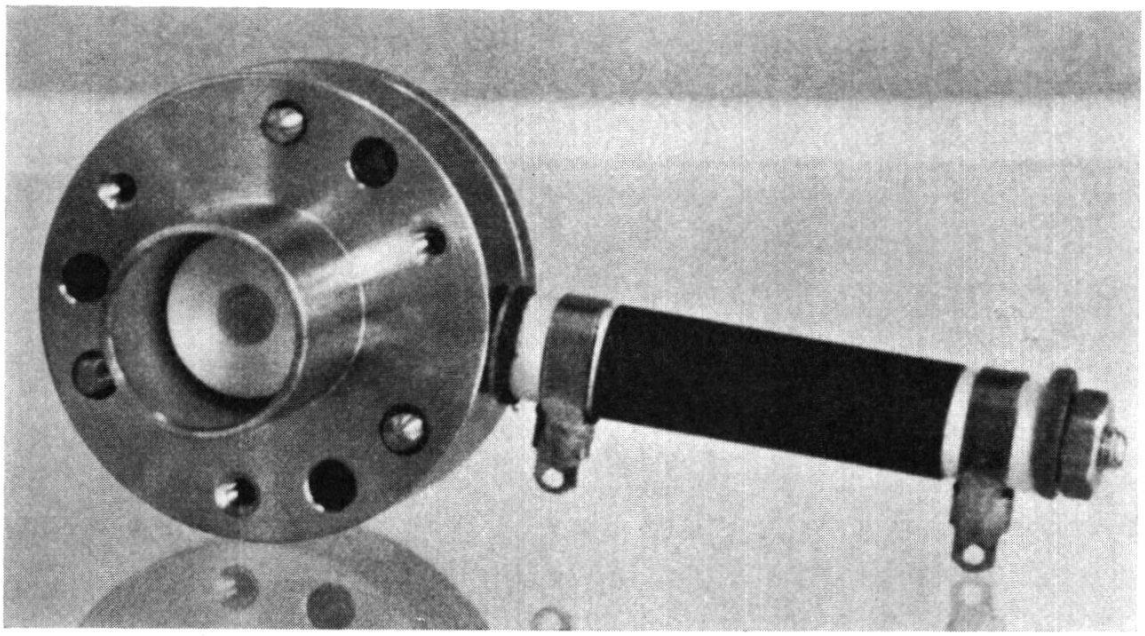

Abb. 10. Isolator der Leitfähigkeitsapparatur mit Heizkörper

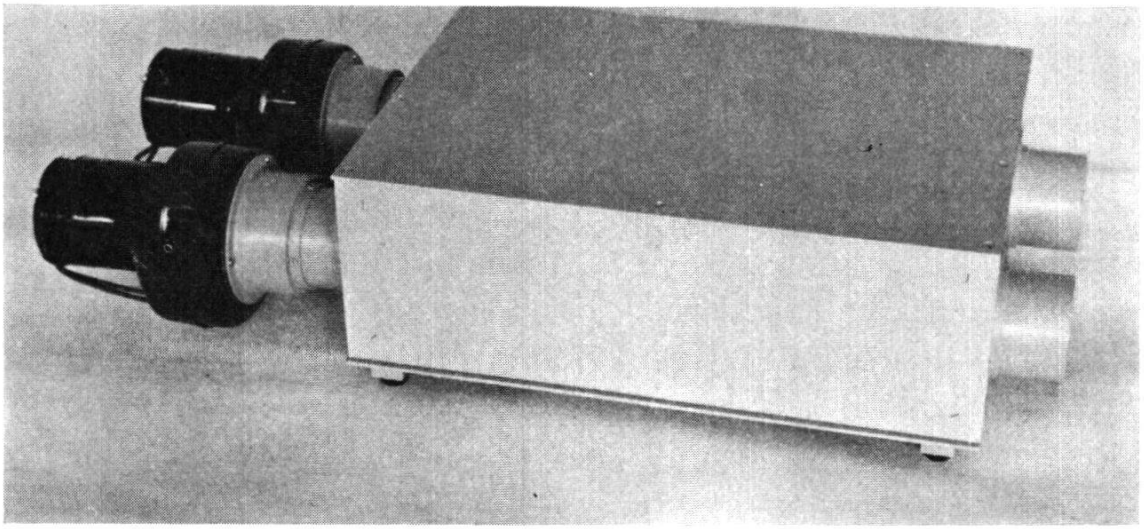

Abb. 11. Aspirationsgerät für die Messung der Leitfähigkeit beider Vorzeichen

Die auf die Zentralelektroden fließenden Ionenströme werden durch abgeschirmte, hochisolierende Kabel den Verstärkern zugeführt und durch in Glas eingeschmolzene Präzisionshochohmwider-

stände zur Erde abgeleitet. Bei einer Eingangsspannung von 100 mV zeigen die Verstärker Vollausschlag. Da die Rohrspannung aber 17,7 Volt beträgt, fällt der Spannungsabfall von 100 mV kaum ins Gewicht und braucht nicht kompensiert zu werden.

d) Der Verstärker

Um die bei Gleichstromverstärkern vor allem im Dauerbetrieb auftretenden Schwierigkeiten zu vermeiden, wird die an R entstehende Gleichspannung U mit einem Schwingkondensator (Vibrator) in eine zu U proportionale Wechselspannung umgewandelt. Über eine Elektrometerröhre erfolgt die Anpassung an den Eingangswiderstand des nachfolgenden Wechselstromverstärkers, an dessen Ausgang die phasenrichtige Gleichrichtung der verstärkten Wechselspannung vorgenommen wird. Durch hohe Gleich- und Wechselstromgegenkopplungen und durch weitgehende Stabilisierung der Versorgungsspannungen wird erreicht, daß sowohl die Abweichungen von der Linearität als auch die durch übliche Temperatur- und Spannungsschwankungen erzeugte Drift von Nullpunkt und Verstärkungsfaktor in allen Meßbereichen nicht mehr als 1 % beträgt. Da die einzelnen Meßbereiche nur von der Größe des gewählten Eingangswiderstandes abhängen, ist der Verstärkungsfaktor für alle Meßbereiche gleich, was eine sehr einfache Kontrolle des Verstärkers zuläßt. Man braucht lediglich an den Eingang eine Gleichspannung von 100 mV zu legen, dann muß das Instrument Vollausschlag zeigen. Allfällige Abweichungen können mit einem Stell-Potentiometer, das die Gesamtgegenkopplung beeinflußt, korrigiert werden. Der Verstärker, der mit Ausnahme der Elektrometerröhre nur Halbleiter enthält, besitzt zwei Ausgänge: 100 mV für einen Kompensationsschreiber und 1 mA an maximal 1 kOhm für ein Drehspulregistrierinstrument. Diese Verstärker, die sich in mehrjährigem Dauerbetrieb bewährt haben, werden auch für die Messung der Klein- und Groß-Ionen-Konzentrationen und des Vertikalstromes verwendet, wobei jeweilen die Eingangswiderstände der betreffenden Meßgröße angepaßt sind. Abb. 12a, 12b, 12c zeigen die Schaltbilder der drei Einheiten, aus denen sich ein solcher Verstärker zusammensetzt, und Abb. 13 einen betriebsbereiten Verstärker. Die Eingangswiderstände und Kapazitäten der in Abb. 12a dargestellten Vibratoreinheit beziehen sich auf den Vertikalstromverstärker.

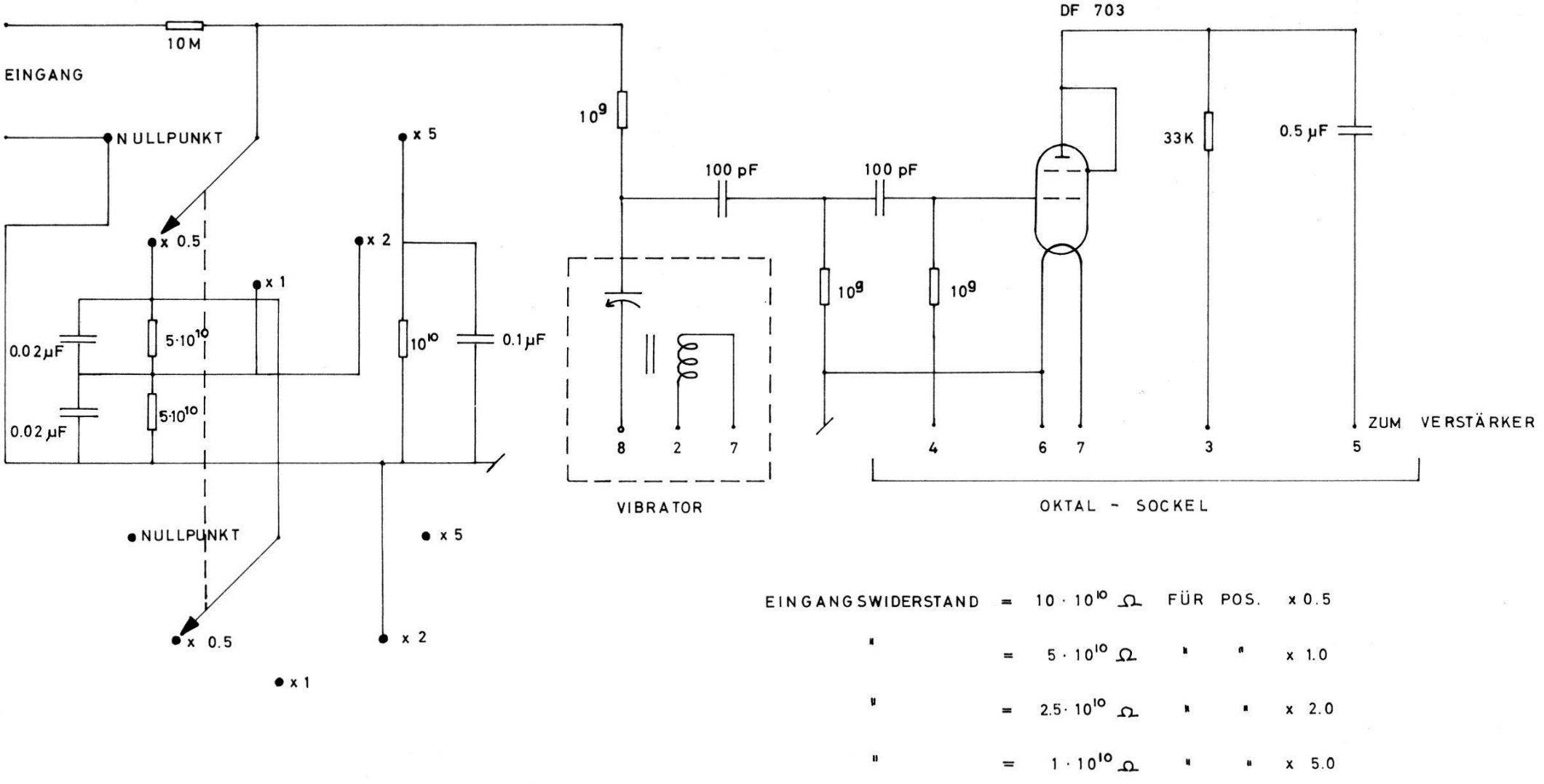

Abb. 12a. Schaltschema der Vibratoreinheit
Die eingezeichneten Widerstands- und Kapazitätswerte beziehen sich auf die Eingangsstufe eines Vertikalstromverstärkers

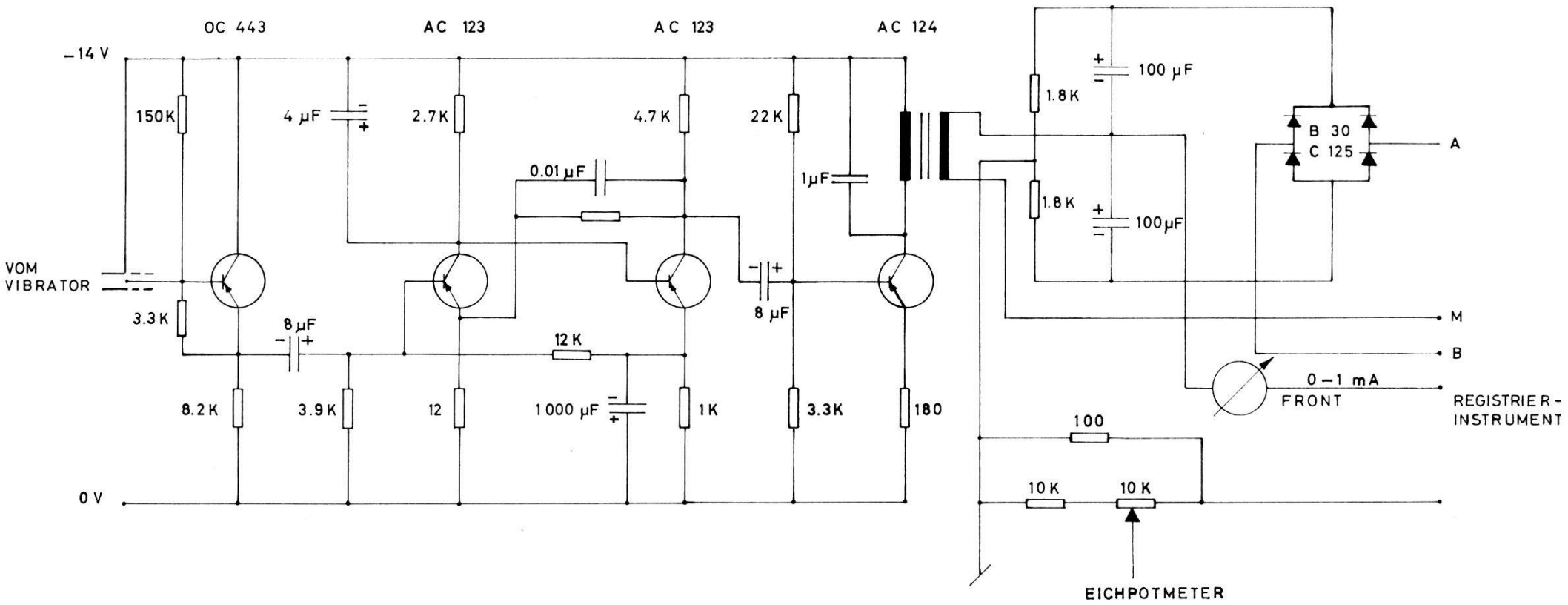

Abb. 12b. Schaltschema des Wechselstromverstärkers mit Phasengleichrichter

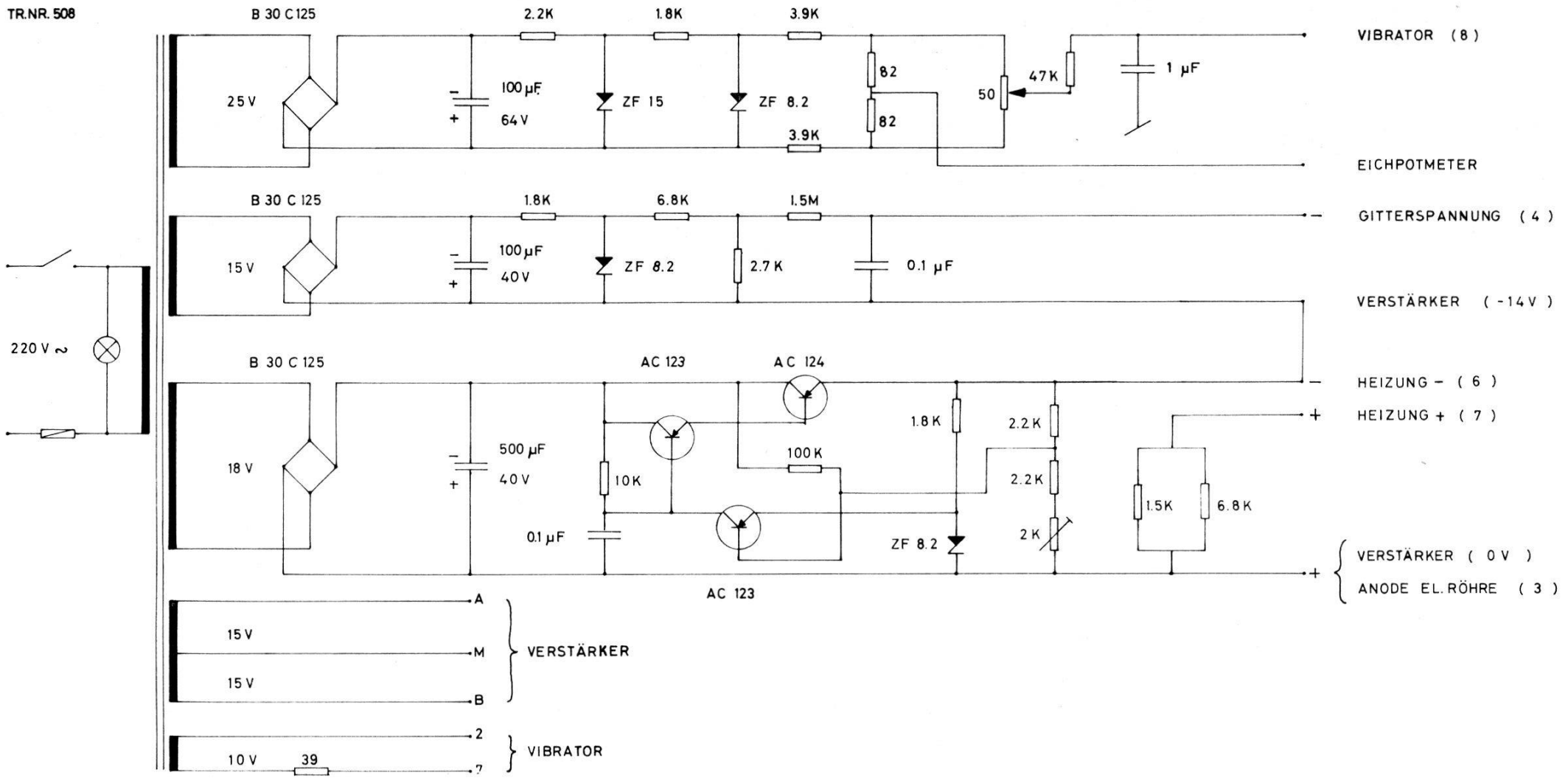

Abb. 12c. Schaltschema der stabilisierten Stromversorgung

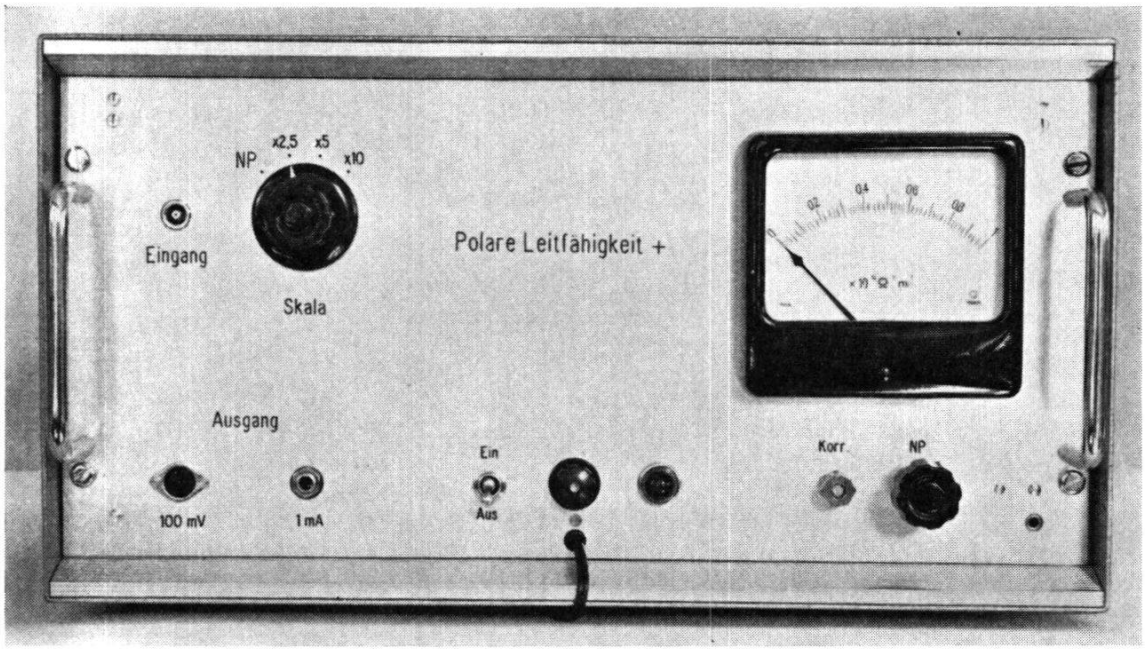

Abb. 13. Verstärker für die Leitfähigkeitsmessung

3. Apparatur zur Messung der Zahl der leichten Ionen pro Volumeneinheit

a) Das Meßprinzip

Grundsätzlich wird das gleiche Meßprinzip angewendet wie bei der Leitfähigkeit, mit dem Unterschied, daß man bei der Messung der Ionenzahl im Sättigungsgebiet arbeitet. Alle Ionen, auch die am Rand einströmenden, müssen auf der Auffangelektrode gesammelt werden. Die Ionenzahl pro Volumeneinheit beträgt

$$n = \frac{J}{M_0 \cdot e} = \frac{U}{M_0 e R}$$

wobei

J = Querstrom im Kondensator
U = Spannungsabfall am Hochohmwiderstand R
M_0 = Durchflußvolumen in m^3/sec
e = Elementarladung $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ A sec

Tabelle 2 zeigt die für die verschiedenen Meßbereiche im Verstärker eingebauten Widerstände und die damit erfaßten Ionenzahlen/cm^3 bei Vollausschlag.

Tabelle 2

Stufe	Widerstand R Ohm	Ionenzahl/cm³
NP	10^7	–
1	10^{11}	1000
2	$5 \cdot 10^{10}$	2000
4	$2{,}5 \cdot 10^{10}$	4000
10	10^{10}	10000

Die Rohrspannung V definiert die minimale Beweglichkeit k der gemessenen Ionen. Alle Ionen mit größerer Beweglichkeit werden also vollständig gemessen, dazu allerdings auch ein kleiner Teil der schwereren Ionen, nämlich diejenigen, welche in der Nähe der Auffangelektrode einströmen.

Zwischen Grenzbeweglichkeit k und Rohrspannung V besteht die Beziehung

$$k \cdot V = \frac{\varepsilon_0 \cdot M_0}{C}$$

wobei ε_0 wieder die Influenzkonstante und C die Kapazität des Kondensators bedeutet.

Wir haben eine Durchflußmenge $M_0 = 6{,}25$ Liter/sec gewählt und arbeiten mit einer Grenzbeweglichkeit $k = 0{,}25 \cdot 10^{-4}$ m²/Volt, entsprechend einer Rohrspannung $V = 110{,}4$ Volt.

b) Konstruktionsdetails

Abgesehen von einer Modifikation der Ansaugseite verwenden wir denselben Aspirator wie bei der Messung der Leitfähigkeit. Da auch die am Rand einströmenden Ionen gezählt werden sollen, muß man aber dafür sorgen, daß diese nicht infolge des elektrischen Feldes zwischen Abschirmung und Rohr auf die Abschirmung getrieben werden (4, 5). Zu diesem Zwecke trägt die Auffangelektrode auf der Ansaugseite einen durch drei dünne Stäbchen gehaltenen, bis zum äußeren Sondenrohr hinausragenden Ring, welcher die zurückgestossenen Ionen auffängt.

Die Durchflußmenge M_0 wird durch den Druckabfall an einer Normblende nach VDI-Vorschrift (6) kontrolliert. Die Einrichtung wurde mit einem Rotameter geeicht.

4. Apparatur zur Messung der Zahl der schweren Ionen pro Volumeneinheit

Infolge der geringen Beweglichkeit der schweren Ionen haben wir an Stelle eines Zylinderkondensators einen Plattenkondensator verwendet. Aluminiumplatten von $L = 0{,}5$ m Länge bilden einen zwölfflächigen Kondensator mit $d = 4$ mm Luftspalt. Bei einer Durchflußfläche von 49,65 cm² und einem Strömungsvolumen $M_0 = 0{,}625$ Liter/sec beträgt die Strömungsgeschwindigkeit nur $v = 12{,}6$ cm/sec.

Das Produkt Grenzbeweglichkeit × Kondensatorspannung beträgt dann

$$k \cdot V = \frac{d^2 v}{L} = 0{,}0403 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m^2/sec}.$$

Mit einer Sondenspannung von z. B. 161 Volt können damit alle Ionen bis zu Ultra-Groß-Ionen mit einer Beweglichkeit von $2{,}5 \cdot 10^{-8}$ m²/sec gezählt werden.

Das pro Zeiteinheit fließende Luftvolumen wird wieder wie bei den leichten Ionen mit dem Druckabfall an einer Normblende kontrolliert.

Tabelle 3 gibt die Ionenzahlen pro cm³ bei Vollausschlag für die verschiedenen Ableitwiderstände.

Tabelle 3

Stufe	Widerstand R Ohm	Ionenzahl/cm³
NP	10^7	–
1	10^{11}	10000
2	$5 \cdot 10^{10}$	20000
4	$2{,}5 \cdot 10^{10}$	40000
10	10^{10}	100000

5. Apparatur zur Messung der Vertikalstromdichte *i*

a) Das Meßprinzip

Das Gerät besteht aus einem isoliert aufgestellten Auffanggitter (Abb. 15) und einem Vibratorverstärker. Der Vertikalstrom wird vom Gitter – ein gelochtes, gegen Korrosion geschütztes Eisenblech von ½ m² Fläche – aufgefangen und durch einen Hochohmwiderstand im Verstärker abgeleitet. Der Spannungsabfall U ist proportional zum Vertikalstrom.

Da der Vertikalstrom je nach Vorzeichen des Potentialgradienten auch negativ sein kann, befindet sich der Nullpunkt des Verstärkers bei $^2/_5$ der ganzen Skala. Der Meßbereich liegt zwischen − 50 und + 75 mV. Tabelle 4 enthält die erfaßten Meßbereiche der Vertikalstromdichte für die verschiedenen Widerstände unter Berücksichtigung der ½ m² großen Auffangfläche.

Tabelle 4

Stufe	Widerstand Ohm	Meßbereich · 10^{-12} A/m²
NP	10^7	–
0,5	10^{11}	− 1 bis + 1,5
1	$5 \cdot 10^{10}$	− 2 bis + 3,0
2	$2{,}5 \cdot 10^{10}$	− 4 bis + 6,0
5	10^{10}	− 10 bis + 15,0

Um Influenzladungen, welche durch rasche Änderungen der elektrischen Feldstärke auf dem Gitter entstehen, eliminieren zu können, sind parallel zu den Eingangswiderständen hochisolierende Kondensatoren geschaltet. Die Größe dieser Kondensatoren ist so gewählt, daß sich auf allen Meßbereichen eine Zeitkonstante von etwa 1000 Sekunden ergibt.

Das Gitter mißt nur dann die absolute Vertikalstromdichte, wenn es auf ebenem Gelände in einer Grube auf Bodenhöhe montiert wird. Leider ist das nicht immer möglich, da Schnee und Gras Schwierigkeiten bereiten. Man kann das Gitter aber auch auf einer Terrasse aufstellen oder sogar an einer vertikalen Wand montieren. Das elektrische Feld ist dann allerdings verzerrt, und man mißt nur relative Werte. Durch Vergleich mit gelegentlichen gleichzeitigen

Messungen auf einer ungestörten Ebene kann aber für die gewählte Aufstellung der Reduktionsfaktor bestimmt werden.

b) Konstruktionsdetails

Da das Gitter den Wettereinflüssen ausgesetzt ist, wurde auf die Konstruktion der Isolatoren (Abbildungen 14a und 14b) besonderes Gewicht gelegt. Das auf einem Rahmen montierte Gitter (Abb. 15) wird in drei Punkten isoliert abgestützt. Abb. 14a zeigt einen Isolator im Schnitt. Der Teflonstab wird besonders im unteren Teil durch einen engen Luftspalt gegen Verschmutzung geschützt. Zudem ist dieser Teil auch elektrisch geheizt, so daß sich keine Feuchtigkeit niederschlagen kann. Eine Kupferhaube schirmt den eigentlichen Isolator gegen außen ab. Zwei durch einen engen, abgewinkelten Luftspalt getrennte Plexiglasringe verhindern das Eindringen von Staub. Der Strom wird im Innern eines Isolators abgenommen und durch ein abgeschirmtes, hochisolierendes Kabel dem Verstärker zugeführt.

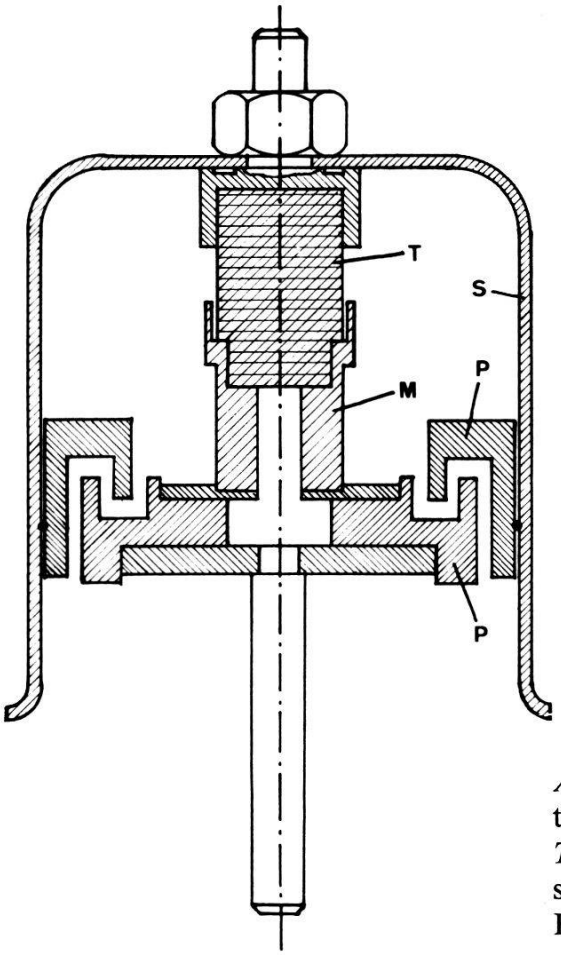

Abb. 14a. Schnitt durch den Isolator des Vertikalstromgitters. *M* geheizte Messingstütze, *T* Teflonisolator, *P* Plexiglasringe gegen Verschmutzung und Insekten, *S* Schutzhaube aus Kupfer

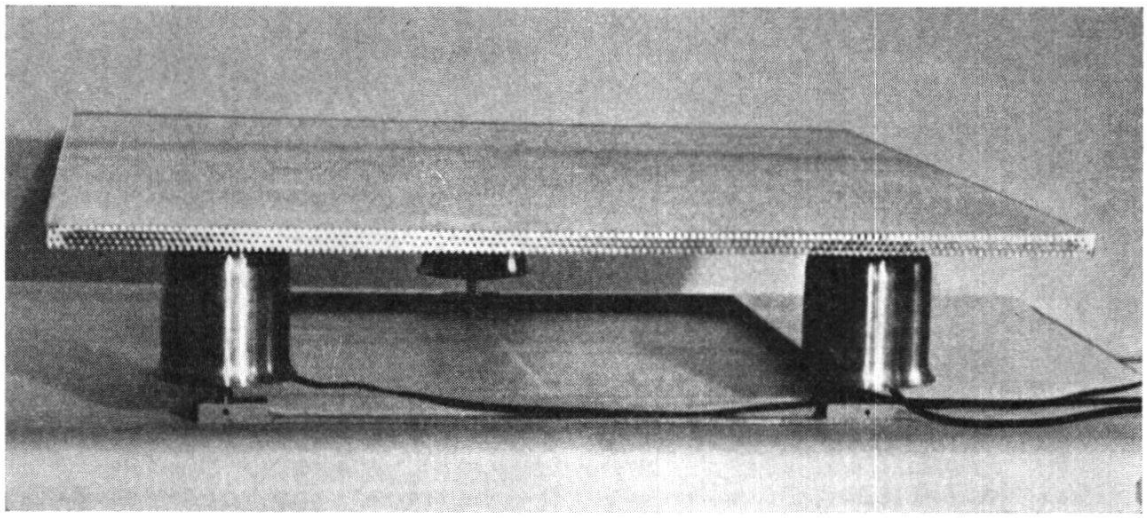

Abb. 15. Fertig montiertes Vertikalstromgitter

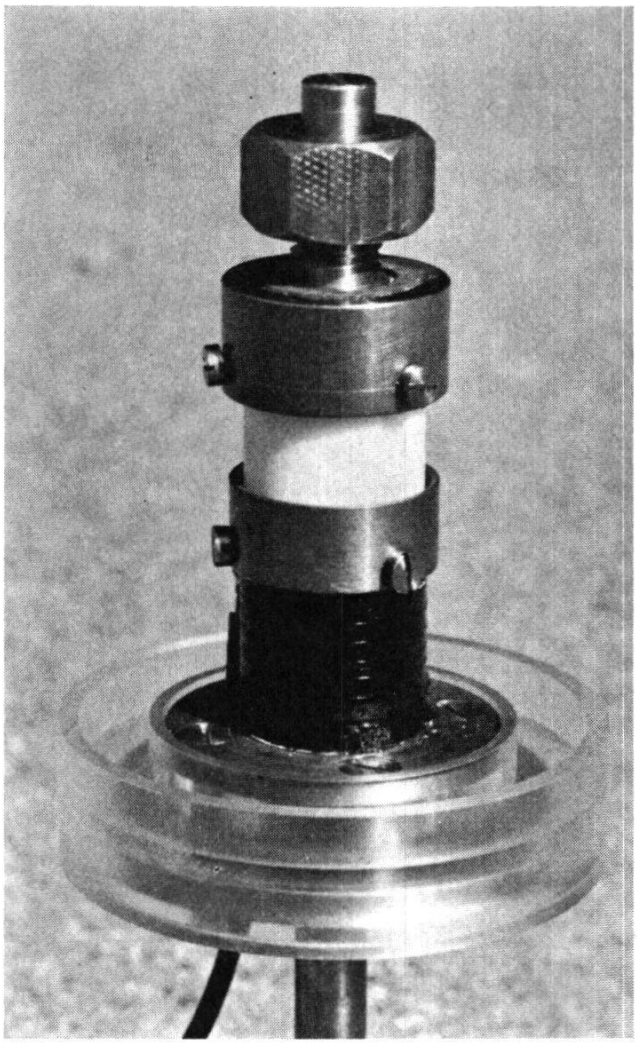

Abb. 14b. Isolator für das Vertikalstromgitter ohne Schutzhaube

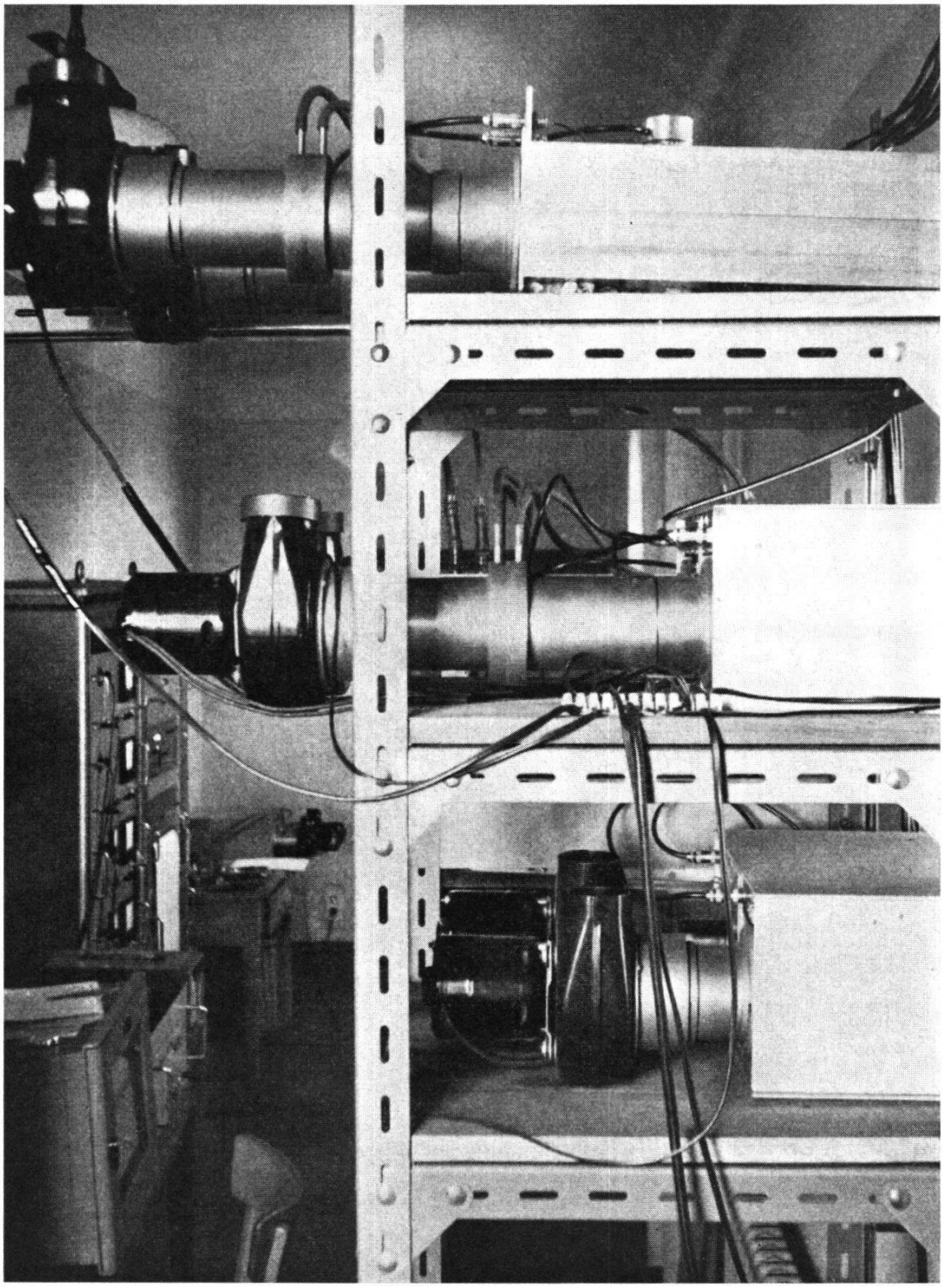

Abb. 16. Aufstellung der Aspiratoren
Von oben nach unten: schwere Ionen, leichte Ionen, polare Leitfähigkeiten
Im Hintergrund links die Verstärkerschränke

6. Aufstellung der Meßapparate

Die Station befindet sich im Turm der Sternwarte des Kantonsschulgebäudes. Der Sondenteil mit radioaktivem Kollektor zur Messung des Potentialgradienten und das Auffanggitter für den Vertikalstrom sind auf der Turmterrasse, etwa 20 m über dem Erdboden, montiert, die Aspiratoren sowie die Verstärkereinheiten und Registriereinrichtungen in einem Turmzimmer untergebracht. Abb. 16 zeigt die Sondenrohre für schwere Ionen (oben), leichte Ionen (Mitte) und polare Leitfähigkeiten (unten). Bei den beiden oberen Rohrgruppen sind die in den Luftstrom eingeschalteten Blenden zur Strömungsmessung zu erkennen. Die leicht auswechsel-

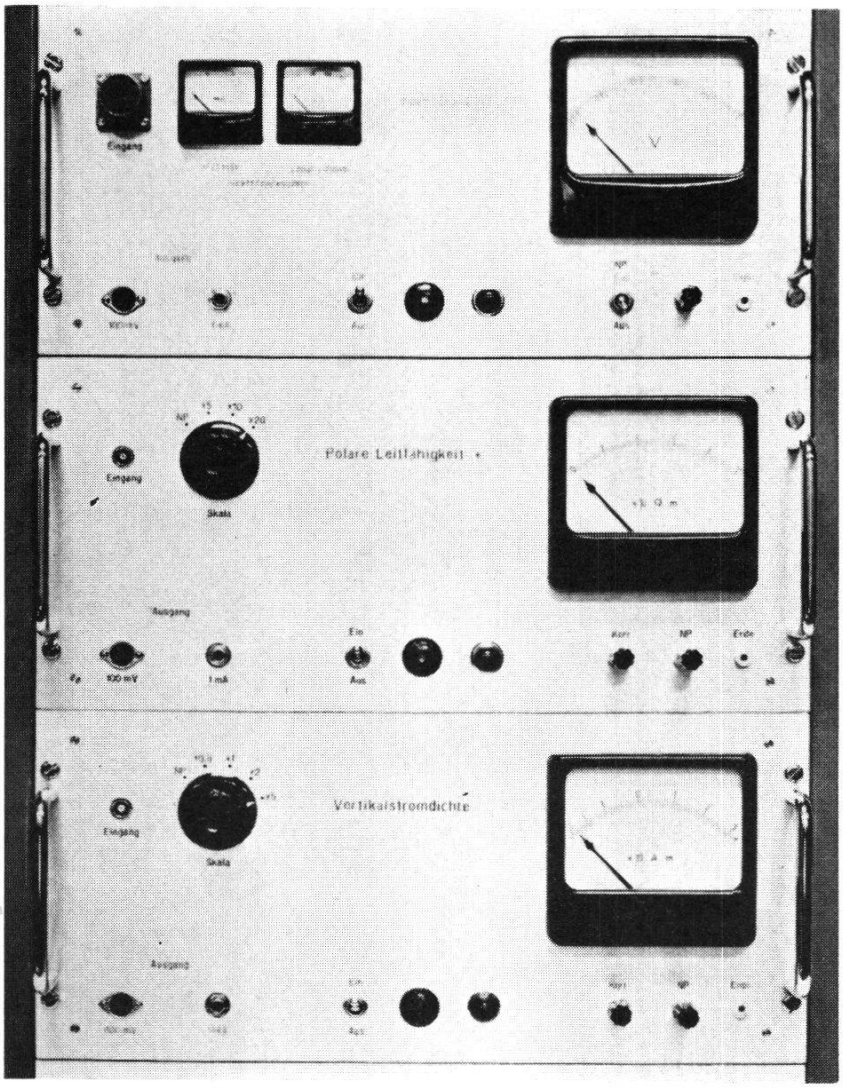

Abb. 17. Teil eines Verstärkerschrankes

baren Verstärkereinheiten (Abb. 17) und die Registriereinrichtung sind in die Schränke links eingebaut.

Um den Zusammenhang zwischen den luftelektrischen Elementen und den meteorologischen Bedingungen erfassen zu können, werden die wichtigsten meteorologischen Größen ebenfalls registriert. Es sind dies: Temperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchtigkeit, Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

Da die Auswertung der Registrierstreifen, speziell die Mittelwertbildung, recht zeitraubend ist, haben wir uns entschlossen, die Stundenmittel der wichtigsten Elemente durch einen Digitaldrucker direkt in Zahlenreihen tabellieren zu lassen. Ein Schrittschalter tastet die Ausgänge der Meßverstärker 20mal pro Stunde ab und formt die Ausgangsspannungen in entsprechend große Impulszahlen um, welche in Registrierwerken summiert und gespeichert und jede Stunde ausgedruckt werden.

IV. Einige Meßergebnisse

Die Registrierungen wurden Ende Mai 1964 begonnen und seither mit nur ganz kurzzeitigen Unterbrüchen, die für die Reinigung der Sondenrohre und Isolatoren erforderlich waren, weitergeführt.

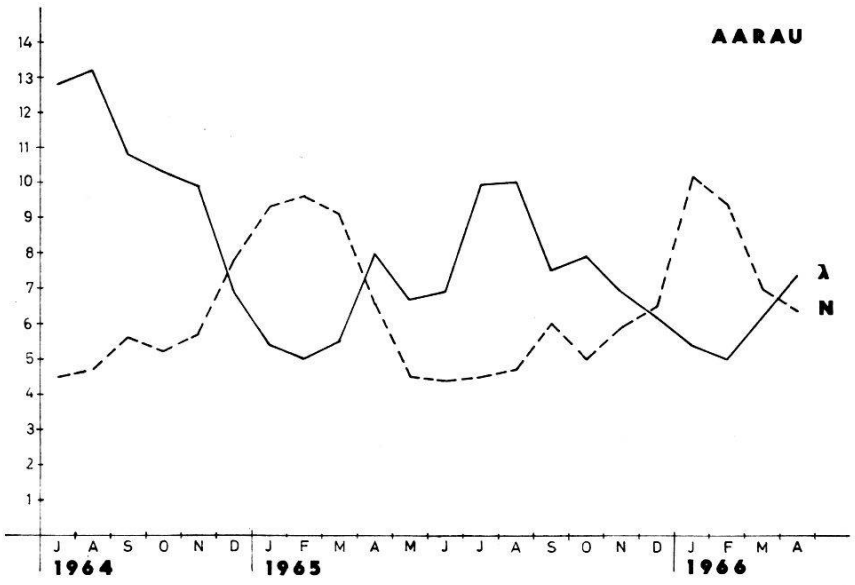

Abb. 18. Jahresgang von Leitfähigkeit und Zahl der schweren Ionen (willkürliche Einheiten)

Im folgenden sollen einige Meßergebnisse erwähnt werden, die vorwiegend mit Luftverunreinigungen zusammenhängen. Abb. 18 zeigt den Jahresgang von Leitfähigkeit und Zahl der schweren Ionen. Man sieht daraus – wie es nach der Theorie zu erwarten ist –, daß die beiden Elemente in großen Zügen gegensinnig verlaufen. Auffallend ist der große Unterschied zwischen Sommer und Winter: im Sommer ein ausgeprägtes Maximum der Leitfähigkeit verbunden mit geringer Konzentration der Schwer-Ionen, in den Wintermonaten ein Maximum der schweren Ionen und eine kleine Leitfähigkeit. Dieses Verhalten erklärt sich aus der Tatsache, daß im Winter die Durchmischung der Luft wegen der bedeutend schwächeren Sonneneinstrahlung viel kleiner ist als im Sommer und daß im Winter durch die Verbrennungsvorgänge in den Heizungen zusätzlich Kondensationskerne in beträchtlichen Mengen erzeugt werden. Die Luftverunreinigungen reichern sich deshalb in Bodennähe an und bilden durch Anlagerung an kleine Ionen Groß-Ionen. Die Konzentration der schweren Ionen nimmt folglich zu und jene der kleinen sinkt. Dadurch sinkt aber auch die Leitfähigkeit der Luft, da sie ja fast ausschließlich auf der Bewegung der Klein-Ionen beruht.

Daß die Leitfähigkeit der Luft in besiedelten Gebieten stark durch die vom Menschen erzeugten Luftverunreinigungen beeinflußt wird, geht aus Abb. 19 hervor, wo die Tagesmittelwerte der Leitfähigkeit

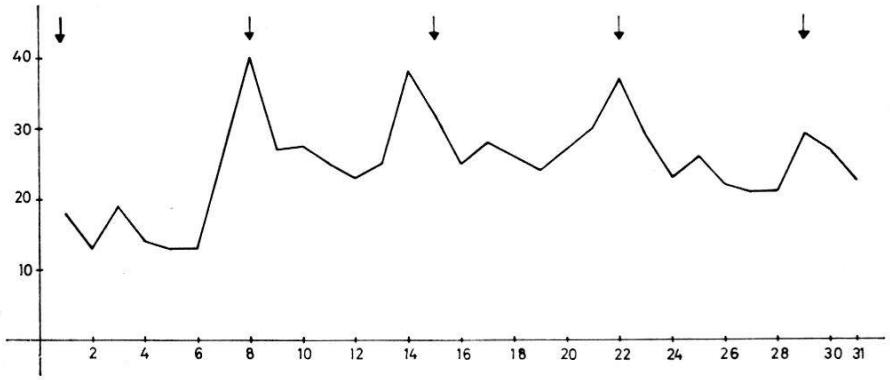

Abb. 19. Tagesmittelwerte der Leitfähigkeit (willkürliche Einheiten). Totale Leitfähigkeit, Aarau, August 1965, ↓ Sonntage

während eines Monates aufgetragen sind. Das Fehlen der industriellen Tätigkeit und der schwächere Straßenverkehr (Lastwagen) bewirken über das Wochenende, und vor allem am Sonntag, eine deutliche Zunahme der Leitfähigkeit. Diese lokalen Einflüsse auf luft-

elektrische Größen können allerdings zeitweise durch meteorologische Vorgänge überdeckt werden, wie das z. B. am 1. August 1964 (Abb. 19) der Fall war, wo durch Niederschläge die Zahl der kleinen Ionen so stark vermindert wurde, daß keine Zunahme der Leitfähigkeit mehr eintreten konnte. Wenn also auch im Einzelfall die lokalen Einflüsse nicht immer sichtbar werden, so zeigen sie sich doch in den Mittelwerten, wie das in der Abb. 20 zu sehen ist, wo der Mittelwert der schweren Ionen für die einzelnen Wochentage aus einer zweijährigen Meßreihe berechnet wurde. Bei einer Mittelwertbildung über sehr viele Meßwerte heben sich die meteorologischen Einflüsse, die zeitlich ja zufällig verteilt sind, weitgehend heraus, und es kommt deutlich zum Vorschein, wie die Luft im Laufe der Woche zuneh-

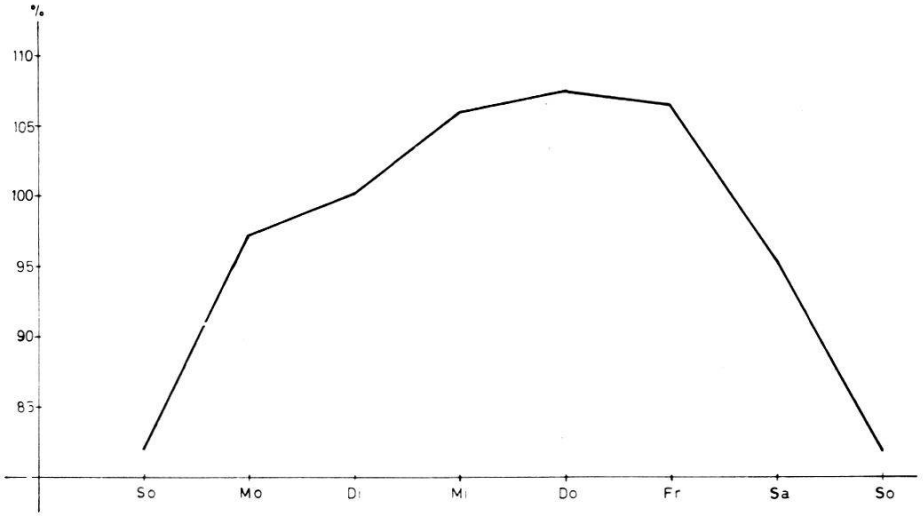

Abb. 20. Wochengang der Konzentration der schweren Ionen

mend verunreinigt wird und sich dann über das Wochenende durch Durchmischung mit reinerer Luft wieder erholt.

Neben der Durchmischung (Verdünnungseffekt) tragen vor allem die Niederschläge zur Reinigung der Luft bei (Auswascheffekt). Ein Beispiel für diesen Auswascheffekt gibt Abb. 21, wo die Tagesgänge der schweren Ionen für niederschlagsfreie Tage und Tage mit Niederschlag getrennt dargestellt sind. Die Konzentrationsspitzen der schweren Ionen und damit also auch jene der Luftverunreinigungen sind im Mittel an niederschlagsfreien Tagen um fast 70% höher als an Tagen mit Niederschlag.

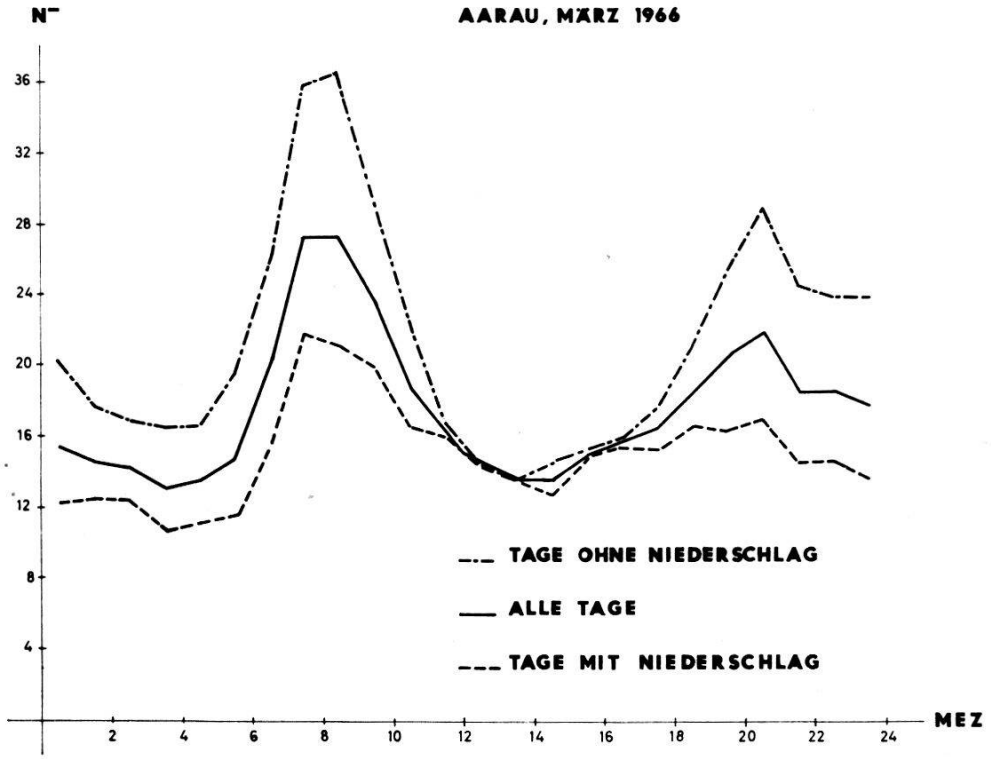

Abb. 21. Mittlerer Tagesgang der Konzentration der schweren Ionen (willkürliche Einheiten)

Diese wenigen Beispiele sollen zeigen, daß in besiedelten Gebieten die luftelektrischen Größen eng mit den Luftverunreinigungen verknüpft sind. Die Beziehungen sind im einzelnen aber noch recht wenig erforscht.

Wir danken dem Regierungsrat und dem Großen Rat des Kantons Aargau für die Bewilligung der zum Aufbau der Station benötigten Mittel. Die Apparate wurden zum größten Teil in der physikalischen Werkstätte der Kantonsschule hergestellt, wobei wir von den Firmen Brown, Boveri & Cie. AG, Baden, Kern & Cie. AG, Aarau, und Sprecher & Schuh AG, Aarau, wertvolle Unterstützung durch unentgeltliche Lieferung von Material und Ausführung von Spezialarbeiten erhielten. Wir danken diesen Firmen für ihr großzügiges Entgegenkommen. Unser Dank gilt auch unserm Mechaniker, Herrn E. GAUTSCHI, für seine sorgfältige und geschickte Arbeit, Frau U. BERTSCHINGER-SAUERLÄNDER und Frau B. SETZ für ihre gewissenhaften Auswertearbeiten.

Literaturverzeichnis

I. Allgemeine Werke

CHALMERS J. A. *Atmospheric Electricity,* Clarendon Press, Oxford 1949.

ISRAEL H. *Atmosphärische Elektrizität,* Band I und II, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1957 und 1961.

MAGILL, HOLDEN und ACKLEY, *Air Pollution Handbook,* McGraw-Hill, New York 1956.

MÜHLEISEN R. Atmosphärische Physik, in: *Handbuch der Physik,* Band XLVIII: Geophysik II, Springer-Verlag, 1957.

Recent Advances in Atmospheric Electricity, edited by L. G. SMITH, Pergamon Press, London 1958.

II. In der Arbeit zitierte Publikationen

1. L. SAXER und W. SIGRIST, Tages- und Jahresgänge der luftelektrischen Elemente in Arosa, *Arch. Met. Geoph. Biokl. A. 12* (1961) Heft 3.
2. L. SAXER und W. SIGRIST, Ein selbstkompensierender Elektrometerröhrenverstärker zur Registrierung des luftelektrischen Potentialgefälles, *Arch. Met. Geoph. Biokl. A. 10* (1957) Heft 1.
3. H. GERDIEN, *Göttinger Nachrichten 1905; Terr. Magn. 10* (1905) 65.
4. W. F. G. SWANN, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity 19* (1914) 171–185.
5. W. E. COBB und B. B. PHILLIPS, U. S. Department of Commerce, Weather Bureau, Technical Paper No. 46.
6. G. RUPPEL, *Arch. Techn. Messen V,* S. 1241–1242.