



Die „Sammlung Vieweg“ hat sich die Aufgabe gestellt, Wissens- und Forschungsgebiete, Theorien, chemisch-technische Verfahren usw., die im Stadium der Entwicklung stehen, durch zusammenfassende Behandlung unter Beifügung der wichtigsten Literaturangaben weiteren Kreisen bekanntzumachen und ihren augenblicklichen Entwicklungsstand zu beleuchten. Sie will dadurch die Orientierung erleichtern und die Richtung zu zeigen suchen, welche die weitere Forschung einzuschlagen hat.

Als Herausgeber der einzelnen Gebiete, auf welche sich die Sammlung Vieweg zunächst erstreckt, sind tätig, und zwar für:

- Physik** (theoretische und praktische, und mathematische Probleme):  
Herr Geh. Reg.-Rat Prof. Dr., Dr.-Ing. E. h. Karl Scheel, Physikal.-Techn. Reichsanstalt, Charlottenburg;
- Chemie** (Allgemeine, Organische und Anorganische Chemie, Physikal. Chemie, Elektrochemie, Technische Chemie, Chemie in ihrer Anwendung auf Künste und Gewerbe, Photochemie, Metallurgie, Bergbau):  
Herr Prof. Dr. Bernhard Neumann, Techn. Hochschule Breslau;
- Technik** (Wasser-, Straßen- und Brückenbau, Maschinen- und Elektrotechnik, Schiffsbau, mechanische, physikalische und wirtschaftliche Probleme der Technik):  
Herr Prof. Dr.-Ing. E. h. Fritz Emde, Techn. Hochschule Stuttgart.

### *Neuere und neueste Hefte der „Sammlung Vieweg“*

- Heft 31. Dr. Heinrich Faßbender: *Die technischen Grundlagen der Elektro-medicin.* Mit 77 Abbildungen. M. 4,—.
- Heft 32/33. Prof. Rudolf Richter: *Elektrische Maschinen mit Wicklungen aus Aluminium, Zink und Eisen.* Mit 51 Abbildungen. M. 6,—.
- Heft 34. Obering. Carl Beckmann: *Haus- und Geschäfts-Telephonanlagen.* Mit 78 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 35. Dr. Aloys Müller: *Theorie der Gezeitenkräfte.* Mit 17 Abb. M. 3,—.
- Heft 36. Prof. Dr. W. Kummer: *Die Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen.* Mit 7 Abbildungen. M. 2,50.
- Heft 37. Dr. Reinhold Rieke: *Die Arbeitsmethoden der Silikatchemie.* 2. Aufl. Mit 4 Abbildungen. M. 3,50.
- Heft 38. Prof. Dr. Albert Einstein: *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie. (Gemeinverständlich.)* 14. Auflage. (61. bis 65. Tausend.) Mit 4 Figuren. M. 3,—.
- Heft 39/40. Dr. Richard Grammel: *Die hydrodynamischen Grundlagen des Fluges.* Mit 83 Abbildungen. M. 5,—.
- Heft 41/42. Ingenieur Georg Duffing: *Erzwungene Schwingungen bei veränderlicher Eigenfrequenz und ihre technische Bedeutung.* Mit 23 Abb. M. 4,75.
- Heft 43. Dr. Robert Schwarz: *Feuerfeste und hochfeuerfeste Stoffe.* 2. vermehrte Auflage. Mit 10 Abbildungen. M. 2,—.
- Heft 44. Dr. Iwan Döry: *Einphasenbahnmotoren.* Mit 75 Abbildungen. M. 3,—.

Fortsetzung siehe 3. und 4. Umschlagseite.

# Die Atmosphäre als Kolloid

Von

**Dr. August Schmauss**

o. Professor für Meteorologie an der Universität München

und

**Dr. Albert Wigand**

o. Professor für Physik und Meteorologie an der Landwirtschaftlichen Hochschule  
Hohenheim - Stuttgart



Mit 10 Abbildungen

---

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

---

---

**Herausgeber dieses Heftes:  
Geh. Reg.-Rat. Prof. Dr.-Ing. e. h. Karl Scheel, Berlin**

---

---

ISBN 978-3-322-98029-8      ISBN 978-3-322-98656-6 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-322-98656-6

Ursprünglich erschienen bei Druck von Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig 1929

**Alle Rechte vorbehalten**

---

## Vorwort.

Es sind wohl ein paar Worte darüber am Platze, wie ein Meteorologe dazu kommt, sich mit Fragen der Kolloidforschung zu beschäftigen. Die Meteorologie hat sich zum Ziele gesetzt, die Witterungserscheinungen als dynamische und thermodynamische Vorgänge in der Atmosphäre zu erklären. Es muß aber jeder aufmerksame Beobachter zugeben, daß auf dem Gebiete der Wolken- und Niederschlagsbildung offenbar noch andere Faktoren mitsprechen; denn wir erleben es gar nicht selten, daß bei einer auf Regen hindeutenden Wetterlage der Regen ausbleibt, während ein andermal bei einer Wetterlage, welche nur geringe Niederschläge zu fordern scheint, intensive Niederschläge erfolgen.

In solchen Lagen wurde ich an die Erfahrung mit Kolloiden erinnert, deren magnetooptisches Verhalten ich in meiner physikalischen Lehrzeit zu untersuchen hatte. Die Vorstellungen von Stabilität und Instabilität kolloider Lösungen schienen mir auch auf die Atmosphäre übertragbar; auch sonst ergaben sich beim Studium des Lehrbuchs der Kolloidchemie von R. Zsigmondy manche Parallelen, auf welche in der Meteorologischen Zeitschrift eingegangen wurde <sup>1)</sup>).

Wie die Kolloidforschung selbst längere Zeit um ihre Anerkennung ringen mußte, wird es auch noch eine Weile dauern, bis die Meteorologie diesen Vorstellungskreis assimiliert haben wird, zumal wir der Atmosphäre kaum im Experiment beikommen können. Die Kolloidforschung hat aber allmählich bei einer ganzen Reihe von naturwissenschaftlichen Disziplinen Eingang gefunden; wir wären daher schon aus logischen Gründen verpflichtet, zu fragen, ob die Kolloidforschung nicht auch manche meteorologischen Vorgänge in anderem Lichte zu sehen gestattet.

Bei den Erörterungen über diese Fragen wurde mir öfter entgegengehalten, daß es sich zwar um beachtenswerte Analogien mancher Witterungsvorgänge mit kolloidalen Vorgängen handle, aber eben nur um Analogien. Es war daher vor allem nötig, die Mitarbeit eines erfahrenen Luftelektrikers zu erbitten: Ich danke Herrn W i g a n d auch an dieser Stelle für sein Interesse an diesen Fragen und die treue Mitarbeit an der vorliegenden Monographie.

A. Schmauss.

# Inhaltsangabe.

	Seite
Vorwort . . . . .	III
Die Atmosphäre als Kolloid (Aerosol) . . . . .	1
1. Ionen . . . . .	1
2. Staub . . . . .	8
3. Hydrometeore . . . . .	9
Das Schweben der Suspensionen . . . . .	11
Das Absetzen der Luftsuspensionen . . . . .	13
Die Grenzflächen der Suspensionen . . . . .	20
Die Stabilität der Hydrometeore . . . . .	21
Die Kondensation des Wasserdampfes . . . . .	23
Trübungs*aktor. . . . .	30
Elektrische Eigenschaften der Luftkörper . . . . .	32
Zahl der Kondensationskerne . . . . .	33
Art der Kondensationskerne . . . . .	35
Die Tröpfchengrößen in Wolken . . . . .	40
Die Schwankungen der Tröpfchengrößen. . . . .	43
Elektrische Ladungen der Tröpfchen und von Staub . . . . .	43
Die Niederschlagsbildung . . . . .	48
Praktische Verwertung kolloider Vorstellungen in der Meteorologie .	55
Schlußbetrachtung . . . . .	65
Literaturverzeichnis . . . . .	66
Namenregister . . . . .	70
Sachregister . . . . .	71

## Die Atmosphäre als Kolloid (Aerosol).

Die Atmosphäre ist nur selten ein molekulardisperses System. Nur nach lang anhaltenden Regen- oder Schneefällen kann sie den Anspruch darauf erheben. Für gewöhnlich ist sie ein kolloid-disperses System von dem Charakter: Gas als Lösungsmittel, feste oder flüssige Stoffe in feinsten Verteilung darin gelöst oder suspendiert. Die Teilchengröße wird auch in der Atmosphäre ihre Bedeutung haben wie bei den Hydrosolen. In Analogie mit diesem Ausdruck werden wir im folgenden von einem Aerosol sprechen.

Ein Erscheinungsgebiet haben Hydrosole und Aerosole ohne weiteres miteinander gemein: die optischen Eigenschaften trüber Medien, wie das Tyndallphänomen, Beugungskränze, Polarisation des diffusen Lichtes usw., die so bekannt sind, daß der einfache Hinweis genügt. Sie haben eine zusammenfassende Behandlung erfahren in der Meteorologischen Optik von P e r n t e r - E x n e r <sup>2)</sup>.

Die Unterschiede von Hydrosolen und Aerosolen liegen vornehmlich in zwei Umständen: den Gaseigenschaften des Mediums und in den wechselnden elektrischen Verhältnissen der Teilchen.

Es lassen sich drei Gruppen von Aerokolloiden unterscheiden:

### 1. Ionen.

In molekularer Lösung erscheinen die Luftionen, unmittelbar nachdem sie aus neutralen Luftmolekeln durch die in der Atmosphäre wirksamen Ionisatoren gebildet worden sind; solche Ionisatoren sind die Strahlungen der radioaktiven Substanzen des Erdbodens und der Luft sowie die durchdringende Höhenstrahlung. Die Ionen müssen anfangs monomolekular sein [B u s s e <sup>3)</sup>], da sie in ganz trockener Luft eine Beweglichkeit von 15 cm/sec im Felde 1 Volt/cm besitzen. Sie sind aber monomole-

kular nicht beständig, weil sie sich durch Anlagerung mehrerer neutraler Luft- und Wasserdampfmolekeln schon vom Moment ihrer Entstehung an vergrößern und in die gewöhnlichen „kleinen“ Ionen (auch „Klumpenionen“ oder „Clusterionen“ genannt) verwandeln.

Diese Kleinionen können nun schon nicht mehr als molekulardispers im Luftmedium angesehen werden. Sie stellen vielmehr die kleinsten vorkommenden Teilchen der kolloiddispersen Phase des atmosphärischen Aerosols dar. Im Gegensatz zu den elektrolytischen Ionen wässriger Lösungen, die ebenfalls angelagerte neutrale Wassermolekeln mitschleppen, muß man die kleinen Luftionen als Kolloidteilchen bezeichnen, nicht allein wegen ihrer Größe, sondern vor allem wegen der Tatsache, daß sie unter Umständen als Kerne der Kondensation des Wasserdampfes in Wirkung treten.

Die Größe der Kleinionen läßt sich aus dieser Kondensationswirkung und außerdem aus ihrer Beweglichkeit berechnen. Bei größter Trockenheit hat nach Schilling<sup>4)</sup> ihre Beweglichkeit im Felde 1 Volt/cm den Höchstwert von 2,45 cm/sec; dem entspricht eine Ionengröße vom fast dreifachen Molekeldurchmesser. Bei normalen Werten der Luftfeuchtigkeit liegt die Beweglichkeit des Kleinions zwischen 1 und 2 cm/sec, und zwar zeigt das negative Ion in der Regel etwas größere Beweglichkeit als das positive. Der Radius des Kleinions ist nach J. J. Thomson und Chauveaur = 3 bis  $4 \cdot 10^{-8}$  cm; Leonard<sup>5)</sup> gibt 1,1 bis  $0,7 \cdot 10^{-7}$  cm an, entsprechend dem 7- bis 5-fachen des O<sub>2</sub>- oder N<sub>2</sub>-Radius. Die Zahl der Molekeln in einem normalen Kleinion ist nach Leonard<sup>5)</sup> mehr als 9 von der Größe der O<sub>2</sub>-Molekeln, nach Loeb<sup>6)</sup> nicht mehr als 6.

Zwischen der Neubildung der Ionen durch den Ionisierungsprozeß und ihrem Verschwinden durch Wiedervereinigung besteht ein stationärer Gleichgewichtszustand, dem eine konstante Anzahl von Ionen entspricht. Die mittlere Lebensdauer der Kleinionen ist etwa 30 sec [Hess<sup>7)</sup>].

Die Konzentration des Kleinionen-Aerosols ist gering. Die Anzahl der Kleinionen eines Vorzeichens wird im Mittel gefunden zu 700/cm<sup>3</sup>. In der Regel ist die Zahl der positiven Kleinionen etwas größer als die der negativen. Bezogen auf die

Loschmidtsche Zahl der Luftmolekeln im Kubikzentimeter ist das Verhältnis der Ionenzahl  $n$  zur Molekelzahl  $N$  nur:  $n/N = \frac{700}{28 \cdot 10^{18}} = 2,5 \cdot 10^{-17}$ . Durch kräftige Ionisierung mit Röntgenstrahlen läßt sich nach früheren Versuchen von J. J. Thomson und Rutherford die Ionenzahl in Wasserstoff auf mehr als das  $10^4$ -fache steigern ( $n/N = 3 \cdot 10^{-13}$ ), so daß aber auch dann nur 1 Ion auf 3 Billionen neutrale Molekeln kommt.

Diese Vorstellungen von den Eigenschaften des Kleinionen-Aerosols sind noch zu ergänzen durch Angaben über die Ladung der Kleinionen und ihre Wirkung als Kerne der Kondensation des Wasserdampfes. Jedes Ion trägt in der Regel wahrscheinlich nur eine Elementarladung ( $e = 4,77 \cdot 10^{-10}$  elektrostatische Einheiten). Die Ladung ist die Ursache dafür, daß das als lufthaltiges Wassertröpfchen anzusehende Ion trotz seiner starken Oberflächenkrümmung seine Wassermolekeln nicht durch Verdampfung verliert, sondern ein stabiles Gebilde bleibt. Denn bei so kleinen Tröpfchen von der Größenordnung kleiner als  $10^{-7}$  cm spielt auch die geringe Ladung nur eines Elementarquantums eine wesentliche Rolle als dampfdruckerniedrigendes, hygroskopisches Agens. Um in feuchter Luft zu Nebeltröpfchen von sichtbarer Größe anzuwachsen, bedürfen die Kleinionen allerdings einer beträchtlichen Übersättigung, die nach übereinstimmenden Berechnungen (J. J. Thomson) und Versuchen (C. T. R. Wilson) mehrere 100 Proz. relative Feuchtigkeit beträgt<sup>8)</sup>. Auffallend ist dabei, daß nach Wilsons Versuchen die zur Wasserkondensation auf den negativen Ionen als Kernen erforderliche Übersättigung das 4,2-fache, für die positiven Ionen das 7,9-fache der Sättigung beträgt, was nicht mit einem geringfügigen Größenunterschied der negativen und positiven Ionen begründet werden kann, sondern seine Ursache in der verschiedenen Größe der elektrischen Kraft haben muß, die zwischen dem negativen oder positiven Ion einerseits und den Wasserdampfmolekeln andererseits wirkt. Während Wasserdampf sich leichter auf den negativen Ionen kondensiert, bevorzugen andere Dämpfe (organische) die positiven. Das weist darauf hin, daß die Dampfmolekel durch ihren Bau polare Eigenschaft besitzt, die sich bei der Kondensation auf Kleinionen als

Kernen äußert und vielleicht auch die Ursache dafür ist, daß die positiven und negativen Ionen unter denselben äußeren Bedingungen verschiedene Beweglichkeit besitzen.

Im normalen meteorologischen Geschehen, auch im Gewitter, kommen solch hohe Übersättigungen wahrscheinlich nicht vor, so daß die Kleinionen keine nennenswerte Rolle als Kerne für die Kondensation des atmosphärischen Wasserdampfes spielen dürften. Immerhin muß doch bei einigen interessanten Sonderfällen, auf die wir später zu sprechen kommen (S. 28), die Beteiligung dieser Kerne angenommen werden. —

Die Anlagerung (Adsorption) von Kleinionen oder auch Elektronen an kleine flüssige oder feste neutrale Teilchen (besonders Verbrennungsprodukte) in der Atmosphäre führt zur Bildung von schwer beweglichen „großen“ oder „schweren“ Ionen, die, nachdem sie im Laboratorium schon früher studiert worden waren, in der freien atmosphärischen Luft zuerst von L a n g e v i n<sup>9)</sup> aufgefunden und von ihm „ions gros“ benannt wurden. Solche G r o ß i o n e n können auch durch photochemisch-lichtelektrische Vorgänge aus den Molekeln der Luftgase [L e n a r d<sup>10)</sup>] sowie unmittelbar aus den großen Ionen von Verbrennungs- und Glühprozessen [W i g a n d<sup>11)</sup>] entstehen.

Für die G r ö ß e der Großionen findet man aus ihrer Beweglichkeit (0,0003 bis 0,0005 cm/sec im Felde 1 Volt/cm) und auch aus ihrer Kondensationskernwirkung die Größenordnung  $r = 10^{-6}$  cm [L e n a r d<sup>10)</sup>, C h a u v e a u<sup>12)</sup>, B o o t h<sup>13)</sup>], entsprechend einer Zusammenballung von Tausenden von Molekeln. Nach der optischen Wirkung der Großionen als Dunstteilchen muß ihr Durchmesser kleiner als  $2,5 \cdot 10^{-5}$  cm sein [A. W e g e n e r<sup>14)</sup>]; M a c L a u g h l i n<sup>15)</sup> findet aus der Lichtzerstreuung  $r = 5,5 \cdot 10^{-6}$  cm.

Entsprechend den Entstehungsbedingungen der Großionen ist ihr massenhaftes V o r k o m m e n beschränkt auf die Luft der Großstädte und Industriegebiete, während man in dunstreiner Land- und Seeluft wesentlich weniger Großionen findet. In der freien Atmosphäre oberhalb der Bodendunstsicht und im Hochgebirge kommen anscheinend sehr wenige oder gar keine Großionen vor, was indirekt aus der Zahl der Kondensationskerne (S. 33) zu schließen ist, da direkte Bestimmungen hier fehlen.

Die Anzahl der Großionen steht annähernd im umgekehrten Verhältnis zur Anzahl der gleichzeitig vorhandenen Kleinionen.

Über die Abhängigkeit der Anzahl der Großionen eines Vorzeichens von den örtlichen Bedingungen mag die Zusammenstellung auf S. 6 einen Begriff geben.

Während bei den Kleinionen die Zahl der positiven über die der negativen überwiegt, ist es bei den Großionen im Mittel deutlich umgekehrt.

Eine zwischen den Kleinionen und Großionen liegende Größenklasse stellen die von Pollock<sup>19)</sup> in atmosphärischer Luft entdeckten, auch von Gockel<sup>20)</sup> sowie von Nolan und de Sachy<sup>18)</sup> gefundenen Mittelionen (intermediären) dar. Ihre Beweglichkeit ist von der Größenordnung 0,01 bis 0,05 cm/sec; dem Werte 0,04 cm/sec entspricht ein Halbmesser von  $4 \cdot 10^{-7}$  cm. Die Anzahl der Mittelionen ist nach Pollock 200 bis 1000/cm<sup>3</sup>, nach Gockel 420. In ihrer Entstehung und Wirkung stehen sie den Großionen nahe.

Die Großionen in der Atmosphäre tragen fast ausschließlich nur eine Elementarladung; das ergibt sich aus den Versuchen von Nolan, Boylan und de Sachy<sup>18)</sup> und ist auch nach den Untersuchungen von Arendt und Kallmann<sup>23)</sup> über die maximale Aufladung von Nebelteilchen in ionisierter Luft zu erwarten, wenn man von diesen untersuchten Nebelteilchen auf die kleineren „Großionen“ extrapolieren darf: Im Gleichgewicht zwischen Diffusion (Wärmebewegung der Teilchen und Ionen) und abstoßender Wirkung der schon auf dem Teilchen befindlichen Ladung ist die Anzahl  $x$  der Elementarladungen gleichen Vorzeichens, die maximal von dem Teilchen aufgenommen werden können,  $x = r \cdot 10^6$ ; daraus folgt mit  $r = 10^{-6}$  cm als Größenordnung für die Zahl der Elementarladungen eines Großions  $x = 1$ . Die Kondensationswirkung dieser geringen Ladung ist aber in Anbetracht der Größe dieser Kerne verschwindend klein. Mineralische Staubteilchen, die durch Reibungsvorgänge hohe Ladungen erhalten haben, gehören nicht zu den Großionen, auch weil sie meist größer sind.

Soweit das Substrat der Großionen nicht eine chemisch-hygroscopische Substanz ist, die bereits unterhalb der Sättigung kondensierend wirkt oder wenigstens die zur Kondensation erforder-

Ort	Beobachter	Anzahl im Kubikzentimeter		Bemerkungen
		Großionen	Kleinionen	
Paris . . . . .	Langevin <sup>9)</sup>	10 000	200	Mittelwerte
Paris . . . . .	Mac Laughlin <sup>15)</sup>	+ 9 037 - 9 197	—	" (Marsfeld)
Paris . . . . .	"	+ 16 714 - 16 697	+ 86 - 70	" (Quartier du Val-de-Grâce)
Washington . . . . .	Swann <sup>16)</sup>	60 000	—	Höchstwert
Dublin . . . . .	Mac Clelland und Kennedy <sup>17)</sup>	58 000 16 000	—	"
Bei Dublin auf dem Lande .	Dieselben	1 000	80	Mittelwerte
Dublin . . . . .	Nolan, Boylan und de Sachy <sup>18)</sup>	3 000 60 000	—	Grenzwerte
Kleines Dorf an der irischen Küste . . . . .	Dieselben	< 1 000	—	Mittelwerte (außerdem 200 bis 1 000 Mittelionen)
Sydney . . . . .	Pollock <sup>19)</sup>	+ 1 914 - 2 228	40	Grenzwerte
Sydney . . . . .	"	650 32 900	—	Mittelwerte (Großionen einschl. 420 Mittelionen)
Freiburg (Schweiz) . . . . .	Gockel <sup>20)</sup>	+ 1 740 - 1 780	+ 690 - 630	Geschlossen aus der Kondensationskernzahl
Altschglerscher . . . . .	"	0	—	} Geschlossen aus der Kondensationskernzahl
Im Ballon über antizyklonaler Bodendunstgrenze . . . . .	Wigand <sup>21)</sup>	0	—	
Dunstfreie Landluft . . . . .	Ebert <sup>22)</sup>	gering	—	

derliche Übersättigung herabsetzt, bedürfen die Großionen einer Übersättigung von einigen Prozenten, um als Kerne der Kondensation zu sichtbaren Nebeltröpfchen zu wirken [Gockel<sup>20</sup>), Booth<sup>19</sup>]). Die Berechnung des Gleichgewichts ergibt für den Zusammenhang zwischen Übersättigung und Tröpfchenradius  $r$  folgende Werte bei 0° [A. Wegener<sup>24</sup>]):

$r$ . . . . .	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$ cm
Rel. Feuchte . . . . .	101	105	120 Proz.

Aber auch ohne sichtbar zu kondensieren, in ungesättigter Luft, ändern die Großionen und besonders die Mittelionen ihre Größe gesetzmäßig mit der Luftfeuchte, indem sich ihre Beweglichkeit mit zunehmender Luftfeuchte vermindert [Pollack<sup>19</sup>]).

Wenn man die Zahl der Großionen gleichzeitig mit der Zahl der Kondensationskerne mißt, so findet man annähernd parallelen Gang. Alle Großionen sind Kerne; aber nicht alle Kerne sind geladen; bei Gockels Untersuchungen waren nicht ganz die Hälfte, bei Nolans Bestimmungen 61 Proz. der Kerne geladen. Die lokalen Bedingungen sind hier, wie stets bei den Großionen, stark bestimmend. Bei der Nebel- und Wolkenbildung der unteren Schichten der Atmosphäre müssen die Großionen als Kerne regional eine wesentliche Rolle spielen.

Dem Einfluß der Schwere sind sämtliche Luftionen praktisch entzogen, da sie wegen ihrer geringen Größe nur sehr langsam fallen. Nach der Stokes-Kirchhoffschen Formel ergibt sich bei der unteren Grenze ihres Anwendungsbereichs für Teilchen mit  $r = 4 \cdot 10^{-5}$  cm, also noch wesentlich größere als die Großionen, eine Fallgeschwindigkeit von  $2 \cdot 10^{-3}$  cm/sec oder 7,2 cm/Stunde. Für die Groß- und Mittelionen mit  $r = 10^{-6}$  bis  $10^{-7}$  cm wäre die Fallgeschwindigkeit mit Berücksichtigung der Gleitung auf rund  $\frac{1}{100}$  hiervon zu schätzen, also auf  $2 \cdot 10^{-5}$  cm/sec oder weniger als 1 mm/Stunde. Die Kleinionen fallen dann noch wesentlich langsamer.

Dagegen ist die Bewegung der Luftionen im elektrostatischen Felde der Erde beträchtlich, besonders bei gewittergestörter hoher Feldstärke, was sich aus ihren Beweglichkeitswerten mit der folgenden Überschlagsrechnung ergibt: Während die Großionen im normalen, vertikal gerichteten luft-

elektrischen Felde von 1 Volt/cm allerdings nur  $5 \cdot 10^{-4}$  cm/sec zurücklegen, die negativen aufwärts, die positiven abwärts, erreichen sie bei der im Gewitter häufig vorkommenden vertikalen Feldstärke von 1 kVolt/cm die Geschwindigkeit 0,5 cm/sec, am Orte eines Blitzkopfes mit etwa 10 kVolt/cm Feldstärke für kurze Zeit sogar 5 cm/sec. Die Kleinionen legen schon im ungestörten Erdfelde 1 cm/sec zurück, und im Gewitterfelde überschreitet ihre Geschwindigkeit häufig den Wert von 10 m/sec, am Orte eines Blitzkopfes für sehr kurze Zeit sogar 100 m/sec.

## 2. Staub.

Die unter 1. genannten Bestandteile entstammen der Luft. Daneben gibt es Beimengungen fremder Herkunft. Der Ausgangsort dieser größeren Teilchen ist zum Teil außerhalb der Atmosphäre gelegen. Sie können aus dem Weltall eingewandert sein, z. B. Bestandteile der Sonne, welche sie infolge des Strahlungsdruckes oder ihres elektrischen Feldes verlassen haben, oder Bestandteile anderer Himmelskörper, welche man kurz mit dem Namen *k o s m i s c h e r S t a u b* zusammenfaßt. Ein besonderes Augenmerk hat man auf die der Erde nahe kommenden Kometen gerichtet, so anlässlich der letzten Fälligkeit des Halley'schen Kometen (1910). Derartige Zuwanderungen werden aber als Ausnahmeerscheinungen zu gelten haben, welche vielleicht auch Ausnahmezustände in der Atmosphäre im Gefolge haben können.

Eine regelmäßige Versorgung der Atmosphäre mit Fremdkörpern erfolgt von der Erdoberfläche aus. Es ist vor allem der Wind, welcher von der flüssigen wie von der festen Erdrinde Teilchen losreißt und höheren Schichten zuführt. Auch die Sonne ist an diesem Transport beteiligt, indem sie durch Erwärmung der Erdoberfläche und der ihr auflagernden Luftschichten diesen einen Auftrieb gibt. Man nennt den Vorgang die *A u s t a u s c h b e w e g u n g* der Atmosphäre [nach W. Schmidt<sup>25</sup>]; Wind und Austausch befördern auch die Verbrennungsprodukte und die sonstigen Verunreinigungen, welche die Industrie in die Atmosphäre entlädt, in größere Höhen.

Besondere, wenn auch nicht seltene Beiträge zur Verunreinigung der Luft sind die Exkreme der *V u l k a n e*, welche manch-

mal bis in sehr große Höhen verfrachtet werden. Das berühmteste Beispiel ist der im Jahre 1883 erfolgte Ausbruch des Krakatoa, der insofern Bedeutung erlangt hat, als die Auswurfsprodukte in großen Höhen mehrmals die Erde umkreisten und damit zum ersten Male Anhaltspunkte für den Bewegungszustand der Atmosphäre in diesen Höhen abgaben. Die folgenden größeren Ausbrüche: 1902 Mont-Pelee-Martinique und Santa Maria-Guatemala, 1912 Katmai auf Alaska, waren daher stets willkommene Studienobjekte. Die damit verbundenen Trübungen geben Anlaß zu den eigenartigen Verfärbungen der Atmosphäre, den blutroten Sonnenaufgängen und -untergängen, welche den kolloiden Charakter der Luftpülle besonders klar erkennen lassen.

Man kann all die Fremdkörper, welche auf den angegebenen Wegen in die Atmosphäre gelangen, nach L. Weber als das Luftplankton bezeichnen<sup>26)</sup>.

### 3. Hydrometeore.

Neben den Suspensionen, welche von außen hineingelangen, produziert die Atmosphäre selbst Beimengungen durch die Aggregatzustandsänderungen des in ihr in wechselndem Maße enthaltenen Wasserdampfes. Es sind das die Ausscheidungen von Wasserdampf, welche aus einer übersättigten Atmosphäre in flüssiger oder fester Form erfolgen. Man nennt sie mit einem Sammelnamen Hydrometeore und unterscheidet die in der Atmosphäre schwebenden von den eigentlichen Niederschlägen.

Die schwebenden Hydrometeore, deren Sinkbewegung gegenüber ihrer horizontalen Verfrachtung zu vernachlässigen ist, haben sehr verschiedene Teilchengrößen. Die feinste Ausscheidung, die sich eben noch dem Auge verrät, ist der Dunst, welcher die Fernsicht trübt, weniger dadurch, daß er das von fernen Objekten kommende Licht nicht hindurchläßt, als dadurch, daß er mit seinem durch diffuse Reflexion des Sonnenlichtes erzeugten Eigenlicht einen Schleier vor das Objekt legt. Der Durchmesser der Dunsttröpfchen läßt sich aus optischen Überlegungen schätzen, er liegt unter  $2,5 \cdot 10^{-5}$  cm [A. Wegener<sup>14)</sup>]. Wachsen die Dunsttröpfchen an, so sprechen wir von Nebel, dessen untere

Tröpfchengröße bei  $5 \cdot 10^{-4}$  cm, dessen obere rund bei  $1 \cdot 10^{-2}$  cm liegt. Bei sehr niedrigen Temperaturen erfolgt die Kondensation des Wasserdampfes in Form von Eisnadeln, es findet also eine richtige Sublimation statt, deren Produkte in ihrer Struktur von den über die flüssige Phase gegangenen Teilchen verschieden sind. Makroskopisch macht sich dieser feine Eisstaub („Diamantstaub“) durch Glitzern in der Sonne bemerkbar. Die Größe derartiger Eiskristalle fand Pernter auf optischem Wege von  $5 \cdot 10^{-4}$  bis  $2 \cdot 10^{-3}$  cm, in der unteren Grenze also gleich der von flüssigen Nebelpartikelchen, in der oberen Grenze unter der Grenze der flüssigen Modifikation bleibend.

Wir pflegen die eben geschilderten dispersen Systeme als Nebel zu bezeichnen, wenn wir uns darin befinden, als Wolken, wenn unser Standpunkt außerhalb liegt. Die Gewöhnung daran ist so mächtig, daß auch der Hochtourist, welcher in Wolken kommt, von Nebel zu sprechen pflegt. Tatsächlich unterscheiden sie sich nicht voneinander. Die Wolkenformen, deren Studium wegen des Bewegungszustandes, dem sie Ausdruck geben, für die Meteorologie von größter Bedeutung ist, sind für den Kolloidforscher weniger wichtig, so daß wir sie hier nicht zu erwähnen brauchen. Einzig die Feststellung wird interessieren, daß dieselbe Wolkenform um so lockerere Bilder aufweist, je höher sie liegt. Es hängt das zum Teil damit zusammen, daß der Gehalt an Wasserdampf in größeren Höhen wegen der niedrigeren Temperatur geringer ist, für dieselbe Temperaturabnahme also weniger Wasser überhaupt ausgeschieden wird; auch die Abnahme der Zahl der Kondensationskerne mit zunehmender Höhe, auf die wir noch zu sprechen kommen werden (S. 33), erklärt die losere Struktur der oberen Wolken.

Eine besondere Bezeichnung haben die Wolken bekommen, welche das Wasser in der festen Aggregatform enthalten. Es sind das die Cirren mit ihren speziellen Formen, welche die oberste Etage der Wolken darstellen (etwa 6 bis 10 km). Wenn man bedenkt, daß die Isotherme von  $0^\circ$  selten über 4 km hinaufgeht, ist damit ausgesprochen, daß die in 4 bis 6 km liegenden Wolken das Wasser im unterkühlten Zustande enthalten müssen. Man hat sich an diese alltägliche Erscheinung bereits so gewöhnt, daß man Cirren, wenn sie gelegentlich, wie bei Gewittern, unter

6 km vorkamen, als „falsche“ bezeichnet hat. Es wurde aber festgestellt, daß es sich um richtige Cirren handelt, die uns, wenn nicht in der freien Atmosphäre eine so weitgehende Unterkühlung des Wassers möglich wäre, viel geläufiger sein würden.

### **Das Schweben der Suspensionen.**

Man hat sich früher das Schweben der Wolken damit klarzumachen versucht, daß man annahm, die Wolkenelemente beständen aus Bläschen. Als Vorbild dienten wohl die Seifenblasen, welche man schweben und aufsteigen sieht. Das Aufsteigen derselben ist aber entweder durch Luftströmungen veranlaßt, oder ein Ergebnis einer eingeschlossenen wärmeren Luft. Sobald der Temperaturengleich mit der umgebenden Luft erfolgt ist, ist natürlich solch ein Bläschen ein Körper „schwerer als Luft“, der durch die Schwere aus ihr herausgeführt wird. Es wäre auch nicht einzusehen, warum die Kondensation des Wasserdampfes anderen Gesetzen gehorchen soll, als wir sie sonst bei der Bildung von Grenzflächen antreffen. Die Oberflächenspannung hat die Funktion einer elastischen Haut, welche sich um den mit Flüssigkeit erfüllten Raum herumlegt.

Wächst mit der Vergrößerung des Tropfengewichtes die Relativbewegung des Tropfens gegen die umgebende Luft, dann wird die Kugelform in eine freie Strömungsform übergehen, wie durch die aerodynamischen Untersuchungen bekannt ist; die Oberfläche wird „windschnittig“, aber innen bleibt die volle Raumauffüllung bestehen, bis bei Steigerung der Relativbewegung Zerplatzen oder Zerblasen eintritt, welches durch vorangehende Schwingungsbewegungen vorbereitet wurde<sup>27)</sup>.

Die Bläschentheorie ist auch mit den Diffusionsgesetzen unvereinbar: der Überdruck, unter welchem die in einem Bläschen eingeschlossene Luft steht, würde ihr Durchwandern durch die Wasserhaut rasch bewerkstelligen. Man hat übrigens an künstlichen Nebeln noch den experimentellen Nachweis erbracht, daß sie aus Tröpfchen bestehen<sup>28)</sup>. Die Beugungserscheinungen, dieses wichtige Hilfsmittel zur Bestimmung der Teilchengröße disperser Systeme, erlitten keinerlei Veränderung, wenn der Druck des Nebelraumes verändert würde, was, wenn es sich um Bläschen handelte, hätte der Fall sein müssen.

Die Erklärung des Schwebens der Luftsuspensionen bereitet ebensowenig wie das Schweben eines Kolloids in seinem Lösungsmittel Schwierigkeiten, wenn man die Teilchengröße bzw. ihre Fallgeschwindigkeit nach der Stokes-Kirchhoffschen Formel berechnet. W. Schmidt<sup>29)</sup> hat für Regentropfen die Verhältnisse klargestellt nach einer besonderen Formel bis herab zur Tropfengröße  $r = 0,02$  cm, für welche sich eine Sinkgeschwindigkeit von 1,8 m sec ergibt. Seine Formel geht für kleinere  $r$  in die Stokes-Kirchhoffsche über und ergibt wie diese für  $r = 5 \cdot 10^{-5}$  cm  $v = 3 \cdot 10^{-3}$  cm sec. Es genügen schon die stets vorhandenen „Austauschbewegungen“ der Luft, um die Teilchen „gelöst“ zu erhalten.

Für diese Frage, aber auch für alle Fragen etwaiger adsorptiver Wirkungen ist es gut, sich die Oberflächenverhältnisse klarzuhalten. Nehmen wir einen Kubikdezimeter Wasser und zerschneiden ihn in Elementarwürfel von der Kante  $a$ , dann ist die Oberfläche des dispersen Systems  $F$ :

$a$	$F$
$10^{-1}$ cm	6 m <sup>2</sup>
$10^{-3}$ „	600 „ (Größe der Wolkenelemente)
$10^{-5}$ „	60 000 „
$10^{-7}$ „	6 km <sup>2</sup> (Größe der Kleinionen)
$10^{-8}$ „	60 „

Aus einem Kubikdezimeter Wasser erhalten wir  $10^{12}$  Würfelchen von der Größenordnung der Wolkenelemente. Es sind also grandiose Vorgänge vorangegangen, wenn eine Hochwasserwelle zu Tale eilt! Es schwindet aber auch das Staunen, daß diese ungeheuren Wassermassen noch vor kurzem von der Luft „getragen“ waren.

Es scheint uns möglich, daß für die Frage des Schwebens der Luftsuspensionen auch die Überlegungen wertvoll werden, welche L. Vegard zur Erklärung des Vorhandenseins von festem Stickstoff in Höhen von 110 bis 120 km herangezogen hat<sup>30)</sup>.

Vegard nimmt an, daß, z. B. auf photoelektrischem Wege, eine Aufladung der Stickstoffkristalle stattfindet. Die elektrisch geladene Materie soll in dem elektrostatischen Felde der Erde einen elektrischen Auftrieb bekommen, wenn  $\frac{E}{m} \cdot F > g$ ,

einen Abtrieb, wenn es  $< g$  ist, wobei  $E$  die Ladung,  $m$  die Masse,  $F$  die elektrische Kraft,  $g$  die Schwerebeschleunigung bedeuten. Die Kriställchen würden also auch schweben können. Es können auch freie Elektronen herumfliegen, die von den Partikeln aufgenommen werden. Durch diesen Austausch von Ladung werden sich die Partikeln bald aufwärts bewegen, bald wieder sinken: Je größer die Partikeln sind, je geringer ist die Wahrscheinlichkeit für eine große Beschleunigung aufwärts, und je größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß sie auf eine gewisse Strecke eine Umladung erfahren.

Wie man auch zu den V e g a r d s c h e n Vorstellungen steht: das elektrische Feld der Atmosphäre ist neben Austausch, Reibung usw. zur Erklärung des Schwebens der Suspensionen kaum zu vernachlässigen, nachdem die elektrische Ladung der Luftsuspensionen, sowohl der Wolkenelemente wie fester Staubteilchen, feststeht.

### Das Absetzen der Luftsuspensionen.

Wenn unsere Atmosphäre keinerlei horizontale oder vertikale Bewegung hätte, würde ein n a t ü r l i c h e r S e l b s t r e i n i g u n g s p r o z e ß einsetzen. Die Suspensionen würden sich an der Erdoberfläche ablagern, die gröberen Teilchen unten, die feineren darüber. Derartige Selbstreinigungsprozesse erleben wir in jedem geschlossenen, stauberfüllten Raume; im Freien haben wir seltener Gelegenheit, solches Absetzen zu beobachten, ausgenommen bei Staub- und Sandstürmen, Vulkanausbrüchen und dergleichen, bei welchen es sich um verhältnismäßig grobe Suspensionen handelt.

„Nebel und Rauche setzen sich unter dem Einfluß der Schwere rascher ab als die Teilchen einer kolloiden Lösung, weil die Fallgeschwindigkeit größer ist. Aus Wasser bestehende Nebeltröpfchen erreichen ja schon bei einem Teilchenradius von  $400 \mu\mu$  eine Fallgeschwindigkeit von  $0,003 \text{ cm sec}$ , haben sich also unter den Bedingungen des Laboratoriums in kurzer Zeit abgesetzt; eine Strecke von etwa  $10 \text{ cm}$  wird in etwa  $40$  Minuten zurückgelegt. Zum Vergleich sei bemerkt, daß in Wasser suspendierte Teilchen gleicher Größe und bei gleichem Dichteunterschied mehr als drei Tage nötig haben, um die gleiche Strecke zurückzulegen <sup>31)</sup>.“

Über die natürliche „Alterung“ von Aerosolen hat V. K o h l s c h ü t t e r interessante Untersuchungen mitgeteilt <sup>32)</sup>.

Es lassen sich durch Verdampfung von Metallen im Lichtbogen völlig trockene Rauche herstellen, die zunächst nicht als Wolke sichtbar sind, sich aber durch den Tyndalleffekt verraten. Nach einer von Zsigmondy angegebenen Methode läßt sich die Zahl der Partikelchen im Kubikzentimeter messen, welche für jedes Metall mit der Zeit sich ganz gesetzmäßig ändert — verringert durch das Zusammentreten benachbarter Teilchen, worin eben der Alterungsprozeß besteht.

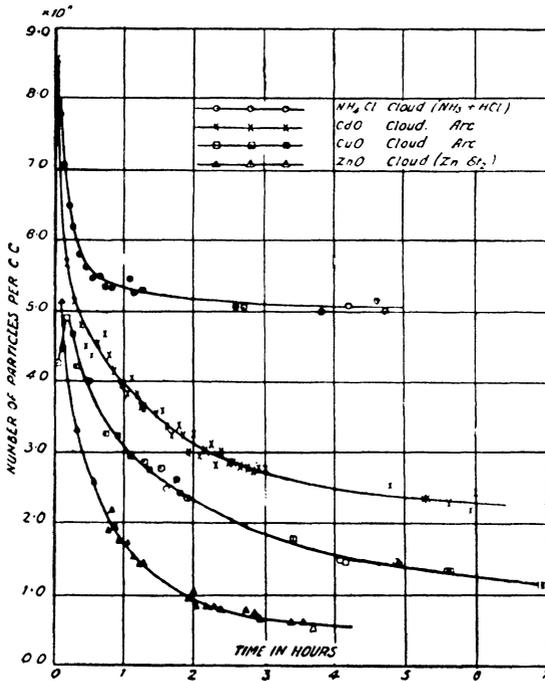


Abb. 1. Teilchenzahlkurven.

„Als gemeinsam erkennt man aus Abb. 1 (nach Whytlaw-Gray) einen sehr unbeständigen Anfangszustand, eine Periode relativ geringer und ein mittleres Stadium langsamer Veränderung.“

Hand in Hand mit dieser Veränderung der Teilchengröße geht eine Veränderung der Fallzeitkurve solcher Aerosole: anfänglich eine Beschleunigung des Sinkens, schließlich konstante Geschwindigkeit. Wenn es auch richtig ist, daß die dabei zutage

tretenden Geschwindigkeiten in der Atmosphäre wegen der Konvektion und Turbulenz nur in besonderen Fällen Bedeutung erlangen werden, ist es doch gut, sich über diese ohne thermodynamische Vorgänge erfolgende Vergrößerungsmöglichkeit suspendierter Teilchen klarzuwerden. Es ist ein natürliches Schicksal von Aerosolen, daß sich die Teilchenzahl verringert, die Teilchengröße verneehrt. Vielleicht begegnen wir einem solchen

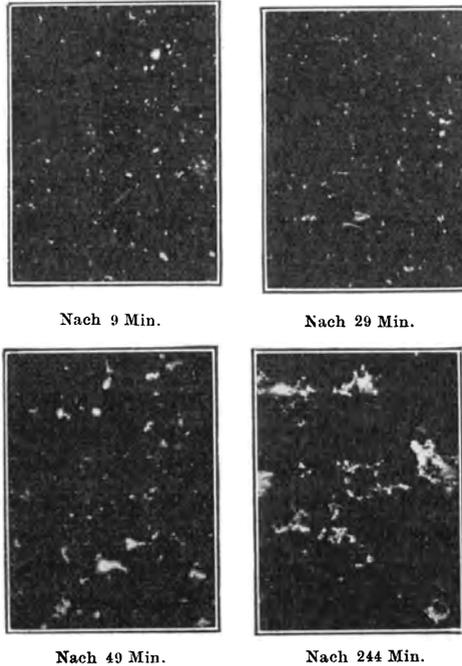


Abb. 2. Aggregation von Zinkoxydrauch.

Vorgang bei Nebelriesel aus ruhig liegendem Stratus. Bei den Hydrometeoren kommt außer der unmittelbaren Vereinigung durch Zusammenfließen von Nebeltröpfchen, durch Aggregation von Schneekristallen auch noch die isotherme Verdampfung hinzu, welche Material von kleineren Teilchen auf größere überführt; gewöhnlich denkt der Meteorologe nur an den letzteren Vorgang.

Daß aber auch eine Teilchenvergrößerung durch Häufung kleinerer Teilchen zustande kommen kann, belegt Kohl-schütter durch Abb. 2, welche die Aggregation in Zinkoxyd-

rauch nach Whytlaw-Gray zeigt. In der Vorlesung pflegt Schmauss sich des den Touristen wohlbekannten festen Brennstoffs „Meta“ zu bedienen, welcher, an einem heißen Metallstab zur Verdampfung gebracht, nach kurzer Zeit in der Form sich vergrößernder Flocken zu Boden sinkt und die Aggregation von Schneekristallen zu Schneeflocken gut zu demonstrieren erlaubt.

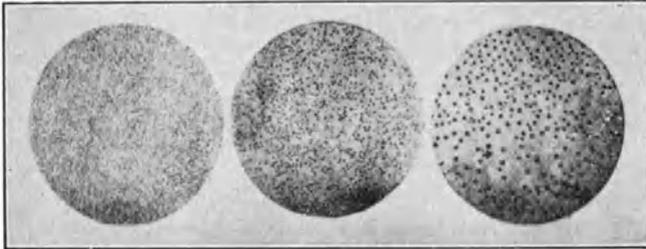
Kohlschütter hat nachgewiesen, daß bei faserbildenden Rauchen äußere elektrische Kräfte eine höchst auffällige Steigerung der Aggregation bilden können. Muß man nicht diese Tatsache zur Erklärung mancher Cirrusformen berücksichtigen? Gar oft sieht man am Morgen, nachdem zuerst wolkenloser Himmel bestanden hatte, ganz plötzlich Cirren in feinen Federformen am Himmel ausschießen. Es wäre sehr wohl denkbar, daß schon vorher Eisnadeln in höchster Zerteilung, dem Auge also unsichtbar, bestanden hatten, welche auf eine von der Sonne ausgehende Wirkung hin zu sichtbaren Aggregaten zusammentreten, die nach dem Fortfall der Sonnenwirkung wieder in kleinere Bestandteile zerfallen; das Auftreten und Verschwinden derartiger Cirrusformen braucht also nicht unbedingt auf eine dort stattfindende Kondensation oder Verdampfung hinzuweisen.

Überaus wichtig erscheint uns auch der Nachweis Kohlschütters, daß mit abnehmender Dichte der Gase der Zerteilungsgrad abnimmt, wie es Abb. 3 so hübsch erkennen läßt. Man muß unseres Erachtens dieses Ergebnis berücksichtigen, wenn z. B. eine Wolke hochgerissen wird, weil die damit verbundene Abnahme des Druckes allein schon auf eine Verringerung des Dispersitätsgrades hinarbeitet.

In der Atmosphäre haben wir noch auf die Turbulenz Rücksicht zu nehmen. Es ist von W. Schmidt gezeigt worden<sup>33)</sup>, daß ein Luftwirbel mit horizontaler Achse, dessen Umfangsgeschwindigkeit größer als die Sinkgeschwindigkeit der Wolkenpartikel ist, einen Teil der in ihm anfangs enthaltenen Teilchen dauernd in sich behält, und zwar um so mehr, je mehr sich das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten von 1 entfernt. Solche Wirbel im kleinen sind die „Turbulenzkörper der Atmosphäre“<sup>34)</sup>, auf deren Bedeutung für das Sinkproblem suspendierter Stoffe A. Wegener<sup>35)</sup> hingewiesen hat. Was beim molekulardispersen System die Diffusion, beim Kolloid die Brownsche Bewegung

ist, ist für das grobdisperse System der Atmosphäre die Turbulenz. „Das Fallen der Wolkenteilchen muß offenbar schon bei geringen Turbulenzgraden ganz verhindert werden, und die alte Frage nach der Ursache des Schwebens der Wolken dürfte auf diese Weise durch die Turbulenz ihre vollständige Beantwortung finden.“

Beim Absetzen der Hydrometeore ist noch zu berücksichtigen, daß ihr Aggregatzustand von der Temperatur abhängig ist, und daß sie wegen der Verdampfung und Kondensation unterwegs

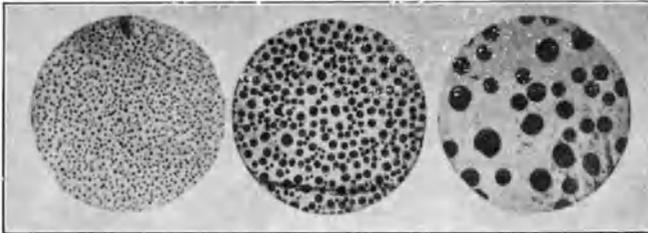


Stickstoff.

Druck: 700 mm

300 mm

50 mm



Wasserstoff.

Abb. 3.

noch eine Massenänderung erfahren können. Dementsprechend würden die Eiskristalle der Cirren nur über den Gebieten der Erde in fester Form anlangen, über welchen die Temperatur der durchfallenen Atmosphäre es erlaubt. Beim Eintreten in eisübersättigte Luft können sie anwachsen, beim Eintritt in trockenere verdampfen. Das gleiche gilt von den Tröpfchen des Nebels.

Die Regentropfengröße, welche diejenige Tropfengröße definiert, bei welcher die Fallgeschwindigkeit ausreicht, um sichtbar zu werden, ist also vom Turbulenzgrade abhängig; sie muß um ein Kleines größer sein, als der tragenden Kraft der Turbulenz entspricht.

Bedenkt man, daß das Turbulenzproblem im strengen Sinne erst für Bewegungen von Flüssigkeiten in Rohren von bekanntem Ausmaße gelöst ist<sup>36)</sup>, dann begreift man, daß die Meteorologie einstweilen noch nicht daran denken kann, alle Fälle der Witterungsgestaltung vorherzusehen. Man darf annehmen, daß der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung und umgekehrt auch in der Atmosphäre *s p r u n g h a f t* vor sich geht; darum muß das *W e t t e r*, soweit es Bewölkung und Niederschlag anbelangt, in der Nähe solcher kritischer Punkte *l a b i l e n* Charakter haben.

Der verschiedene Turbulenzgrad kann vielleicht auch ein Phänomen aufhellen, über dessen Ursache man noch wenig weiß: Die *A n o r d n u n g d e r W o l k e n n a c h E t a g e n*. Wenn man die Häufigkeit des Vorkommens bestimmter Wolkenformen in den verschiedenen Höhen berechnet, zeigt sich eine Bevorzugung bestimmter Höhen. Von der Erdoberfläche bis zur Stratosphären-grenze (in unseren Breiten in etwa 10 km Höhe) finden sich mehrere Kondensationszonen, welche durch wolkenfreie Räume getrennt sind. Der Grund der etagenweisen Anordnung der Ausfällungszonen (Wolken) kann in der Struktur der Strömung liegen, in dem Wechsel von laminarer und turbulenter Bewegung, der sich beim Überschieben verschiedener Strömungen der Atmosphäre ergibt. Wie das Erdinnere, hat auch die Atmosphäre einen schalenförmigen Aufbau, nur daß die Schalen fortgesetzt sich verschieben, wodurch der Wechsel der Witterung gegeben ist.

*A. W e g e n e r*<sup>35)</sup> macht darauf aufmerksam, daß sich auch die von *A. W i g a n d*<sup>37)</sup> erhaltenen Beobachtungen über die Verteilung der Kerne in Inversionsschichten einfach erklären, wenn man auch für diese als Ursache des Schwebens die Turbulenz betrachtet. „In Inversionsschichten und Isothermien ist die Turbulenz stark verringert; hier müssen die Teilchen, die in turbulenten Schichten suspendiert bleiben, zu Boden sinken, genau wie der Lehm der turbulenten Flüsse, wenn deren Turbulenz beim Eintritt in einen See oder ins Meer erlischt.“ Eine turbulenzschwache Schicht wird also kernarm, während sich in ihrem unteren Teile eine Anreicherung von Kernen ergibt, die dem Auge als Dunstschicht sichtbar werden kann.

Solche Häufungsschichten von Kernen (Dunstteilchen) müssen sich gegen Ein- und Ausstrahlung anders verhalten als die

zwischenliegende Atmosphäre: Die Ausbildung von Inversionen, welche man stets an solchen Schichten findet, kann also die Folge solcher Dunstanhäufungen sein; jedenfalls muß man diese Erklärung ebenso würdigen wie die, daß die Inversionen die Ursache von Dunstanhäufungen werden. Es ist gar nicht immer leicht, Ursache und Wirkung bei den Witterungsvorgängen auseinanderzuhalten<sup>38)</sup>.

Nach den Untersuchungen von C. G. T. Morison<sup>39)</sup> scheint auch dem Lichte eine große Rolle bei der Schichtenbildung zuzukommen. Derselbe hat festgestellt, daß feine Kaolin- und Ton-suspensionen im Dunkeln normal absetzen, im Lichte aber deutliche Schichtungen und Unstetigkeiten zeigen.

An der Bedeutung des Lichtes für die Abscheidung kann der Meteorologe nicht vorübergehen. Wir verweisen auf die Arbeit von O. Baudisch und L. Wels<sup>40)</sup>, welche an radioaktiven oder eisenhaltigen Wässern eigenartige Reaktionen festgestellt haben. Franzensbader Wasser z. B. opalisierte nach wenigen Minuten im Lichte, was die beginnende Ausscheidung von vorher gelösten Eisensalzen anzeigt. Ampullen anderer Wässer, die sich im Lichte schon nach Bruchteilen einer Stunde trübten, zeigten, dunkel aufbewahrt, keine Veränderung.

Daß das Tageslicht kondensationsfördernd wirkt, kann man an einer geschlossenen, mit einer seichten Wasserschicht gefüllten Flasche feststellen. Man wird innen einen Tauniederschlag beobachten an der dem Lichte zugewandten Seite; dreht man die Flasche um 180°, dann löst sich der Niederschlag auf der Schattenseite auf, um auf der neuen Lichtseite zu erscheinen. Auch bei Quecksilberbarometern kann man Ähnliches beobachten.

Bei Wassertröpfchen hat man auch zu beachten, daß ein Wachsen bzw. Schrumpfen derselben möglich ist, wenn verschiedene Größen gleichzeitig vorhanden sind. Der Dampfdruck über gekrümmten Oberflächen ist eine Funktion des Radius (vgl. S. 7). Allerdings tritt die Dampfdruckänderung erst bei starker Krümmung merklich zutage. Hat ein Tropfen einen Radius von  $10^{-4}$  cm, so ist sein Dampfdruck nur um etwa 1 Prom. größer als der über einer ebenen Oberfläche herrschende. Erst im kolloiddispersen Gebiet wird die Drucksteigerung erheblich. Bei einem Tropfenradius von  $10^{-6}$  cm wird der Dampfdruck um 10 Proz. größer, bei

einem solchen von  $10^{-7}$  cm um 100 Proz. Die Stabilität eines Dunstes wird also gestört, wenn in ihn größere Tröpfchen (Wolkenelemente) hineingelangen. *Freundlich* erinnert daran, daß, wenn man in einem Gefäß einen Flüssigkeitsbeschlag erzeugt, es dann luftleer macht und zuschmilzt, die Tröpfchen sich nach längerer Zeit zu einem großen Tropfen vereinigen, hat aber Bedenken, ob derartige Versuche so temperaturkonstant ausgeführt werden konnten, daß nicht auch die Möglichkeit einer Destillation von einer wärmeren zu einer kälteren Stelle vorlag<sup>41)</sup>. Wenn nicht alle Tröpfchen genau gleich groß waren, was kaum anzunehmen ist, genügt schon ihre verschiedene Größe, um die größeren auf Kosten der kleineren durch isotherme Destillation wachsen zu lassen und eine *Vereinheitlichung* der Teilchengrößen vorzubereiten.

Gleiche Tropfengröße ist in Nebel und Wolken die Regel; es geht dies daraus hervor, daß in Nebel und Wolken normalerweise Beugungskränze um eine Lichtquelle oder um den Schatten des Beobachters vorhanden sind, die sich nur in homogenen Nebeln bilden können.

### **Die Grenzflächen der Suspensionen.**

Bei den meteorologischen Überlegungen wurde bisher angenommen, daß ein Wolkenelement ein bis an den Rand homogener Tropfen ist, sei es von reinem Wasser oder einer homogenen Lösung von Salzen, und danach die Verdunstung oder Kondensation gegenüber der Umgebung gewertet. Gerade im Grenzbereiche Tropfen—Luft trifft das aber nicht zu. Es weisen manche Erscheinungen darauf hin, daß ein Unterschied zwischen einer Wolke in *statu nascendi* und einem älteren Gebilde besteht. Eine Wolke in *statu nascendi* macht einen sehr empfindlichen Eindruck, man sieht oft rasche Rückbildungen vor sich gehen, die man an „alten“ Wolken nicht mehr feststellt.

Zweierlei Veränderungen, der Kolloidphysik längst geläufig, sind zu beachten: Das eine ist die *Lösung von Luft in Wasser*.

Die zweite Veränderung, an welche zu denken ist, ist die *Veränderung der Konzentration der etwa ge-*

lösten Salze in der Oberflächenschicht. Die Konzentration in der Oberflächenschicht kann größer (positive Adsorption) oder kleiner sein (negative Adsorption), als wir sie unseren Dampfspannungsberechnungen zugrunde legen. Es gilt der Satz <sup>42)</sup>: Eingelöster Stoff wird positiv adsorbiert, wenn er die Oberflächenspannung erniedrigt, negativ, wenn er sie erhöht.

Die elektrische Doppelschicht eines Wassertröpfchens in Luft liegt nach L e n a r d <sup>43)</sup> mit beiden Belegungen im Tröpfchen. Bei reinem Wasser sitzt die negative Ladung an der Oberfläche und reicht bis zur Tiefe von  $8 \cdot 10^{-7}$  cm; weiter innen sitzt die positive Ladung und reicht bis  $13 \cdot 10^{-7}$  cm hinein. Die Dicke der Doppelschicht beträgt demnach etwa 40 Moleküldurchmesser. Die Kapillarschicht an der Oberfläche ist dagegen wesentlich dünner.

Minimale Säurezusätze kehren den Ladungssinn um, so daß der L e n a r d effekt ein sehr empfindlicher Vorgang ist. Wir können vorläufig nur ahnen, welche Bedeutung den Adsorptionsvorgängen in bezug auf die Stabilität der Wolkenelemente zukommt, besonders wenn gleichzeitig Tropfen verschiedener Konzentration desselben Salzes oder gar verschiedener Salze sich nebeneinander finden.

Dagegen kann die zur Herstellung des Adsorptionsgleichgewichtes erforderliche Zeit für meteorologische Vorgänge wohl außer Betracht bleiben, da der Übergang der dynamischen in die statische Oberflächenspannung sich in Bruchteilen einer Sekunde vollzieht <sup>43)</sup>, was wohl für Hydrossole, nicht aber für Aerosole von Bedeutung ist.

### **Die Stabilität der Hydrometeore.**

Neben dem Schweben der Wolkenelemente ist ihre Beständigkeit besonders merkwürdig. Eine Wolke befindet sich, wie die aerologischen Messungen gezeigt haben, fast immer in einer ungesättigten Atmosphäre. Wenn auch das Innere der Wolke gegen Verdampfung geschützt ist, so gilt das gewiß nicht für die äußere Begrenzung. Und doch ist kein langsames Abtrocknen einer Wolke bekannt. Wenn man eine Auflösung einer Wolke beobachtet, ist sie meist an absteigende oder turbulente Bewegung

der Luft geknüpft, in welcher sie schwebt, worauf vor allem die Geschwindigkeit solcher Vorgänge hinweist.

Einfach liegen die Verhältnisse bei **Großstadtnebeln**. Die Wassertröpfchen, die aus unreiner Großstadtluft organische Gase und flüssige sowie feste Teilchen (Öle, Ruß) auflösen oder adsorbieren, werden dadurch beständiger, ihre Verdampfung wird herabgesetzt, so daß sie in ungesättigter Luft stabil sein können. Aus der adsorbierten Schicht geht die Verdampfung schwerer vor sich, daher haben die Großstadtnebel so große Beständigkeit.

Die Ursache für die Beständigkeit der **Wolken** liegt zum Teil in den gelösten Salzen, welche die Dampfspannung herabsetzen und die Existenz eines Tropfens auch in für eine ebene Wasseroberfläche ungesättigter Atmosphäre erlauben, teils in der eigenartigen, von **N. Gudris** und **L. Kulikowa** festgestellten beschränkten Verdampfung auch solcher Tropfen, welche reines Wasser enthalten <sup>44</sup>).

Dieselben haben beobachtet, daß die **Verdampfungs-  
geschwindigkeit eines Tropfens**, welche theoretisch — wegen der Verkleinerung — zunehmen sollte, mit der Zeit **abnimmt**, so daß nicht bloß der Unterschied der Dampfspannung über konvexer und ebener Oberfläche maßgebend ist. Tropfen von  $1,4 \cdot 10^{-4}$  bis  $5 \cdot 10^{-5}$  cm Durchmesser verdampften nur in den ersten 15 bis 20 Minuten rasch, dann aber immer langsamer. Die Abkühlung der Tropfen durch Verdunstung kann, wie des näheren nachgewiesen wurde, hierfür nicht verantwortlich gemacht werden. **Gudris** und **Kulikowa** stellen die Hypothese zur Erörterung, daß der **neugebildete Tropfen** etwas vom **umgebenden Gase** absorbiert und einen **Sättigungszustand** erreicht, welcher die Verdampfung herabsetzt. Die Untersuchung hat weiter ergeben, daß die Verdampfung in einer Wasserstoffatmosphäre gesteigert, in einer Kohlensäureatmosphäre entsprechend verlangsamt wurde, was damit übereinstimmt, daß Kohlensäure vom Wasser gut, Wasserstoff schlecht absorbiert wird.

**Gudris** und **Kulikowa** haben an Tropfen von **Lösungen** festgestellt, daß größere Tropfen wachsen, während kleinere gleichzeitig verdampfen, d. h. die Erniedrigung der Dampfspannung ist bei großen Tropfen groß genug, eine negative

Differenz der Dampfspannung über konvexer und ebener Oberfläche zu erzeugen. Es gibt demnach Gleichgewichtstropfen, eine Tropfengröße, bei welcher weder Verdunstung noch Kondensation stattfindet. Elektrische Ladung der Tropfen war dagegen ohne Einfluß.

Die Versuche der beiden Russen machen es wahrscheinlich, daß bestimmte Tropfengrößen stabil, andere unstabil sind. Daraus ergibt sich eine andere Möglichkeit, die Tatsache der Wolkeneta gen zu erklären. Zunächst sollte die ganze Troposphäre mit Tröpfchen erfüllt sein, welche, wegen des Sedimentationsgleichgewichtes, nach oben abnehmende Größe haben. Die Größen, welche stabil sind, treten uns als Wolken entgegen, während die Höhen, in welche die instabilen Tropfengrößen zu liegen kommen, sich als wolkenfreie Räume ausbilden.

### **Die Kondensation des Wasserdampfes.**

Die Kondensation des Wasserdampfes aus der Luft wäre ein sehr einfaches Problem, wenn sie mit dem Erreichen des Taupunktes auch eintreten würde.

Schon die Taubildung an festen Körpern ist aber kein einfaches Phänomen; daß neben den thermischen Verhältnissen auch adsorptive Eigenschaften mitsprechen, weiß man z. B. aus den Hauchbildern auf Glas, welche eine vorangegangene Behandlung derselben, z. B. eine unsichtbare Zeichnung, mit einem Wischer oder gar einem Finger zum Vorschein bringen. Noch verwickelter sind die Verhältnisse für die in Luft erfolgenden Kondensationsvorgänge, welche Kondensationskerne brauchen.

Die Methode zur exakten Erfassung dieser Vorgänge ist bekannt. C. T. R. Wilson studierte durch Expansion eines mit Wasserdampf gesättigten Luftvolumens bekannter Größe auf ein gleichfalls meßbares Volumen die einzelnen Phasen des Kondensationsvorganges. Bei keimfreier Luft ist eine Expansion im Verhältnis der Volumina 1,25 : 1, entsprechend einer etwa vierfachen Übersättigung, nötig, um Verdichtung zu erhalten<sup>45)</sup>. „Es entstehen dann verhältnismäßig wenige, aber größere Tropfen — C. T. R. Wilson schätzt etwa 100 auf den Kubikzentimeter —, die sich wie Regenschauer in einigen Sekunden senken; die Zahl

der Kerne ist also klein. Dies Verhalten bleibt gleich, wenn man nach dem Absetzen der Tropfen den Versuch wiederholt. Man hat es also mit Kernen zu tun, wie sie sich wohl der wahren Kernbildungsgeschwindigkeit entsprechend bilden. Bis zu einem Volumenverhältnis von 1,37 : 1, einer Übersättigung von etwa 8, ändert sich an der Erscheinung nichts merklich. Sind die Übersättigungen noch größer, so ändert sich das Bild auffallend und rasch. Es bildet sich ein starker Nebel kleinerer Tropfen, der sich im Laufe einer Minute oder in noch längerer Zeit absetzt. Er zeigt, namentlich in der Durchsicht betrachtet, ausgesprochene Farben, die sich bei steigender Übersättigung von Tiefgrün über Rötlich nach Grünlichweiß verändern, wie die nachfolgende Tabelle erkennen läßt:

Farbe der Nebel bei größerer Übersättigung.

Volumenverhältnis $\frac{v_1}{v_2}$	Farbe
1,408	Leuchtendgrün
1,412	"
1,414	"
1,419	Blaugrün
1,422	Purpur
1,424	Leuchtendrot
1,426	Rot
1,429	"
1,434	Rötlich
1,437	Rötlichweiß
1,453	Grünlichweiß
1,458	"

„Oberhalb eines Volumenverhältnisses von 1,37 wird also die Zahl der Kerne sehr viel größer und nimmt, soweit die Versuche reichen, immer noch mehr zu. Bei dem Volumenverhältnis der „empfindlichen Farben“ von 1,42 berechnet Wilson rund 10<sup>8</sup> Tröpfchen auf 1 ccm“<sup>46)</sup>.

Die zu solchen Übersättigungen nötigen Expansionen finden in der Atmosphäre, wenn überhaupt, nur bei den gewaltigsten, auf kleine Räume beschränkten Vertikalbewegungen statt. Die normalen Wolkenbildungen liegen, wie alle aerologischen Messungen zeigen und auch aus der Farbskala folgt, weit darunter.

Auf dem von W i l s o n gefundenen Unterschied der Kondensationsfähigkeit negativer und positiver Ionen wurde die Gewittertheorie von G e r d i e n <sup>47)</sup> aufgebaut; sie steht und fällt mit dem mehr als hypothetischen Vorkommen solcher Übersättigungen in der freien Atmosphäre, hat aber auch darum wenig Anklang gefunden, weil die vorhandene Ionenmenge nachweislich nicht zur Bildung des Gewitterfeldes ausreichen würde.

Viel wirksamer als diese „natürlichen“ Keime ist das Luftplankton. Zwar nicht, wie man früher glaubte, der „Staub“ schlechthin; A. W i g a n d hat nachgewiesen, daß der klassische Apparat von A i t k e n kein Staub-, sondern ein Kernzähler ist; es sind vornehmlich chemisch - hygroskopisch wirksame Stoffe, welche die Kondensation erleichtern <sup>48)</sup>.

Eine Bestätigung stellen auch die Messungen von H. K o p p e dar, die er auf dem Ölberg bei Jerusalem 1916—1917 ausgeführt hat. Bei Ostwind, der dort als trockener Scirocco auftritt und aus der Wüste stark durch Staub getriebene Luftmassen mitbringt, ist die Kernzahl im Kubikzentimeter nahezu 0. Bei Westwind dagegen, der als Monsun mit hoher Feuchtigkeit vom M e e r e und der S t a d t her weht, wurden Kernzahlen von etwa 2000 im Kubikzentimeter festgestellt <sup>49)</sup>. Ferner wurde auch von C. B r a a k bestätigt, daß gewöhnliche Staubwolken arm an Kernen sind <sup>50)</sup>.

„Es müssen noch s p e z i f i s c h e Einflüsse und die N a t u r der Elektrizitätsträger berücksichtigt werden, vielleicht um so mehr, je eingehender man die unter verschiedenen Bedingungen entstehenden Träger untersucht. So ist unter anderem durch die Arbeiten von L e n a r d und R a m s a u e r \*) bekannt, daß ultraviolette Licht unter bestimmten Umständen in Gasen Kerne erzeugt, die wie Staub oder chemische Kerne schon bei kleinen Übersättigungen wirken. Voraussetzung ist die Anwesenheit von gewissen Dampfspuren — die sich durch flüssige Luft entfernen lassen — wie Ammoniak und andere. Wahrscheinlich entstehen unter dem Einflusse des ultravioletten Lichtes Kerne, die aus chemisch wirkenden Stoffen, wie Wasserstoffsperoxyd, Stickstoff u. dgl., bestehen . . . Große Kerne entstehen nach O w e n und H u g h e s , wenn man ein Gas unter eine gewisse konstante Tem-

---

\*) sowie R i c h a r z und seinen Schülern.

peratur abkühlt. Beim Erwärmen auf die Versuchstemperatur vermag ein derart vorgekühltes Gas auch bei kleinen Übersättigungen die Verdichtung auszulösen<sup>51)</sup>. Von der stratosphärischen Ozonschicht wird es abhängen, wieweit ultraviolettes Licht von der zur Kernbildung nötigen Wellenlänge in der Troposphäre zur Verfügung steht.

Besonders interessant wird das Kondensationsproblem bei Temperaturen unter 0°, weil die Dampfspannung über Eis kleiner ist als die über Wasser. Luft, welche für Wasser noch ungesättigt

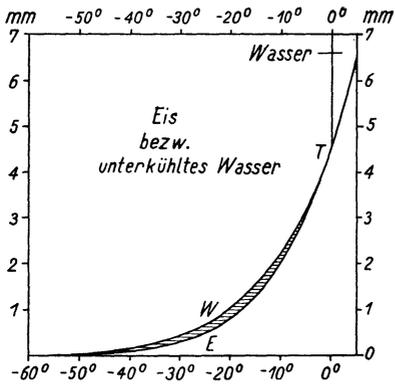


Abb. 4.

ist, kann für Eis übersättigt sein, ein Zustand, den A. Wegener als „Frostübersättigung“ bezeichnet. Folgen wir seinen diesbezüglichen Ausführungen<sup>52)</sup>:

Im Roozeboomschen Zustandsdiagramm (Abb. 4) liegt der Bereich der Frostübersättigung in dem schraffierten Raume zwischen der Gleichgewichtskurve der beiden Phasen Dampf und unter-

gekühltes Wasser *TW* und der davon abweichenden Gleichgewichtskurve der Phasen Dampf und Eis *TE*. Diese beiden Kurven vereinigen sich einerseits im Tripelpunkt *T* des Wassers, andererseits im absoluten Nullpunkt der Temperatur und des Druckes.

Wir sind gewohnt, die relative Feuchtigkeit auch bei negativen Temperaturen auf *W* und nicht auf *E* zu beziehen. Der Grund liegt darin, daß die zuerst beginnende Eiskondensation in der Atmosphäre einen mehr sporadischen Charakter trägt, oft auch ganz fehlt, wenn die Kerne fehlen, während die Kondensation in unterkühlten Tröpfchen eine Massenkondensation darstellt, welche das Auftreten wesentlicher Übersättigungen nicht mehr gestattet.

Aus dem Abstände der *W*- und *E*-Kurve folgt, daß Frostsättigung bei folgenden relativen Feuchtigkeiten herrscht:

Temperatur . . . .	— 10	— 20	— 30	— 40	— 50	— 60°
Rel. Feuchtigkeit . .	91	82	74	67	61	55 Proz.

A. Wegener hat auf seiner Grönlandexpedition die Frostübersättigung besonders studiert. Sie ist dort der normale Zustand, sobald schönes Wetter und tiefe Temperatur herrscht. Die Luft war vollkommen klar, die Frostübersättigung zeigte sich nur in der Bildung von Reifkristallen auf der Schneeoberfläche und allen festen Gegenständen, die stets eintrat, sobald die Frostübersättigung überschritten wurde.

Zur Auslösung der Frostübersättigung in der Luft war Zuführung von Kernen notwendig. Wegener führt hierfür zwei Beispiele an: „Bei Temperaturen unter  $-40^{\circ}$  und Frostübersättigung wurde bei der Station Borg regelmäßig ein Nebelstreifen beobachtet, der, am Hause beginnend, sich in der Windrichtung etwa bis zu dem 3 km entfernten Rand des Inlandeises verfolgen ließ. Die Luftströmung war bei diesen tiefen Temperaturen stets so wenig turbulent, daß die Umgrenzung der Nebelfahne, wenngleich sich erweiternd, doch deutlich bis in solche Entfernungen erkennbar war. Die fehlenden Sublimationskerne lieferte wohl hauptsächlich der Schornstein unseres Hauses.

„In Grönland wurden noch weitere interessante Beobachtungen über die Auslösung der Frostübersättigung gemacht. An einem solchen Tage, als das Haarhygrometer bei sehr tiefer Temperatur Frostübersättigung zeigte und die Nebelfahne im Lee des Hauses sichtbar war, kamen unsere Pferde etwas erhitzt von einem Ausflug über das Eis zurück. Sie boten einen seltsamen Anblick, denn ihre Atemwolken lösten sich nicht wieder auf, sondern wuchsen zu einer sich ausdehnenden und immer dichter werdenden Wolke zusammen, die schließlich wohl etwa 50 m Höhe erreichte. Es sah aus, als zöge eine Karawane, in eine riesige Staubwolke gehüllt, durch die Wüste.

„Wenn man nicht annehmen will, daß in diesen Fällen die Lungen der Pferde die fehlenden Sublimationskerne unmittelbar geliefert haben, so müssen sie das jedenfalls indirekt getan haben, nämlich durch Bildung von Tröpfchen, die hinreichend groß wurden, um bei der Abkühlung zu erstarren und nunmehr als Sublimationskerne zu wirken.

„Diese letzte Auffassung scheint noch bestätigt zu werden durch die folgende, noch seltsamere Beobachtung am mensch-

lichen Atem. In meinem Beobachtungsbuch von Borg findet sich jedesmal, wenn die Nebelfahne im Lee des Hauses beobachtet wurde, auch notiert: ‚rauschender Atem‘. Das Geräusch war nur schwach, einem leisen Klirren ähnlich, aber doch gut zu hören, weil bei so tiefen Temperaturen im Freien stets große Stille herrschte. Das Geräusch bildet sich in der bereits ausgeatmeten und sich selbst überlassenen Dampf Wolke und war daher am besten zu hören, wenn man gegen schwachen Wind ausatmete und damit die Atemwolke wieder gegen die Ohren zurücktreiben ließ. Die Entstehung scheint damit zusammenzuhängen, daß die Atemwolke in diesen Fällen nicht mehr aus Wassertröpfchen, sondern eisförmigen Teilchen bestand. Aber ob das leise Klirren nur auf Zusammenstöße solcher Eispartikeln zurückzuführen ist oder etwa mit dem plötzlichen Erstarren bisher unterkühlter Tröpfchen zusammenhängt, oder ob noch andere Erklärungen in Frage kommen, wage ich heute noch nicht zu entscheiden. Auch diese Erscheinung ist offenbar schon verschiedentlich beobachtet worden. So sagt H a n n<sup>53)</sup> bei der Schilderung der Winterkälte von Werchojansk: Der ausgehauchte Wasserdampf gefriert sogleich zu feinen Eisnadeln, die ein beständiges Knistern in der Luft erzeugen. Durchschneidet ein Rabe langsamen Fluges die Luft, so bleibt hinter ihm ein dünner, fadengleicher Dampfstreifen zurück.“

Bei seinen Freiballonfahrten, die mehrmals bis über 9000 m Höhe geführt haben, hat A. W i g a n d<sup>54)</sup> stets starke Ausatemungswolken beobachtet, und zwar in trockener Luft, auch wenn sie in bezug auf Eis ungesättigt war. Diese Wolken waren so dicht wie Nebel und Wolken in niedrigen Höhen, hatten also nicht die dünne Struktur der Cirren. Die wenigen gewöhnlichen Kondensationskerne im Ci-Niveau (Größenordnung ihrer Anzahl: 1 bis 10 im Kubikzentimeter) würden dafür nicht ausreichend sein. Vielmehr ist anzunehmen, daß die im Kernzähler und bei normaler Wolkenbildung nicht zur Wirkung gelangenden kleinen Luftionen (Größenordnung: 1000 Paare im Kubikzentimeter) dabei als Kerne wirkten; denn die Übersättigung der ausgeatmeten Luft ist ja bei Abkühlung auf  $-40^{\circ}$  bis  $-50^{\circ}$  sehr groß („Dampfstrahlphänomen“). Die Ausatemungswolke löste sich jeweils wieder schnell auf. Auch bei den W e g e n e r s c h e n Ausatemungswolken in Grönland sind wohl die kleinen Luftionen die Kerne, nachdem

A. W i g a n d <sup>48)</sup> nachgewiesen hat, daß die Ausatemluft keine Kerne liefert.

Aus der Dampfspannungskurve geht hervor, daß zwischen unterkühltem Wasser, Eis und Wasserdampf kein Gleichgewicht herstellbar ist, wenn alle Teile dieselbe Temperatur haben <sup>55)</sup>. Da der maximale Dampfdruck über dem Eise geringer ist als über dem Wasser, wird sich fortwährend Wasserdampf auf dem Eise verdichten und gleichzeitig flüssiges Wasser verdampfen müssen, bis das flüssige Wasser ganz verschwunden ist. Dieser Vorgang ist von großer Bedeutung für die Erklärung von Schnee- und Graupelwolken. Eine Wolke, die in bezug auf die unterkühlten Wassertröpfchen gesättigt ist, ist in bezug auf etwa hineingeratene Eiskristalle übersättigt, so daß fortwährend Kondensation an diesen stattfinden muß.

Ganz anders liegen die Verhältnisse, wenn wir die Annahme zulassen, daß die einzelnen Teile verschiedene Temperatur besitzen; z. B. kann auf einem Stück Eis, das in einen über 0° temperierten Raum von einer relativen Feuchtigkeit  $R_w$  (über Wasser) von 50 Proz. gebracht wird, Kondensation eintreten. Maßgebend ist nur der Dampfdruck der Umgebung und der durch die Temperatur des Eises gegebene Dampfdruck über diesem. Am besten stellt man die Vorgänge dar, wenn man nach dem Vorschlage von A. W e g e n e r den Begriff der „äquivalenten Feuchtigkeit“ ( $R$ )<sub>t</sub> einführt, die sich auf das betr. Objekt von der Temperatur  $t$  bezieht, wobei man, um allen Fällen gerecht zu werden, zwischen ( $R_w$ )<sub>t</sub> und ( $R_e$ )<sub>t</sub> unterscheiden muß. Die starke Verdunstungskraft der polaren Gebiete, auch vieler winterlicher Wetterlagen in unseren Breiten, ist nicht so sehr ein Ergebnis ihrer „Trockenheit“ als der Übertemperierung gegenüber der Luft. Ist z. B. die Lufttemperatur — 20°, die der Hautoberfläche 5°, so beträgt die äquivalente Feuchtigkeit nur 15 Proz., selbst wenn in der Luft vollkommene Sättigung  $R_w = 100$  Proz. herrscht.

Daß auch die Kondensation des Wasserdampfes in der festen Form, wie sie uns in den Cirren (Kristallwolken) bekannt ist, Kondensationskerne zur Voraussetzung hat, ist zwar nicht bewiesen, aber sehr wahrscheinlich, wenn wir uns der Tatsache der Unterkühlung als dem Gegenstück der Übersättigung

erinnern. Die Entstehung eines Kristalls verlangt das Zusammen-treten der Aufbaumoleküle in ganz bestimmter Anordnung, ist also ohne Haftflächen noch schwieriger zu erzielen als die Entstehung eines Tropfens. Dementsprechend werden die Kondensationskerne der Sublimation feste Körperchen sein, an denen gerade in den Höhen kein Mangel sein wird, in welchen die Cirren sich finden („Sonnenstäubchen“). An der Grenze von Troposphäre und Stratosphäre haben wir uns eine ähnliche Anreicherung kosmischen Staubes vorzustellen, wie wir die Anhäufung irdischen Staubes an den unteren Inversionen kennen.

Sind erst einmal Eiskristalle gebildet, dann können diese durch Hinabsinken in tiefere Schichten ganz besonders wirksame „Infektion“ abgeben, was aus dem Unterschied der Cirren gegenüber dem tiefer liegenden Cirrocumulus und Cirrostratus zu folgen scheint.

### Trübungsfaktor.

Neben der Aitken'schen Methode, die Kondensationskerne zu erfassen, ergibt sich eine optische Möglichkeit, um deren Durchbildung sich vor allem Linke und seine Schüler verdient gemacht haben. Da sich die Kondensationskerne, sobald auf ihnen eine Verdichtung des Wasserdampfes stattfindet, in der Veränderung der Sichtweite äußern, kann man mit den von Wigand angegebenen Sichtmessern quantitativen Aufschluß bekommen<sup>56)</sup>, auch durch Schätzung der Himmelfärbung nach einer Blauskala, noch genauer nach Linke<sup>57)</sup> mit Messungen der Sonnenstrahlung, welche durch die kolloiden Trübungen herabgesetzt wird. Man bekommt die Dunstrübung nicht rein, weil auch eine Zunahme des Wasserdampfgehaltes allein schon den Durchlässigkeitsgrad herabsetzt; da aber in den meisten Fällen damit auch eine Verdichtung auf vorhandenen Kondensationskernen verbunden ist, bekommt man gute Aufschlüsse.

Linke hat aus Strahlungsmessungen am Taunusobservatorium eine Formel für die Sonnenstrahlung abgeleitet<sup>57)</sup>:

$$I_m = I_0 \cdot e^{-a_m \cdot m \cdot T} = I_0 \cdot q_m^{m \cdot T},$$

worin  $q$  = Transmissionskoeffizient für reine trockene Luft,  $m$  = Schichtdicke,  $T$  = Trübungsfaktor bedeutet.  $T$  stellt sich also als der Faktor dar, mit welchem die augenblickliche Schichtdicke der Atmosphäre zu multiplizieren ist, damit man dieselbe Schwächung der Sonnenstrahlung bekommt, wie sie eben vorliegt.

Linkes leider zu früh verstorbener, hochbegabter Schüler Milch hat das Verhalten dieses Trübungsfaktors in Abhängigkeit von verschiedenen meteorologischen Faktoren studiert<sup>58)</sup>. Es ergab sich eine Abhängigkeit von der Wetterlage:

Wetterlage	Hochdruck	Hochdruckkeil	Hochdruckrücken	
$T$	1,84	2,10	2,15	
Wetterlage	Hochdruck mit Randstörungen		Tiefdruckfurche	Randtief
$T$	2,36		3,05	3,39

Die heutigen meteorologischen Vorstellungen über das Wetter arbeiten mit Luftkörpern; allgemein bekannt sind ja bereits die äquatorialen und polaren Ströme, von denen unsere Wetterberichte sprechen. H. Solberg und C. Störmer<sup>59)</sup> haben gezeigt, daß Tropikluft, also die auf der Vorderseite einer Depression einströmende Luft, einen höheren Gehalt an Ionen und Kondensationskernen hat als die Polarluft der Rückseite. Hand in Hand damit geht die Sicht, die, wie jeder weiß, nach dem Abzug einer Depression, solange der Zustrom polarer Luftmassen anhält, ihre höchsten, sonst nur bei Föhnlagen erreichten Werte aufweist.

So konnte Milch auch eine zunächst mehr klimatologisch wertvolle, aber auch synoptisch sich auswirkende Beziehung der Trübung zur Windrichtung feststellen. Er fand für den Taunus:

Wind	E	SE	S	SW	W	NW	N	NE
$T$	1,82	2,03	2,69	2,32	2,56	2,50	2,49	2,32

Natürlich ist der Trübungsfaktor auch lokal bedingt; die Nähe von Industriezentren und dergleichen gibt Zusatzglieder zu den rein synoptischen Konstanten.

Wenn wir uns an den Gedanken gewöhnen, daß das Eintreffen einer neuen Strömung auch das Eintreffen einer in ihrem kolloiden Verhalten anderen Luftmasse bedeutet, werden uns manche Witterungsvorgänge in anderem Lichte erscheinen. Z. B. wird der sogenannte Mischungsnebel, der sich beim Überschieben

einer wärmeren und feuchteren Luftmasse über eine kältere einstellt, sehr von dem Gehalt an Kondensationskernen abhängen müssen. Wir begreifen, daß dieselbe Wetterlage einmal zu starkem Nebel oder Hochnebel führt, auf dessen Auftreten wir ein andermal trotz sonst gleicher Verhältnisse vergeblich warten.

### Elektrische Eigenschaften der Luftkörper.

Es scheint, daß die Luftkörper-Forschung eine wichtige Hilfe durch das Studium der drahtlosen Reichweite und Empfangsstörungen erhält. Es ist schon längere Zeit bekannt, daß das Potentialgefälle und damit die Raumladung der Luft, sowie die Leitfähigkeit beim Durchschneiden von Schichtflächen der Atmosphäre sich sprunghaft ändern kann und hier auch zeitlich schnell schwankt. Von *Linke*<sup>60)</sup> im Freiballon, von *F. Herath*<sup>61)</sup> mit Hilfe von Drachenaufstiegen, von *A. Wigand*<sup>62)</sup> im Freiballon und Luftschiff ins einzelne studiert, hat sich die innige Beziehung dieses Erscheinungskomplexes mit der synoptischen Meteorologie ergeben. Ein Beispiel eines Luftschiffaufstiegs von *Wigand* diene zur Erläuterung:

Seehöhe m	Potentialgefälle Volt/m	Raumladung 10 <sup>-10</sup> ESE/cm <sup>3</sup>	Temperatur °C
460	+ 154		10,9
560	— 170	+ 593	—
700	— 280	+ 208	9,3
750	— 44	— 1250	—
800	— 20	— 127	10,6
1080	— 20	0	11,0

Heute weiß jeder Rundfunkteilnehmer, daß er bestimmte Stationen bei bestimmten Wetterlagen sehr gut oder sehr schlecht aufnehmen kann; wenn es einmal möglich sein wird, die variable Stärke der Radiogramme mit einem einfachen Gerät exakt aufzuzeichnen, wird man zu einer internationalen Kooperation aufrufen, in unmittelbarer Anlehnung an das internationale meteorologische Netz: Die meteorologischen Schichtflächen, welche für die Witterungsvorgänge von so großer Bedeutung sind, sind es auch für die Ausbreitung der Radiogramme.

### Zahl der Kondensationskerne.

Viele Tausende von Messungen verschiedener Beobachter nach der Aitkenschen Zählmethode ergaben im Mittel folgende Größenordnungen für die Anzahl der Kondensationskerne im Kubikzentimeter am Boden:

Bei zyklonalem Wetter . . . . .	1000—10 000
Bei antizyklonalem Wetter . . . . .	10 000—100 000
In Großstädten und Industriegebieten . . .	> 100 000
In reiner Landluft und im Gebirge . . . .	einige hundert.

Für die vertikale Kernverteilung bei Hochdruckwetter findet W i g a n d <sup>63)</sup> folgende Mittelwerte:

Höhe	Kernzahl/cm <sup>3</sup>	Wolkenetage
100 m . . . . .	44 000	
500 „ . . . . .	13 000	} str, cu
1000 „ . . . . .	5 000	
2000 „ . . . . .	550	} alto-str, alto-cu
3000 „ . . . . .	200	
5000 „ . . . . .	50	
8500 „ . . . . .	5	ci

Die Kernzahl ist von gleicher Größenordnung wie die Zahl der Wolkenelemente in der betreffenden Höhe. Aus diesem Grunde, aber auch wegen der Abnahme des Wasserdampfgehaltes, nimmt die Wolkendichte mit zunehmender Höhe stark ab.

Die Höhenverteilung der Kernzahl  $K$  ist keine einfache logarithmische, wie man sie nach dem in der barometrischen Höhenformel zum Ausdruck kommenden Verhalten der nicht-kolloiden Luftbestandteile und nach dem Sedimentationsgleichgewicht von Hydrosolen erwarten sollte. Die Kurve im Diagramm von  $\log K$  mit der Höhe  $h$  (Abb. 5, nach den W i g a n d'schen Einzelmessungen bei Ballonfahrten) ist keine Gerade, sondern sie besteht deutlich aus drei geradlinigen Stücken mit Knickpunkten in 1750 und 3000 m Höhe. Wir haben also auch im Kern-Aerosol Etagenbildung, entsprechend der Höhenlage von häufigen, durch die vertikale Temperaturverteilung bedingten Sperrschichten und Wolkenstufen. Die meist vom Boden stammenden Kerne werden durch Konvektion und Austausch nach Maßgabe der jeweils vorhandenen

Sperrschichten mehr oder weniger hoch hinauf verfrachtet; ihre Schichtungsgesetze müssen daher auch, ebenso wie die der Wolken, durch die Gesetzmäßigkeiten der Temperaturschichtung bestimmt werden. Daß die Größe der Kerne bei dieser Etagenbildung eine Rolle spielt, ist wegen der verschwindend kleinen Fallgeschwindigkeit der Kerne unwahrscheinlich. In jeder höheren der drei Kern-etagen ist nicht nur die Kernzahl selbst, sondern auch die Abnahme

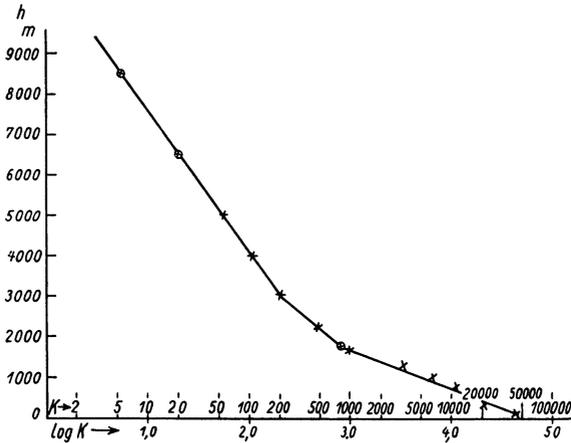


Abb. 5.

der Kernzahl nach oben geringer als in der tieferen Etage. In jeder Etage nimmt die Kernzahl einfach logarithmisch mit zunehmender Höhe ab:

$$h_2 - h_1 = \kappa (\log K_1 - \log K_2).$$

In jeder Etage hat jedoch der Proportionalitätsfaktor  $\kappa$  einen anderen Wert. Bei Verwendung Briggscher Logarithmen ist  $\kappa$  gleich der Höhenstufe für Abnahme der Kernzahl  $K$  auf  $1/10$ :

Etage	Höhe $h$ m	Kernzahl $K$	$\kappa$ m
I	100	45 000	943
II	1750	800	2080
III	3000	200	3520
	5000	54	

### Art der Kondensationskerne.

Der Wert der Kondensationskerne in bezug auf die Erleichterung der Kondensation bemißt sich vor allem nach dem Grade der Benetzbarkeit. An benetzbaren Flächen liegt ja der Taupunkt bei einer höheren Temperatur, als dem Sättigungspunkt entspricht (Adsorptionswirkung). Hygroskopische Stoffe beschlagen darum früher. Darauf gründen sich manche „Wetterzeichen“, wie das Beschlagen von Mauern und Fußböden, die Reaktion wolletragender Tiere auf bevorstehende Witterungsänderungen u. dgl.

Von den in der Luft suspendierten Kernen sind diejenigen wirkungsvoller, welche eine chemische Affinität zu Wasser haben, die mit Wasser Lösungen von niedrigerem Dampfdruck geben, während nicht benetzbare Oberflächen sich verhalten wie etwa eine Petroleumoberfläche, von welcher Cantor zeigte, daß auf ihr Wasserdampf erst merklich unterhalb der Sättigungstemperatur zu Tröpfchen verflüssigt wird<sup>64</sup>).

Wir möchten hier eine Beobachtung anführen, welche Schmauss am 17. Januar 1928 zu machen Gelegenheit hatte. Das Chemische Institut der Technischen Hochschule in München befindet sich im Hofe des umfangreichen Gebäudes. Es macht sich stets durch die Schwängerung der Luft mit chemischen Dämpfen bemerklich, die sich mit der Windrichtung nach dem südlichen oder nördlichen Hofausgang hin verbreiten. Am angegebenen Tage war diesiges Wetter. Im Bereiche des Chemischen Instituts kam es zu leichtem Sprühregen, so daß — es herrschte leichter Nordwest — das Pflaster um das Institut bis zum Südausgang hin naß war, während der Nordausgang trocken blieb. Die Atmosphäre „neigte“ zur Kondensation, denn fünf Stunden später trat allgemein leichter Sprühregen ein, der lokal wegen des Reichtums an chemischen Kernen am Institut schon früher eingesetzt hatte.

Die Wirksamkeit der „industriellen Keime“ ist lange bekannt, sie findet in dem Gegensatz von Stadt- und Landnebel ihren sinnfälligen Ausdruck. Die Verunreinigungen, welche in Industriestädten in die Luft gelangen, erlauben eine Kondensation des Wasserdampfes auch schon bei Feuchtigkeiten unter 100 Proz. Die Stadtnebel setzen auch ihrer Auflösung durch

die Sonne einen großen Widerstand entgegen. Eine Verminderung der in wirtschaftlicher und hygienischer Hinsicht gleich verhängnisvollen Stadtnebel ist daher nur denkbar, wenn es gelingen sollte, die Anreicherung mit Kondensationskernen einzudämmen<sup>65</sup>).

Auf eine besondere Art von Kondensationskernen hat wohl zuerst G. M e l a n d e r hingewiesen (1897), der auf das zahlreiche Vorkommen von Salzkernen in der Luft, besonders an den Ufern der Ozeane, hinwies. „Wenn man bedenkt, daß fast Dreiviertel der Erdoberfläche von Wasser bedeckt ist, so scheint die Annahme, daß die meisten bei der Kondensation des Wasserdampfes in der Atmosphäre wirksamen Staubkerne von dem bei Stürmen emporgehobenen Spritzwasser herrühren, sehr wahrscheinlich. Diese Tropfen enthalten viele hygroskopische Salzkern, die man jedoch nicht zählen kann, bevor sie eingetrocknet sind<sup>66</sup>.“ Auch G. L ü d e l i n g hat sich dieser Anschauung angeschlossen<sup>67</sup>), welche später von H. K ö h l e r in einer langjährigen, bewundernswerten Experimentaluntersuchung bestätigt wurde.

H. K ö h l e r hat die Kondensationsvorgänge und die damit zusammenhängenden Erscheinungen sich geradezu zur Lebensaufgabe gemacht. Er begann seine Untersuchungen auf dem im schwedischen Hochgebirge gelegenen Observatorium H a m b e r g s, auf dem 1830 m über dem Meere gelegenen P a r t e t j a k k o im Jahre 1914, und setzte sie später fort auf dem in 900 m über dem Meere gelegenen norwegischen Observatorium H a l d d e a m K a a f j o r d. Er brachte mehr als 10 Jahre in diesem grandiosen Naturlaboratorium zu, in welchem die Hydrometeore so unmittelbar eindrucksvoll dem Beschauer entgegen treten, wie es die Depressionen tun, welche vom Ozean kommend den norwegischen Geophysikern in B e r g e n Vorgänge zu schauen erlaubten, welche ein kontinentaler Meteorologe immer erst nach manchen Wandlungen zu sehen bekommt. Bei der großen Bedeutung, welche die K ö h l e r s c h e n Arbeiten auch für andere Gebiete der Physik disperser Systeme besitzen, erscheint eine ausführliche Berichterstattung im Rahmen unserer Studie be-  
rechtigt<sup>68</sup>).

Man hat schon früher versucht, über die Natur der Kondensationskerne durch Analyse des Regenwassers Aufschluß zu be-

kommen, darf aber nicht vergessen, daß die Niederschläge das Luftplankton auch mechanisch mitreißen können, wovon man sich namentlich im Winter an dem Aussehen abschmelzender Schneefelder überzeugen kann. H. Köhler rückte daher den Wolken-elementen selbst zu Leibe, die man auf den in die Kondensationszone hineinreichenden Gebirgen abfangen kann.

Fußend auf der Vorstellung Melanders folgerte er, daß die Verteilung der in der Atmosphäre befindlichen anorganischen Salze dieselbe ist wie in dem Oberflächenwasser des Meeres. Köhler hat daher die Analyse auf Chlor vorgenommen und die Mengen der Salze berechnet. Er fand z. B. bei einer Temperatur von  $-9^{\circ}$  und gesättigter Atmosphäre  $0,00357$  g Cl im Liter, eine Menge, die beinahe immer im Raufrost gefunden wird. Das Chlor ist zumeist an Natrium gebunden, Cl Na ist ein fast allgegenwärtiger Stoff, wie jeder Praktikant der Spektroskopie weiß, dem das in der Bunsenflamme vorhandene Natriumspektrum Ärger bereitete. Die übrigen Salze treten quantitativ zurück, besitzen aber, wie namentlich der Anteil an Magnesiumsalz, eine große Bedeutung wegen ihrer hygroskopischen Eigenschaften.

Der Radius der Tröpfchen wurde optisch bestimmt; er ergab sich zu  $1,5 \cdot 10^{-3}$  cm. Man hatte es mit einer dichten Wolke zu tun, welche die bei dieser Temperatur ungewöhnliche Menge von  $7,9$  g flüssiges Wasser im Kubikmeter Luft enthielt. Für  $1$  cbm Luft waren die Salzmengen — berechnet aus dem Chlorgehalt unter der Annahme der Verteilung wie im Oberflächenwasser des Meeres —

Na Cl . . . .	$4,0 \cdot 10^{-5}$ g	Mg SO <sub>4</sub> . . . .	$0,4 \cdot 10^{-5}$ g
Mg Cl <sub>2</sub> . . . .	$0,6 \cdot 10^{-5}$ „	Ca SO <sub>4</sub> . . . .	$0,2 \cdot 10^{-5}$ „

Angenommen, daß die Verteilung dieser Salzmengen vollkommen regelmäßig ist, auf jedes Tröpfchen also gleich viel kommt, waren in jedem Tröpfchen  $9,18 \cdot 10^{-14}$  g Salz. Nach vollkommener Eindampfung erhält man Teilchen von der Größenordnung  $10^{-5}$  cm, welche also die untere Grenze dieser Kondensationskerne darstellen.

H. Köhler hat dann an Hand der bekannten Formeln der Erniedrigung des Dampfdruckes durch Lösung eines Salzes, der

Erhöhung desselben durch die sphärische Form für mehrere Konzentrationen den Radius berechnet, den ein Tröpfchen in gesättigter Luft haben muß, um stabil zu sein. Bezeichnen wir mit  $N$  eine Normallösung, so ergibt sich für

$$\begin{array}{ll} N.1 \dots\dots 3,9.10^{-6} \text{ cm} & N.10^{-3} \dots\dots 3,5.10^{-3} \text{ cm} \\ N.10^{-1} \dots\dots 3,5.10^{-5} \text{ „} & N.10^{-4} \dots\dots 3,5.10^{-2} \text{ „} \\ N.10^{-2} \dots\dots 3,5.10^{-4} \text{ „} & \end{array}$$

als Radius stabiler Tropfen.

Die experimentell festgestellte ClNa-Menge war rund  $N/10000$ ; gehen wir von diesem Werte aus und denken uns den Tropfen der Verdunstung unterworfen, dann sind die aufeinanderfolgenden Radien (Ausgang: experimentell ermittelter Radius):

$$\begin{array}{ll} N.10^{-4} \dots\dots 1,5.10^{-3} \text{ cm} & N.10^{-1} \dots\dots 1,5.10^{-4} \text{ cm} \\ N.10^{-3} \dots\dots 7,0.10^{-4} \text{ „} & N.1 \dots\dots\dots 9,5.10^{-5} \text{ „} \\ N.10^{-2} \dots\dots 3,4.10^{-4} \text{ „} & \end{array}$$

Wir sehen daraus: Übereinstimmung der beiden Tabellen besteht nur für  $N.10^{-2}$ , d.h. der experimentell ermittelte Tropfen von  $1,5.10^{-3}$  cm Durchmesser befand sich nicht in gesättigter, sondern in übersättigter Atmosphäre, der Betrag der Übersättigung ist jedoch sehr klein und mit unseren gewöhnlichen meteorologischen Instrumenten nicht meßbar.

Das Beispiel erscheint besonders wichtig, weil wir unsere meteorologischen Überlegungen nur an die Werte der ersten Tabelle anschließen können, während die wirklichen Verhältnisse, wie man an dem Unterschied des rechnermäßig ermittelten Teilchenradius von  $3,5.10^{-2}$  cm gegenüber dem experimentell ermittelten von  $1,5.10^{-3}$  cm ersieht, schon durch geringe Übersättigungen andere sein können. Die Übereinstimmung von Theorie und Wirklichkeit für  $N.10^{-2}$ , entsprechend einem Tröpfchenradius von der Größenordnung  $10^{-4}$  cm, weist diesem eine besondere Stellung an: Köhler nennt ihn „Grenztröpfchen“, die Konzentration der Salze in ihm „Grenzkonzentration“. Tatsächlich besteht eine sehr gute Übereinstimmung mit der oben angegebenen unteren Grenze der Nebelelemente ( $5.10^{-4}$ ), während wir für die Bestandteile des Dunstes  $2,5.10^{-5}$  cm gefunden hatten, die Köhler rechnermäßig als die Rückstandsgröße eines Grenztröpfens ermittelt hatte.

Wahrscheinlich wächst der Tropfenradius vom Rande der Wolke nach dem Innern zu von der Größenordnung  $10^{-4}$  auf diejenige von  $10^{-3}$ . Genauer berechnet Köhler die Tröpfchengrößen im Innern einer ausgebildeten Wolke zu  $5,0 \cdot 10^{-3} > r \geq 1,5 \cdot 10^{-3}$  cm, in den äußeren Schichten zu  $1,6 \cdot 10^{-3} > r \geq 3,1 \cdot 10^{-4}$  cm. Die Schwankungen erklären sich zur Genüge aus der verschiedenen Größe der Salzpartikelchen, welche als Kondensationskerne dienen.

Es hat sich ergeben, daß etwa  $35 \cdot 10^{-4}$  g Meeressalze im Liter Wolkenluft vorkommen. Da ihre Konzentration im Meere 35 g auf den Liter beträgt, bekommen wir eine Vorstellung von der enormen Verdünnung, welche durch die Austauschvorgänge in der Atmosphäre eintritt. Köhler stellt sich vor, daß diese Meeressalze in ihrer vertikalen Verbreitung eine mittlere Höhe erreichen, so daß man von einer Magnesium-Natriumzone sprechen kann. Nimmt man an, daß in höheren — noch nicht untersuchten — Schichten andere Kondensationskerne die Rolle übernehmen, z. B. Ammoniumnitrat, Ozon usw., welche ebenfalls bestimmte Zonen erfüllen, dann wäre damit eine andere Erklärung dafür gefunden, warum die Wolken die Troposphäre nicht kontinuierlich erfüllen, sondern etagenweise angeordnet sind.

Der Lebenslauf der Salz-Kondensationskerne ist also der: Eindampfen über den Trockengebieten der Erde bis zu den unsichtbaren Dunstteilchen; erneutes Wachstum in feuchter Atmosphäre. Daß dies auch auf dem Kontinente der Fall sein kann, beweisen die Untersuchungen von F. Albrecht auf dem Hohen Sonnblick in den Tauern, welcher einen gleichen Gehalt der Wolkenluft an Meeressalzen feststellte wie Köhler, trotz der Entfernung von etwa 1500 km<sup>69)</sup>.

Von einer auf dieser Grundlage erreichten Nebelbildung berichtet I. Szonoki<sup>70)</sup>. Derselbe kochte künstliches Meerwasser und brachte die Dämpfe mit Dämpfen destillierten Wassers zusammen, wobei er einen starken Nebel erhielt.

Der Nachweis, daß die Wolkenelemente Salze gelöst enthalten, läßt es auch verstehen, daß die Bausteine der Wolken noch in 6 km Höhe flüssig sein können. Für reines Wasser wären die dafür geforderten Unterkühlungen unwahrscheinlich groß, für Salzlösungen dagegen nicht. Wenn A. Wegener<sup>52)</sup> auf seiner Grönlandreise 1912/13 Wassertröpfchen bei  $-34,5^{\circ}$  in seiner Um-

gebung hat nachweisen können, begegnet der durch optische Untersuchungen gesicherte Nachweis der flüssigen Aggregatsform der Wolkenelemente in 6 km keinem besonderen Staunen.

H. K ö h l e r hat durch mikroskopische Aufnahmen am Einzelindividuum noch den besonderen Nachweis erbracht, daß die Wolkenelemente aus unterkühltem Wasser bestehen können, was man bis dahin aus den Beugungserscheinungen gefolgert hatte, welche in einer Wolke auftreten. Von höchstem Interesse sind namentlich die Aufnahmen, welche die Anlagerung von Tröpfchen an Eiskristallen erkennen lassen, womit er der Schnee- bildung nähergerückt ist.

### Die Tröpfchengrößen in Wolken.

H. K ö h l e r hat eine Fülle von Messungen der Tröpfchengrößen in Wolken und Nebeln vorgenommen, und zwar nach zwei voneinander unabhängigen Methoden. Einmal optisch, durch schnelle Ausmessung der Kränze rings um eine starke Lichtquelle (Scheinwerfer bzw. Mondlicht während der Polarnacht), wobei die Radien nach der bekannten Formel <sup>71)</sup>

$$2r = (n + 0,22)\lambda/\sin\alpha$$

berechnet wurden, worin  $r$  der Tröpfchenradius,  $n$  die Ordnung des roten Ringes,  $\alpha$  der Winkel des äußeren Randes des roten Ringes und  $\lambda$ , die Wellenlänge, gleich  $571\text{ m}\mu$  ist.

Daneben kam eine experimentell sehr interessante mikroskopische Messung zur Anwendung, indem die Tröpfchen, welche sich auf feinen Drähten vom Durchmesser  $7 \cdot 10^{-3}$  oder  $1,5 \cdot 10^{-3}\text{ cm}$  absetzten, ausgemessen wurden.

Hiernach wurden die Häufigkeiten ausgezählt, mit welchen die einzelnen Radien vertreten waren. Die Anordnung zeigt Abb. 6.

Die Kurven zeigen ausgeprägte Maxima und Minima. Die Maxima  $A_1, A_2, A_4, A_8$  entsprechen den Radien 7, 9, 11,  $14 \cdot 10^{-4}\text{ cm}$ , die Minima  $a_1, a_2, a_4$  und  $a_8$  den Werten 8, 10, 13 und  $16 \cdot 10^{-4}\text{ cm}$ ; man findet, daß, wenn zwei Tröpfchen  $A_1$  zusammen-

fließen, ein Tröpfchen  $A_2$  entsteht. Vier Tröpfchen  $A_1$  bilden ein  $A_4$ , acht Tröpfchen  $A_1$  geben ein  $A_8$ . Analog sind die Beziehungen der  $a_1, a_2, a_4, a_8$ . Die Maxima zeigen sich also als eine 7-Gruppe, die Minima als eine 8-Gruppe.

Ein Unterschied zwischen Sommer und Winter war darin gegeben, daß im Winter das absolute Maximum der Häufigkeit bei  $A_1$ , im Sommer bei  $a_1$  lag.  $A_4$  und  $A_8$  waren aber auch im Sommer relative Maxima. Im Winter ist also die 7-Gruppe

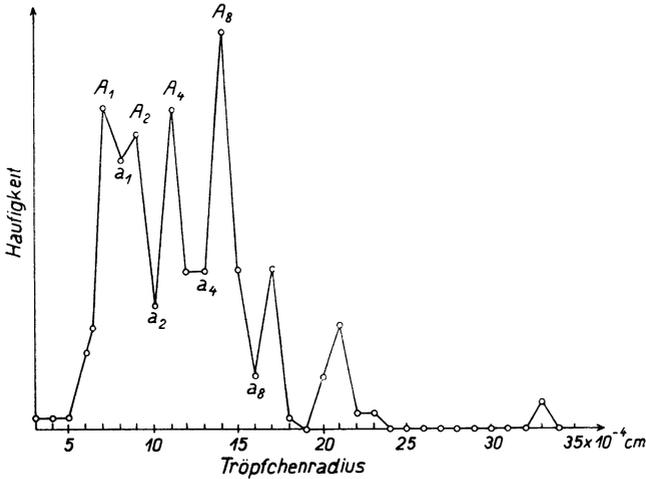


Abb. 6.

über der ganzen Kurve vorherrschend, im Sommer dagegen hat ein Tröpfchen aus der 8-Gruppe das absolute Maximum. Dann überwiegt jedoch wieder die 7-Gruppe wie im Winter.

Für die Frage der Niederschlagsbildung muß der Nachweis, daß sich die Wolkenelemente aus wenigen Bausteinen (7- und 8-Gruppe) durch Zusammenfließen vergrößern, besondere Bedeutung beanspruchen, die quantenhafte Vergrößerung an Stelle einer kontinuierlichen, etwa durch weitere Kondensation. Die Untersuchungen Köhlers machen es sehr wahrscheinlich, daß die 7- und 8-Gruppen selbst wieder Multipla kleinerer Elementarbausteine sind. Daß sie nicht auf einen Baustein zurückzuführen sind, deutet Köhler als ein Ergebnis verschiedener Kondens-

sationskerne; die Tröpfchen einer Gruppe haben jeweils denselben Kondensationskern.

Köhler hat den Nachweis erbracht, daß die 7-Gruppe durch Salzpartikelchen des Meeres bestritten wird. Zur Erklärung der 8-Gruppe denkt er wegen des vornehmlichen Vorkommens im Sommer an Kondensationskerne aus der Pflanzenwelt oder an anorganische stickstoffhaltige Verbindungen, Ammonium oder Ammoniumnitrat, was auch die Analysen des Regenwassers wahrscheinlich machten.

A. Defant<sup>72)</sup> hatte schon im Jahre 1905 im Binnenland-Regen eine gruppenweise Anordnung der Tropfen gefunden, welche nahe an die Köhlerschen Werte heranführt und den Gedanken einer gewissen Universalität der Kondensationskerne nahe legt. Aus seinen Messungen folgert Köhler für die Nebeltröpfchen, daß sich solche von gleicher Größe stärker anziehen als solche verschiedener Größe; eine Tatsache, die sonst in der Kolloidchemie nicht bekannt ist; vielmehr koagulieren Kolloide mit verschiedenen Teilchengrößen rascher als solche mit einheitlicher Teilchengröße.

Sehr wahrscheinlich kommt den zwei Hauptgruppen von Kondensationskernen, den vom Meere stammenden und den vom Lande kommenden, eine gesonderte Bedeutung zu: den ersteren im sogenannten großen Kreislauf des Wassers, soweit also der Niederschlag direkt vom Meere stammt, den letzteren im kleinen Kreislauf, welcher das vom Festlande stammende Wasser nochmals umsetzt, dabei aber die im großen Wasserkreislauf abgesetzten Meeressalze dem Boden beläßt.

Die Kenntnis der ungefähren Größe der Wolkenelemente setzt uns in den Stand, eine Vorstellung von der Größenordnung der Anzahl der Wolkenelemente zu erhalten. „Nimmt man eine Größe von  $2r = 2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$  als Durchmesser an, so wäre das Volumen des Tröpfchens  $\frac{4}{3} r^3 \pi = 4,2 \cdot r^3 = 4,2 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3$ . Das ergäbe für einen Wassergehalt von 1 bis 2 g im Kubikmeter eine Anzahl von etwa 240 bis 480 Tröpfchen im Kubikzentimeter. Das ist dieselbe Größenordnung, wie sie die Messung der Anzahl der Kondensationskerne mit dem Aitkenschon Kernzähler in diesen Luftschichten ergibt<sup>73)</sup>.“

### Die Schwankungen der Tröpfchengrößen.

H. K ö h l e r hat wiederholt festgestellt, daß die Schwankungen der Tröpfchengrößen, namentlich bei kleinen Tropfen, oft außerordentlich schnell sind. Hierüber äußert er sich in seiner letzten, zusammenfassenden Arbeit. Er konnte feststellen, daß im Mittel eine sprungweise Abnahme der Tröpfchengröße eintritt, sobald die Windgeschwindigkeit über  $0^{\circ} 12 \text{ m/sec}$  und unter  $0^{\circ} 8 \text{ m/sec}$  erreicht hat. Der Wind besitzt also eine Dispersionskraft. Der Korrelationskoeffizient der stabilsten Tröpfchen in ihrer Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit beträgt  $-0,48 \pm 0,002$ , ist also recht beachtenswert. Man wird unmittelbar an die Beobachtungsregel erinnert, die bei manchen Wetterlagen ihre Berechtigung hat: „Wenn der Wind sich legt, dann regnet es.“ Es ist wohl die Struktur des Windes für seine Dispersionskraft maßgebend, was man ja auch an der Erde beobachten kann, wenn man vom Eisenbahnfenster aus das Schicksal der von der Lokomotive ausgestoßenen Dampfwolke verfolgt. Sie ist gelegentlich als Zeuge des zurückgelegten Weges längere Zeit zu verfolgen, während sie ein andermal rasch ihrer Auflösung entgegengeht. Die relative Feuchtigkeit der Luft reicht meistens nicht aus, das verschiedene Verhalten zu erklären, das bei Berücksichtigung der Auflösungskraft des Windes verständlich wird. Bezüglich der Windrichtung fand Köhler keinen sehr ausgeprägten Unterschied, wohl aber bei Westwinden eine Tendenz zu größeren Tröpfchen. Eine Abhängigkeit der Stabilitätsgröße von der Temperatur scheint nicht so ausgeprägt. Die erwähnte Beziehung für die Tröpfchengrößen über oder unter Null hängt wohl mit dem Unterkühlungsvorgang zusammen. Im übrigen ließ sich feststellen, daß bei sinkender Temperatur die Tröpfchengrößen anfangs wachsen, um nach  $t = -7,5^{\circ}$  schnell zu sinken.

### Elektrische Ladungen der Tröpfchen und von Staub.

Daß trockener Nebel kleinere Tröpfchen hat als nässender, wurde im allgemeinen bestätigt, doch führt Köhler auch Ausnahmen an und macht für diese auf eine Erscheinung aufmerksam, die uns für das k o l l o i d e Verhalten der Wolkenelemente wichtig

zu sein scheint: „Bei einer Temperatur über 0° lag einmal über dem Observatorium ein trockener, dichter Nebel. Der Draht, an welchem sonst das Absetzen erfolgte, wurde exponiert, es setzten sich aber keine Tröpfchen ab. Eine geriebene Siegelackstange wurde an den Draht geführt und sofort setzten sich Tröpfchen ab.“

Das spricht dafür, daß die Nebeltröpfchen elektrisch geladen sind. Direkte Messungen dieser Ladung von *Wigand* und *Wittenbecher*<sup>74)</sup> ergaben für antizyklonalen Strahlungsnebel hohe Beträge von 350 bis 2000 Elementarladungen pro Tröpfchen, für zyklonalen Nebel 60 bis 300; das Vorzeichen der Ladung wechselte im Mischungsnebel schwadenweise, im Strahlungsnebel war es meist positiv, jedoch auch negativ. Daß solche hohen Aufladungen durch Ionenadsorption möglich sind, ist nach der Formel von *Arendt* und *Kallmann*<sup>23)</sup> (vgl. S. 5) durchaus plausibel.

Es wird auch behauptet, daß der Rauhrostansatz an Hochspannungsleitungen vom Ladungszustand der Drähte abhängen soll. Hierbei versprechen Erfahrungen, welche sich mit der fortschreitenden Elektrifizierung der Bahnen werden gewinnen lassen, Aufschluß.

Rauhrostansatz (im Nebel unter 0°) auf geladenen Drähten (Gleichspannung von  $\pm 220$  Volt) wurde von *Wigand* studiert mit dem Ergebnis, daß der Ansatz gleich stark war wie auf ungeladenen Drähten, die gleichzeitig exponiert wurden. Hochspannungs-Überlandleitungen kommen wegen des Wechselstromes nicht in Betracht.

Wir erinnern uns an die Staubablage, welche man in den ersten Zeiten der elektrischen Inneneinrichtung hat beobachten können. Damals gab es noch nicht die umeinandergeschlungenen Zuleitungsdrähte, sondern parallel nebeneinander verlaufende Stromzuführungen. Man konnte bei den von Gleichstrom beschickten Leitungen nach längerem Gebrauch ein Schwarzwerden eines Drahtes beobachten, an dem sich also der entgegengesetzt geladene Staub absetzte, während der andere Draht sauber blieb. Auch an lange nicht benutzten Zambonisäulen sind einseitige Staubanlagerungen bekanntgeworden.

Den Staubansatz am negativen Pol einer Gleichstromleitung läßt die in Abb. 7 wiedergegebene Aufnahme gut erkennen; der positive Pol war geerdet.

Die elektrische Ladung von Staub ist eine Tatsache, welcher in letzter Zeit auch von technischer Seite großes Interesse entgegengebracht wird. Als erster hat sich P. Beyersdorfer mit dem Problem der Zuckerstaubexplosionen beschäftigt und dabei manche unserer kolloidphysikalischen Überlegungen angewandt<sup>75)</sup>. Gemeinsam mit G. Jaeckel hat er die Untersuchung weitergeführt<sup>76)</sup>, welche ergeben hat, daß der Zuckerstaub durch Reibung am Boden, an den Wänden der Maschinen usw.

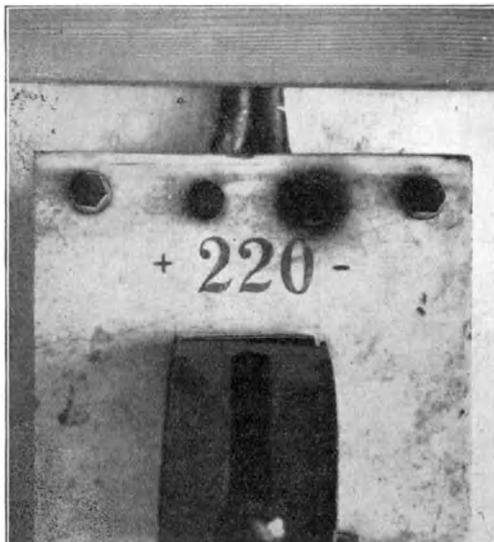


Abb. 7.

Staubansatz am negativen Pol einer Gleichstromleitung (phot. Pforte).

eine elektrische Ladung annimmt, welche beim Vorhandensein einer Initialzündung zu den bekannten gefährlichen Explosionen führen kann.

Die Initialzündung, welche durch kleinste Funken eingeleitet werden kann, wird von einem Element der Wolke zum nächsten weitergegeben. Unwillkürlich denkt man an die Blitzentladungen, welche sich auch vielleicht mehr in der Form einer explosionsartigen Ausbreitung als einer glatten Funkenentladung von gigantischem Ausmaße vollziehen.

Dieselben Vorgänge beobachtet man auch bei Kohlen- und Mehlstaubexplosionen; es ist ferner bekannt, daß man in Staub-

stürmen schon elektrische Entladungen beobachten konnte<sup>77)</sup>. Hierher gehört auch die starke Aufladung von Treibschnee und namentlich das vulkanische Gewitter, über welches eine interessante Monographie von A. St ä g e r vorliegt<sup>78)</sup>. St ä g e r hat nachgewiesen, daß auch bei den vulkanischen Gewittern weniger an Elektrisierungen nach Analogie der Gewitterwolken zu denken ist, als an starke Aufladungen der Asche beim Austritt aus dem Krater. Es wird von der Entladungsfähigkeit der Atmosphäre abhängen, ob es zu einer sichtbaren oder einer stillen Entladung kommt; auch dieser Vorgang ist also von der Wetterlage im weitesten Sinne abhängig, so daß sich da manche Beziehungen zur Meteorologie ergeben.

Beyersdorfer führt eine interessante Beobachtung an: „Wenn schlechtes Wetter im Anzug ist, hält sich der Zuckerstaub bei weitem nicht solange schwebend in der Luft wie bei ständig gutem Wetter. Bei gutem Wetter hat man in stauberfüllten Räumen viel mehr den Eindruck der blauen Ferne, der Schönwettersicht, als bei schlechtem Wetter, wo dem Staube alsbald seine Ladung entzogen wird<sup>79)</sup>.“ Die solbildende Kraft der Atmosphäre hängt also auch in geschlossenen Räumen von der Wetterlage ab, was wir besonders vermerken, da man bei der Frage des Einflusses des Wetters auf meteoropathisch veranlagte Menschen auch die Tatsache zu beachten hat, daß sich derselbe nicht etwa nur im Freien äußert, sondern auch im Zimmer, welches ein künstliches Klima besitzt. Die mit der Wetterlage wechselnde Stabilität von Aerosolen ist allen aufmerksamen Beobachtern geläufig, welche das sehr verschiedene Verhalten von Rauch als Wetterzeichen kennen. Hier ist noch ein weites Feld für die Forschung offen, welche wohl auch die Beziehungen zur Chemie der Adsorptionen wird herstellen müssen<sup>80)</sup>; auch B e y e r s d o r f e r weist in seinen Untersuchungen auf die O b e r f l ä c h e n w i r k u n g e n hin.

Einen sehr hübschen Nachweis der elektrischen Ladung von ultramikroskopischem Rauche hat V. K o h l s c h ü t t e r<sup>81)</sup> an Hand von Versuchen von Wells und Gerke mitgeteilt (siehe Abb. 8).

„Wird Rauch unter dem Ultramikroskop in ein Wechselfeld senkrecht zum Beleuchtungskegel gebracht, so verschieben sich die Teilchen unter der Wirkung des Lichtes in der Richtung des

Strahles und bewegen sich zugleich infolge der Aufladung, die sie durch natürliche Ionisation oder auch durch Influenz erhalten, im Felde mit der Periode seines Wechsels, so daß für sie ein Zickzackweg resultiert. Die Amplitude der Schwingung eines Teilchens ist ein genaues Maß des Weges, den es in gegebener Zeit unter der Wirkung einer bekannten elektrischen Kraft zurücklegt, wodurch eine Bestimmung seiner Größe möglich wird. Man ersieht, daß erstens Teilchen verschiedener Größe, zweitens neben den geladenen auch ungeladene vorhanden sind, die sich um das elektrische Feld nicht kümmern.“

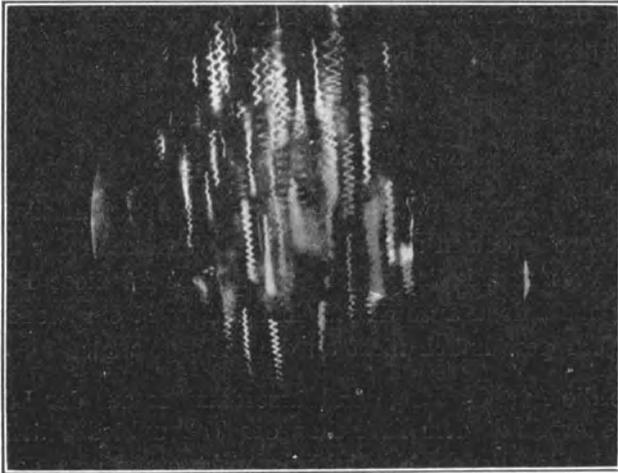


Abb. 8.

Ultramikroskopisches Verhalten von Rauch im Wechselfeld.

Im Anschluß an diese Abbildung sei auf eine Beobachtung hingewiesen, die man an Dampfvolken machen kann, welche sich in einem elektrischen Wechselfelde befinden: Steht eine Dampflokomotive unter einer mit Wechselstrom beschickten Hochspannungsleitung, dann sieht man gelegentlich, wenn die Lokomotive Dampf abläßt, ein eigenartiges Vibrieren über die Wolke hinweg, ein Flimmern im Rhythmus der Wechsel des elektrischen Stromes. Die Dampfwolke befindet sich in einem elektrischen Felde und scheint makroskopisch auf die Wechsel zu reagieren, wie wir es in Abb. 8 im Ultramikroskop sehen, weil ihre Tröpfchen elektrisch geladen sind.

Es scheint sich dabei um einen wechselnden Grad der Dispersion des Mediums zu handeln, der auch aus anderen Erscheinungen bekannt ist. Wir haben bei der Besprechung des Trübungsfaktors gesehen, daß die Sicht eine Funktion des Luftkörpers ist. Man beobachtet aber auch gelegentlich eine Besserung oder Verschlechterung der Sicht ohne einen entsprechenden Ersatz der Luft. Man muß dann annehmen, daß die kleinen trübenden Teilchen zu größeren Aggregaten zusammentreten oder sich wieder aufteilen in kleinere. Die Trübung ist der auf die Volumeneinheit entfallenden Masse proportional und umgekehrt proportional der Größe der trübenden Teilchen, so daß also bei gleichem Gehalt an trübender Substanz die Sichtigkeit um so größer ist, je größer die Teilchen sind.

### **Die Niederschlagsbildung.**

In der Umgangssprache versteht man unter „Niederschlag“ das meßbare Absetzen atmosphärischen Wassers an der Erdoberfläche. Vom physikalischen Standpunkt aus ist diese Definition zu eng gefaßt, denn auch die Wolkenbildung ist ein Niederschlag, der nur für gewöhnlich nicht an die Erde gelangt.

Wie die Ausscheidung des Wasserdampfes aus der Luft nicht ohne weiteres mit dem Erreichen des Taupunktes eintritt, kann man auch die Niederschlagsbildung nicht einfach so darstellen, daß sich bei weiterer Abkühlung der Luft neues Wasser an den bereits vorhandenen Wolkenelementen kondensiert, so daß sie wachsen und, der Anziehungskraft der Erde folgend, als Niederschlag zum Boden gelangen können. Gewiß spielt dieser Vorgang eine große Rolle, manche Formen des Niederschlages, wie die Hagelbildung, können nur durch ihn erklärt werden. Aber er ist sicherlich nicht der einzige Vorgang zur Vergrößerung der suspendierten Tröpfchen. Wir haben aus den Köhlerschen Untersuchungen gelernt, daß in den Wolken bestimmte Größen der Wolkenelemente gehäuft vorkommen, welche durch das Zusammenfließen gleicher Bausteine erklärt werden können. Daß dieses Zusammenfließen nicht nur thermodynamisch bedingt ist, weiß jeder Praktiker des Wetterdienstes.

J. v o n H a n n <sup>82)</sup> schreibt über dieses letzte, geheimnisvolle Stadium der Niederschlagsbildung: „Was gibt den ersten Anlaß zur Vereinigung der in der Luft suspendierten kleinen Wasserteilchen, welche die Wolke bilden, zu größeren Tropfen? Nicht selten sieht man schwere, dunkle Wolken lange unverändert am Himmel stehen oder dahinziehen, ohne daß sie Regen zur Erde herabsenden. Plötzlich aber scheint eine Auslösung eingetreten zu sein, und wie mit einem Male hat dann die Regenbildung die gesamten Wolkenmassen ergriffen... Welche Kräfte sind es, die das Zusammenfließen oder die Vergrößerung der Wolkenteilchen früher verhindert haben, plötzlich aber außer Wirksamkeit getreten sind? Man denkt wohl in erster Linie an elektrische Ladungen und Entladungen der Wolkenteilchen.“

Der Vorgang erinnert an die Erfahrungen mit kolloidalen Lösungen, die unter Umständen jahrelang unverändert bleiben und plötzlich beim Einbringen eines wirksamen Agens eine katastrophale Umwandlung erleben.

In derartigen kolloidalen Lösungen sind „zwei antagonistische Kräfte wirksam: anziehende Kräfte, welche die Teilchenvereinigung herbeiführen, und abstoßende elektrische Kräfte, welche eine Trennung der Teilchen erstreben. Fällt das Potential unter den kritischen Wert, so vereinigen sich die Mikronen und Ultramikronen zu flockenartigen Gebilden“ <sup>83)</sup>.

Über den Vorgang der Koagulation eines Kolloids ist man genau unterrichtet. „Nimmt man den Teilchen ihre Ladung durch geeignete Elektrolytzusätze, so wird der isoelektrische Punkt erreicht, in welchem sie keine Ladung mehr besitzen und koagulieren. Mit Annäherung an den isoelektrischen Punkt nimmt die Beständigkeit der kolloiden Lösung ab <sup>84)</sup>.“

Ob eine der Elektrolytkoagulation analoge Ausflockung auf elektrischer Grundlage in der Atmosphäre stattfindet, weiß man noch nicht: Nach Kohlschütters Ansicht ist gleichsinnige Teilchenladung als Stabilisator eines Aerosols nicht nötig. Laboratoriums- und Freiluftversuche nach dieser Richtung wären dringendst erwünscht.

Das zur Niederschlagsbildung erforderliche Zusammenfließen kleinster Tröpfchen könnte auch auf andere Weise erzwungen

werden, z. B. m e c h a n i s c h , wie man die Koagulation von kolloiden Lösungen durch Umrühren beschleunigen kann <sup>85</sup>). Eine Mikrostruktur der Luftbewegung könnte in der Lage sein, die Nebeltröpfchen selbst gegen elektrische Abstoßungskräfte zur Berührung zu bringen. A. W i g a n d meint, den vermehrten Niederschlag über Großstädten zum Teil darauf zurückführen zu können, neben dem Hinaufschaffen positiver Raumladungen durch den Reibungsaufwind. Das „Umrühren“ ist besonders wirksam, wenn die Teilchen schon eine gewisse Größe erreicht haben. Auch K ö h l e r weist auf die Bedeutung des Umrührens durch die Turbulenz bei der atmosphärischen Koagulation nachdrücklich hin <sup>86</sup>).

Daß die N i e d e r s c h l a g s b i l d u n g durch Z u s a m m e n f l i e ß e n e l e m e n t a r e r B a u s t e i n e , nämlich der Wolkenelemente, zustande kommt, ist von H. K ö h l e r direkt nachgewiesen worden <sup>87</sup>). Er hat nach der bekannten Eosinmethode die Größe der Regentropfen bestimmt und dabei Multipla der von ihm ermittelten Größe der Wolkenelemente erhalten. Es ist sehr beachtlich, daß er auf dem an der norwegischen Küste gelegenen Haldde-Observatorium nahezu dieselbe Verteilung der Tropfengrößen bekommen hat wie A. D e f a n t <sup>88</sup>) bei seinen Messungen im Binnenlande, was für eine gewisse Universalität der Kondensationskerne spricht, auf die wir schon in anderem Zusammenhange aufmerksam wurden.

Die Häufigkeitskurve der Tropfengrößen zeigt ähnlich wie die Häufigkeitskurve der Wolkenelemente Maxima und Minima; im Regen überwiegt die 8-Gruppe (siehe S. 41).

In der Meteorologie sieht man heute alles Heil in der Ermittlung von Auf- und Abgleitflächen. Gewiß sind die Niederschläge dort, wo eine wärmere und feuchtere Strömung an einer kühleren hinaufgeführt wird (Aufgleitregen), oder wo ein Emporpressen warmer, feuchter Luft durch die Unterschlebung einer kälteren Strömung erfolgt (Böenregen), unmittelbar dynamisch zu erklären. Aber für die häufigen Fälle, in denen nur ein ganz geringes Gefälle besteht, wie bei den gelegentlich über halbe Erdteile hin ausgebreiteten Landregen, braucht man noch eine andere Ursache der Regenbildung. Auch kann es aus Wolken regnen, in denen keine dynamischen oder thermodynamischen Vorgänge ersichtlich sind. Wir führen hier einen Bericht eines aufmerksamen

Beobachters (Major *Holtzhey* in Lindau) an: „Bei einem Spaziergang auf dem Pfänder habe ich die Beobachtung gemacht, daß es aus einer sehr dünnen Schicht Nebels recht tüchtig regnen kann. Oben war es ganz wolkenlos, im Rheintal und auf dem See Nebelmeer, aus dem überall die Kirchtürme herausragten. Als wir auf dem Rückwege in den Nebel hineinkamen, waren wir nach zehn Minuten durch und durch naß von ausgiebigem Tropfenregen, nicht Nebelrieseln! Dabei konnte man immer noch den Sonnenschein auf der oberen Grenze des Nebels erkennen.“ Man muß hier an Koagulationsvorgänge erinnert werden. Änderung der Raumladung (Größe und auch Vorzeichen) sowie der Kernzahl ist von *Wigand* beim Durchgehen durch eine Schichtgrenze direkt nachgewiesen worden. Man muß an solche Vorgänge denken, wenn gelegentlich „das Wetter falsch“ ist, d. h. nicht dem normalen, nur dynamisch und thermodynamisch geschauten Ablauf entspricht. Es ist auch sehr wohl denkbar, daß im Aerosol *A d s o r p t i o n s v o r g ä n g e* stattfinden, die es ermöglichen, ein Kolloid aus der Lösung zu entfernen, wie es z. B. in der Färbertechnik der Fall ist. Alle sonst bekannten Vorgänge, welche zu einer Vergrößerung suspendierter Stoffe führen, müssen auch in der Atmosphäre ihre Bedeutung haben. Daß wir vorerst noch wenig darüber wissen, ist kein Beweis, daß die Vorstellungen der Physik disperser Systeme auf die Atmosphäre nicht anwendbar wären. Gewiß haben die Teilchenabstände eine andere Größenordnung als in den Hydrosolen, dafür sind aber auch ganz andere Ladungen der fein verteilten Materie möglich, bis zu mehreren tausend Elementarladungen pro Tröpfchen. In der Atmosphäre hat man Gelegenheit, das Wachstum von molekularen Größen bis zu wahrnehmbaren Dimensionen zu verfolgen; es wird daher auch die Kolloidforschung nur Vorteil davon haben, wenn sie dem noch wenig erforschten Aerosol ihre Aufmerksamkeit zuwendet. Da ein praktisches Ziel dabei verfolgt werden kann — Entstaubung, Entfernung von Nebeln —, bringt die einschlägige Technik diesen Überlegungen großes Interesse entgegen, wie die „Mitteilungen der *Delbag*“ (Deutsche Luftfilterbaugesellschaft) erkennen lassen <sup>89)</sup>.

Leider versagt ein wichtiges Hilfsmittel, mit dem man an die Prüfung der Hypothese der Verwandtschaft von Koagulation und

Niederschlagsbildung herangehen könnte: die Messung der elektrischen Ladung der Niederschläge, weil man nicht leicht wird unterscheiden können, ob die gemessene Ladung original ist oder erst unterwegs erworben wurde. Wir brauchen nur an die L e n a r d schen Untersuchungen zu erinnern (Wasserfallelektrizität, Effekt des Zerblasens, Ionenadsorption), sowie an die Aufladung fallender, beim Fallen zusammentreffender und wieder abprallender Niederschlagsteilchen unter dem Einfluß des elektrischen Feldes der Erde (Elster und Geitel); welche kombinierten Möglichkeiten für Laden, Entladen und Umladen<sup>90)</sup>!

Von Smoluchowski hat die Beziehungen zwischen Koagulation und Teilchenladung frühzeitig erkannt. Seine Theorie der Koagulation wurde für kolloide Lösungen ausgearbeitet, weil dort die Möglichkeit einer Prüfung bestand, welche für Aerosole, wie schon mehrmals betont, so schwierig ist. Auch H. K ö h l e r<sup>91)</sup> hat auf solche Überlegungen hingewiesen. Nachdem die Aerosole in optischer und elektrischer Beziehung mit den Hydrosolen so weitgehende Übereinstimmung zeigen, sollten die Meteorologen sich auch mit den Vorgängen der Koagulation vertraut machen.

Übrigens berücksichtigen auch die reinen Dynamiker der Meteorologie die Tatsache, daß die Niederschlagsergiebigkeit durchaus nicht immer aus dem Druck- und Strömungsfelde abgeleitet werden kann. Ein wirklich großer Fortschritt der Wettervorhersage ist in dem letzten Jahrzehnt dadurch erzielt worden, daß man dem Niederschlag im System der Nachrichtenübermittlung eine stets steigende Bedeutung zuerkannt hat. Wenn eine Zirkulationsstörung (Depression) von Westen kommt, achtet man sehr darauf, welches ihre Niederschlagskraft beim Betreten der Britischen Inseln ist. Unter sonst gleichen Umständen ist sie manchmal groß, manchmal gering; wir nehmen dann an, daß das auch für ihren weiteren Weg der Fall sein werde. Mit anderen Worten, wir anerkennen ein individuelles Verhalten der Zirkulationsstörungen, das nicht aus den bekannten Bestimmungsstücken gefolgert werden kann.

Besonders eindrucksvoll ist die Feststellung, daß es, wenn es schon längere Zeit geregnet hat, „leicht regnet“, während man nach längeren Trockenzeiten bei demselben Aussehen der Druck-

und Strömungskarten das Gefühl der Trägheit in der anderen Richtung nicht los wird. Die Atmosphäre ist dann immunisiert, wie wir gelegentlich sagen. Das fehlende Bestimmungsstück scheint auf kolloidphysikalischem Gebiete zu liegen; die Worte Kondensationskerne, Stabilität von Kolloiden, Koagulation genügen zur Erklärung einer von Fall zu Fall verschieden reagierenden Atmosphäre. Da wir diese Verhältnisse nicht vorher überschauen können, müssen wir erst die Reaktion einer Störung abwarten. Wer an der Bedeutung der Kolloidforschung für die Meteorologie zweifelt, der möge einmal eine Wetterkarte anlegen, in welche nur Druck, Temperatur und Wind, aber keine Bewölkung und Hydrometeore eingetragen werden, und sich dann die Frage vorlegen, wo und in welchem Ausmaße Niederschläge augenblicklich stattfinden. Dann wird ihm klar werden, daß außer den Schichtflächen usw. noch andere Momente die Niederschlags-tätigkeit bestimmen.

Das Bewußtsein, daß nicht alle Wettervorgänge thermodynamisch zu fassen sind, kommt namentlich den aufmerksamen Beobachtern der Tropen. Es seien aus einer überaus spannenden Schilderung eines tropischen Gewitters von W. Knoche<sup>92)</sup> einige Sätze hier angefügt.

Knoche befand sich auf einer Fahrt auf dem Rio Paraguay am 3. Oktober 1927, als um 7 Uhr nachm. ein Gewitter ausbrach. „Es zog nicht herauf, es war da, und es war da, soweit das Auge blicken konnte... Es war ein vergebliches Bemühen, die Zahl der Blitze und anderen Entladungen auch nur annähernd angeben zu wollen. Durch 8 Stunden waren bestimmte Abschnitte, die man fest ins Gesichtsfeld einbezog, während  $\frac{3}{4}$  der Zeit in flackerndem Lichte so hell beleuchtet, daß jede Einzelheit zu erkennen war... Alle Entladungsformen, mit Ausnahme von Kugelblitzen, waren vorhanden. Auffallend war die große Häufigkeit von Perlschnurblitzen, die fast ebenso häufig wie die Funkenblitze auftraten. Während letztere von rotgelber Farbe waren, waren die Perlschnurblitze blendend weiß... Außerordentlich eindrucksvoll waren Blitze, welche rotierten und die Erinnerung an Sonnen, wie sie bei Feuerwerken zur Verwendung kommen, wachriefen, wie überhaupt das ganze Schauspiel einem Brillantfeuerwerk von unerhörten Dimensionen und Variationen

vergleichbar war. Zur Zeit des Höhepunktes des Gewitters sah man zenital Hunderte von leuchtenden Kreisbogen, aber durcheinandergeworfen, von denen eine derartige Lichtfülle ausging, daß man die Augen schließen mußte. In diesen Augenblicken schien ‚Feuer vom Himmel‘ zu fallen. Und fügt man hinzu, daß von 7 Uhr nachm. bis 1½ Uhr vorm. kein einziger Donner zu hören war, daß im Gegenteil eine unheimliche Stille herrschte, ohne daß sich ein Lüftchen regte oder ein Tropfen fiel, so ist das Entsetzen der Passagiere wohl zu verstehen. . . . Es sei bemerkt, daß in den 7 Monaten, die bis zum 2. Oktober verstrichen waren, im Westen des Staates Sao Paulo, in Süd-Matto Grosso, in ganz Paraguay, im ganzen Chaco sowie im Norden der argentinischen Nordprovinzen kein Tropfen Niederschlag gefallen war, die Dürre war entsetzlich. Es handelte sich um eine besonders stark ausgeprägte Trockenperiode einer ausgedehnten Region des südamerikanischen Kontinents, wie sie seit vielen Jahrzehnten nicht beobachtet worden war. . . . Ein eigentümlicher Dunst lagerte über der Savanne usw., bedingt teilweise durch feinsten Staub als Gefolge aufsteigender Luftströme, vor allem aber wohl verursacht durch die überaus zahlreichen Steppenbrände, die am Tage durch riesige Rauchsäulen sichtbar wurden, während nachts die Flammen wie Fanale zu beiden Seiten des Flusses riesenhaft emporloderten. . . . Auch am 3. Oktober herrschte während des ganzen Tages dieses charakteristische Bild vor. . . . es war äußerst schwül an Bord des Schiffes, eine Schwüle, die auch während des ganzen donnerlosen Abschnittes der Entladungen bei völliger Windstille anhielt. Wolken des aufsteigenden Luftstromes (cu, cu-ca) hatten sich nicht gebildet. Erst im Augenblick, als der Donner begann, setzte eine rapide Abkühlung ein (1½ Uhr vorm.), während eine stürmische Bö aus Süd aufkam. . . .

„Ich glaube, daß man für dieses seltsame, stille Gewitter wohl folgende Annahme machen kann:

„Über einer warmen, wasserreichen Schicht, die eine außerordentliche Ausdehnung einnimmt, lagern sich kalte Luftmassen, die von Süden hervorschieben. Wir haben also eine entschiedene Schichtung nach Temperatur und Feuchtigkeit, wie wahrscheinlich

auch Windbewegung, welche in hohem Maße Veranlassung gibt, die Schallstrahlen nach oben hin abzulenken, so daß sie den Boden überhaupt nicht erreichen, so daß eine ausgedehnte Zone des Schweigens entsteht. Es ist überaus charakteristisch, daß, nachdem eine Durchmischung der übereinanderlagernden Luftmassen eingetreten ist..., der Donner sofort einsetzt.

„Zweifellos tragen zu diesem tropischen Elementarereignis elektrischer Natur auch Zustände nicht allein thermodynamischer Natur bei, sondern solche kolloidaler Natur (Branddunst als Aerosol?).

„Nur müssen wir, falls wir dem Branddunst eine entscheidende Bedeutung für die Entstehung der Gewitterelektrizität beimessen, vielleicht unter dem Einfluß der Reibung, annehmen, daß starke Ladungen der Wolke nicht erst entstehen, wenn sich größere feste oder flüssige Niederschlagsformen gebildet haben, sondern wenn plötzliche Sprünge im Leitvermögen an der Grenze zwischen artspezifischen Dunstschichten und kondensierten Massen auftreten. Daß wahrscheinlich Dunst- resp. Haarrauch als Sol gegenüber dem Lösungsmittel Luft zu punktförmig ausströmenden, sichtbar als flächenhaften Entladungen Anlaß geben, ist gerade auch für den Chaco usw. möglich, wo irrende Entladungen in sonst wolkenlosen Nächten nicht selten sind.“

### **Praktische Verwertung kolloider Vorstellungen in der Meteorologie.**

Jeder Kolloidforscher und Kolloidtechniker weiß, daß man für die kolloiden Reaktionen nur Regeln, keine Gesetze aufstellen kann. Sie sind namentlich in der Nähe des isoelektrischen Punktes so empfindlich, daß kleine Ursachen große Wirkungen haben können. Auch in der Wettererklärung begegnet man solchen Tatsachen. Die eine ist bereits anerkannt: Die Verringerung der zur Wolkenbildung nötigen Übersättigung durch Kondensationskerne. Unter den Bestimmungsstücken, welche der heutige Wetterdienst für die Aufstellung der Wetterdiagnose verwendet — Luftdruck, Temperatur, Wind usw. —, ist der Gehalt der Atmosphäre an Kondensationskernen noch nicht enthalten. Das ganze Rüst-

zeug des Wetterdienstes ist auf Dynamik und Thermodynamik eingestellt, es gilt als das Ziel der Wettervorhersage, das kommende Wetter zu berechnen. Man versucht, auf Grund einer umfassenden Diagnose zu einer Prognose zu gelangen, und meint, daß wir zwar noch ein Jahr brauchen können, um das Wetter des morgigen Tages auf Grund des heutigen Zustandes der Atmosphäre zu berechnen, daß aber eine spätere Generation all die damit verbundene Arbeit in kürzerer Zeit zu erledigen lernen werde.

Wir teilen diesen Optimismus nicht. Man wird sich unseres Erachtens auf dem Gebiete der Wettervorhersage immer mit Wahrscheinlichkeiten an Stelle von Sicherheiten begnügen müssen<sup>93)</sup>. Einer der Gründe ist das unkontrollierbare Verhalten der Kondensationskerne, ein anderer die allerdings noch hypothetische Parallele der Niederschlagsbildung mit der Koagulation von Kolloiden.

Die Physik, welche auf die Grundlagen der Wettervorhersage gerne etwas verächtlich reagiert, darf nicht vergessen, daß es auch Naturgesetze gibt, welche in besonderen Fällen eine Berechnung der Wirkung nicht erlauben. Wenn wir den Ansatz des Gesetzes mit  $y = f(x)$  nehmen, dann ist  $\Delta y = f'(x) \Delta x$ , welches auch bei einem kleinen Zuwachs von  $x$  eine große Veränderung von  $y$  an den Stellen ergibt, wo  $f'(x)$  groß ist. Wir erinnern z. B. an die Tatsache, daß das Vorzeichen des Lenard-Effektes bei Zusatz ganz geringer Mengen von Schwefelsäure umschlägt. Nehmen wir ein solches Umschlagen des Ladungssinnes von Aerosolen an, dann wird es verständlich, daß gelegentlich bei anscheinend ganz gleichem Wetterbilde so verschiedene Niederschlagstätigkeit zu beobachten ist.

Zwingt uns sonach die Parallele meteorologischer Erscheinungen mit kolloiden Vorgängen zur Resignation, so eröffnet sie auf einem anderen Gebiete Ausblicke: Wir meinen das Problem der Wetterbeeinflussung. Es kann nicht unser Bestreben sein, das Wetter zu „machen“; das verbietet uns schon die Ehrfurcht vor den in der Witterungsgestaltung zur Auswirkung kommenden Kräften, denen gegenüber auch die stärksten Kraftanstrengungen des Menschen machtlos sind. Es sind das Vorgänge, bei welchen einer unendlich kleinen Ursache auch nur eine unendlich kleine Wirkung entspricht, zu einer greifbaren Wirkung

also auch ein entsprechender Kraftaufwand nötig wäre. Dagegen erscheint das Problem in den Fällen lösbar, in welchen die Naturkräfte bereits zur Verfügung stehen und nur der Auslösung harren.

Man kann also sehr wohl das Problem erörtern, in einer der Kondensation nahe stehenden Luftmasse die Wolkenbildung dadurch zu erleichtern, daß man ihr Kerne zuführt. Hierfür kann das Flugzeug berufen sein, an das sich bereits manche interessante Beobachtungen anschließen <sup>94)</sup>:

Einer unserer Münchener Flieger, Z. Diemer, machte am 9. und 11. Mai 1919 je einen Höhenflug, am 9. Mai zwischen 2 und 4 Uhr nachm., am 11. Mai zwischen 10 und 12 Uhr vorm. Als er etwa 7500 m erreicht hatte und nur mehr langsam höher stieg, zeichnete sich der Weg, den er beschrieb, durch eine auf dem blauen Himmel sich hellweiß abhebende Spur ab. Zunächst dachte man an das Sichtbarwerden von Auspuffgasen, die man aber auch schon und noch besser in den unteren Schichten hätte beobachten müssen. Die Veränderung, welche die Erscheinung nahm, belehrte uns aber bald, daß es sich um eine richtige Wolkenbildung handelte. Die Spur, welche auf einer Länge von 70 bis 80 km, entsprechend dem vom Flieger zurückgelegten Wege, hinzog, wurde breiter und entwickelte sich als Cirrocumulus von schönen Formen. Die Wolke kam langsam von Westen her gegen den Zenit und hatte nach einer Stunde eine horizontale Tiefe von etwa 800 bis 1000 m erlangt. Man konnte in ihr jede Phase des Auspuffmanövers abgebildet sehen. Erst mit der weiteren Verbreiterung der Wolke verwischten sich die Einzelheiten. Als die Erscheinung vor der Sonne vorüberzog, war ein Stück Sonnerring (Halo) zu sehen, ein Zeichen, daß es sich um eine Eiswolke handelte.

An beiden Tagen war die Wetterlage „zu örtlicher Gewitterbildung geneigt“; am 11. Mai kam es schon um 4½ Uhr nachm. zu Gewitterregen. Das Flugzeug griff also in eine in Vorbereitung befindliche Wolkenbildung fördernd ein, wahrscheinlich durch seine Auspuffgase, welche Kondensationskerne an die Luft abgaben. Man hatte den Eindruck einer Infektion, welche in einer hierzu disponierten Atmosphäre nach Maßgabe der Diffusionsgeschwindigkeit der Kondensationskerne (In-

fektionskeime) eine bis zur Erschöpfung derselben fortschreitende Cirrusbildung auslöste.

Daß eine *D i s p o s i t i o n* der Atmosphäre gegeben sein muß, um die Wolkenbildung zu ermöglichen, zeigte sich bei der Wiederholung der Flüge am 16. und 17. Juni 1919, von denen der letztere sogar bis 9600 m führte. Am 16. Juni, einem völlig wolkenlosen Tage, trat keinerlei Wolkenbildung ein; am 17. Juni waren am Südhimmel einige Cirren zu sehen. Als der Flieger dorthin ausbog, löste er einen schwachen Cirrusschwanz aus, der aber, wie die natürlichen Cirren, bald wieder verschwand.

Weitere Beobachtungen der Auslösung von Wolkenbildung durch ein Flugzeug sind von *L o e w e*<sup>95)</sup> und *L a u t n e r*<sup>96)</sup> be-



Abb. 9. Wolkenbildung durch ein Flugzeug (Lautner).

schrieben worden; Abb. 9 zeigt eine auf der Zugspitze gemachte Aufnahme des Phänomens.

Kondensationskerne der Stickstoffgruppe mögen bei der Erscheinung beteiligt gewesen sein, die *A. G o c k e l* beschreibt: Es ist beobachtet worden, daß ein durch einen wolkenfreien Raum gehender Blitz, der auf seinem Wege stark wasserdampfgesättigte Atmosphäre antraf, einen *N e b e l s t r e i f e n* erzeugte<sup>97)</sup>.

Hierher gehören auch die gelegentlich bei Beschießungen, Explosionen oder Bränden beobachteten Wolken- und Niederschlagsbildungen. Man hat diese Fragen namentlich während des Weltkrieges fleißig erörtert. Daß das Schießen, auch ein intensives Trommelfeuer, ohne Einfluß ist, wenn die Atmosphäre nicht

zur Niederschlagsbildung neigt, ist sicher. Nur in den Fällen, in welchen die Sättigung der Atmosphäre bis zum status nascendi gediehen ist, können die Explosionsgase wirksam werden. Das gilt auch für Schrapnellwolken, deren Studium oft sehr interessant war. An manchen Tagen wurden sie rasch der Auflösung entgegengeführt, an anderen hatte man den Eindruck der Vergrößerung und Verbreiterung, wobei natürlich die Turbulenz der Luft eine große Rolle spielt. Daß über Rauchwolken sich Haufenwolken einstellen können, ist oft beobachtet worden<sup>98)</sup>.



Abb. 10. Wolkenbildung durch Kaminrauch (Koppe und Wigand).

Industriegebiete und Großstädte sind ebenfalls Quellen lokaler Wolkenbildung. So beobachtete W. Späth<sup>99)</sup> „gelegentlich eines Flugzeugaufstieges am 23. Oktober 1918 in den Mittagsstunden in der Umgebung von Köln eine dicke Cumuluswolke auf der linken Rheinseite, die durch ihr isoliertes Auftreten überraschte. Beim Näherkommen im Gleitfluge wurde unter der Wolke ein in vollem Betriebe befindliches Eisenwerk erkannt. Die Wolke lag auf einer Dunstschicht von 500 m Höhe. Über der Dunstschicht zeigte der im Flugzeug mitgenommene Meteorograph eine Inversion an“.

Die Abb. 10, eine Ballonaufnahme, zeigt, wie sich aus mehreren Rauchfahnen von Fabrikaminen Stratusstreifen entwickeln,

die beim Weiterziehen mit dem Winde immer größer werden und sich dann rechts außerhalb des Bildes zu einer geschlossenen Wolkendecke zusammenfügen. Der Ballon flog diesen Streifen parallel, jedoch etwas höher, in einer Schwimmschicht, die in der Kondensationshöhe etwa 100 m über dem Boden begann. Ehe die Strömung die Kamine erreichte, war in der intensiven Dunstschicht so gut wie gar keine Kondensation eingetreten, wie auch neben den Streifen im Vordergrund des Bildes und unter dem Ballon, wo keine Kamine rauchten, kaum etwas Wolkenbildung auftrat. Die Dunstschicht war jedenfalls in einem Zustande nahe vor der Kondensation, und es genügte ein geringer Anlaß, sei es Hebung durch die Kaminwärme, sei es Zufuhr von Verbrennungswasserdampf oder Kernen, um die Stratusbildung auf dem Wege über die Streifen zu bewirken.

Man darf bei diesen Erscheinungen natürlich nicht vergessen, daß bei allen Verbrennungsvorgängen Wasserdampf und Wärme geliefert werden, so daß die Rolle der Kondensationskerne nicht klar herauszuschälen ist. Es gibt ein meteorologisches Paradoxon „Luft, die wir erwärmen, kühlt sich ab.“ Gemeint ist die adiabatische Temperaturerniedrigung, welche in einem durch Erwärmung ausgelösten aufsteigenden Luftstrom eintritt; wenn sie dabei unter den Taupunkt herabrückt, kann es zur Kondensation kommen. Die Wolken- und gelegentliche Gewitterbildungen über Vulkanen vereinigen alle Momente: Auftrieb durch Wärme, Zufuhr von Kernen, Abkühlung durch die konvektiven Vorgänge. Ob dabei der zur Wolkenbildung verwendete Wasserdampf aus den Eruptionsgasen oder aus der mit hochgerissenen Außenluft stammt, ist für den Bildungsprozeß solcher Wolken belanglos.

Die aschenhaltige Vulkanwolke, auch wenn sie aus trockener Asche besteht, muß als Aerosol gelten, das durch elektrostatische Kräfte im Schweben gehalten wird; denn die elektrische Entladung durch einen Blitz in der Pinienwolke des Vesuvus hat ein Herausfallen von Aschenregen zur Folge. Vulkangewitter sind stets an das Auftreten von Ascheneruptionen gebunden; je aschenreicher, desto blitzreicher sind sie <sup>100</sup>).

Die Elektrisierung der Vulkanasche erfolgt, wie bei der Aufwirbelung von Staub, durch Zerstäubung und Reibung beim Ausstoßen der trockenen Asche (Stägere), auch wohl durch Adsorp-

tion von Ionen aus den heißen Eruptionsgasen an den Aschenteilchen. Durch eine Blitzentladung wird das die geladenen Teilchen tragende luftelektrische Feld (vgl. S. 13) vernichtet, so daß die Teilchen herabfallen müssen. Daß zum Boden gelangende Aschen geladen sind, ist nachgewiesen. Der Blitz könnte auch die schwebende Asche entladen und damit die einer Vereinigung und Ausfällung der Teilchen entgegenwirkende Kraft beseitigen; wir hätten dann die Analogie zur Koagulation von Hydrosolen bei Erreichung des isoelektrischen Punkts <sup>101</sup>).

So mag auch manchmal die Steigerung des Niederschlages bei Blitzbildung, die man beide auf eine vorübergehende Verstärkung einer Aufwärtsbewegung zurückzuführen gewohnt ist, dadurch zustande kommen, daß eine Blitzentladung als der primäre Vorgang die Koagulation der Wolkenelemente veranlaßt, so daß die Zunahme des Niederschlages eine Folge der elektrischen Entladung wäre.

In diesen Zusammenhang gehört auch die Tatsache, daß Großstädte einen Einfluß auf die Niederschlagsbildung ausüben. Schmauss hat in einer Studie <sup>102</sup>) nachgewiesen, daß das Zentrum von München nicht dieselben Niederschlagsverhältnisse aufweist wie eine Außenstation. Es hat sich gezeigt, daß die Innenstadt einen Überschuß an Schwachregen, daneben einen Überschuß an Starkregen hat. Das reichlichere Angebot an Kondensationskernen ist wohl für die ersteren verantwortlich, der Reibungsaufwind und das damit gegebene Emporheben von positiver Raumladung für die letzteren (vgl. S. 50). Daneben mag auch eine thermodynamische Erklärung Geltung haben, wie sie z. B. H. Seilkopf gegeben hat <sup>103</sup>): „Als weiterer wetterverschlechternder Faktor kommt hinzu, daß über größeren Städten — namentlich wenn ihr Profil aus einer Ebene geringer Reibung herauswächst — sich infolge der verstärkten Reibung eine Turbulenzzone mit adiabatischem Temperaturgefälle ausbildet. Herrscht im ungestörten Strömungsfelde schwächeres Temperaturgefälle, so kann innerhalb der Brandungszone die Kondensationshöhe gesenkt werden.“ Die entsprechende Senkung einer Wolkendecke gegenüber der Umgebung wird beispielsweise über Hamburg häufig beobachtet. „Gelegentlich können sich durch den Reibungsaufwind niedrige Wolken ausbilden, während die Umgebung keine oder nur hohe Bewölkung

aufweist... Über dem luvseitigen Teil der Stadt bilden sich dichtgedrängt in 150 bis 200 m Höhe Fractocumuluswolken, besonders schön vom Flugzeug aus sichtbar. Der Wolkenrand pflegt das Weichbild der Stadt überraschend abzubilden.“

Wir werden aber auch an die Theorie von E. Bandl<sup>104)</sup> erinnern, welcher das Auftreten feiner Bewölkung an bestimmten Bergen vor einer Witterungsänderung mit dem Ausströmen radioaktiver Luft aus Erdspalten in Verbindung gebracht hat. Wir verweisen ferner auf die Veränderungen, welche kolloide Lösungen unter dem Einfluß von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen erfahren, indem  $\alpha$ -Strahlen entladend auf negative,  $\beta$ -Strahlen auf positive Kolloidteilchen wirken. Welche Bedeutung den radioaktiven Vorgängen zukommt, hat schon Frau Curie festgestellt<sup>105)</sup>. Außer den Radiumstrahlen kann auch Radiumemanation die Kondensation von Wasserdampf hervorrufen, „aber der Vorgang ist ein anderer in dem Falle, daß man nur die durchdringenden Strahlen benutzt, insofern, als der Wasserdampf nicht übersättigt oder auch nur gesättigt zu sein braucht. Ein Gefäß, welches destilliertes Wasser und mit Emanation durchsetzte Luft enthält, die auf konstanter Temperatur erhalten wird, enthält nichtsdestoweniger einen permanenten Nebel, der im elektrischen Bogenlicht sichtbar ist... Kondensationskerne können in diesem Falle nicht die in dem Gas erzeugten Ionen sein, da dann eine Übersättigung für die Kondensation notwendig wäre“.

Es finden sich viele Einzelbeobachtungen über den Einfluß elektrischer Kräfte auf die Veränderung von suspendierten Tröpfchen; so berichtet A. Gockel<sup>106)</sup>, daß, wenn man einem kleinen Zimmerspringbrunnen eine geriebene Siegelackstange nähert, statt der vielen kleinen Tröpfchen weniger, aber größere fallen, daß also unter dem Einfluß des elektrischen Feldes ein Zusammenfließen von Tröpfchen stattgefunden hat. Die Beobachtung hat Ähnlichkeit mit dem von R. v. Helmholtz und Richarz am Dampfstrahl ausgeführten Experiment, ihre Deutung ist aber noch unsicher. Wir wiederholen darum auch hier die schon öfter ausgesprochene Bitte an die Kolloidforscher, den Aerosolen ihre Aufmerksamkeit zuzuwenden, an denen Vorgänge studiert werden können, die sich in Hydrosolen kaum fassen lassen. Eine Reihe von sehr beachtenswerten Vorschlägen nach dieser Richtung

sind in dem Buche von A. W e n d l e r enthalten, in welchem auch ein wertvolles Literaturverzeichnis über die bisherigen Leistungen auf diesem noch unerschlossenen Gebiete zu finden ist<sup>107)</sup>.

Man kennt die Volksregel, daß es „schlecht Wetter wird, wenn es den Rauch herabdrückt“. Ein dynamischer oder thermodynamischer Grund hierfür ist uns nicht bekannt. Wenn der Rauch aufsteigt, gehen seine Teilchen als Aerosol in Lösung und werden damit Bestandteile der Atmosphäre. Wird aber der Rauch herabgedrückt, dann besitzt die Atmosphäre keine „solbildende Kraft“. Das Ausfallen ist ein Vorbote der Koagulation der Wolke. Das kann entweder durch Entladung geschehen oder durch Beschwerung infolge einer an den Rauchteilchen stattfindenden Kondensation, welche einen Rückschluß auf die „Niederschlagsneigung“ der Atmosphäre überhaupt erlaubt. Die Elektrisierung der Rauchpartikelchen kann man sich durch Reibungsprozesse sowie durch die Adsorption solcher Ionen entstanden denken, die beim Verbrennungs- und Glühprozeß gebildet werden.

Auf der elektrischen Ladung der Suspensionen beruht der Gedanke, sie aus der Atmosphäre herauszuschaffen, um eine Besserung der Sicht, eine Verminderung der Nebelplage zu erreichen. Der Vorkämpfer dieses Gedankens war O. L o d g e in England; in neuerer Zeit macht insbesondere das Entstaubungsverfahren von C o t t r e l l in Amerika und M ö l l e r in Deutschland von sich reden. —

Zum Schluß eine Hervorhebung charakteristischer Unterschiede der elektrischen Eigenschaften von Hydrosol und Aerosol, soweit nicht schon vorher darauf hingewiesen wurde:

Im Hydrosol ist es das Wassermedium, das mit seiner hohen Dielektrizitätskonstante als wesentliche Ursache am Zustandekommen der elektrischen Eigenschaften beteiligt ist (C o e h n); dadurch wird die elektrische Doppelschicht am Kolloidteilchen und seine Aufladung bei der Adsorption elektrolytischer Ionen bestimmt.

Beim Aerosol, wenn es sich (wie meist in der Atmosphäre) um ein Wasser-Aerosol handelt, hat die disperse Phase die hohe Dielektrizitätskonstante. Die elektrische Doppelschicht liegt nach L e n a r d mit ihren beiden Belegungen in der Oberflächenschicht

des Wassertröpfchens. Wird sie beim Wasserfalleffekt oder durch Zerblasen zerteilt, so tritt entgegengesetzte Aufladung des Tröpfchens und der umgebenden Luft ein.

Aber auch ohne solche Zerteilungsvorgänge kann die Doppelschicht des Tröpfchens dahin wirken, daß sich die Teilchen eines Wasser-Aerosols in ionisierter Luft bei der Ionenadsorption vorwiegend gleichsinnig aufladen. Die anfangs ungeladenen Tröpfchen eines Wassernebels, entstanden durch Kondensation auf ungeladenen Kernen, werden vorwiegend Ionen des einen Vorzeichens aufnehmen, weil die Außenbelegung der Doppelschicht entgegengesetzt geladen ist und von der mehr im Innern des Tröpfchens liegenden Innenbelegung einen gewissen Abstand hat. Ist das Ion bei seiner Wärmebewegung so nahe herangekommen, daß seine Entfernung nicht mehr groß ist gegen den Abstand der beiden Belegungen der Doppelschicht, so wird es angezogen. Die mit der Außenbelegung gleichsinnig geladenen Ionen werden in diesem Falle abgestoßen. Ein Nebeltröpfchen aus reinem Wasser, dessen Doppelschicht außen negativ ist, müßte sich durch solche Ionenadsorption leichter positiv als negativ aufladen. Bei geringer Elektrolytkonzentration im Wassertröpfchen kehrt sich die Wirkung um. Es können aber bei diesem Vorgang nur solche Ionen abgestoßen werden, die mit geringer Geschwindigkeit ankommen. Bei größerer Geschwindigkeit wird die kinetische Energie des Ions auch gegen das elektrostatische Feld der Außenbelegung der Doppelschicht oder einer bereits auf dem Tröpfchen befindlichen Ladung zur Adsorption führen können, so daß sich in Luft mit überwiegender Ionenzahl eines Vorzeichens hohe gleichsinnige Aufladung der Aerosolteilchen ausbilden kann. Wie und bis zu welchem Betrage eine solche gleichsinnige Aufladung mit vielen Elementarladungen pro Teilchen durch Ionenadsorption in Abhängigkeit von der Teilchengröße möglich ist, haben die Untersuchungen von *Arendt* und *Kallmann*<sup>23)</sup> (S. 5) gelehrt.

Während das *Hydrosol* einen elektrisch wie auch mechanisch und hydrodynamisch stabilen Gleichgewichtszustand von unbegrenzter Dauer darstellen kann, befindet sich ein *Aerosol* günstigstenfalls nur in einem stationären Gleichgewicht. Seine Beständigkeit ist eine statistische, indem zwar das

Aerosol als Ganzes zwischen den Vorgängen des Entstehens und Vergehens balancieren und trotz Stoffwechsels beständig erscheinen kann, während die individuellen dispersen Teilchen, aus denen es zusammengesetzt ist, wechseln, weil sie nur eine beschränkte Lebensdauer haben. Den Vergleich mit einem Lebewesen, das dem Stoffwechsel unterworfen ist und doch seine Identität bewahrt, dessen Lebensgeschichte, Jugend und Alter für seinen Zustand bestimmend sind, verwendet der Meteorologe mit Vorliebe, wenn er sich und Anderen das Wesen der Wolke, dieses typischen Aerosols, klarmachen will.

### Schlußbetrachtung.

In den vorliegenden Ausführungen ist ein Stück der Not enthalten, in welcher sich der praktische Wetterdienst befindet. Man muß es aussprechen, daß für die Vorausbestimmung des Wetters leider nicht die Faktoren die ausschlaggebende Rolle spielen, die wir exakt zu ermitteln in der Lage sind. Daß das Wetter vom Luftdruck, den wir so genau als gewünscht messen können, nicht abhängt, weiß jeder Laie. Daß die Temperatur Null Grad nicht die Bedeutung hat, wie es uns angenehm wäre, haben wir an der Tatsache der Unterkühlung des Wassers kennengelernt. Den Taupunkt der Luft können wir mit aller wünschenswerten Genauigkeit errechnen, aber die Kondensation des Wassers in der Luft erfolgt bei anderen Temperaturen. Wir können die allgemeinen Bedingungen für Nebelbildung genau angeben; im Einzelfalle aber hängt sie von Zufälligkeiten ab. Das quantitativ Unbedeutende, das auch in anderen Disziplinen bedeutungsvoll werden kann — man denke an Hormone, Vitamine, Homöopathie usw. —, stellt sich unserem Streben nach einer exakten Wettervorhersage in den Weg. Darum müssen wir Hilfe von den Kolloidforschern erbitten. Die meteorologischen Probleme ihnen aufzuzeigen, war die Hauptaufgabe dieser Abhandlung, wie umgekehrt die Mahnung an unsere meteorologischen Kollegen, die Ergebnisse der Kolloidforschung nicht außer acht zu lassen.

### Literaturverzeichnis.

- 1) A. Schmauss, Meteorol. Zeitschr. 1919, S. 16; 1920, S. 1.
- 2) J. M. Pernter und F. M. Exner, Meteorologische Optik, 2. Aufl. Wien und Leipzig bei W. Braunnüller, 1922. 907 S. mit 243 Figuren und einer farbigen Tafel.
- 3) W. Busse, Ann. d. Phys. 81, 587, 1926; 84, 327, 1927.
- 4) H. Schilling, Ann. d. Phys. 83, 23, 1927.
- 5) P. Lenard, Ann. d. Phys. 41, 91, 1913.
- 6) L. B. Loeb, Ann. d. Phys. 84, 689, 1927.
- 7) V. F. Hess, Wien. Ber. [2 a] 136, 603, 1927; Phys. Zeitschr. 28, 882, 1927.
- 8) A. Wegener, Thermodynamik der Atmosphäre, Leipzig 1911, S. 73 bis 75.
- 9) P. Langevin, Compt. rend. 140, 232, 1905.
- 10) P. Lenard, Ann. d. Phys. 1, 486, 1900; 3, 289, 1900; P. Lenard und C. Ramsauer, Heidelb. Ber. 1910, Abh. 31 u. 32; 1911, Abh. 24; Meteorol. Zeitschr. 1912, S. 150.
- 11) A. Wigand, Meteorol. Zeitschr. 1913, S. 17.
- 12) B. Chauveau, Le Radium 9, 161, 1912.
- 13) E. H. Booth, Journ. and Proc. R. Soc. New South Wales 57, 173, 1923; Meteorol. Zeitschr. 1925, S. 251 (Referat).
- 14) A. Wegener, l. c. (8), S. 251.
- 15) J. MacLaughlin, Compt. rend. 184, 1183 u. 1571, 1927.
- 16) Nach V. F. Hess, Die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre und ihre Ursachen. Braunschweig 1926, S. 51.
- 17) J. A. Mac Clelland u. H. Kennedy, Proc. R. Irish Acad. (A) 30, 72, 1912; 32, 1, 1913.
- 18) J. J. Nolan, R. K. Boylan u. G. P. de Sacy, Proc. R. Irish Acad. (A) 37, 1, 1925; Meteorol. Zeitschr. 1927, S. 154 (Referat); J. J. Nolan u. G. P. de Sacy, Proc. R. Irish Acad. (A) 37, 71, 1927; Meteorol. Zeitschr. 1927, S. 156 (Referat).
- 19) J. A. Pollock, Le Radium 6, 129, 1909; Phil. Mag. (6) 29, 514 u. 636, 1915.
- 20) A. Gockel, Neue Denkschr. d. Schweiz. Naturf. Ges. 54, Abh. 1, 1917.
- 21) A. Wigand, Beitr. zur Physik d. freien Atm. 5, 178, 1913.
- 22) Nach H. Mache u. E. v. Schweidler, Die atm. Elektrizität. Braunschweig 1909, S. 98.
- 23) P. Arendt u. H. Kallmann, Zeitschr. f. Phys. 35, 421, 1926.
- 24) A. Wegener, l. c. (8) S. 71.
- 25) Zusammenfassung in: W. Schmidt, Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen. Probleme der kosmischen Physik, Heft VII. Hamburg, Henri Grand, 1925.
- 26) Literatur über die Staubtrübung der Atmosphäre von 1909 bis 1926 bei: F. Lindholm, Gerlands Beiträge zur Geophysik 18, 127, 1927.
- 27) P. Lenard, vgl. H. Freundlich, Kapillarchemie, 2. Aufl., 1922, S. 20.

- 28) J. Kiessling, Meteorol. Zeitschr. 1884, S. 117.  
29) W. Schmidt, Meteorol. Zeitschr. 1909, S. 183.  
30) L. Vegard, Die Naturwissensch. 1925, S. 545.  
31) H. Freundlich, Kapillarchemie, 2. Aufl., 1922, S. 1083.  
32) V. Kohlschütter, Kolloidzeitschr. **42**, 209, 1927; Referat Meteorol. Zeitschr. 1927, S. 473 (Schmauss).  
33) W. Schmidt, Meteorol. Zeitschr. 1913, S. 171.  
34) E. Barkow, Meteorol. Zeitschr. 1915, S. 97; Ann. der Hydrogr. 1917, S. 45.  
35) A. Wegener, Meteorol. Zeitschr. 1920, S. 231.  
36) Vgl. das zusammenfassende Referat von L. Schiller, Phys. Zeitschr. **26**, 566, 1925.  
37) A. Wigand, Ann. d. Phys. **59**, 689, 1919.  
38) Vgl. A. Schmauss, Meteorol. Zeitschr. 1921, S. 8.  
39) C. G. T. Morison, Die Naturwissensch. 1925, S. 731 (aus Nature vom 16. Mai 1925).  
40) O. Baudisch und L. Wels, Die Naturwissensch. 1925, S. 749.  
41) H. Freundlich, Kapillarchemie, 2. Aufl., 1922, S. 63.  
42) H. Freundlich, Kapillarchemie, 2. Aufl., 1922, S. 66.  
43) P. Lenard, Heidelb. Akad. Ber. 1914; A. Bühl, Ann. d. Phys. **83**, 1220, 1927.  
44) N. Gudris und L. Kulikowa, Zeitschr. f. Phys. **25**, 121, 1924.  
45) Vgl. Die Theorie bei H. Freundlich, l. c. S. 1063.  
46) H. Freundlich, l. c. S. 1064.  
47) H. Gerdien, Jahrbuch d. Radioakt. u. Elektronik **1**, 24, 1904.  
48) A. Wigand, Meteorol. Zeitschr. 1913, S. 10.  
49) A. Wigand, Ann. d. Phys. **59**, 693, 1919.  
50) C. Braak, Verh. Konk. Magn. en Met. Obs. Batavia No. 10, S. 14, 1922.  
51) H. Freundlich, l. c. S. 1067.  
52) A. Wegener, Meteorol. Zeitschr. 1920, S. 8.  
53) J. von Hann, Handb. d. Klimatologie, Bd. III, 3. Aufl., 1911, S. 643.  
54) A. Wigand, l. c. (49) S. 721.  
55) A. Wegener, Meteorol. Zeitschr. 1910, S. 451.  
56) A. Wigand, Meteorol. Zeitschr. 1919, S. 342; 1924, S. 216; A. P e p p l e r, Beitr. zur Physik d. freien Atm. **13**, 98, 1927.  
57) F. Linke, Beitr. zur Physik d. freien Atm. **10**, 91, 1922.  
58) W. Milch, Meteorol. Zeitschr. 1924, S. 109.  
59) H. Solberg und C. Störmer, Geofysiske Publ. vol. III, No. 12, 1925.  
60) F. Linke, Göttinger Abh., math.-phys. Kl. N. F. **3**, Nr. 5, 1904.  
61) F. Herath, Beitr. zur Physik d. freien Atm. **9**, 12, 1920; Sonderheft 1922, S. 56; Zeitschr. f. techn. Phys. **4**, 116, 1923; Mitteil. des Aeronautischen Observatoriums Lindenberg 1923.  
62) A. Wigand, Ann. d. Phys. **66**, 81, 1921; **85**, 333, 1928; E. Everling und A. Wigand, Ann. d. Phys. **66**, 261, 1921.  
63) A. Wigand, l. c. (49) S. 717.  
64) H. Freundlich, l. c. S. 221.  
65) W. Hartmann, Wetter 1924, S. 129.

- <sup>66)</sup> G. Melander, Ann. d. Hydr. u. mart. Met., Köppenheft 1926, S. 65.
- <sup>67)</sup> G. Lüdelling, Ber. Potsdamer Observat. 1904, S. XVII.
- <sup>68)</sup> H. Köhler, Zusammengestellt in Meddellanden från Statens Meteorologisk-Hydrografiska-Anstalt, Stockholm 1925, Bd. 2, No. 5. Ferner: Zur Kondensation des Wasserdampfes in der Atmosphäre, Geofysiske Publicationer, Vol. II, No. 1 u. 6; Meteorol. Zeitschr. 1927, S. 41.
- <sup>69)</sup> F. Albrecht, Sonnenblickvereinsbericht 1924, S. 11.
- <sup>70)</sup> J. Szolnoki, Zeitschr. f. angew. Meteorologie 1928, S. 62.
- <sup>71)</sup> J. M. Pernter und F. M. Exner, Meteorol. Optik, 2. Aufl. 1922, S. 482. Weitere Literatur über Tröpfchengröße: J. M. Pernter, Meteorol. Zeitschr. 1906, S. 378 (Hann-Band); V. Conrad, Meteorol. Zeitschr. 1907, S. 159; A. Wagner, Wien. Ber. 1908, S. 1287; H. Köhler, Meteorol. Zeitschr. 1923, S. 257.
- <sup>72)</sup> A. Defant, Meteorol. Zeitschr. 1905, S. 321; W. Schmidt, Meteorol. Zeitschr. 1908, S. 496. Vgl. auch F. Albrecht, Sonnenblickvereinsbericht 1924, S. 11.
- <sup>73)</sup> K. Köhler, Elektrizität der Gewitter, Sammlung Borntraeger, Band 3, S. 44, 1924; A. Wigand, l. c. (49) S. 72<sup>o</sup>.
- <sup>74)</sup> A. Wigand, Phys. Zeitschr. 27, 803, 1926.
- <sup>75)</sup> P. Beyersdorfer, Zeitschr. des Vereins der Deutschen Zuckerindustrie, 1922, S. 475.
- <sup>76)</sup> G. Jaeckel, ebendort 1923, S. 117; G. Jaeckel und P. Beyersdorfer, ebendort 1923, S. 136. Zusammenfassung in der Monographie von P. Beyersdorfer, Staubexplosionen. Dresden und Leipzig, Th. Steinkopff, 1925.
- <sup>77)</sup> P. Beyersdorfer und F. Kercher, Über eine elektr. Entladung in einer Straßenstaubwolke, Meteorol. Zeitschr. 1922, S. 395.
- <sup>78)</sup> A. Stäger, Gerlands Beitr. zur Geophysik 16, 277, 1927.
- <sup>79)</sup> P. Beyersdorfer, l. c. (76) S. 12.
- <sup>80)</sup> E. Hückel, Adsorption und Kapillarkondensation, aus der Sammlung Kolloidforschung in Einzeldarstellung, Bd. 7, 1928. Leipzig, Akadem. Verlagsgesellschaft.
- <sup>81)</sup> V. Kohlschütter, l. c. (32).
- <sup>82)</sup> J. von Hann, Lehrbuch der Meteorologie, 3. Aufl., S. 304; 4. Aufl., S. 320, 1926.
- <sup>83)</sup> R. Zsigmondy, Kolloidchemie, 2. Aufl., S. 63.
- <sup>84)</sup> R. Zsigmondy, l. c. S. 62.
- <sup>85)</sup> Vgl. H. Freundlich und H. Kroch, Die Naturwissensch. 1926, S. 1206.
- <sup>86)</sup> H. Köhler, Meteorol. Zeitschr. 1927, S. 44.
- <sup>87)</sup> H. Köhler, Über Tropfengruppen in Wolken, Meteorol. Zeitschr. 1925, S. 137. Über (Regen-)Tropfengruppen, Meteorol. Zeitschr. 1925, S. 463.
- <sup>88)</sup> A. Defant, Wien. Ber. (math.-naturw. Kl.) 114, 585, 1905; Meteorol. Zeitschr. 1905, S. 321.
- <sup>89)</sup> Vgl. in England die Reports der Commission for the Atmosph. Pollution. (Met. Office London.)
- <sup>90)</sup> Literatur hierüber siehe K. Köhler, l. c. (73) S. 60.
- <sup>91)</sup> H. Köhler, Meteorol. Zeitschr. 1927, S. 41.

- <sup>92)</sup> W. Knoche, Meteorol. Zeitschr. 1928, S. 100.
- <sup>93)</sup> Vgl. A. Schmauss, Das Problem der Wettervorhersage. Hamburg, Henri Grand, 1923.
- <sup>94)</sup> A. Schmauss, Meteorol. Zeitschr. 1919, S. 265; 1920, S. 152.
- <sup>95)</sup> F. Loewe, Mitt. d. Aeron. Obs. Lindenberg 1928, S. 161.
- <sup>96)</sup> P. Lautner, Meteorol. Zeitschr. 1928, S. 349.
- <sup>97)</sup> A. Gockel, Das Gewitter, 1925, S. 191.
- <sup>98)</sup> Vgl. z. B.: E. Zinner, Meteorol. Zeitschr. 1917, S. 264; R. Ettenreich, Meteorol. Zeitschr. 1919, S. 355; H. Hergesell, Das Wetter 1917, S. 178; E. Naegler, Das Wetter 1917, S. 179.
- <sup>99)</sup> W. Späth, Meteorol. Zeitschr. 1920, S. 105.
- <sup>100)</sup> A. Stäger, Zeitschr. f. Geophys. 1, 209, 1924/25.
- <sup>101)</sup> R. Zsigmondy, Kolloidchemie, 2. Aufl., 1918, S. 34; A. Schmauss, Meteorol. Zeitschr. 1923, S. 84; A. Stäger, Gerlands Beitr. 16, 298, 1927; Kolloidzeitschr. 42, 223, 1927.
- <sup>102)</sup> A. Schmauss, Meteorol. Zeitschr. 1927, S. 339.
- <sup>103)</sup> H. Seilkopf, Ann. d. Hydr. u. marit. Meteorol. 1928, S. 116.
- <sup>104)</sup> E. Bandl, Meteorol. Zeitschr. 1916, S. 366.
- <sup>105)</sup> Me. Curie, Die Radioaktivität, Leipzig 1912, S. 237.
- <sup>106)</sup> A. Gockel, Das Wetter 1920, S. 7.
- <sup>107)</sup> A. Wendler, Das Problem der technischen Wetterbeeinflussung. Hamburg, Henri Grand, 1927.

# Namenregister.

(Die Zahlen bedeuten die Seiten.)

**Aitken** 25, 30, 32, 42.  
**Albrecht** 39, 42.  
**Arendt** 5, 44, 64.

**Bandl** 62.  
**Barkow** 16.  
**Baudisch** 19.  
**Beyersdorfer** 45, 46.  
**Booth** 4, 7.  
**Boylan** 5, 6.  
**Braak** 25.  
**Bühl** 21.  
**Busse** 1.

**Cantor** 35.  
**Chauveau** 2, 4.  
**Coehn** 63.  
**Conrad** 40.  
**Cottrell** 63.  
**Curie** 62.

**Defant** 42, 50.  
**Delbag** 51.  
**Diemer** 57.

**Ebert** 6.  
**Elster** 52.  
**Ettenreich** 59.  
**Everling** 32.  
**Exner** 1, 40.

**Freundlich** 11, 13, 20,  
21, 23, 24, 26, 35, 50.

**Geitel** 52.  
**Gerdien** 25.  
**Gerke** 46.  
**Gockel** 5, 6, 7, 58, 62.  
**Gray** 14, 16.  
**Gudris** 22.

**Halley** 8.  
**Hann** 28, 49.  
**Hartmann** 36.  
**Helmholtz, R. v.** 62.  
**Herath** 32.  
**Hergesell** 59.

**Hess** 2, 6.  
**Holtzhey** 51.  
**Hückel** 46.  
**Hughes** 25.

**Jaeckel** 45.

**Kähler** 42, 52.  
**Kallmann** 5, 44, 64.  
**Kennedy** 6.  
**Kercher** 46.  
**Kiessling** 11.  
**Kirchhoff** 7, 12.  
**Knoche** 53.  
**Köhler** 36–43, 48, 50, 52.  
**Kohlschütter** 13, 15, 16,  
46, 49.  
**Koppe** 25, 59.  
**Kroch** 50.  
**Kulikowa** 22.

**Langevin** 4, 6.  
**Lantner** 58.  
**Lenard** 2, 4, 11, 21, 25,  
52, 56, 63.  
**Lindholm** 9.  
**Linke** 30, 31, 32.  
**Lodge** 63.  
**Loeb** 2.  
**Loewe** 58.  
**Loschmidt** 3.  
**Lüdeling** 36.

**Mac Clelland** 6.  
**Mache** 6.  
**Mac Laughlin** 4, 6.  
**Melander** 36, 37.  
**Milch** 31.  
**Möller** 63.  
**Morison** 19.

**Naegler** 59.  
**Nolan** 5, 6, 7.

**Owen** 25.

**Peppler, A.** 30.  
**Pernter** 1, 10, 40.

**Pforte** 45.  
**Pollock** 5, 6, 7.

**Ramsauer** 4, 25.  
**Richarz** 25, 62.  
**Roozeboom** 26.  
**Rutherford** 3.

**Sachy, de** 5, 6.  
**Schiller** 18.  
**Schilling** 2.  
**Schmauss III**, 13, 16, 19,  
35, 56, 57, 61.  
**Schmidt, W.** 8, 12, 16, 42.  
**Schweidler, v.** 6.  
**Seilkopf** 61.  
**Smoluchowski, v.** 52.  
**Solberg** 31.  
**Späth** 59.  
**Stäger** 46, 60, 61.  
**Störmer** 31.  
**Stokes** 7, 12.  
**Swann** 6.  
**Szolnoki** 39.

**Thomson** 2, 3.  
**Tyndall** 1.

**Vegard** 12, 13.

**Wagner** 40.  
**Weber** 9.  
**Wegener, A.** 3, 4, 7, 9,  
16, 18, 26, 28, 29, 39.  
**Wells** 46.  
**Wels** 19.  
**Wendler** 63.  
**Whytlaw** 14, 16.  
**Wigand III**, 4, 6, 18, 25,  
28, 29, 30, 32, 33, 42,  
44, 50, 51, 59.  
**Wilson** 3, 23, 24.  
**Wittenbecher** 44.

**Zinner** 59.  
**Zsigmondy III**, 14, 49, 61.

# Sachregister.

(Die Zahlen bedeuten die Seiten.)

- Abscheidung durch Lichtwirkung** 19.  
**Absetzen der Luft Suspensionen** 13—20.  
**Adsorption in der Grenzschicht des Tropfens** 21.  
— von Ionen 4, 5, 44, 64.  
**Adsorptionsvorgänge** 46, 51.  
**Aerosol** 1.  
**Aggregation, Änderung mit der Gasdichte** 16—17.  
—, Steigerung durch Altern 15.  
—, — — elektrische Kräfte 16.  
**Alterung von Aerosolen** 13—16.  
**Anzahl der Großionen** 4—6.  
— — Kleinionen 2, 3, 6.  
— — Kondensationskerne 33, 42.  
— — Mittelionen 5—6.  
— — Wolkenelemente 42.  
**Art der Kondensationskerne** 25—26, 35—42.  
**Asche, vulkanische** 8—9, 46, 60—61.  
**Atem, rauschender** 28.  
**Aufladung der Teilchen durch Ionenadsorption** 4, 5, 44, 64.  
**Ausatmungswolken** 27—29.  
**Auslösung** 57.  
— der Niederschlagsbildung 49.  
— von Wolkenbildung 57—60.  
**Auspuffgase** 57—58.  
**Austausch** 8, 12, 13.
- Benetzbarkeit der Kondensationskerne** 35.  
**Berechnung des Wetters** 56, 65.  
**Beständigkeit der Wolken** 21—22.  
**Beweglichkeit der Großionen** 4.  
— — Kleinionen 1—2.  
— — der Mittelionen 5.
- Bewegung der Luftionen im elektrostatischen Felde der Erde** 7—8.  
— — — im Schwerfeld der Erde 7.  
— — — Luft Suspensionen 12—13.  
**Bläschentheorie der Wolken** 11.  
**Blitz, Bildung eines Nebelstreifens durch einen** 58.  
**Blitzbildung, Steigerung des Niederschlags bei** 61.  
**Blitze, tropische** 53—54.  
—, vulkanische 60—61.  
**Branddunst** 55.
- Chemische Kondensationskerne** 35.  
**Chlorgehalt der Wolken** 37.  
**Chlornatriumgehalt der Wolkenteilchen** 37—39.  
**Cirren** 10—11, 29—30, 57—58.  
—, Kondensationskerne der 29—30.
- Dampfstrahlphänomen** 28, 62.  
**Dampf Wolken, elektrische Ladung von** 47.  
**Dielektrizitätskonstante** 63.  
**Dispersion des Mediums** 48.  
**Dispersionskraft des Windes** 43.  
**Disposition der Atmosphäre zu Wolkenbildung** 57—58.  
**Doppelschicht, elektrische, in der Grenzschicht des Tropfens** 21, 63.  
**Drahtlose Empfangsstörungen** 32.  
— Reichweite 32.  
**Dunst** 9, 54—55.
- Eis, Kondensation auf** 29.  
**Eiskondensation** 26, 29.  
**Eisstaub** 10.

Elektrische Doppelschicht in der Grenzschicht des Tropfens 21, 63.  
— Eigenschaften der Luftkörper 32.  
— Entladungen in Staubstürmen 46.  
— — — tropischen Gewittern 53—54.  
— — — vulkanischen Gewittern 46.  
— Ladung von Dampfwolken 47.  
— — der Großionen 5.  
— — — Kleinionen 3.  
— — — Nebeltröpfchen 43—44, 47.  
— — — Niederschläge 52.  
— — von Rauch 46—47, 63.  
— — — Staub 44—46.  
— — der Vulkanasche 60—61.  
Entladung der Vulkanasche 61.  
— — Wolkenteilchen 49.  
—, Koagulation durch 49.  
Entnebelung 51, 63.  
Entstaubung 51, 63.  
Etagen, Anordnung der Wolken nach 18, 23, 39.  
— in der vertikalen Kernverteilung 33—34.  
**Frostübersättigung** 26—27.  
**Gewitter, tropische** 53—55.  
—, vulkanische 46, 60—61.  
Gleichgewicht, stationäres, im Aerosol 64—65.  
Grenzflächen der Suspensionen 20—21.  
Größe der Dunstteilchen 9.  
— — Großionen 4, 7.  
— — Kleinionen 2.  
— — Mittlionen 5, 7.  
— — Meeressalzkerne 37.  
— — Nebelteilchen, Wolkenteilchen 10, 37—43.  
— — Regentropfen 50.  
Großionen 4—8.  
Großstadtnebel 22, 35—36.  
Großstadtniederschläge 50, 61.  
Großstadt, Wolkenbildung über einer 61—62.  
**Haarrauch** 55.  
**Hydrometeore** 9—11.  
**Hygroskopische Kerne** 36—37.  
**Infektion** 57—58.  
**Industrielle Keime** 35.

Inversionsschichten, Verteilung der Kondensationskerne in 18.  
**Ionen** 1—8, 25, 64.  
Ionenadsorption 4, 5, 44, 64.  
Isoelektrischer Punkt 49, 55, 61.  
**Kerne der Eiskondensation** 27—30.  
Kernwirkung der Großionen 4, 5, 7.  
— — Kleinionen 2—4, 23—25, 28.  
— von Staub 25.  
Kleinionen 2—4, 6—8.  
Koagulation 49—53, 56, 61.  
Koagulation durch Entladung 49, 52, 61.  
— — Umrühren 50.  
Kolloid, die Atmosphäre als 1.  
Kolloidforschung und Meteorologie III, 65.  
Kometenstaub 8.  
Kondensation auf Eis 29.  
— — Ionen 2—5, 7, 23—25, 28.  
— durch Radiumstrahlen 62.  
— des Wasserdampfes 23—30.  
Kondensationshöhe, Senkung der — in einer Turbulenzzone 61.  
Kondensationskerne, Art der 25—26, 35—42.  
— aus Auspuffgasen 57.  
—, Bildung durch ultraviolettes Licht 25.  
—, chemische 35.  
—, hygroskopische 36—37.  
—, industrielle 35.  
— aus Meeressalz 36—39.  
—, Natur der 25—26, 35—42.  
— im Rauch 59, 63.  
— der Stickstoffgruppe 58.  
—, Verteilung in Inversionsschichten 18.  
—, vertikale Verteilung der 33—34.  
— bei der Wetterdiagnose 55—56.  
—, Zahl der 33—34.  
—, Zuführung von 35, 57—59, 61.  
Kosmischer Staub 8, 30.  
**Ladung von Dampfwolken** 47.  
— der Großionen 5.  
— — Kleinionen 3.  
— — Nebeltröpfchen 43—44, 47.  
— — Niederschläge 52.  
— von Rauch 46—47, 63.  
— — Staub 44—46.

Ladung von Vulkanasche 60—61.  
Lebensdauer des Aerosols 65.  
— der Kleinionen 2.  
Lichtwirkung, Abscheidung durch 19.  
—, Schichtenbildung durch 19.  
Lösung von Luft in der Grenzschicht der Tropfen 20.  
Luftionen 1—8, 25, 64.  
Luftkörper, elektrische Eigenschaften der 32.  
—, Trübung der 31.  
Luftplankton 9.  
**Magnesiumsalzgehalt der Wolkenteilchen** 37, 39.  
Meeressalzkerne 36—39.  
Meteorologie und Kolloidforschung III, 65.  
Mittelionen 5—7.  
**Natur der Kondensationskerne** 25—26, 35—42.  
Nebel 9—10.  
—, Entfernung von 51, 63.  
Nebelbildung aus Meerwasserdampf 39.  
— durch Radiumemanation 62.  
Nebelstreifen, Bildung von — durch Blitz 58.  
Nebelteilchen, elektrische Ladung der 43—44, 47.  
—, Größe der 10, 37—43.  
Niederschlag, Steigerung bei Blitzbildung 61.  
Niederschläge, elektrische Ladung der 52.  
Niederschlagsbildung 48—55.  
—, Auslösung der 49.  
— über Großstädten 50, 61.  
Niederschlagsergiebigkeit 52.  
Niederschlagskraft 52.  
**Oberfläche der Luftsuspensionen** 12.  
Oberflächenwirkungen 46.  
Optik, meteorologische 1, 9.  
**Potentialgefälle** 32.  
**Radioaktive Luft, Wolkenbildung durch** 62.  
Radiumstrahlen, Kondensation durch 62.  
Rauch, herabgedrückter 63.

Rauch, Kondensationskerne im 59, 63.  
—, Ladung von 46—47, 63.  
—, Wolkenbildung durch 59—60.  
Rauh frostansatz 44.  
Raumladung 32, 50, 61.  
Rauschender Atem 28.  
Regentropfengröße 50.  
Reibungsaufwind 50, 61.  
**Salzkerne** 36—39.  
Schallstrahlen 55.  
Schichtenbildung und Turbulenz 18.  
— durch Lichtwirkung 19.  
Schwankungen der Tröpfchengröße 43.  
Schweben der Luftsuspensionen 11—13.  
Sicht 30—31, 46, 48.  
Sichtmesser 30.  
Solbildende Kraft der Atmosphäre 46, 63.  
Stabilität der Hydrometeore 21—23.  
Stadtnebel 22, 35—36.  
Stationäres Gleichgewicht im Aerosol 64—65.  
Staub 8—9.  
Staubansatz an elektrischen Leitungen 44—45.  
Staub, elektrische Ladung von 44—46.  
Staubentfernung 51, 63.  
Staubexplosionen 45.  
Staub, Keruwirkung von 25.  
—, kosmischer 8, 30.  
Staubstürme 45—46.  
Staub, vulkanischer 8—9, 46, 60—61.  
Stoffwechsel 65.  
**Taubildung** 23.  
Taupunkt 23, 65.  
Teilchengröße und Sicht bzw. Trübung 48.  
—, Veränderung der — durch Altern 14—16.  
Teilchenzahl, Veränderung der — durch Altern 14—16.  
Tröpfchengröße in Wolken 10, 35—43.  
— und Übersättigung 7, 19—20.  
Tropfenform 11.  
Tropfengröße im Regen 50.  
Tropische Gewitter 53—55.  
Trübung der Atmosphäre 9, 30—32, 48.  
Trübungsfaktor 30—32.  
Turbulenz und Schichtenbildung 18.

Turbulenz, Schweben der Luftsuspensionen durch 16—18.

Turbulenzzone, Senkung der Kondensationshöhe in einer 61.

**Übersättigung** für Eis 26.

— bei Kondensation auf Großionen 7.

— — — — Kleinionen 3—4, 23—25, 28.

— und Tröpfchengröße 7, 19—20.

Ultraviolettes Licht, Kernbildung durch 25.

Umrühren, Koagulation durch 50.

Umschlagen des Ladungssinnes 56.

Unterkühlte Wassertropfen 39—40, 65.

**Vulkanische Gewitter** 46, 60—61.

Vulkanischer Staub 8—9, 46, 60—61.

**Wasserfalleffekt** 52, 64.

Wetterbeeinflussung 56.

Wetterdiagnose 55—56.

Wettervorhersage 56, 65.

Wind und Tröpfchengröße 43.

Windes, Dispersionskraft des 43.

Wolkenbildung durch Flugzeuge 57—58.

— — radioaktive Luft 62.

— — Rauch 59—60.

— über Großstädten 61—62.

Wolkenetagen 18, 23, 39.

Wolkenteilchen, Größe der 10, 37—43.

**Zahl der Kondensationskerne** 33—34.

Zerblasen von Tropfen 11, 52, 64.

Zerteilung der Doppelschicht des Tropfens 64.

Zerteilungsgrad von Aerosolen, Änderung durch Altern 14—16.

— — —, Änderung mit der Gasdichte 16—17.

Zuckerstaubexplosionen 45.

Zuckerstaubladung 45—46.

Zusammenfließen der Wolkenröpfchen 40—42, 58—50, 62.

**Neuere und neueste Hefte der „Sammlung Vieweg“**

- Heft 45. Prof. Dr. K. Fajans: *Radioaktivität und die neueste Entwicklung der Lehre von den chemischen Elementen*. 4. Auflage. Mit 11 Abbildungen und 14 Tabellen. M. 5,—.
- Heft 46. Dr. Bruno Alexander-Katz: *Quarzglas und Quarzgut*. Mit 43 Abb. M. 2,50.
- Heft 47. Prof. Dr. G. Berndt: *Radioaktive Leuchtfarben*. Mit 28 Abbildungen im Text und auf einer Lichtdrucktafel. M. 4,—.
- Heft 48. Dr. R. Fürth: *Schwankungserscheinungen in der Physik*. Mit 5 Abb. M. 3,50.
- Heft 49. Dr. Hans Georg Möller: *Die Elektronenröhren und ihre technischen Anwendungen*. 2., vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 208 Textabbildungen und einer Tafel. M. 7,50.
- Heft 50. Prof. Dr. C. Dorno: *Klimatologie im Dienste der Medizin*. Mit 11 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 51. Prof. Dr. C. Isenkrahe: *Zur Elementaranalyse der Relativitätstheorie*. M. 4,50.
- Heft 52. Dr.-Ing. Max Moeller: *Das Ozon. Eine physikalisch-chemische Einzeldarstellung*. Mit 32 Textfiguren. M. 6,—.
- Heft 53. Dr. V. Geilen: *Mathematik und Baukunst als Grundlagen abendländischer Kultur. — Wiedergeburt der Mathematik aus dem Geiste Kants*. M. 3,—.
- Heft 54. Dr. H. Heinrich Franck: *Die Verwertung von synthetischen Fettsäureestern als Kunstspeisefette in wirtschaftlicher, physiologischer und technischer Beziehung*. Mit 3 Abbildungen. M. 3,25.
- Heft 55. Dr. Alfred Wegener: *Die Entstehung der Mondkrater*. Mit 9 Abbild. im Text und auf 3 Tafeln. M. 2,25.
- Heft 56. Niels Bohr: *Drei Aufsätze über Spektren und Atombau*. 2. Auflage. Mit 13 Abbildungen. M. 5,—.
- Heft 57. Prof. Dr. Hans Cloos: *Der Mechanismus tiefvulkanischer Vorgänge*. Mit 24 Zeichnungen und einer Karte. M. 4,—.
- Heft 58. Dr. Walther Gerlach: *Die experimentellen Grundlagen der Quantentheorie*. 2. Auflage. Mit 43 Abbildungen.
- Heft 59. Prof. Dr. E. Study: *Denken und Darstellung in Mathematik und Naturwissenschaften*. 2. verbesserte und erweiterte Auflage. Mit 10 Abbildungen. M. 3,75.
- Heft 60. Prof. Dr. techn. Milan Vidmar: *Theorie der Kreiselpumpe*. Mit 39 Abbildungen. M. 4,75.
- Heft 61. Reg.-Rat Dr. W. Meissner: *Entfernungs- und Höhenmessung in der Luftfahrt*. Mit 66 Abbildungen. M. 4,—.
- Heft 62. Dr. K. Siebel: *Die Elektrizität in Metallen*. M. 3,50.
- Heft 63. Dr.-Ing. M. Dolch: *Die rationelle Verwertung der niederwertigen Braunkohlen*. Mit 7 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 65. E. Study: *Mathematik und Physik*. Eine erkenntnistheoretische Untersuchung. M. 1,50.
- Heft 66. Dr. Walter Schallreuter: *Über Schwingungserscheinungen in Entladungsröhren*. Mit 14 Abbildungen. M. 1,50.
- Heft 67. Prof. Dr. Eberhard Buchwald: *Das Korrespondenzprinzip*. M. 5,50.
- Heft 68. Direktor Dr. Iwan Döry: *Die Schüttlerscheinungen elektrischer Lokomotiven mit Kurbelantrieb*. Mit 12 Abbildungen. M. 1,50.
- Heft 69. Prof. Dr.-Ing. Fritz Emde: *Sinusrelief und Tangensrelief in der Elektrotechnik*. Mit 18 Bildern. M. 4,50.
- Heft 70. Laurenz Bock: *Die Konstitution der Ultramarine*. Mit 3 Abb. M. 2,40.