

Veröffentlichungen des Preußischen Meteorologischen Instituts

Herausgegeben durch dessen Direktor

G. Hellmann

Nr. 317

Abhandlungen Bd. VII. Nr. 3.

**Photogrammetrische Wolkenforschung
in Potsdam
in den Jahren 1900 bis 1920**

Von

R. Süring

Berlin 1922

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Preis 25 *M*

Veröffentlichungen des Preußischen Meteorologischen Instituts

Herausgegeben durch dessen Direktor

G. Hellmann

Nr. 317

Abhandlungen Bd. VII. Nr. 3.

**Photogrammetrische Wolkenforschung
in Potsdam
in den Jahren 1900 bis 1920**

Von

R. Süring

1922

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Preis 25 *M*

ISBN 978-3-662-23196-8 ISBN 978-3-662-25195-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-25195-9

1. Methode der Wolkenmessungen.

Vorbemerkung. Nachdem vom Sommer 1896 bis zum Sommer 1897 gemäß internationalem Übereinkommen an mehreren Orten Höhe, Geschwindigkeit und Zugrichtung der Wolken gemessen waren, wurde vielfach der Wunsch geäußert, diese Messungen fortzusetzen. Die Umständlichkeit und Kostspieligkeit der älteren photogrammetrischen Verfahren hat dies verhindert. Dem damaligen Vorsteher des Meteorologisch-Magnetischen Observatoriums zu Potsdam, Prof. A. Sprung (gestorben 1909) ist es jedoch gelungen, die Meßmethode so zu vervollkommen, daß ein Beobachter zu ihrer Ausführung genügt; er hat dadurch ermöglicht, daß in Potsdam die photogrammetrische Wolkenforschung weitergeführt werden konnte.

Schon im Jahre 1894 hat Sprung dem Internationalen Meteorologischen Komitee einen »Vorschlag zur Vereinfachung der korrespondierenden Wolkenaufnahmen« unterbreitet¹⁾; hiernach sollten durch elektrischen Strom an den beiden Stationen Uhrwerke ausgelöst werden, welche genau gleichzeitig die photographische Aufnahme und dann den Plattenwechsel automatisch bewirken. Sprung arbeitete diesen Plan zusammen mit der Firma R. Fueß in Berlin-Steglitz, insbesondere mit deren Abteilungsleiter F. Becker weiter aus, die Firma Fueß übernahm die mechanische Ausführung eines solchen photogrammetrischen Wolkenautomaten²⁾ und stellte die Apparate im Frühling 1897 in Potsdam auf. Schon im April dieses Jahres wurden brauchbare Aufnahmen erhalten, aber in dem Bestreben, weitere Vervollkommnungen einzuführen, wurden die Apparate in den folgenden zwei Jahren mehrfach abmontiert und abgeändert, ohne daß sie genügend häufig neu justiert werden konnten.

Über die Korrekturen der Plattenkoordinaten bestehen daher, wie später noch näher ausgeführt werden wird, für diese Zeit einige Zweifel, so daß ich mich entschloß, das Beobachtungsmaterial erst von 1900 an für die vorliegende Arbeit zu benutzen.

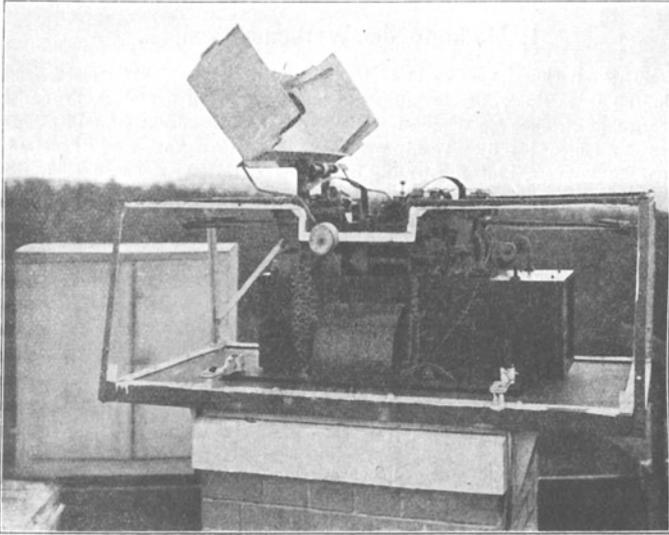
Bauart des Wolkenautomaten. In einer metallenen Kamera liegt horizontal ein Aluminiumrahmen für photographische Platten von 15×18 cm Größe. Zu beiden Seiten davon befinden sich Vorrats- und Sammelkästen für je 20 Platten mit Rahmen. Ein durch elektrischen Strom ausgelöstes Triebwerk besorgt automatisch den Plattenwechsel. Nach vollzogenem Wechsel wird die in der Kamera befindliche Platte mit Federkraft von unten gegen die genau horizontalen Spitzen gedrückt, die sich ihrerseits in einem Rahmen mit 4 Marken befinden, welche sich bei der Aufnahme mit abbilden und damit zum Ersatz eines Fadenkreuzes dienen. Unter dem Objektiv befindet sich der Momentverschluß, bestehend aus einer Kreisplatte mit sektorförmigem Ausschnitt. Bei der Belichtung wird die Kreisscheibe durch ein aufgezoogenes Gewicht, das elektrisch ausgelöst wird, um 180° gedreht, wobei der Sektor am Objektiv vorbeigeht. Oberhalb des Objektivs liegt ständig eine ziemlich helle Gelscheibe. Der ganze Apparat ist auf einem starken gemauerten Pfeiler mit Sandsteinplatte befestigt und zum Schutz gegen die Witterung von einem etwa $80 \times 150 \times 55$ cm großen Zinkblechkasten mit Eisenrahmen umgeben. Der Schutzkasten hat an allen vier Seiten breite Türen und oberhalb der Kamera einen übergreifenden »Regendeckel«, welcher durch ein gleichfalls elektrisch auslösbares Gewicht automatisch gehoben und gesenkt werden kann. Die Figur auf Seite 4 zeigt den Wolkenautomaten mit gehobenem Regendeckel; von dem Schutzkasten sind die Zinkblechbekleidungen fortgenommen, damit man den Apparat selbst sieht. Im Hintergrunde links steht der Schrank für das Schaltwerk des Apparats. Der Betriebsstrom wird durch eine Batterie von 80 Leclanché-Elementen erzeugt. Der eine Automat ist auf dem kleinen Turm des Meteorologisch-Magnetischen Observatoriums bei Potsdam ($\varphi = 52^\circ 23'$, $\lambda = 13^\circ 4'$ E. Gr., Seehöhe 103.3 m) aufgestellt, der zweite in einer Entfernung von 1946 m in Richtung nach $W 20^\circ N$ unweit der Havel auf dem sogen. Tornow (Seehöhe 33.9 m). Dieser Platz war schon 1896 als Hilfsstation für direkte photogrammetrische Wolkenmessungen benutzt worden. Die elektrische Leitung zwischen beiden Stationen wird oberirdisch an einem besonderen Gestänge geführt.

Um eine Aufnahme zu machen, wird der Strom eingeschaltet und durch Druck auf eine Taste der Automat in Gang gesetzt. Durch den Stromschluß wird der Anker eines Elektromagneten angezogen, welcher ein Fallgewicht zum Heben des »Regendeckels« freigibt. Bei ganz geöffnetem Deckel wird ein zweiter Elektro-

¹⁾ Bericht des Intern. Meteor. Komitees und der Intern. Kommission für Wolkenforschung zu Upsala 1894. Deutsche Ausg. Berlin 1895. Anhang X, S. 27—29; abgeändert und erweitert in Meteor. Zeitschr. 12, S. 217—220, 1895.

²⁾ Sprung hat nur ganz kurze Beschreibungen dieses Apparats gegeben, und zwar in den Arbeiten: Über den photogrammetrischen Wolkenautomaten und seine Justierung (Zeitschr. f. Instrumentenk. 19, S. 111—118, 129—137, 1899); Sur un appareil automatique pour la mesure photogrammétrique des nuages (Congrès intern. de météor. à Paris 1900, S. 104—108); Über die Justierung und Benutzung des photogrammetrischen Wolkenautomaten (Zeitschr. f. Instrumentenk. 24, S. 206—213, 1904).

magnet zum Öffnen des Momentverschlusses und zur Abgabe eines Klingelzeichens betätigt. Die Zeit der Aufnahme ist dadurch bis auf den Bruchteil einer Sekunde genau bestimmt. Sobald sich der Regendeckel wieder geschlossen hat, löst ein dritter Elektromagnet ein anderes Fallgewicht aus, das den Rahmen mit der exponierten Platte etwas senkt und nun diese Platte mittels einer Kette ohne Ende in den Sammelkasten zieht, während aus dem Vorratskasten eine neue Platte unter das Objektiv gelegt und hier gegen den oben erwähnten Rahmen mit den Orientierungsmarken angepreßt wird. Nachdem alles ordnungsmäßig erledigt ist, wozu rund eine Minute erforderlich ist, fällt, wie in einer Klingelanlage, im Schaltwerk ein Schalttäfelchen, und es ertönt ein Schluß-



signal von jeder der Stationen. Die Schlußsignale kommen natürlich meist nicht ganz gleichzeitig an, da ja der Plattenwechsel bei beiden Apparaten verschieden lange dauern wird, je nachdem das eine oder andere Laufwerk besser geölt ist. Da die drei Funktionen des Automaten (Heben des Schutzdeckels, Momentaufnahme, Plattenwechsel) zwangsläufig hintereinander erfolgen, so ist das Signal ein sicheres Anzeichen dafür, daß beide Apparate zu einer neuen Aufnahme bereit sind. Macht man nun eine zweite Aufnahme, so erhält man zwei zusammengehörige Plattenpaare, aus denen sich Höhe, Geschwindigkeit und Zugrichtung der photographierten Wolke berechnen läßt.

Schon während des Baues dieser Wolkenautomaten für Zenitaufnahmen beschloß Sprung eine Erweiterung zu einer Spiegel-Vorrichtung, welche auch die Aufnahme von horizontnahen Teilen des Wolkenhimmels gestatten sollte. Oberhalb des Objektivs wurde eine drehbare starke Messingscheibe von ca. 30 cm Durchmesser mit drei Öffnungen von der Größe des Objektiv-Durchmessers aufgesetzt. Die eine ist frei, oberhalb der beiden anderen sind Spiegel unter 45° Neigung aufgestellt. Wird die Scheibe automatisch nach elektrischer Auslösung gedreht, so sind drei Stellungen möglich, eine für Zenitaufnahmen, die beiden anderen für Aufnahmen des Süd- und des Nordhorizonts (genauer SSW und NNE). Auf diese Weise sind auch einige Horizontaufnahmen geglückt. Verschiedene technische Schwierigkeiten, insbesondere der Umstand, daß sich die Glasspiegel als nicht witterungsbeständig erwiesen, und daß leicht Leitungsstörungen eintraten, haben dazu geführt, daß diese Erweiterungs-vorrichtung wieder abmontiert wurde, und daß man sich auf Zenitaufnahmen beschränkte.

Objektiv und Verschuß. Als Objektive wurden 1896 von der Optischen Anstalt C. P. Goerz zwei Doppelanastigmaten (von der Firma jetzt als Dagor bezeichnet) Serie III F:6.8 von rund 18 cm Brennweite und möglichst gleicher Symmetrie — nicht allein in sich, sondern auch untereinander — bestellt. Nach einer vorläufigen Prüfung seitens der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt ist diese Forderung völlig befriedigend gelöst, denn es beträgt

Objektiv	Brennweite für Achsenstrahlen	Abstand des oberen Hauptpunktes ¹⁾ von den äußeren Linsenscheiteln	Abstand des unteren Hauptpunktes von den äußeren Linsenscheiteln
Nr. 27762	183.6 mm	14.5 mm	14.4 mm
» 27765	183.75 »	14.6 »	14.6 »

¹⁾ Die Bezeichnung »oberer Hauptpunkt« gilt für die im Apparat benutzte Stellung des Objektivs.

Es wurde ein mittlerer Wert der Brennweite von 183.7 mm zu grunde gelegt, und die Stellung der Objektive im Apparat so reguliert, daß der Abstand des unteren Linsenscheitels von der Platte bei Nr. 27762 169.3 mm, bei Nr. 27765 169.1 mm betrug. Eine Anfang November 1898 an den beiden Apparaten vorgenommene Kontrolle ergab jedoch, daß die tatsächliche Bildweite bei Nr. 27762 (Hauptstation) 184.08 mm, bei Nr. 27765 183.15 mm betrug. Daraufhin sind die beiden Bildweiten bis auf 0.1 mm gleichgemacht. Die freie Öffnung der Objektive beträgt 27 mm, bei größter wirksamer Öffnung zeichnen die Objektive bis zu 70° Winkelausdehnung vollkommen scharf, bei kleineren Blenden bis zu 90° Bildwinkel.

Um die effektive Öffnungszeit der Sektorenverschlüsse des Objektivs zu ermitteln, d. h. die gesamte Belichtungsdauer vom Beginn des Öffnens bis zum Ende des Schließens, wurde eine vom Wechselstrom gespeiste Glühlampe von 5 H K, 125 V in einiger Entfernung von der Kamera im Kreise bewegt und ihr Bild mittels eines unter 45° geneigten Spiegels durch das Objektiv auf die horizontal gelagerte Platte geworfen¹⁾. Die Zahl der Helligkeitsschwankungen des fotografierten Lichtbogens ist dann ein Maß für die Belichtungsdauer. Die Lampe leuchtet in jeder Periode in beiden Stromrichtungen je einmal auf, so daß bei Wechselstrom von 50 Perioden 100 Schwärzungsmaxima in der Sekunde entstehen. Für unsern Verschuß ergab sich eine effektive Öffnungszeit von 0.12 Sek. Von dieser Zeit entfallen jedoch etwa $\frac{1}{3}$ auf die wenig wirksamen Phasen des Öffnens und Schließens des Verschlusses, so daß die nützliche Öffnungszeit, während der das Objektiv ganz frei arbeitet, etwa 0.08 Sek. ist. Die Objektive werden im Winter mit voller Öffnung, aber mit Gelscheibe benutzt. Im Sommer wird je nach der Jahreszeit abgeblendet.

Mit dem Wolkenautomaten können auch Zeitaufnahmen gemacht werden, indem bei einer besonderen Schaltung die Kreisplatten des Momentverschlusses bei ganzer Öffnung des Objektivs angehalten und erst durch neuen Stromschluß wieder in Gang gesetzt werden. Von dieser Einrichtung ist jedoch nur bei Justierung des Apparates durch Sternaufnahmen Gebrauch gemacht worden.

Während der ganzen Meßperiode sind orthochromatische Silber-Eosin-Spiegelglasplatten von Otto Perutz-München benutzt worden. Spiegelglas ist unbedingt notwendig, wenn man die Parallaxen bis auf 0.1 mm ausmessen will. Die Perutzsche Emulsion hat sich auch bei wochenlangem Liegen im Freien, bei Sommerhitze wie bei feuchtem Winterwetter, als außerordentlich witterungsbeständig erwiesen.

Justierung des Apparates und Korrekptionsbestimmung der Plattenkoordinaten. Um die Orientierung der im Automaten befindlichen Plattenmarken zu bestimmen, hat Sprung ein sehr genaues und elegantes Meßverfahren ersonnen. Es besteht darin, bei beginnender Nacht mit dem Automaten Sterne zu photographieren und die aufgezeichneten Bahnkurven mit den nach dem Astronomischen Jahrbuch berechneten zu vergleichen. Wenn man die Objektive 35 bis 40 Minuten nach dem wahren Sonnenuntergang öffnet und etwa zwei Stunden später wieder schließt, so erhält man auf den Platten scharfe Bahnspuren der zenitnahen Sterne und außerdem infolge des letzten Dämmerungslichtes noch gute Abbildungen der Marken. Besonders im Herbst sind solche Aufnahmen lohnend, da dann zwei Sterne erster Größe, nämlich Wega (α Lyrae) und Deneb (α Cygni) nahe dem Zenit stehen.

Da man für Wolkenberechnungen im allgemeinen die parallaktischen Verschiebungen der Bildkoordinaten beider Platten gegeneinander und nicht ihre genaue Stellung in jedem einzelnen Apparat braucht, so genügt es fast immer, die Differenz der Sternbildkoordinaten auf M und T auszumessen, also die »relativen« Korrekptions zu bestimmen. Sprung hat aber auch das Verfahren zur Ermittlung der absoluten Korrekptions vollständig durchgerechnet und veröffentlicht (Zeitschr. f. Instrk. 1899 und 1904). Aus diesen Arbeiten sollen hier nur die Schlußformeln mitgeteilt werden, jedoch teilweise mit etwas anderen Bezeichnungen und Berichtigungen²⁾. Legt man die Platten mit der Schichtseite nach oben so hin, daß die breite Marke zum Beschauer hin liegt, so sind die Bildkoordinaten so orientiert, daß sie nach N und E positiv gezählt werden. Bezeichnet man die Abszissen mit v (Richtung der längeren Plattenachse), die Ordinaten mit w , so sind die Koordinaten des Sterns:

$$v = r \sin \sigma \cos \mu + \left(n - \frac{r \cos \sigma}{\cos \delta} \right) \sin \mu$$

$$w = r \sin \sigma \sin \mu - \left(n - \frac{r \cos \sigma}{\cos \delta} \right) \cos \mu.$$

Dabei sind

$$r = f \frac{\cotg \beta}{\cos \delta} \cdot \frac{1 - \cos \sigma \operatorname{tg} \delta \cotg \beta}{(1 - \cos \sigma \operatorname{tg} \delta \cotg \beta)^2}$$

und σ der Stundenwinkel, β die Deklination des Sterns, n der Abstand des projektivischen Mittelpunktes der photographierten Sternbahn vom nächsten Scheitel der elliptischen Sternbahn (141.55 mm für α Lyrae), f die gemeinschaftliche mittlere Bildweite beider Objektive (183.7 mm), δ die Zenitdistanz der Hauptstation ($37^\circ 37' 3'' .6$), μ der Winkel, um welchen die Basislinie in der Richtung M \rightarrow T von der Westrichtung gegen Norden abweicht (19.6°).

¹⁾ Näheres in der Arbeit von F. Schindelhauer: Prüfung des Momentverschlusses des Potsdamer Wolkenautomaten im Bericht über die Tätigkeit des Kgl. Preuß. Meteorol. Instituts im Jahre 1913 S. (77), 1914.

²⁾ z. B. ist in Sprungs Formeln β nicht die Deklination, sondern deren Ergänzung zu 90° ; die Zahlenrechnung ist aber richtig.

Sprung hat die absoluten Bildkoordinaten aus Aufnahmen der Wega für Herbst 1898 und 1903 berechnet. Bezeichnet man die für das Observatorium gültigen Koordinaten mit dem Index 0, die für die Station Tornow mit 1, so lauten die gefundenen Korrekturen Δ in mm:

Zeit	Δv_0	Δv_1	$\Delta(v_0-v_1)$	Δw_0	Δw_1	$\Delta(w_0-w_1)$
Sept. 1898	- 2.68	0.54	- 3.22	0.46	0.53	- 0.07
Sept. 1903	- 1.07	- 0.85	- 0.22	- 2.01	- 0.06	- 1.95

Die Änderung der Parallaxenkorrektur innerhalb von 5 Jahren beträgt hiernach genau 3 mm, und zwar würde 1898 ohne Anbringung einer Korrektur eine zu große Wolkenhöhe gefunden worden sein, während 1903 die Parallaxe durch die neue Korrektur wenig geändert wird. Über Zeit und Ursache der Korrekturenänderung hat Sprung nichts ermittelt; er sagt nur (Zeitschr. f. Instr. 1904 S. 209): »Schwierig erscheint es aber, sich davon ein Bild zu machen, wie diese Veränderungen zustande gekommen sein mögen«.

In den Jahren 1899 bis 1904 sind etwa ein Drittel aller bisherigen Bilder mit dem Wolkenautomaten aufgenommen worden. Dieses Material würde außerordentlich an Wert verlieren, wenn es nicht gelingen würde, festzustellen, ob diese Korrekturenänderungen allmählich oder plötzlich eingetreten sind, und in letzterem Falle, wann dies geschehen ist. Allmähliche Änderungen sind bei dem festen Bau der Kamera wenig wahrscheinlich, man wird vielmehr annehmen müssen, daß sie sprungweise bei den mannigfachen kleinen Umbauten des ganzen Apparats in jener Zeit entstanden sind. Der Zeitpunkt dieser Arbeiten ließ sich nachträglich noch feststellen, aber das allein genügt noch nicht; man muß auch wissen, welche Arbeiten schädlich gewesen sind und welche nicht. Um das zu ermitteln, ging ich von der Überlegung aus, daß sich bei verhängnisvollen Ereignissen nicht allein die beiden Kameras mit den festen Marken gegeneinander als Ganzes, sondern daß sich auch die Stellungen der Marken jedes einzelnen Apparats in sich verschoben haben werden. Ich untersuchte daher, wie sich an jeder Station die Verbindungslinien der Marken gegen ein genau rechtwinkliges Achsenkreuz seit 1898 verdreht haben. Brachte ich die beiden seitlichen und die obere Marke mit den Koordinatenachsen einer in mm geteilten Glasplatte zur Deckung, so ergab sich für ausgewählte kurze Zeitabschnitte als mittlere Abweichung der Spitze der unteren Marke von der Nullordinate der Glasplatte:

	1898/99 30. IX. bis 2. I.	1899 29. III. bis 5. IX.	1902 9. I. bis 12. IX.	1902/03 25. IX. bis 30. IX.	1904 17. III. bis 21. VII.
auf M:	- 0.17	- 0.11	- 0.20	- 0.18	- 0.20 mm
» T:	+ 0.37	- 0.08	- 0.14	- 0.50	- 0.48 »

Nach obiger kleiner Zahlzusammenstellung sind größere Markenverschiebungen Anfang 1899 und zwischen dem 12. und 25. Sept. 1902 eingetreten, und zu jener Zeit hat auch tatsächlich der Mechaniker am Apparat gearbeitet. Zwischen dem 15. Februar und dem 6. März 1899 sind beide Kameras aus den Apparaten entfernt worden — so viel ich feststellen konnte, ist es das einzige Mal gewesen, daß die Kameras herausgenommen sind —, um die Spiralfedern aus dem Momentverschluß zu entfernen, und um festere Führungsleisten für den Transport der Platten aus dem Vorratskasten in die Kamera und von dort in den Sammelkasten anzubringen. Außerdem ist am 29. März 1899 die Bildweite beider Objektive verändert worden; um eine gleiche Bildweite von 183.7 mm zu erzielen, wurden die Abstände der unteren Objektivkuppen von den Platten auf 169.2 mm für M und auf 168.9 mm für T abgeändert (die Entfernungen der unteren Hauptpunkte von der Objektivkuppe betragen 14.5 mm für M und 14.8 mm für T). Eine Prüfung dieser Justierung am 10. August 1899 lieferte die Werte 169.17 mm für M und 168.83 mm für T, also eine vollkommen befriedigende Übereinstimmung mit den geforderten Größen. Bei dieser Gelegenheit wurde auch die Horizontierung der Platten geprüft; sie erwies sich — nach handschriftlichen Bemerkungen von Prof. Sprung — auf dem Tornow als vollkommen gut, während auf dem Meteorologischen Observatorium eine leichte Senkung nach vorn zu erkennen war. Ob eine Änderung vorgenommen ist, läßt sich nicht mehr ermitteln. — Am 16. und 17. September 1902 ist der Wolkenautomat auf Lichtdichtigkeit geprüft worden; hierbei ist vielleicht eine kleine Verschiebung oder Verbiegung an einer Marke von T vorgekommen, aber jedenfalls keine stärkere Verrückung des Rahmens. Rechnerisch ergibt sich die Unsicherheit, welche durch Nichtberücksichtigung dieser Markenveränderung entstanden ist, selbst für Wolken von 10 km Höhe zu weniger als 1% in extremen Fällen (äußerste Randpartien). Nach diesen Feststellungen ist man offenbar berechtigt, als den Zeitpunkt der großen Korrekturenänderung des Markenkreuzes den März 1899 anzunehmen und von April 1899 mit den 1903 gefundenen Koordinatenkorrekturen zu rechnen.

Von 1903 bis 1917 (mit Ausnahme der Jahre 1908 und 1911 bis 1914) sind alljährlich die Wolkenautomaten durch Sternaufnahmen kontrolliert worden. Das Ergebnis der letzten derartigen Korrekturenbestimmung ist:

Zeit	Δv_0	Δv_1	$\Delta(v_0-v_1)$	Δw_0	Δw_1	$\Delta(w_0-w_1)$
Sept. 1917 mm	- 1.07	- 1.20	+ 0.13	- 2.01	- 0.02	- 1.99
Änderung seit 1903 . . . »	0.00	- 0.35	+ 0.35	0.00	- 0.01	+ 0.01

Mit Ausnahme der Abszissenkorrektur von T ist also seit 1903 alles ganz unverändert geblieben. Die Verschiebung auf T ist nach 1910 und vor 1915 eingetreten, wahrscheinlich Mitte Juli 1914 durch einen Blitzschlag in T, welcher eine größere Reparatur, freilich nur an den Elektromagneten und Zuleitungsdrähten, erforderte.

Sprungs Berechnungen der Markenkorrekturen beziehen sich nur auf die Bahn von α Lyrae, die nahe dem mittleren oberen Rande der Platten (v rund -10 und $+55$ mm, $w = 45$ und 56 mm) liegt. Da nun die Marken nicht genau rechtwinklig zueinander stehen, so gelten die gefundenen Korrekturen nur dann für alle Punkte der Platte, wenn die auf S. 6 erwähnte Verschiebung der unteren Marken nach links berücksichtigt wird. 1917 betrug diese Verschiebung gegen ein rechtwinkliges Fadenkreuz für $M = -0.33$ mm, für $T = -0.45$ mm. Bei der Orientierung des Fadenkreuzes nach den oberen und den seitlichen Marken muß daher die Korrektur der v mit abnehmendem w auch abnehmen. Das hat sich bestätigt bei einer Nachprüfung der Korrekturen, die ich mit Hilfe der zweiten auf den Platten erkennbaren Sternbahn (Deneb, α Cygni) berechnet habe. Diese Bahn liegt rund 40 mm tiefer auf der Platte (für 1917 war $v = -64$ und -18 mm, $w = -10$ und $+19$ mm); sie ergibt als Korrekturen für 1917:

Δv_0	Δv_1	$\Delta(v_0 - v_1)$	Δw_0	Δw_1	$\Delta(w_0 - w_1)$
-1.20	-1.48	+0.28	-1.84	+0.19	-2.03 mm.

In der Praxis gestaltet sich die Auswertung dadurch viel zuverlässiger, daß bei der Berechnung von Höhe und Bewegung der Wolken — ausgenommen bei einem kleinen Höhenkorrektionsglied — stets nur die Unterschiede zweier Koordinaten in die Rechnung eingehen, und diese bleiben innerhalb der Ablese-Genauigkeit von ± 0.05 mm auf der Platte unverändert. Da gegenwärtig die Marken an beiden Stationen um ungefähr den gleichen Betrag gegen ihre richtige Lage verdreht sind, so genügt es zur Bestimmung der parallaktischen Verschiebung zwischen der M- und der T-Aufnahme, die Nullordinate der Glasskala auf die Verbindungslinie der oberen und der unteren Marke zu legen und mit einer konstanten Korrektur zu rechnen. Braucht man auch die w -Werte, so wird die Nullabszisse der Glasskala mit den Spitzen der beiden seitlichen Marken zur Deckung gebracht. Bei diesem Verfahren bleibt der Fehler des aus ungleicher Höhe der Stationen entstehenden Höhenkorrektionsgliedes stets unter 10 m, also unterhalb der Grenze, bis auf welche die Wolkenhöhen der einzelnen Platten ausgerechnet worden sind.

Formeln zur Berechnung von Höhe und Bewegung der Wolken. Da das für diese Untersuchung benutzte Plattenmaterial nur aus Zenitaufnahmen besteht, so sind die zur Berechnung notwendigen Formeln außerordentlich einfach. Die Ableitung der Formeln ist schon mehrfach veröffentlicht¹⁾, und es soll deshalb hier nur eine Zusammenstellung in dem Umfange und in der Form, wie sie für die Praxis wichtig ist, gegeben werden. Dabei werden folgende Bezeichnungen eingeführt:

X, Y, Z: Die rechtwinkligen Raumkoordinaten des Wolkenpunktes in bezug auf den Horizont der Hauptstation M, ausgedrückt in m. Z ist also die Höhe der Wolken über der Hauptstation, deren Höhe über dem Meeresspiegel 103 m beträgt: Wegen der spiegelbildlichen Abbildung auf der photographischen Platte ist bei graphischer Darstellung ein positives X nach links, ein positives y nach oben aufzutragen. Zwei aufeinanderfolgende Aufnahmen sind durch die Indizes I und II unterschieden.

H = Z + 103: Wolkenhöhe in m über dem Meeresspiegel.

v und w: Die Abszisse und die Ordinate des Wolkenpunktes auf der photographischen Platte, ausgedrückt in mm. Die Koordinaten auf der Platte der Hauptstation (M) sind durch den Index 0, die auf der Nebenstation Tornow (T) durch den Index 1 gekennzeichnet.

B = 1469.4 m: Die Horizontalprojektion der Basislinie zwischen den Stationen M und T.

$\Delta = -69.4$ m: Die Vertikalprojektion der Basislinie (Höhenunterschied zwischen M und T), bezogen auf M.

f = 183.7 mm: Die Bildweite der Objektive.

V_h die wahre horizontale, V_v die wahre vertikale Geschwindigkeit der Wolken (aufsteigend positiv) in mps.

$t_{II} - t_I$: Zeitunterschied in Sekunden zwischen zwei aufeinander folgenden Aufnahmen.

ψ : Azimut des Wolkenzuges, bezogen auf die Basislinie als Ausgangspunkt. Die Basis weicht um $19^{\circ}.6$ von der E-W-Richtung nach N ab.

$\varphi = 19^{\circ}.6 + \psi$: wahres Azimut des Wolkenzuges (Zug aus W = 0°).

Die zur Berechnung benutzten Formeln lauten alsdann:

$$Z = \frac{Bf - v_1 \Delta}{v_0 - v_1} = \frac{Bf}{v_0 - v_1} - \frac{v_1 \Delta}{v_0 - v_1}; \quad H = Z + 103$$

$$X = Z \frac{v_0}{f}; \quad Y = -Z \frac{w_0}{f}$$

$$V_h = \frac{\sqrt{(X_{II} - X_I)^2 - (Y_{II} - Y_I)^2}}{t_{II} - t_I}$$

$$V_v = \frac{Z_{II} - Z_I}{t_{II} - t_I}$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{Y_{II} - Y_I}{X_{II} - X_I}$$

¹⁾ z. B. Koppe: Photogrammetrie und internationale Wolkenmessung (Braunschweig 1896) S. 12; A. Sprung und R. Süring: Ergebnisse der Wolkenbeobachtungen in Potsdam und an einigen Hilfsstationen in Deutschland in den Jahren 1896 und 1897 (Berlin 1903) S. 12, 15.

Um von der Größe der parallaktischen Verschiebung der Wolkenbilder auf den Platten und von der Größe der auf ihnen abgebildeten Wolkenfläche eine Vorstellung zu geben, ist nachstehend angegeben, wie groß für verschiedene Wolkenhöhen der Wert $(v_0 - v_1)$ ist und welchen natürlichen Maßen die Länge von 1 cm auf der Platte und die Fläche von 1 cm² ungefähr entsprechen.

Wolkenhöhe km	2	4	6	8	10	12
parall. Verschiebung . . mm	135	67	45	34	27	22.5
1 cm auf der Platte . . m	110	220	320	430	540	650
1 cm ² auf der Platte . . km ²	0.01	0.05	0.10	0.18	0.29	0.42

Die ganze photographische Platte stellt bei einer Wolkenhöhe von 2 km etwas mehr als 2 km² Himmelsfläche, bei 4 km Höhe 8 1/2 km², bei 8 km Höhe 34 km² und bei 12 km Höhe 75 km² Fläche dar. Die photographischen Aufnahmen sind also — namentlich für obere Wolken — gut geeignet zur Erkennung des Gefüges der Wolken.

Auswertung der photogrammetrischen Wolkenmessungen zu Potsdam. Die meisten Wolkenaufnahmen hat Herr Oberlandmesser Th. Bötzel in Hildesheim ausgemessen, berechnet und hinsichtlich bemerkenswerter Einzelheiten beschrieben. Die hierbei gewonnenen Erfahrungen seien daher hier mit seinen Worten wiedergegeben:

»Die beiden zusammengehörigen Platten (M und T) werden nebeneinander auf einen oben durch eine Spiegelglasplatte abgedeckten und auf der dem Beschauer abgekehrten Seite zwecks Zutritt von Licht offenen Kasten so gelegt, daß ihre Langseiten in der Längsrichtung des Kastens sich befinden und die großen Marken dem Beschauer zugekehrt sind. Es sind dann die v nach rechts und die w nach oben positiv zu rechnen. Den Platten wird von unten her einen im Kasten angebrachten, um eine horizontale Achse drehbaren Planspiegel Licht zugeführt. Bei Anwendung von Tageslicht muß man die Augen durch einen Schirm gegen direktes Licht schützen, beim Arbeiten bei künstlichem Licht, wobei nur eine elektrische Glühlampe und zwar von etwa 100 Kerzen Helligkeit in Frage kommt, muß die Spiegelglasplatte vor dem Auflegen der Negative mit einer Mattscheibe abgedeckt werden; die Glühlampe wird in dem Kasten, der im übrigen nach der offenen Seite hin durch einen Schirm abzublenden ist, oberhalb des Planspiegels angebracht. Wir haben die Erfahrung gemacht, daß bei künstlichem Lichte ein besseres Arbeiten möglich ist, als bei Tageslicht, wohl wegen der gleichmäßigeren Beleuchtung. — Die Ausmessung der auf beiden Platten mit einer Kopiernadel ausgestochenen und mit Bleistift umringelten und numerierten identischen Punkte erfolgt mit einer in Quadratmillimeter eingeteilten Glasplatte unter Zuhilfenahme einer Ableselupe auf etwa 1/50 mm. Es liegt im Interesse der Schonung der Platten, die Markenverbindungsstellen mit der Kopiernadel nur soweit von den Marken aus in die Gelatineschicht einzuritzen, daß man die Quadratglastafel sicher anlegen kann. Hat man nur die Höhe der Wolken zu bestimmen, also nur die v zu messen, so braucht man überhaupt keine Linie einzuritzen, sondern kann die Tafel direkt auf die obere und untere Marke anlegen. Wir fanden es empfehlenswert, hierzu die 10 cm-Linie zu benutzen, weil man dann ohne Verschiebung nach der positiven und negativen Seite messen kann.

Bei Auswertung von Doppelaufnahmen mit geringem Zeitunterschied zur Ermittlung der Richtung des Wolkenzuges und dessen Geschwindigkeit wird die Verbindungslinie der linken und rechten Marke nur von links her auf einige Zentimeter Länge eingeritzt. Wir fanden es ratsam, da hier auf vier Platten identische Punkte aufzusuchen sind, diese zunächst nur auf dem ersten Plattenpaare genau auszustechen und ohne Umringelung lediglich zu numerieren und dann erst nach Aufsuchung derselben Punkte auf dem zweiten Plattenpaare die Umringelung vorzunehmen. Wegen des oft stark veränderten Aussehens der zweiten Aufnahme würde durch die sofortige Umringelung der ausgestochenen Punkte auf dem ersten Plattenpaare die Identifizierung sehr erschwert werden.

Die Berechnung der rohen Höhen erfolgt am bequemsten mittels einer nach Parallaxen-Unterschieden von 0.1 mm fortschreitenden Hilfstafel, der man die Höhen, soweit erforderlich, durch Interpolation auf 0.01 mm ohne weiteres entnehmen kann. Alle weiteren Rechnungen werden am zweckmäßigsten und genügend genau mit dem logarithmischen Rechenschieber ausgeführt. Für die Berechnung der Verbesserung der rohen Höhen wegen der ungleichen Höhenlage der beiden Stationen ergibt sich eine wertvolle Rechenprobe dadurch, daß man außer der Größe $\frac{69.4 v_1}{v_0 - v_1}$ auch zur Kontrolle noch $\frac{69.4 v_0}{v_0 - v_1}$ berechnet; die Differenz beider Werte muß genau die Zahl 69.4, also die Höhendifferenz der beiden Basis-Endpunkte ergeben. Zur Bestimmung von Geschwindigkeit und Zug der Wolken genügt eine graphische Darstellung auf Millimeterpapier.

Die Streichrichtung von Wolken wird am einfachsten durch eine auf das Negativ gelegte Zelluloidplatte ermittelt, auf der natürlich außer den Marken-Verbindungsstellen die für unseren Fall davon abweichende Nord-Süd- und West-Ost-Linie und zwar zweckmäßig in roter Tusche aufzuzeichnen sind. Natürlich ist dabei die Bildumkehrung zu berücksichtigen.

Bei der Ausmessung von Wellenlängen von Wogenwolken mißt man am besten ein ganzes zusammengehöriges System aus, man erhält dann die mittlere Wellenlänge durch Division der Zahl der Wellen in die

gesamte Länge. Kleine Unterschiede gleichen sich so aus, und die Genauigkeit wird im ganzen gesteigert. Die Messung erfolgt hierbei ebenso wie bei der Ermittlung von Flächengrößen und sonstiger Dimensionen von Wolken auf 0.1 mm mit einem Anlegemaßstabe unter Umrechnung auf wirkliches Maß mit Hilfe der Kenntnis der Höhe der Objekte und der Brennweite des Objektivs.

Von erheblichem Interesse ist die Feststellung der Neigung von ei-Federn und -Fäden und von Wolken-schichten gegen die Horizontale. Hierbei ist zur Regel gemacht, daß nur solche Resultate als verbürgt angenommen werden, die durch überschüssige Bestimmungen bestätigt sind. Bei der Ermittlung der Neigungen von Wolkenschichten z. B. wurde die Messung an mindestens drei in einer geraden Linie liegenden Punkten oder aber an mindestens zwei verschiedenen Stellen an je zwei Punkten ausgeführt. Man hat so die Gewißheit, daß die im allgemeinen kleinen Neigungen reell sind und nicht durch Beobachtungsfehler vorgetäuscht werden.

Häufig findet man auf einer Platte, namentlich in der ei-Region, verschiedene Schichten derselben Wolkenform etagenförmig angeordnet. Um rasch und sicher zu erkennen, welche einzelne Messungen zusammenzufassen sind, stellt man die einzelnen Höhen graphisch dar und trifft hiernach seine Entscheidung.

Was die Zahl der im Mittel pro Platte ausgestochenen und gemessenen Punkte betrifft, so ergab sich dafür im Mittel der Jahre 1900 bis 1907 und 1915 bis 1916 etwa 4.5.*

Umfang und weitere Verarbeitung des Materials. Von den in den Jahren 1900 bis 1920 aufgenommenen Wolken sind 1723 Doppelplatten, d. h. Platten, welche gleichzeitig an den Stationen M und T exponiert sind, für Höhenmessungen benutzt worden. Ungefähr ebenso groß, nämlich 1665, ist die Zahl der auf ihnen ausgemessenen Wolkenschichten. Die Zahlen weichen voneinander ab, weil einerseits zur genaueren Bestimmung von Geschwindigkeit und Zugrichtung der Wolken vielfach zwei Aufnahmen hintereinander gemacht worden sind, die dann nur einfach gezählt sind, während andererseits manche Platten mehrere Wolkenschichten wiedergeben. Im allgemeinen ist die Wolkenbewegung mit dem Sprungsehen Wolken Spiegel, also in relativem Maße, bestimmt worden.

Mit Rücksicht auf die große Entfernung zwischen beiden Stationen, welche Höhen unter 1600 m überhaupt nicht zu messen gestattet, weil dann die parallaktische Verschiebung bereits 163 mm beträgt, und Wolken unter 2000 m nur bei besonders günstigen Umständen, sind untere Wolken nur ganz vereinzelt photographiert worden. Die Zahl der gemessenen cu und str-cu beträgt nur 27. Ganz überwiegend sind ci untersucht, nämlich 1133, außerdem 505 a-cu und a-str. Nur in bezug auf Wolken bis herab zur a-cu-Region kann daher das neue Material als Ergänzung zu den Messungen während des internationalen Wolkenjahres 1896/97¹⁾ angesehen werden. Damals waren 341 ci und ci-str, 71 ci-cu, 308 a-cu, a-str und »falsche ci«-Schichten gemessen worden.

Die Verteilung der Wolkenaufnahmen auf die einzelnen Jahre ist sehr ungleich. Am meisten brauchbare Platten, nämlich 246, wurden im Jahre 1901, am wenigsten im Jahre 1918 erhalten. Sie verteilen sich über die einzelnen Jahre wie folgt:

Jahr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1900 +	136	246	128	100	95	88	148	124	34	63
1910 +	91	92	71	82	41	65	50	31	8	14

schließlich 16 Platten im Jahre 1920. Im ersten Jahrzehnt wurden Messungen am häufigsten an den für aeronautische Messungen vorgesehenen »internationalen« Tagen angestellt, im zweiten Jahrzehnt richtete sich das Hauptaugenmerk auf ei-Wolken bei Anzeichen von Witterungsumschlägen, während a-cu nur ausnahmsweise photographiert wurden. Die weitere Bearbeitung ist meist für die Zeitabschnitte 1900 bis 1909 und 1910 bis 1920 getrennt vorgenommen worden, um die Ergebnisse in sich vergleichen zu können.

Von jeder gemessenen Wolke — je nach der Güte entweder von der M- oder von der T-Platte, ist ein Positiv (Papierabzug) angefertigt worden, auf welchem die ausgemessenen Punkte mit roter Tinte eingezeichnet sind. Auf diese Weise ist eine äußerst wertvolle, bequeme zu benutzende Sammlung von Wolken ohne perspektivische Verzeichnung entstanden.

Bei der Zusammenstellung der Messungen wurde immer die Wolkenform möglichst genau beschrieben, außerdem kurz die Wetterlage mit Angaben über Stärke und Richtung des Bodenwindes. Die Wolkenhöhe, vom Meeresspiegel an gerechnet, ist in Dekametern, die Geschwindigkeit in ganzen mps., die Richtung bis auf ganze Striche der 16 teiligen Windrose (22 $\frac{1}{2}$ °) angegeben. Höhenunterschiede einzelner Wolkenschichten oder Wolkenpunkte sind meist bis auf ganze Meter berechnet, da die Einzelwerte in Metern ausgedrückt sind.

Vom Jahrgang 1908 an bis 1920 sind die Einzelwerte von Wolkenschichten in »Ergebnisse der Meteorologischen Beobachtungen in Potsdam« (zuerst im Jahrgang 1909) abgedruckt worden. Das wertvolle ältere, aber erst später ausgewertete Material aus den Jahren 1900 bis 1907 kann leider nicht in extenso veröffentlicht werden.

¹⁾ A. Sprung und R. Süring: Ergebnisse der Wolkenbeobachtungen in Potsdam und an einigen Hilfsstationen in Deutschland in den Jahren 1896 und 1897 (Veröffentl. des Kgl. Preuß. Meteor. Instituts). Berlin 1903.

2. Höhe von Wolkenformen.

Bei der Bearbeitung der einzelnen Platten ist versucht worden, die Wolkenformen nicht nur in das internationale Schema richtig einzureihen, sondern außerdem noch engere Gruppen zusammenzufassen. Dabei schloß ich mich bezüglich der ei möglichst eng an meine bei Bearbeitung der Potsdamer Wolkenmessungen 1896/97 benutzte Klassifikation¹⁾ an, jedoch wurden einige Formen noch etwas schärfer definiert; außerdem wurde zu den beiden früheren ei-str-Formen (Filz und Decke) noch der netzförmige ei-str hinzugefügt. Für diese Form haben sich freilich wenig eindeutige Ergebnisse gezeigt, und zwar hauptsächlich aus dem Grunde, weil das ei-Netz meist aus zwei oder mehr übereinander liegenden Wolkenschichten besteht und die einzelnen Schichten manchmal in verschiedene Gruppen eingereiht worden sind, so daß die Ausbeute an solchen Netzformen sehr gering ausgefallen ist (19 Platten). In Zukunft wird es sich empfehlen, diese Formen mit der des kamm- oder skelettförmigen ei zu vereinigen.

Die Sonderklassifikation 1900/20 umfaßte folgende Formen:

1. ci-Hauch: matter Anflug von dünnen, nebligen Massen mit einförmiger Struktur (ci informis).
2. ci-Schopf: Kralle, Locke oder Knäuel an der Vorderseite von Fäden (im Sinne der Zugrichtung) (ci uncinus).
3. ci-Flocken: flockig ohne deutliche Fäden, ausnahmsweise wulstförmig, aber nicht fest geballt oder gleichmäßig abgerundet und dadurch abweichend von ci-cu (ci floccosus).
4. ci-Nest oder -Feder²⁾: am häufigsten Knäuel mit auslaufenden Fasern, aber auch wirbel-, strauch-, schachtelhelm-, wurzel-, flammenförmig (ci pennatus).
5. ci-Band: parallele Bänder (Wogen) in annähernd gleichen Abständen. Breite der Bänder mindestens 100, durchschnittlich 500 bis 1000 m, in der Regel nahezu senkrecht zur Zugrichtung, manchmal Übergang zu ci str (ci undulatus).
6. ci-Faden: gerade, meist dicht zusammengedrückte und annähernd in die Zugrichtung fallende Fasern von weniger als 100 m Breite, vielfach bündelförmig. Zuweilen wogenförmig, zuweilen aber auch Fortsetzung oder entartete Ausbildung von ci 4 (ci fascigerus).
7. ci-Kamm oder -Rippe: skelett- oder grätenförmig mit ausgesprochener Hauptachse. Die Hauptachse ist (meist nahezu rechtwinklig) ausgekämmt; zuweilen sind auch zwei verschiedene Wogensysteme schichtförmig übereinander gelagert und dann etwas federförmig (ci vertebratus).
8. ci-Schweif: stark gebogene Fasern (Roßschweif), wahrscheinlich meist nur eine entartete Sonderform von ci 6 (ci equinus).
9. ci-Filz: nahezu geschlossene ci-str-Decke von gespinnartigen, wirtt durcheinander laufenden Fasern (ci-str implexus).
10. ei-Decke: matte, ziemlich einförmige und dichte ci-str-Decke, vielfach flockig (ci-str velum).
11. ei-Netz: ziemlich regelmäßiges, netzartiges ci-str-Geflecht, zuweilen ballenförmig mit Lücken. Übergang zu »negativen« Formen nach Sprung; vergl. S. 13 (ci-str corrosus).
12. ci-cu: hellglänzende, deutlich und ziemlich gleichmäßig abgerundete Wolkenballen (ci-cu).

Tabelle I. Höhen von Cirruswolken in km über Meeresspiegel.

Wolkenart	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Winter	Früh- ling	Som- mer	Herbst	Jahr
1. ci-Hauch . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	11.11	11.17	—	10.71	—	—	—	—	11.000
2. ci-Schopf . . .	7.41*	—	7.61	8.34	8.06	8.91	8.87	9.64	8.57	9.73	9.34	8.93	7.50	8.44	9.03	9.33	8.585
3. ci-Flocken . . .	8.54	7.42*	8.21	7.95	8.69	8.44	8.80	9.89	9.33	9.00	8.95	8.19	8.06	8.39	9.34	8.71	8.625
4. ci-Nest	8.22	8.47	8.17	7.95*	7.98	8.58	9.14	9.41	9.67	9.91	9.11	8.88	8.29	8.17	9.41	9.30	8.792
5. ei-Band	8.19	8.39	7.75	8.54	7.71*	9.02	9.28	9.78	9.23	9.19	9.35	7.78	8.11	8.42	9.43	8.77	8.682
6. ci-Faden	7.90	7.72*	7.80	7.81	7.72*	8.17	8.80	9.67	9.06	9.28	8.89	9.15	7.81	7.90	9.18	9.11	8.500
7. ci-Kamm	8.17	8.13*	8.40	8.14	8.23	8.74	8.79	8.99	9.13	8.98	8.90	8.17	8.23	8.37	8.97	8.68	8.562
8. ci-Schweif . . .	—	—	5.73	6.44	9.02	7.17	8.31	—	10.17	10.17	—	—	—	7.54	—	—	7.938
9. ci-Filz	7.58	4.80*	8.50	7.83	6.08	8.72	9.70	9.50	9.74	9.46	8.82	8.00	6.96	7.54	9.65	8.93	8.270
10. ei-Decke	8.55	8.59	7.77*	8.10	8.66	9.69	8.79	9.00	9.78	8.61	8.20	8.16	8.30	8.82	9.49	8.32	8.732
11. ei-Netz	7.86	7.24	—	7.14*	9.31	8.23	8.04	10.17	—	8.98	10.17	7.45	7.55	8.23	9.10	8.87	8.438
ci (Summe 1-11) .	8.14	8.05	8.02	7.99*	8.17	8.62	8.97	9.57	9.35	9.37	9.01	8.36	8.07	8.26	9.30	8.91	8.635
reinen ci (1-8) . .	8.16	8.18	8.02	8.02*	8.32	8.53	8.94	9.52	9.29	9.56	9.06	8.40	8.12	8.29	9.25	9.01	8.667
ei-str (9-11) . . .	8.09	7.51	8.07	7.89	7.42*	8.99	9.20	9.77	9.77	8.99	8.68	8.07	7.89	8.10	9.58	8.58	8.538
ci-cu	—	6.80	6.47	5.88*	6.08	5.81	6.60	6.50	6.79	6.72	5.82	6.26	6.64	5.92	6.63	6.27	6.365
ci 4 { 1900-09 . . .	8.28	8.97	8.28	8.46	7.77*	8.56	9.36	9.44	9.87	9.89	9.03	8.66	8.52	8.26	9.59	9.19	8.890
{ 1910-20	8.00	7.47	7.98	7.35*	8.30	8.64	8.87	9.25	9.32	9.99	9.39	9.24	7.81	8.10	9.51	9.54	8.649
Stratosphäre ³⁾																	
(Beginn untere Grenze)	9.77	9.91	10.00	9.73	9.72*	10.05	10.38	10.55	10.62	10.68	10.70	10.25	9.89	9.83	10.52	10.54	10.190

¹⁾ a. a. O. S. 77.

²⁾ Die Bezeichnung »Feder« ist zwar sehr gebräuchlich, sollte aber möglichst vermieden werden, da sie leicht zu Verwechselungen mit kamm- oder rippenförmigen ci führt.

³⁾ ausgeklübelt.

In Tabelle I sind monatliche, jahreszeitliche und jährliche Mittel der Seehöhen dieser verschiedenen Wolkenformen zusammengestellt; Tabelle II enthält die Zahl der hierfür benutzten Messungen. Da die Zahl der Messungen im Sommer wesentlich größer ist als im Winter, und da ein sehr starker jährlicher Gang der Wolkenhöhen vorhanden ist, sind die Jahresmittel der ci aus den Monatsmitteln gebildet. In Zeile 12 der Tabelle I

Tabelle II. Zahl der zur Höhenbestimmung von Ci benutzten Wolkenschichten.

Wolkenart	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Jahr
1. ci-Hauch	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1	—	5	7
2. ci-Schopf	3	—	4	5	2	4	12	4	6	6	10	5	61
3. ci-Flocken	8	3	22	17	17	28	31	16	16	14	29	19	220
4. ci-Nest	10	9	8	14	15	28	21	16	22	28	27	8	206
5. ci-Band	8	6	15	9	8	9	19	7	16	21	10	10	138
6. ci-Faden	7	3	8	7	11	11	9	5	14	12	20	6	113
7. ci-Kamm	5	5	11	8	17	23	17	10	12	9	7	12	136
8. ci-Schweif	—	—	1	1	1	2	3	—	—	2	—	—	10
9. ci-Filz	5	1	4	3	7	12	8	7	3	4	3	1	58
10. ci-Decke	6	3	6	8	6	9	7	5	9	12	10	8	89
11. ci-Netz	1	2	—	2	1	4	1	3	—	1	3	1	19
ci (I-II)	53	32	79	74	85	130	128	73	99	110	119	71	1053
ci-cu	—	1	1	8	5	14	14	12	7	16	10	2	90

sind alle ci-Formen (ausgenommen ci-cu) zu einem Mittel zusammengefaßt, in den Zeilen 13 bis 15 sind reine ci-Formen, ci-str und ci-cu getrennt gemittelt. Die letzte Zeile enthält die am Aeronautischen Observatorium zu Lindenberg (34 km ESE von Potsdam) bestimmten Durchschnittshöhen der unteren Grenze der Stratosphäre nach Messungen in den Jahren 1906 bis 1916¹⁾.

In bezug auf Höhe nimmt der ci-Hauch eine Sonderstellung ein. Da das Objekt gerade im Zenit photographisch schwer zu erfassen ist, liegen leider nur die sieben Messungen aus Spätsommer und Herbst vor, aber alle lieferten Höhen von rund 11 km. Der ci-Hauch schwebt also an der obersten Grenze der Troposphäre, etwa 2 km höher als die übrigen ci; auch 1896/97 lag diese Form bei weitem am höchsten. Die übrigen Formen zeigen im Jahresmittel keine erheblichen Höhenunterschiede untereinander. Die höchste Form ist — ebenso wie 1896/97 — das ci-Nest (Feder), desgleichen tritt die Zusammengehörigkeit der Formen 5 bis 7 wieder gut hervor, aber im übrigen gewinnt man den Eindruck, daß 1896/97 der Witterungscharakter stark in die Messungen eingegangen ist, während er in der langen Reihe 1900 bis 1920 ausgeglichen ist. Die Seltenheit der Beobachtungen von ci-Schweif (ci 7) hängt jedenfalls damit zusammen, daß die Form im Zenit wenig ausgeprägt ist, die geringe Höhe dieser Form damit, daß nur wenige Messungen aus Sommer und Herbst vorliegen. Recht bemerkenswert ist die ungefähr gleiche Höhe von ci und ci-str, die bei Zerlegung der 21jährigen Reihe in zwei Teile ebenso deutlich hervortritt wie in dem Gesamtmittel. Wenn sich auch der typische ci-str, eine strukturlose, gleichmäßige Schicht photographisch nicht ausmessen läßt, so ist doch unzweifelhaft, daß diese Wolkenform in ihrem Anfangsstadium, wo sie sich noch nicht ganz zusammengeschlossen hat (ci 10), sogar höher ist als die meisten reinen ci-Formen.

Bildet man für die einzelnen ci-Formen die Jahresmittel getrennt für die beiden Zeiträume 1900/09 und 1910/20 — ausgenommen für die selteneren ci 1, 8, 9 und 11, bei denen im zweiten Zeitabschnitt einige Monatsmittel fehlen —, so stimmen die Formen unter sich bis auf höchstens 280 m überein.

Zeitabschnitt	ci 2	ci 3	ci 4	ci 5	ci 6	ci 7	ci 10
1900—1909 . . . km	8.674	8.588	8.800	8.767	8.622	8.782	8.758
1910—1920 . . . »	8.600	8.756	8.649	8.732	8.342	8.529	8.714
Unterschied . . . »	0.074	0.168	0.241	0.035	0.280	0.253	0.044

Die ci-Wolken haben also über Potsdam eine mittlere Seehöhe von 8.6 km, sie liegen im Jahresmittel 1½ km unterhalb der oberen Begrenzung der Troposphäre, ihre Jahresschwankung beträgt 1.6 km.

Für die Unterscheidung verschiedener ci-Formen ist der jährliche Gang der Höhe viel charakteristischer als die Höhe selbst. Der allgemeine Jahresverlauf der ci-Höhe ist gekennzeichnet durch sehr rasches Anwachsen von April bis Juli, ziemlich konstante Höhe von Juli bis Oktober mit Neigung zu einem sekundären Maximum im September, das manchmal zum Hauptmaximum wird, ferner durch raschen Abfall von Oktober bis Januar und sehr niedrige Höhen bis April. Das Minimum tritt entweder zu Anfang des Winters oder erst im Vorfrühling ein; dazwischen (Ende Januar oder im Februar) liegt zuweilen ein kleines Maximum. In der ci-Region bilden

¹⁾ J. Reger: Die Lindenerger Registrierballonaufstiege in den Jahren 1906 bis 1916. Die Arbeiten des Preuß. Aeron. Observ. bei Lindenberg 13, Wiss. Abhandl. Braunschweig 1919 S. 41.

also Sommer und Herbst (Mai bis Oktober) die warme, Winter und Frühling die kalte Jahreszeit; der bezügliche Höhenunterschied beträgt rund 1 km. Bei der für das internationale Wolkenjahr 1896/97 empfohlenen Zusammenfassung der Monate April bis September und Oktober bis März tritt der Unterschied zwischen warmer und kalter Jahreszeit weniger scharf hervor.

Prüft man diesen Jahresverlauf an den einzelnen ci-Formen, so sieht man aus Tabelle I, die für das Studium durch getrennte graphische Darstellungen der Gänge in den Zeiträumen 1900/09, 1910/20 und teilweise 1896/97 ergänzt wurde, hinsichtlich des Maximums: Ein einfaches Sommermaximum haben ci 3, 7 und 10; ein Hauptmaximum im Juli mit sekundärem Herbstmaximum haben ci 5, 6, 9, 11; bei ci 2 ist es zweifelhaft, welches dieser beiden Maxima überwiegt. Dagegen hat ci 4 (Nest) nur ein Herbstmaximum; mit Rücksicht auf die Wichtigkeit dieser Feststellung sind in Zeile 16 und 17 die Zahlen für die einzelnen Jahresgruppen getrennt mitgeteilt.

Ein einziges deutliches Winterminimum haben die Formen 3, 7, 9; bei ci 2, 5, 6, 10 und 11 ist es zweifelhaft, ob das Minimum im Frühwinter oder Frühling überwiegt. ci 4 nimmt wiederum eine Sonderstellung ein mit einem scharf ausgeprägten Frühjahrsminimum (März oder April).

Es liegt nahe, diese Ergebnisse in Beziehung zu setzen zu anderen Vorgängen in den obersten Schichten der Troposphäre, um zu entscheiden, ob bestimmte ci-Formen vorwiegend Neubildungen oder nur Überreste von Depressionswolken sind. E. Gold ist — freilich auf Grund eines wenig vergleichbaren und dürftigen Beobachtungsmaterials¹⁾ — zu keinen eindeutigen Schlüssen gekommen. Nachdem er hervorgehoben hatte, daß der reine ci für Berlin, Paris und Upsala (nach den Ergebnissen von 1896/97) das Maximum seiner Höhe im Frühsommer, das Minimum im Spätwinter hat, entgegen dem Herbstmaximum und Frühlingminimum der unteren Stratosphärenengrenze (H_c), fährt er fort: »Während also — wenigsten für ci-str — die Ergebnisse auf eine gemeinsame Ursache für die Änderung von H_c und Wolkenhöhe hingewiesen haben, zeigen sie, daß die Wolkenbildung in der Regel nicht die Ursache der plötzlichen Abnahme und des Zeichenwechsels des Temperaturgradienten ist. Das letztere war auch kaum anzunehmen. Dagegen ist es wichtig hervorzuheben, daß die Höhe des nest- oder federförmigen ci (ci 4), dessen wirbelähnliche Struktur kürzlich auch S. Fujiwhara²⁾ betont hat, einen durchaus parallelen jährlichen Gang mit der Höhe der unteren Stratosphärenengrenze über Lindenberg hat. Denselben Jahresgang hat H_c über München³⁾. Auch die sekundären Extreme (Maximum im Februar, Minimum im Dezember) stimmen gut überein mit den Höhen von ci 4 über Potsdam und H_c über Lindenberg. Da der vom Jahresgang der meisten andern ci-Formen abweichende der nestförmigen ci genügend verbürgt ist — zum Beleg sind in Tabelle I, Zeile 16 und 17 die monatlichen Höhen für die Zeitabschnitte 1900—1909 und 1910—1920 getrennt aufgeführt —, so ist man zu dem Schluß berechtigt, daß die Ausbildung dieser ci-Form in engem Zusammenhang steht mit der Höhe der unteren Stratosphärenengrenze, wahrscheinlich ist aber die ci-Bildung nicht die Ursache, sondern die Wirkung der Schwankungen von H_c. Der Höhenunterschied zwischen H_c und ci 4 hat gleichfalls einen jährlichen Gang; er ist am kleinsten (0.8 km) im Spätsommer, am größten (1.8 km) am Ende des Winters. Das Ergebnis ändert sich nur wenig, wenn man an Stelle von Höhen mit Luftdichten rechnet. Das besagt also, daß der Einfluß der Stratosphäre in der kalten Jahreszeit tiefer hinabreicht als in der warmen, oder daß die Temperaturschwankungen, welche die Bildung von ci 4 begünstigen, im Winter größer sind als im Sommer. Druck- oder Temperaturerniedrigungen an der unteren Stratosphärenengrenze werden sicherlich das ausschlaggebende Moment in dem Zusammenhang zwischen H_c und ci 4 sein. Treten bei Druckerniedrigung in der Stratosphäre oder Substratosphäre Expansion und Abkühlung ein, oder entsteht durch verstärkte Ausstrahlung oder schließlich durch horizontalen Kälteeinbruch eine Einsenkung der isothermen Flächen, so sind die Bedingungen für Wolkenbildungen mit wirbelartigem Charakter gegeben. Auch die hauchförmigen, ganz hohen ci (ci 1) sowie ein Teil der schopfförmigen ci (ci 2) mit sekundärem Höhenmaximum im Herbst werden mit Änderungen der unteren Stratosphärenengrenze in Verbindung stehen. Das sind also Neubildungen von Wolken.

Dagegen werden die meisten wellenartigen ci-Formen nur Überreste oder Umbildungen von Depressionswolken oder wenigstens Folgerscheinungen der aus Depressionsgebieten strömenden Luftmassen sein. Hierauf deutet schon der jährliche Gang ihrer Höhe mit dem Juli-Maximum hin. Denselben Gang hat die Temperatur an der unteren Stratosphärenengrenze; deren Maximum fällt ebenfalls nicht auf den Herbst, sondern schon auf den Juli und ihr Minimum auf den Februar. Ungefähr ebenso ist der jährliche Temperaturgang in den Luftschichten zwischen 9 und 12 km über Lindenberg. Da die Vertikalerstreckung der Zyklogen mit der Temperatur der oberen Luftschichten in enger Beziehung steht, so werden auch die Höhen der von der oberen Wolkenkappe der Depressionen ausgehenden Cirren um so größer sein, je höher dort die Temperatur ist. Es werden also die ci-Formen mit einem Juli-Maximum der Höhe Begleiterscheinungen von großen Depressionen sein. Insbesondere gilt dies von den flockigen und bandförmigen ci (ci 3, ci 5, ci 6 und ci 7), ferner von dem strukturlosen dichten ci-str (ci 10). Ihr Zusammenhang mit dem Depressionsgebiet ist nicht so zu denken, daß sie immer als fertige Kondensationsprodukte ausfließen, sondern es können auch die ausströmenden Luftmassen auf ihrem Wege nach

¹⁾ E. Gold: The international kite and balloon ascents. Geophys. Memoirs Nr. 5. London 1913. S. 124.

²⁾ S. Fujiwhara: The natural tendency towards symmetry of motion and its application as a principle in meteorology. Quart. Journ. R. Met. Soc. 47 (1921). S. 287.

³⁾ A. Schmauss: Münchener Aerologische Studien Nr. 8. (Deutsch. Met. Jahrb. für Bayern 1918.)

dem Hochdruckgebiet sich mehrfach kondensieren und austrocknen, je nachdem sie an kälteren oder wärmeren Luftschichten vorbeistreichen. Je näher sie an die oben relativ kühle Antizyklone kommen, desto mehr Gelegenheit ist zur Bildung zarter Mischungswolken gegeben. Der Beobachter auf der Erde sieht die Cirren zeitlich in umgekehrter Reihenfolge: zuerst die letzten flockigen Depressionsreste oder zarte regelmäßige Wogen, alsdann — häufig in mehreren Schichten übereinander — immer unregelmäßigere, skelett-, feder-, gespinst- oder netzförmige Gebilde, darauf manchmal erneutes Aufklaren und schließlich den strukturlosen oder schwach flockigen Cirrostratus. Alle diese Wolken gehören aber ihrem Ursprunge nach zur Depression. Eine solche Auffassung der ci-Bildung ist im wesentlichen nur eine Verallgemeinerung der Betrachtung von A. de Quervain über die Entstehung der sommerlichen ci aus Gewittercirren¹⁾. Nachdem de Quervain einige Winterbeobachtungen mitgeteilt hat, gelangt er auch schon zu dem Schluß: »Diese und ähnliche Beobachtungen lassen schließen, daß auch die einer großen Depression vorangehende Cirrostratusdecke ganz so entstanden ist, wie es im Sommer im einzelnen beobachtet werden kann. De Quervain schätzt, daß für seinen Beobachtungsort (Zürich) etwa $\frac{3}{4}$ aller im Laufe des Jahres, besonders im Sommer sichtbaren ci und ci-str nichts anderes sind als die Reste von cu-ni; diese Form müßte logisch ci-str-cu-ni genitus heißen. Zu ungefähr dem gleichen Häufigkeitswert führen die Potsdamer Messungen. Faßt man die ci-Formen 3, 5 bis 8 und 10, sowie die Hälfte der schopfförmigen ci und des ci-str-Gespinstes als Depressionswolken auf, so bilden diese zusammen 71% unserer sämtlichen ci-Messungen.

Hinsichtlich der extremen Höhen von ci verdient hervorgehoben zu werden, daß in dem Zeitraum 1900 bis 1920 35 Wolken über 11 km, drei über 12 km hoch gefunden worden sind. Die größte Höhe war 12,67 km; sie wurde gemessen am 19. Mai 1914 an einem skelettförmigen ci, der mit 19 mps aus NE zog; auch die dritthöchste Wolke (12.25 km am 8. Juli 1901) zog aus NE, während ein ci von 12.55 km (10. Juni 1915) dem Randgebiete eines großen ci-Schirmes angehörte. Ungefähr die Hälfte der Wolken über 11 km Höhe hatten eine nördliche Komponente der Zugrichtung, nur 8 hatten eine südliche. Im Wolkenjahr 1896/97 betrug die größte ci-Höhe für Potsdam 11.91 km; man kann daher sagen, daß hier die Wolken unter 13 km Höhe bleiben und nur selten 12 km überschreiten. Natürlich treten ganz hohe Wolken vorwiegend im Sommer und Herbst ein (28 Fälle von 35). An den ci mit Höhen über 11 km sind alle Wolkenformen beteiligt mit Ausnahme der an Zahl schwach vertretenen ci 2 und ci 8. Relativ am stärksten (d. h. mit Rücksicht auf die Gesamthäufigkeit seines Vorkommens) ist der hohe ci-Hauch (57%) vertreten, die übrigen Wolken dagegen nur mit 2 bis 4% ihrer Häufigkeit. Die untere Höhengrenze, in der noch typische ci-Formen vorkommen, ist etwa 5 km. Zweimal sind ci unter 5 km gemessen worden, nämlich ein ci-Filz von 4.80 km (29. Januar 1901) und ein flockiger, ci-str ähnlicher ci von 4.94 km (6. Juni 1906). ci-ähnliche Formen kommen bis herab zu 3 km vor. Auf die Höhengrenze unter 6 km kommen 27 Fälle (2 $\frac{1}{2}$ %) zwischen 7 $\frac{1}{2}$ und 10 km sind ci ziemlich gleichmäßig verteilt; mehr als 50% aller Messungen fallen in diese Schicht. Näheres über die Häufigkeitsverteilung wird am Ende des folgenden Abschnitts gesagt.

Während hinsichtlich der Höhe eine Unterscheidung zwischen ci und ci-str nicht gerechtfertigt ist, ergibt sich für ci-cu eine merklich niedrigere Höhe, nämlich 6.36 km im Jahresmittel. Im Zeitraum 1896/97 war 5.75 km gefunden worden. Der ci-cu ist vorwiegend eine Wolke der warmen Jahreszeit, 80% der Messungen fallen in die Monate April bis einschließlich September. Die Ermittlung des jährlichen Ganges wird durch die wenig zahlreichen Winterbeobachtungen sehr erschwert; es ist aber nicht daran zu zweifeln, daß gerade im Winter auffallend hohe ci-cu vorkommen. Andererseits sind ci-cu im Sommer merklich höher als im Frühling und Spätherbst. Eine befriedigende Erklärung für das Auftreten einer besonderen typischen Wolkenform, wie es ci-cu sind, in einer Höhengrenze mit durchschnittlich starken vertikalen Temperaturgradienten steht noch aus. Anscheinend sind ci-cu, ebenso wie die meisten ci nur Restgebilde von solchen Depressionen, die nicht weit nach oben reichen oder dem Beobachter ziemlich nahe sind. 50% aller ci-cu-Messungen liegen zwischen 6 und 7 km Höhe. Während weiter oberhalb meist nur noch Anhäufungen von Eisnadeln, die durch den Wind streifig ausgezogen werden, vorkommen, reicht bis zu 7 km Höhe offenbar der Wasserdampfgehalt der Luft noch zu ballenförmigen Wolkenkonglomeraten aus. Der im Zeitraum 1900/20 gemessene höchste ci-cu war 8.70 km, der niedrigste 3.51 km hoch.

Bei den a-cu-Messungen wurden, ebenso wie bei den ci, verschiedene Formen unterschieden und durch römische Ziffern gekennzeichnet. Es waren folgende:

I. Normale Form, meist mit Schatten auf den Ballen und wogenförmig angeordnet. Waren die Wolkenballen in der Windrichtung faserig ausgezogen, so wurden sie mit Ia bezeichnet.

II. Körnige Struktur oder sehr kleine — $< (100 \text{ m})^2$ —, meist einzeln stehende Wolkengebilde, die früher Beinamen, wie frixus, floccus, granosus, sphericus erhalten haben.

III. Stark nach unten ausgebuchet; kissenförmig (pulvinatus), mindestens $(300 \text{ m})^2$ groß. In diese Gruppe sind auch die Mammato-Formen eingereiht.

IV. Wolken mit Lücken in den einzelnen Ballen, so daß vielfach ein netzartiges Aussehen entsteht, von Sprung »negatives« a-cu genannt, von andern a-cu corrosus.

¹⁾ De Quervain: Beiträge zur Wolkenkunde. 5. Meteor. Zeitschr. 1908 S. 450.

V. Auffallend glänzende, kleine und zarte Schichten; entweder einzeln stehende, kuppenartige Schichten mit scharf zulaufenden Rändern und hier zuweilen perlmutartig irisierend (a-cu lenticularis, margarodes, incertus, Wolkenhaube), oder schirm- bzw. pilzartig aus Böen- oder Gewittergewölk ausfließend (*falscher* ei).

VI. Turmartig aus einer a-cu-Wolkenschicht herauswachsend (a-cu castellatus).

VII. a-str: gleichmäßige, weißgraue Schicht mit a-cu-Rändern.

Die Formen IV bis VI gehören nicht sämtlich in die a-cu-Region; es sind darunter auch Wolken des aufsteigenden Stromes, aber durchschnittlich liegen sie doch zwischen 3.5 und 6.5 km Höhe und sind deshalb in Ermangelung einer anderen Gruppierungsmöglichkeit hier untergebracht worden.

Die Höhe der verschiedenen a-cu-Form und daneben die Zahl der Messungen ist in Tabelle III zusammengefaßt worden.

Tabelle III. Höhen von a-cu-Wolken in km über Meeresspiegel.

Wolkenart	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
I. a-cu norm. . . .	3.68 ₁₂	4.14 ₁₁	4.04 ₁₇	2.85 ₃₀	3.75 ₃₇	3.90 ₂₇	3.91 ₄₆	4.28 ₃₉	3.98 ₂₉	4.29 ₄₃	4.01 ₁₈	4.50 ₁₄	3.944 ₃₃₄
H. a-cu granosus . .	3.19 ₂	3.89 ₁	3.24 ₇	3.24 ₇	4.38 ₁₃	3.25 ₁₁	3.75 ₁₉	3.96 ₁₈	4.53 ₇	4.45 ₉	3.79 ₂	6.51 ₁	4.015 ₉₀
III. a-cu pulvin. . .	5.27 ₂	5.02 ₁	4.12 ₄	4.22 ₅	3.39 ₁	3.48 ₆	3.92 ₅	2.74 ₂	2.96 ₁	3.66 ₃	5.91 ₂	2.51 ₁	3.933 ₃₉
IV. a-cu corrusus . .	—	—	—	5.52 ₁	5.98 ₁	6.75 ₁	3.34 ₂	2.84 ₁	—	7.45 ₂	3.77 ₁	—	5.161 ₉
V. a-cu lentic. . . .	—	—	3.64 ₉	4.74 ₅	4.76 ₅	6.15 ₁	5.27 ₅	2.61 ₁	—	2.94 ₂	6.35 ₂	—	4.717 ₂₃
VI. a-cu castell. . .	—	—	—	—	—	6.13 ₁	—	—	—	—	—	—	6.130 ₁
VII. a-str.	2.52 ₁	—	—	3.17 ₁	4.88 ₅	—	4.08 ₃	—	4.17 ₁	4.14 ₂	4.18 ₁	—	4.212 ₁₄
Mittel: a-cu I—III .	3.82	4.19	3.85	3.08	3.92	3.73	3.88	4.13	4.06	4.28	4.16	4.51	3.967

Die normalen a-cu-Formen (I bis III) haben auch bei Gruppierung nach Jahreszeiten eine mittlere Höhe, die von 4 km wenig abweicht. Allerdings kommen in den Wintermonaten typische a-cu auch in Höhen von weniger als 2 km vor, die sich mit dem Wolkenautomaten wegen der zu großen parallaktischen Verschiebung beider Bilder nicht mehr messen lassen, und der in Tabelle III angedeutete jährliche Gang der Höhe mit einem Maximum im Winter ist daher zweifelhaft¹⁾. Jedenfalls sind die a-cu im Frühling und Frühsommer niedriger als im Herbst. Trotz der in meinem Material fehlenden ganz niedrigen a-cu bestätigt sich wieder, daß die schon von Ekholm und Hagström²⁾ eingeführte und namentlich von H. Hildebrand Hildebrandsson wiederholt empfohlene Zweiteilung der a-cu in obere (> 4 km) und niedere (< 4 km) eine gewisse Berechtigung hat, wenn sie sich auch nicht durch abweichende Form äußert. Schon 1896/97 hatten sich für Potsdam³⁾ zwei Häufigkeitsmaxima bei 2600 und bei 4600 m ergeben. Fast genau dieselben Scheitelwerte, nämlich 2600 und 4200 m, zeigt das Material von 1900/20; ein weiteres sekundäres Maximum ist bei 6600 m ausgeprägt (vergl. S. 17). In der warmen Jahreszeit sind die a-cu ungefähr doppelt so häufig wie in der kalten; sie sind also nicht so ausgesprochene Sommerformen wie die ci-cu. Eine deutliche Beziehung zwischen Wolkenhöhe und Ballengröße besteht für a-cu nicht.

Unter den a-cu III befinden sich nur vier typische a-cu mammati, d. h. gleichmäßige Wolkenschichten mit sackartig herabhängenden Ansätzen. Zufällig gehören alle dem Monat Juni an; die näheren Begleitumstände waren:

- S. VI. 1901 3^p Höhe: 2.24 km, Zug: W 6 mps, tagsüber vereinzelt ●^o.
 30. VI. 1909 0^p » 4.88 » » SW 6 » ● um 1^p.
 30. VI. 1909 6^{1/4}^p » 2.45 » » N 5 » 1^{1/2} Stdn. nach ●.
 28. VI. 1915 11^a » 4.58 » » S 9 » Ferngewitter.

Kurze Zeit vor oder nach der Messung oder in der Nachbarschaft der Wolken fiel stets Regen, so daß also großtöpfiges Gewölk eine Vorbedingung für die Entwicklung dieser Formen sein dürfte. Bemerkenswert sind die Beobachtungen vom 30. VI. 1909, wo gut entwickelte a-cu mamm. mittags in 4.88 km und 6 Stunden später an ganz ähnlichen Wolken in 2.45 km Höhe gesehen wurden. Leider waren auch bei dem am besten entwickelten a-cu mamm. am 28. VI. 15 die Wolkenumrisse im Zenit zu wenig deutlich, um eine genaue Ausmessung von Höhenunterschieden in der Wolke zu ermöglichen.

Die Höhenmessungen von a-cu IV (Wolken mit mehr oder weniger kraterförmigen Lücken) zeigen, daß diese Gebilde meist der ci-cu-Region angehören. 6 von den 9 gemessenen Wolken waren über 5.5 km hoch. Mit einer Ausnahme lagen sie am Rande, aber doch noch innerhalb eines Hochdruckgebiets. Manchmal handelt es sich wohl nur um zwei übereinander liegende Wogensysteme, in der Regel jedoch anscheinend um wirbelartige Neubildungen. Auch in der ci-Region sind solche netzartige Formen mehrfach beobachtet worden.

¹⁾ Übrigens hat auch W. Peppeler aus Messungen an Drachen und Fesselballonen über Lindenberg gefunden, daß a-cu und a-str in der wärmeren Jahreszeit etwas niedriger sind als in der kälteren. Meteor. Zeitschr. 1920 S. 189.

²⁾ Ekholm et Hagström: Mesures des hauteurs et des mouvements des nuages. Acta Soc. Reg. Upsaliensis 1885; Meteor. Zeitschr. 1887 S. 73.

³⁾ A. Sprung und R. Süring: Ergebnisse der Wolkenbeobachtungen . . . S. 67.

Noch weniger einheitlich als diese »negativen« a-cu sind die linsenförmigen a-cu und »falschen« ci (a-cu V). De Quervain¹⁾ hat mit Recht darauf hingewiesen, daß hinsichtlich ihres Ursprungs und meist auch hinsichtlich des Aussehens wesentliche Unterschiede bestehen zwischen der wahrscheinlich durch Hebung feuchter Luft in der Umgebung eines cu gebildeten linsenartigen Wolkenkappe oder Abschmelzungswolke und dem von einer Böenwolke direkt ausströmenden »falschen« Cirrusschirm. Andererseits ist eine starke Aufwärtsbewegung der Luft mit cu- oder cu-nb-Bildung in beiden Fällen die notwendige Vorbedingung für diese Wolkenarten und eine Abwärtsbewegung die Ursache der Linsen- und der Schirmform, so daß eine gemeinsame Bearbeitung beider Formen doch einige Berechtigung hat. Sondert man diese Wolken nach ihrem Aussehen, so erhält man als deren Höhen:

	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Jahr
a-cu lenticul.	3.10	5.86	5.40	—	4.04	2.61	2.94	—	6.35	4.23 km
»falscher« ci-Schirm	4.18	4.61	4.98	6.15	10.22	—	7.20	—	—	5.62 »

Der ausfließende »falsche« ci bildet sich nur am Gipfel von cu-nb, seine Höhe wird daher stark durch Jahres- und Tageszeit beeinflußt. Das Höhenmaximum (10.22 km) trat am Rande eines ungewöhnlich stark entwickelten Gewittergewölks auf, während das Minimum (2.80 km) das Ausströmen aus einer typischen Aprilbö anzeigte. Die Entstehung und Form dieser Wolken ist nicht wesentlich anders als bei echten ci; es handelt sich nur um eine Miniaturform von ci, und die baldige Beseitigung des Zusatzes »falsch« ist daher dringend notwendig. Die Linsen- oder Kappenformen reihen sich hinsichtlich ihrer Höhe gut in die a-cu-Schicht. Ohne Begleitung von cu können sie durch ihre Ähnlichkeit mit ci-str zu groben Höhenschätzungen verleiten. So konnten die niedrigen Wolken vom 2. August 1902 (2.61 km) und vom 8. Oktober 1903 (3.07 km) wegen ihrer zarten Form und der blendend weißen Färbung leicht für echte ci gehalten werden.

Der a-cu castellatus (a-cu VI) hat mit a-cu nur das gemein, daß er in der Regel in der Höhe der a-cu-Schicht entsteht, dann aber alle Merkmale der Wolken des aufsteigenden Stromes annimmt und dabei häufig bis in die ci-cu-Region vordringt. Bei der einzigen Messung unseres Materials (14. VI. 1910 11^h) konnten nur untere Teile einer Wolke gemessen werden, die am Horizont eine ausgesprochene a-cu castellatus-Form hatte; die Wolke zerfiel aber bei ihrem Herankommen in a-cu-artige Wolkenwürfel von etwa 500 m Breite. Um 6^h P entlud sich über Potsdam ein schweres Gewitter mit heftigen Wind- und Regenböen.

Nur der Vollständigkeit halber sind in die Tabelle III auch die a-str-Höhen aufgenommen. Von ihnen gilt in noch höherem Grade das, was schon bei den a-cu betont worden ist, nämlich daß die recht häufig vorkommenden Wolken unter 2 km Höhe nicht gemessen sind. Die Jahresmittel und besonders die Winterwerte der Tabelle III sind also zu hoch.

3. Bewegung und Häufigkeitsverteilung der Wolken.

Für die Berechnung mittlerer Wolkengeschwindigkeiten und Richtungen ist nur eine Unterscheidung zwischen ci, ci-cu und a-cu gemacht worden; eine Trennung in weitere Sonderformen von ci würde die Ergebnisse bei den großen aperiodischen Geschwindigkeitsschwankungen zwischen weniger als 1 mps und etwa 70 mps²⁾ nur verwischen. Die Monats- und Jahresmittel sind in Tabelle IV enthalten. Die darin angegebene Jahresgeschwindigkeit der ci von 22¹/₂ mps wird den wahren Mittelwert schon bis auf etwa ± 1 m treffen, da auch die Geschwindigkeiten kürzerer Zeitabschnitte in sich gut übereinstimmen. Es betrug nämlich die Geschwindigkeit der ci und ci-str in den Zeitabschnitten:

	1896/97	1900/09	1910/20	1900/20
Sommer (April—Sept.)	22.5	21.7	20.7	21.4
Winter (Okt.—März)	24.6	24.7	22.9	24.2
Jahr	23.2	23.0	20.8	22.5.

Die ci ziehen im Frühling und Frühsommer am langsamsten. Von ihrem Minimum im Mai steigt die Geschwindigkeit langsam bis Januar an. Das im Mittel angedeutete sekundäre Maximum im September ist insofern beachtenswert, als in diesem Monat die Kontraste besonders groß sind. Von den insgesamt 25 Fällen mit ci-Geschwindigkeiten über 50 mps entfallen allein 6 auf den September. Diese ci gehörten aber nicht zu tiefen atlantischen Depressionen, sondern meist zu mitteleuropäischen Zyklonen mit nachdringendem Hochdruck aus SW; ihnen folgten zuweilen sehr starke Niederschläge in Teildepressionen, sie waren aber nicht etwa Vorläufer von »Äquinoxialstürmen«. Sondert man die Fälle mit Geschwindigkeiten von mindestens 35 mps für jeden Monat aus (in Tabelle IV sind die absoluten und prozentischen Zahlen aufgeführt), so hebt sich der September nicht mehr heraus, es sind somit nur die ganz großen Geschwindigkeiten, welche das sekundäre Geschwindigkeitsmaximum dieses Monats bedingen. Prozentisch überwiegt im Winter die Zahl der mit mindestens 35 mps ziehenden Wolken ganz bedeutend die Zahlen von Frühling und Frühsommer. 50% der ci mit Geschwindigkeiten von mindestens 35 mps kamen aus Richtungen zwischen SSW und WSW, nur 5% aus östlichen Richtungen.

¹⁾ Meteor. Zeitschr. 1908 S. 442.

²⁾ Das Geschwindigkeitsmaximum betrug 1896/97 59, 1900/20 66 mps. Ein am 15. VI. 1901 gemessener Wert von 75 mps ist außer Betracht gelassen, da die Bestimmung der relativen Geschwindigkeit unsicher war.

Die mittleren monatlichen Geschwindigkeiten für ci-cu sind noch etwas unsicher, da die Zahl der Messungen im Winter zu gering ist; das Maximum scheint aber — ebenso wie bei den ci — im Winter, das Minimum im Frühling zu liegen. Die hohen Geschwindigkeiten im August und September werden bei umfangreicherem Material vielleicht verschwinden. Allerdings zeigt auch a-cu ein sekundäres Höhenmaximum im August. Die hohen sommerlichen Geschwindigkeiten von ci-cu und a-cu hängen vielleicht mit Gewitterbildungen zusammen. Auffallend, aber durch hinreichend viele Beobachtungen bestätigt, sind die großen Schwankungen der a-cu-Geschwindigkeit im Laufe des Jahres; im Dezember ziehen die a-cu fast doppelt so schnell wie im April (20.9 gegen 10.6 mps).

Tabelle IV. Richtung und Geschwindigkeit von ci, ci-cu, a-cu 1900/20.
(S = 0°, W = 90°, Geschwindigkeit in mps).

		Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
ci, ci-str	Richtung	83°	91	77	76	78	76	82	80	98	65	62	53	77°
	Geschwindigk. mps	28.5	23.8	21.4	20.2	19.7*	20.7	21.3	22.8	23.6	23.3	25.4	25.0	22.5
	Maximal- »	49	57	59	58	60	57	46	47	66	49	63	50	66
	Geschwindigkeit	NNW	WSW	NW	SW	WSW	WNW	ENE	SW	SW	NW	S	NE	SW
	Zahl der Fälle	37	75	70	83	129	115	74	92	112	115	73	54	1026
v > 35 mps, Zahl in %		8	8	9	3	5	4	9	11	10	11	10	12	100
		22	11	13	4	4	4	12	12	9	10	14	22	10
ci-cu	Richtung	68°	157	92	154	59	109	88	92	108	70	107	—	92°
	Geschwindigk. mps	(45.0)	(20.0)	18.5	11.3*	17.1	15.8	18.3	26.9	20.4	16.7	17.2	—	18.6
	Zahl der Fälle . .	1	1	8	6	15	13	12	8	19	11	4	—	98
a-cu	Richtung	109°	90	61	83	75	69	94	69	66	81	62	106	79°
	Geschwindigk. mps	16.5	17.1	13.7	10.6*	10.9	12.1	10.7	13.9	10.6	12.9	16.5	20.9	13.3
	Zahl der Fälle . .	18	9	29	42	62	55	71	56	36	60	24	14	476

Die in Tabelle IV aufgeführten mittleren Zugrichtungen sind streng gebildet aus den Komponenten der einzelnen Messungen; die Gradzählung ist von S = 0° im Sinne des Uhrzeigers gerechnet. Man sieht, daß in der ci-Region nur die Monatsmittel von September und Februar nördliche Komponenten haben, während die wesentlich tieferen ci-cu selbst im Jahresmittel noch aus W 2° N kommen. a-cu haben im Jahresmittel die gleiche Zugrichtung wie ci. Schon diese Zahlen deuten darauf hin, daß für die mittleren Wolkenzugrichtungen nicht die Höhe, sondern die Wetterlage das Ausschlaggebende ist.

Da am Potsdamer Observatorium regelmäßig zu allen geraden Stunden (außerdem um 7^h und 9^h) die Art und Menge der Bewölkung geschätzt und dabei möglichst häufig die Zugrichtung der Wolken bestimmt wird, lag es nahe, dieses Material zur Ergänzung heranzuziehen. Es ist dazu der zwanzigjährige Zeitraum 1901 bis 1920 mit mehr als 6500 Beobachtungen von Wolkenzügen benutzt worden. Von den daraus abgeleiteten monatlichen Mittelwerten soll hier nur Gebrauch gemacht werden für die Frage, wie sich der Anteil einer nördlichen und einer östlichen Komponente im Laufe des Jahres ändert. Für Nord-Europa und auch für einige Stationen Mittel-Europas ist nämlich gefunden worden, daß die ci im Winter eine nördliche Komponente und im Sommer eine südliche Komponente ihrer Westströmung haben. Die Tabelle IV zeigt in der ci-Region keine wesentliche Verschiedenheit der Zugrichtung zwischen Winter und Sommer; in den aerologischen Werten von W. Pepler ist sogar der Anteil der Südkomponente im Winter stärker als im Sommer. Da vielleicht die Strömungen zwischen S und W stärker sind als die zwischen W und N, sind Häufigkeitszählungen vorgenommen. Trennt man die Werte in Zugrichtungen zwischen WNW und ENE und in solche zwischen WSW und ESE, so beträgt der prozentische Anteil der nördlichen Zugrichtungen an den gesamten Beobachtungen im:

Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
50.9	49.1	33.2	38.1	42.5	40.8	34.3	40.2	41.7	31.6	39.8	39.6%

Nach dieser Auszählung spielen also die nördlichen Zugrichtungen im Winter eine viel größere Rolle als im Sommer. Im Januar und Februar sind nördliche Zugrichtungen ebenso häufig wie südliche, aber schon im März sinkt der Anteil der Nordwinde auf $\frac{1}{3}$ — entsprechend der in Tabelle IV angezeigten Rückdrehung des Wolkenzuges von W nach WSW — und bleibt von April bis Dezember zwischen 32 und 42 % der Gesamtbeobachtungen mit sekundären Maxima im Mai und September. Der September zeigt auch in Tabelle IV eine Nordkomponente der ci-Richtung; ebenso wie bei dem sekundären Geschwindigkeitsmaximum im September handelt es sich hier gewissermaßen um einen Vorläufer des winterlich antizyklonalen Witterungstypus.

Den geringen Anteil der Ostkomponente an den ci-Richtungen zeigt eine kleine jahreszeitlich geordnete Übersicht, welche in der ersten Horizontalreihe die prozentische Häufigkeit der ci mit Ostkomponente, ferner in der zweiten und dritten Reihe die ohne Berücksichtigung der Geschwindigkeit gebildete mittlere Richtung der östlichen und ebenso die der westlichen ci-Züge enthält (ausgedrückt in Graden, von S = 0° im Sinne des

Uhrzeigers gezählt) und schließlich die aus dem photogrammetrischen Material streng berechneten mittleren Zugrichtungen aller ci. Die dritte und vierte Zeile enthalten fast gleich große Werte, obgleich in der dritten Zeile die aus Ost ziehenden ci ausgesondert sind.

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Jahr
proz. Anteil der ci mit E-Kompon.	13.9	21.4	15.6	17.6	18.1 %
mittl. Zugrichtung der ci mit E-Komp.	238	257	250	243	247 ⁰
mittl. Zugrichtung der ci mit W-Komp.	79	74	75	72	78 ⁰
mittl. Zugricht. aller ci (photogramm. Bestimm.) . . .	76	77	79	75	77 ⁰

Am häufigsten sind östliche ci-Richtungen im Frühjahr (April 28 %, Mai 26 %); es spricht sich dies auch in den in Tabelle IV erkennbaren Geschwindigkeitsminima während der Monate April und Mai aus.

In Tabelle V sind mittlere Richtung und Geschwindigkeit der Wolken ohne Rücksicht auf die Form nach Höhenstufen von je 1 km zusammengefaßt. In diese Tabelle sind außerdem die Resultanten aus den beiden Richtungskomponenten, also die Luftversetzung in mps aufgenommen und die von W. Peppler¹⁾ auf Grund von Ballonvisierungen berechneten mittleren Richtungen und Geschwindigkeiten der Luftströmungen über Mitteleuropa. Die Pepplerschen Zahlen gründen sich auf das bis 1913 in den »Veröffentlichungen der internationalen Kommission für wissenschaftliche Luftschiffahrt« enthaltene Material.

Tabelle V. Richtung und Geschwindigkeit der Wolken, geordnet nach Höhenstufen.

Höhe	Zugrichtung in Graden (von S = 0° über W nach N gezählt)						Windgeschwindigkeit in mps						Luftversetzung in mps (Resultante der mittl. Geschwindigk.-Komp.)				
	Jahr					Wi.	Fr.	So.	He.	Jahr		Wi.	Fr.	So.	He.	Jahr	
	Wi.	Fr.	So.	He.	Wolken					Ballon	Wolken						Ballon
2-3 km	63	79	93	84	83	98	13.7	8.8	9.6	10.5	9.8	7.5	11.8	5.7	5.9	6.6	5.0
3-4 »	87	65	72	60	70	99	16.4	11.7	11.2	10.7	11.5	8.7	11.6	5.8	8.4	8.2	7.8
4-5 »	92	63	60	68	68	100	16.9	12.8	11.5	13.5	13.0	10.2	13.3	6.8	7.6	10.2	8.5
5-6 »	156	64	87	66	84	101	21.8	15.7	15.0	14.3	15.9	11.6	13.4	8.7	10.6	7.0	8.1
6-7 »	73	57	89	81	72	100	23.8	20.7	18.2	20.1	20.8	13.2	11.3	13.8	10.5	11.6	11.7
7-8 »	71	74	86	79	76	100	26.9	19.6	19.4	23.3	22.3	14.7	19.7	9.7	9.4	13.4	12.9
8-9 »	74	94	73	66	74	100	26.6	18.6	23.0	21.6	21.2	16.3	14.0	9.1	13.0	15.5	12.6
9-10 »	87	84	73	75	78	100	22.3	22.6	21.1	25.5	23.7	17.6	17.5	11.5	16.6	14.6	14.8
10-11 »	93	92	91	88	92	101	25.7	19.4	22.0	24.9	22.9	18.0	14.4	11.5	15.1	13.3	13.9
> 11 »	(158)	138	105	83	102	102	(29.0)	20.0	29.1	24.6	26.0	17.4	—	11.2	15.0	17.8	14.9

Schon Peppler hat hervorgehoben, daß die Ergebnisse von Wolkenmessungen und Pilotvisierungen wegen der Verschiedenheit der Methode und der zur Ableitung benutzten Wetterlage voneinander abweichen müssen. Die Visierungen sind eine ausgesprochene »Schönwettermethode«, während die hohen Wolken überwiegend in Randgebieten von Zyklonen erscheinen. Hierdurch erklärt es sich, daß die Luftgeschwindigkeiten nach Ballonvisierungen um rund 1/4 kleiner sind als nach Wolkenmessungen; die letzteren geben aber wahrscheinlich ziemlich gute Mittelwerte. Hinsichtlich der Windrichtung mit der Höhe sind vermutlich beide Methoden zur Ableitung absoluter Werte wenig brauchbar. Immerhin ist es auffallend, daß die vom Boden bis 3 km anderweitig sicher festgestellte Rechtsdrehung in den Wolkenzügen oberhalb von 3 km nur im Winter gefunden worden ist. In allen übrigen Jahreszeiten dreht der Wolkenzug oberhalb von 3 km zurück, und erst zwischen 5 und 7 km beginnt wieder Rechtsdrehung. Zwischen 10 und 11 km ist die mittlere Zugrichtung in allen Jahreszeiten fast rein West, und darüber hinaus überwiegt eine nördliche Komponente über die südliche ganz entschieden. Die Wolken drehen hier am meisten nach N im Winter und Frühling, also in den oben kalten Jahreszeiten; im Herbst geht die Drehung nicht über W hinaus. Dieser letzte Wert entsteht allerdings nur durch gegensätzliches Verhalten von September und Oktober: im September von 9 km an WNW bis NW, im Oktober bis zu 11 km WSW. Die Verhältnisse bleiben also noch immer recht ungeklärt.

Bezüglich der Änderung der Wolkengeschwindigkeit in der Vertikalen bestätigt Tabelle V einige Feststellungen, auf welche schon bei der Bearbeitung des Materials von 1896/97 (a. a. O. S. 69) aufmerksam gemacht worden war, nämlich die starke, fast sprunghafte Geschwindigkeitszunahme über 4 oder 5 km, also oberhalb der a-cu Zone, und ferner von 7 km an eine ganz langsame Zunahme oder gar Abnahme der Geschwindigkeit nach oben. Zwischen 7 und 11 km Höhe ist die mittlere Wolkengeschwindigkeit in allen Jahreszeiten nahezu die gleiche, während der Geschwindigkeitsunterschied zwischen ci und ci-cu nach Tabelle IV ungefähr 4 mps beträgt. Die vertikale Verteilung der Luftversetzung und des Wirkungsgrades des mittleren Zuges (Verhältnis von Luftversetzung zu Wolkengeschwindigkeit) zeigen keine charakteristischen Besonderheiten.

1) W. Peppler: Die Windverhältnisse der freien Atmosphäre. Arbeiten des Preuß. Aeron. Observatoriums Lindenberg. Bd. XIII (1919), S. 50.

Zur Ergänzung der Ergebnisse von 1896/97 ist auch noch die Häufigkeit der Wolken nach Schichten von je 400 m Dicke ausgezählt worden. Die Zahl der im Zeitraum 1900/20 ausgemessenen Wolken betrug in der Schicht

< 2 km	4	4.4—4.8 km	29	7.2— 7.6 km	87	10.0—10.4 km	88
2 —2.4 »	27	4.8—5.2 »	33	7.6— 8.0 »	104	10.4—10.8 »	62
2.4—2.8 »	46	5.2—5.6 »	36	8.0— 8.4 »	116	10.8—11.2 »	41
2.8—3.2 »	37	5.6—6.0 »	32	8.4— 8.8 »	120	11.2—11.6 »	15
3.2—3.6 »	40	6.0—6.4 »	55	8.8— 9.2 »	82	11.6—12.0 »	3
3.6—4.0 »	31	6.4—6.8 »	72	9.2— 9.6 »	115	12.0—12.4 »	—
4.0—4.4 »	35	6.8—7.2 »	63	9.6—10.0 »	102	12.4—12.8 »	2

Vergleicht man die oberen Grenzen maximaler und minimaler Häufigkeit in den Zeiträumen 1896/97 (a. a. O. S. 69) und 1900/20, so zeigt sich — mit Ausnahme einer kleinen Unstimmigkeit zwischen 5.6 und 6.0 km — nirgends eine Abweichung um mehr als eine Höhenstufe.

	obere Grenzen maxim. Wolkenhäufigk.					obere Grenzen minim. Wolkenhäufigk.			
	1.6	4.4	6.8	8.8	10.0 km	4.0	5.2	7.2	9.6 km
1896/97	—	4.4	6.8	8.8	9.6 »	4.0	4.8	7.2	9.2 »
1900/20	—	4.4	6.8	8.8	9.6 »	4.0	4.8	7.2	9.2 »

Wolkenbewegung und Wolkenhäufigkeit zeigen somit ausgesprochene Unstetigkeiten in der Vertikalen. Der stärkste Sprung liegt an der oberen Grenze der a-cu-Region, ferner sind Unstetigkeiten besonders häufig oberhalb der ci-cu. Das wogenartige Aussehen dieser Wolkenformen ist damit erklärt. Ihre Entstehung hängt vielleicht mit den thermischen Gleitflächen zusammen, die sich nach den Vorstellungen von V. Bjerknes und seinen Anhängern an den Trennungsfächen von warmen und kalten Luftmassen ausbilden. Nach den bisherigen Ermittlungen steigen diese Gleitflächen von der Steuer- oder Kurslinie (der warmen Front) mit einem Neigungsverhältnis von etwa 1:100 bis zu einer Höhe von 3 bis 4 km an, verlaufen dann ungefähr horizontal und verlieren sich allmählich. Die durchschnittliche Grenzhöhe wird von den mittleren Feuchtigkeitsverhältnissen abhängen. Durch Kondensationswärme, Strahlung an der 4 km-Fläche oder an der oberen Grenze der sekundären Niederschlagsgebiete kann vielleicht von neuem Gelegenheit zu Gleitflächen gegeben werden. In der ci-Region bildet jedenfalls die Depressionskappe eine neue Quelle für Schichtwolken.

4. Wolken und Wetterlage.

Mit der Beziehung zwischen Wolkenzug und Depressionszug haben sich zahlreiche Forscher befaßt. Die deutlichsten Ergebnisse hat Th. Hesselberg¹⁾ erzielt durch Vergleich der Bahnen der barometrischen Minima und Maxima mit den auf Grundlage der ci-Beobachtungen gezeichneten Stromkarten. Hiernach bewegen sich die Zyklen und die beweglichen Antizyklen in derselben Richtung fort wie die Luft im ci-Niveau über deren Zentrum. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Zyklen und Antizyklen beträgt im Mittel 0.2 bis 0.4 der Geschwindigkeit der Luft im ci-Niveau, und zwar ist die relative Fortpflanzungsgeschwindigkeit für die barometrischen Minima geringer, wenn sie vertieft, als wenn sie ausgefüllt werden. Als wichtig für die Wetterprognose wird die Regel genannt: »Die Bahnen der Depressionen fallen für einen Zeitraum von 24 bis 48 Stunden nahe mit der Stromlinie im ci-Niveau zusammen, die über dem Zentrum der Zykline verläuft«. Die Richtigkeit dieser Sätze in großen Zügen soll hier nicht bestritten werden; betrachtet man freilich die zahlreichen, der Hesselbergschen Arbeit beigegebenen Karten (48 Stück), so sieht man, daß wirkliche Beobachtungen über den Zentren der Tiefdruckgebiete außerordentlich selten sind, daß hier die Strömungslinien also ziemlich stark extrapoliert werden mußten, und ergänzende Untersuchungen nicht überflüssig sein werden. Nun können natürlich aus dem Potsdamer Material ohne Zuhilfenahme anderer Stationen keine Stromlinien gezogen werden, sondern man muß sich mit momentanen Zugrichtungen begnügen; andererseits kann das Geschwindigkeitsverhältnis zwischen Zykline und Wolke — und zwar hier zum ersten Male — mit Hilfe absoluter Messungen anstatt aus rohen Schätzungen abgeleitet werden.

Zunächst wurden die Wolkenmessungen ausgesucht, welche an Tagen mit deutlich auf der Wetterkarte erkennbaren Depressionen gemacht waren (287 Tage), und es wurde herausgeschrieben: Depressionsgeschwindigkeit von 8^a des Messungstages bis 8^a des darauf folgenden Tages, Zugrichtung, Lage und Entfernung des Zentrums von Potsdam, ferner die Richtung der Isobaren über der Gegend von Potsdam, ferner Form, Höhe, Zugrichtung und Geschwindigkeit der Wolken. Daraus wurde abgeleitet das Verhältnis der Depressionsgeschwindigkeit zur Wolkengeschwindigkeit ($v_d : v_w$) und die Größe des Winkels zwischen Isobarenrichtung und Wolkenzug einerseits, zwischen Depressionszug und Wolkenzug andererseits. Eine Abweichung des Wolkenzuges im Sinne des Uhrzeigers, also Ausfließen aus der Depression, wurde positiv gezählt. ci, ci-str und ci-cu wurden als obere, a-cu und a-str als mittelhohe Wolken zusammengefaßt. Die Ergebnisse sind dann monatsweise gruppiert; es

¹⁾ Th. Hesselberg: Die Luftbewegungen im Cirrusniveau. Spezialarbeiten aus dem Geophysik. Institut (Leipzig). Bd. 1 (1913) S. 17—73. Vorläufige Mitteilung in Beiträge zur Physik der freien Atmosph. Bd. 5 (1913) S. 198—205.

sollen hier aber nur die jahreszeitlichen Mittel aufgeführt werden. Die durchschnittliche Entfernung des Beobachtungsortes vom Depressionszentrum betrug rund 1000 km.

	Obere Wolken			Mittelhohe Wolken		
	Ausfließen			Ausfließen		
	Va : v _w	aus der Isobare	aus dem Depressionszug	Va : v _w	aus der Isobare	aus dem Depressionszug
Winter	0.30	32 ⁰	21 ⁰	0.69	34 ⁰	22. ⁰⁵
Frühling	0.48	25	21	0.76	25	22
Sommer	0.46	20	16	0.71	10	3
Herbst	0.45	16	13.5	0.63	9	3
Jahr ¹⁾	0.42	23. ⁰⁷	18. ⁰⁰	0.70	17. ⁰⁹	10. ⁰¹

Das Geschwindigkeitsverhältnis von Depressions- und ci-Zug ist in allen Jahreszeiten ungefähr das gleiche und kommt dem oberen Grenzwert von Hesselberg (0.4) sehr nahe. Das größere Verhältnis für a-cu entspricht deren geringerer Geschwindigkeit. Multipliziert man die Verhältniszahlen mit den mittleren Geschwindigkeiten von ci und a-cu gemäß Tabelle IV, so erhält man 9.4 und 9.3 mps (34 km-St.) als mittlere Fortpflanzungsgröße der Depressionen.

Die Richtung des ci- und a-cu-Zuges stimmt mit der Bewegungsrichtung der Depressionen im September nahezu überein; in den übrigen Monaten ist ein deutliches Ausfließen bemerkbar, das im Februar am größten ist und von da ziemlich stetig bis zum Herbst abnimmt. Für die a-cu-Region sind die Werte im Winter und Frühling ebenso groß wie für ci, sonst um etwa einen Strich kleiner. Für die Vorherbestimmung der Depressionsbahn sind jedoch Wolkenzugbeobachtungen von einer einzelnen Station nur in sehr beschränktem Maße zu verwenden, da in Einzelfällen sehr große Abweichungen vom Mittelwerte vorkommen. Auch die Änderungen des Wolkenzuges im Laufe eines Tages sind hierfür wenig brauchbar, denn zuweilen dreht der Wolkenzug nach rechts, während die Depression nach links ausweicht. Ferner kommen Fälle vor, wo trotz kräftig entwickelter, rasch aus dem Westquadranten ziehender ci die Depression in NW stationär bleibt oder sich ausfüllt. Diese Unstimmigkeiten wurden eingehender verfolgt, aber die Zahl der Fälle ist zur Gewinnung allgemeiner Gesichtspunkte doch zu gering. Auffallenderweise war gerade bei dicht benachbarten Depressionen und ganz besonders bei Teildepressionen manchmal kaum ein Zusammenhang zwischen Depressionszug und Wolkenzug zu bemerken; wahrscheinlich gehörten dann die gemessenen ci schon zu der folgenden Depression, die erst am nächsten Tage klar erkennbar wurde. Bei nestförmigen ci (ci 4) kommen anscheinend am häufigsten große Abweichungen von den Durchschnittswerten vor. Hinsichtlich der prozentischen Häufigkeit, mit welcher sich bestimmte ci-Formen bei dem Vorübergang von Depressionen zeigten, ergab sich die Reihenfolge: ci-cu, ci-Flocken (ci 3), ci-Decke (ci 10), a-cu I, a-cu II, ci-Filz (ci 9), ci-Bänder (ci 5), Fäden (ci 6), ci-Nest (ci 4), ci-Rippe (ci 7). Formen, die weniger als zehnmal gemessen wurden, sind unberücksichtigt geblieben.

Im Anschluß hieran seien einige Bemerkungen über die Form von ci-Wolken in bezug auf die sie begleitenden atmosphärischen Zustände gemacht. Bei der großen Mannigfaltigkeit der Erscheinungen erfordert eine solche Darstellung eigentlich einen fortlaufenden Hinweis auf Einzelfälle. Da aber das im Manuskript vorliegende Beobachtungsmaterial mit genauer Beschreibung von Einzelheiten und mit Angabe der begleitenden Witterungserscheinungen sich wegen der hohen Druckkosten leider nicht veröffentlichen läßt²⁾, muß ich mich auf allgemeine Gesichtspunkte beschränken. Es liegt nahe, eine solche Betrachtung mit einer Gruppierung der Wolken nach verschiedenen Wetterlagen an der Erdoberfläche zu beginnen — eine solche Einordnung ist auch tatsächlich vorgenommen worden —, dann zu untersuchen, ob bestimmte Wolkenformen, bezw. welche sich bei diesen Wetterlagen zeigen, wie es mit Höhe, Geschwindigkeit und Richtung steht, und schließlich den Bau der Luftdruckgebilde mit dem Bau der Wolken in Zusammenhang zu bringen. Mit Rücksicht auf die große Mannigfaltigkeit der ci-Formen und auf die Änderung der Druckverteilung mit der Höhe soll jedoch der umgekehrte Weg eingeschlagen werden. Ausgehend von den für ci-Bildungen günstigen Strömungsverhältnissen soll versucht werden, bestimmte ci-Formen diesen atmosphärischen Zuständen anzugliedern und das statistische Material nur zur Ergänzung und Bestätigung heranzuziehen. Es ist nämlich hoffnungslos, Wolkenformen in eindeutigen Zusammenhang mit der Wetterlage zu bringen. Auch die ci sind im wesentlichen Produkte der Ablenkung der Luftströmungen aus der Vertikalen; der thermische und dynamische Zustand der neuen Gleichgewichtslage ist daher das Maßgebende für die Form, und die Druckverteilung kommt erst an zweiter Stelle in Frage.

Für die Wolkenbildung in höheren Luftschichten kommen hauptsächlich in Betracht: 1. »Eintropfen« kalter Luft aus der Stratosphäre in die Substratosphäre; 2. Abfließen von Wolkenmassen aus den Randgebieten und der Kappe des großen Depressionsgewölks; 3. Mischung von Luft verschiedener Herkunft an »Gleitflächen«.

¹⁾ Mittel aus den 12 Monaten, nicht aus den Jahreszeiten.

²⁾ Das Beobachtungsmaterial von 1908 an ist in den »Ergebnissen der Meteorologischen Beobachtungen in Potsdam«, Jahrgang 1909 ff. ziemlich ausführlich abgedruckt worden. Die meisten Messungen stammen aber aus den Jahren 1900 bis 1904.

Das Eindringen kalter Luft aus der Stratosphäre in die Troposphäre — gleichgültig, ob es sich dabei um eine »Temperaturwelle« oder um ein »Entropfen« handelt — ist in neuester Zeit vielfach Gegenstand aerologischer Forschung gewesen. An dem Bestehen solcher Vorgänge ist nicht mehr zu zweifeln. Genügend Wasserdampf zur Wolkenbildung ist bis etwa 12 km Höhe vorhanden, er können daher sowohl direkt durch Sublimation oder durch Vermittlung von Frostübersättigung entstehen. Im ersten Falle ist zunächst ein schirmförmiger Beschlag, im zweiten Falle eine gegen den Horizont geneigte Streifenbildung zu erwarten. Beide Male wird aus dynamischen Gründen bald Wirbelbildung folgen, und sie wird sich in mehr oder weniger phantastischen Formen — manchmal geradezu in Miniaturwirbeln — äußern. Tatsächlich sind bei zenitnahen ei-Wolken solche Überbleibsel oder Bruchstücke von Wirbeln mit ungefähr vertikaler Achse ziemlich häufig zu erkennen. Im allgemeinen ist diese Art von Wolken besonders hoch, außerdem stimmt aber, wie auf S. 12 hervorgehoben wurde, der Jahresgang ihrer Höhe so gut mit dem Jahresgang der Höhe der unteren Stratosphärenrengegrenze überein, daß ein Zusammenhang zwischen beiden bestehen muß. Diese Feststellungen gelten in erster Linie für die hauch-, schopf- und nestförmigen ei; diese wurden daher schon auf S. 12 als ei-Neubildungen bezeichnet. Damit soll aber nicht gesagt sein, daß sich nur diese Formen in einer sonst wolkenfreien Strömung spontan bilden, sondern daß diese Formen bei Neubildungen am häufigsten sind. Auch flockige und besonders netzförmige ei können Überbleibsel von Wirbeln sein. Besonders die netzförmigen, ei-st-ähnlichen Wolken (»lacumaris-Formen«) sind in der Literatur mehrfach erwähnt; sie sind zwar ziemlich selten und sind deshalb nicht bei unserer Betrachtung des jährlichen Höhenverlaufs berücksichtigt worden; der Gang widerspricht aber nicht der Annahme einer Zusammengehörigkeit zu der Stratosphäre, da das Höhenmaximum im Herbst ebenso groß ist wie im Juli. Sehr schöne ei mit Lücken im Innern der Knäuel waren z. B. am 8. Februar 1914 (Nr. 2471/72) in 9.4 km, also einer für Winter-ei recht beträchtlichen Höhe entwickelt. Sie wurden anscheinend gespeist von langen Wolkenfäden, die in 8.92 km Höhe in Richtung NNW—SSE angeordnet waren; die Zugrichtung war oben und unten nahezu die gleiche (oben W 39° N, unten W 37° N), die Geschwindigkeit oben kleiner als unten (11.6 und 14.1 mps). Die Wolken lagen auf dem Gehänge eines über Siebenbürgen ziemlich stationären und gegen eine Depression im NW von Schottland abfallenden Hochdruckgebiets von 775 mm. Temperaturmaximum 12° 5, Bodenwind S—SSW₃₋₄, Tagesmittel der Bewölkungsmenge am 7. II. 0.5, am 8. II. 4.8, am 9. II. 3.0. Der Witterungscharakter blieb bis zum 12. II., als sich das Tiefdruckgebiet weiter nach SE ausgebreitet hatte, ziemlich unverändert. Weitere Beispiele sind der 5. VII. 1905 (10.15 km), der 8. III. 1906 (8½ km) und der 15. X. 1909 (9.38 km). Ganz ähnliche Formen kommen auch an den tieferen großen Schichtgrenzen in 7 und 4 km Höhe vor; es sind dies die ei-cu und a-cu corrossi (negative ei-cu), die schon auf S. 13 erwähnt wurden. Auch hier liegt als Entstehungsursache die Annahme eines »Entropfens« und damit verbundener Wirbelbildung nahe. Solche Wolken zeigten sich u. a. in der ei-cu-Region am 25. V. 1904 (6.0 km), am 13. X. 1904 (7.45 km), am 24. IV. 1907 (5.52 km) und als eine unterhalb von 4 km recht seltene netzförmige Wolke am 6. XI. 1905 (3.77 km).

Solche »Neubildungen« müssen sich durch Singularitäten in den oberen Luftströmungslinien äußern, und es ist überraschend, wie häufig sie die typische Form von idealisierten Divergenzlinien, d. h. die Form eines Federschaftes mit nach beiden Seiten auslaufenden, gekräuselten Federn haben. Die Bezeichnung »Feder« ist aber leicht irreführend, da häufig auch die rippen- und skelettförmigen, in der Regel aus zwei übereinander liegenden Wogensystemen bestehenden ei (ei 7) als Federn bezeichnet werden. Über den physikalischen Vorgang bei diesen Wolkenneubildungen läßt sich auf Grund der Messungen nichts aussagen. Manchmal kommen Höhenunterschiede verschiedener Wolken Teile bis zu 1 km vor, und in solchen Fällen ist es wohl möglich, daß es sich um das Herabsinken von Kondensationsteilchen in frostübersättigte Schichten mit geringer werdender Turbulenz handelt. Das würde der von A. Wegener mehrfach, zuletzt in der Meteor. Zeitschrift 1920 S. 8, 231, 347 versuchten Erklärung der ei als »Fallstreifen« entsprechen. Der Begriff der Fallstreifen ist aber dann auch auf Wolken auszudehnen, die nur ganz schwach gegen die Horizontale geneigt sind. Größere Neigungen als 4° kommen nur ganz selten vor. Fallstreifen sind jedoch keinesfalls eine notwendige Bedingung für die Entwicklung von ei-Neubildungen; nach dem Potsdamer Wolkenmaterial ist das Herauswachsen von ei-Streifen aus einer fertigen ei-Masse ohne meßbare Höhenänderung viel häufiger als Fallstreifenbildung.

Weitaus am häufigsten entstehen ei in den Luftmassen, welche in den oberen Randgebieten der Zyklen fließen. Es sind dies die letzten Reste der Kondensationsprodukte, welche in der Depression gebildet worden sind; man kann sie daher als Restbildungen oder Depressions-ei bezeichnen. Auch für sie kann man keine ganz bestimmten, nur ihnen eigentümlichen Formen angeben, sondern man kann nur sagen, daß sie sich vorwiegend als Fäden, Wogen, Doppelwogen oder gleichmäßige Decken zeigen, d. h. als ei 5, 6, 7, 8, 9 und 10 der Klassifikation auf S. 10. Auch die ei-cu und a-cu sind meist Depressionswolken. Abgesehen von de Quervain (vergl. S. 13) und J. Vincent¹⁾ haben sich neuerdings J. Bjerknes und H. Solberg²⁾ mit diesen Depressionswolken beschäftigt, indem sie — wenigstens schematisch — die Wolkenfolge vor der regenbringenden warmen und kalten Front einer Zyklone erörterten. Bei dem Heranrücken der warmen Front (ungefähr entsprechend dem Südostquadranten der Zyklone) sollen sich zunächst schopfförmige ei, dann ei-str, schließlich a-str und nb

¹⁾ J. Vincent: Cirro-stratus et alto-stratus. Mémoires cour., Acad. royale de Belgique. T. 52. 1891.

²⁾ J. Bjerknes and H. Solberg: Meteorological conditions for the formation of rain. Geofysiske Publikationer Vol. II No. 3. Kristiania 1921. S. 23 und folgende.

zeigen. Es folgen nun hinter der warmen Front: eine regentfreie Zone, darauf a-str und a-cu (häufig als a-cu lenticularis) und schließlich der Böenregen der kalten Front. Die Wolken der warmen Front werden als typische Schichtwolken auf einer Gleitfläche aufgefaßt. Diese Gleitfläche schneidet die Erdoberfläche im warmen Regengebiet und erhebt sich unter einem Winkel von rund 6° bis zu 9 km Höhe in der Region der ci-Wolken. In Norddeutschland, wo Teildepressionen vorherrschen, bedarf dieses Schema offenbar verschiedener Ergänzungen. Die hier auftretenden Wolken werden selten einer einzigen Gleitfläche, die bis zum Boden herabreicht, zuzuschreiben sein; vielleicht wird man es mit mehreren gegen das Depressionszentrum etwas geneigten Unstetigkeitsschichten zu tun haben, längs denen sich die Wolken bilden. Da Unstetigkeitsflächen nach aerologischen Forschungen in 4 und 8 km Höhe besonders häufig sind, und da sich die isothermen Flächen in ci-Höhe gegen die Depression hin senken, so ist die Bedingung für die Umformung der der Depression entströmenden feuchten Luftmassen in ci, und zwar vornehmlich in wogenförmige ci zwanglos gegeben.

Die Bildung von Depressions-ci läßt sich an dem ci-Schirm eines großen Gewittergewölks unmittelbar beobachten und ist auch durch das Potsdamer Wolkenmaterial wiederholt festgehalten worden. Dabei scheint besonders bemerkenswert zu sein: 1. Die ci bilden sich fast immer nur an den obersten Randpartien des cu-nb und, da die Messungen meist an Wolken von ausgesprochenen »Wärmegeewitern« angestellt worden sind, in ungewöhnlich großer Höhe (26. VII. 1900 bei 10.82 km, 31. V. 1902 bei 10.93 km, 11. VII. 1914 bei 10.22 km, 10. VI. 1915 bei 12.55 km), und 2. die Neigung zu Wogenbildungen ist in den Anfangsstadien dieser ci fast immer zu erkennen. In den eben genannten Beispielen war Wogenbildung stets vorhanden. Erst in größerer Entfernung von der Mutterwolke tritt das fadenförmige Aussehen und damit die typische ci-Form stärker hervor. Die erste Feststellung deutet an, daß die ci-Höhe abhängig ist von der Vertikalerstreckung der Depression, worauf schon S. 12 hingewiesen wurde; die zweite Feststellung lehrt, daß man streifige ci-Formen nicht immer als »Fallstreifen« zu deuten braucht, sondern, daß sie auch in aufwärts gerichteten Luftströmungen zustande kommen. Das Vorkommen von »Fallstreifen« soll zwar nicht bestritten werden, und die Ausmessung vieler mehrfach gebogener ci-Fäden beweist sogar, daß satteldachförmig gebaute ci nicht selten sind, im allgemeinen aber werden die Formen der Depressions-ci einerseits bedingt durch Wogenwolken mit durchschnittlich 80° Abweichung von der Zugrichtung und andererseits durch nahezu mit der Luftströmung übereinstimmende Streifen. Der beste Typus für Depressionswolken ist nach den Potsdamer Messungen der rippen- oder skelettförmige ci (ci 7). Hier ist die Wogenbildung noch durch den gleichen Abstand der meist ziemlich kurzen Querrippen nachweisbar, während die Hauptachse der Wolke nahezu in die Zugrichtung fällt und die Richtung der unter ihr liegenden warmen Luftströmung anzeigt. In größerer Entfernung von der Depression lösen sich die horizontal liegenden Wogen mehr und mehr auf, dagegen verstärkt sich die Wolkenachse in der sanft ansteigenden Strömung (Bildung von ci-Fäden) und mischt sich mit Wolken aus anderen Höhenschichten zu stark zerzausten, schwer zu beschreibenden Formen (vielfach Brandungsvorgänge), oder es zerfällt schließlich die Achse in einzelne Wirbelknochen (flockige ci). Zwischen der Depression und der Region der ci-Rippen überwiegen einfache Schichtwolken (ci-str) und Wellenformen (ci 5). Die regelmäßige Folge von flockigen ci bis zum nb wird aber häufig unterbrochen durch wolkenfreie Zonen mit nachfolgenden relativ hohen und zarten ci. Diese Unterbrechungen hängen offenbar mit der Neigung zur Bildung kleiner Teildepressionen zusammen. Für die Depressions-ci ist es ferner sehr charakteristisch, daß sie meist in mehreren Schichten von einigen 100 m Vertikalabstand angeordnet sind, wobei die zierlichen Wolken meist am tiefsten liegen. Diese Schichtbildung ist ein besonders gutes Anzeichen dafür, daß der Beobachtungsort wirklich von dem Niederschlag der »warmen Front« (nach J. Bjerknes) erreicht wird. Auf mehrschichtigen ci folgte in 90 % der Messungen Regen.

Fadenförmige Gebilde sind nicht so ausschließlich auf die ci beschränkt, wie in der Regel angenommen wird. Auch in der Region der ci-cu und a-cu ist streifenförmiges Ausziehen der Wolkenballen durch den Wind recht häufig. Bei den Potsdamer Messungen sind in 7 % der Fälle derartige Streifen so deutlich, daß sie schon bei der Berechnung als Sonderform der a-cu (Ia) bezeichnet wurden, die wirkliche Häufigkeit ihres Vorkommens ist noch größer. Fallstreifen ließen sich dabei nicht nachweisen. Als gutes Beispiel für diese Form Ia mag auf die in verschiedenen meteorologischen Schriften und Leitfäden, u. a. in Hanns Lehrbuch der Meteorologie auf Tafel 14 wiedergegebene Potsdamer a-cu-Aufnahme vom 29. V. 1900 hingewiesen werden. Hier ist das Auskämmen der großen Wolkenrollen klar ersichtlich. Auch die zuweilen hakenförmig umgebogenen ci-cu entstehen anscheinend in ähnlicher Weise. Durchschnittlich wird die Verteilung so sein, daß nahe der Depression lange Wolkenrollen mit kurzen Längsstreifen vorherrschen, daß sich mit wachsender Entfernung die Rollen immer mehr verkürzen und die Streifen immer mehr verstärken. Hiernach würden die ci-Bänder, -Fäden, -Rippen und -Schweife nur Übergangsformen derselben ci-Art sein, deren Auftreten in erster Linie von dem Abstand von der Depression und der Stärke der Luftbewegung abhängt. Zum Teil werden hierzu auch die von J. Bjerknes und Solberg besonders hervorgehobenen schopfförmigen ci (ci 2) zu rechnen sein. Schon auf S. 12 wurde bemerkt, daß der jährliche Verlauf ihrer Höhe auf zweierlei Arten ihrer Entstehung hinweist. Bei sehr starken Windunterschieden entstehen schon in der Nähe der Depression stark und meist mehrfach gekrümmte lange Streifen; es sind dies die vielfach als Sturmzeichen gedeuteten ci-Schweife (Roßschweife, Katzenschwänze, ci 8). Für Potsdam liegen leider nur 10 gute Messungen solcher ci-Schweife vor, deren mittlere Höhe sich zu nur 7.9 km ergab.

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich im allgemeinen auf Wolken der »warmen Front«, also auf die Südostseite normal ziehender Zyklonen. In Potsdam ist der Übergang zu den Böenregen der kalten Front meist durch mittelhohe und untere Wolken gekennzeichnet, so daß ei — falls diese vorhanden sind — selten gesehen werden können. Charakteristisch für solche Rückseiten-ei ist ihre geringe Höhe; der Form nach überwiegen ei-Fäden. Der Übergang von ei-Fäden in ei-cu konnte verschiedentlich nachgewiesen werden; entweder zerfielen zarte Polarbanden in kleine Ballen (19. XII. 1900), oder die Fäden schlossen sich an der Vorderseite zu kleinen Bällchen zusammen (22. IV. 1912). Die Angabe von J. Vincent, daß ei-cu keine Umformung von ei-str ist, konnte bestätigt werden. Für die Wolken an der kalten Front scheint mir die Erklärung ihrer Bildung an einer Gleitfläche zuweilen gut zu passen. Anscheinend handelt es sich dabei meist um Wolken von geringer Lebensdauer. J. Bjerknes und Solberg führen als besondere »Kalte Frontwolke« den a-cu lenticularis an, also eine im warmen Luftstrom abschmelzende Wolke.

Gleitflächen sind nicht nur in der Nähe der Depressionen vorhanden, sondern müssen sich überall da ausbilden, wo kalte oder warme Luftströmungen in eine bisher gleichartige Luftmasse eindringen. Dabei werden sich zunächst strukturlose Mischungswolken (a-str und ei-str) entwickeln und beim Fehlen stärkerer Zentrifugalkräfte erhalten bleiben. Die Untersuchung dieser Wolken ist aber der Photogrammetrie versagt, da sich nur selten genügend scharfe Punkte zur Identifizierung auf den Platten finden. Hier ist also eine bedauerliche Lücke des Potsdamer Beobachtungsmaterials, und es muß daher davon abgesehen werden, die »Gleitflächen«-Wolken in ihrer Allgemeinheit hier zu behandeln.

Die Erörterungen über die Beziehung der Wolken zu den Luftströmungen sollen nun durch einige Zusammenstellungen über die Wolkenverteilung in der Umgebung der Depressionen ergänzt werden. Hierzu wurden die Wolken hinsichtlich Form, Höhe und Geschwindigkeit nach der Lage in den einzelnen Quadranten der Depression, in nächster Nähe von Teildepressionen (TT) und in Hochdruckgebieten (H) jahreszeitlich geordnet. Bei den ei mußte die Lage NW von der Depression aus Mangel an Messungen unberücksichtigt bleiben; ferner wurde die Häufigkeit der Wolkenformen bei bestimmten Wetterlagen nur für das ganze Jahr, nicht für einzelne Jahreszeiten berechnet, und zwar ausgedrückt in Prozenten der Gesamthäufigkeit. Auf die Hochdruckgebiete entfallen ziemlich genau 1/3 aller ei-Messungen; am häufigsten sind hier fadenförmige ei (letzte Reste der Depressionswolken?), ferner die nest- und schopfförmigen ei (Neubildungen?). An vierter Stelle stehen ei-Bänder, anscheinend Vorläufer von kleinen Randgebilden. In nächster Nähe von Teildepressionen sind ei-Rippen, ei-Decken und ei-Bänder bei weitem vorherrschend. An der Südseite größerer Depressionen, und zwar sowohl im SE-, wie im SW-Quadranten überwiegen ei-cu bei weitem. Im SE-Quadranten folgen dann in bezug auf Häufigkeit ei-Flocken, ei-Rippen und netzförmiger ei-str, im SW-Quadranten (meist Rückseite oder kalte Front) ei-str in verschiedenen Formen und ei-Bänder, also ausgesprochene Schichtwolken. Im NE-Quadranten kommen im Gegensatz zum SE-Quadranten wenig oder gar keine gebaltete Formen vor, sondern überwiegend netz- und schopfförmige ei; die letzteren Feststellungen sind jedoch wenig sicher, weil zu wenige Beobachtungen vorliegen.

Die Beziehungen von Wolkenhöhe und -geschwindigkeit zur Wetterlage sind aus der nachfolgenden Tabelle ersichtlich. Hier bedeutet H Hochdruckgebiet, T Tief, T_{NE} Nordostquadrant des Tief usw.; TT Teiltief, h Wolkenhöhe in km, v horizontale Wolkengeschwindigkeit in mps, n Zahl der benutzten Fälle. Depressionen, welche östlich von Potsdam lagen, sind nicht für die Zusammenstellung benutzt worden.

Tabelle VI. Beziehung von Wolkenhöhe und -geschwindigkeit zur Wetterlage.

Wetterlage	Winter			Frühling			Sommer			Herbst			Jahr		
	h	v	n	h	v	n	h	v	n	h	v	n	h	v	n
1. ei															
H	8.15	21.9	58	8.27	18.4	84	9.38	20.4	111	9.05	20.8	113	8.71	20.4	366
T _{SE}	7.97	27.4	29	8.63	25.9	46	9.04	24.5	27	8.83	25.0	52	8.64	25.7	154
T _{SW}	8.69	?	5	8.27	18.6	9	8.72	16.8	12	8.25	39.8	15	8.46	35.1	41
T _{NE}	—	—	—	8.40	18.9	29	—	—	—	9.17	19.0	6	(8.78)	(19.0)	35
TT	7.76	14.4	36	8.10	19.6	59	9.01	21.8	93	9.40	23.8	49	8.56	19.9	237
2. a-cu															
H	4.81	17.8	13	3.70	10.7	48	3.99	10.0	70	4.80	11.5	37	4.15	11.1	168
T _{SE}	3.65	17.4	16	3.79	11.4	39	4.39	14.6	29	4.43	16.2	28	4.09	14.3	112
T _{SW}	3.83	20.8	6	3.34	13.2	10	3.53	14.6	30	4.20	17.5	16	3.70	15.3	62
T _{NE}	(5.19)	(17.0)	1	2.96	9.6	7	3.97	9.4	8	5.60	15.0	4	3.96	10.2	20
T _{NW}	—	—	—	3.18	9.0	6	4.13	8.7	7	3.78	13.8	4	3.71	9.5	17
T u. TT . .	3.08	13.7	11	4.35	11.5	34	4.24	12.7	54	4.03	10.9	41	4.11	12.2	140

Hiernach sind alle oberen und mittleren Wolken durchschnittlich am höchsten in Hochdruckgebieten, dann folgt bezüglich der Höhe T_{SE}, dann anscheinend die Nordseite (linke Seite) der Depression. Am niedrigsten sind, wie zu erwarten, die Wolken der Rückseite. TT und T_{SE} haben ungefähr die gleiche Höhe. Die Höhenunterschiede der Wolken in H und T_{sw} sind für ei kleiner als für a-cu (250 gegen 450 m).

Die Geschwindigkeit ist sowohl für c_i wie für $a-cu$ am größten auf der rechten Seite der Depression und auffallend klein auf der linken Seite. Die Werte für H und TT liegen in der Mitte und sind ziemlich gleich hoch. Wider Erwarten ist bei der Wetterlage T_{sw} die c_i -Geschwindigkeit im Herbst und die $a-cu$ -Geschwindigkeit in allen Jahreszeiten größer als bei T_{SE} ; anscheinend macht sich hier schon die Vorderseite der nächstfolgenden Depression geltend. Als mittlere Geschwindigkeiten ergeben sich für:

	V_{ci}	V_{a-cu}	Diff. $V_{ci} - V_{a-cu}$
Rechte Seite der Depression	25.4	14.8	10.6 mps
Linke Seite der Depression	19.0	9.8	9.2 »
Hoch und Teiltief	20.2	11.6	8.6 »

5. Einzelheiten über den Bau der Wolken.

Die bisherigen Betrachtungen über Wolkenformen können auf Grund der genauen photogrammetrischen Ausmessung vielfach noch ergänzt werden durch Mitteilungen über räumliche Anordnung, Struktur, Größe der Wolkenmassen und dergl. Leider muß die Darstellung aus Raummangel auf ganz kurze skizzenhafte Bemerkungen beschränkt werden.

1. Neigung von Wolkenschichten. Die genaue Ausmessung von Wolkenschichten zeigt, daß sie nicht immer horizontal ausgebreitet sind, sondern daß sie häufig sowohl in der Zugrichtung als auch quer dazu geneigt sind, und daß solche Lagen charakteristisch für das Herannahen von Depressionen sind. Da ich früher eine besondere Studie hierüber veröffentlicht habe¹⁾, kann ich mich hier mit einem Auszug aus jener Arbeit begnügen.

Meist treten geneigte Flächen quer zur Zugrichtung an c_i -Federn und c_i -Rippen (c_i 7) auf, und zwar ist dann die Streichrichtung der kurzen Querfläden oder Wogen nahezu senkrecht zur Zugrichtung, d. h. die Richtungen der an der Grenzfläche übereinander fließenden Luftmassen sind nahezu die gleichen, und nur deren Geschwindigkeitsunterschied ist für die Wogenbildung maßgebend gewesen. Da bei gleichgerichteten Strömen thermische Verschiedenheiten wenig wahrscheinlich sind, ist anzunehmen, daß die Neigungen durch dynamische Kräfte entstanden sind. Für diese Vermutung spricht auch der Umstand, daß die Neigung α im allgemeinen — wenigstens für c_i — um so größer ist, je größer die Wolkengeschwindigkeit v ist. Ein negatives α bedeutet ein Gefälle in der Richtung gegen das Tiefdruckgebiet. Unter Berücksichtigung der Luftdichte ρ in der Höhe h und der Schwerkraftsbeschleunigung ist aus der Wolkeneigung der Druckgradient ($G = 8162 \rho \operatorname{tg} \alpha$) in mm und die horizontale Beschleunigung der Luftmassen in der Richtung des Druckgefälles, also die Gradientbeschleunigung ($g \operatorname{tg} \alpha$) berechnet worden. Da der so berechnete Gradient nur auf ganz kurze Zeit bestehen kann und nicht mit den mittleren Druckgradienten in der Atmosphäre verglichen werden kann, sind nur die Werte von $\rho \operatorname{tg} \alpha$ in die folgende Tabelle aufgenommen. n bedeutet hier wieder die Zahl der benutzten Fälle.

Neigung von Wolkenschichten gegen die Horizontale quer zur Zugrichtung.

Jahreszeit	h	ρ (in kg/m^3)	v	$-\alpha$	$-g \operatorname{tg} \alpha$	$-\rho \operatorname{tg} \alpha$	n	Regenwahrscheinlichkeit
1. c_i								
Winter	7.39	0.57	22.0	6.6	1.135	0.066	9	78 %
Frühling	8.66	0.49	25.0	6.1	1.049	0.052	11	100 »
Sommer	9.32	0.45	21.3	4.9	0.841	0.039	12	72 »
Herbst	9.13	0.46	28.3	6.7	1.153	0.054	13	77 »
Jahr	8.72	0.51	24.0	6.0	1.031	0.054	45	82 »
2. c_i-cu und $a-cu$								
Winter	6.83	0.60	45.0	(5.2)	(0.893)	(0.055)	1	(100 %)
Frühling	4.75	0.76	13.5	3.0	0.514	0.040	7	71 »
Sommer	5.71	0.68	15.1	2.4	0.411	0.028	8	50 »
Herbst	5.18	0.71	20.6	2.5	0.429	0.031	7	71 »
Jahr	5.30	0.71	17.8	2.8	0.480	0.035	23	65 »

Die Neigung der Flächen ist also bei den oberen Wolken ungefähr doppelt so groß wie bei den mittleren. Man kann daraus schließen, daß die Wolkeneigungen in der c_i -Region eine größere Einwirkung auf das Wetter haben werden als diejenigen in tieferen Schichten, denn, weil die Ausbildung von Teildepressionen durch stärkere Neigung der Druckflächen, auf denen sich die Wolken entwickeln, befördert wird, ist eine Beziehung zwischen Wolkeneigung und dem darauf folgenden Niederschlag zu erwarten. Es wurde daher nachgesehen, in wieviel Fällen und nach wieviel Stunden Niederschlag auf die Messung folgte. Als wirkungslose Neigung wurde das Ausbleiben von Niederschlag innerhalb von 30 Stunden angesehen. Die so berechnete Regenwahrscheinlichkeit, ausgedrückt in Prozenten der benutzten Fälle, ist in der obigen Tabelle eingetragen.

¹⁾ R. Süring: Über Neigungen von Wolkenschichten. Sitzungsber. der kgl. preuß. Akademie der Wiss. 1918. XXXVIII. S. 814—820.

Man sieht, daß die Regenwahrscheinlichkeit bei geneigten *ci* größer ist als bei *ci-cu* und *a-cu*; sie ist für mittelhohe Wolken so gering, daß sie praktisch bedeutungslos ist. Traten Niederschläge ein, so begannen diese am häufigsten nach rund 12 Stunden; für *ci* betrug der mittlere Anfangswert 15, für *ci-cu* und *a-cu* 12 Stunden.

Von den Fällen, wo die vorderen Wolkenflächen nicht horizontal liegen (kurz als Neigungen in der Zugrichtung bezeichnet), sind nur *ci* benutzt und von diesen auch nur solche, wo die Neigungen auf etwa 1 km Länge ziemlich geradlinig verlaufen. In der folgenden Tabelle sind Aufwärts- und Abwärtsneigungen (α_+ und α_-) unterschieden.

Neigung von Cirrusschichten in der Zugrichtung.

Jahreszeit	h	ρ	v	α_+	n_+	α_-	n_-
Winter	7.14	0.58	33.1	4.6	5	2.6	2
Frühling	8.01	0.52	25.6	5.7	7	—	—
Sommer	9.33	0.46	17.9	7.6	11	4.7	5
Herbst	8.14	0.51	36.1	6.4	5	3.8	5
Jahr	8.42	0.50	26.4	6.4	28	3.9	12

Hiernach ist Ansteigen der Wolkenschichten häufiger und dem absoluten Betrage nach stärker als Abfallen. Entgegengesetzt wie bei Neigungen quer zur Zugrichtung kommen die stärksten Neigungswinkel im Sommer und bei den kleinsten Geschwindigkeiten vor. Die Entstehungsursache liegt also in diesen Fällen wahrscheinlich nicht in dynamischen, sondern in thermischen Kräften. Damit steht auch im Einklang, daß solche Wolken meist weitab vom Depressionszentrum lagen. Charakteristische Formunterschiede, je nachdem die Wolken aufstiegen oder abfielen, waren nicht erkennbar; es kamen sowohl fadenförmige wie flockige *ci* vor. Die Niederschlagswahrscheinlichkeit war ziemlich gering, nämlich 61 % für Aufwärts- und 67 % für Abwärtsbewegungen.

2. Doppel- und Mehrfach-Schichtbildungen. Es ist aus Ballonregistrierungen und unmittelbaren Beobachtungen bekannt, daß vielfach nicht nur die Luftschichten dicht unterhalb der Troposphären-grenze, sondern auch die tiefer liegenden Eiswolken eine blättrige Struktur aufweisen. Bei unseren photogrammetrischen Aufnahmen wurde daher sorgfältig darauf geachtet, ob und wie häufig sich in den oberen Wolken mehrere Schichten über einander vorfinden. Die Feststellung, ob bei Feststellung verschiedener Höhen in einer Wolkenmasse wirklich eine mehrfache Schichtbildung vorliegt oder ein lockerer, ziemlich gleichförmiger Aufbau von mehreren hundert Metern Mächtigkeit, ist natürlich nicht immer möglich; es wurden aber alle zweifelhaften Fälle ausgeschlossen, und die Zahl der wirklich vorgekommenen Schichtbildungen ist daher sicher größer als in der folgenden Zusammenstellung angegeben ist.

Häufigkeit von mehreren *ci*-Schichten übereinander.

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Jahr
Zahl aller Schichtbildungen	21	51	48	48	168
Zahl der Bildungen in Abständen von ≥ 1 km	1	13	10	13	37
Prozent. Häufigkeit aller Schichtbildungen	13	18	16	16	16 %
Prozent. Häufigkeit der Bildungen mit ≥ 1 km Abstand	0.6	5	3	4	4 %

Bei den insgesamt 1053 *ci*-Messungen haben sich 168 mal, d. i. 16%, mindestens zwei Wolkenschichten übereinander feststellen lassen; diese prozentische Häufigkeit ist in der dritten Zeile für die einzelnen Jahreszeiten angegeben. Mehr als $\frac{3}{4}$ dieser Schichten hatten einen Abstand von weniger als 1 km; die Zahl der Schichten in Abständen von mindestens 1 km sind in der zweiten und vierten Zeile aufgeführt. Die Häufigkeitsverteilung ist in den einzelnen Jahreszeiten ziemlich die gleiche, nur der Winter ist verhältnismäßig arm an Schichtbildungen in der *ci*-Region. Vielleicht hängt dies mit der dann sehr großen *ci*-Geschwindigkeit zusammen. Unter den 168 Schichtbildungen waren 25 Fälle mit mindestens 3, zwei mit 4 und vier mit 5 Schichten übereinander. In den letzten Fällen reichte die Schichtbildung bis zur *ci-cu*- oder *a-cu*-Region herunter; die dabei gefundenen Höhen waren:

Datum	Wolkenhöhen in km	Bemerkungen
26. V. 1901, 4 ^p	10.80, 7.03, 6.41, 4.64, 4.18	Gewitterrand mit Regen
9. IX. 1903, 8 ^{1/4} ⁿ	9.02, 8.64, 7.97, 6.75, 5.92	Tagsüber häufig Regenböen
6. V. 1915, 10 ^{1/2} ⁿ	10.45, 9.89, 9.40, 8.52, 6.63	☉ 1 7 ^{1/4} ^p
23. IX. 1916, 4 ^{3/4} ^p	9.43, 9.03, 8.22, 7.84, 6.16	ohne Regen (Westrand einer Antizyklone)

Am häufigsten sind Doppelschichten mit Abstand von weniger als 500 m (52% der Fälle); hierbei handelt es sich offenbar nur um eine besondere, wenn auch recht häufige blättrige Struktur ein und derselben Wolke. Grundsätzlich davon verschieden sind meist die Schichten mit Vertikalabständen von 1 km und mehr, da hier ein Ausfließen aus verschiedenen Regionen der Depression stattgefunden haben wird; die letzteren Schichtbildungen sind es auch, welche als Begleiterscheinungen von Teildepressionen als Wetterzeichen angesprochen werden. Auf die enge Beziehung zwischen Schichtbildung und Niederschlägen wurde schon auf Seite 21 hingewiesen. Sie drückt sich auch in der Wetterregel von E. Mylius¹⁾ aus: »Schlechtem Wetter, insbesondere der Neigung zu Niederschlägen, gehen immer mehrschichtige Wolken voraus, und fast immer folgen sie ihm eine kurze Zeit nach. Einfache Wolkenschichtung dagegen und wolkenloser Himmel deuten auf ruhige, trockene Witterung«. Eine genaue Verfolgung der verschiedenen Arten von Schichtbildungen ist nur möglich, wenn die Bewegung in jeder einzelnen Schicht genau bestimmt werden kann; die Zahl der hierfür brauchbaren photogrammetrischen Doppelaufnahmen ist noch zu gering.

Hinsichtlich der Form der ci in den einzelnen Schichten ist zu bemerken, daß flockige ci und ci-str bei weitem überwiegen; haben die übereinander liegenden Schichten verschiedene Formen, so liegen meist die zarteren Gebilde, namentlich ci 4 und ci 7 unten. Schichten dieser Art sind eine charakteristische Begleiterscheinung von Teildepressionen, vor allem auf der rechten Vorderseite, teilweise aber auch nach Aufhören der Niederschläge der »warmen Front«. Am stärksten scheint die Mehrfachschichtbildung bei Wetterlagen zu sein, die Gewitter und Böen bringen. Nur bei sehr ausgeprägten Hochdrucklagen, z. B. in dem oben angeführten Fall von 5 Schichtbildungen am 23. IX. 1916, dringt manchmal die warme Front am Rande von Teildepressionen nicht weit genug vor, um Niederschläge zu erzeugen, und dann ist anscheinend auch die Verteilung der Wolkenformen in der Vertikalen gestört, d. h. es liegen oben vorwiegend feder- oder fadenförmige Wolken und darunter flockige Gebilde. So bestanden am 23. IX. 1916 die beiden höchsten Schichten aus ci-Fäden, in 8.2 und 7.8 km Höhe waren die Wolken nestförmig und flockig, und in 6 km lag ci-cu undulatus. Das sind aber nur Ausnahmefälle.

Mehrfache a-cu-Schichten sind im allgemeinen schlecht zu messen, weil sie zu dicht übereinander liegen, und a-cu schon an und für sich — z. T. infolge der Wogenbildung — eine größere vertikale Mächtigkeit haben als ci. Jedenfalls kommen blättrige a-cu recht häufig vor; dagegen ist ci-cu über a-cu, d. h. gleichzeitiges Vorkommen von Wolken in rund 6 1/2 und 4 km Höhe ziemlich selten.

3. Wogenwolken. Das zur Untersuchung brauchbare Material besteht aus 227 Fällen, hiervon kommen auf ci-cu und a-cu 152. Leider sind darunter nur wenige Doppelaufnahmen, anscheinend deshalb, weil die Beobachter meist der Ansicht waren, daß bei diesen deutlich erkennbaren Wolken eine photogrammetrische Aufnahme, ergänzt durch eine relative Bestimmung des Wolkenzuges, genügt, während gerade hier eine genaue Feststellung der Bewegung der verschiedenen Wolkenteile erwünscht gewesen wäre. Aus diesem Grunde ließ sich auch das Abweichen der Streichrichtung von der Zugrichtung durchschnittlich nur mit einer Genauigkeit von zwei Strich (22 1/3°) ermitteln. Eine eingehende Untersuchung ist daher für später in Aussicht genommen.

Geordnet nach Jahreszeiten ergibt sich als mittlere Wellenlänge in m, gerechnet von der Mitte eines Wolkenwulstes bis zur Mitte des nächstfolgenden:

Wolkenform	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Jahresmittel		Maxim.	Minim.
					Mittel aller Fälle	geb. aus Jahreszeiten		
ci	563 ₁₅	484 ₂₅	576 ₁₈	527 ₁₇	532 ₇₅	538	2200	80 m
ci-cu und a-cu	(696) ₈	331 ₃₃	292 ₂₄	341 ₁₇	339 ₁₃₈	415	1650	35 m

Die Zahl der Messungen ist neben die Wellenlängen gesetzt. Ein jahreszeitlicher Einfluß ist nicht klar erkennbar, dagegen eine Zunahme der Wellenlänge mit der Höhe. Das hatte sich auch 1896/97 gezeigt²⁾ bei durchweg etwas größeren Wellenlängen (ci und ci-str 759 m, ci-cu 482 m, a-cu 442 m). Gruppirt man die Wellenlänge nicht nach der Wolkenform, sondern nach der Höhe, so tritt die Zunahme noch deutlicher hervor:
 Wolkenhöhe: 2—3 3—4 4—5 5—6 6—7 7—8 8—9 9—10 10—11 km
 Wellenlänge (ausgeglichen): (305) 282 326 372 396 476 502 610 630 m

Durchschnittlich nimmt die Wellenlänge λ auf 1 km Höhe um 50 m zu. Dabei ist aber zu bemerken, daß die Zunahme sprungweise vor sich geht, da die ci-cu — allerdings nur 24 Messungen im Zeitraum 1900/20 — eine mittlere Wellenlänge von nur 224 m hatten, davon 9 mit einer Wellenlänge von höchstens 100 m. Auch hinsichtlich der Häufigkeitsverteilung nimmt ci-cu eine Sonderstellung ein. Die prozentische Häufigkeit bestimmter Wellenlängen (λ) betrug für:

λ	≤ 100 m	< 250 m	250-500	500-750	750-1000	> 1000 m
ci	9.6	26.0	35.6	16.4	9.6	12.3 %
ci-cu	37.5	66.6	33.3	—	—	—
a-cu	7.1	38.6	39.4	15.0	3.1	3.9 %

¹⁾ E. Mylius: Volkswetterkunde. Berlin, O. Salle, 1908. S. 8.

²⁾ A. Sprung und R. Süring: Ergebnisse der Wolkenbeobachtungen in Potsdam S. 73.

Die mit der Höhe sich ändernde Wellenlänge wird verständlich, wenn man ihre Abhängigkeit von Temperatur- und Windänderungen berücksichtigt. Ein Anwachsen von λ kann, wie Alfred Wegener gezeigt hat¹⁾, entweder durch Verringerung des Temperatursprunges oder durch Vergrößerung des Windsprunges an der Unstetigkeitsfläche entstehen. Unter vereinfachenden Annahmen (Sinusform der Wellen, Temperatur der unteren Luftschicht = 0°, trockene Luft, keine Kondensation, vollkommen sprunghafte Änderung von Temperatur und Wind) hat A. Wegener eine einfache Formel zur Berechnung der Wellenlängen von Luftwogen berechnet und eine graphische Tabelle entworfen, aus der sich die Wellenlängen für bestimmte Temperatur- und Windsprünge entnehmen lassen. Die Annahme der Sinusform ist für a-cu nur in sehr roher Annäherung, für ci-cu und ci im allgemeinen recht gut erfüllt, z. B. betrug für die längste ci-Welle von 2200 m die Breite der Wolkenstreifen in der Zugrichtung ungefähr 1300 m. Bei Temperaturen tiefer als 0° verkleinern sich, bei feuchter Luft vergrößern sich die λ der Wegenerschen Tabelle derart, daß sich ihre Wirkung in der ci-Schicht ungefähr ausgleicht, während für a-cu die Temperatursprünge um 10 bis 20% zu verkleinern, die Wellenlängen also zu vergrößern sind. Kondensation wird, abgesehen von kleinen Verlängerungen der Wellen, im wesentlichen nur die Wellenform beeinflussen. Die Annahme einer Mischungszone von mehreren 100 m Mächtigkeit anstelle einer scharfen Unstetigkeitsfläche läßt sich zahlenmäßig nicht in einfacher Weise berücksichtigen. Aus den Wegenerschen Kurven sind nachfolgend einige Windsprünge (Δv) berechnet, die notwendig sind, um bei bestimmten Temperatursprüngen (Δt) gewisse Wellenlängen zu erzeugen.

$\Delta v \backslash \lambda$	50	100	300	500	1000	1500	2000 m
für $\Delta t = 0,95^\circ$	0,5	0,75	1,3	1,7	2,4	3,0	3,5 mps
1°	0,8	1,0	1,5	2,3	3,3	4,0	4,8
5°	1,7	2,4	4,2	5,3	7,5	9,3	10,7
10°	2,4	3,3	5,8	7,5	10,6	13,0	15,0

$\Delta t > 5^\circ$ und $\Delta v > 10$ mps werden selten erreicht werden; es ist daher anzunehmen, daß lange Wellen (≥ 1 km) nur bei sehr kleinen Δt vorkommen werden, und daß Windsprünge im wesentlichen deren Ursache sein werden. Prüft man daraufhin unser Wolkenmaterial an Wellenlängen von mindestens 1 km, so ergeben sich als Mittelwerte:

für ci: $h = 9,61$ km, $\lambda = 1568$ m, $v = 38$ mps, normales $v = 23,5$ mps. Zahl der Beob. 9.

für ci-cu und a-cu: $h = 5,60$ km, $\lambda = 1208$ m, $v = 12,5$ mps, normales $v = 16,5$ mps. Zahl der Beob. 6.

Bei großem v wird meist auch Δv groß sein, große λ sind daher bei schnellen ci zu erwarten. Umgekehrt ist es aber in der a-cu-Schicht; hier traten lange Wellen mit einer Ausnahme (a-cu in 7,3 km Höhe am 27. VIII. 1900) immer nur bei relativ kleinen Windgeschwindigkeiten auf. Der Gegensatz ist aber nur ein scheinbarer; bei den ci sind meist die losen höheren Wolkenteile zur Ausmessung benutzt, während bei den a-cu die obere Wolkenfläche verdeckt ist, so daß die gemessenen v der unteren Windströmung entsprechen, deren geringer Wert gerade auf einen starken Windsprung hindeutet.

Ganz kurze Wellen sind nur bei außerordentlich hohen Δt wahrscheinlich. Dem Einbrechen solcher relativ warmer Luftströme in eine ziemlich ruhige Atmosphäre entspricht z. B. die große Häufigkeit von ci-cu an der Südseite von Depressionen (S. 22). In der ci-Region treten ungewöhnlich kleine λ , ebenso wie lange λ , meist bei übernormal hohen Windgeschwindigkeiten auf, d. h. bei den hier zu erwartenden großen Δv müssen auch ganz bedeutende Δt vorkommen. Im Mittel der sieben Fälle von ci mit höchstens 100 m Wellenlänge betrug die Wolkengeschwindigkeit 28,9 mps bei einer mittleren Wolkenhöhe von 8,05 km und einer Wellenlänge von 95 m. Diese kurzen Wellen hatten durchweg eine Frontbreite von weniger als 1 km; die Wogenbildung war also nur auf einen kleinen Raum beschränkt, sie war gewissermaßen eine örtliche Erscheinung. Das zeigte sich besonders deutlich bei dem Winter-ci vom 16. II. 1901. Hier bildeten sich auf der Vorderseite einer Teildepression in 5,87 km Höhe polarbandförmige ci-Fasern aus mit Streichrichtung NNE-SSW und Bewegung von 24 mps aus NNE. Scheinbar waren diese Fäden an einigen Stellen von Wogen durchsetzt; die genaue Messung ergab jedoch, daß die Wogen deutlich von den Fäden getrennt waren und 90 m tiefer als diese lagen (Doppelaufnahme mit 11 ausgemessenen Wolkenpunkten). Die Größenverhältnisse der Wogen waren: Wellenlänge 100 m, Frontbreite 500 m mit Streichrichtung WNW-ESE. — Mit einer Ausnahme lagen die kurzwelligen ci an der Vorderseite von Depressionen, nur in einem Falle (18. VI. 06) am Ostabhange eines nach E vordringenden Hochdruckrückens. Die ci dieses Tages hatten die typische knäuel- oder nestförmige Gestalt von ci-Neubildungen (Eintropfen kalter Luft mit Wirbelbildung gemäß S. 20). Auch hier lagen die nur an wenigen Stellen auftretenden Wogen tiefer (400 m) als die fadenförmigen Enden der ci-Knäuel. Das ci-Nest hatte eine Höhe von 8,59 km mit Zug von 10 mps aus W, während die Wogen eine Streichrichtung von SW nach NE hatten.

¹⁾ A. Wegener: Studien über Luftwogen. Beiträge zur Phys. d. freien Atm. 2, S. 55—72, 1907.

Die kleinste bei ci-cu beobachtete Wellenlänge war 35 m (13. X. 1904 bei $h = 7.32$ km und WNW von 17 mps). Bei Annahme eines Δt von 5° kann der Windsprung nur etwa 1 mps und selbst bei Δt von 10° weniger als 2 mps betragen haben.

Am vielseitigsten liegen die Verhältnisse in der a-cu-Schicht. In rund 4 km Höhe kamen Wellenlängen zwischen 45 m (14. VIII. 06) und 1650 m (30. I. 01) vor. Nach der Zusammenstellung auf S. 25 kommen nur 7% der Messungen auf Wellenlängen > 750 m; es werden also bei der Wogenbildung der a-cu die Temperatureinflüsse über die Windwirkungen stark überwiegen. Das Zusammentreffen beider Einflüsse äußert sich in den zahlreichen Doppelfurchungen.

Die Stellung der Woge zur Zugrichtung gibt uns weitere Anhaltspunkte über ihre Entstehung. Nach den Ausführungen von A. Wegener in den vorhin erwähnten Studien über Luftwogen sind drei Fälle zu unterscheiden:

1. Wogen senkrecht zur Zugrichtung. Entstehung: Geschwindigkeitsunterschied (Δv) der oberen und unteren Luftschicht ohne Richtungsunterschied ($\Delta \varphi$) beider Schichten.
2. Wogen in der Zugrichtung. Entstehung: nur Richtungsunterschied, kein Geschwindigkeitsunterschied.
3. Wogen schräg zur Zugrichtung. Entstehung: Δv und $\Delta \varphi$; jede Stellung läßt aber zwei Deutungen über den Änderungssinn von v und φ zu. Bezeichnet man $\varphi = 0^\circ$ als Südwind, $\varphi = 90^\circ$ als Westwind usw., und zählt man den Winkel (α) zwischen Zugrichtung (φ) und Streichrichtung (σ) positiv entgegengesetzt der Drehung des Uhrzeigers, so bedeutet ein positives α entweder Linksdrehung des oberen Windes und Windabnahme nach oben oder Rechtsdrehung des oberen Windes und Windzunahme, dagegen bedeutet ein negatives α entweder Linksdrehung mit Windzunahme oder Rechtsdrehung mit Windabnahme. Unabhängig vom Vorzeichen wird mit wachsendem α die Windzunahme bei Rechtsdrehung größer, bei Linksdrehung kleiner.

Für das Potsdamer Material ist der Winkel $\alpha = \varphi - \sigma$ nach Strichen (ein Strich = $11\frac{1}{4}^\circ$) berechnet. Ordnet man nach dem Vorzeichen von α , so erhält man als Häufigkeitsverteilung:

für $\alpha =$	absolute Häufigkeit					prozent. Häufigkeit			
	90°	+	-	0°	Summe	90°	+	-	0°
bei ci n =	18	36	17	4	75	24.0	48.0	22.7	5.3%
bei ci-cu und a-cu . n =	39	68	47	16	170	22.9	40.0	27.6	9.4%

Unter der Annahme, daß immer Windzunahme nach oben stattgefunden hat, würde also bei ci in 48%, bei ci-cu und a-cu in 40% der Fälle Rechtsdrehung des Windes nach oben eingetreten sein; jedenfalls überwiegen die positiven α entschieden über die negativen. Fälle, in denen nur φ ändert (α kleiner als 2 Strich), werden meist solche sein, wo fast ausschließlich Temperatursprünge die Wogenbildung veranlassen; sie sind verhältnismäßig selten, ihre Häufigkeit beträgt für ci-cu und a-cu nur 9%, für ci sogar nur 5%.

Die Größe der mittleren Abweichung zwischen Zug- und Streichrichtung ist:

Wolke	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Gesamt- mittel	Jahres- zeitl. Mittel	1896/97
ci	72.5	87.5	72.5	72.5	76.2	76.2	72°
ci-cu und a-cu	72.5	81.0	69.5	87.5	77.5	77.6	91.°5

Hienach ist die mittlere Stellung der Woge zur Zugrichtung für alle Wolkenarten ungefähr die gleiche. Der Wert ist für ci in guter Übereinstimmung mit demjenigen von 1896/97; für a-cu wurde aber damals ein viel größerer Betrag gefunden. Die starke Unregelmäßigkeit in den einzelnen Jahreszeiten weist schon darauf hin, daß die Verhältnisse bei a-cu recht schwankend sind. Voraussichtlich hängt dies mit der häufigen Doppelfurchung der ci-cu und a-cu zusammen. Die genaue Ausmessung lehrt, daß in den meisten Fällen ein doppeltes Wogensystem wirklich vorhanden ist. Die Annahme von A. Wegener¹⁾, daß die Kreuzungen meist auf »die Tendenz zum Emportreiben von cu-Köpfen zurückzuführen sind, welche dann infolge des Windunterschiedes zwischen beiden Luftschichten gerade in dieser Richtung in die Länge gezogen werden«, trifft wohl nur vereinzelt zu; das häufige Vorkommen von a-cu in den kühlen Tagesstunden spricht auch dagegen. Bei solchen Kreuzungen sind meist die Wogen mit dem kleineren α die längeren. Da nun auch in den a-cu mehrere Schichten vertikal übereinander liegen, so bilden sich die Wogen vielleicht zunächst in getrennten Schichten mit verschiedenen Temperatur- und Windsprüngen aus, und erst die Vereinigung der Schichten durch das Emportreiben der Wellenberge führt zu der typischen Erscheinung der gekreuzten Wogenwolken.

Von den Wogen sind hinsichtlich der Entstehung scharf zu trennen die durch den Wind ausgezogenen Wolkenstreifen, welche sowohl bei ci wie auch bei a-cu (vergl. S. 21) häufig vorkommen. In der äußeren Form sind Wogen und Windstreifen nicht immer sicher zu unterscheiden. Eine Zusammenstellung der Winkel zwischen Zugrichtung und Streichrichtung solcher Streifen führte — ebenso wie ältere ähnliche Untersuchungen

¹⁾ A. Wegener: Thermodynamik der Atmosphäre. Leipzig 1911. S. 157.

von L. Besson-Paris, P. Gamba-Pavia, L. H. G. Dines-London — zu keinem entscheidenden Ergebnis. Sowohl für ei wie für a-cu ist eine Rechtsdrehung des Wolkenzuges gegen die Streichrichtung nur um wenige Prozent häufiger als eine Linksdrehung. Ein Zusammenfallen von Zugrichtung und Streichrichtung (genauer gesagt: eine Abweichung von weniger als zwei Strich) war bei ei in 1,5%, bei a-cu in 11% der Messungen vorhanden, was offenbar ein Beweis dafür ist, daß diese Wolken fast immer eine Schichtgrenze zwischen zwei verschieden gerichteten Luftströmungen sind.

Photogrammetrisch lassen sich Bestimmung von Wogenrichtung und Streichrichtung von Wolkenfäden dazu benutzen, die Verschiebung des ganzen Wolkensystems in sich zu erkennen. Es kann hierfür nur ein Beispiel gegeben werden. Am 8. VII. 1901 wurden zwischen 3 $\frac{3}{4}$ h^p und 6 $\frac{1}{4}$ h^p drei Aufnahmen von ei-Wolken zwischen 10.8 und 12.2 km Höhe gemacht. Es ließen sich drei Schichten in 11.1, 11.6 und 12.25 km unterscheiden; die ersten beiden Schichten waren verbunden durch NE—SW gerichtete Streifen, die beiden oberen durch Federn mit Streichrichtung N—S. Die Darstellung der Wind-, Wogen- und Streichrichtungen zeigte, daß zwischen 10.8 und 11.1 km eine aus ENE ziehende Wolkenschicht mit NNW—SSE gerichteten Wogen lag. Hier hatte also nur ein Windsprung ohne Winddrehung stattgefunden. Zwischen 11.6 und 12.2 km drehte der Wind, angezeigt durch Form der ei-Federn, über NE bis NNW, und in 12.25 km lag ein zweites Wogensystem ($\lambda = 350$ m, Streichrichtung: WSW—ENE), also hier fand von neuem ein Windsprung ohne wesentliche Winddrehung statt.

4. Größe von ei-cu und a-cu. Die Ausmaße solcher Wolken sind bisher nur geschätzt worden. Die photogrammetrischen Aufnahmen lassen eine zahlenmäßige Auswertung zu. Bei den häufig unbestimmten Umrissen der Wolken und der manchmal stark schwankenden Größe der Ballen haben allerdings nur Mittel- und Extremwerte Bedeutung, diese werden aber den tatsächlichen Verhältnissen für Potsdam schon sehr nahe kommen. Die folgende Tabelle enthält, jahreszeitlich geordnet, zunächst die mittlere Länge und Breite der Wolkenballen in m, alsdann die Flächengröße, ausgedrückt in (m)², da die Ballen meist nahezu quadratische Form haben, und ausgedrückt in ha (1 ha = 0.01 qkm). Zum Schluß ist die Zahl der benutzten Platten (n) angegeben.

Größe von ei-cu- und a-cu-Ballen.

		1. Mittel					2. Maxima			
		Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Jahr	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
ei-cu	}	400 × 400	153 × 117	123 × 99	123 × 116	141 × 112 m	—	700 × 350	320 × 240	450 × 450 m
		(400)	134	110	119	(126 m) ²	—	495	277	(450 m) ²
		—	1.79	1.22	1.43	1.58 ha	—	24.5	7.7	20.2 ha
		n = 1	17	23	12	53	—	—	—	—
a-cu	}	296 × 289	287 × 226	228 × 197	249 × 206	254 × 214 m	650 × 450	1130 × 850	1000 × 1000	1000 × 700 m
		292	255	212	226	(233 m) ²	541	980	1000	(837 m) ²
		8.55	6.49	4.49	5.12	5.44 ha	29.25	96.0	100.0	70.0 ha
		n = 23	82	127	73	305	—	—	—	—

Hiernach sind a-cu-Flächen nahezu viermal so groß wie ei-cu. Die Wolkenballen sind im Sommer am kleinsten und im Winter am größten. Die Seitenlänge der ei-cu ist nur wenig größer als die Hälfte der mittleren Wellenlänge (224 m), während sie für a-cu etwa $\frac{2}{3}$ der Wellenlänge ist. Die Bedingungen einer sinusförmigen Welle sind also für ei-cu gut, für a-cu recht wenig erfüllt. Einiges Interesse beanspruchen die Extreme. Der größte ei-cu kam in 8.19 km Höhe vor, während die größten a-cu — zwei Beispiele von 1 km Seitenlänge — in Höhen von 6.5 und 4.6 km lagen. Die kleinsten Wolkenballen (sowohl ei-cu wie a-cu) hatten nur 14—20 m Seitenlänge. Häufig finden sich auf derselben Platte gruppenweise Wolken von verschiedener Größenordnung; es deutet dies auf schichtförmigen Bau dieser Wolken und auf stark variable Kräfte bei der Bildung von Wogen.

Die Aufarbeitung des photogrammetrischen Plattenmaterials wurde durch außerordentliche Beihilfen seitens des Ministeriums für Wissenschaft, Kunst und Volksbildung, der Druck der Abhandlung durch Unterstützung seitens der »Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft« ermöglicht.