

H. ISRAËL

ATMOSPHERISCHE
ELEKTRIZITÄT

TEIL II



ATMOSPHERISCHE ELEKTRIZITÄT

TEIL II

FELDER, LADUNGEN, STRÖME

VON

H. ISRAËL

Leiter des Meteorologischen Observatoriums Aachen
des Deutschen Wetterdienstes und Professor
an der Technischen Hochschule Aachen

z. T. unter Mitarbeit von

H. DOLEZALEK

MIT 218 ABBILDUNGEN

LEIPZIG 1961
AKADEMISCHE VERLAGSGESELLSCHAFT
GEEST & PORTIG K.-G.

VORWORT

Der vorliegende Band

Felder, Ladungen, Ströme

bringt die 1957 mit dem Band

Grundlagen, Leitfähigkeit, Ionen

begonnene Neubearbeitung der atmosphärischen Elektrizität zum Abschluß.

Daß sich entgegen dem ursprünglichen Plan zwischen das Erscheinen der beiden Teile doch eine längere Pause eingeschoben hat, hat seinen Grund nicht zuletzt darin, daß sich bei einem in Entwicklung befindlichen Forschungsgebiet ein geeigneter Zeitpunkt für eine monographische Behandlung um so schwerer finden läßt, je lebhafter die Entwicklung fortschreitet.

Die Forschungsarbeit auf dem Gebiet der atmosphärischen Elektrizität hat im letzten Jahrzehnt in mehrfacher Hinsicht wesentlichen Auftrieb erhalten. Vor allem sind ihr durch die Impulse zur Erweiterung der Untersuchungen in synoptischer und in aerologischer Richtung wesentliche neue Aufgaben erwachsen. — Insbesondere hat dabei die Möglichkeit, atmosphärisch-elektrische Messungen für meteorologisch-aerologische Spezialfragen, wie z. B. für die Turbulenz- und Austauschforschung, heranzuziehen, in zunehmendem Maße an Bedeutung gewonnen. Weiter zeichnet sich eine Entwicklung ab, die den atmosphärisch-elektrischen Messungen heute im Rahmen der Überwachung der Atmosphäre auf Verseuchung durch Kernspaltungsprodukte die Rolle von Monitoren für Strahlungsveränderungen zuweist. — Schließlich ist der „Großeinsatz“ luftelektrischer Arbeiten im Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 zu erwähnen.

Es erschien sinnvoll, einen Zeitpunkt zum Manuskriptabschluß zu wählen, zu dem sich die angedeuteten Entwicklungen in ihren ersten Erfolgen abzeichneten.

Besondere Sorgfalt ist ebenso wie im ersten Band auch hier der Zusammenstellung der Quellen gewidmet. Dank der Zustimmung des Herausgebers und des Verlages zur erforderlichen Umfangserweiterung war es dem Verfasser möglich, die ihm bekannten Originalarbeiten, die etwas zur Entwicklung des Gebietes beigetragen haben bzw. beitragen, weitestgehend aufzuführen. Besonderer Wert wurde dabei auf eine möglichst vollständige Literaturzusammenstellung für die ältere Zeit (bis etwa Mitte der vierziger Jahre) gelegt, denn die neuere Literatur ist an sich leichter zugänglich und dank der heutigen Referate-Tätigkeit leichter auffindbar als die ältere. — Schwierigkeiten sprachlicher Art machten hier allerdings eine entsprechende Verwertung und Bewertung der russisch-sprachigen Literatur unmöglich, was nicht zuletzt wegen der gerade im Bereich der Sowjetunion in Gang befindlichen atmosphärisch-elektrischen Arbeiten zum Austauschproblem bedauert werden muß.

Wie in Band I werden auch im vorliegenden Band die einzelnen Meßmethoden im Text jeweils nur kurz im Prinzip behandelt und in ihren Einzelheiten in einem besonderen Anhang „Meßtechnik“ dargestellt. Der Text dessen ist auch hier z. T. identisch mit dem Text „Luftelektrizität, Meßmethoden und Geräte“ in Band III der Neuauflage von Linkes Meteorologischem Taschenbuch, der mit freundlicher Genehmigung von dessen Herausgeber, Herrn Prof. Dr. F. Baur, zur Vervollständigung in die vorliegende Monographie übernommen werden konnte.

Ferner sind, ebenso wie in Band I, größere Tabellen im Anhang zusammengefaßt, Tabellen im Text sind mit arabischen, Anhangtabellen mit römischen Ziffern durchnummeriert.

Um einem von verschiedenen Seiten an mich gelangten Wunsch zu entsprechen, sind im vorliegenden Band die Gleichungen durchweg „zweisprachig“ in den beiden Ausdrucksformen des „elektrostatischen CGS-Systems“ und des „m-s-V-A-Systems“ nebeneinandergestellt.

Berichtigungen und Ergänzungen zu Band I wurden auf das Notwendigste beschränkt. Nur zum Kapitel „Natürliche und künstliche Radioaktivität im atmosphärischen Bereich“ mußte ein etwas ausführlicherer Nachtrag eingefügt werden.

Bei der Erledigung der umfangreichen Korrekturen wurde ich in besonders dankenswerter Weise von den Herren Dipl.-Phys. H. Dolezalek und Dipl.-Phys. A. Oster unterstützt.

Aachen, März 1961

H. Israëli

INHALT

Fünfter Abschnitt: Das atmosphärisch-elektrische Feld

A. Das stationäre Feld	1
§ 52. Vorbemerkungen und Übersicht	1
a) Die Maßsystem-Frage.	1
b) Die Vorzeichen-Frage.	2
c) Übersicht	4
§ 53. Meßprinzipien	12
§ 54. Zur Auswahl und Bearbeitung des Meßmaterials	20
a) Materialauswahl	20
b) Die Fourier-Analyse in der Lufterlektrizität.	24
§ 55. Das Reduktionsproblem	25
§ 56. Das atmosphärisch-elektrische Feld (Potentialgefälle) in Bodennähe: Mittelwerte und Breiteneffekt.	29
§ 57. Das atmosphärisch-elektrische Feld (Potentialgefälle) in der freien Atmosphäre	34
§ 58. Periodische Variationen des atmosphärisch-elektrischen Feldes (Potentialgefälles).	41
a) Tagesgang.	42
b) 27tägige Periode	49
c) Jahresgang	50
d) 11-Jahre-Periode.	52
§ 59. Zur Analyse der zeitlichen Variationen.	53
§ 60. Die Elemente des atmosphärisch-elektrischen Feldes (Potentialgefälles): 1. Die globale Potentialdifferenz V	63
a) Die Weltgewitterstatistik	65
b) Der elektrische Aufbau der Gewitterwolken	68
c) Bilanz des Ladungsumsatzes im lufterlektrischen Stromkreis	70
§ 61. Die Elemente des atmosphärisch-elektrischen Feldes (Potentialgefälles): 2. Der örtliche Luftwiderstand w	73
a) Erfahrungstatsachen	73
b) Die Analyse von J. G. Brown	79
c) Die Ableitung der Doppelschwingung des Potentialgefälles aus dem Tagesgang des Austausches	80
d) Neuere Arbeiten	83

§ 62. Die Elemente des atmosphärisch-elektrischen Feldes (Potential-Gefälles): 3. Der „columnar resistance“ (Säulenwiderstand) <i>R</i> . . .	85
a) Bestimmung der Variationen des <i>c. r.</i>	87
b) Extrapolation von Potentialgefälle-Messungen	87
c) Extrapolation von Leitfähigkeitsmessungen	89
d) Die Extrapolation von O. H. Gish	89
§ 63. Beispiele für das Ineinandergreifen der Steuerungsmechanismen.	91
a) Der Weltzeitanteil des Potentialgefälles über Land	91
b) Weitere Beziehungen zwischen Potentialgefälle und Suspensionsgehalt der Luft	92
c) Die Tagesvariation des Potential-Gefälles in Abhängigkeit vom Luftkörper	97
d) Die Analyse nach G. R. Wait	100
e) Ersatz-Schaltbilder	101
§ 64. Aperiodische Variationen	103
a) Stationäre und nichtstationäre Variationen	103
b) Säkulare Änderungen	104
c) Meteorologische Einwirkungen	105
d) Anthropogene Einflüsse	116
e) Kosmische Einflüsse auf das luftelektrische Potentialgefälle	118
§ 65. Der „Sonnenaufgangs-Effekt“	120
B. Nichtstationäre Erscheinungen	125
§ 66. Die luftelektrische Unruhe	125
a) Nichtstationäre Erscheinungen	125
b) Die Erscheinungen der Unruhe	126
c) Zur Deutung der Unruhe	132
§ 67. Feldsprünge	136
§ 68. „Luftstörungen“ („atmospheric“, „spherics“)	141
a) Entstehung und Form der Störungen	142
b) Zahl und Einfallsrichtung der Störungen	152
c) Störungen und kosmische Einflüsse	158
§ 69. „Spherics“ und Weltgewittertätigkeit	160
 Sechster Abschnitt: Ladungen	
§ 70. Übersicht	164
§ 71. Meßprinzipien	165
a) Indirekte Raumladungsbestimmungen	166
b) Direkte Raumladungsbestimmungen	168
§ 72. Entstehen und Vergehen von Raumladungen	168

§ 73. Raumladungen in der wolkenfreien Atmosphäre	172
a) Bodennähe	172
b) Freie Atmosphäre	177
c) Der verallgemeinerte Elektrodeneffekt	179
§ 74. Raumladungen in Nebel und Wolken (ohne Niederschlagsbeteiligung)	182
a) Befund	182
b) Deutung	184
§ 75. Ladungsbildung bei Niederschlägen I: Beobachtungserfahrungen	189
a) Übersicht	189
b) Meßergebnisse	191
§ 76. Ladungsbildung bei Niederschlägen II: Maschinen mit Eigenpolung	195
a) Effekte bei Beteiligung von flüssiger oder fester Phase allein	196
b) Effekte bei Beteiligung von flüssiger <i>und</i> fester Niederschlagsphase	199
§ 77. Ladungsbildung bei Niederschlägen III: Maschinen mit Fremderregung	202
a) Der „Elster-Geitel-Prozeß“	202
b) Der „Wilson-Effekt“	206
c) Der „Asymmetrie-Effekt“	207
d) Experimentelle Ergänzungen	209

Siebenter Abschnitt: Ströme

§ 78. Übersicht	211
§ 79. Meßprinzipien	212
a) Indirekte Bestimmung der Dichte des vertikalen Leitungsstromes	213
b) Direkte Messung der Vertikalstromdichte	215
c) Bestimmung der Konvektionsstromdichte	220
d) Andere Stromanteile	221
§ 80. Der stationäre Vertikalstrom (Mittelwerte)	222
§ 81. Stationär verlaufende Variationen der Vertikalstromdichte	226
§ 82. Zur Deutung des stationären Vertikalstromverhaltens	232
§ 83. Instationäre Variationen des Vertikalstromes	237
§ 84. Vertikalstrom und Erdmagnetismus	244
§ 85. Der Niederschlagsstrom	247
§ 86. Des Spitzenstrom	250
§ 87. Der Blitzstrom	254

Achter Abschnitt: Ergänzungen und Folgerungen

§ 88. Übersicht	261
§ 89. Luftelektrische Synopsis	262

§ 90. Das Problem der Vergleichbarkeit.	268
§ 91. Ergänzungen zum Problem des Ladungsumsatzes	272
§ 92. Gewitterprobleme.	276
a) Gewittertheorie	276
b) Das Gewitter als Generator	280
c) Elektrisierung und Niederschlag; energetische Probleme.	284
§ 93. Zur biologisch-bioklimatischen Bedeutung des atmosphärisch- elektrischen Geschehens	286
a) Übersicht	286
b) Die Schirmwirkung.	290
c) Folgerungen	292
§ 94. Lufterlektrizität und Radioaktivität (Nachtrag zu Bd. I.)	295
a) Bilanz der natürlichen Radioaktivität.	295
b) Die „radioaktive Verseuchung“ (künstliche Radioaktivität im atmosphärischen Bereich)	301
c) Lufterlektrische Wirkungen der künstlichen Radioaktivität in der Atmosphäre	308
d) „Heiße Teilchen“	314

Anhang: Meßtechnik, Hilfstabellen, Ergänzungen, Nachträge, Register

I. Meßtechnik	318
Teil 3: Felder, Ladungen, Ströme	318
A. Lufterlektrisches Feld, Potential-Gefälle	318
B. Raumladung	364
C. Ladungsumsatz zwischen Atmosphäre und Erde	370
D. Gewittermessungen	376
E. Spherics-Messungen	380
F. Nachtrag: Neuere Meßtechnik auf radioaktivem Gebiet.	387
II. Extenso-Tabellen	391
III. Ergänzungen	409
A. Die Feldgleichung des strahlenden Dipols	409
B. Die Verteilung der Gewittertätigkeit auf der Erde	416
C. Vorschlag einer erweiterten Klassifikation für das Gebiet der atmosphärischen Elektrizität	416
IV. Berichtigungen zu Teil I	422
V. Nachträge zu Teil I	425
Literaturverzeichnis	427
Gesamtverzeichnis der Texttabellen zu Teil I und II	480
Gesamtverzeichnis der Extenso-Tabellen im Anhang zu Teil I und II.	483
Register (Geographische Bezeichnungen und Sachregister).	485

FÜNFTER ABSCHNITT

DAS ATMOSPHERISCH-ELEKTRISCHE FELD

A. Das stationäre Feld

§ 52. Vorbemerkungen und Übersicht

Der vorliegende II. Teil der Monographie „Atmosphärische Elektrizität“ behandelt die Felder, Ladungen und Ströme in der Atmosphäre. Die Grundzüge der hier bestehenden Zusammenhänge sind bereits in der Übersicht des dritten Abschnittes in Teil I (s. S. 90–105) besprochen, und wir haben nun die Aufgabe, sie in ihren Einzelheiten zu begründen, abzuleiten und darzustellen. Vorher sollen jedoch noch zwei Grundsatzfragen besprochen werden, die für die weitere Darstellung von Bedeutung sind: Die Maßsystem-Frage und die Vorzeichen-Frage. Beide Fragen erfordern bekanntlich bestimmte Konventionen, über die im Interesse von Verfasser und Leser gleich zu Anfang Klarheit geschaffen werden soll.

a) Die Maßsystem-Frage

Die Verwendung verschiedener Maßsysteme nebeneinander ist eine die heutige physikalische Publizistik belastende Erscheinung. Da es bisher nicht möglich gewesen ist und auch in Zukunft kaum möglich sein dürfte, eine logisch zwingende Entscheidung zu Gunsten des einen oder anderen Systems herbeizuführen, muß es auch im hier zu behandelnden Gebiet dem Belieben bzw. der Gewohnheit des Einzelnen überlassen bleiben, ob er seine mathematischen Formulierungen in der Sprache der Elektrostatik oder in der des m-s-V-A-Systems ausdrücken will.

Im ersten Teil sind zur Erleichterung der „Übersetzung“ von Formulierungen aus der Sprache des einen Maßsystems in die des anderen auf den S. 240–246 die Bezeichnungen, Dimensionen und Umrechnungsfaktoren zusammengestellt, nach denen jederzeit der Übergang von den durchweg im elektrostatischen Maßsystem angegebenen Größen und

Gleichungen in eines zweier anderer gebräuchlicher Systeme möglich ist. Da indes auch dieser Versuch zur möglichst weitgehenden Beseitigung der nun einmal vorhandenen Maßsystemschwierigkeiten bei einigen Lesern auf eine gewisse Kritik gestoßen ist wegen nicht genügender Berücksichtigung des m-s-V-A-Systems, wird im vorliegenden Band der Weg beschritten, alle Gleichungen, die in den verschiedenen Maßsystemen verschiedenes Aussehen erhalten, in den beiden Schreibweisen des elektrostatischen CGS-Systems und des m-s-V-A-Systems anzuführen und Zahlen in beiden Maßen anzugeben¹⁾.

b) Die Vorzeichen-Frage

Die Frage nach dem Vorzeichen, das man den luftelektrischen Elementen zuerkennen soll, stößt auf gewisse Schwierigkeiten, weil Feldstärke \vec{E} und Potentialgradient φ durch die Beziehung

$$(71) \quad \vec{E} = -\text{grad } \varphi$$

verknüpft sind, also jeweils definitionsgemäß verschiedenes Vorzeichen haben.

Die Schwierigkeit läßt sich bezüglich des elektrischen Feldes in der Atmosphäre beheben, wenn man sich durch Konvention darauf einigt, dem im normalen Schönwetter herrschenden atmosphärisch-elektrischen Feld das Attribut

positives Feld

oder

positiver Potentialgradient
(positives Potentialgefälle)

zu verleihen und sich dann konsequenterweise auf diese Benennung zu beschränken, im ersten Fall also auf die Bezeichnung „Potentialgradient“ („Potentialgefälle“), im zweiten auf die Bezeichnung „Feld“ völlig zu verzichten.

Nun besitzt aber die Atmosphäre auch eine gewisse Leitfähigkeit Λ ; sie wird also nach Gleichung (77) (Teil I, S. 95) von einem Vertikalstrom der Dichte $\vec{i} = \Lambda \vec{E}$ durchflossen²⁾. Nach dieser Gleichung müssen Stromdichte und Feldstärke gleiches Vorzeichen tragen. Wir müssen

¹⁾ In der Regel wird erst die Formel im CGS-System, rechts daneben oder darunter im m-s-V-A-System angegeben.

²⁾ Horizontalkomponenten spielen im atmosphärisch-elektrischen Bereich nur eine untergeordnete Rolle und brauchen hier nicht berücksichtigt zu werden.

somit je nach der Konvention, zu der wir uns bezüglich der Vorzeichenbenennung im atmosphärisch-elektrischen Zustand entschließen, bei Wahl des Wortes „positiver Potentialgradient“ für den Schönwetterzustand diesem eine negative Stromrichtung, bei Wahl des Wortes „positives“ Feld für den gleichen Zustand diesem eine „positive“ Stromrichtung zuzuordnen, obwohl in beiden Fällen ein Transport positiver Ladungen zur Erde hin gemeint ist.

J. A. Chalmers [133] weicht diesem Dilemma dadurch aus, daß er die Bezeichnung Feld \vec{E} aus dem luftelektrischen Sprachgebrauch verbannt und überall durch den in umgekehrter Richtung weisenden Vektor \vec{F} des Potentialgefälles ersetzt wissen will. Man erhält so zwar zu einem positiven Potentialgefälle automatisch einen positiven Strom, verzichtet dafür allerdings in der Grundbeziehung des Ohmschen Gesetzes auf Korrektheit bezüglich des Vorzeichens; denn dieses gilt für \vec{E} , nicht für \vec{F} !

Man könnte dies natürlich dadurch vermeiden, daß man bei der Bezeichnung Feldstärke \vec{E} bleibt, ihre im normalen Schönwetter herrschende Richtung als positiv bezeichnet und die Bezeichnung Potentialgefälle \vec{F} „verbannt“. Als einziger — aber nicht stichhaltiger — Einwand könnte dagegen vorgebracht werden, daß dies der Gewohnheit widerspricht, die von der Leiteroberfläche nach außen, hier also vom Boden nach oben weisende Richtung, als „positiv“ zu bezeichnen.

H. Dolezalek [209] diskutiert eine andere Möglichkeit zur Lösung des Dilemmas: Er behält eine Vorzeichenangabe bei, bezeichnet das Schönwetterfeld und den Schönwetterstrom als positiv und bezieht das Wort „Potentialgradient (Potentialgefälle)“ nur auf dessen Absolutwert.

Indes bringt die Durchführung des Verlangens, in Zukunft in der Luftelektrizität *streng* an der durch Gleichung (71) nun einmal festgelegten Richtungsantibasis von Feld und Potentialgradient festzuhalten und im Sinn des oben diskutierten Vorschlages eines der beiden Worte

„Feld“ oder „Potentialgradient“

auszumerzen, *in jedem Fall* die Gefahr von Unklarheiten und Verwirrungen mit sich: Einmal entzieht es der zwar inkorrekten, aber seit jeher bestehenden Gewohnheit, im atmosphärisch-elektrischen Sprachgebrauch „positives Feld“ und „positiver Potentialgradient“ für den *gleichen* Zustand nebeneinander zu verwenden, den Boden. In künftigen Arbeiten würden andere Vorzeichenbenennungen auftreten

müssen als in bisherigen Arbeiten. Zudem: „It is far too late to attempt to re-educate workers“ (J. A. Chalmers, l. c.).

Sucht man nach einem Ausweg aus dieser Situation, der weder die früheren Veröffentlichungen „wegen falscher Vorzeichenbenennung“ unlesbar macht, noch bei künftigen Arbeiten neue Vorzeichenbenennungen fordert, so bietet sich folgender Ausweg an:

Wird eine Vereinbarung der Art getroffen, daß für die drei luftelektrischen Größen Feld, Potentialgradient (Potentialgefälle) und Strom an Stelle einer Vorzeichenangabe eine Richtungsangabe gewählt wird, so kann durch die Bezeichnungen

normale Schönwetter-Richtung

und

umgekehrte Schönwetter-Richtung

die Vorzeichenfrage umgangen werden.

Um jeden Zweifel auszuschalten, kann man dieser Feststellung noch die ergänzende Angabe hinzufügen, daß bei normaler „Schönwetter-Richtung“ der Erdoberfläche durch den Vertikalstrom positive Ladungen zugeführt werden.

Für eine Vorzeichenangabe besteht jetzt keine Notwendigkeit mehr. Erscheint sie trotzdem, so ist es in jedem Fall leicht, den Anschluß an die vorgeschlagenen Beziehungen „normale Schönwetter-Richtung“ und „umgekehrte Schönwetter-Richtung“ zu finden.

Wohl aber wäre es zur Vermeidung jedes weiteren Mißverständnisses zu empfehlen, künftig den Veröffentlichungen eine Feststellung über die gewählte Richtungsbenennung voranzustellen bzw. beizugeben, wie es in Zweifelsfällen in diesem Buch geschieht.

Schwierigkeiten bei Berechnungen, z. B. bei der Prüfung des Ohm'schen Gesetzes im atmosphärisch-elektrischen Bereich, sind nicht zu befürchten, da hierbei in der Regel nur die Absolutwerte interessieren.

c) Übersicht

Das elektrische Feld in der Atmosphäre hat von den ersten Anfängen der luftelektrischen Forschungsarbeit an im Vordergrund des Interesses gestanden. Seine wesentlichen Eigenschaften sind deshalb schon sehr früh (Ende des 18. Jahrhunderts) als Erfahrungstatsachen bekannt geworden. Die Frage nach seinen Ursachen dagegen wird nach einigen erfolglosen Versuchen im 19. Jahrhundert erst seit Elster und Geitel auf der richtigen Grundlage behandelt und hat erst in der jüngsten

Vergangenheit eine befriedigende Antwort erfahren. Wir haben diese Entwicklung bereits im ersten Abschnitt des ersten Teiles kennengelernt. Als Einleitung zu der nun folgenden ausführlichen Behandlung des luftelektrischen Feldes müssen wir diese Dinge nochmals kurz streifen und uns dabei einige hierauf bezügliche Überlegungen ins Gedächtnis zurückrufen, denen wir in Teil I schon hier und da begegnet sind.

Die Entwicklung der luftelektrischen Grundanschauungen erhält ihr typisches Gepräge dadurch, daß die Frage, ob zwischen den beiden Erscheinungsgebieten der Luftelektrizität und der Meteorologie engere innere Beziehungen bestehen oder nicht, in den verschiedenen Entwicklungsphasen grundsätzlich verschieden beantwortet worden ist.

Die Erkenntnis, daß überall und zu allen Zeiten in der bodennahen Atmosphäre ein elektrisches Feld besteht, geht schon auf L. G. Lemonnier, G. B. Beccaria, H. B. de Saussure [I, 33; I, 407; I, 621] u. a. zurück; ebenso stammt die Feststellung regelmäßiger periodischer Veränderlichkeiten desselben im Laufe des Tages schon aus dieser Zeit. Die Verfeinerung und Ausdehnung der Messungen brachte dann bald das Ergebnis, daß der Tagesgang um so klarer in Erscheinung trat, je „besser das Wetter war“. Dies mußte zur Unterscheidung zwischen „ungestörten“ und „gestörten“ Zeiten führen und gab damit den Anlaß zu der Ende des 19. Jahrhunderts entstandenen Gewohnheit, aus dem anfallenden Beobachtungsmaterial zunächst nur die sogenannten „ungestörten Tage“ auszuwählen und statistisch zu verarbeiten.

Diese Auswahl „ungestörter Tage“ hatte einen doppelten Grund: Zunächst sollte sie als Abstraktion vom Wettereinfluß die Sichtung des Beobachtungsmaterials erleichtern helfen. Daß sich in der Folgezeit mit nur wenigen Ausnahmen eine Beschränkung der *gesamten* luftelektrischen Arbeit auf „ungestörte Tage“ allein ergab, war ursprünglich weder angestrebt noch berechtigt¹⁾. — Ein zweiter Grund, der zu einer derartigen Abstraktion Anlaß bot, war eine gewisse Enttäuschung darüber, daß alle bis dahin unternommenen Versuche, zu einer direkten Korrelation zwischen elektrischem und meteorologischem Geschehen zu kommen, vorerst versagten, obwohl die auffallende Ähnlichkeit zwischen den Tagesvariationen luftelektrischer und meteorologischer

¹⁾ Diese Beschränkung hat zwar die Möglichkeit zur Erkennung der weltweiten Zusammenhänge gegeben, hat aber bei der Formulierung des Grundproblems zu einer unrichtigen — weil einseitigen! — und deshalb unlösbaren Fragestellung geführt und damit die Entwicklung verzögert.

Elemente immer wieder zu neuen Versuchen für erklärende Hypothesen Anlaß gab¹⁾. Wir können heute den Grund für das Versagen dieser ersten elektro-meteorologischen Korrelationsversuche in folgendem sehen: Bis an die Schwelle unseres Jahrhunderts sah man die Erscheinungen der Lufterlektrizität nur als elektrostatische Phänome an. Diese Auffassung, die durchaus folgerichtig dem damaligen Erfahrungsumfang entsprang, konnte verständlicherweise zum *dynamischen* Geschehen der Meteorologie keine befriedigende Verbindung finden.

Um die Jahrhundertwende ändert sich dann das lufterlektrische Bild grundsätzlich durch die Entdeckung der Luftionisation: Die Leitfähigkeit der Luft hat einen Strom zur Folge, der das lufterlektrische Feld abzubauen bestrebt ist. Da aber das Feld weiter besteht, muß ein Vorgang (Gegenstrom) existieren, der im gleichen Maße feldaufbauend wirken muß, wie der bekannte Schönwettervertikalstrom abbaut. *Das bestehende lufterlektrische Feld wird damit zum sinnfälligen Ausdruck eines stationären Gleichgewichtszustandes zwischen zwei einander entgegenwirkenden Prozessen.*

Diese Auffassung bringt den *dynamischen Charakter der atmosphärisch-elektrischen Vorgänge* zum Ausdruck und gestattet gleichzeitig, das allgemeine Grund- und Existenzproblem präziser zu formulieren und nach den beiden einander entgegenwirkenden Prozessen der Trennung und Wiederzusammenführung von Ladungen zu fragen, deren Gruppierung im Raum das Feld bedingt. Damit wäre eigentlich die Grundlage für eine korrelative Verbindung zwischen den beiden Gebieten der Lufterlektrizität und der Meteorologie gegeben gewesen. Die weitere Arbeit geht aber in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts zunächst andere Wege: Sie beschränkt sich infolge der schon eingewurzelten Abkehr von der Meteorologie auf „ungestörte Zeiten“ und sucht von hier aus das Problem des „Gegenstromes“ zu lösen, der „eine negative Gesamtladung der Erde aufrecht erhält“.

Wie wir schon in § 29 (Teil I, S. 100ff.) sahen, drängen sich bei der Betrachtung der Beobachtungsergebnisse zwei Fragen auf:

¹⁾ A. Volta, A. Peltier und F. Exner sind die Hauptrepräsentanten dieser Bemühungen, bei denen speziell im atmosphärischen Wasserdampf der verbindende Faktor vermutet wurde. Die Exnerschen Vorstellungen, nach denen ein inverses Verhalten des lufterlektrischen Feldes am Boden und der absoluten Feuchte erwartet wurde, wurde durch die zu ihrer Bestätigung unternommene Expedition von H. Benndorf nach Tomsk/Sibirien 1897/98 widerlegt: Die Erwartung besonders hoher Feldstärken in der fast wasserdampffreien Atmosphäre des sibirischen Winters wurde bekanntlich *nicht* bestätigt.

1. Wie ist es zu erklären, daß die Tagesvariationen des luftelektrischen Feldes über den arktischen Gebieten und den Ozeanen auf der ganzen Erde phasengleich verlaufen?
2. Warum ist diese Erscheinung auf die genannten Gebiete beschränkt oder was ist die Ursache dafür, daß über dem Festland die Tagesvariationen nach Ortszeit verlaufen?

Die Lösung dieser beiden Grundprobleme ist wesentlicher Inhalt der luftelektrischen Arbeit überhaupt. Wir sind erst heute auf Grund unserer Kenntnis von der Leitfähigkeit der Luft und ihren Ursachen in der Lage, diese Fragen mit Aussicht auf Erfolg zu behandeln.

Die im vierten Abschnitt (Teil I) behandelten Erfahrungstatsachen über die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre haben uns gezeigt, daß die Atmosphäre als erdumspannender Kugelkondensator anzusehen ist, der von der Erdoberfläche als der inneren und den hoch-

leitfähigen Schichten in der Hochstratosphäre und Ionosphäre als der äußeren Elektrode begrenzt wird (vgl. Abb. 125).

Abb. 125 zeigt schematisch einen Ausschnitt dieses atmosphärischen Kondensators. Das Dielektrikum ist die Lufthülle zwischen der Erdoberfläche und der in etwa 65 km Höhe beginnenden räumlichen Gegenelektrode in Gestalt der sog. luftelektrischen Ausgleichsschicht (LAS), die man wohl sinngemäß mit der untersten Ionosphäre in Verbindung bringt. Diese Schicht schirmt das Kondensatorinnere nach Art eines Faraday-Käfigs gegen Wirkungen von außen ab. Dafür ist es natürlich bedeutungslos, ob die leitende Schicht 10, 100 oder mehr Kilometer dick ist.

Zunächst sei nur angenommen, daß der Kondensator ungeladen ist und außerdem von einem völlig nichtleitenden Dielektrikum erfüllt wird. Erhält nun die Erde von außen eine Ladung $-e_0$, so erzeugt diese in der Lufthülle ein abwärts gerichtetes elektrisches Feld der Stärke e_0/r^2 bzw. $e_0/(4\pi\epsilon_0 r^2)^{1/2}$ mit r als Abstand vom Erdmittelpunkt. Da die Dicke des Dielektrikums mit seinen etwa 65 km sehr klein gegenüber

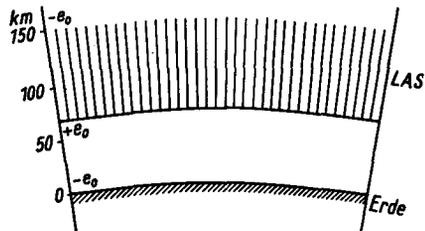


Abb. 125. Schematischer Vertikalschnitt durch die Erdatmosphäre.

¹⁾ Die erste Formel gilt für das CGS-System, die zweite für das m-s-V-A-System (siehe oben unter a).

dem Erdradius ist, läßt sich der Kugelkondensator in guter Näherung als Plattenkondensator ansehen; es resultiert also durch die Ladungszufuhr eine bis zur Unterseite der Außenelektrode praktisch konstante Feldstärke. Die Ladung $-e_0$ influenziert auf der Unterseite der leitenden Schicht LAS die Ladung $+e_0$, auf ihrer Außenseite also $-e_0$, so daß sich oberhalb der LAS das von der Ladung $-e_0$ der Erde herrührende Feld im Betrag e_0/r^2 bzw. $e_0/(4\pi\epsilon_0 r^2)$ fortsetzt¹⁾.

Denkt man sich nun dem Kondensatorinneren eine Leitfähigkeit Λ aufgeprägt, die zunächst in allen Punkten des Innenraumes den gleichen Wert haben soll, so fließt in radialer Richtung ein Strom, der nach den Gleichungen 76/77 (Teil I, S. 95) die Dichte

$$(318) \quad i = (n_1 e k_1 + n_2 e k_2) \cdot E = \Lambda \cdot E$$

$n_1 =$ positive
 $n_2 =$ negative
 $e =$ Elementarladung
 $E =$ Feldstärke

Kleinionendichte der Beweglichkeit k_1
 k_2

hat. Dieser Strom gleicht die Ladungen $+e_0$ bzw. $-e_0$ auf den beiden Belegungen aus und bringt damit das Feld im Inneren zum Verschwinden. Soll es bestehen bleiben, so muß den beiden Belegungen dauernd eine den Stromfluß kompensierende Ladungsmenge zugeführt werden. Der Feldverlauf bleibt im freien Innenraum des Kondensators der gleiche, wie er in einem vollkommen nichtleitenden Dielektrikum herrschen würde; nur in Elektrodennähe tritt jetzt infolge der Leitfähigkeit der Luft noch die schon § 14 und § 32 (Bd. I) im einzelnen behandelte Erscheinung des Elektrodeneffektes hinzu.

Nimmt nun, wie es in Wirklichkeit der Fall ist, die Leitfähigkeit mit der Höhe rasch zu, so bildet sich ein anderer Verlauf der Feldstärke mit der Höhe aus. Wir haben diese Überlegungen schon in Teil I (S. 96/97) durchgeführt und gesehen, daß sich in diesem Fall der Feldverlauf solange umgestalten muß, bis sich eine Verteilung einstellt, bei der das Produkt aus Feldstärke E und Leitfähigkeit Λ in allen Höhen den gleichen Wert hat. Nach einer an anderer Stelle behandelten Beziehung ist eine Folge davon die Bildung von Raumladungen im Kondensatorinnenraum.

¹⁾ Ob sich infolge einer immerhin denkbaren Ladung e_a der leitenden Schicht selbst im Außenraum noch ein zusätzliches Feld überlagert, ist im Innenraum des atmosphärischen Kondensators nicht festzustellen und vorläufig unbekannt.

Betrachtet man jetzt eine beliebige konzentrische Kugelfläche im Innenraum des Kondensators, so hat die Feldstärke E_i an dieser Kugelfläche den Wert

$$(319) \quad E_i = \frac{e_0 + e_i}{r_i^2} \text{ bzw. } E_i = \frac{e_0 + e_i}{4\pi \epsilon_0 r_i^2},$$

wo e_0 wieder die Ladung der Erde, e_i die Summe der zwischen Erdoberfläche und Kugelfläche gelegenen Raumladungen und r_i den Radius der Kugelfläche bedeuten. Durch die Oberfläche unserer i -Kugel fließt also ein Strom $j = -4\pi r_i^2 A_i E_i$ nach innen, der die Ladung $e_0 + e_i$ entsprechend zu verkleinern sucht. Es folgt also

$$(320) \quad \frac{d}{dt} (e_0 + e_i) = -4\pi r_i^2 A_i E_i \text{ bzw. } = -\frac{A_i}{\epsilon_0} E_i r_i^2$$

und nach Gl. (319)

$$(321) \quad \frac{d}{dt} E_i = -4\pi A_i E_i \text{ bzw. } = -\frac{A_i}{\epsilon_0} E_i$$

bzw. integriert:

$$(322) \quad E_i = E_i^0 \cdot e^{-4\pi A_i t}$$

bzw. $E_i = E_i^0 \cdot \exp\left(-\frac{A_i}{\epsilon_0} t\right),$

d. h., das Feld verschwindet bei fehlendem Aufrechterhaltungsvorgang nach einem Exponentialgesetz, dessen zeitlicher Verlauf durch die Zeitkonstante $1/(4\pi A_i)$ bzw. ϵ_0/A_i bedingt wird.

Für unseren Kondensator mit seiner nach oben hin zunehmenden Leitfähigkeit bedeutet das, daß sich das Feld um so rascher umformt, je größer die Leitfähigkeit ist. Mit anderen Worten: Das Abklingen des Feldes würde nicht in allen Höhen gleichzeitig erfolgen, sondern das Feld würde nach und nach von oben nach unten fortschreitend abgebaut¹⁾.

Man kann die Betrachtung umdrehen und auf den schon behandelten Fall anwenden, daß an den zunächst feldfrei zu denkenden atmosphärischen Kondensator mit seiner vorgegebenen Leitfähigkeitsverteilung eine Spannungsdifferenz U angelegt und aufrecht erhalten wird. Im

¹⁾ Unter Benutzung der in Tabelle 11 (Teil I, S. 129) gegebenen Zahlen ermittelt man leicht, daß in 0 (2500, 4400, 6500) m Höhe das ursprüngliche Feld innerhalb 1670 (530, 310, 200) s auf $1/10$ seines ursprünglichen Wertes absinken würde, wenn der Aufrechterhaltungsprozeß plötzlich fortfiel.