

## **Werk**

**Jahr:** 1953

**Kollektion:** fid.geo

**Signatur:** 8 Z NAT 2148:19

**Werk Id:** PPN101433392X\_0019

**PURL:** [http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PID=PPN101433392X\\_0019|LOG\\_0026](http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PID=PPN101433392X_0019|LOG_0026)

## **Terms and Conditions**

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

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

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

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

## **Contact**

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

# Die luftelektrischen Elemente im Großstadtbereich

Untersuchung der Ursachen der Schwankungen und Extremwerte  
des Potentialgradienten

Von R. Mühleisen, Weißenau Kr. Ravensburg<sup>1)</sup>

Mit 16 Abbildungen

## I. Einleitung

Der tägliche und jährliche Verlauf des Potentialgradienten im luftelektrischen Feld ist an sehr vielen Stationen auf der gesamten Erde registriert und gedeutet worden. In den meisten Arbeiten werden die Mittelwerte unter bestimmten Bedingungen des Wetters, z. B. bei Schönwetter, bei Bewölkung, bei Niederschlägen usw., besprochen und man gewinnt daraus ein ziemlich umfassendes und weithin klares Bild über den Gang der Werte und zum Teil über deren Ursachen. Ohne Zweifel darf heute angenommen werden, daß das luftelektrische Feld an der Erdoberfläche von den Ladungen herrührt, die in den höheren atmosphärischen Schichten, vornehmlich in den elektrisch gut leitenden Höhen über 60 km sitzen. Diese Ladungen stammen von den Gewittern über der gesamten Erde, welche an ihrer Oberseite hauptsächlich positiv, an ihrer Unterseite hauptsächlich negativ gepolt sind und damit positive Ladungen in die Höhe und negative zum Erdboden transportieren. In den Schichten in größerer Höhe werden diese Ladungen infolge der hohen Leitfähigkeit gleichmäßig über die Erde verteilt, und damit erhalten wir von den elektrischen Verhältnissen in der Atmosphäre das Bild eines konzentrischen Kugelkondensators. Die Feldstärke innerhalb dieses wird aber noch durch die mit der Höhe über dem Erdboden zunehmenden Leitfähigkeit der Luft beeinflusst. Man rechnet heute mit einer Spannung der elektrischen Ausgleichsschicht gegenüber der Erdoberfläche von etwa 100 bis 200 kV, mißt eine Leitfähigkeit der Luft am Erdboden von etwa  $2 - 3 \times 10^{-16} \text{ Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  und elektrische Feldstärken am Erdboden von etwa 100 bis 200 V/m. Ein elektrischer Vertikalstrom von einer Dichte von etwa  $3 \times 10^{-16}$  Amp. je Quadratcentimeter fließt dauernd innerhalb des Kugelkondensators.

Der Verlauf des Potentialgradienten wie auch der Luftleitfähigkeit zeigt an Erdstationen einen ausgeprägten Tagesgang, außerdem noch jährliche Veränderungen. Groß sind diese Schwankungen, wenn man in der Nähe von oder gar in Städten Messungen durchführt. Die Antwort auf die Frage nach den Ursachen dieser Schwankungen der luftelektrischen Elemente lautete in den bisher veröffentlichten Arbeiten meist so, daß angenommen wurde, daß der Zusammenhang zwischen Spannung der Ausgleichsschicht  $U_a$ , Leitfähigkeit am Erdboden  $\lambda_E$ , Gesamtwiderstand einer Luftsäule zwischen Ausgleichsschicht und Erdboden  $R_S$  und Vertikalstrom  $j_v$  durch eine rein Ohmsche Beziehung gegeben sein sollte:

$$j_v = \mathfrak{C}_E \cdot \lambda_E = \frac{U_a}{R_s}$$

daraus wird

$$\mathfrak{C}_E = \frac{U_a}{R_s \cdot \lambda_E}.$$

Es wird sicher möglich sein, mit dieser Beziehung die Schwankungen in luftelektrisch ungestörter Gegend weitgehend zu erklären, obwohl darüber noch kaum Messungen

<sup>1)</sup> Dr. R. Mühleisen, Max Planck-Institut für Physik der Stratosphäre. Weißenau, Kr. Ravensburg.

angestellt worden sind. Der sogenannte „Ringschluß“ im luftelektrischen Feld ist m. W. noch nicht bestätigt worden; in einer späteren Arbeit soll darauf näher eingegangen werden.

Die außerordentlich hohen Schwankungen der luftelektrischen Elemente im Großstadtbereich schienen geeignet zu sein, um diese Zusammenhänge zu prüfen. Dabei ergab sich, daß die Beziehung nach Formel (2) nicht zur Erklärung ausreicht; es muß angenommen werden, daß Raumladungen in verschiedener Höhe neben den Leitfähigkeitschwankungen eine Rolle spielen. Solche Raumladungen wurden bisher von einzelnen Autoren vermutet, sind aber m. W. nicht innerhalb von Städten und an wechselnden Standorten aufgefunden worden.

## II. Verbesserte luftelektrische Meßmethoden

Da also starke und schnelle Schwankungen luftelektrischer Größen innerhalb einer Großstadt und vor allem an verschiedenen Punkten zu messen waren, mußten die verwendeten Geräte geringe Einstellzeiten und bequeme Ablese- und Registriermöglichkeiten haben, leicht zu handhaben sein und an beliebigen Wechselstromnetzen betrieben werden können. Alle Geräte sollten, wenn möglich, leicht transportabel und kurze Zeit nach dem Einschalten betriebsbereit sein. Diese Forderungen waren nur durch Neuentwicklungen zu erfüllen.

### 1. Messung des Potentialgradienten

Die luftelektrische Feldstärke oder der P.G. wurde mittels radioaktiver Kollektoren gemessen. Eine Sonde war mit RdTh belegt, in allen anderen Fällen wurden mit Polonium aktivierte Silberkugeln von 2 mm Durchmesser verwendet. Zur bequemen Anbringung und Änderung des Abstandes des Kollektors von der auf dem Erdpotential liegenden Oberfläche einer Hauswand, des Erdbodens o. ä., war das Präparat an einer ausziehbaren Antenne angebracht. Zur Messung des Potentials der hoch isoliert aufgestellten Sonde dienten im einfachsten Falle gut isolierte elektrostatische Voltmeter, die heute mit Meßbereichen bis herab zu 300 V käuflich sind. Für Registrierzwecke diente ein Röhrenvoltmeter nach *Ehmert* und *Mühleisen* [1], dessen Eingangswiderstand  $\geq 5 \cdot 10^{13}$  Ohm ist und dessen Meßbereich  $\pm 600$  V umfaßt. Daran kann ein üblicher Punkt- oder Tintenschreiber angeschlossen werden.

### 2. Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Luft

Aus der Anzahl der positiven und negativen Kleinionen wurde auf die elektrische Leitfähigkeit der Luft geschlossen. Die Kleinionenzahlen sind zunächst mit einem von Dr. *Breuning* freundlicherweise zur Verfügung gestellten Kleinionenzähler gemessen und registriert worden, später wurde zusammen mit *Creutzberg* ein eigenes Gerät entwickelt, das in Kürze beschrieben wird [2]. Im Prinzip beruht es auf der *Gerdien*schen Aspirationsmethode: durch 2 nebeneinanderliegende Systeme von Kondensatoren wird Luft durchgesaugt und der Strom über die Mittelelektroden getrennt nach positiven und negativen Kleinionen mit 2 Röhrenvoltmetern gemessen. Man erhält dadurch bei Sättigungsspannung die Zahl der positiven und negativen Kleinionen mit einer zeitlichen Auflösung von etwa 30 Sekunden.

### 3. Die Raumladungsdichte

Zusammen mit *Holl* [3] wurde eine Methode zur Messung der elektrischen Raumladungsdichte in Luft entwickelt, bei der die Influenzwirkung auf abfallenden Wassertropfen benutzt wird. Die Ladung dieser Wassertropfen wird gemessen und ist ein Maß für die Raumladungsdichte. Damit wurde ein zeitliches Auflösungsvermögen von  $\frac{1}{3}$  Sek., bei Dauerregistrierung von 10 Sek erreicht.

### 4. Der Vertikalstrom

Im luftelektrischen Feld wird er normalerweise auf einer im Freien aufgestellten Platte von einigen Quadratmetern Fläche gemessen. Da die großen Schwankungen des P.G. im Großstadtbereich aber starke Verschiebungsströme hervorrufen, mußten diese nach der bereits von *Scrase* [14] angegebenen Methode kompensiert werden. Dieses war zusammen mit dem zur P.G.-Messung verwendeten Röhrenvoltmeter sehr einfach. Trotzdem waren noch Glättungskondensatoren erforderlich, die die Zeitkonstante der Vertikalstrommessung auf etwa 10 Min. erhöhte. Die Methode, die zusammen mit *Creutzburg* ausgebaut wurde, wird in Kürze veröffentlicht [2].

## III. Ursache der kurzperiodischen Schwankungen des Potentialgradienten

Eine Registrierung des P.G. in oder am Rande einer Großstadt unterscheidet sich ganz wesentlich von einer entsprechenden in einem luftelektrisch weniger gestörten Gebiet oder über den Meeren. Es sollen hier einige Beispiele in den Abb. 1a und b gezeigt werden; man erkennt hieraus:

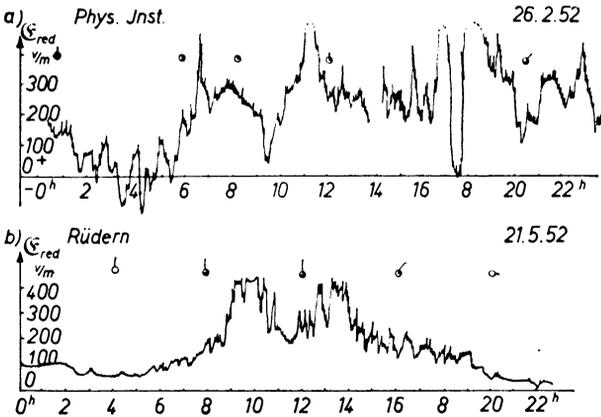


Abb. 1. Beispiele von Registrierungen des Potential-Gradienten bei Schönwetter  
a) in der Großstadt, b) am Rande der Großstadt.

- a) die großen Unterschiede zwischen Tag- und Nachtwerten,
- b) die großen Schwankungsamplituden und
- c) deren unterschiedliche Perioden.

Zur Aufklärung der Ursachen dieser besonderen Verhältnisse wurde folgendermaßen verfahren:

Gleichzeitige Registrierung des P.G. an 2 oder 3 Stationen, die in von Zeit zu Zeit veränderten seitlichem Abstand aufgestellt wurden,

sollten zunächst einmal die flächenhafte Ausdehnung der Störquellen, d. h. Ladungen, erkennen lassen; dabei wurden alle wichtig erscheinenden meteorologischen Daten zunächst beobachtet und notiert, später z. T. registriert oder vom Wetteramt Stuttgart in Erfahrung gebracht.

1. Potentialgradientenschwankungen bei geringen seitlichen Abständen von 1 bis 50 m

Zwei Meßanordnungen für luftelektrische Potentiale mit großer zeitlicher Auflösung wurden bei zunächst kleinen seitlichen Abständen der radioaktiven Kollektoren von 1,3 m; 10 m; 30 m und 50 m eingesetzt. Um Einflüsse der Wolken nicht berücksichtigen zu müssen, wurde schönes Wetter mit geringer Bewölkung unter  $\frac{3}{8}$  abgewartet und i. a. an Tagen mit geringen Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s gemessen.

Vergleicht man so gewonnene Mehrfachregistrierungen, so erhält man aus der Anschauung ein Ergebnis über die Abweichungen bzw. Übereinstimmungen des Verlaufs der Potentiale, wie es in Tabelle 1 zusammengestellt ist.

Tabelle 1  
Häufigkeit der Übereinstimmung von Schwankungen des Potential-Gradienten

Abstand	Tageszeit	P.G.-Schwankungen mit Perioden von				
		> 30 Min.	< 30 Min. > 5 Min.	< 5 Min. > 2 Min.	< 2 Min. > $\frac{1}{2}$ Min.	< $\frac{1}{2}$ Min.
1.3 m	Mittag			100%	60%	30%
	Spätabend			100%	50%	0%
10 m	Mittag		80%	40%	0%	0%
	Abend		40%	20%	0%	0%
30 m	Mittag	100%	80%	40%	0%	0%
	Nacht	50%	0%	0%	0%	0%
50 m	Abend	100%	50%	0%	0%	0%

Eine Ursache für die Schwankungen mit kleinen Perioden ergab sich aus dem Verhalten des radioaktiven Kollektors bei geringen Luftgeschwindigkeiten, welcher im Laboratorium untersucht war. Nach den mehr theoretischen Arbeiten von *Cialdea* [4] und den mehr auf die Meßmethodik ausgerichteten Versuchen des Verfassers [5] wird klar, daß die stark ionisierte Luft in der Umgebung des Kollektors dann zu störenden Raumladungen führt, wenn die Luftgeschwindigkeit bis in die Größenordnung der Ionengeschwindigkeit vermindert ist. Die an der nahezu punktförmigen Quelle gebildeten Ionen laufen nämlich im normalen Felde je nach Vorzeichen zur Wand oder von ihr weg; und entsprechend der Luftbewegung bildet sich eine Raumladungsverteilung aus, die das ursprüngliche Feld stört. Da an den eingerichteten Stationen P.G. von etwa 200 bis 1000 V/m an der Meßstelle, im Mittel etwa 500 V/m, vorkamen, so werden dort die Ionen mit Geschwindigkeiten von etwa 7 cm/sec entsprechend den Vorzeichen getrennt. Leicht turbulente Luftbewegungen mit Geschwindigkeiten von weniger als 50 cm/sec, wie sie bei vermeintlicher Windstille immer vorkommen, verursachen demnach die größten Schwankungen. Daraus erklärt sich das Teilergebnis der Tabelle 1, daß nämlich abends und nachts, also bei geringen Windgeschwindigkeiten, die kurzperiodischen Schwankungen schon in der geringen Entfernung von 1,3 m keine Korrelation mehr aufweisen.

Nun kann man diesen Fehler der Meßmethode leicht ausschalten, wenn man durch einen künstlichen Luftstrom, der tangential zur Äquipotentialfläche durch den Kollektor gerichtet ist, die Ionen desselben rasch wegführt.

2. Potentialgradientenschwankungen bei größeren seitlichen Abständen der Stationen

Mit den leicht transportablen und aufstellbaren Geräten wurden nun außerhalb des Instituts Messungen und Registrierungen des P.G. vorgenommen. Vor allem wurden 3 feste Stationen eingerichtet, deren Lage aus der Karten-

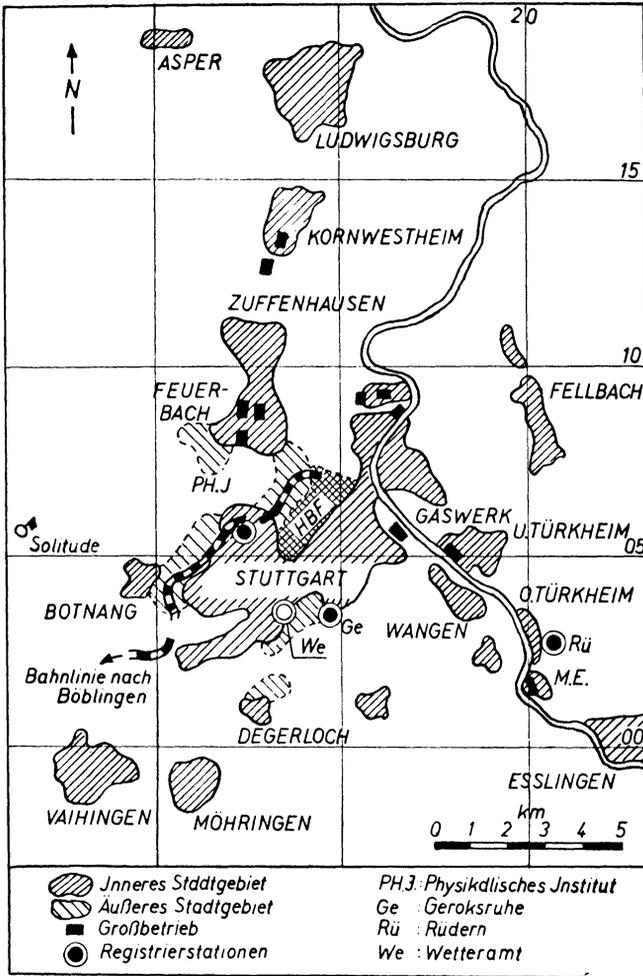


Abb. 2. Lageplan der Registrierstationen

skizze (Abb. 2) ersichtlich ist. Der radioaktive Kollektor bei Station 1 (Ph. I) ist an der senkrechten Südwand eines Beobachtungsstandes auf dem Dach des Physikalischen Instituts, Stuttgart, in 20 m Höhe über dem Erdboden in der üblichen Weise angebracht und wie bei allen übrigen Stationen mit

Röhrenvoltmeter und Registriergalvanometer verbunden. Eine Kontaktuhr sorgt für stündliche Kontrolle des Nullpunktes auf den photographischen Registrierstreifen.

Station 2 (Ge) ist am nördlichen Dachfenster eines Zweifamilienhauses an der Gerokruhe ebenfalls etwa 10 m über Grund aufgestellt.

Station 3 (Rü) befindet sich im eigenen Wohnhaus in Rüdern, wo die Sonde an der Ostseite des Walmdaches durch einen durchgebohrten Dachziegel geführt ist. Ihre Höhe über Grund beträgt etwa 8 m.

Alle Stationen liegen am Hang: Station 1 in 284 m über NN zwischen Bismarckturm (410 m) und Stadtmitte (240 m), Station 2 in 395 m Höhe über NN unterhalb des Frauenkopfes (462 m) und Station 3 in 370 m Höhe zwischen einer Hochebene (etwa 400 m) und der Neckartalsole in 230 m über NN. Diese Hanglage hat den Vorteil, daß dort ganz selten vollkommene Windstille herrscht, sondern zumindest schwache Hangwinde wehen und dadurch falsche Potentialanzeigen durch die Bildung von Raumladungen um den ionisierenden Kollektor vermieden werden, wie der Verfasser [5] gezeigt hat.

Außer diesen drei festen Stationen, an denen mit nur kurzen Unterbrechungen von Juli 1951 bis März 1953 Dauerregistrierungen liefen, wurden noch zwei weitere zusammengestellt, die leicht transportabel und in kürzester Zeit betriebsbereit sind. Ein kleines Benzinaggregat liefert für *eine* bewegliche Station Wechselspannung 220 V, 400 W, so daß mit dessen Hilfe an beliebiger Stelle auch im Freien registriert werden kann. Alle Sondenisolatoren wurden schwach geheizt, so daß bei hoher Feuchtigkeit nie Fehler aufgetreten sind.

In derselben Weise wie bei kleineren Abständen wurde nun auch die Übereinstimmung der Schwankungen des P.G. bei größeren seitlichen Abständen der Stationen gesucht. Die Tabelle 2 zeigt deutlich, daß die an sich großen Schwankungsamplituden auf rein örtliche Störquellen hindeuten, deren Ausdehnung die Größenordnung 100 bis 1000 m selten übersteigt.

*Tabelle 2*  
*Häufigkeit der Übereinstimmung von Schwankungen des Potential-Gradienten*

seitl. Abstand	Tageszeit	mit Perioden von		
		> 4 Std.	< 4 Std. > 1/2 Std.	< 1/2 Std.
0.8 km	Mittag	70%	20%	—
3.0 km	ganztägig	70%	10%	0%
9.0 km	ganztägig	60%	10%	0%

Die Schwankungen mit Perioden von 1 Stunde und mehr dagegen können bei Schönwetter bereits durch Einflüsse entstanden sein, die tageszeitlich bedingt an allen Stationen etwa gleichermaßen auftreten, wie etwa das Heizen in der kalten Jahreszeit. Oder sie können von der allgemeinen Luftunruhe (Böigkeit) abhängen, die die Sonneneinstrahlung verursacht und die Kerne und Großionen anhebt. Allerdings müssen dann solche Prozesse mit den beobachteten Perioden verlaufen.

#### IV. Wetterlagen mit geringen Schwankungen des Potentialgradienten und guter Übereinstimmung bei Doppel- und Dreifachregistrierungen

Bei der Durchsicht von Registrierungen des P.G. in der Großstadt erhebt sich die Frage, ob zu gewissen Zeiten der Verlauf lediglich von der Spannung der Ausgleichsschicht und nicht mehr von den lokalen Bedingungen abhängt. Diese Fälle müssen sich dadurch auszeichnen, daß die Mehrfachregistrierungen gut übereinstimmen und außerdem niedrige Werte der Potentiale vorkommen. Die Übereinanderzeichnung der Dauer-Registrierungen an den 3 festen Stationen ließ sehr bald erkennen, daß es solche Wetterlagen gibt, bei denen offenbar örtliche luftelektrische Störungen beseitigt sind. Beispiele solcher

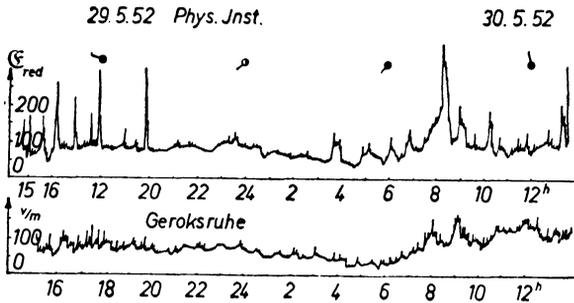


Abb. 3. Beispiele von gleichzeitigen Potential-Gradient-Registrierungen an zwei Stationen in 3 km Abstand bei Windgeschwindigkeiten über 2 m/s.

Registrierungen an 2 Stationen in 3 km Abstand sind in Abb. 3 wiedergegeben. Auffallend und nicht übereinstimmend sind dabei nur die hohen Spitzen am Physikalischen Institut, die von vorbeifahrenden Dampflokomotiven herrühren. Darauf soll weiter unten eingegangen werden. Die Voraussetzungen für solche „ungestörten P.G.-Verläufe“ sind nach den bisherigen Erfahrungen:

- keine Niederschlagbildung in der gesamten Atmosphäre über und in der Umgebung der Meßstelle und
- stetiger Wind mit Geschwindigkeiten über 2 bis 3 m/sec, der die örtlich produzierten Kerne und Großionen so rasch wegführt und dabei verdünnt, daß die Luftleitfähigkeit nicht merklich vermindert wird, also  $Z$  etwa  $1000/\text{cm}^3$  bleibt; oder
- nach Niederschlägen; oder
- an Sommer-Sonn- und Feiertagen, auch bei kleineren Windgeschwindigkeiten.

Am meisten überraschte die letzte Beobachtung, die durch die Wiedergabe der Verläufe des Gradienten an drei hintereinanderfolgenden Tagen bei beständiger Wetterlage in Abb. 4 veranschaulicht wird. Dies bedeutet, daß außerhalb der Heizperiode die Ursachen für Felderhöhungen im Großstadtbereich bei Schönwetter hauptsächlich in der werktäglichen Betriebsamkeit in und um eine Großstadt zu suchen sind.

Die Voraussetzungen a) bis d) erlauben es, die von der Lage und Umgebung der Meßstelle abhängigen Potentialregistrierungen auf die freie Ebene zu reduzieren. Da es natürlich schwer ist, von einer Meßstelle aus zu erkennen, ob gerade die Voraussetzungen erfüllt sind, bedurfte es vieler Einzelmessungen,

um den Reduktionsfaktor für alle drei Stationen mit befriedigender Genauigkeit zu ermitteln. Mit den bisher ermittelten Faktoren wurde versucht, die P.G. für die ungestörten Zeiten auf ebenes Feld umzurechnen.

Das Ergebnis einer Bildung stündlicher Mittelwerte der reduzierten P.G. über solche Zeiten gibt in Abb. 5 immerhin eine Andeutung von einem Tagesgang, der einen Vergleich mit den ozeanischen Registrierungen erlaubt,

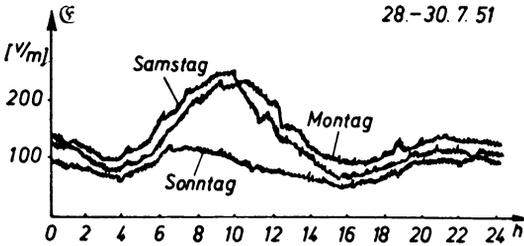


Abb. 4. Vergleich von werktäglichen und sonntäglichen Verläufen des Potential-Gradienten innerhalb der Großstadt.

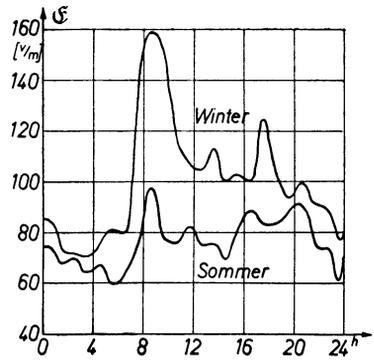


Abb. 5. Stündliche Mittelwerte der Potential-Gradienten a) im Winter, b) im Sommer, bei Windgeschwindigkeiten  $\geq 3$  m/sec in der Großstadt.

abgesehen von dem steilen Maximum am Vormittag. Der mittlere Wert des P.G. beträgt etwa 80 bis 100 V/m und stimmt gut mit dem Erwartungswert überein.

Nimmt man diese so ermittelten Tagesgänge als ungestörte bei hoher Luftleitfähigkeit, so läßt sich ein Maß für die Felderhöhung durch die großstädtische Kern- und Ionenerzeugung angeben. Einige Mittelwerte der P.G. für verschiedene Jahreszeiten, Tageszeiten und Witterungsverhältnisse seien hier wiedergeben.

Tabelle 3  
Felderhöhung in der Großstadt  
(auf ebenes Feld reduzierte Potential-Gradienten)

Wetterlage	Winter		Sommer	
	Tag V/m	Nacht V/m	Tag V/m	Nacht V/m
Windig . . . . .	125	85	85	65
Windig 8 bis 12h	200	—	90	—
Schönwetter . . .	270	140	150	95
Bewölkt . . . . .	175	120	80	55
Nebel und Dunst	500	300	155	80

Die gemessene Leitfähigkeit der Großstadtluft bzw. die Zahl der Kleinionen schwankt in Stuttgart bei den obigen Wetterlagen zwischen  $n_{\pm \max} = 2000$  Ionen/cm<sup>3</sup> und  $n_{\pm \min} = 100$  Ionen/cm<sup>3</sup>, also etwa um den Faktor 20. Gelegentlich kommen kurzfristig noch kleinere Werte vor.

## V. Einzelquellen von Kernen, Großionen und künstlichen Raumladungen im Freien und im Versuch

Da der Verlauf der P.G. in der Großstadt so große Schwankungen aufweist, so konnte erwartet werden, daß es durch Mehrfachregistrierungen gelingen würde, einzelne Quellen zu erkennen. Die Messungen zu diesem Zwecke wurden durch Windrichtungsregistrierungen ergänzt und sind sehr zeitraubend, weil sehr vom Wetter abhängig. An dieser Stelle sollen daher Ergebnisse von solchen Messungen aufgeführt werden, die weitgehend abgeschlossen und geklärt sind. In einer kurzen Mitteilung [13] wurden Teilergebnisse bereits erwähnt.

1. Am eindringlichsten und deshalb am ehesten erkannt waren die P.G.-Erhöhungen durch den in etwa 400 m Entfernung am Institut vorbeifahrenden Eisenbahnzug bei NW-W-Winden; bei Abb. 3 wurde oben darauf hingewiesen. Wie schon *Israel* [6] mitgeteilt hat, werden bei dampfenden

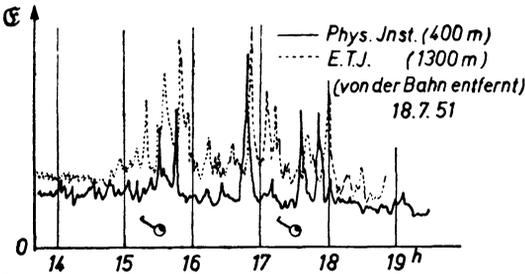


Abb. 6. Starke Erhöhungen des Potential-Gradienten durch den Rauch von Dampflokomotiven an 2 Stationen

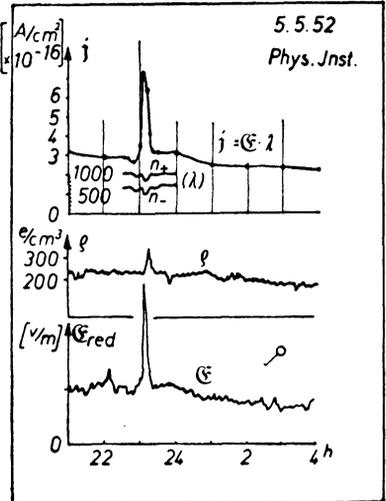


Abb. 7. Potential-Gradient  $\Phi$ , Leitfähigkeit  $\lambda$  ( $n_+$ ,  $n_-$ ), Raumladungsdichte  $\rho$  und Vertikalstromdichte  $j = \Phi \cdot \lambda$  bei einer in 400 m Entfernung vorbeifahrenden Dampflokomotive

Lokomotiven immer positive Ausschläge beobachtet, deren Erklärung aber noch ausstand.

Man war geneigt, zunächst nur eine Leitfähigkeitsverminderung als Folge der Kernzahlerhöhung anzunehmen. Wie *Kasemir* [7] gezeigt hat, würde aber eine kurze Walze endlicher Breite, niedriger Höhe und geringerer Leitfähigkeit die Feldlinien verdrängen und unter ihr eine Felderniedrigung bewirken, wenn ihre Ausdehnung nicht bis zum Erdboden reicht. Da meist keine Leitfähigkeitserniedrigung gleichzeitig mit den Felderhöhungen gefunden wurden, so konnte diese Erklärung nicht aufrecht erhalten werden.

Als die Felderhöhung durch den Lokomotivrauch auch noch in 1300 m Entfernung von der Bahnlinie bei nur mäßigen Windgeschwindigkeiten beobachtet wurde (Abb. 6), ohne daß noch eine Spur des Rauches zu sehen gewesen wäre, wurde klar, daß die Luftmasse eine elektrische Raumladung enthalten mußte. Registrierungen auf dem Institutsdache zeigten dann in vielen Fällen positive Raumladungsanstiege, selten Leitfähigkeitsvermindernungen: Abb. 7.

Gelegentlich wird nur der Potentialanstieg beobachtet, wenn die Dampf- wolke der Lokomotive ihrer Anfangstemperatur entsprechend zunächst hoch- steigt und erst dann seitlich durch den Wind abgetrieben wird, die ver- unreinigte Luft die Meßstelle also nicht erreicht.

Eine Messung der Ladung der ausgestoßenen Dampfteilchen direkt über der Lokomotive an einem Tunnelausgang lieferte den ersten direkten Nach- weis, daß einmal der Dampf eine positive Raumladung hat, außerdem auch der noch einige Zeit lang aus dem Tunnel ausströmende Rauch. Diese Raum- ladung und die Kerne vermindert dann auch die Leitfähigkeit im Verlaufe der Rekombination zwischen Kleinionen und großen Teilchen und der Anlage- rung an Kerne.

Nimmt man das Doppelte des aus der Registrierung in Abb. 7 ermittelten Wertes für die Raumladungsdichte am Erdboden von etwa  $+140 \text{ e/cm}^3$  als Mittelwert in den beeinflussten Höhen an, so errechnet sich daraus der beobachtete Feldstärkeanstieg von  $200 \text{ V/m}$ , wenn man eine homogene Schichtdicke der geladenen Luftmasse von  $40 \text{ m}$  annimmt, was plausibel ist.

2. Eine ähnliche Feldänderung bringt die bei der Kokslöschung im Stutt- garter Gaswerk aufsteigende Wasserdampf- wolke hervor. In dem Augenblick, in welchem diese am oberen Rande des Löschturmes erscheint, steigt das Feld an einer in der Nähe stehenden Meßstelle rapid an, was ebenfalls auf eine positive Ladung der Dampf- wolke hinweist.

3. Auf dem Gelände des Hauptbahnhofs Stuttgart wurde die Kleinionen- zahl registriert. Während im Rauch von Dampflokomotiven hauptsächlich die negativen Kleinionen vermindert waren als Folge positiver Großionen, zeigten elektrische Lokomotiven offenbar nach Funkenbildung sehr große Zahlen der Kleinionen beider Vorzeichen.

4. Im Laboratoriumsversuch ließen wir Wasserdampf aus einem Papin- schen Topf unter Druck in kernhaltige Luft eines fast geschlossenen Dachraumes ausströmen und verfolgten dabei die elektrische Raumladungsdichte und Luftleitfähigkeit. Man erkennt aus Abb. 8, wie sich eine negative Raum- ladung bildet und zunächst die negativen und auch die positiven Kleinionen zunehmen; erst nach einigen Minuten nimmt dann die Leitfähigkeit ab.

Die Versuche sind im Einklang mit früheren. Schon *Armstrong* hatte bei seiner Dampfstrahlelektrismaschine gefunden, daß reiner Dampf, je nach der verwendeten Düse, negativ oder positiv geladen ist. Bei den untersuchten großstädtischen Wasserdampf- erzeugern ist es vielleicht die Beimischung von Kohlenstaub o. ä., was das positive Vorzeichen bewirkt.

Die Zunahme der Zahl der negativen Kleinionen wird verständlich, wenn man annimmt, daß beim Verdunsten von negativ geladenen Wassertröpfchen negativ geladene Wasserdampf- moleküle entstehen. Ebenso kann die allerdings geringere Zunahme der positiven Kleinionen- zahl erklärt werden. Sicher werden bei den Reibungseffekten negative und positive Ladungen entstehen, und zwar mit so hohen Oberflächenladungsdichten, daß Ladungen absprühen und dadurch die Zahl der Kleinionen vermehrt wird.

5. Ein überraschendes Ergebnis brachte folgender Versuch: Klopft man auf eine vor dem Kleinionen- zähler liegende Wolldecke, so werden dabei

gegenüber der normalen Anzahl das 20- bis 100fache an Kleinionen beider Vorzeichen erzeugt, was nur durch Absprühen der durch Reibung an den Wollfasern entstandenen Ladungen erklärt werden kann. Bereits das Vorbeigehen einer Person im weißen Arbeitsmantel erhöhte die Kleinionenzahl merklich infolge derselben Ursache.

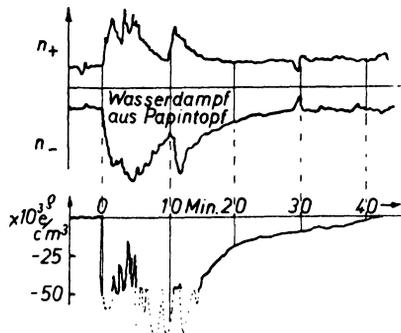


Abb. 8.

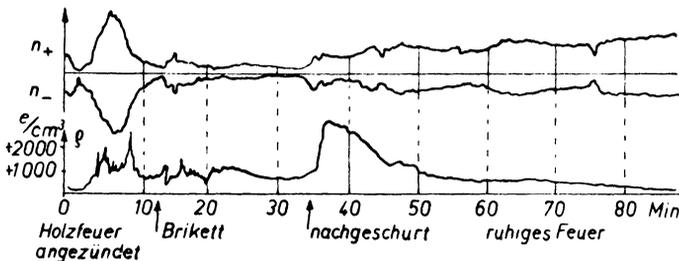


Abb. 9.

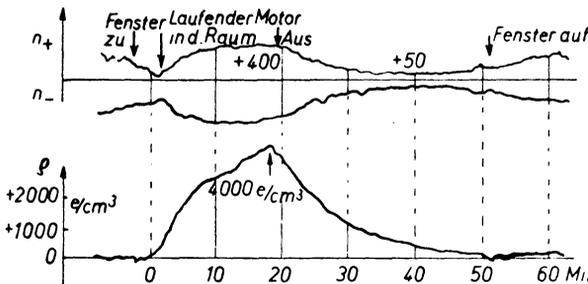


Abb. 8 bis 10. Elektrische Raumladungsdichte und Zahl der positiven und negativen Kleinionen bei raumladungsbildenden Prozessen.

positive Raumladung mit gleichzeitiger Leitfähigkeitserhöhung. Dagegen gehen beide Werte bei ruhig brennendem Feuer stark zurück, was auf reiner Kernezeugung und deshalb Anlagerung der Kleinionen an Kerne hinweist.

Der letzte Versuch kann teilweise die Maxima des P.G. in den frühen Morgenstunden im Winter und zu den üblichen Heizzeiten, z. B. auch vor den Mahlzeiten, erklären, die häufig deutlich erkennbar auftraten. Und so erklärt

6. In analoger Weise wurden nun andere Kern- und Großionenerzeuger untersucht. In den Wintermonaten erhöht die Ofenheizung ganz beträchtlich die Kernzahl, wie *Israel* [8] besonders eindringlich für Davos gezeigt hat. Auch *Gagge* und *Moriyana* [62] stellten in New Haven (USA) einen Unterschied der mittleren Großionenzahl fest, nämlich im Winter etwa  $10\,000/\text{cm}^3$  und

außerhalb der Heizperiode etwa  $4000/\text{cm}^3$ . Es ist aber bisher unseres Wissens noch nicht untersucht worden, ob Rauch einen elektrischen Ladungsüberschuß aufweist. Im Laboratorium wurde deshalb die Raumladungsdichte und Leitfähigkeit von durch Ofenrauch verunreinigter Luft gemessen (Abb. 9). Sowohl beim Anheizen wie beim Nachlegen und Schüren entsteht eine

Raumladungsdichte und Leitfähigkeit von durch Ofenrauch verunreinigter Luft gemessen (Abb. 9). Sowohl beim Anheizen wie beim Nachlegen und Schüren entsteht eine

sich das steile Maximum des P.G. am Morgen in Abb. 5 während der Winterzeit. Die von der Ofenheizung herrührenden positiven Raumladungen beim Schüren und Anlegen am Vormittag müssen so groß sein, daß sie selbst durch kräftigen Wind nicht verwischt werden können.

Die Raumladungen, die in einer Großstadt im Verlaufe eines Vormittags produziert werden und Felderhöhungen verursachen, müssen auch zu einer Erhöhung des Vertikalstroms führen. Dies zeigt das Beispiel einer gleichzeitigen Registrierung des P.G., der positiven und negativen Kleinionen und des Vertikalstroms am 30. Juni 1952 in Abb. 11. Letzterer steigt von seinem tiefsten Wert kurz vor 6 Uhr früh auf mehr als das Doppelte an, ziemlich gleichlaufend mit dem allerdings größeren Anstieg des P.G. Dies ist ein deutlicher Beweis für die Entstehung von Raumladungen als Ursache der Felderhöhung, und dies bereits im Sommer, wo die Wohnräume nicht geheizt werden.

7. Rasch verlaufende Feldanstiege wurden neben Autostraßen beobachtet. Es zeigte sich, daß die Auspuffgase von Kraftfahrzeugen vor allem der mit Dieselöl betriebenen, ebenfalls positive Raumladungen hervorriefen. Die Registrierung beim entsprechenden Versuch im Laboratorium mit einem kleinen Benzinaggregat ist in Abb. 10 zu sehen. Lediglich beim Anwerfen des Motors entstand eine negative Raumladung, dann eine positive während des Betriebes. Auch Kleinionen beider Vorzeichen werden erzeugt, doch überwiegt bald die Anlagerung an Kerne und Großionen, weshalb die Luftleitfähigkeit später stark abfällt. So ist es verständlich, daß die hohen Feldanstiege bei Messungen neben einer Autostraße nicht mit meßbaren Leitfähigkeitsänderungen gekoppelt waren.

Auch von Fahrzeugen hochgewirbelter Straßenstaub ließ den P.G. ansteigen.

8. Im Laboratorium wurden dann noch weitere Verbrennungsvorgänge untersucht. Das Ergebnis dieser Messungen zeigt Tabelle 4.

Es überrascht, daß die in Siedlungen, Industriegebieten und durch den Verkehr erzeugten Raumladungen hauptsächlich positives Vorzeichen haben. Dagegen waren die Raumladungen, welche bei offener Verbrennung von Benzin, Petroleum, Holzwohle usw. entstanden, negativ.

9. Tatsächlich konnten in mehreren Fällen auch starke negative P.G. registriert werden. Sie traten an der Station Gerokruhe häufig bei NO-Wind

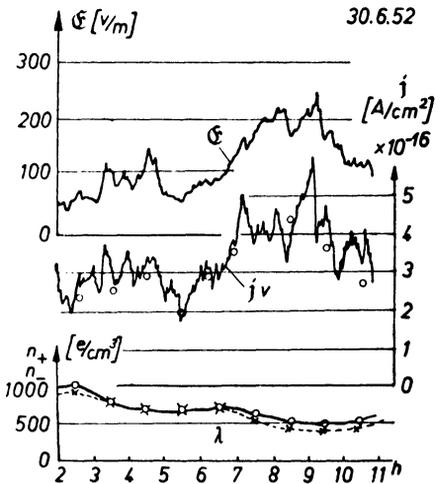


Abb. 11. Morgendlicher Anstieg des Potential-Gradienten und des Vertikalstroms zum Beweis der Raumladungs-Erzeugung im Großstadtbereich (Potential-Gradient  $E$ , Vertikalstrom  $j_v$  und Luftleitfähigkeit  $\lambda$  registriert;  $\circ$ :  $j_v$  berechnet =  $E \cdot \lambda$ ).

auf (Abb. 12) und ebenso im Physikalischen Institut, wenn der Wind die Abgase des benachbarten Organisch-Chemischen Instituts zutrieb.

Tabelle 4  
Vorzeichen künstlicher Raumladungen:

(+)	(-)
Auspuff (Benzinmotor)	Benzin-Feuer, offen
Auspuff (Dieselmotor)	Petroleum-Feuer, offen
Schornstein-Rauch	Alkohol-Feuer, offen
Kohlenpulver-Feuer	Holzwohle-Feuer, offen
Lokomotivdampf	Wasserdampf, rein
Dampfwolke (Gaswerk)	(aus Metalldüse)

Für den letzteren Fall zeigt auch die Raumladungsregistrierung in Abb. 13 sehr hohe negative Werte.

Die Ursache für den negativen Gradienten an der Station Gerokruhe wird in den Abgasen des 2.8 km entfernten Gaswerks zu suchen sein, weil dort an Ort und Stelle ebenfalls starke negative P.G. beobachtet worden waren.

10. Störungen durch sprühende Hochspannungsleitungen. Angeregt durch eine Veröffentlichung von *Chalmers* [9] über negative Felder bei Nebel und Dunst, die durch Hochspannungsleitungen verursacht worden sein sollen, wurden mit den vorhandenen transportablen Geräten die Hochspannungsleitungen um Stuttgart untersucht. Es zeigte sich sofort, daß nur einige wenige Leitungen die luftelektrischen Elemente stark stören, und zwar solche, die hörbar sprühen. Diese haben Seildurchmesser, welche für die zu übertragenden Wechselspannungen, z. B. 220 kV, zu gering sind, was bei

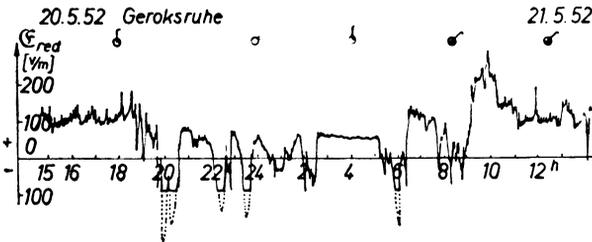


Abb. 12. Potential-Gradientenverlauf bei Gerokruhe bei negativen Raumladungen

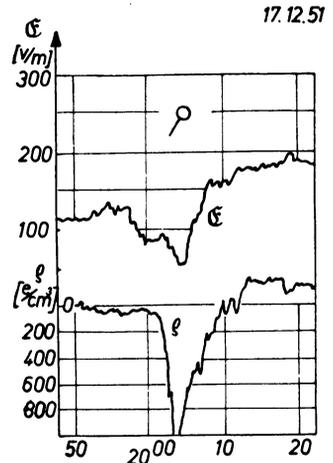


Abb. 13. Potential-Gradientenverlauf und Raumladungsdichte bei einer negativen Raumladung vom Chemischen Institut

einigen älteren Leitungen noch anzutreffen ist. Einige andere Leitungen sprühen nur gelegentlich, insbesondere bei großer Feuchtigkeit der Luft, bei Dunst oder Nebel. Durch Zufall wurden auch an einer Stelle einer sonst nicht sprühenden Hochspannungsleitung starke Schwankungen des P.G. mit hohen positiven und negativen Vorzeichen gefunden. Die Ursache hierfür war nicht zu erkennen, dürfte aber in schadhafte Isolatoren zu suchen sein.

Die Ergebnisse von Messungen, die bei Schönwetter und mäßigem Wind ausgeführt wurden, zeigen folgendes Bild:

Die Luftleitfähigkeit in der Nähe der Leitungen ist erheblich vergrößert und schwankt außerordentlich stark. Die Zahl der positiven Kleinionen steigt bis auf mehr als 10 000 Ionen/cm<sup>3</sup>, die der negativen bis auf 3000/cm<sup>3</sup>. Der P.G. ist in unmittelbarer Nähe hinter der Leitung in Windrichtung besonders hoch. Es werden bis etwa in 500 m Entfernung Werte von 300 bis über 2000 V/m beobachtet, die besonders stark und rasch schwanken. Auch hohe negative P.G. treten kurzzeitig auf.

In größerer Entfernung von Hochspannungsleitungen in Windrichtung ist die Zahl der positiven Kleinionen fast wieder normal, dagegen die der negativen Kleinionen noch stark vermindert. Bis zur gleichen Entfernung etwa kann man auch die Erhöhung des P.G. gegenüber normalen Werten feststellen. Bis jetzt wurden diese Änderungen noch an Orten gefunden, die in Windrichtung 10 km von der sprühenden Hochspannungsleitung entfernt liegen.

Diese Beobachtungen können erklärt werden, wenn man annimmt, daß gleichviel positive und negative Kleinionen von den Leitungen absprühen und ihre Bewegung im luftelektrischen Feld, die Luftbewegung und dann die Anlagerung und Rekombination der Ionen berücksichtigt. Durch das elektrische

Feld werden nämlich die negativen Kleinionen nach oben, die positiven Kleinionen nach unten wandern. Je nach der Turbulenz der Luftbewegung werden sie dabei verwirbelt, so daß am Boden nicht nur positive, sondern auch negative Ionen ankommen und außerdem die Werte stark schwanken. Infolge der normalen Lebensdauer der Kleinionen in Kontinentalluft lagern sich diese im Verlauf von etwa 100 sec an Kerne an, so daß in einigen 100 m Entfernung von den Leitungen in Windrichtung keine erhöhte Leitfähigkeit mehr anzutreffen ist. Dafür haben sich aber jetzt Großionen gebildet, die wegen der vorhergegangenen Trennung der leicht beweglichen Ladungsträger nach ihren Vorzeichen jetzt zu stark positiven Raumladungen über dem Erdboden und wahrscheinlich geringeren negativen Raumladungsdichten in Höhen, größer als die Leitungen selbst, führen; eine Anschauung von dieser Entwicklung soll Abb. 14 vermitteln.

Anders verhalten sich die Raumladungen bei Dunst und Nebel. Die Lebensdauer der Kleinionen ist nur sehr gering und die Größe der Großionen und Nebelteilchen derart, daß diese mit ihren Ladungen langsam ausfallen. Dadurch werden zunächst die am Boden anzutreffenden positiven Träger und erst nach längerer Zeit bzw. nach größerem Weg die negativen Großionen über dem Erdboden anzutreffen sein. Diese länger lebenden negativen Raum-

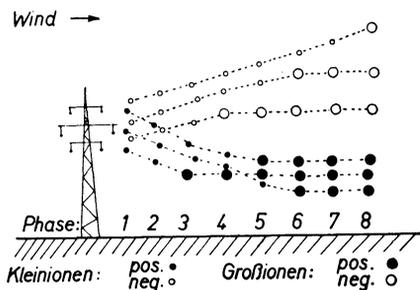


Abb. 14. Ionen von sprühenden Hochspannungsleitungen bei laminarer Luftbewegung

ladungen müssen dann die von *Chalmers* gefundenen negativen Felder bei Nebel und Dunst hervorrufen. Sie wurden auch von uns in Entfernungen von 3 bis 7 km hinter sprühenden Hochspannungsleitungen an zwei fest eingerichteten Stationen bei denselben Wetterlagen beobachtet und negative P.G. oft während vieler Stunden registriert.

## VI. Die Lebensdauer von Raumladungen

Nun interessiert die Frage, wie weit solche Raumladungen vom Wind fortgetragen oder in welcher Zeit und durch welche Vorgänge sie abgebaut werden. Verschiedene Versuche sprechen dafür, daß diese Raumladungen hauptsächlich aus Großionen und geladenen Teilchen mit Radien bis zu einigen  $10^{-6}$  cm bestehen. Die größten von ihnen können mehrere Elementarladungen tragen; *Wilkening* [10] u. a. rechnen mit einer elektrischen Ladung von

$$Q \leq \frac{R}{10^{-6}} \cdot e$$

Diese Teilchen werden entladen, indem sie Kleinionen entgegengesetzten Vorzeichens einfangen. Für die Entladung von Teilchen mit Mehrfachladungen gilt nach *Whipple* und *Chalmers* [11] unter der Voraussetzung, daß die Teilchen ventiliert werden:

$$\frac{\alpha Q}{\alpha t} = -4\pi\lambda \cdot Q,$$

woraus  $Q = Q_0 \cdot e^{-4\pi\lambda t}$  wird.

Die Zeit für Entladung auf  $Q = 1/10 Q_0$  wird für hohe Leitfähigkeit der Luft bei

$$\begin{aligned} n_{\pm} &= 1000 \text{ e/cm}^3, \text{ also} \\ \lambda &= 2 \cdot 10^{-4} \text{ e.st.E.}, \text{ größer als} \\ \tau_{1/10} &= 925 \text{ sek} \approx 15 \text{ min sein.} \end{aligned}$$

In und am Rande einer Großstadt ist aber die Leitfähigkeit am Tage meist viel niedriger mit Werten bis  $\lambda \approx 0.2 \cdot 10^{-4}$  e.st.E., und die obige Voraussetzung der „Ventilation“ ist kaum erfüllt. Deshalb wird es berechtigt sein,  $\tau_{1/10}$  wesentlich größer, nämlich größenordnungsmäßig zu etwa 2 Std. anzunehmen.

Damit ist aber die Raumladung noch nicht verschwunden, sondern es entsteht dafür laufend ein Defizit an Kleinionen eines Vorzeichens, das erst allmählich durch den Vertikalstrom und daneben durch Diffusion und Turbulenz verschwindet. Ebenso werden natürlich die ursprünglich großen Teilchen durch Sedimentation teilweise ausfallen. Man muß demnach mit einer Verweilzeit der Raumladungen von mehreren bis zu 10 Stunden rechnen, während deren sie durch den Wind ein Vielfaches von 10 km fortgetragen werden können.

Zur Untersuchung dieser Verweilzeit haben wir folgende Versuche ausgeführt:

Markante und leicht erkennbare Raumladungen sollten vom Entstehungsort weg in Windrichtung so weit wie möglich verfolgt werden. Dazu eignete sich der Lokomotivdampf mit seiner hohen Spitze im Verlauf des P.G., wenn man einen Wind mit Richtung senkrecht zur Bahnlinie abwartete. Bei zwei Versuchsfahrten gelang die Registrierung der Feldspitze und es wurde nach einer Stunde die Felderhöhung fast mit derselben Amplitude beobachtet. Der

bewaldeten Umgebung Stuttgarts und des Aufwands wegen gelang bisher eine weitere Verfolgung noch nicht.

Die Verfolgung der Raumladungen, die durch sprühende Hochspannungsleitungen hervorgerufen werden, ergab bisher, daß noch in 5 km Entfernung von der Leitung der P.G. um das 3fache erhöht sein kann. Die Raumladung ist bei den gemessenen Windgeschwindigkeiten etwa 30 Minuten vorher entstanden.

Ebenso wurde an der Station Gerokruhe auch bei geringen Windstärken negative P.G. gefunden, wie oben bereits ausgeführt wurde. Bei Winden mit Geschwindigkeiten um 1 m/sec, wie sie nachts während der fraglichen Zeiten herrschten, kommt bei einer Entfernung von fast 3 km eine Verweilzeit von etwa 1 Stunde heraus.

Der durch positive Raumladungen erzeugte Überschuß der Zahl der positiven gegenüber den negativen Kleinionen wurde mit Hilfe des Kleinionenzählers in der Umgebung Stuttgarts gesucht und gefunden. Um sicher zu gehen, daß keine Ursachen für örtlich verschiedene Leitfähigkeiten infolge unterschiedlicher Ionisation bestehen, wurden zuerst in einer Nachtfahrt zwischen 1<sup>h</sup> und 6<sup>h</sup> früh an sieben Plätzen um Stuttgart die Kleinionenzahlen gemessen. Das Wetter war: Bewölkung 0/8, Temperatur etwas unter 0° C, Wind 0 bis 4 m/sec. Das Ergebnis ist in Tabelle 5 eingetragen. Man erkennt nur geringe Unterschiede an den frei gelegenen Meßorten.

Tabelle 5  
Leitfähigkeitsmessungen am 13. I. 1952  
01–06 Uhr

Zeit	Meßort (Wind)	$n_+$	$n_-$	$(n_+ - n_-)$
13. I./01.30 <sup>h</sup>	Gerokruhe (Stadt) (SW, 2 m/s).....	385	340	+ 45
02.30	Vaihingen-Möhringen (NNW, 4 m/s) ...	490	460	+ 30
03.20	Büsnaier Hof (NW, 1 m/s) .....	480	450	+ 30
04.00	Solitudewald (-) .....	430	490	- 60
04.20	Solitude Schloß (NW, 3 m/s) .....	510	470	+ 40
05.00	Neckartal (b. Bhf.) .....	220–380	210–390	± 10
06.00	Rüdern (Höhe) (W, 2 m/s) .....	390	440	- 50
07.00	Gerokruhe (N, 1 m/s) .....	400	400	0

Auch die Differenz der Zahlen verschiedenen Vorzeichens ist unbedeutend. Die mittleren Ionenahlen für diese Nacht und freie Stellen betragen:

$$n_+ = 480 \text{ Ionen/cm}^3,$$

$$n_- = 470 \text{ Ionen/cm}^3.$$

Diese Werte wurden häufig bei ähnlichen Wetterlagen und Meßstellen gefunden.

Eine zweite größere Meßfahrt am 14. März 1952 diente dem Zweck, bei einheitlicher Windrichtung ONO den Großstadteinfluß in der Umgebung aufzusuchen. Die hohe Windgeschwindigkeit von 4 bis 5 m/sec ließ aber keine großen Unterschiede erwarten. Wieder sind in Abb. 15 die Meßergebnisse für Kleinionenzahlen und außerdem noch für die örtlichen P.G. eingetragen, welche in ebenem Feld gemessen wurden und daher vergleichbar sind. Obwohl als Folge des kräftigen Windes die Verunreinigungen der Luft nicht sichtbar

waren — die Sicht auch über die Großstadt hinweg war völlig klar — sind doch erkennbar die niedrigeren Werte für die Kleinionen mit einem Überschuß der positiven Ionen in den in Windrichtung hinter der Stadt liegenden Meßstellen und bis zu Entfernungen von 25 km.

Ebenso wird der Großstadteinfluß aber an der allerdings geringen Erhöhung des P.G. sichtbar. Seitlich des Schlauches hinter der Stadt sind die Werte normal.

Bei zwei weiteren Fahrten wurde dann der erwartete Effekt der positiven Raumladungen der Großstadt deutlich erhalten. In der Abb. 16 sind die

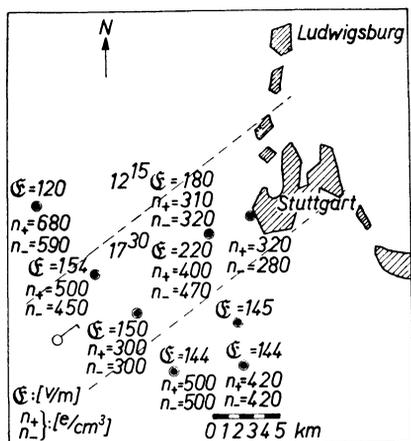


Abb. 15. Wirkung von elektrischen Raumladungen in Windrichtung hinter der Großstadt (Windgeschwindigkeit 4 bis 5 m/sec)

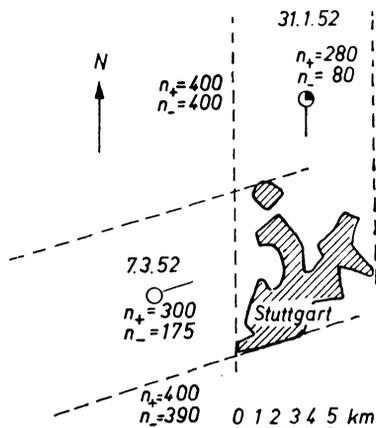


Abb. 16. Wirkung von elektrischen Raumladungen auf die Kleinionenzahl in Windrichtung hinter der Großstadt (Windgeschwindigkeit 1 bis 2 m/sec)

Meßergebnisse vom 31. März 1952 und 7. März 1952 enthalten. In etwa 10 km Entfernung nördlich von starken Kern- und Großionenquellen bei Stuttgart-Münster ist der im freien Gelände bisher größte Überschuß positiver Kleinionen gegenüber den negativen von etwa  $+200 \text{ e/cm}^3$  gefunden worden. Das Gerät wurde durch Kontrollmessungen vor- und nachher an Stellen ohne Großstadteinfluß überprüft und war einwandfrei. Fast ebenso groß war der Überschuß am 7. März 1952 bei Schloß Solitude — etwa  $+125 \text{ e/cm}^3$  — obwohl dort der Wind über die Wälder wehte. Die Windgeschwindigkeiten waren an beiden Tagen etwa 2 m/sec, so daß das Aerosol etwa  $1\frac{1}{2}$  Stunden vorher die Großstadt verlassen hatte. Auffallend war dabei, daß der Unterschied der Kleinionendichte beider Vorzeichen am Stadtrand noch nicht merklich auftrat, sondern entsprechend der Entladezeit der Großteilchen von Stunden erst später erschien.

## VII. Zusammenfassung

Die Untersuchung der luftelektrischen Größen, Potentialgradient, Kleinionenzahlen, der Raumladungsdichte und des Vertikalstromes im Bereich von Großstadt und Industrie konnte durch neu entwickelte Meßgeräte mit kurzer

Einstellzeit, hoher Empfindlichkeit und bequemer Bedienung erfolgreich begonnen werden. Es ergab sich vor allem, daß an gestörten Orten nicht nur hohe Dichten der Kondensationskerne und Großionen vorkommen, sondern daß Raumladungen erzeugt werden, die in niedrigen Höhen mit dem Winde treiben und sich mehrere Stunden halten können. Sie haben meist positive Vorzeichen und erhöhen somit die luftelektrische Feldstärke am Erdboden und den Vertikalstrom. Gelegentlich werden negative Raumladungen gefunden, die ihren Ursprung in chemischen Vorgängen, meist Verbrennungen, haben. Mindestens innerhalb und in der Nähe von dicht besiedelten Gebieten müssen wir also neben der Gewittertätigkeit die Ladungsproduktion durch Industrie, Verkehr und Siedlungen als zweiten Generator für das luftelektrische Feld am Erdboden in Betracht ziehen. Die Raumladungen erniedrigen die Zahl der negativen oder positiven Kleinionen, je nachdem ob sie selbst positiv oder negativ sind. Bei Luftströmung im ebenen, freien Gelände können sie die normale Differenz der Kleinionenzahlen infolge des Elektrodeneffektes verstärken, vermindern oder ihn vortäuschen. So wird es leicht verständlich, warum in den zahlreichen Veröffentlichungen über Messungen des Elektrodeneffekts so sehr verschiedene Ergebnisse genannt werden.

Sprühende Hochspannungsleitungen schaffen völlig abnormale Verhältnisse und sind über weite Strecken von Einfluß auf den Potentialgradienten und die Raumladungsverhältnisse samt deren Folgen. Sie weisen aber auch deutlich darauf hin, daß in irgendwelchen Gebieten mit örtlichen Unterschieden der Ionisation Raumladungen entstehen und diese wieder zu starken P.G.-Schwankungen führen können, sobald die Luft nicht laminar strömt; dies ist aber fast nie der Fall. Deshalb sind Schwankungen der luftelektrischen Elemente immer ein Anzeichen für solche Stellen. Immer ist deshalb die gleichzeitige Registrierung der Windrichtung zu empfehlen.

Es war das Ziel der vorliegenden Arbeit gewesen, Einzelercheinungen zu untersuchen. Die bisherigen Ergebnisse haben neue Erkenntnisse gebracht, und diese wiederum können zur Klärung mancher alter und neuer Probleme anregen. Insbesondere eröffnen diese Erfahrungen die Möglichkeit, die so oft unterschiedlichen Meßergebnisse vieler Autoren zu verstehen. Denn manches bisher unverstandene Ergebnis wird gedeutet werden können, wenn die luftelektrisch wirksamen Störquellen in der Nachbarschaft des Meßortes aufgedeckt sind.

Im weiteren Verlauf dieser Untersuchungen der anthropogenen Raumladungen sind Aufschlüsse über meteorologische Probleme, insbesondere in Erdbodennähe, zu erwarten. Während *Israel* [12] auf die Zusammenhänge zwischen großräumigem Luftmassenaustausch und luftelektrischen Größen mehrfach hingewiesen hat, erlauben die vorliegenden Erfahrungen den Gang kleinräumiger Luftbewegungen in besiedelten Gebieten oder anderen Orts genauer zu verfolgen.

Für manche Anregung und das stete Interesse habe ich Herrn Professor Dr. *E. Regener*, für tatkräftige Unterstützung vielen Helfern herzlich zu danken, ebenso der Deutschen Forschungsgemeinschaft, deren Sachbeihilfe den Bau der Meßgeräte und die vielen Messungen im Freien ermöglichte.

## Literatur

- [1] *Ehmert, A. u. Mühleisen, R.*: ZS. f. angew. Phys. **5** (1953), S. 43—47.
- [2] *Mühleisen, R. u. Creutzburg U.*: Veröffentlichung in Vorbereitung.
- [3] *Mühleisen, R. u. Holl, W.*: Geofisica Pura e Applicata **22** (1952), S. 3—8.
- [4] *Cialdea (u. Losurdo)*: Annali di Geofisica **1** u. **2** (1949/50).
- [5] *Mühleisen, R.*: ZS. f. Naturforschung **6a** (1951), S. 667.
- [6] *Israel, H.*: Annalen d. Meteor. (1950), S. 330.
- [7] *Kasemir, H. W.*: Studien über das atmosph. Potentialgefälle V.
- [8] *Israel, H.*: Meteorol. Rundschau **1** (1947), S. 200.
- [9] *Chalmers, J. A.*: Journ. of Atm. and Terr. Phys. **2** (1952), S. 155.
- [10] *Wilkening, M. H.*: Rev. Scient. Instr. **23** (1952), S. 13.
- [11] *Whipple u. Chalmers*: Quart. Journ. Roy. Met. Soc. **LXX**, 1944.
- [12] *Israel, H.*: Arch. f. Met. Geophys. u. Biokl. Wien A **2** (1950), S. 367.
- [13] *Mühleisen, R.*: Nat. wiss. **39** (1952), S. 376—377.
- [14] *Scovase, F. J.*: Geophys. Memoirs **58** (1933) S. 1—22 und **75** (1938) S. 1—20.