

Werk

Jahr: 1935

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:11

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0011

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0011

LOG Id: LOG_0062

LOG Titel: Nächtliche Austauschströmungen in der bodennahen Luftschicht, hergeleitet durch stereophotogrammetrisch vermessene Bahnen von Schwebeballonen

LOG Typ: article

Übergeordnetes Werk

Werk Id: PPN101433392X

PURL: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

OPAC: <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

Terms and Conditions

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

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

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

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

Contact

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

Nächtliche Austauschströmungen in der bodennahen Luftschicht, hergeleitet durch stereophoto- grammetrisch vermessene Bahnen von Schwebballonen

Von **Friedrich Wilhelm Nitze** — (Mit 11 Abbildungen und 7 Tafeln)

Es wird eine einfache Methode beschrieben, die Bahnen von beleuchteten Schwebballons nachts stereophotogrammetrisch zu vermessen. Die Vorteile der kontinuierlichen photographischen Aufzeichnung der Ballonbahnen bieten die Möglichkeit, alle Feinheiten der Luftbewegungen zu erfassen. Die Anwendung der Methode befaßt sich mit den Luftbewegungen bei geringstem Gradientwind in der bodennahen Schicht (bis etwa 20 m Höhe). Dabei wurden selbständige, durch die Bodenbeschaffenheit (z. B. Hang) und die Austauschvorgänge bedingte Luftbewegungen vermessen.

A. Beschreibung der Ballonvermessung

Photographische Wolkenmessungen hat R. Süring eingehend bearbeitet*). Die Anwendungen der photographischen Methode auf die *Flugbahnen* von *Segelflugzeugen* sind in den Veröffentlichungen der Rhön-Rossitten-Gesellschaft von P. Raethjen beschrieben**). A. Büdel***) vermißt *Rauchfahnen* photogrammetrisch und erhält daraus Aufschlüsse über die Austauschverhältnisse und Bewegung kleiner Luftmassen in den unteren Luftschichten.

I. Methode der Vermessung. Bei den genannten Arbeiten mußten fortlaufend einzelne Momentbilder vom beweglichen Objekt (Wolken, Flugzeug, Rauch) gemacht werden, wobei die Bewegung des Objektes um so genauer erfaßt wurde, je mehr Bilder in der Zeiteinheit hergestellt wurden. Vorliegende Arbeit zeigt erstmalig eine Arbeitsweise, die gestattet, die Bewegung eines Objektes vollkommen kontinuierlich mittels nur einer photographischen Aufnahme bzw. einem Aufnahme-paar zu bestimmen und die Strömungsformen der Luftmassen direkt abzubilden: Es wurden bei Dunkelheit beleuchtete Schwebballone mit zwei in bestimmtem Abstand aufgestellten Photoapparaten gleicher Brennweite und unter gleicher Aufnahmerichtung photographiert und stereophotogrammetrisch vermessen. Während der Zeitdauer einer Ballonbahn waren die Objektive der Photoapparate geöffnet, und die Bahn des fliegenden Ballons wurde auf beiden Photoplaten als Lichtspur abgebildet. Bei oberflächlicher Orientierung und Justierung der Aufnahmeapparate erhält man so ein Stereobild der Ballonbahn. In einer älteren Mitteilung des „Aeronautischen Observatoriums in Lindenberg“ wurde über eine solche Darstellung von Ballonbahnen von R. Becker kurz berichtet. Zur Auswertung der Stereobilder (bei der Lindenberger Arbeit ist diese nicht vorgenommen

*) Veröffentl. des Preiß. Meteorol. Inst. in Potsdam 1900—1920.

***) Siehe auch Beitr. z. Phys. der fr. Atm. 13, 148.

***) Beitr. z. Phys. d. fr. Atm. 1933.

worden) ist jedoch eine genaue innere und äußere Orientierung der Apparate erforderlich, und zwar ist bei der normalen Aufnahme in erster Linie darauf zu achten, daß die Objektivachsen horizontal und senkrecht zur Aufnahmebasis (Standlinie der beiden Apparate) verlaufen.

In gleichen Zeitabständen (wenige Sekunden) deckte eine Pappscheibe das Objektiv eines Apparates ab. Dadurch wurden kurze Unterbrechungen der Lichtspur auf einer Platte hervorgerufen, die als Zeitmarken dienten. Es genügt, diese Unterbrechung nur an einem Apparat vorzunehmen, da jeder beliebige Bahnpunkt auf der zweiten Platte im allgemeinen durch den Stereoeffekt festgestellt werden kann. Die Dauer des Abdeckens richtet sich nach der jeweiligen Windstärke.

II. Auswertung der Bilder. Die Formeln zur Berechnung der Bahnpunkt-Koordinaten ergeben sich aus den Fig. 1 und 2. Koordinatennullpunkt ist der vordere (optische) Hauptpunkt des Objektivs des linken Aufnahmeapparates. Durch je zwei in den Kameras befestigte Marken, die durch geeignete Beleuchtung als Schatten auf den Platten sichtbar gemacht wurden, ist bei beiden Aufnahmen

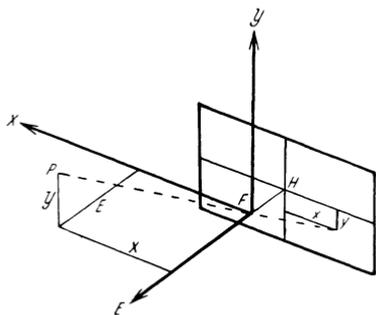


Fig. 1. Orientierung der linken Platte und Koordinatensystem

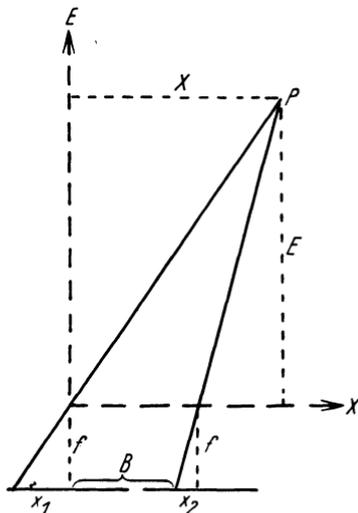


Fig. 2. Normale Stereoaufnahme (schematisch)

der Bildhauptpunkt (Schnitt der optischen Achse mit der Platte) festgelegt. Für die normalorientierte Aufnahme gilt für die Punktkoordinaten:

$$E = \frac{B \cdot f}{p}; \quad X = \frac{B \cdot x_1}{p}; \quad Y = \frac{B \cdot y_1}{p}.$$

E bedeutet die Horizontalprojektion der Entfernung des Bahnpunktes P von der Basislinie B ; X und Y sind die beiden anderen Koordinaten von P (X in Richtung der Basis, Y in Richtung der Vertikalen); x_1 und y_1 sind die entsprechenden Bildpunktkoordinaten auf der linken Platte, bezogen auf den Hauptpunkt als Koordinatenanfang, $p = x_1 - x_2$ die Horizontalparallaxe.

Die Bildpunktkoordinaten x_1 und y_1 und die Horizontalparallaxe p wurden mit einem Pulfrich-Stereokomparator bestimmt, der dem Geophysikalischen Institut in dankenswerter Weise vom Göttinger Mathematischen Institut zur Verfügung gestellt wurde.

III. Apparatur und Arbeitsweise. Nach dieser Methode wurden zunächst zwei verschiedene Gelände, auf denen später die Ballonvermessungen ausgeführt werden sollten, neu vermessen*). Es wurde dabei ein Zeiss-Phototheodolit benutzt. Der Apparat (9×12 , $1 : 6.3$, $f = 127$ mm), der ebenfalls vom Mathematischen Institut entliehen wurde, gestattet die Herstellung von ausmeßbaren Stereobildern mit nur einem Apparat. Er besitzt nämlich außer der eigentlichen Photoeinrichtung ein Fernrohr, dessen Achse parallel zur Photoplattenebene verläuft. Die Kamera mit dem Fernrohr zusammen sind drehbar um eine vertikale Achse; an einem horizontalen Teilkreis kann der Betrag der Drehung abgelesen werden. Die Vertikalachse ist durch eine Nabe mit vertikaler Spitze markiert, die sowohl allein als auch mit der übrigen Apparatur auf das Stativ aufgesetzt werden kann. Bei der Herstellung einer Stereoaufnahme wurde zunächst ein Bild auf einem der beiden Standpunkte gemacht, nachdem mit dem Fernrohr der zweite Standpunkt, der durch ein zweites Stativ mit aufgesetzter Spitze bereits festgelegt sein muß, anvisiert wurde. Die Objektivachse verläuft dann senkrecht zur Basis. Danach wird der Phototheodolit auf das zweite Stativ gesetzt, und es wird wie bei der ersten Aufnahme verfahren. Auf diese Weise erhält man die beiden Stereobilder nacheinander. Bei der Vertauschung des Standpunktes wird der Photoapparat lediglich von der Nabe abgehoben und auf die entsprechende am zweiten Standpunkt aufgesetzt. Die Naben selbst mit dem Dreifußgestell bleiben fest auf den Stativen, so daß keine unerwünschte Verschiebung der Standpunkte eintritt.

Zur Vermessung von beweglichen Objekten ist diese Methode natürlich unbrauchbar, denn beide Aufnahmen müssen gleichzeitig gemacht werden. Da der Phototheodolit nur in einem Exemplar vorhanden war, wurden für die nächtliche Vermessung der Ballonbahnen zwei alte Wolkenkameras gleicher Brennweite verwendet (9×12 , $1 : 7.7$, $f = 83.4$ mm). Diese ließen nur eine wesentlich ungenauere Justierung und gegenseitige Orientierung als bei dem Zeiss'schen Apparat zu. Die Einstellung der beiden Platten parallel zur Basis wurde dadurch annähernd erreicht, daß je zwei an den Apparaten befestigte Kreuzmarken, deren Verbindungslinie der Plattenebene parallel läuft, mittels eines Theodoliten in Richtung der Basis anvisiert und durch Drehung bzw. Verschieben der Apparate auf den Vertikalfaden des Theodoliten eingestellt wurden. Die vertikale Justierung der Platten wurde mit Hilfe einer anlegbaren Libelle erreicht. Ein Versuch, das Gelände bei den nächtlichen Ballonvermessungen mit abzubilden, führte leider nicht zum Ziel.

*) Hierbei wurden gelegentlich auch verschwenkte Aufnahmen verwendet. Im Prinzip unterscheidet sich dies nicht von der hier beschriebenen Methode. Im übrigen sei auf die photogrammetrische Literatur verwiesen.

Es ergab sich, daß das Gelände nur bei langer Belichtung erkennbar wurde, daß aber die Lichtspur des Ballons dann nicht mehr überall sichtbar war. Länger als $1\frac{1}{2}$ Stunden durfte im allgemeinen nicht belichtet werden, damit auch die Teile der Bahn vor dem Himmel noch auswertbar sein sollten. Diese Zeit aber reichte zur Abbildung des Geländes nicht aus. Es war deshalb folgende Hilfsmethode erforderlich: Bei den Geländeaufnahmen mit dem Zeiss-Phototheodolit wurden mehrere, besonders markierte Punkte im Gelände (deren Lage außerdem noch trigonometrisch bestimmt worden war) mit abgebildet. Nachts wurden diese Punkte durch Glühlampen sichtbar gemacht und mit den Ballonbahnen zusammen fotografiert. Mittels dieser „Paßpunkte“ konnte die Justierung der Wolkenkameras geprüft werden. Justierungsfehler wurden rechnerisch beseitigt. Bedingung dabei ist, daß mindestens drei dieser Festpunkte auf beiden Ballonplatten abgebildet sind, was auch leicht erreicht werden kann.

Die Schwebeballone hatten etwa 120 g freien Auftrieb (70 cm Durchmesser), und jeder trug eine 6-Volt-Stabbatterie mit einer 3.5-Volt-Birne. Bei einer maximalen Windbewegung von etwa 2 m/sec und dunklem Hintergrund war die Lichtspur auf der Platte noch bis zu 700 m Entfernung von der Kamera sichtbar. Die Empfindlichkeit der Platten betrug 29^0 Sch. Bei den Aufnahmen war die Entfernung der beiden Photoapparate $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{20}$ der mittleren Entfernung des Ballons von den Photoapparaten. Größere Werte des Verhältnisses vergrößern zwar die Genauigkeit bei der Berechnung der Koordinaten der einzelnen Bahnpunkte, erschweren jedoch andererseits die stereoskopische Identifizierung dieser Punkte im Auswertegerät. Im wesentlichen wurden Ballonbahnen von verhältnismäßig geringen Ausmaßen vermessen; die kleinsten betragen nur einige Meter, die größten etwa 500 m Länge bei Entfernungen von den Photoapparaten zwischen 40 und 700 m.

IV. Vor- und Nachteile der Methode. Der wesentliche Vorteil dieser Methode liegt in der kontinuierlichen, direkten Aufzeichnung der Ballonbahnen, was besonders für Vermessungen zeitlich und räumlich kleiner Strömungen geeignet ist. Zeitmarken können mit genügender Genauigkeit noch in Abständen von einer Sekunde angebracht werden. Außerdem können zu gleicher Zeit eine größere Anzahl von Pilotballonen gestartet und gemeinsam auf einem Plattenpaar abgebildet werden, ohne dabei einen Mehraufwand an Instrumenten — abgesehen von den Ballonen selbst — zu benötigen.

Der prinzipielle Nachteil dieser Methode, daß sie nur bei Dunkelheit angewandt werden kann, wirkte sich bei den hier untersuchten Erscheinungen der nächtlichen Austauschbewegungen natürlich nicht aus.

Betreffs der Fehlerquellen, die bei der Verwendung von Schwebeballonen bestehen, sei auf K. O. Lange²⁾ verwiesen. Die dort angegebenen Faktoren, die zu einer Auftriebsänderung der Ballone führen (Sonneneinstrahlung, Diffusion durch die Ballonwandung und adiabatische Temperaturänderung des Ballongases), spielten bei diesen Messungen keine Rolle.

V. Fehlerberechnung. Betrachtungen über die Genauigkeit der Geländeaufnahmen mit dem Zeiss-Phototheodolit können hier unterbleiben. Dieses Instrument ist ausreichend für geodätisch-photogrammetrische Vermessung. Die für den hier vorliegenden Zweck erforderliche Genauigkeit wird aber auf alle Fälle erreicht, und die photogrammetrisch gewonnenen Paßpunkte können als fehlerfrei angesehen werden. Gelegentliche trigonometrische Kontrollmessungen haben dies bestätigt.

Bei den nächtlichen Vermessungen der Ballonbahnen mußte jedoch wegen der unzureichenden Justiervorrichtung der verwendeten Aufnahmeapparate mit erheblichen Fehlern gerechnet werden. Wie bereits auf S. 249 erwähnt, machte bei der Orientierung und Justierung der beiden Apparate besonders das Einrichten der Platten in eine Ebene (Vertikalebene parallel zur Basis) Schwierigkeit. Es wird deshalb hier der „Konvergenzfehler“ von Bedeutung, der durch Konvergieren bzw. Divergieren der Objektivachsen in der Horizontalebene entsteht. Ein Konvergenzfehler beeinflusst die drei Punktkoordinaten; hier sei jedoch, wie auch bei den weiter unten angeführten Fehlern, nur der Einfluß auf die E -Koordinate (Entfernung) beschrieben:

$$E_{\text{korrigiert}} = E_{\text{berechnet}} + \Delta E,$$

wobei ΔE die durch den Fehler (hier Konvergenzfehler) bedingte Korrektur der Abstandskoordinate ist. Fig. 3 veranschaulicht die Wirkung eines Konvergenzfehlers $\Delta \varrho$:

$$\Delta E = \frac{X^2 + E^2}{B} \cdot \Delta \varrho \quad (E = E_{\text{berechnet}}).$$

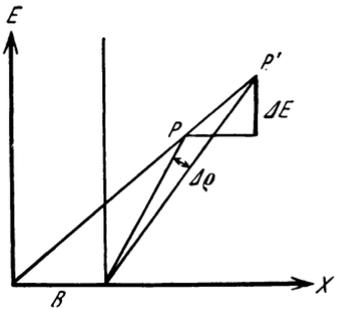


Fig. 3. Wirkung eines Konvergenzfehlers $\Delta \varrho$

Und zwar ist ΔE bei Konvergenz negativ, bei Divergenz positiv [vgl. (1)]. Ob in den einzelnen Fällen Konvergenz oder Divergenz der Aufnahmerichtungen vorlag, wurde graphisch an Hand der festen Kontrollpunkte bestimmt, wobei sich auch der Betrag des Fehlers abschätzen ließ. Im Mittel ergab sich ein Fehler von 1^0 (oder 0.017 im Bogenmaß). Für die Verhältnisse, wie sie hier vorlagen, bedeutet solch ein Fehler, z. B. für $X = 20$ m, $E = 100$ m und $B = 15$ m: $\Delta E = 12.1$ m, d. h. die Entfernungskoordinate E wird um rund 11% gefälscht. Man sieht, wie stark ein solcher Konvergenzfehler wirken kann, da ja die Entfernungskorrektur mit dem Quadrat des Abstandes des vermessenen Punktes vom Koordinatenanfang wächst. Werte für $\Delta \varrho$ von der angeführten Größenordnung liegen bei den verwendeten Apparaten durchaus im Bereich der Fehlermöglichkeit, und man ersieht hieraus, wie sehr die Forderung nach genauen justierbaren Apparaten berechtigt ist.

Aber auch durch ungenaue innere Orientierung der Apparate können erhebliche Fehler auftreten. So entsteht ein „Horizontalparallaxenfehler“ durch ungenaue Befestigung der Hauptpunktmarken im Apparat oder auch durch un-

genaues Zentrieren der Platten im Bildträger des Komparators. In beiden Fällen wird die Platte im Auswertegerät in ihrer Ebene aus der Soll-Lage verschoben, was eine Fälschung der Horizontalparallaxe der Bildpunkte zur Folge hat. Die Hauptpunktmarken (an die Platten anlegbare Zeiger) wurden auf ihre richtige Stellung hin geprüft. Der dabei festgestellte Fehler konnte bei der Auswertung der Platten berücksichtigt werden. Es bleibt daher nur noch die zweite Möglichkeit für einen Horizontalparallaxenfehler: das ungenaue Zentrieren der Platten. Wegen der mangelhaften Beschaffenheit (unscharfe und ungleiche Formen) der Hauptpunktmarken der verwendeten alten Photoapparate konnte bei der Festlegung des Koordinatennullpunktes sehr wohl ein Parallaxenfehler von $\Delta p = 0.5$ mm entstehen. Den Einfluß auf die Abstandskoordinate E zeigt folgende Formel, die man durch Differenzieren der Formel $E = B \cdot f/p$ (S. 248) erhält:

$$\Delta E = \frac{E^2}{B \cdot f} \cdot \Delta p.$$

Für die oben angegebenen Verhältnisse und eine Brennweite von $f = 80$ mm würde demnach ein $\Delta p = 0.5$ mm ein ΔE von 4.2 m, also einen Abstandsfehler von etwa 4% zur Folge haben. Der Horizontalparallaxenfehler, der bei der

Tabelle 1

Basis = 10.63 m. Nullpunkt: $y_0 = 108.5$; $x_0 = -96.4^*$; $p_0 = 40.79$. „Konvergenzfehler“: $+ \Delta \varrho = 35.1'$ (Divergenz!). „Parallaxenfehler“: $+ \Delta p = 0.70$ mm.

Bezeichnung der Punkte	y'_1	x'_1 *)	p'	y_1	x_1	p	Y'	X'	E'
A	115.8	- 105.0	32.96	7.3	- 8.6	7.83	9.91	11.7	114.1
B	115.4	- 89.1	32.78	6.9	+ 7.3	8.01	9.21	- 9.7	111.2
C	114.7	- 72.6	27.41	6.2	+ 23.8	13.38	4.95	- 19.0	66.0

Bezeichnung der Punkte	$Y_{\Delta \varrho}$	$X_{\Delta \varrho}$	$E_{\Delta \varrho}$	$Y_{\Delta \varrho, \Delta p}$	$X_{\Delta \varrho, \Delta p}$	$E_{\Delta \varrho, \Delta p}$	ΔE	$a_{\Delta \varrho, \Delta p}$	a	
A	11.1	13.0	126.4	12.2	14.3	139.0	18%	} 26.6	27.2	
B	10.1	- 10.7	122.7	11.1	- 11.8	134.5	17%		} 60.6	62.0
C	5.2	- 20.2	70.4	5.5	- 21.3	74.3	11%		} 73.9	75.5

- y'_1, x'_1, p' = Ablesung am Komparator.
- $y_1 \dots$ = Bildpunktkoordinaten in mm.
- $Y' \dots$ = Unkorrigierte Punktkoordinaten in m = \odot
- $Y_{\Delta \varrho} \dots$ = Nach $\Delta \varrho$ korrigierte Punktkoordinaten in m = Δ
- $Y_{\Delta \varrho, \Delta p} \dots$ = Nach $\Delta \varrho$ und Δp korrigierte Punktkoordinaten = \cdot
- ΔE = Fehler (Differenz) zwischen E' und $E_{\Delta \varrho, \Delta p}$.
- $a_{\Delta \varrho, \Delta p}$ = Abstand der korrigierten Punkte.
- a = Tatsächlicher Abstand der Punkte (trigonometrisch vermessen).

*) Da die positive Richtung der x -Achse am Komparator entgegengesetzt zur üblichen Richtung verläuft, erhalten die x -Ablesungen ein negatives Vorzeichen [also: $x_1 = x'_1 - x_0$, z. B. $- 8.6 = - 105.0 - (- 96.4)$].

stereoskopischen Einstellung der „Wandermarke“ des Komparators auf einen Bahnpunkt entstehen könnte, ist wesentlich kleiner, weil hier der zu bestimmende Punkt im allgemeinen deutlich und gleichartig auf beiden Platten erkennbar ist. Die Parallaxenfehler können hier unter 0.02 mm gehalten werden, so daß dadurch der Abstand E nur um maximal 0.2% gefälscht wird.

An weiteren Fehlern bei der Orientierung der Apparate sind zu nennen: der Bildweitenfehler, d. h. ungleiche Bildweite in beiden Apparaten (hier ist immer Bildweite = Brennweite); er verursacht einen Entfernungsfehler, der proportional der Abszisse und der Entfernung E des Punktes und umgekehrt proportional der Basis und der Brennweite ist. Weiter entsteht durch Verkanten der Apparate in der Vertikalebene der Verkantungsfehler; das entsprechende ΔE ist der Höhenkoordinate Y und der Entfernung E proportional¹⁾.

Die genannten Fehler sind in erster Linie für die Verzerrung des ausgewerteten Aufnahmebildes verantwortlich. Mit Hilfe der bekannten Kontrollpunkte wurde jedes Aufnahme paar auf diese Fehler hin untersucht, und es ergab sich, daß der Konvergenz- und der Horizontalparallaxenfehler die ausschlaggebende Rolle spielten. Bei der endgültigen Berechnung der Punktkoordinaten wurden daher nur zwei Korrekturen bezüglich dieser beiden Fehler angebracht. In allen Fällen konnte ein bestimmtes, eindeutiges Fehlerpaar ($\Delta \rho$, Δp) gefunden werden, das eine hinreichende Entzerrung des Kontrollpunktdreiecks und damit des ganzen Bildes lieferte. Auch der Fehler in der Höhenkoordinate Y wurde dadurch bis auf einen unbedeutenden Betrag beseitigt. Die so berechneten und korrigierten Abstandskoordinaten E waren dann noch mit einem Fehler von 0.5 bis 3% behaftet, was bei den beabsichtigten Luftströmungsuntersuchungen als ausreichend gelten konnte.

Die beschriebene Fehlerberechnung wäre überflüssig, wenn — wie auf S. 251 bereits erwähnt — ein ausschließliches Arbeiten mit zwei Exemplaren des Zeiss-Phototheodoliten möglich gewesen wäre. Die Punktkoordinaten ließen sich dann schnell und mit vollkommen ausreichender Genauigkeit mit Hilfe der einfachen Formeln auf S. 248 berechnen.

Vorstehende Tabelle 1 enthält ein Beispiel für die Berechnung von drei Kontrollpunkten einer Aufnahme. Die Lage der drei Kontrollpunkte zeigt Fig. 4. Man sieht, daß die Seiten des Kontrollpunktdreiecks bis auf einen Fehler von etwa 2% bestimmt wurden.

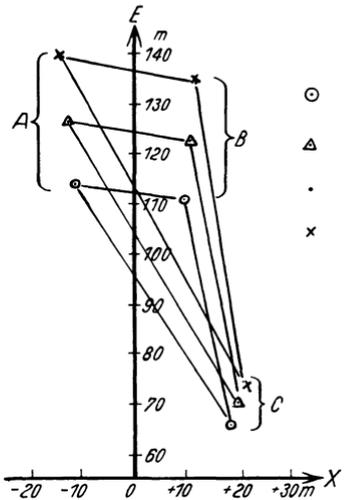
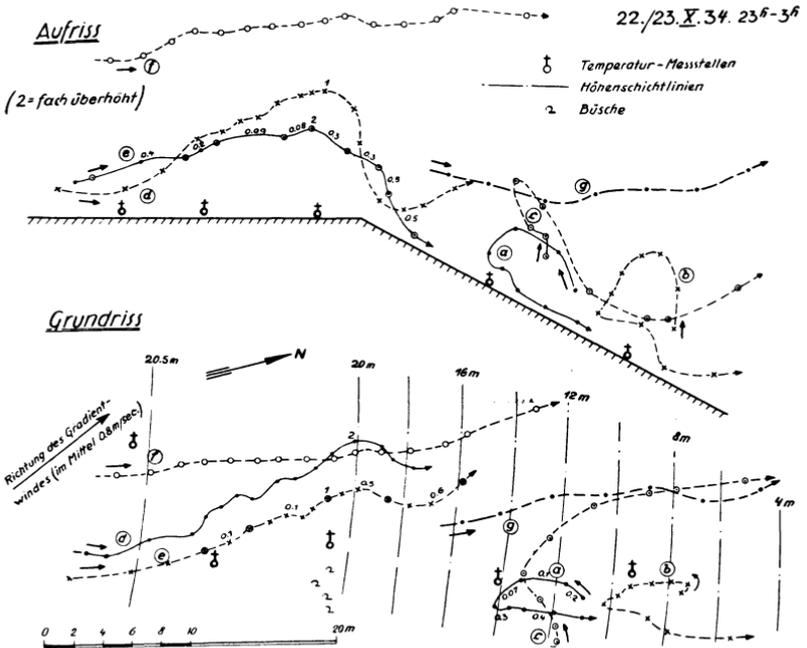


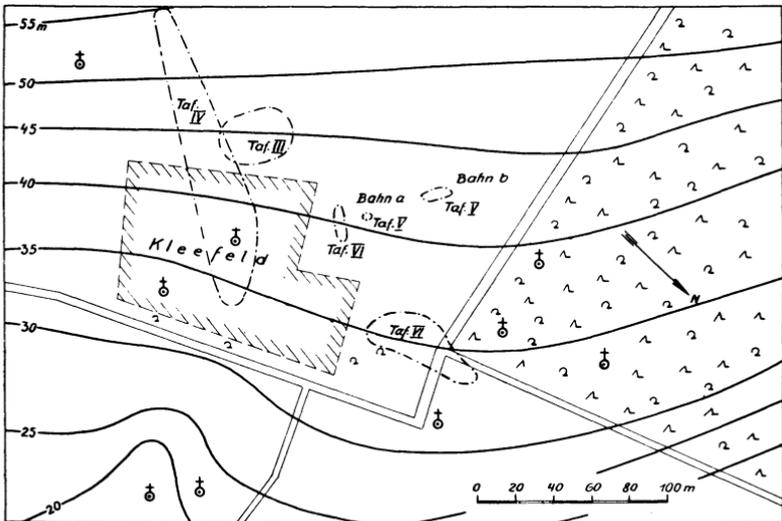
Fig. 4. Fehlerbestimmung durch drei Paßpunkte (\times = trigon. vermessene Punkte)

Tafel I



Mittlere Geschwindigkeiten für einzelne Bahnstücke (Projektionen) in m/sec

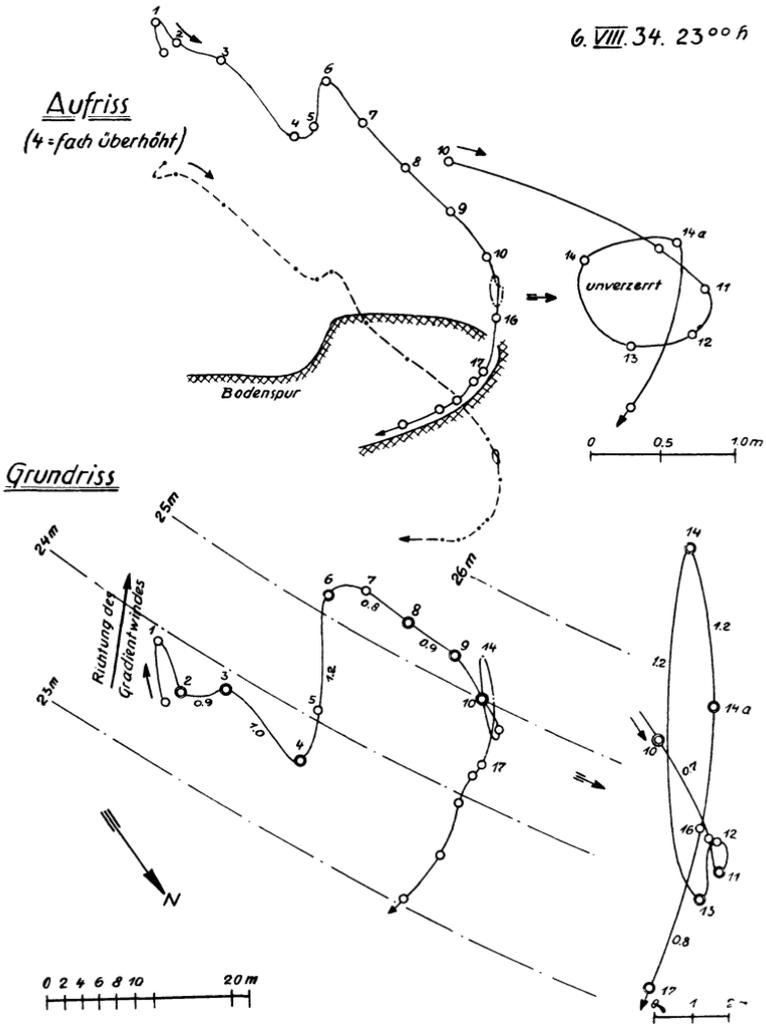
Tafel II



⊕. Temperatur-Messstellen, 2. Busch

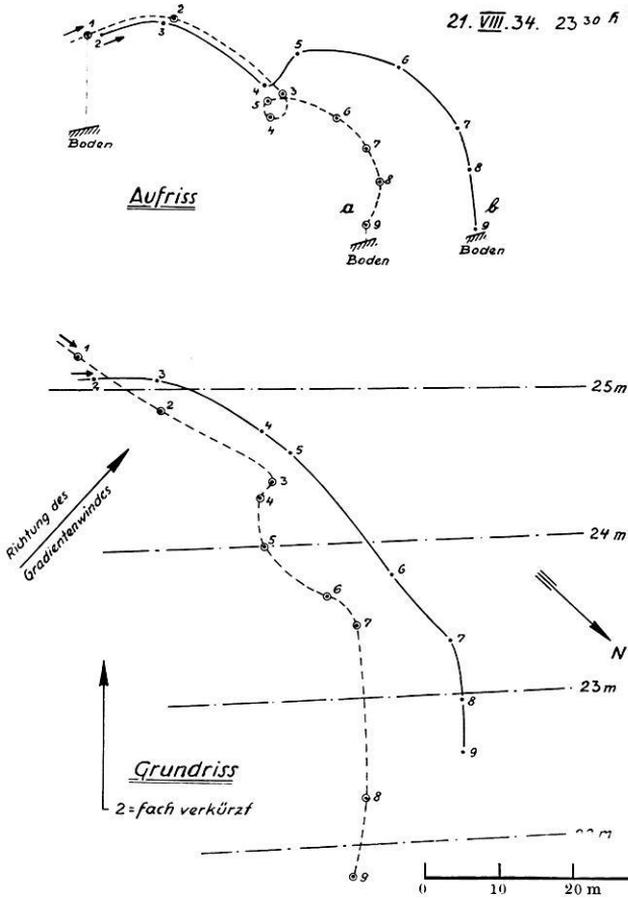
Tafel III

6. VIII. 34. 23⁰⁰ h



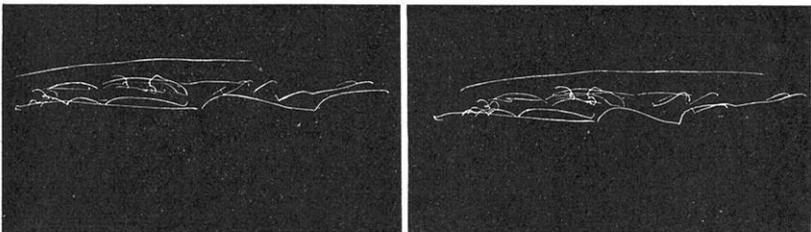
Die Geschwindigkeiten sind für einzelne Bahnstücke (Horizontalprojektionen) in m/sec angegeben

Tafel IV



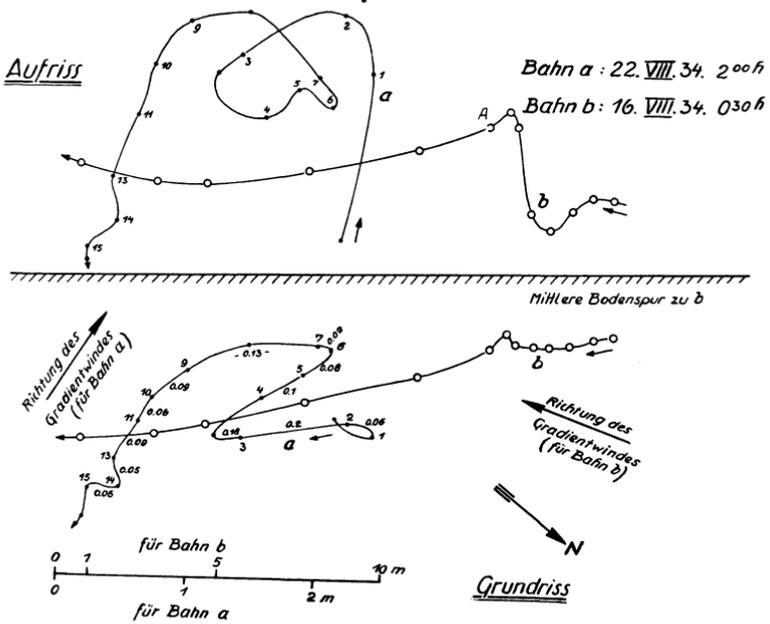
1, 2, 3, ... bezeichnen zeitlich zusammengehörige Punkte von *a* und *b*
Die Ballongeschwindigkeit schwankt zwischen 0.06—0.11 m/sec

Tafel VII



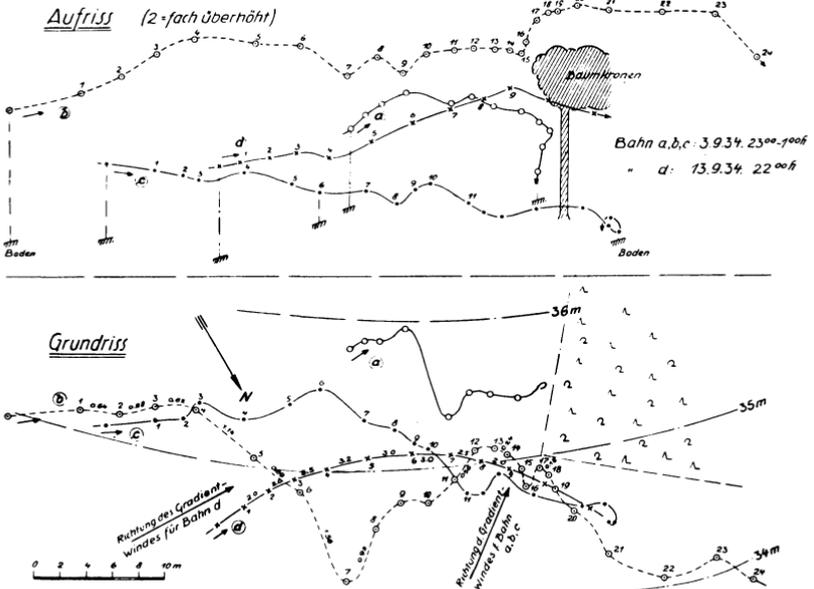
Stereoaufnahme einiger Ballonbahnen. Bei Betrachtung unter einem Stereoskop erhält man einen deutlichen *räumlichen* Eindruck von den Bahnen

Tafel V



1, 2, 3 ... = Zeitmarken (je 4 sec). Geschwindigkeiten in m/sec

Tafel VI



Zeitmarken für b und c : 5 sec. Zeitmarken für d : 1 sec. 1, 2, 3 ... = Zeitmarken

B. Ergebnisse

Allgemeines über die Messungen. Die beschriebene Methode ist besonders für die Erforschung feiner Luftströmungen auf kleinem Raum geeignet. Die Aufgabe dieser Arbeit ist die Vermessung der windschwachen nächtlichen Luftbewegung in der bodennahen Schicht. Es wurden insgesamt etwa 90 Ballonbahnen vermessen, wovon 68 auswertbar waren. Gleichzeitig wurden auch Temperaturmessungen der Luft bis zu 5 m Höhe und in zeitlichen Abständen von 1 und $\frac{1}{2}$ Minute mittels Quecksilberthermometer ausgeführt. Sie liefern ein anschauliches Bild der Temperaturverteilung in der unteren Luftschicht und bringen deutlich die Austauschvorgänge, die sich zum Teil auch in den Ballonbahnen zeigen, zum Ausdruck.

Sämtliche Vermessungen wurden in mehr oder weniger klaren Nächten mit geringem Gradientwind vorgenommen. Die Beobachtungsnächte waren: der 9./11., 10./11. V., 6./7. VIII, 15./16. VIII, 21./22. VIII, 3./4. IX., 13./14. IX, 28./29. IX.; 22./23. X. und 23./24. X. 1934.

1. Ergebnisse am Steilhang. — *a) Zirkulationsströmungen.* In diesem Abschnitt werden die charakteristischen Luftströmungen beschrieben, die die Vermessung von 30 Ballonbahnen an einem steilen Hang lieferte. (Das Gelände liegt nordwestlich der Straße „Geophysikalisches Institut—Knochenmühle“. Es ist trockenes und steiniges Weideland mit einem Gefälle von rund 1 : 3. Näheres darüber siehe in Tafel I.

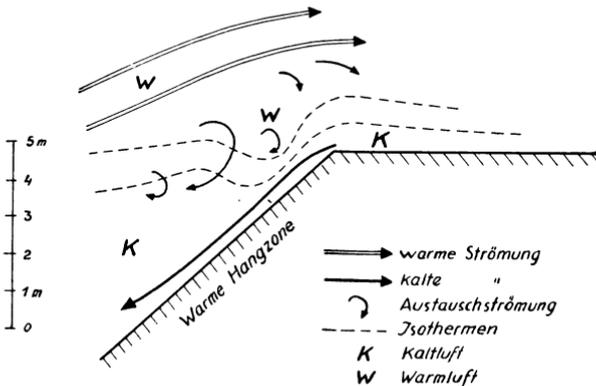


Fig. 5. Zirkulationssystem am Steilhang (nach Marvin)

Bei schwachem Gradientwind sind die bodennahen Luftströmungen in starkem Maße von Art und Form der Erdoberfläche abhängig³⁾, da dann die örtlichen Verschiedenheiten bestimmenden Einfluß gewinnen. In dem vorliegenden Fall des Steilhanges hat die nächtliche Abkühlung des Erdbodens und der anliegenden Luftschichten bekanntlich den bodennahen Kaltluftfluß zur Folge: Die unterste kalte Bodenluft höherer Geländeteile liegt in derselben Horizontalebene neben Luftmassen, die höher über der Erdoberfläche liegen und daher wärmer sind (eben

wegen des Bodengefalles). Dieser Dichteunterschied in horizontaler Richtung bewirkt den hangabwärts gerichteten Kaltluftfluß, der einen „Kältesee“ im Tal bildet, während die Hänge relativ warm bleiben, da hier die kalte Luft dauernd abfließt. Geiger konnte diesen Kaltluftfluß bereits über nur sehr schwach geneigtem Gelände beobachten. An einem steilen Hang muß naturgemäß diese Erscheinung besonders deutlich auftreten. Wie dieser hangabwärtsgerichtete Luftstrom im einzelnen beschaffen ist, zeigen die hier aufgenommenen Ballonbahnen. Fig. 5 ist die aus ihnen abgeleitete schematische Darstellung der Luftströmungen am Steilhang (s. Bahnen *a* und *b*, Tafel I).

Die räumliche Ausdehnung und der zeitliche Verlauf dieses Strömungsbildes sind in erster Linie von der Stärke des Gradientwindes abhängig. Dieser wurde den Anemometerregistrierungen des Geophysikalischen Instituts entnommen. Während der Beobachtungen betrug er maximal 3.0 m/sec (in 50 bis 60 m über der Beobachtungsstelle).

Gleich nach Sonnenuntergang stellte sich auf $\frac{3}{4}$ Hanghöhe die Zone der Zirkulationsströmungen ein. Diese blieben während einer ganzen Nacht im wesentlichen erhalten. Über dieser Zone liegt ein Gebiet gleichmäßiger Winddrehung, da sich hier mit zunehmender Höhe der Gradientwind gegenüber dem hangwärts fließenden Luftstrom immer mehr durchsetzt (s. Bahn *g*, Tafel I). Die Zirkulationen greifen bis zum Boden durch, was durch Augenbeobachtungen kleinerer Ballons festgestellt wurde. Die Zirkulationsströmungen stellten sich nur dann ein, wenn der Gradientwind unter einer bestimmten Stärke blieb. Bei Auffrischen des Windes auf etwa 1.5 m/sec in 1 m Höhe an der oberen Hangkante wurde die Zirkulationszone zerstört, und die obere Zone mit der gleichmäßigen Winddrehung reichte bis zum Boden (ähnlich wie Bahn *g*, Tafel I). Die Richtung des Gradientwindes war bei Windstärken unter 1.5 m/sec ohne wesentlichen Einfluß auf die Ausbildung der Zirkulationsströmungen.

Wenn für längere Zeit, etwa 60 Minuten, die Windstärke unter einem bestimmten Betrag (etwa 1 m/sec) blieb, konnte eine Periodizität bei der Ausbildung der Zirkulationsströmungen beobachtet werden. Diese bildeten sich nämlich in Abständen von rund 12 Minuten aus, um ununterbrochen 5 Minuten zu bestehen. In den Zwischenzeiten herrschten äußerst schwache Luftbewegungen ohne bevorzugte Richtung. Diese Erscheinung trat mit großer Genauigkeit auf, allerdings nur dann, wenn die allgemeine Windstärke (in 1 m Höhe an der Hangkante) unter 1 m/sec blieb, oberhalb derer bereits die Zerstörung des Zirkulationssystems einsetzt.

b) Die Temperaturmessungen. Für das Verständnis dieser Vorgänge sind Temperaturmessungen wesentlich. Es wurden an acht Stellen des Hangprofils Messungen zum Teil bis 3 m Höhe ausgeführt. Fig. 6 zeigt ein Bild der Temperaturverteilung längs des Hangprofils; es stellte sich kurz nach Sonnenuntergang ein und war charakteristisch für alle Beobachtungszeiten. Auffallend ist die Ausbuchtung der Isothermen nach unten in etwa $\frac{3}{4}$ Hanghöhe. In diesem Gebiet ist die Temperatur dauernd höher als darüber und darunter am Hang. (Im Mittel um 2.3°

höher als an der Hangkante.) Es ist dies die begünstigte „warme Hangzone“³⁾. Erst in etwa 200 m von der Hangkante hangaufwärts erreicht die Luft die Temperatur der warmen Hangzone (bei diesen Vergleichen beziehen sich die Temperaturangaben auf 0.1 m über dem Boden); aber auch in den anderen Schichten — bis 3 m beobachtet — treten dieselben Unterschiede auf.

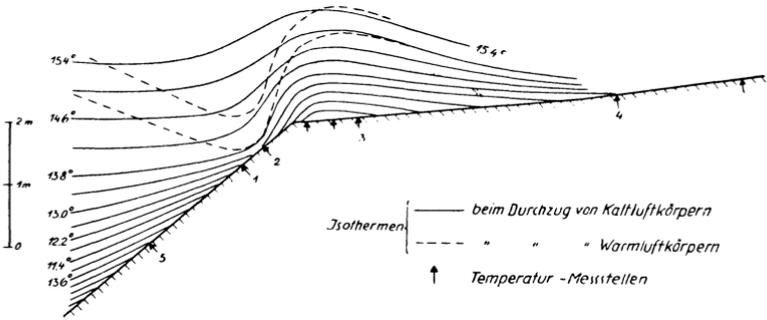


Fig. 6. Schematische Darstellung der Temperaturverteilung am Steilhang

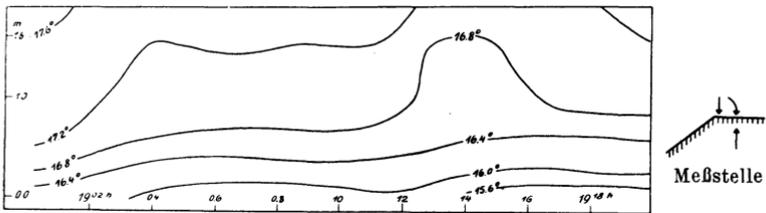


Fig. 7. Zeitlicher Temperaturverlauf auf dem Hangplateau des Steilhangs

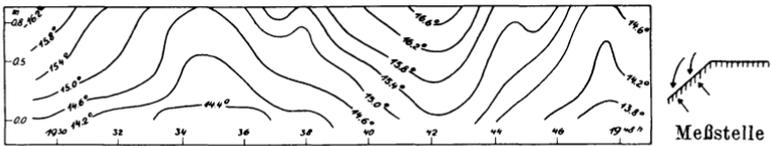


Fig. 8. Zeitlicher Temperaturverlauf am Steilhang

Dieses Gebiet der warmen Hangzone fällt mit dem der beschriebenen Zirkulationsströmungen zusammen. Weiter wurden an einigen Stellen des Steilhangs (\uparrow 1, 2, 3, 4, 5 der Fig. 6) Temperaturmessungen bis 3 m Höhe und in zeitlichen Abständen von $\frac{1}{2}$ und 1 Minute vorgenommen. Fig. 7 und 8 geben die zwei Typen des Temperaturganges wieder. Fig. 8 ist aus den Messungen im Gebiet der warmen Hangzone (\uparrow 1, 2, Fig. 6), Fig. 7 aus denen oberhalb und unterhalb der warmen Hangzone (\uparrow 3, 5, Fig. 6) hergeleitet. Im Gebiet der warmen Hangzone zeigt sich eine

verhältnismäßig große Temperaturunruhe im Gegensatz zu der gleichmäßigen Temperaturschichtung in den Gebieten darüber und darunter. Fig. 8 zeigt deutlich, wie warme und kalte Luftkörper abwechselnd am Thermometer vorbeifließen, und zwar ist auch hierbei wieder — wie bei den Beobachtungen der Zirkulationsströmungen — die Periode von 12 bis 15 Minuten festzustellen. Eine zusammenhängende Erklärung der oben beschriebenen Beobachtungen soll im nächsten Abschnitt folgen.

c) *Erklärung der Beobachtungen.* Erwartungsgemäß muß an einem Hang ein nächtlicher Kaltluftstrom hangabwärts bestehen. Marvin machte durch theoretische Betrachtungen verständlich, daß dieser Kaltluftstrom in einzelne Zirkulationen aufgelöst wird und nicht in einem gleichmäßigen Strömen der Kaltluft unter der Warmluft besteht⁴⁾. Tatsächlich konnte hier dieses Zirkulationssystem nachgewiesen werden. Fließt von einer Stelle unmittelbar über dem Hang Kaltluft hangabwärts, so muß aus Kontinuitätsgründen ein Nachschub von einem gleichgroßen Luftquantum aus der Umgebung erfolgen. Nicht nur die unterste Luftschicht ist an diesem Nachschub beteiligt, sondern selbstverständlich auch die oberen angrenzenden Schichten. Über diesem Kaltluftstrom fließt die Luft entsprechend dem Gradientwind, der im allgemeinen von der Richtung des Kaltluftflusses verschieden ist. In der Reibungszone dieser beiden Strömungen bilden sich die Zirkulationsbewegungen aus, die gleichsam den Transport der Luftmassen aus den höheren Schichten an die Stelle der abfließenden Kaltluft darstellen. Die Stärke der Zirkulationen wird davon abhängen, wie groß der Bewegungsunterschied zwischen den beiden Strömungen ist. Auf der Talsohle stagniert die Kaltluft und wächst im Laufe der Nacht in vertikaler Richtung an. Dieses Kaltluftkissen läuft flach auf dem Hang aus (s. Fig. 6). Im Bereich dieser stagnierenden Kaltluft sind daher Zirkulationsströmungen oberer Art nicht zu erwarten, sondern nur dort, wo die abfließende Kaltluft eine nennenswerte Geschwindigkeit besitzt. Erst oberhalb der ersten Hanghälfte konnten mittels kleiner Ballone schwache Zirkulationsströmungen beobachtet werden, und auf $\frac{3}{4}$ Hanghöhe ist die Erscheinung am ausgeprägtesten. Hier findet dauernd ein Ersatz der abfließenden Kaltluft durch warme Luft aus höheren Schichten statt. Als Folge dieses erhöhten Austausches zwischen den unteren und oberen Luftmassen bildet sich in diesem Gebiet die begünstigte warme Hangzone, die auch im Bild der Temperaturverteilung (Fig. 6) deutlich zum Ausdruck kommt. Weiter oberhalb am Hang, also etwa an der Hangkante, wird die Lufttemperatur deshalb wieder niedriger, weil hier die abfließende Kaltluft noch nicht die genügende Masse und Geschwindigkeit hat, wie weiter unten in der warmen Hangzone. Diese erhöhte dynamische Luftunruhe bewirkt naturgemäß einen erhöhten Massenaustausch zwischen den unteren kalten und oberen warmen Schichten. Infolgedessen wird in der warmen Hangzone das Anwachsen des inversen Temperaturgradienten im Laufe einer Nacht in starkem Maße unterbunden. So wächst z. B. in der Nacht zum 29. IX. 1934 der Gradient in der warmen Hangzone in der Zeit von 19.20 bis 0.20 Uhr im Mittel um 0.4°C (pro 1 m) an, während er in derselben Zeit im Gebiet der Kaltluft an der oberen

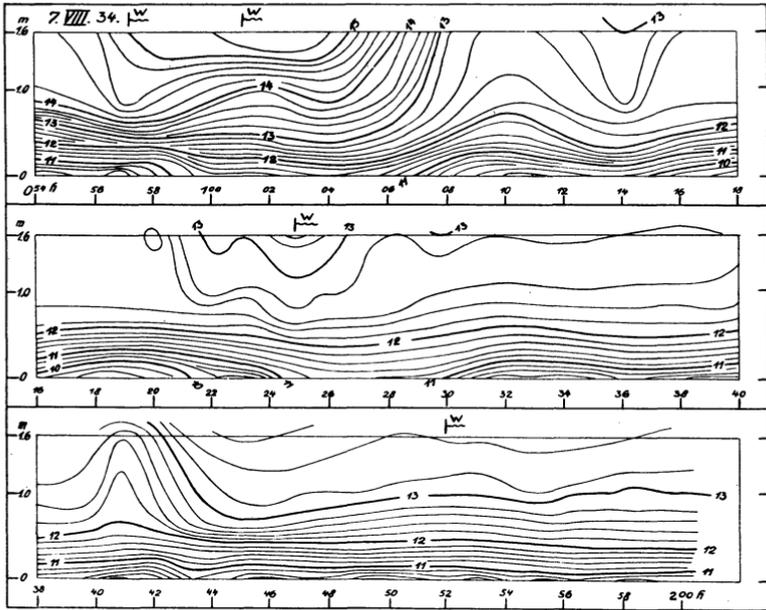
Hangkante um 2.1^0 zunimmt. (Wäre die Durchmischung der Luftmassen in der warmen Hangzone vollkommen, so müßte sich die vertikale Temperaturverteilung gemäß dem adiabatischen Temperaturgradienten einstellen.) Vor der Hangkante wird das Bodengefälle sehr gering (s. Tafel I), und deshalb stagnieren hier ebenfalls die Kaltluftmassen (vgl. den ruhigen Temperaturgang in Fig. 7). Begünstigt wird dies noch durch die Stauwirkung einzelner Büsche. Bahn *d* und *e*, Tafel I, zeigen den glatten und ruhigen Verlauf der Strömungen in dieser Kaltluft.

Die Beobachtungen ergaben, daß im Gebiete der warmen Hangzone die Ausbildung der Zirkulationen mit derselben Periode stattfand wie die der Temperaturunruhe. Es ist daher anzunehmen, daß immer dann ein Abrutschen einer Kaltluftmasse erfolgt, wenn ein bestimmter Wert der „Instabilität“ der Luftmassen am steilen Hang erreicht ist. (Die Instabilität wird dadurch hervorgerufen, daß die Kaltluft das Bestreben hat, ihrer Schwere folgend, hangabwärts zu fließen.) Das würde bedeuten, daß die Frequenz der Temperaturunruhe und der Zirkulationsströme proportional dem Grad der Abkühlung der unteren Luftschichten (oder der Ausstrahlung), die Amplitude jedoch unabhängig davon ist. F. Albrecht fand in einer Arbeit über ähnliche Vorgänge bei Tage das Umgekehrte⁵). Er zeigte nämlich, daß die Erwärmung der Luft in den unteren Schichten absatzweise geschieht, derart, daß nach einer gewissen Zeit eine erwärmte Luftmasse aufsteigt und durch noch nicht erwärmte Luft ersetzt wird. Die hierbei auftretende Frequenz in der Temperaturunruhe ist unabhängig von der Intensität der Strahlung, die Amplitude proportional der Intensität der Strahlung. Es ist also nicht so, daß immer dann eine Luftmasse aufsteigt, wenn nur der vertikale Temperaturgradient eine gewisse Größe überschreitet. Eine instabil geschichtete Luftmasse wird vielmehr nur durch einen äußeren „Initialimpuls“ zum Umstoß gebracht. Geiger weist auf diese Tatsache ebenfalls hin³). Solche Initialimpulse sind die Turbulenzelemente der bewegten Luft (Barkowsche Turbulenzelemente). In den Windregistrierungen der Albrechtschen Arbeit stimmt die Frequenz der Windunruhe mit der der Temperaturunruhe überein, ein Beweis dafür, daß tatsächlich ein Umsturz der Luftmassen von der Windunruhe gesteuert wird. Bei den hier beobachteten nächtlichen Vorgängen ist kaum anzunehmen, daß die Temperaturunruhe durch Turbulenzkörper im obigen Sinne bedingt ist. Denn gerade in den Zeiten größter Windruhe trat die Periodizität am deutlichsten auf. Es ist also demnach anzunehmen, daß hier die Frequenz der Temperaturunruhe von der Intensität der Strahlung abhängt, und daß die dabei auftretende Amplitude unabhängig davon ist. Anknüpfend an die Albrechtschen Beobachtungen würde das also bedeuten, daß hier ein Umsturz der Luftmassen bzw. ein Abrutschen eines Luftkörpers am Hang ohne Hilfe eines Initialimpulses eintritt. Vielmehr wird die Periode dadurch hervorgerufen, daß immer dann ein Kaltluftkörper abrutscht, wenn er eine genügende Mächtigkeit und Abkühlung erreicht hat. Diese Periode hängt nur von der Intensität der Ausstrahlung und der Eigenart des Hanges ab.

II. Ergebnisse am flachen Hang. — Strömungs- und Temperaturbeobachtungen.

Die folgenden Vermessungen und Beobachtungen wurden am NE-Hang des Warteberges ausgeführt. Das Gelände ist in Tafel II abgebildet. Es hat ein mittleres Gefälle von 1 : 12 bis 1 : 16. Die Temperaturmessungen wurden an den bezeichneten Stellen vorgenommen. Weitere Einzelheiten gehen aus der Tafel hervor.

1. Der Hangwind. Auch am flachen Hang wurde in der untersten Schicht das Abwärtsfließen der Kaltluft beobachtet. Hier zeigte sich aber im besonderen Maße der Einfluß des Oberwindes. In fast allen Nächten herrschte ein Gradientwind



Im allgemeinen bleibt die Windstärke (in 2 m Höhe) unter 1.5 m/sec
Mittl. Grad. 2.6° pro 0.8 m. W = Auffrischen des Windes um etwa 1 m/sec

Fig. 9. Zeitlicher Temperaturverlauf am flachen Hang

mit einer mehr oder weniger starken Komponente hangaufwärts. Blieb der Oberwind (in 2 m Höhe) unter 1 m/sec, so zeigten fast alle Ballonbahnen den talwärts gerichteten Luftstrom, der im allgemeinen bis zu einer Höhe von 1 m über dem Erdboden vorhanden war. Tafel III zeigt im letzten Stück der Ballonbahn ein Beispiel für diese Hangströmung. Mit wachsendem Abstand vom Erdboden dreht die Richtung der Strömung in die des Gradient-(Ober-)windes ein. Ein Beispiel dafür zeigte bereits Bahn g, Tafel I; aber auch die Bahn der Tafel III zeigt diese Erscheinung sehr deutlich. (Beachte den ähnlichen Verlauf von Grund und Aufriß!) Es treten dabei oft große Unterschiede in Geschwindigkeit und Richtung der Luftbewegung auf: Am Boden herrscht der von der Oberströmung wenig beein-

flußte Hangwind, und bereits 9 m darüber ist mit guter Annäherung der Oberwind, der in vielen Fällen bis zu 180° davon verschieden ist, vorhanden. Die Ursache für solche großen Unterschiede in der Strömung liegt in der stabilen Schichtung der Luftmassen: Am Boden der hangabwärts fließende Kaltluftstrom, darüber der Gradientwind, dazwischen eine Übergangsschicht mit Ansatz zur Wirbelbildung (Tafel V und VI). Diese Zone der Wirbelbildung tritt bei Auffrischen des Windes bis auf 2 m/sec in 2 m Höhe besonders deutlich hervor. Die Bahn der Tafel III zeigt dies in sehr ausgeprägter Form. Die Zunahme des Gradientwindes bewirkt nämlich erhöhten dynamischen Austausch, der bis zu einer bestimmten Höhe über dem Boden durchgreift. Es tritt oberhalb dieser Höhe daher eine verstärkte Durchmischung der Luft ein, was eine Abschwächung des stabilen Temperaturgradienten bedeutet. Die Bodenströmung bleibt in Richtung und Geschwindigkeit erhalten, und es bildet sich an ihrer oberen Grenze eine Zone mit erhöhter virtueller Reibung aus; es treten in dieser Zone Wirbelströmungen auf, die langgestreckte Formen zeigen. Gleichzeitige Temperaturmessungen zeigen deutlich diese Wirkung des Windes. Fig. 9 zeigt, wie in den Zeiten einer Zunahme des Windes in 2 m Höhe die Temperatur in allen Schichten bis etwa 0.7 m über dem Boden zunimmt, was auf erhöhtem dynamischen Austausch mit den oberen wärmeren Schichten beruht. Je näher eine Luftschicht dem Erdboden ist, um so weniger wird sie von diesem Durchgreifen des Gradientwindes erfahren. Erst bei wesentlich größeren Windstärken (etwa von 4 m/sec ab) setzt sich der dynamische Austausch bis in unmittelbare Bodennähe durch.

Absinken von Kaltlufttropfen. — Beobachtungen. Auf Grund einer verhältnismäßig großen Anzahl von Ballonvermessungen konnte eine gewisse Luftunruhe [Rückkehrkonvektion nach Schmauss⁹⁾] festgestellt werden, die nur bei der allergeringsten Luftbewegung oder nach Zeiten mit ausgesprochener Windstille auftrat. Die betreffenden Ballone führten zum Teil sehr verschlungene Bahnen aus, zum Teil zeigten sie auch regelrechte Zirkulationsbewegungen (Beispiele: Bahn a, Tafel IV und Tafel V). Diese ungeordnete Luftbewegung konnte in allen hier betrachteten Höhen beobachtet werden. Irgendein Einfluß des Geländes wurde nicht gefunden. Die Hauptbedingung für ihr Zustandekommen war lediglich, wie bereits erwähnt, eine äußerst geringe allgemeine Luftbewegung. Der Lebenslauf solcher „Zirkulationen“ soll kurz beschrieben werden: Zunächst führt der Ballon eine langsame glatte Bewegung, entsprechend der geringen Windstärke aus. Plötzlich beginnt die verschlungene Bahn, wobei die Geschwindigkeit des Ballons durchweg größer wird. Nach einigen Sekunden bis 2 Minuten tritt der anfängliche quasilaminare Strömungszustand wieder ein. Wesentlich ist bei diesem Vorgang, daß in der Nachbarschaft (etwa ab 10 m) dauernd die laminare Strömung herrschte und nichts von einer ungeordneten Luftbewegung zu merken war. Man hatte bei dem Vorgang den Eindruck eines in den allgemeinen laminaren Strömungszustand eindringenden selbständigen Bewegungssystems. Die bodennahen Teile der Zirkulationsbahnen zeigen meist eine hangabwärts gerichtete Bewegungskomponente. Die Ausmaße der fast geschlossenen Formen betragen 0.5 bis 5 m.

Erklärung. Der dynamische Austausch ist bei Nacht in Bodennähe sehr gering; er genügt deshalb nicht, um die Abkühlung von der untersten Bodenschicht in höhere Schichten zu übertragen. Temperaturmessungen von W. Schmidt⁶⁾ ergaben, daß nachts ein Austausch von derselben Größenordnung wie bei Tage wirksam ist, obwohl die Austauschwirkung des Windes nachts geringer ist. Besonders in windstillen Nächten wäre ein sehr kleiner Austausch zu erwarten, wenn man definitionsgemäß⁶⁾ unter Austausch die Mischung der Luftteile in allen Richtungen versteht, wobei alle Eigenschaften der verschiedenen Luftteile in gleichem Maße vermischt werden sollen. Nun folgt jedoch aus den beschriebenen „Gleitvorgängen“ mit der großen vertikalen Änderung der Geschwindigkeit und Richtung der Luftbewegung, daß in vertikaler Richtung eine wesentlich geringere Mischung der Luft wirksam ist als bei Tage, wo solche großen Eigenschaftsunterschiede nicht auftreten. Das bedeutet, daß der aus der Geschwindigkeitsverteilung abgeleitete Austauschkoeffizient bei Nacht wesentlich geringer sein muß als bei Tage. Die Berechnung des Austauschkoeffizienten aus den Temperaturverhältnissen muß daher als unzulässig betrachtet werden, wenn es sich um windschwache Nächte handelt. D. h. aber, daß an dem nächtlichen Wärme- bzw. Kältetransport in vertikaler Richtung außer dem dynamischen und thermischen Austausch noch ein weiterer Vorgang merklich beteiligt ist. Das kann nur die Abkühlung der Luft durch Ausstrahlung sein. Unter der Annahme, daß die in der Luft enthaltenen Staubteilchen durch ihre stärkere Ausstrahlung die Abkühlung der Luft hervorrufen, kommt Defant⁷⁾ rechnerisch zu dem Ergebnis, daß die nächtliche Abkühlung auch in den höheren Luftschichten durch diesen Vorgang erklärt werden kann. Falkenberg und Stoecker⁸⁾ führten als weitere die Ausstrahlung bestimmende Faktoren den Gehalt der Luft an Wasserdampf und Kohlenoxyd an.

Dichteunterschiede in der Verteilung der „Staubteilchen“ (einschließlich H_2O -Dampf und CO_2) führen nämlich zu einer verschiedenen Abkühlung in horizontaler Richtung und damit zu einer Bewegung der Luft. Man kann diese Bewegung als thermisch bedingten Austausch auffassen, da hier eine hochgelegene Kältequelle vorhanden ist. Es kann eine Luftmasse infolge großen „Staubgehaltes“ durch die Ausstrahlung kälter werden als die darunter befindliche Luft. Die Folge ist, daß sich solch ein Kaltluftkörper nach unten hin in Bewegung setzt. Bei allgemeiner Windstille wird diese Bewegung durch das Fehlen des dynamischen Austausches begünstigt (s. auch Abschnitt 2). Einzelne Ballonbahnen zeigen auch deutlich das Absinken von Luftmassen in spiralenförmig gegen den Boden verlaufenden Bahnen.

Ergänzende Temperaturbeobachtungen. Eine Bestätigung obiger Vorstellung von den ungeordneten Strömungsvorgängen gaben auch einige Temperaturmessungen. Fig. 10 zeigt das Ergebnis einer solchen Messung in Isoplethendarstellung. Der Wind war während der Messung äußerst schwach (unter 0.2 m/sec). Etwa um 24 Uhr tritt sehr plötzlich starke Abkühlung, besonders in der höheren Schicht, auf. Diese Temperaturerniedrigung kann nur durch Absinken eines „Kaltlufttropfens“ erfolgt sein. Von unten her kann eine Kaltluftmasse wohl kaum

emporgehoben werden, da hierzu die dynamische Energie des Windes zu klein ist. Beachtenswert ist der zeitliche Verlauf des Vorganges: Das Absinken von oben macht sich plötzlich bemerkbar, dauert etwa 2 Minuten und hört plötzlich auf. Die Bewegungen der Ballone machen auch den entsprechenden Eindruck (s. S. 264); wie am Mittag vornehmlich „Aufwindkamine“ auftreten, so haben wir hier „Abwindkamine“. Gelangt der Ballon in einen solchen, so wird er ruckweise hinabgerissen, wobei am Rande auch oft Wirbelbewegungen auftreten. Daß die Abkühlung nicht auf advektiver Heranführung von Kaltluftmassen beruht, beweist wieder die Tatsache, daß die Temperaturmessungen in der Umgebung keine Abkühlung ergaben. Bei besonders intensiven Vorgängen dieser Art konnte eine merkliche Auffrischung des Windes festgestellt werden. Hier war also Windzunahme mit Abkühlung verbunden, und nicht wie in den früheren Fällen mit Erwärmung (infolge des erhöhten Austausches mit den oberen warmen Schichten) verbunden.

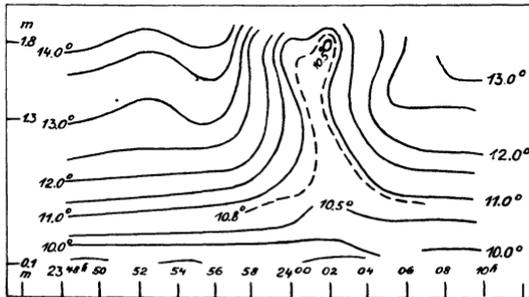


Fig. 10. Absinken von Kaltlufttropfen in Thermoisoplethendarstellung

4. *Einfluß eines Waldes auf die windschwachen Strömungen.* Ein spezieller Fall der Erdbodenverschiedenheiten in ihrem Einfluß auf die nächtlichen bodennahen Strömungen wird im folgenden behandelt, und zwar handelt es sich um Strömungen im Grenzgebiet Wald/freies Feld. Für eine restlose Klärung der Verhältnisse reichen jedoch die Beobachtungen nicht aus. Der etwa 7 m hohe Mischwald liegt am Anfang des bereits bekannten flachen Hangs (s. Tafel II). Die Ballonbahnen zeigen bei ihren Bewegungen in der Nähe des Waldes an bestimmten Stellen gleiche Tendenz, an anderen dagegen erhebliche Unterschiede. So tritt z. B. bei einer Luftbewegung auf den Wald zu (in Streichrichtung des Hanges) in etwa 10 bis 20 m Entfernung von ihm bei fast allen Ballonbahnen Vertikalbewegung nach oben auf, die sich meist in unmittelbarer Nähe des Waldes in eine nach unten bis zum Boden gerichtete umkehrt (s. Tafel VII, Bahn a). Diese besonderen Bewegungen traten vornehmlich bei geringster Luftbewegung auf. Zur Klärung ist wieder die Kenntnis der Temperaturverteilung in dem Grenzgebiet Wald/freies Feld erforderlich. Im Kronenraum des Waldes befindet sich relativ kalte Luft, die durch Ausstrahlung der Baumkronen gebildet wird³⁾; bei einem Waldgebiet stellt nämlich der Kronenraum den Hauptsitz der nächtlichen Ausstrahlung dar. Ein Teil der

Kaltluft des Kronenraumes wird von dem darüber wegstreichenden Wind (im allgemeinen Gradientwind) infolge des dynamischen Austausches aufgenommen. Der andere Teil, der um so größer ist, je schwächer der Gradientwind ist, sinkt in den Bestand hinab und bildet am Boden ein Kaltluftkissen. In der vertikalen Temperaturverteilung sind demnach zwei Minima vorhanden, am Erdboden und im Kronenraum. H. Karsten konnte noch im Freien in horizontaler Entfernung von den Kronen ein Temperaturminimum in der vertikalen Verteilung feststellen¹⁰⁾. Man kann also folgendes Bild der Temperaturverhältnisse entwerfen, wie es schematisch in Fig. 11 dargestellt ist. Daß sich tatsächlich eine solche Temperaturverteilung, die hier nur durch wenige Messungen in den Grundzügen bestätigt werden konnte, im Grenzgebiet Wald/Feld des Nachts ausbildet, zeigte kürzlich H. G. Koch durch eingehende Messungen¹¹⁾. Die Bewegungen der Ballone lassen sich nun in diesem Zusammenhang

erklären. Unmittelbar vor dem Waldrand herrscht absteigende Luftbewegung infolge des Absinkens der kalten Luft aus dem Bereich der Baumkronen. Weiter entfernt (etwa bei der Stelle A, Fig. 11) tritt Aufwärtsbewegung wie vor einem Kaltluftberg auf. Als Wirkung einer einfachen Hindernisströmung vor dem Wald sind die Vertikalbewegungen deshalb nicht zu

bewerten, weil bei Windgeschwindigkeiten von etwa 1.5 m/sec an aufwärts alle Bahnen glatten Verlauf annehmen und sich erst jetzt der Wald als Hindernis in den Bahnen — jedoch völlig andersartig und mit nur schwachen Abweichungen von der geradlinigen Strömungsbahn — bemerkbar macht (s. Bahn d, Tafel VI). In den bodennahen Teilen der Ballonbahnen zeigt sich meist die Wirkung der aus dem Waldinnern abfließenden Kaltluftmassen. Der Wind begünstigt also den bodennahen Kaltluftfluß. Bahn b, Tafel VI zeigt in ihrem letzten Teil, daß in etwa 2 m Höhe über dem Walde noch kein Einfluß des schwachen Gradientwindes vorhanden ist.

III. Besprechung einzelner Ballonbahnen. In den vorigen Abschnitten wurde bei der Besprechung der Ergebnisse jeweils auf die entsprechenden Ballonbahnen hingewiesen. Hier seien einige für die verschiedenen Fälle besonders typische Bahnen noch einmal behandelt.

Zu Zirkulationsströmungen am Steilhang. Tafel I zeigt die charakteristischen Strömungsformen am Steilhang. Die Geschwindigkeiten bei den Ballonen a, b und c sind durchweg gering (unter 0.9 m/sec); in den letzten Teilen der Bahnen kommt die Wirkung des untersten hangabwärts gerichteten Stromes in einer deutlichen Geschwindigkeitssteigerung zum Ausdruck. Die Bahn c stellt eine Vermessung dar, die nur wenige Minuten nach Bahn b angestellt wurde. Hier zeigt

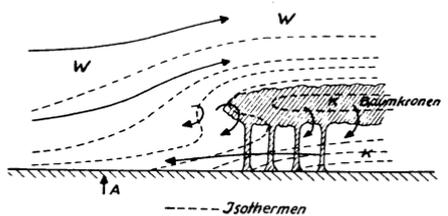


Fig. 11. Temperaturverteilung am Waldrand (schematisch)

sich nicht das klare Bild der Zirkulationen, obwohl der Wind *nicht* zugenommen hatte. Es scheint hier offenbar der Fall vorzuliegen, der auf S. 259 beschrieben wurde: Die Kaltluft an der Oberfläche des Hanges hat noch nicht die genügende Mächtigkeit und Geschwindigkeit hangabwärts, um Zirkulationen hervorzurufen. Die Bahn zeigt deutlich eine verstärkte Einwirkung des Oberwindes: Im anfänglichen Stück, etwa bis Stelle *A*, macht sich noch eine Zirkulationsbewegung gegen den Hang bemerkbar. Im weiteren Verlauf wird eine schwache Zirkulationsbewegung größeren Ausmaßes angedeutet. Letztere kommt dadurch zustande, daß die hangabwärts fließende Luft über eine stetig kälter werdende Unterlage gelangt; infolge ihrer Bewegungsenergie strömt die Luft über ihre Gleichgewichtslage hinaus (zu tief in die Kaltluft des Tales hinein) und erfährt so eine Beschleunigung nach oben. Die Bahnen *d*, *e* und *f* veranschaulichen die Strömungen im Bereiche der relativ ruhigen Kaltluft, die vor der Hangkante lagert (s. Fig. 6). Das Aufgleiten an dem hier befindlichen Kaltluftkissen tritt bei den Bahnen *d* und *e* sehr deutlich in Erscheinung. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind zu Anfang der Bahnen sehr gering; später werden sie infolge des Absaugens der Luft an der Hangkante wesentlich größer. Bahn *f* zeigt, daß bereits in etwa 7 m Höhe über der Hangkante der Einfluß des Steilhanges nicht mehr vorhanden ist. Bahn *g* wurde kurz vor Bahn *a* aufgenommen. Die allgemeine Luftbewegung war hier ebenfalls gering. Die Zirkulationen dürften also kaum über 6 m hinaufreichen, da in dieser Höhe bereits im wesentlichen der Gradientwind vorherrscht.

Zu Hangwind, Winddrehung am flachen Hang. Tafel II zeigt den Plan des flachen Hanges, über dem die folgenden Ballonbahnen vermessen wurden. Die Bahnen selbst werden gesondert in größeren Maßstäben dargestellt, da sie auf dem Geländeplan zu klein erscheinen würden. Ihre Lagen im Gelände sind in Tafel II bezeichnet.

Als erstes Beispiel für das Zusammenwirken der beiden Strömungstypen unterer Hangwind—oberer Gradientwind sei Bahn *a*, Tafel III aufgeführt. Bei dieser Vermessung, wie auch während der ganzen Nacht, wehte der Oberwind (in 2.5 m über der Erde) fast senkrecht hangaufwärts mit einer mittleren Geschwindigkeit von 1.4 m/sec. Die Vermessung beginnt, als der Ballon bereits eine Höhe von 9 m über dem Boden hat. Im großen und ganzen zeigt die Bahn eine schrägabwärts gegen den Hang gerichtete Strömung. Dabei tritt folgende Erscheinung deutlich hervor: Plötzliches Auffrischen des Oberwindes um nur geringe Beträge verursacht ein Hochreißen des Ballons mit Eindrehung in die Richtung des Oberwindes (s. z. B. Zeitmarke 4); ähnlich wie Bahn *f* und *g*, Tafel I. Je näher der Ballon dem Erdboden kommt, um so mehr macht sich bei seinen Bewegungen die Komponente des unteren Kaltluftstromes bemerkbar. In etwa 1 m Höhe über dem Boden tritt eine ausgesprochene Grenze zwischen der unteren und oberen Strömung auf. Der Ballon beschreibt mehrere geschlossene Wirbelbahnen. Unterhalb dieser Zone folgt der Ballon der quasilaminaren Kaltluftströmung senkrecht zu den Isohypsen hangabwärts, also entgegengesetzt der Richtung des Oberwindes. Während dieser und auch anderer windstillen Nächte konnten mehrere ähnliche

Strömungen mit der Grenzzone zwischen Hang- und Oberwind vermessen werden. Das angeführte Beispiel ist besonders markant.

Andere Ballons zeigten jedoch gar nichts von der beschriebenen Grenzzone. Letztere kann aber auch deshalb nicht während einer ganzen Nacht bestehen, da der Fluß der unteren Kaltluft nicht in gleicher Stärke fort dauert, sondern zeitweise völlig aufhört. Die Beobachtungen am Steilhang zeigten Ähnliches. Auf eine Abbildung einer Bahn, die nur die Erscheinung der starken stetigen Winddrehung mit der Höhe zeigt, sei verzichtet; Tafel III gibt ja bereits in ihrem ersten Teil der Bahn ein Beispiel dafür. Solche Bahnen bilden die Mehrzahl der Vermessungsergebnisse.

Zu Rückkehrkonvektion. Bahn *a* der Tafel IV zeigt eine ungeordnete Luftbewegung, die charakteristisch für die windschwachen Austauschvorgänge ist. Während eines größeren Zeitraumes (etwa 30 Minuten), in welchem die Vermessung der Ballonbahn stattfand, wurde die größte horizontale Geschwindigkeit der Luft zu 0.18 m/sec gemessen. Solche Zirkulationsbewegungen traten in dieser ausgeprägten Form vornehmlich bei ganz geringer Windbewegung auf. Zwei weitere Bahnen, die die windschwachen Austauschbewegungen darstellen, zeigt Tafel V. Ballon *b* ist 3 Sekunden nach Ballon *a* gestartet worden. Die Bahnen zeigen besonders das spiralenförmige Abwärtsströmen der Luft. Auch während dieser Vermessungen herrschte fast allgemeine Windstille.

Zu Waldeinfluß. Einige Ballonbahnen in der Nähe des Waldes sind in Tafel VI dargestellt. Bahn *a* zeigt in ihrem letzten Verlauf die Austauschbewegung vor dem Wald, wie sie auf S. 267 beschrieben wurde. Das Absinken zeigt wieder ausgesprochene Spiralenform. (Der Ballon hat den Wald nicht etwa berührt.) Bahn *b* und *c* zeigen bei Zeitmarke 7 bzw. 6 wesentliche Unterschiede in ihrem Verlauf. Ob hier ein Waldeinfluß besteht, kann nicht entschieden werden, da hier zu wenig Beobachtungen vorliegen. Jedenfalls werden im späteren Verlauf der Bahnen die Geschwindigkeiten in Waldnähe sehr gering, und die Bewegungen deuten Austauschvorgänge an. Im großen und ganzen zeigen sie außerdem den abwechselnden Einfluß von Gradientwind und unterem Kaltluftstrom. Wie gleichrichtend stärkere Windgeschwindigkeit auf die Bewegung wirkt, ist aus Bahn *d* ersichtlich. Alle Bahnen, die bei Windstärke von etwa 2 m/sec an aufwärts vermessen wurden, zeigen denselben glatten Verlauf. Bei noch größerer Windzunahme würde natürlich die Turbulenz der Luft größer, und die Ballonbahnen würden dies zeigen. Hier befinden wir uns jedoch noch im Bereich der Luftbewegung, wo die geringe Windzunahme nur die thermisch bedingten Sonderbewegungen verwischt (bzw. verhindert) und selbst nur schwache dynamische Luftunruhe hervorruft. Daher kommt es, daß die Ballonbahnen bei größerer Windgeschwindigkeit (bis zu etwa 3.5 m/sec) einen glatten und ruhigen Verlauf annehmen.

Zum Schluß sei noch auf eine Bahnvermessung hingewiesen, die in Tafel IV mit *b* bezeichnet ist. Die allgemeine Luftbewegung war während der Vermessung etwa nur 0.6 m/sec in 2 m Höhe. Zeitmarken wurden bei dieser Aufnahme leider nicht gemacht. Nach den Augenbeobachtungen erfolgte die Aufwärtsbewegung

sehr plötzlich und mit einer etwa dreimal so großen Geschwindigkeit wie die anfängliche Bewegung; auf dem Höhepunkt bei Stelle *A* nahm die Geschwindigkeit wieder den anfänglichen Wert an. Durch die dynamische Windunruhe können derartige Vertikalbewegungen wegen der geringen allgemeinen Luftbewegung kaum hervorgerufen werden. Vielmehr scheint hier auch eine Ausgleichsbewegung thermischer Natur vorzuliegen. Vertikalbewegungen dieser Art scheinen besonders dann aufzutreten, wenn am Vortage starke Einstrahlung mit geringer Luftbewegung die Ausbildung großer „thermischer Unterschiede“ über dem Gelände verursacht; dieses war in dem betrachteten Beispiel der Fall. Wie eine derartige Austauschbewegung im einzelnen entstanden ist, müssen weitere Beobachtungen zeigen.

Zusammenfassung

Die stereophotogrammetrische Vermessung von Pilotballonen stellt in der einfachen Anordnung, wie sie hier erstmalig durchgeführt wurde, eine geeignete Methode für genaue Beobachtung windschwacher Luftströmungen dar.

An einem flachen Hang (Gefälle 1 : 13) zeigte sich in den untersten Schichten (bis 2 m Höhe) eine Kaltluftströmung, deren Richtung und Geschwindigkeit nur vom Gelände abhing. Darüber wehte die vom Luftdruckgefälle bedingte wärmere Luft. Beide Strömungen waren durch eine Übergangsschicht getrennt, in der Wirbelbildung auftrat. Die Breite dieser Übergangsschicht wuchs mit zunehmender Windgeschwindigkeit, bis bei einer Windgeschwindigkeit über 3 m/sec eine allgemeine Durchmischung auftrat.

An diesem gleichen Hang wurde auch ein Zirkulationssystem im Grenzgebiet Feld/Wald gefunden.

An einem steilen Hang ergab sich außerdem noch die Existenz eines ausgeprägten Zirkulationssystems im oberen Drittel des Hanges. Es entsprach qualitativ den theoretischen Vorstellungen von Marvin⁴). Als neu erwies sich aber daß dieses Zirkulationssystem nicht stationär war, sondern nach einer Zeitdauer von etwa 5 Minuten erlosch, um sich nach etwa 12 bis 15 Minuten erneut zu bilden. Die Erklärung für diesen pulsatorischen Charakter konnte durch gleichzeitige Temperaturmessungen gegeben werden. Der Kaltluftfluß den Hang hinunter erfolgte auch nicht dauernd, sondern in einzelnen Stößen, und die Periode dieser Stöße war die gleiche wie die der Zirkulationssysteme. Wodurch dieser stoßartige Charakter des Kaltluftflusses bedingt ist, konnte nicht einwandfrei festgestellt werden. Anscheinend handelt es sich um ein Aufstauen der Kaltluft an der Hangkante, das so lange anhält, bis durch einen dynamischen Anstoß oder auch durch ein mechanisch bedingtes Instabilwerden diese angesammelte Kaltluftmasse sich in Bewegung setzte.

Durch die nun herabfließende Kaltluft entstand dann das Zirkulationssystem der „warmen Hangzone“. Infolge des raschen Strömens der Kaltluft reichte dann die an der Hangkante aufgespeicherte Luftmasse nicht mehr aus, der Kaltluftstrom riß ab und damit erlosch das Zirkulationssystem. Erst nachdem sich wieder genügend Kaltluft an der Hangkante aufgestaut hat, kann sich dieser Vorgang wiederholen.

Die Anregung zur vorliegenden Arbeit gab Herr Professor G. Angenheister. Zur Durchführung der Arbeit waren mir beim photogrammetrischen Teil Herr Dr. H. Jung, beim meteorologischen Teil Herr Dr. G. A. Suckstorff mit Rat und Tat behilflich. Allen möchte ich aufrichtig danken.

Literatur

- 1) Beiheft der allgemeinen Vermessungsnachrichten: Bildmessung und Luftbildwesen. Heft 2 (1934).
- 2) K. O. Lange: Über Windströmungen an Hügelhindernissen. Veröffentl. d. Forschungs-Instituts d. Rhön-Rossitten-Ges. 1929.
- 3) Geiger: Das Klima der bodennahen Luftschicht, 1927.
- 4) Marvin: Air drainage explained. Monthly Weather Review 1914, S. 583.
- 5) F. Albrecht: Beitr. z. Geophys. **25**, 1.
- 6) W. Schmidt: Der Massenaustausch in freier Luft usw. Hamburg 1925.
- 7) A. Defant: Nächtliche Abkühlung der staubbeladenen Luftschichten. Ann. d. Hydrogr. 1919, S. 93.
- 8) Falckenberg u. Stoecker: Bodeninversion und atmosphärische Energieleitung durch Strahlung. Beitr. z. Physik d. fr. Atm. **13**, 246.
- 9) A. Schmauss: Nächtliche Abkühlung der untersten Luftschichten. Ann. d. Hydrogr. 1919, S. 235.
- 10) H. Karsten: Beiträge zur Kenntnis der Temperaturverhältnisse in den untersten Luftschichten. Landwirtschaftl. Versuchs-Anstalt Helsingfors 1921.
- 11) H. G. Koch: Temperaturverhältnisse und Windsystem eines geschlossenen Waldgebietes. Veröff. d. Geophys. Inst. d. Universität Leipzig 1934.

Göttingen, Geophysikalisches Institut, April 1935.

Referate und Mitteilungen

Forschung am Nanga-Parbat. Deutsche Himalaya-Expedition 1934. Von R. Finsterwalder, W. Raechl (L. Distel), P. Misch, F. Bechtold. Sonderveröffentlichung der Geographischen Gesellschaft zu Hannover. Herausgegeben von Dr. H. Spreitzer. V und 143 Seiten, 1 farbiges Titelbild, 1 Gedenkblatt, 56 Bilder auf 26 Tafeln, 2 Karten (mit 1 Deckblatt), 24 Textabbildungen. Kommissionsverlag Helwing, Hannover. Preis RM 4.80.

Dieses Buch, ein vorläufiger Bericht über die wissenschaftlichen Ergebnisse der Deutschen Himalaya-Expedition 1934, wendet sich nicht nur an den Fachmann, sondern es soll auch dem wissenschaftlich gebildeten Laien eine Vorstellung von den Aufgaben einer solchen Expedition und ihrer Durchführung geben. Nach einigen Worten des Gedenkens für die kurz vor dem Ziel ums Leben gekommenen Teilnehmer der Expedition und einem kurzen einleitenden Kapitel über den Sinn des Buches beginnt die Darstellung mit einem tagebuchartigen Bericht von dem wissenschaftlichen Leiter R. Finsterwalder, ergänzt durch einige Aufzeichnungen des Geologen P. Misch und des Geographen W. Raechl. Gerade diese Form der Schilderung erweist sich als