

# 5. *Über Beobachtungen von kurz dauernden Luftdruckschwankungen (Windwogen); von M. Toepler.*

(Hierzu Taf. I, Photogramme 2, 3, 7 a, 7 b, 9 und 10. Die Photogramme 1, 4, 5, 6, 8 und 11 befinden sich im Text.)

In einer früheren Notiz<sup>1)</sup> habe ich einen Apparat angegeben, mit welchem sich kleinste Luftdruckänderungen beobachten lassen; daselbst sind auch Beobachtungsdiagramme *periodischer* Druckschwankungen (Helmholtzsche Windwogen) mitgeteilt.

Inzwischen ist von anderer Seite<sup>2)</sup> vergeblich nach periodischen Luftdruckschwankungen gesucht worden. Ich habe daher vorigen Herbst meine Beobachtungen wieder aufgenommen. Die früher benutzte Vorrichtung hat hierbei insofern eine wesentliche Vervollkommnung erfahren, als die zeitraubende Beobachtung des Libellenkuppenstandes durch *photographische* Registrierung desselben ersetzt wurde, wodurch der Apparat für meteorologische Zwecke bequem brauchbar geworden ist.

Im folgenden sei eine kurze *Besprechung des Apparates* und — im Anschlusse an eine Reihe von Photogrammen — einiges über den Einfluß *lokaler Störungen*, über das Auftreten und den Charakter von *Luftdruckwogen*, sowie schließlich über die Möglichkeit, aus den Aufnahmen ein neues meteorologisches Element, die „*barometrische Unruhe*“, zu entnehmen, angegeben.

1) M. Toepler, Wied. Ann. 57. p. 472. 1896.

2) Vgl. J. Flögel, Naturw. Rundschau 16. p. 566—567. 1901 und Fortschr. d. Phys. (III) 57. p. 205. 1901. Vermutlich treten Luftdruckwogen in der Tiefebene seltener auf als im Hügellande (Dresden). Gleichfalls mit dem von meinem Apparate sich in wesentlichen Teilen unterscheidenden Variometer von Hefner-Alteneck angestellte Beobachtungen finden sich auch bei J. West, Wied. Ann. 65. p. 943. 1898.

## I.

## Bemerkungen zum Apparate.

Seinen wesentlichen Bestandteilen nach wird der Apparat aus folgendem gebildet (vgl. die schematische Fig. 1). In einem von schlechten Wärmeleitern umgebenen Glasgefäße  $V$  ist Luft mittelst der in einer Drucklibelle befindlichen Flüssigkeit (Toluol)  $T$  abgeschlossen. Änderungen des äußeren Luftdruckes veranlassen dann entsprechende Verschiebungen der Flüssigkeitssäule. Die Lagenänderungen der Flüssigkeitskuppe  $a$  werden photographisch registriert. Dies wird erreicht, indem eine neben dem Rohre angebrachte Linse ein passend vergrößertes Bild der Kuppe auf einen der Rohrachse parallelen

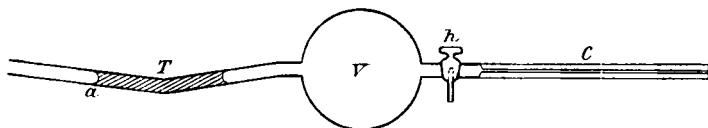


Fig. 1.

Spalt entwirft<sup>1)</sup>; unmittelbar hinter dem Spalte wird durch ein Uhrwerk ein photographischer Papierstreifen senkrecht zur Spaltrichtung langsam vorübergezogen.

Die eventuell auch durch den Dreiweghahn  $h$  abzuschließende Kapillare  $C$  ermöglicht den Ausgleich *langsamer* Barometerstandsänderungen, deren Registrierung bei der wünschenswerten starken Vergrößerung der Luftdruckschwankungen

1) Bei der Abbildung erscheint, obgleich das abgebildete System (die klare *ungefärbte* Libellenflüssigkeit im Glasrohre, beide im Wasserbade mit planparallelen Glaswänden) nur aus *durchsichtigen* Medien besteht, die *Luft* im Libellenrohre, deren Brechungsexponent allein von denen der übrigen Systemteile wesentlich abweicht, *dunkel* auf hellem Grunde; etwa auftretende störende Reflexe sind leicht durch passend auszuprobierende Blenden zu beseitigen. Längs eines den vertikalen Teil des so erhaltenen Kuppenbildes schneidenden, horizontalen, schmalen Spaltes herrscht dann auf der einen Seite homogene Helligkeit, auf der anderen fast völlige gleichmäßige Dunkelheit. Letztere Helligkeitsverteilung läßt sich längs eines hinreichend schmalen Spaltes auch dann erreichen, wenn, wie bei Aufnahme der nachfolgend mitgeteilten Photographie, das Libellenrohr sich nicht in einem Wasserbade, sondern in Luft befindet.

unhandlich breite Registrierbänder erfordern würde. Dagegen werden alle *kurzdauernden* Luftdruckänderungen stark vergrößert registriert.

Abgesehen von dem später noch eingehender zu behandelnden Einflusse der Kapillaren gilt (vgl. l. c. p. 476) für den Zusammenhang von Druckänderung  $db$  (in  $\text{g/cm}^2$ ) und wahrer Kuppenverschiebung  $dl$  (in cm)

$$(a) \quad db = dl \left( 2 \cdot \sigma \cdot \sin \alpha + k \cdot \frac{q}{V} \cdot b_0 \right).$$

Bei dem von mir bei Aufnahme der mitgeteilten Photogramme benutzten Apparate war speziell:

Das spezifische Gewicht der Libellenflüssigkeit (Toluol)  $\sigma = 0,886$ , der Knickungswinkel  $2\alpha$  der Libelle gleich  $0,145$ , der Querschnitt des Libellenrohres  $q = 0,093 \text{ qcm}$ , das abgesperrte Luftvolumen  $V = 166,2 \text{ ccm}$ ,  $b_0$  der mittlere Barometerstand ( $1033 \text{ g/cm}^2$ );  $k$  bedeutet das Verhältnis der spezifischen Wärmen der Luft gleich  $1,41$ .

Die Formel gilt unter der Voraussetzung, daß die Zustandsänderungen im Ballon als adiabatische aufzufassen sind, wie dies für die hier untersuchten *kurzdauernden* Druckschwankungen jedenfalls zutrifft (für isotherme Zustandsänderungen wäre in der Formel  $k$  durch den Faktor 1 zu ersetzen).

Beträgt die optische Vergrößerung durch die vor  $a$  angebrachte Linse  $\omega$ , so ergibt sich als Beziehung zwischen Luftdruckänderung und Verschiebung  $dL$  des Kuppenbildes (in cm)

$$(b) \quad db = \frac{dL}{\omega} \left( 2 \sigma \sin \alpha + k \frac{q}{V} b \right).$$

Für den benutzten Apparat,  $\omega = 9,2$ , wird also speziell

$$db = 0,94 \, dl = 0,102 \, dL.$$

Eine Verschiebung  $dL$  des Kuppenbildes um 1 cm wird also veranlaßt durch eine Druckänderung  $db$  von  $0,102 \text{ g/cm}^2$ , d. h. eine Luftdruckzunahme um 1 mm Hg gibt eine Kuppenverschiebung um 133 mm, d. h. bei der angenommenen optischen Vergrößerung (9,2) beträgt also die Gesamtvergrößerung der auf Hg-Säule bezogenen Druckänderung 133.

Bei scharfer Kuppenabbildung läßt sich deren jeweiliger Stand bis auf  $\frac{1}{8} \text{ mm}$  in den Photogrammen ablesen. Diesem entspricht bei einer Gesamtvergrößerung von 133 eine Druckänderung von ca.  $\frac{1}{670} \text{ mm Hg}$ , d. h. von rund  $\frac{1}{500\,000} \text{ Atm}$ .

Die Spaltbreite hat offenbar bei dem Abbildungsverfahren einen Einfluß auf die Schärfe des Bildes. Druckschwankungen von kürzerer Dauer als diejenige Zeit, innerhalb deren sich der Spalt um seine Breite verschiebt, können nicht mehr unterschieden werden. Diese Zeit kann also gewissermaßen als Maßstab für das *zeitliche* Auflösungsvermögen der Vorrichtung für kurze Druckschwankungen dienen. Der benutzte Apparat besaß einen Spalt von nur  $\frac{1}{120}$  cm Breite<sup>1)</sup>, die an ihm innerhalb 1 Stunde vorbeigezogene Streifenlänge je nach Wahl des Uhrwerkes 10,5 oder 31,5 cm; das Auflösungsvermögen war also 1 bez. 3 Sek.; Druckschwankungen von längerer Dauer können demnach als solche erkannt werden.

*Beleuchtung:* Für die gewählte Vergrößerung gab bei 1 Sek. Auflösungsvermögen und Anwendung von empfindlichem Bromsilbergelatinepapier die Beleuchtung mittels Auerbrenner noch genügende Schwärzung<sup>2)</sup>, ebenso eine 100-Kerzen elektrische Glühlampe. Bei 3 Sek. Auflösungsvermögen (Belichtungsdauer) genügte soeben schon eine 16-Kerzenlampe oder eine helle Petroleumlampe. Tageslicht schwärzte *im Winter* in der Regel das Papier nur ungenügend.

Willkürliche *Zeitmarken* in den Photogrammen (vgl. solche in Phot. 3, 6, 8 und 9) erhält man einfach durch kurzdauerndes Abstellen der Beleuchtung.

#### Zur Theorie des Apparates.

Der angegebene Apparat beruht auf der Anwendung der Drucklibelle zur Messung kleinster Druckdifferenzen. Das in vorliegender Arbeit voranstehend angegebene Variometer ist nach Bau und Abmessung der Größenverhältnisse der speziellen Aufgabe, kleinste, *kurzdauernde* Schwankungen des atmosphärischen Luftdruckes in *tunlichst großem Maßstabe* photographisch zu registrieren, angepaßt.

1) Ein breiterer Spalt wurde nur selten angewandt.

2) Die mitgeteilten Photogramme sind ausnahmslos mit Auerlicht aufgenommen. Die in den Photogrammen sichtbaren Ungleichmäßigkeiten in der Schwärzung sind zum Teil durch inkonstantes Brennen des Auerlichtes, zum Teil durch nicht ganz gleichmäßigen Gang des einfachen Uhrwerkes veranlaßt; die horizontale Streifung rührt von Staubeilchen im Spalte her.

Es sei zunächst von dem Einflusse der Kapillaren  $C$  abgesehen (der Hahn  $h$  geschlossen gedacht).

Die Anwendbarkeit der Drucklibelle zu *exakten* Messungen ist gebunden an eine regelmäßige, sich gleichbleibende Ausbildung der Flüssigkeitskuppen. Diese ist erfahrungsgemäß<sup>1)</sup> in weitgehendem Maße gewährleistet für die Kuppenbildung von Xylol oder Toluol in ausgesucht zylindrischen Glasrohren von 0,1—0,2 qcm lichtem Querschnitt und für *kleine Kuppenverschiebungen* (unter 1 cm). Unter dieser Voraussetzung kann von einer *strengen* Gültigkeit der oben unter (a) und (b) angegebenen Gleichungen die Rede sein. Es ist also die Größe  $q$  in den Formeln festgelegt, und ferner die Bedingung gegeben, daß  $dL$  möglichst klein, der Faktor

$$2 \sigma \sin \alpha + k \cdot \frac{q}{V} b_0$$

also tunlichst groß, d. h. daß die gewünschte starke Vergrößerung (*kleiner* Faktor von  $dL$  in Gleichung (b)) möglichst auf optischem Wege (großes  $\omega$ ) erreicht werden muß.<sup>2)</sup>

Ferner ist zur Wahl des Knickungswinkels  $2\alpha$  und der Ballongröße  $V$ , welche beide zusammen den Wert des in Rede stehenden Faktors bedingen, folgendes zu bemerken. Wenn auch für *kurzdauernde* Druckschwankungen das Verhalten der Luft im Ballon als adiabatisch anzusehen ist, so wird man doch, wenn leicht zu erreichen, das zweite Glied, welches allein den unsicheren Faktor  $1,41 > k > 1$  enthält, klein gegen das erste Glied machen. Würde man z. B.  $\alpha = 45^\circ$  und  $V = 2000 \text{ ccm}$  wählen, so würde ( $q = 0,093$  und  $\sigma = 0,886$  vorausgesetzt) der Faktor den Wert  $1,25 + 0,05 \cdot k$  annehmen, der Einfluß, ob die Zustandsänderung adiabatisch oder isotherm erfolgt, auf

1) Vgl. die eingehenden Untersuchungen über die Drucklibelle als Meßinstrument von A. Toepler, Wied. Ann. 56. p. 609. 1895.

2) Die Anwendung einer *mehr als* zehnfachen optischen Vergrößerung würde die unbequeme Beleuchtung mit sehr hellen Lichtquellen (Bogenlicht) erfordert haben.

Die größte bei den unruhigen Wetterlagen des letzten Winters beobachtete kurzdauernde Druckschwankung betrug ca. 0,3 mm Hg-Druck; für den benutzten Apparat (Gesamtvergrößerung 133, optische Vergrößerung 9,2) veranlaßt diese extreme Druckänderung doch nur eine wahre Kuppenverschiebung von 4,8 mm.

weniger als 2 Proz. des Ausschlages herabgedrückt sein.<sup>1)</sup> Hinderliche Konstanthaltung der Temperatur im Ballon vorausgesetzt, würde der Apparat dann kurzdauernde und auch langdauernde atmosphärische Druckänderungen sehr genau messen lassen.

Bei der zu scharfer Registrierung der kleinsten Druckschwankungen bei ruhigem Wetter erwünschten starken Vergrößerung (Vergr. mindestens 100, d. h. für 1 mm Hg mindestens 10 cm Kuppenbildverschiebung) wäre die exakte Mitregistrierung der (ja manchmal viele mm Hg an einem Tage betragenden) langsamen Luftdruckänderungen auf dem aus praktischen Gründen doch höchstens 10—15 cm breiten Registrierstreifen nur möglich, wenn in Zeitintervallen von höchstens 1 Stunde — eventuell durch automatische Auslösung vom Uhrwerke aus — der Hahn *h* geöffnet, und dadurch die Flüssigkeitskuppe je wieder in die Nullstellung (Mitte des Streifens) zurückgebracht würde.

Bei Untersuchungen, welche nur möglichst genaue Registrierung speziell und ausschließlich von *kurzdauernden* Druckschwankungen erfordern, wie die Untersuchung lokaler Störungen, von Windwogen relativ kurzer Dauer oder vor allem der *barometrischen Unruhe*, ist die *Anbringung der Kapillaren C* zur Erzielung eines konstanten mittleren Kuppenstandes jedenfalls der eben angedeuteten komplizierten Vorrichtung vorzuziehen.

*Einfluß der Kapillaren C.* Bei dem äußeren Drucke  $b_0$  stehe der Flüssigkeitsfaden in seiner Nulllage (gleich hohe Kuppenlage), d. h. im Ballon herrsche gleichfalls der Druck  $b_0$  (in g/cm<sup>2</sup>).

Es ändere sich nun außen mit der Zeit  $t$  der Druck und zwar sei

$$(1) \quad b = b_0 + f(t).$$

---

1) Für den benutzten Apparat war (vgl. ersten Abschn.) der Faktor  $0,128 + 0,58 \cdot k$ , d. h. das zweite Glied desselben überwiegend. Für die bei meinen Registrierungen allein in Frage kommenden *kurzdauernden* und dabei kleinen Luftdruckschwankungen ist, wie schon eingangs angenommen,  $k$  sicher gleich 1,41 zu setzen; es konnten daher doch  $\alpha$  und  $V$  relativ klein gewählt werden, um die Unbequemlichkeit der mit großem  $\alpha$  verbundenen starken Schiefstellung des Uhrwerkes, sowie vor allem diejenige der Konstanthaltung der Temperatur für großen Ballon  $V$  zu umgehen.

Dann ist, wenn  $b_1$  den gleichfalls sich ändernden Druck im Ballon,  $dl$  wie in Gleichung (a) und (b) die zugehörige Kuppenverschiebung aus der Nulllage bezeichnet, auf der einen Seite des Ballons (links in Fig. 1) die Gleichgewichtsbedingung

$$(2) \quad \left\{ \begin{array}{l} b = b_1 + p_1, \\ \text{erfüllt, wo} \\ p_1 = 2 \sigma \sin \alpha \cdot dl \end{array} \right.$$

ist<sup>1)</sup>, während rechts die Druckdifferenz  $b - b_1$  Luft durch die Kapillare in den Ballon treibt.

Die Luft bewegt sich in der Kapillaren unter starker Reibung, die in der Zeit  $dt$  durchfließende Luftmenge  $dm$  ist also proportional der treibenden Kraft ( $b - b_1 = p_1$ ), und demnach gegeben durch

$$(3) \quad dm = u \cdot p_1 \cdot dt,$$

wo  $u$  eine *Konstante* bedeutet (abhängig von Länge und Querschnitt der Kapillaren).

Die während der Zeit Null bis  $t$  eingedrungene Luftmenge  $m$  zusammen mit der anfänglich im Ballon vorhandenen Menge  $M$  gibt den Innendruck  $b_1$ . Diese Menge  $M + m$  füllt aber bei einem angenommenen Kuppenstande  $dl$  zur Zeit  $t$  nicht  $V$ , sondern  $V - q \cdot dl$ , also ist

$$b_1 = b_0 \frac{M + m}{M} \cdot \left( 1 + k \frac{q}{V} dl \right),$$

worin  $k = 1,41$  für *adiabatische* oder  $k = 1,0$  für *isotherme* Kompression zu setzen ist.

Da  $M$  gleich  $V \cdot b_0 \cdot \lambda / 1033$  ist ( $\lambda$  spezifisches Gewicht der Luft bei 1033 g/cm<sup>2</sup> Druck und Beobachtungstemperatur), so ergibt sich unter Benutzung von (1) und (2) und Vernachlässigung eines Gliedes höherer Ordnung

$$p_1 \left( 1 + k \frac{q \cdot b_0}{V \cdot 2 \sigma \sin \alpha} \right) + \frac{1033}{V \cdot \lambda} \cdot m - f(t) = 0.$$

---

1) Da  $\alpha$  klein ist, so kann für  $\sin \alpha$  auch  $\alpha$  selbst gesetzt werden; ferner sei bemerkt, daß in den Formeln diejenige Verschiebungsrichtung des Flüssigkeitsfadens *positiv* gerechnet ist, welche durch eine Zunahme des äußeren Druckes veranlaßt wird, in Fig. 1 also eine Verschiebung von links nach rechts.

Differenziert man nach der Zeit und ersetzt  $dm/dt$  durch  $p_1 \cdot u$  nach Gleichung (3), so erhält man

$$(4) \quad \frac{dp_1}{dt} \left( 1 + k \frac{q}{V} \frac{b_0}{2\sigma\alpha} \right) + p_1 \frac{1033 \cdot u}{V \cdot \lambda} - \frac{d}{dt} f(t) = 0.$$

Die allgemeine Lösung dieser Gleichung ist, wenn man zur Abkürzung setzt

$$\gamma = \frac{1033 \cdot u \cdot 2\sigma\alpha}{\lambda (V \cdot 2\sigma\alpha + k \cdot q \cdot b_0)},$$

$$5) \quad (2\sigma\alpha \cdot dl =) p_1 = e^{-\gamma t} \left( c + \frac{V \cdot 2\sigma\alpha}{V \cdot 2\sigma\alpha + k \cdot q \cdot b_0} \int_0^t \frac{df(t)}{dt} \cdot e^{\gamma t} \cdot dt \right).$$

Hierdurch ist der Zusammenhang zwischen der Kuppenverschiebung  $dl$  und der Barometerstandsänderung  $f'(t)$  gegeben. Für geschlossene Kapillare, d. h. für  $\gamma=0$  geht Gleichung (5) in die einfache früher und eingangs angegebene (a) über, nur daß in letzterer die Luftdruckänderung nicht mit  $f(t)$ , sondern mit  $db$  bezeichnet wurde.

Unter den unendlich vielen möglichen Arten des Verlaufes des Luftdruckes, d. h. von  $f(t)$ , interessieren uns hier besonders zwei spezielle Fälle.

1. *Bestimmung von  $\gamma$ .* Angenommen der Luftdruck sei konstant  $\cong b_0$ , dann wird  $p_1 = c \cdot e^{-\gamma t}$ , d. h. ein zur Zeit  $t=0$  vorhandener Ausschlag  $dl=c$  verliert sich allmählich. Es sei zur Zeit  $t_1$  der Ausschlag  $dl_1$  und zur Zeit  $t_2$  der Ausschlag  $dl_2$  beobachtet, dann ist

$$\frac{dl_1}{dl_2} = e^{-\gamma(t_1 - t_2)},$$

also  $\gamma$  bestimmbar.<sup>1)</sup>

Die Registrierung des Abklingens einer *absichtlich* bei möglichst ruhigem Wetter, z. B. durch Einblasen von Luft durch die Kapillare erzeugten Überdruckes läßt also  $\gamma$  *leicht* feststellen.

---

1) Bemerkt sei, daß mit der Messung von  $\gamma$  auch ein Mittel gegeben ist, um  $u$  und somit auch Reibungskoeffizienten von Gasen zu bestimmen.

2. Periodische Luftdruckänderungen. Es sei speziell

$$f(t) = A \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T};$$

dann wird

$$p_1 = c \cdot e^{-\gamma t} + \frac{2\sigma V \sin \alpha}{2\sigma V \sin \alpha + k\eta b_0} \cdot A \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{\gamma^2 T^2 + 4\pi^2}} \cdot \sin \left\{ \frac{2\pi}{T} \cdot t + \arcsin \frac{\gamma T}{\sqrt{\gamma^2 T^2 + 4\pi^2}} \right\}.$$

Auf einem durch den Anfangszustand ( $t = 0$ ) gegebenen Verlauf  $c \cdot e^{-\gamma t}$  superponiert sich eine Sinusschwankung von ungeänderter (im Vergleich zum Falle mit geschlossener Kapillaren) Dauer, aber mit Phasenverschiebung und reduzierter Amplitude.<sup>1)</sup>

Jede beliebige periodische Druckänderung ist darstellbar durch eine Summe harmonischer Schwankungen mit abnehmender Periodendauer. Bei Anwendung einer Kapillaren werden die Amplituden der Summenglieder mit längerer Periode stärker geschwächt, als die der kurzen; in akustischer Ausdrucksweise gesprochen ändert die Kapillare also die Klang-

1) Nachstehende Tabelle gibt zu leichterer Orientierung die Werte des Reduktionsfaktors

$$\frac{2\pi}{\sqrt{\gamma^2 T^2 + 4\pi^2}}, \text{ d. h. von } \cos \arctg \frac{\gamma \cdot T}{2\pi}$$

für verschiedene Werte von  $\gamma$  und  $T$ .

Schwingungsdauer $T$ in Minuten	Amplitudenreduktion für die Werte der Kapillarkonstanten $\gamma$						
	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0
0,2	1,000	1,000	0,999	0,998	0,988	0,953	0,844
0,5	1,000	0,999	0,997	0,988	0,929	0,783	0,532
1,0	0,999	0,997	0,988	0,953	0,783	0,532	0,300
2,0	0,998	0,988	0,953	0,844	0,532	0,300	0,155
5,0	0,988	0,929	0,783	0,532	0,244	0,125	0,062
10,0	0,953	0,783	0,532	0,300	0,125	0,063	0,031
30,0	0,723	0,386	0,205	0,104	0,042	0,021	0,011
60,0	0,464	0,205	0,104	0,052	0,021	0,011	0,005

Eine Schwingung des äußeren Luftdruckes, z. B. von 60 Min. Dauer und einer Amplitude gleich 1, würde also aufgenommen mit einem Apparate, für den  $\gamma = 0,5$  ist, eine Sinuskurve von gleicher Periodendauer und der Amplitude 0,205 ergeben.

farbe, hohe Schwingungen erscheinen weniger geschwächt als tiefe.

Man wird natürlich zwecks möglichst unverzerrter Registrierung den Wert von  $\gamma$  tunlichst *klein* wählen. Beobachtungen mit Apparaten von oben angegebenen Größenverhältnissen haben unter Anwendung sehr verschieden weiter Kapillaren gezeigt, daß auch bei den unruhigsten Druckverhältnissen des verflossenen Winters das Kuppenbild nicht über den 10 cm breiten Registrierstreifen hinaus trat, wenn  $\gamma > 0,5$  gewählt wurde.

## II.

### Beobachtungen.

Nachstehende Tabelle gibt zunächst für die im nachfolgenden mitgeteilten Photogramme einige vielleicht erwünschte Daten:

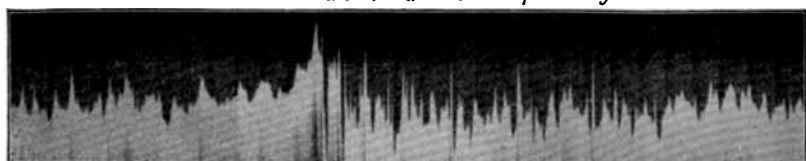
Nummer des Photogrammes	Datum der Registrierung	Laufgeschw. in cm/Stunde	Spaltbreite in mm	Konstante $\gamma$
1	17. IX. 1902	31,5	0,36	1,70
2	13. XI. 1902	10,5	0,08	0,604
3	17. XI. 1902	31,5	0,36	1,70
4	13. XII. 1902	31,5	0,08	0,604
5	27. XII. 1902	31,5	0,08	0,604
6	20. I. 1903	10,5	0,08	ca. 0,5
7 a u. 7 b	28. I. 1903	10,5	0,08	„ 0,5
8	16. II. 1903	10,5	0,08	„ 0,5
9 u. 10	21. II. 1903	10,5	0,08	1,68

In allen Photogrammen ist die Zeitordinate horizontal gelegt; die Photogrammteile links gehen denen rechts zeitlich voraus. Eine Vertikalverschiebung um 1 cm entspricht einer Luftdruckänderung von 1:13,3 mm Hg; *zunehmendem* Drucke entspricht eine Ordinaten*senkung* (die Photogramme stehen also bezüglich des Druckes sozusagen verkehrt).

Phot. 11 a u. 11 b sind auf das *Zweifache* (linear) *vergrößerte* Teile von Phot. 7 a u. 7 b, Phot. 1 ist auf 7:12 verkleinert.

*Lokale Störungen.* Stellt man einen Apparat der beschriebenen Art geschützt gegen direkte Stoß- und Saugwirkung

*a b c d e f g*



3<sup>h</sup> 28' p.

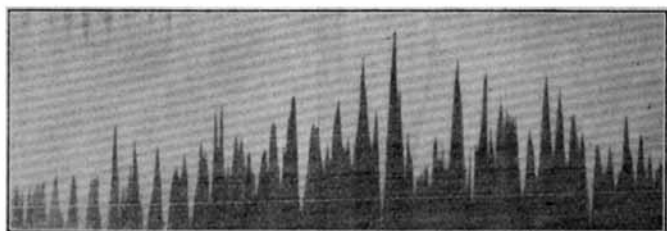
*a b c d e f g*

Phot. 1. 17. IX. 1902.



12<sup>h</sup> 42' p.

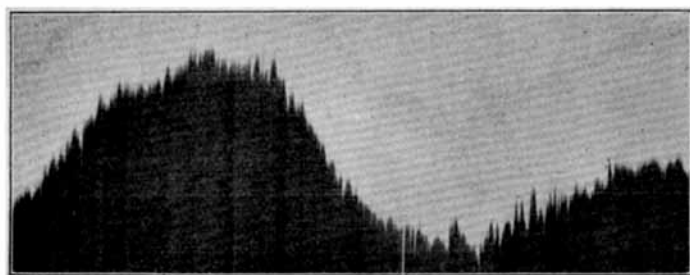
Phot. 4. 13. XII. 1902.



6<sup>h</sup> 2' p.

⊗

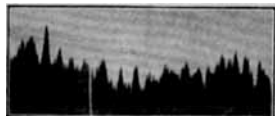
Phot. 5. 27. XII. 1902.



12<sup>h</sup> 39' p.

Phot. 6. 20. I. 1903.

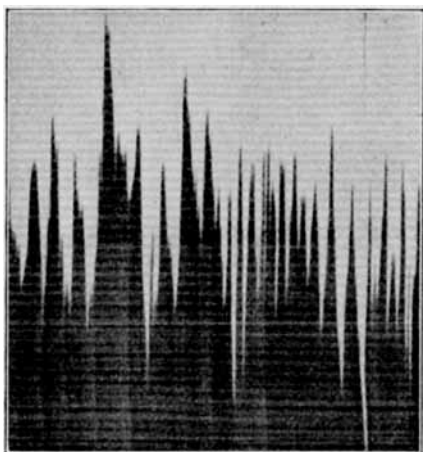
des Windes auf<sup>1)</sup>, so gibt das erhaltene Photogramm den Verlauf der Luftdruckschwankungen am Aufstellungsorte; Störungen lokalen Ursprunges in weiterem Sinne werden aber natürlich mitregistriert.



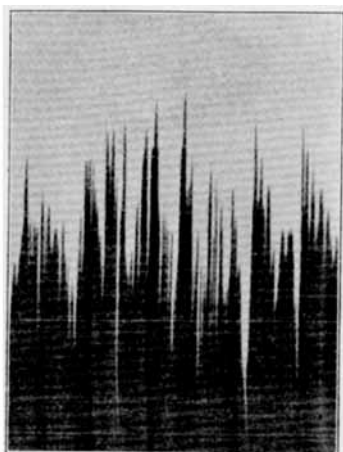
10<sup>h</sup> 38' a.

Phot. 8. 16. II. 1903.

Jedes Öffnen und Schließen von Türen im ganzen Gebäude ist bei sehr *ruhigem* Luftdrucke in den Diagrammen markiert. Die so entstehenden Marken sind durch ihre charakteristische Gestalt und kurze Dauer in den Photogrammen leicht zu erkennen und



Phot. 11a.



Phot. 11b.

sind (abgesehen von den durch Türöffnen des *Beobachtungszimmers* selbst veranlaßten) so klein (bis höchstens 2 mm ent-

1) Für das benutzte Beobachtungszimmer (an der Südfront des Hauptgebäudes der Techn. Hochschule) ließ sich ein wesentlicher Unterschied der Aufnahmen bei offenem oder geschlossenem Fenster *nicht* konstatieren; die Ventilations- und Heizschächte, sowie die Undichtigkeiten von zwei Fenstern und drei Türen vermittelten hinreichend rasch und ausgiebig den Druckausgleich nach außen.

Eine Aufstellung des Apparates völlig frei von lokalen Störungen dürfte nicht möglich sein. Der zweckmäßigste Aufstellungsort dürfte der Innenraum hoher, wenn möglich runder Türme sein, wo die lokalen Störungen durch die Turmwände für alle Windrichtungen die gleichen und direkte Stoßwirkungen auf den Apparat leicht auszuschließen sind.

sprechend  $\frac{1}{70}$  mm Hg), daß sie außer bei ganz ruhigem Barometerstande nicht stören.

Schwerer ihrem Wesen nach zu beurteilen sind die lokalen Störungen im weitesten Sinne, herrrührend von Stoß- und Saugerscheinungen an den Außenwänden oder dem Dache des Beobachtungsgebäudes etc.; hierüber können nur gleichzeitige Druckaufnahmen an verschiedenen Stellen des Gebäudes Aufschluß geben. Einige Versuche derart haben z. B. gezeigt, daß die in meinen Photogrammen bei windigem Wetter häufig auftretenden, dem allgemeinen Diagrammverlauf superponierten auffallenden Druckschwankungen mit immer nahe der gleichen kurzen Periodendauer von nur 8—10 Sek. und oft großer Intensität aller Wahrscheinlichkeit nach hervorgerufen werden von stehenden Schwankungen der Luft in dem an das Gebäude der Technischen Hochschule nach Süden angrenzenden, zwischen hohen Häusermauern eingeschlossenen großen parallelepipedischen Raume des Hochschulgartens (ähnlich den sogenannten „Seiches“ in Landseen). Phot. 11a und 11b zeigen vergrößerte Stücke der nur 10 Min. nacheinander erhaltenen Photogramme 7a und 7b; erst in letzterem (7b bez. 11b) sind, durch nicht festgestellte Ursache ausgelöst, „Seiches“ eingetreten (sichtbar in den dichtgedrängten schmalen Spitzen). Den Stoß- und Saugwirkungen am Gebäude verdanken offenbar die nur bei Windwetter auftretenden auffallenden nadelförmigen „Spitzen“, wie sie in Phot. 2 in großer Zahl zu sehen sind, ihren Ursprung.

*Luftdruckwogen.* Von besonderem Interesse sind unter der Fülle mannigfachster Formen, welche bei länger fortgesetzter Registrierung in den Diagrammen auftreten, diejenigen von *periodischem* Charakter.

Wind- oder Luftwogen werden wie bekannt *sichtbar*, wenn ihre Lage derart ist, daß in den Wogenbergen Kondensation eintritt. Schöne regelmäßige Systeme nahe äquidistanter Wolkenstreifen in höheren Luftschichten sind ja sehr oft zu sehen, besonders *vor* Wetterumschlag nach längerem schönen Wetter.

Als *Luftdruckschwankungen* können Luftwogen nur wahrnehmbar werden, wenn letztere (relativ zu ihrer Wellenlänge)

nahe dem Erdboden verlaufen<sup>1)</sup>; Variometerbeobachtungen *ergänzen* die Wolkenstudien.

Klare, durch Windstoß, Seiches etc. nicht getrübt *Wogenbarogramme* erhält man in der Tat, wenn auch selten<sup>2)</sup>, bei Windstille kurz vor Einsetzen windigen Wetters, oder auch kurz nach solchem.

Die registrierten Druckschwankungen geben immer die Superposition der Druckwirkungen von Vorgängen in den verschiedensten Höhen. Auf periodische Druckänderungen erscheinen oft unregelmäßige Störungen aufgelagert; hierbei können dann z. B. einzelne Wogen eines Wellenzuges sogar ganz zerstört erscheinen (vgl. die mit ⊗ markierte Stelle in Phot. 5), oder es tauchen nach kürzeren oder längeren Intervallen unregelmäßigster Druckschwankungen manchmal plötzlich wieder einzelne Wellen auf, welche offenbar noch zu dem nur scheinbar erloschenen Wellenzuge gehören (der mit  $\alpha\beta\gamma\dots\lambda$  bezeichnete Wellenzug in Phot. 3 erscheint derart mehrfach gestört).

Bei starkem Winde treten (außer den oben behandelten Seiches) meist, wie schon erwähnt, *exzessiv* hoch- oder tiefgehende, sehr *kurzdauernde*, daher in den Photogrammen „*nadelförmig*“ erscheinende Druckschwankungen (*Spitzen*) auf (vgl. Phot. 2). Den Grund zu ihrer Bildung habe ich noch nicht mit Sicherheit feststellen können<sup>3)</sup>; vermutlich ist es die lokale Stoß- oder Saugwirkung an der Gebäudefront, in welcher das Beobachtungszimmer liegt. Jedenfalls aber *markieren* diese Druckspitzen das Vorüberziehen *ganz bestimmter* Luftdruckverhältnisse über den Beobachtungsort, und können für sie

---

1) Vgl. H. v. Helmholtz, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin p. 772. 25. Juli 1889.

2) Insgesamt habe ich bisher während mehr als 350 Stunden die Luftdruckänderungen photographisch registriert. Druckwogen ähnlich denen in Phot. 8 und 4 treten *recht häufig* auf. Abgesehen hiervon und von den gleichfalls öfters zu beobachtenden Druckschwankungen nach Art von Phot. 6 umfassen die mitgeteilten Photogramme alle überhaupt innerhalb genannter Zeit registrierten Druckänderungen von ausgesprochen periodischem Charakter.

3) Dies wird erst möglich sein nach Fertigstellung einer Anzahl in Arbeit befindlicher, möglichst gleich gebauter Registrierinstrumente.

als *äußerst scharfe* Indikatoren angesehen werden. Treten die Spitzen in regelmäßigen Zeitabständen auf (wie in Phot. 2), so indizieren sie das Vorhandensein von Luftwogen.

Neigt die Wetterlage einmal zu Luftwogenbildung, so zeigen die Registrierungen, daß manchmal stundenlang Druckwogen *gruppenweise* auftreten. Haben die Gruppen nahe gleiche Periodendauer, so findet vermutlich die Wogenbildung immer erneut an der gleichen atmosphärischen Trennungsfläche statt.

Gruppen von Druckwogen sind zu bemerken in:

Phot. 2,	Gruppe <i>a</i> bis <i>h</i> ,	Periodendauer	2,76 Min.
„	<i>a' b'</i>	„	2,76 „
„	<i>A' B'</i>	„	4,08 „
„	<i>A</i> bis <i>D</i> ,	„	4,08 „
„	<i>α</i> „ <i>ε</i> ,	„	2,60 „
Phot. 3,	„ <i>α</i> „ <i>λ</i> ,	„	0,95 „
„	„ <i>α</i> „ <i>f</i> ,	„	1,9 „
Phot. 9,	„ <i>A</i> ,	„	1,56 „
Phot. 10	(vom gleichen Tage wie Phot. 9),		
	Gruppe <i>A</i> ,	Periodendauer	1,58 „
	„ <i>a</i> bis <i>d</i> ,	„	4,57 „
	„ <i>α</i> „ <i>δ</i> ,	„	4,4 „
	„ 1 „ 11,	„	4,3 „

Über die Möglichkeit, daß *derselbe* Wind doch Wellen nicht ganz gleicher Länge an der gleichen Trennungsfläche erzeugt, vgl. man H. v. Helmholtz, l. c. p. 777.

Es würde der Begriff von Luftwogung zu eng gefaßt sein, wenn man ihn allein auf das Auftreten einer Reihe *äquidistanter* möglichst *gleicher* Zustände beschränken wollte. Wegen ihres häufigeren Auftretens seien hier noch zwei Arten von nicht streng periodischen Druckänderungen wenigstens erwähnt, welche noch Luftwogung im weiteren Sinne repräsentieren. Phot. 6 zeigt die ersten dieser charakteristischen Typen — sozusagen eine *einzig*e Druckwoge. Einen weiteren öfters wiederkehrenden Wogungstypus zeigt Phot. 1: das Auftreten einer Reihe charakteristischer Druckzustände (hier Spitzen) mit regelmäßig *ab-* oder, wie in Phot. 1, *zunehmender* Zeitdifferenz (Periodendauer) und Intensität.

*Barometrische Unruhe.* Außer zur Untersuchung spezieller Drucktypen haben zusammenhängend fortlaufende Registrierungen kleinster Luftdruckschwankungen auch an und für sich Interesse. Die Differenz des größten und kleinsten innerhalb einer bestimmten Zeit (z. B. einer Minute) auftretenden Druckes kann man als „*barometrische Unruhe*“ bezeichnen. Sie bildet ein meines Wissens nach noch nicht untersuchtes meteorologisches Element, dessen Mittelwert, von Ort zu Ort verschieden und mit der Jahreszeit wechselnd, sicher neben dem mittleren Barometerstande der Feststellung und Untersuchung wert erscheint.

Zur Untersuchung der barometrischen Unruhe dürfte das Variometer (bei angenäherter Innehaltung der eingangs angegebenen Dimensionen) besonders geeignet sein. Hierzu trägt wesentlich folgende Tatsache, welche auch von allgemeinem Interesse ist, bei. Die in der Natur auftretenden extremen und mittleren Werte der Amplituden langdauernder Barometerschwankungen nehmen viel langsamer zu als die Schwingungszeiten; während z. B. eine Änderung des (mittleren) Barometerstandes bei allgemeinen Druckstörungen 1 mm in der Stunde, also  $\frac{1}{60}$  mm/Min. selten erreicht, sind solche von  $\frac{1}{5}$  mm/Min. für *kurze* Druckschwankungen nicht selten. Die *langsamen* — bei Anwendung von Kapillaren nicht mit registrierten — *Druckänderungen* tragen also *erfahrungsgemäß* zum *wahren Werte der Unruhe* nur *wenig* bei. Dementsprechend erhält man bei gleichzeitiger Registrierung am gleichen Orte mit Apparaten von recht *verschieden* weiten Kapillaren wesentlich verschiedene Werte für die Unruhe nur dann, wenn die Unruhowerte selbst sehr klein sind.<sup>1)</sup>

Allgemeine Schlüsse von meteorologischem Interesse, welche bei fortgesetzten Registrierungen in verschiedenster Hinsicht zu erwarten sind, lassen sich aus meinen Aufnahmen, welche — in bisher nur *sehr* lückenhafter Weise — erst wenige Monate umfassen (seit September 1902), noch nicht entnehmen.

---

1) Zum Nachweise diene nachfolgende Tabelle; zwei Apparate standen im gleichen Zimmer etwa 1 m voneinander entfernt, ihre  $\alpha$ ,  $\sigma$  und  $q$  waren bis auf Abweichungen von weniger als 1 Proz. die gleichen,  $v_1 = 166,2$  ccm und  $v_2 = 172$  ccm; dagegen war  $\gamma_1 = 0,60$ , während  $\gamma_2 = 1,70$  betrug. Angegeben sind die größten, kleinsten und mittleren Unruhowerte (in mm/Min. Bildverschiebung, 13,3 mm/Min. entsprechen

Einige Beobachtungsergebnisse spezieller Art seien jedoch immerhin schon nachstehend mitgeteilt.

Die Größe der Unruhe läuft nur in allerrohester Annäherung parallel mit der Windstärke.

Der *mittlere* Wert der Unruhe war im Winter *wesentlich* höher als vorigen Herbst und dieses Frühjahr.<sup>1)</sup> Der seit vorigem Herbst registrierte Extremwert der Unruhe betrug ca. 0,3 mm Hg in der Minute.<sup>2)</sup>

Der Wert der Unruhe ist oft stundenlang nahe der gleiche oder ändert sich nur sehr langsam. Rasche Schwankungen der

0,1 mm Hg-Druckänderung) für diejenige halbe Stunde, in deren Mitte die in Kolumne 2 vermerkte Zeit lag.

Datum	Zeit	Apparat mit $\gamma = 0,6$ Unruhwerte			Apparat mit $\gamma = 1,7$ Unruhwerte		
		Max.	Min.	Mittlere	Max.	Min.	Mittlere
14. XII. 1902	12 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup> Nachm.	6	2	2,88	6	2	2,96
	1 — „	7	2	3,68	6	1	3,00
15. XII. 1902	4 — „	8	3	5,10	9	3	5,22
	4 30 „	8	3	5,04	7	3	4,80
	5 45 „	9	3	5,64	10	4	5,72
	6 15 „	10	4	6,45	9	4	5,85
17. XII. 1902	12 15 „	31	12	19,20	32	12	18,44
	3 45 „	34	15	22,3	34	12	22,55
	4 15 „	—	—	—	35	6	18,08
	4 45 „	—	—	—	26	11	17,00
18. XII. 1902	11 45 Vorm.	5	1	2,32	4	1	1,88
19. XII. 1902	12 15 Nachm.	21	4	12,00	17	4	11,60
	12 45 „	18	4	7,76	14	4	7,08

Man sieht, die den beiden Apparaten entnommenen Unruhwerte stimmen befriedigend überein. Immerhin wird man aber bei den Aufnahmen möglichst enge Kapillaren vorziehen und mit  $\gamma$  jedenfalls nicht über zwei hinausgehen.

1) Dies dürfte eine allgemein gültige Regel sein; vgl. auch hierzu J. Hann, Meteorologie p. 202.

2) Größere Werte kommen sicher in seltenen Fällen auch im Binnenlande (Dresden) vor; so wurde am 16. X. 1895 bis 0,7 mm/Min. beobachtet; vgl. M. Toepler, l. c. Diagramm Nr. 8.

Unruhe sind für gewisse Wetterlagen, z. B. für Wirbelgewitter, charakteristisch. Interessantes ergibt auch die Verfolgung des Verlaufes der Unruhe beim Vorüberziehen eines Gewitters; meist ist derselbe ein auffallend gesetzmäßiger. In Fig. 2 zeigt die gestrichelte Kurve diesen Verlauf für das Gewitter vom 17. IX. 1902 (aus Phot. 1 entnommen), die strichpunktiierte

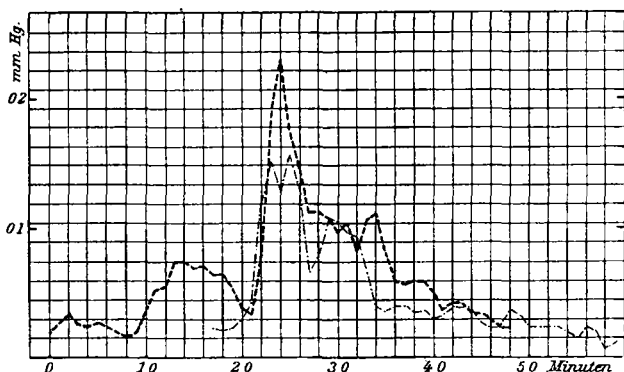
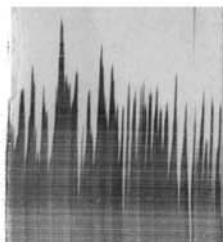


Fig. 2.

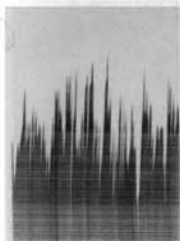
Kurve die Unruhawerte für ein Gewitter vom 20. VIII. 1902 4<sup>h</sup> Nachm.; nach plötzlichem Emporschnellen von geringen Werten sinkt die *Unruhe* in beiden Fällen dann allmählich in recht regelmäßiger Weise (nahezu nach dem Formeltypus  $c \cdot e^{-\alpha t}$ ) wieder auf den Ursprungswert zurück. Ganz ähnlichen Verlauf zeigen auch Unruhdiagramme für einige Gewitter dieses Frühjahres.

Dresden, Physik. Inst. d. Techn. Hochsch., 17. Juli 1903.

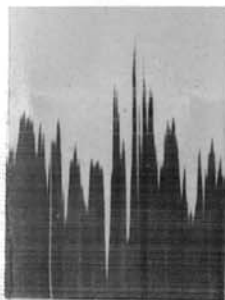
(Eingegangen 18. Juli 1903.)



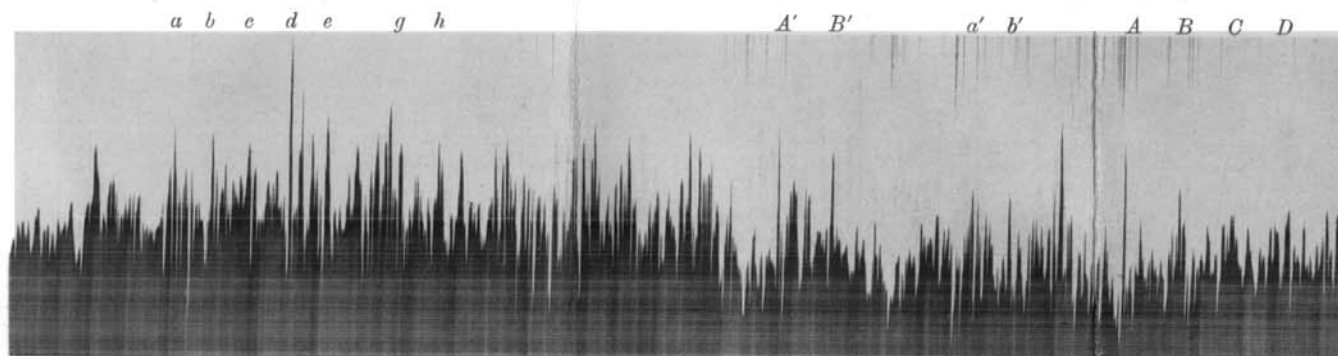
Phot. 7a. 28. I. 1903. 12<sup>h</sup> 45' p.



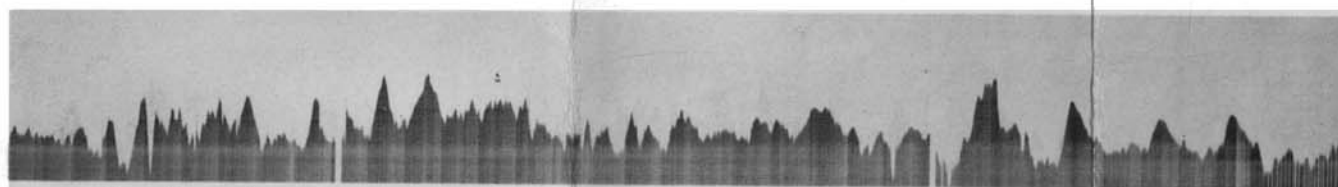
Phot. 7b. 28. I. 1903.



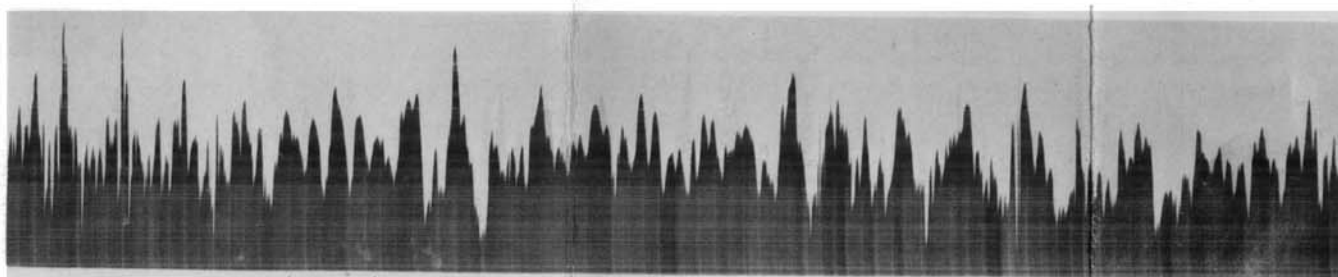
Phot. 9. 21. II. 1903.



Phot. 2. 13. XI. 1902.



Phot. 3. 17. XI. 1902.



Phot. 10. 21. II. 1903.

M. Toepler.