



## Berichte des Deutschen Wetterdienstes

# 8

### **Über die Messung des Luftdrucks durch Bestimmung der Siedetemperatur mit dem Hypsometer**

von  
Hans Gerhard Müller



Zitationsvorschlag:

Müller, Hans Gerhard: Über die Messung des Luftdrucks durch Bestimmung der Siedetemperatur mit dem Hypsometer. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1954.

(Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 8)

ISSN der Onlineausgabe: 2194-5969

ISSN der Druckausgabe: 0072-4130

---

## Nutzungsbedingungen



Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz

Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden.

Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

---

Herausgeber und Verlag: :

Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
D- 63067 Offenbach am Main

Internet: [www.dwd.de](http://www.dwd.de)

Mail: [bibliothek@dwd.de](mailto:bibliothek@dwd.de)

## Inhalt

	Seite
Zusammenfassung .....	3
1. Vor- und Nachteile verschiedener Methoden der Luftdruckmessung .....	3
2. Eigenschaften der vorhandenen Hypsometer- konstruktionen .....	3
3. Einfluß der Eigenschaften der Siedesubstanz .....	4
4. Wärme- und strömungstechnische Ausbildung eines verbesserten Hypsometers .....	6
5. Probleme der Temperaturmessung .....	8
6. Erfahrungen mit hypsometrischen Luftdruck- messungen bei Radiosondeaufstiegen .....	8
7. Ausblick .....	13
8. Literatur .....	13

## Zusammenfassung

Es werden Vorschläge gemacht, das auf der Bestimmung der Siedetemperatur beruhende hypsometrische Meßverfahren sowohl für Luftdruckmessungen am Boden wie für aerologische Zwecke zu verbessern.

Dabei erscheint aussichtsreich die Verwendung von Substanzen hohen Molekulargewichts als Siedeflüssigkeit, die Verwendung eines besonderen Ausdehnungsraumes gleichzeitig zur Rekondensation der Siedesubstanz und die automatische Regelung der Heizung in Abhängigkeit vom Dampfverbrauch.

Weiter werden praktisch durchgeführte Versuche mit dem beschriebenen Hypsometer bei Radiosondenaufstiegen besprochen, die Ergebnisse mit den Messungen durch Barometerdosen verglichen und die Fehlermöglichkeiten diskutiert.

Eine Radiosondenkonstruktion unter Benutzung der gewonnenen Gesichtspunkte könnte der Praxis bessere und schneller verwertbare Resultate liefern und erheblich Arbeitsaufwand bei der Vorbereitung und Eichung der Geräte sparen.

### 1. Vor- und Nachteile verschiedener Methoden der Luftdruckmessung

Die Bestimmung des Luftdrucks geschieht vorzugsweise mit dem Quecksilberbarometer (1). Diese Messungen unterliegen jedoch einer Reihe von Korrekturen: die beobachtete Länge der Quecksilbersäule muß auf Normalschwere und 0° C reduziert werden, das Instrument muß beschleunigungs- und erschütterungsfrei aufgehängt sein, die Güte des Vakuums bedarf der Kontrolle, Instrumente mit reduzierter Teilung erfordern weitere Vorsichtsmaßnahmen. Auch rein technische Eigenschaften schränken die Verwendbarkeit des Quecksilberbarometers für viele Zwecke ein, so daß es auf Expeditionen, auf Schiffen und Luftfahrzeugen und überall da, wo schnelle, mühelose Ablesung verlangt wird, weitgehend durch Aneroidbarometer ersetzt worden ist.

Die Eigenschaften der elastischen Nachwirkung, Reibungs- und Nullpunktfehler und die nicht in allen Fällen technisch beherrschte Temperaturabhängigkeit der elastischen Kraft der Dosenrückführung und der Spannung des Füllgases (2) beschränken die Verwendung des Aneroidbarometers jedoch auf Fälle, wo häufige Nacheichung mittels Quecksilberbarometers möglich ist.

Von anderen Methoden der Luftdruckmessung hat sich in der Meteorologie nur die hypsometrische eingeführt, die Bestimmung des Luftdrucks aus der Siedetemperatur. Ihr Hauptanwendungsgebiet lag bisher bei Expeditionen, im Schiffsbetrieb, bei der barometrischen Höhenbestimmung auf Bergen, zur Funktionskontrolle von Stationsbarometern in ausgedehnten Netzen, sowie zur Bestimmung örtlicher Schwerkraftwerte aus gleichzeitigen barometrischen und hypsometrischen Messungen.

### 2. Eigenschaften der vorhandenen Hypsometerkonstruktionen

Das Hypsometer benutzt als Meßprinzip die Abhängigkeit der Siedetemperatur einer chemisch reinen Substanz vom äußeren Druck. Eine Flüssigkeit beginnt zu sieden, wenn bei zunehmender Erwärmung ihr Dampfdruck gleich dem äußeren Druck (Luftdruck) wird. Für jede Substanz ist daher die Abhängigkeit des Siedepunkts vom Luftdruck durch ihre Dampfdruck-

kurve gegeben. Der Siededruck hängt weder von der Lufttemperatur noch von der örtlichen Schwerkraft ab. Er wird auch nicht durch die praktisch in Frage kommenden Beschleunigungen beeinflusst, elastische Federn und mechanische Übertragungen werden nicht benötigt. Damit besitzt das Hypsometer eine Reihe grundsätzlicher Vorzüge vor dem Quecksilber- und dem Aneroidbarometer. Ein weiterer wichtiger Vorzug, der sich insbesondere bei aerologischen Messungen auswirkt, liegt in der Art der Abhängigkeit der Siedetemperatur vom Druck. Diese Verhältnisse werden im sechsten Abschnitt besonders behandelt. Wenn sich das Hypsometer bisher nicht in höherem Maße als Druckmeßgerät der meteorologischen Praxis eingeführt hat, so liegt das an einer Reihe von Schwierigkeiten, auf die in der Literatur mehrfach hingewiesen worden ist (3) (5) (7).

Die bisher benutzten Hypsometer gehen in ihrer Bau- und Wirkungsweise meistens auf das Hypsometer nach v. D a n c k e l m a n n (4) zurück. Die richtige Anzeige der Siedetemperatur erfolgt nur, wenn die auf dem Thermometer und in seiner Nähe kondensierende Dampfmenge ausreicht, um alle Wärmeverluste durch Ableitung, Abstrahlung und konvektive Abfuhr zu decken. Um das sicherzustellen, muß ein gewisser Dampfüberschuß vorhanden sein. Andererseits darf auch nicht zu viel Dampf erzeugt werden, da sonst infolge des grundsätzlich unvermeidbaren Strömungswiderstandes auf dem Wege des Dampfes vom Siedegefaß nach außen eine Druckdifferenz auftritt, die auch am Orte des Thermometers einen Überdruck gegenüber dem äußeren Luftdruck zur Folge haben kann. Die unter solchen Umständen gemessene Siedetemperatur läßt den Luftdruck zu hoch erscheinen.

Die zulässigen Grenzen sind bei der üblichen Heizung durch Spirituslampe schlecht einzuhalten. Geringe Änderungen der Flammenhöhe ändern die gelieferte Dampfmenge, jeder Windstoß, jede Änderung der Außentemperatur und jede Änderung der Luftzirkulation in der Umgebung des Meßgeräts ändern die Abkühlungsverhältnisse. Dazu kommt, daß ein Teil dieser Ursachen, z. B. Windstöße, sich insofern doppelt auswirken, als sie gleichzeitig die Kühlung erhöhen und die Heizleistung herabsetzen. In allen diesen Fällen kann kalte Luft von außen in das Thermometerrohr eindringen und eine erhebliche zu niedrige Anzeige bewirken, da die eindringende kalte Luft die Dampfzufuhr zum Thermometerkörper völlig blockiert. Durch Verstärkung der Heizung ist jedoch nicht unbedingt Abhilfe zu schaffen, weil bei zu starker Heizung der oben erwähnte Überdruck gegenüber der Außenluft auftritt. Die Folge ist ein zu hoher Siedepunkt und eine zu hohe Luftdruckanzeige des Thermometers.

Für hypsometrische Zwecke benutzte Quecksilberthermometer müssen eine sehr hohe Empfindlichkeit besitzen, da sich die Siedetemperatur von Wasser pro 0,1 mb Druckänderung bei Atmosphärendruck nur um 0,003° C ändert. Derart empfindliche Thermometer benötigen eine erhebliche Quecksilbermenge und eine sehr enge Kapillare. Durch die Elastizität des Glases wird gelegentlich eine Deformation des verhältnismäßig großen Gefäßes unmittelbar durch den Luftdruck hervorgerufen. Die enge Kapillare bewirkt leicht ein Abreißen des Fadens, Überdestillieren von Quecksilber in den oberen Teilen der Kapillare ist eine weitere häufige Fehlerursache bei Hypsometerthermometern.

Die unsymmetrische Anordnung der Dampfaustrittsöffnungen beim Hypsometer nach v. D a n c k e l m a n n hat zur Folge daß bei starkem Wind im

Freien das Meßresultat leicht durch Stau- oder Sogeffekte gefälscht wird.

Ein betrieblicher Nachteil dieses Hypsometers ist endlich, daß eine Wasserfüllung nach ca.  $\frac{1}{2}$  bis  $\frac{3}{4}$  Betriebsstunden verbraucht ist, so daß Reihemessungen häufig für längere Zeit unterbrochen werden müssen.

Es hat nicht an Versuchen gefehlt, einen Teil der angeführten Fehler zu beseitigen. Der Verfasser benützte für Messungen im Flugzeug 1934/35 ein Hypsometer, das regulierbare elektrische Heizung besaß. So konnte die Dampfleistung genau konstant gehalten, aber auch wechselnden Außenbedingungen bequem angepaßt werden. Der Dampf strömte nicht ungehindert ins Freie aus, vielmehr wurde der nicht im Apparat selbst kondensierte Anteil in einem Kühler aufgefangen und das Kondensat dem Vorrat im Siedegefaß wieder zugeführt, so daß die Betriebsdauer gegenüber dem alten Gerät wesentlich verlängert wurde.

Um die notwendige Heizleistung gering zu halten und der Gefahr eines inneren Überdrucks zu entgehen, war das Gerät von 1934 mit Ausnahme der Kühlvorrichtung gut gegen Wärmeverlust isoliert. Ein empfindliches Kontrollmanometer gestattete, die Druckdifferenz zwischen der Außenluft und dem Inneren des Instrumentes zu messen und notwendigenfalls durch Drosseln der Heizleistung den Überdruck auf ein unschädliches Maß herabzusetzen.

Später haben Koppe (6) und Gelbke (7) Konstruktionen angegeben, die sich ebenfalls elektrischer Heizung und des Rückkühlprinzips bedienen. Durch geschickte Dampfführung sollten Kaltlufteinbrüche vermieden werden. Bei der Gelbkeschen Konstruktion ist im Gegensatz zu der von Danckelmann der Platz des Thermometergefäßes erst an einer Stelle weit hinten im Dampfstrom gewählt, wo ein erheblicher Teil des Dampfes schon kondensiert ist. Hierdurch ist die Gefahr eines Überdruckes am Ort des Thermometers gegenüber der älteren Konstruktion erheblich herabgesetzt. Von amerikanischer Seite sind seit 1948 Versuche zur Verwendung des Hypsometers zur Luftdruckmessung bei Radiosonden bekanntgeworden (8).

### 3. Einfluß der Eigenschaften der Siedesubstanz

Um die Möglichkeiten der hypsometrischen Luftdruckmessung übersehen zu können, erscheint es zweckmäßig, die dafür wesentlichen Eigenschaften der in Frage kommenden Substanzen kurz zusammenzustellen.

Eine Substanz für hypsometrische Luftdruckmessung sollte folgende Eigenschaften aufweisen:

- Sie muß leicht chemisch rein zu erhalten sein und einen wohldefinierten Siedepunkt haben.
- Sie soll in dem für Messungen in Betracht kommenden Bereich der Lufttemperatur (etwa von  $-40$  bis  $+40^\circ\text{C}$ , für aerologische Messungen nach tiefen Temperaturen bis zu  $-90^\circ$ ) flüssig sein. Festes Kondensat könnte die Apparatur verstopfen oder doch die Strömungsverhältnisse und Wärmeübergangsbedingungen im Gerät so verändern, daß eine Messung unmöglich wird.
- Ihr Siedepunkt soll etwa zwischen  $+80$  und  $+180^\circ\text{C}$  liegen, um bequem zu beherrschende Temperaturen zu bekommen. Unter  $+80^\circ\text{C}$  stört bei Beobachtungen an der Erdoberfläche zu große Flüchtigkeit, oberhalb  $+180^\circ\text{C}$  wachsen die Wärmeverluste stark an. Insbesondere bei Verwendung von Halbleiterthermometern, wie sie bei den nachstehend beschriebenen Versuchen benutzt wurden, läßt bei so hohen Temperaturen auch die Genauigkeit der Temperaturmessung nach. Für die Verwendung hochsiedender Substanzen spricht jedoch, daß bei diesen das Verhältnis: Änderung der Siedetemperatur zu Dampfdruckänderung günstiger ist als bei niedrigsiedenden (vgl. folgenden Abschnitt).

d) Die Substanz darf nicht in extremem Maße giftig sein oder besondere Maßnahmen zur Verhinderung von Korrosion in der Apparatur verlangen oder zur Selbstzersetzung bei längerem Sieden neigen.

Die Höhe der Siedetemperatur eines Stoffes bei vorgegebenem Druck ist durch den Verlauf der Dampfdruckkurve gegeben. Die Dampfdruckkurve wird im allgemeinen durch Messungen festgelegt. Ihr theoretischer Verlauf ergibt sich durch Integration der Clausius-Clapeyron'schen Gleichung, die den Energieumsatz bei Phasenübergängen beherrscht.

Speziell auf den Vorgang der Verdampfung einer Flüssigkeit angewandt, lautet diese Formel:

$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{L}{T(V_{sd} - V_{sfl})}$$

- wo T die absolute Temperatur,  
 $p_s$  den Sättigungsdruck bei T,  
 $V_{sd}$  das spezifische Volumen des Dampfes bei T und  $p_s$   
 $V_{sfl}$  das spezifische Volumen der Flüssigkeit bei T und  $p_s$   
 L die Verdampfungswärme bei T bedeutet.

Die allgemeine Form der Clausius-Clapeyron'schen Gleichung ergibt, verlangt zur Auswertung die exakte Kenntnis der chemischen Konstante des betrachteten Stoffes ( $i_p$ ), der spezifischen Wärmen des Dampfes und der Flüssigkeit, sowie der Verdampfungswärme einschließlich des Verlaufes dieser Größen mit der Temperatur:

$$\ln p = -\frac{L_0}{RT} + \frac{c_{p_0 \text{ Gas}}}{R} \ln T + \frac{1}{R} \int_0^T \frac{dT}{T^2} [(c_p - c_{p_0})_{\text{Gas}} - c_{\text{Kond.}}] dT + i_p$$

Soweit bei hypsometrischen Messungen ein größerer Druckbereich erfaßt werden muß, wie z. B. bei der Verwendung des Hypsometers bei Radiosondeaufstiegen, benutzt man zweckmäßig die von Nernst angegebene Näherungsgleichung, wie sie z. B. H. v. Siemens (9) für Schwefelkohlenstoff angewandt hat. Wird das Hypsometer nur in einem Bereich benutzt, wie es bei Messungen an der Erdoberfläche der Fall ist, wo nur Änderungen der Siedetemperatur von einigen Grad Celsius bzw. Druckänderungen von der Größenordnung 100 mb bei 1000 mb Gesamtdruck erfaßt zu werden brauchen, so genügt jede Näherungsformel. Insbesondere kann man die August'sche Formel benutzen, die sich ergibt, wenn man für die Verdampfungswärme einen Mittelwert einsetzt und das Volumen der Flüssigkeit neben dem des Dampfes vernachlässigt, sowie voraussetzt, daß der Dampf sich wie ein ideales Gas verhält. Die dabei nicht berücksichtigten Abhängigkeiten von der Temperatur sind dabei in der Größe C versteckt, die somit nur für relativ kleine Bereiche der Siedetemperatur als konstant angesehen werden kann. Die Gleichung für den Dampfdruck lautet in dieser Vereinfachung:

$$\log p = \frac{A}{T} + C$$

Für die Auswahl einer geeigneten Siedesubstanz genügt es, aus den Dampfdruckformeln ein Bild davon zu gewinnen, wie sich die thermischen Zustandsgrößen auf die hypsometrische Druckmessung auswirken. Chemisch ähnliche Substanzen vorausgesetzt, liegt die Siedetemperatur für einen gegebenen Luftdruck um

so höher, je größer die Verdampfungswärme ist. Andererseits sieht man, daß die Änderung des Sättigungsdruckes mit der Siedetemperatur größer wird, wenn man zu Stoffen mit höherer Verdampfungswärme übergeht. Wie die Tabelle 1 zeigt, variiert die erzielbare

Genauigkeit im ganzen nur sehr wenig, lediglich Wasser mit seiner extrem hohen Verdampfungswärme erscheint merklich ungünstiger als die übrigen Substanzen.

Tab. 1 Physikalische Eigenschaften von Hypsometerflüssigkeiten

	Wasser	Schwefelkohlenstoff	Tetrachlorkohlenstoff	Normal-Oktan	Chlorbenzol	Brombenzol
Chemische Formel	H <sub>2</sub> O	CS <sub>2</sub>	CCl <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> CH <sub>3</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Br
Molekulargewicht	18,02	76,13	153,84	114,22	112,56	157,02
Dichteverhältnis des Dampfes am normalen Siedepunkt gegenüber (Luft 20° C)	0,59	2,89	5,18	3,59	3,38	4,46
Normal-Siedetemperatur ° C	100,0	46,25	76,6	114,2	132,0	155,6
Änderung der Siedetemperatur ° C pro mb Druckänderung bei normalem Siedepunkt	0,028	0,031	0,033	0,039	0,036	0,038
Verdampfungswärme cal/g (bei Temp.)	538,9 (100)	84,1 (0)	45,7 (76,5)	76,7 (80)	77,6 (131)	57,6 (156)
Spezifische Wärme der Flüssigkeit cal/g° C (bei Temp.)	1,01 (100)	0,24 (0)	0,20 (20)	0,53 (20)	0,31 (20)	0,23 (20)
Dichte der Flüssigkeit g/cm <sup>3</sup> (bei Temp.)	0,958 (100)	1,293 (0)	1,599 (18)	0,704 (18)	1,106 (20)	1,522 (0)

Bei den bisher benutzten Hypsometern fand praktisch ausschließlich Wasser als Siedesubstanz Verwendung. Es ist billig, praktisch überall vorhanden und genügend leicht rein zu erhalten. Es besitzt den Vorteil, daß seine physikalischen Eigenschaften (s. Tab. 1) genauer bekannt sind als die aller übrigen in Frage kommenden Stoffe. Wegen der großen Verdampfungswärme transportiert ein Gramm Wasserdampf unter sonst gleichen Verhältnissen eine viel größere Wärmemenge von der Dampfquelle zur Kondensationsstelle als irgendeine andere in Frage kommende Substanz. Wegen der geringen Dichte des Wasserdampfes gegenüber anderen Substanzen erscheint dieser Vorteil allerdings weniger groß, wenn man statt der Massen gleiche Volumina verschiedener Substanzen vergleicht. Das dürfte aber richtiger sein, weil es beim Wärmetransport ja vorzugsweise auf den Einfluß der Leitungsschnitte und Strömungsgeschwindigkeiten ankommt. Von Nachteil bei Messungen bei tiefen Außenlufttemperaturen ist der verhältnismäßig hoch liegende Gefrierpunkt des Wassers. Für Hypsometermessungen auf Bergen und in arktischen Gebieten ist Wasser daher unbequem, für aerologische Zwecke nicht ohne besondere Vorsichtsmaßregeln brauchbar.

Auf die Gefahr der Einbrüche kalter Luft bis zum Thermometer wurde oben schon hingewiesen. Tatsächlich kommen derartige Kaltluftereinbrüche nicht nur bei zu geringer Dampfleistung vor, sondern sie erfolgen auch dann noch, wenn die Dampfleistung an sich noch ausreichen würde, alle Wärmeverluste durch Leitung und Konvektion zu decken. Die Ursache für diese Erscheinung liegt wieder in der geringen Dampfdichte des Wasserdampfes. Sie beträgt beim normalen Siedepunkte nur etwa die Hälfte der Dichte der atmosphärischen Luft von Zimmertemperaturen. Dringt in eine mit Wasserdampf gefüllte Leitung von oben her Luft ein, so muß die Dampfleistung so groß sein, daß der Dampfstrom selbst die Luft trotz der Gewichts-differenz mit hinausreißt; nur so läßt sich die geschil-

derte Gefahr vermeiden. Nun sind aber im Interesse der Vermeidung fälschenden Überdrucks gerade geringe, eben noch ausreichende Dampfmengen und möglichst kleine Heizleistungen erwünscht.

Es gibt zwei Möglichkeiten, dem geschilderten Effekt zu entgehen: Will man Wasser oder eine andere Substanz mit einer Dampfdichte verwenden, die geringer ist als die Dichte der atmosphärischen Luft, so hat man das Siedethermometer an der höchsten Stelle des Instruments anzubringen, das Instrument selbst insbesondere in seinem oberen Teil gegen Wärmeabgabe nach außen zu schützen und die Dampfaustritts- oder Druckausgleichsleitung möglichst tief unten anzuordnen. Bei dieser Anordnung, wie sie z. B. in dem Danckelmann-Fuess'schen Hypsometer angewandt wird, bleibt die schwere Luft unter dem leichten Dampf liegen und kann nicht bis in die Nähe des Thermometers vordringen.

Die zweite Möglichkeit ist, im Grundsatz die alte Anordnung beizubehalten, aber eine Substanz zu verwenden, deren Dampfdichte beim Siedepunkt größer ist als die Dichte der atmosphärischen Luft. Diese Möglichkeit wurde bei den hier beschriebenen Versuchen vorgezogen, da sie bei Verwendung z. B. von Schwefelkohlenstoff als Siedesubstanz mit praktisch der gleichen Anordnung aerologische Luftdruckmessungen durchzuführen gestattet.

Die Zahl der Verbindungen, die nach den vorn aufgeführten Bedingungen als Hypsometersubstanzen in Frage kommen, ist sehr groß. Folgende Substanzen wurden in Betracht gezogen: Schwefelkohlenstoff, Tetrachlorkohlenstoff, Normal-Oktan, Chlorbenzol, Brombenzol. Ihre für Hypsometermessungen besonders interessierenden physikalischen Eigenschaften wurden in Tabelle 1 zusammengestellt. Mit Ausnahme von Normal-Oktan und Brombenzol wurden mit den genannten Substanzen praktische Versuche durchgeführt.

Wegen seines niedrigen Siedepunktes kommt Schwefelkohlenstoff nur für Messungen in der freien Atmosphäre in Frage, wo der Vorteil einer geringen Temperaturdifferenz zwischen Siedesubstanz und Außenluft wichtig ist und wo die kurze Versuchsdauer von höchstens 1½ bis 2 Stunden keine Schwierigkeiten durch zu rasches Verdampfen der Substanz erwarten läßt. An der Erdoberfläche angewandt, ist Schwefelkohlenstoff zu flüchtig. Auch seine Giftigkeit und Feuergefährlichkeit sprechen gegen eine Anwendung bei Bodenmessungen.

Tetrachlorkohlenstoff wurde sowohl für Messungen an der Erdoberfläche wie für Luftdruckmessungen mit Radiosonden benutzt. Sein Siedepunkt liegt für die ersteren noch reichlich niedrig, die Substanz erscheint als zu flüchtig. Bei aerologischen Messungen, wie sie im Abschnitt 6 beschrieben werden, ist die Empfindlichkeit der Thermometer beim Siedepunkt von Tetrachlorkohlenstoff schon soviel geringer als bei Schwefelkohlenstoff, daß letztere Substanz vorzuziehen ist. Außerdem liegt der Schmelzpunkt von Tetrachlorkohlenstoff (bei  $-22,9^{\circ}\text{C}$ ) für aerologische Messungen schon unangenehm hoch. Die hier vorliegenden Versuche benutzen also für Messungen an der Erdoberfläche vorzugsweise Chlorbenzol, für solche in großen Höhen Schwefelkohlenstoff.

Die vorn genannten Substanzen besitzen alle entsprechend ihrem hohen Molekulargewicht eine Dampfdichte, die groß ist gegenüber der Luftdichte bei Zimmertemperatur. Die Maßzahlen für das Dichteverhältnis sind in Tabelle 1 angegeben. Durch Verwendung dieser Stoffe kann die beim Wasserdampf so oft beobachtete Fehlerursache des „Kaltlufteinbruches“ bei geeigneter räumlicher Anordnung des Thermometers und der Kondensationsflächen im Hypsometer völlig vermieden werden. Da auch die Diffusionsgeschwindigkeit eines Dampfes großen Molekulargewichts gegenüber Wasserdampf und Luft gering ist, kann man durch geeignete Konstruktion des Hypsometers eine praktisch vollständige Trennung des dampferfüllten Raumes von der Außenluft erzielen. Bei dem weiter unten beschriebenen Gerät bildet sich bei Verwendung eines schweren Dampfes eine Art „Dampfspiegel“, eine wohldefinierte Grenzfläche, durch die praktisch keine kalte Luft ins Innere des Instrumentes vordringen kann.

#### 4. Wärme- und strömungstechnische Ausbildung eines verbesserten Hypsometers

Außer der Wahl einer geeigneten Siedesubstanz sind bei der praktischen Durchführung von Messungen mit dem Hypsometer eine Reihe von Gesichtspunkten zu beachten, die die thermischen und Strömungseigenschaften des Apparates betreffen.

Die Heizung soll nach Möglichkeit elektrisch erfolgen, da die elektrische Leistung ohne Schwierigkeit zu messen und zu regulieren ist. Die elektrische Heizung stellt auch keinen Raumannspruch und ist technisch am einfachsten durchzuführen.

Da jedoch, wie bereits erwähnt, das Hypsometer als Luftdruckmeßgerät ein Hauptanwendungsgebiet auf Expeditionen und bei anderen Gelegenheiten hat, wo elektrische Energie auch in geringem Betrage nicht immer zur Verfügung steht, erscheint es mitunter zweckmäßig, ein Gerät zu verwenden, bei dem eine gleichmäßige Wärmezufuhr trotz schwankender Heizleistung eines Spiritusbrenners gewährleistet ist. Zu diesem Zweck kann man das eigentliche Siedegeäß mit einem Bade aus einer Flüssigkeit umgeben, deren Siedepunkt um einen geringen, möglichst konstanten Betrag über der Siedetemperatur der eigentlichen Meßsubstanz liegt. Die Wärmezufuhr zur Meßsubstanz ist dann bei

gleichbleibenden Abmessungen des Apparates und annähernd gleichbleibenden Flüssigkeitsmengen konstant, da ja die Temperaturdifferenz zwischen Bad- und Meßflüssigkeit konstant bleibt. Schwankungen der Heizleistung wirken sich nur in verstärkter Verdampfung bzw. Rückgang der Verdampfung der Badflüssigkeit aus, nicht aber in der Dampfleistung der Meßflüssigkeit. Das gleiche gilt für geänderte Abkühlungsbedingungen, die sich ebenfalls ausschließlich auf die die Meßflüssigkeit einhüllende Badflüssigkeit auswirken. Die Dampfleistung der Meßflüssigkeit selbst bleibt praktisch ungedändert, solange sich das Bad auf Siedetemperatur befindet.

Zur Realisierung eines derartigen Bades kann man zum Beispiel eine Substanz wählen, deren Siedepunkt um einen geringen, möglichst konstanten Betrag über dem der Meßflüssigkeit liegt. In Betracht kommen hier chemisch der Meßflüssigkeit verwandte Substanzen, wie höhere Glieder einer homologen Reihe, konzentrierte

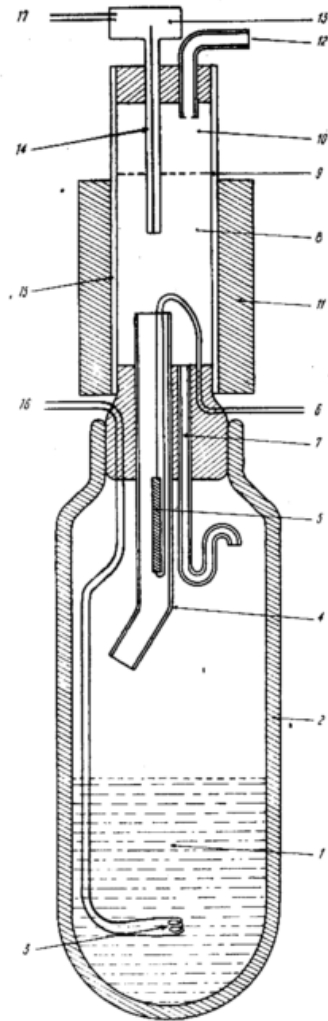


Abb. 1

- Hypsometer
- 1 Siedeflüssigkeit
  - 2 Isoliergeäß
  - 3 Heizwicklung
  - 4 Thermometerrohr
  - 5 Halbleitthermometer
  - 6 Zuleitung zum Thermometer
  - 7 Kondensat-Rückleitung
  - 8 Dampferfüllter Teil des Ausdehnungsraumes
  - 9 Niveau des Dampfspiegels
  - 10 Kühlraum (luffterfüllter Teil des Ausdehnungsraumes)
  - 11 Isoliermantel des Ausdehnungsraumes
  - 12 Druckausgleichsleitung
  - 13 Schaltkasten für Heizregelung
  - 14 Thermostat für Heizregelung (Bimetallthermometer mit Schalter)
  - 15 Wandung des Ausdehnungsraumes
  - 16 Zuleitung für die Heizung
  - 17 Zuleitung der Heizregelung

Lösungen mit der Meßsubstanz als Lösungsmittel oder auch geeignete azeotropische Gemische. Der in den meisten Fällen vorzuziehende Weg ist aber wohl der, daß man als Badflüssigkeit dieselbe Substanz wie als Meßflüssigkeit benutzt. Man braucht nur den Dampfstrom aus dem Bade mittels eines mit vorher bestimmten Druck aufsitzenden Federventils zu drosseln. Der Überdruck, unter dem die Badflüssigkeit siedet, bestimmt dann die Temperaturdifferenz zwischen Bad und Meßflüssigkeit und damit die der Meßflüssigkeit zugeführte Heizleistung.

Weitere thermische und strömungstechnische Gesichtspunkte, die bei hypsometrischen Messungen eine Rolle spielen, sollen am Beispiel eines Hypsometers besprochen werden, das zur Klärung dieser Fragen gebaut wurde. Eine schematische Zeichnung dieses Geräts zeigt Abbildung 1.

Als Siedesubstanz wurde für die Messungen am Boden Chlorbenzol, zum Teil auch Tetrachlorkohlenstoff benutzt. Die Substanz befindet sich in einem Vakuummantelgefäß und wird durch eine Art Tauchsieder elektrisch erwärmt. Die elektrisch zugeführte Heizung entspricht der bei stationärem Sieden benötigten Dampfmenge. Der entwickelte Dampf kondensiert an allen Stellen, deren Temperatur unter der dem jeweiligen Luftdruck entsprechenden Siedetemperatur liegt solange, bis diese erreicht ist. Die Kondensationswärme deckt dabei ständig die Wärmeverluste des Hypsometers durch Leitung, Konvektion und Strahlung. Durch die Umhüllung der Siedeflüssigkeit mit dem Isoliergefäß werden diese Verluste klein gehalten und die Wärmeabgabe praktisch auf geringe Teile der Oberfläche der Apparatur beschränkt. Diese Teile der Oberfläche liegen auf dem Wege des Dampfstromes hinter dem Thermometer. Das Vakuummantelgefäß zur Isolierung wurde mit Rücksicht auf die beabsichtigten, weiter unten beschriebenen aerologischen Versuche gewählt, bei denen die zur Verfügung stehende Heizungsenergie extrem klein, die Abkühlung aber sehr groß ist. Für die Versuche am Boden hätte jeder andere gute Isoliermantel das gleiche geleistet.

Der Bedarf an Heizleistung hängt noch von der gewählten Hypsometersubstanz ab. Je höher der Siedepunkt liegt, um so größer sind unter sonst gleichen Voraussetzungen auch die Wärmeverluste nach außen. Bei Chlorbenzol wurde eine Leistung von etwa 15 Watt verbraucht, bei Schwefelkohlenstoff beträgt die Heizleistung etwa 2 bis 3 Watt. Diese Werte ändern sich unter Umständen erheblich, wenn die Abmessungen der Apparatur ein wenig geändert werden.

Bei Verwendung einer der in der Tabelle 1 aufgeführten Substanzen hohen Molekulargewichts ist die vorher beschriebene Gefahr von Kaltlufteinbrüchen zur Temperaturmeßstelle stark verringert. Um sie ganz auszuschalten, wurde jetzt oberhalb des Siedegefäßes ein Ausdehnungsraum angeordnet, der eine gewisse Dampfmenge aufnehmen kann. Diese wirkt bei plötzlich auftretenden Druckschwankungen als Puffer. Ein Teil des Ausdehnungsraumes ist nach außen gegen Wärmeabgabe isoliert und daher während des Betriebes des Instrumentes ständig dampferfüllt. Der obere Teil des Ausdehnungsraumes dagegen ist nicht isoliert. An seinen Wänden kondensiert daher der überschüssige Dampf. An der Grenze zwischen dem isolierten und dem nicht isolierten Teil des Ausdehnungsraumes besteht somit stets ein Bereich sehr starker Temperaturabnahme von unten nach oben, in dem der Dampfdruck der Siedesubstanz sehr rasch vom Außendruck (Atmosphärendruck) auf einen sehr kleinen Wert fällt, der vom Wert des Sättigungsdruckes bei Zimmertemperatur im allgemeinen nicht sehr verschieden ist. Auf die Weise bildet sich im Ausdehnungsraum der bereits erwähnte „Dampfspiegel“ aus. Ist die Heizleistung relativ groß, so

liegt der Dampfspiegel im oberen Teile des Ausdehnungsraumes, wird dagegen die Heizleistung geringer (oder die Kühlwirkung durch äußere Umstände größer), so sinkt der Dampfspiegel entsprechend, bis die wirk-same Kühlfläche so weit reduziert ist, daß sie der noch verbliebenen Dampfleistung (bzw. der größeren Kühlwirkung) entspricht. Bei gerade ausreichender Heizung liegt der Dampfspiegel gerade in der Trennfläche beider Räume (wie in Abb. 1 angedeutet). Nur bei nicht ausreichender Heizleistung sinkt er auf längere Zeit bis in den isolierten Teil des Ausdehnungsraumes hinab. Kurzfristigen Schwankungen des Luftdruckes folgt der Dampfspiegel sofort. Die Größe des Ausdehnungsraumes ist unmittelbar dadurch bedingt, wie groß die dauernde restliche Wärmeabgabe nach außen durch die „isolierende“ Wand ist, wie groß die größten schnellen Luftdruckschwankungen sind, die noch durch den Dampf-puffer aufgefangen werden müssen, und wie groß die Schwankungen der Kühlleistung durch Änderung der Außentemperatur und der Ventilation sind.

Der bereits erwähnte zum Kaltlufteinbruch entgegengesetzte Fehler der älteren Hypsometerkonstruktionen ist die Überhitzung. Sie wird hier dadurch bekämpft, daß die Dampfleistung nach Möglichkeit herabgesetzt wird und der Strömungswiderstand auf dem Wege des Dampfes äußerst gering gehalten wird. Da es im Gegensatz zu den mit Wasser arbeitenden älteren Hypsometern nicht nötig ist, einen so starken Dampfstrom aufrechtzuerhalten, daß eingedrungene Luft dynamisch mit hinausgerissen wird, und die Wärmeabgabe nach außen durch die gute Isolation sehr gering bleibt, genügen ganz geringe Dampf-mengen, um das Innere des Apparates auf Siedetemperatur zu halten. Bei einer Heizleistung von 20 Watt werden maximal zwischen 60 und 100 mg (15 bis 18 cm<sup>3</sup> Dampf) der in Tabelle 1 aufgeführten Substanzen in der Sekunde verdampft.

An den Wänden des Ausdehnungsraumes, insbesondere im nicht wärmeisolierten oberen Teil, findet dauernd Kondensation statt. Das nach unten abfließende Kondensat gelangt durch ein besonderes Röhrchen in das Siedegefäß zurück. Die Siedesubstanz geht also bis auf ganz geringe Reste, die durch Diffusion durch das Druckausgleichsrohr ins Freie gelangen, nicht verloren, sondern wird wieder verwendet. Der ins Freie entweichende Teil der Substanz ist natürlich um so größer, je größer der Dampfdruck des Stoffes bei der Außentemperatur ist. Hier liegt der Grund, weshalb für die normale Luftdruckmessung (im Gegensatz zur aerologischen) Schwefelkohlenstoff als Hypsometersubstanz ausscheidet.

Der im Thermometerrohr angebrachte Temperaturfühler (s. Abschnitt 5) ist nur durch seine Zuleitungen gehalten und hängt frei im Dampfstrom, ohne mit den Rohrwänden in Berührung kommen zu können. Die lichte Weite des Thermometerrohres beträgt etwa 12 mm. Es ist in seinem unteren Ende im Siedegefäß leicht abgekrümmt, damit Spritzer der siedenden Flüssigkeit nicht an das Thermometer gelangen können.

Die elektrische Heizung gestattet auf einfache Weise eine automatische Regelung. Im Ausdehnungsraum ist ein Bimetall-Temperaturfühler so angebracht, daß er zur Hälfte im Dampfraum, zur Hälfte im Kühlraum hängt. Ein mit dem Bimetall gekoppelter Schalter schaltet einen geeigneten Bruchteil (10 bis 20%) der Heizleistung aus, wenn der Dampfspiegel über das planmäßige Niveau steigt, er schaltet denselben Bruchteil der Heizleistung wieder ein, wenn sich das Bimetall durch Absinken des Dampfspiegels abkühlt. Der zur Regelung zu benutzende Bruchteil der Heizleistung wurde durch Versuche bestimmt. Er genügt, um eine gleichmäßige Funktion des Hypsometers zu gewährleisten, nachdem einmal die annähernd richtige Heizleistung eingestellt worden ist. Es besteht keine Schwierigkeit,

diese primitive Regeleinrichtung durch eine genauere stetig wirkende zu ersetzen.

Die Verbindung des Ausdehnungsraumes zur Außenluft wird durch ein Druckausgleichsrohr vermittelt. Dieses Rohr dient nur dem Druckausgleich, eine regelmäßige Strömung durch dasselbe existiert nicht, da nach Einstellung des Dampfspiegels alle verdampfte Substanz bei normalem Betrieb im Kühlraum wieder kondensiert. Nur durch Diffusion kann ein geringer Teil der Substanz nach außen gelangen. Bei Verwendung des Hypsometers bei starkem Wind, auf Bergen oder in schnell bewegten Fahrzeugen wird die Druckausgleichsleitung an eine statische Drucksonde angeschlossen, so daß dann der Luftdruck mit der Genauigkeit gemessen wird, mit der die Drucksonde selbst den statischen Druck erfaßt.

### 5. Probleme der Temperaturmessung

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, beträgt die Änderung der Siedetemperatur mit dem Luftdruck bei den hier in Betracht gezogenen Substanzen zwischen 0,03 und 0,04° C pro Millibar Druckänderung. Die Bestimmung des Luftdruckes auf  $\frac{1}{10}$  mb setzt also eine Genauigkeit der Temperaturmessung auf 0,003 bis 0,004° C voraus.

Um die Schwierigkeiten der Temperaturmessung mit Quecksilberthermometer zu umgehen, wurden bei den hier besprochenen Versuchen als Temperaturfühler Halbleiterthermometer benutzt, wie sie in jüngerer Zeit mehrfach untersucht worden sind (10): Stäbchen oder Röhren aus keramischer Masse (Titandioxyd, Uranidioxyd und ähnlich sich verhaltende Stoffe). Benutzt wurden Thermometer verschiedener Herkunft. Einen Begriff von Größe und Aussehen solcher Thermometer gibt Abbildung 2.

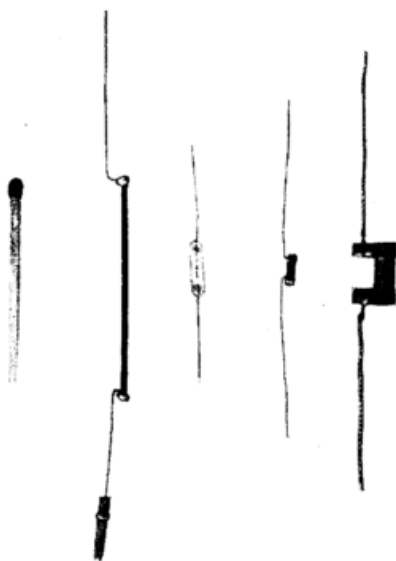


Abb. 2  
Verschiedene Formen von Halbleiterthermometern (zum Größenvergleich ist links ein Streichholz mit abgebildet).

Die Temperaturcharakteristik des Widerstands der Halbleiterthermometer kann durch die Formel ausgedrückt werden

$$\log R = \frac{K}{T} + C,$$

wobei K und C annähernd konstant sind. Der Temperaturkoeffizient des Widerstandes ändert sich also reziprok zum Quadrat der absoluten Temperatur. Der Widerstand und sein Temperaturkoeffizient fallen beide stark mit ansteigender Temperatur. Die Konstanten K der hier verwendeten Thermometer lagen zwischen 800

und 1600. Bei den empfindlicheren Thermometern, die für die Luftdruckmessung am Boden benutzt wurden, betrug der Temperaturkoeffizient bei 132° C etwa 2,2% pro Grad C und der Widerstand 460 Ohm.

Schaltet man zwei derartige Thermometer in zwei einander gegenüberliegende Zweige einer Wheatstoneschen Brücke, so ergibt 0,1 mb Luftdruckänderung eine Änderung von rund  $6,6 \cdot 10^{-5}$  des Thermometerwiderstandes, d. i. rd.  $3 \cdot 10^{-2}$  Ohm. Bei einem Thermometerstrom von  $2 \cdot 10^{-4}$  Amp im 460-Ohm-Thermometer tritt an der Brückendiagonale eine Spannung von rund  $6 \cdot 10^{-6}$  Volt auf, die durch ein geeignetes Nullgalvanometer angezeigt werden muß. Die Luftdruckablesung selbst geschieht durch Ablesen des Meßrheostaten, dessen Einstellung gleich in Luftdruckwerten beziffert werden kann und dessen Widerstand geändert wird, bis das Brückengalvanometer stromlos ist.

Unter den Fehlermöglichkeiten ist besonders der Stromwärme Beachtung zu schenken.

Bei Quecksilberthermometern für hypsometrische Druckmessung ist die Reproduzierbarkeit der Anzeige wegen der durch die große Quecksilbermenge und die enge Kapillare bedingten Alterungserscheinungen nicht gut. Gelbke (7) gibt als normalen Gang 0,6 mb in 6 Monaten an. Zwei Halbleiterthermometer wurden ein halbes Jahr lang der bei diesen Messungen benutzten geringen Belastung ausgesetzt, in dieser Zeit konnte kein merklicher Alterungsgang festgestellt werden.

Die Eichung des Hypsometers geschieht am vorteilhaftesten direkt durch Vergleich mit der Druckanzeige eines Normalbarometers. Es ist vielleicht sogar möglich, das Gerät, soweit seine Konstruktion es gestattet, unter Verwendung geeichter Platinwiderstandsthermometer und entsprechend genauer Widerstände zur Gewinnung verbesserter Dampfdruckwerte zu benutzen.

Die Anzeigegenauigkeit der ganzen Anordnung kann durch folgende Fehler beeinträchtigt werden:

- Mangelnde Reinheit der Siedeflüssigkeit. Dieser Fehler erscheint bei allen in Tabelle 1 angegebenen Substanzen vermeidbar.
- Kaltlufteinbrüche und Überhitzung. Diese beiden Fehler werden durch die beschriebenen Konstruktionsmerkmale vermieden.
- Die Differenz des Gewichtes der über dem Thermometer ruhenden Dampfsäule bis zum Dampfspiegel gegenüber der Außenluft bewirkt bei der schwersten hier betrachteten Substanz (Tetrachlorkohlenstoff) bei 10 cm Höhendifferenz einen Fehler von 0,05 mb. Dieser Fehler spielt im allgemeinen keine Rolle, kann aber auch durch eine konstante Korrektur eliminiert bzw. eingeeicht werden.
- Fehler des Thermometers. Nach den bisherigen Erfahrungen kann angenommen werden, daß Alterungseffekte keinen merklichen Einfluß haben.
- Die Anzeigegenauigkeit des Nullgalvanometers und die Genauigkeit des Meßwiderstandes können im Rahmen der Anforderungen der Luftdruckmessung stets so gehalten werden, daß ihre Fehler gegenüber einem Fehler von  $\pm 0,1$  mb klein sind.

### 6. Erfahrung mit hypsometrischen Luftdruckmessungen bei Radiosondenaufstiegen

Von besonderer Bedeutung ist die hypsometrische Luftdruckmessung für die Aerologie. Für Messungen durch Radiosonden (11) kommt von vornherein das Quecksilberbarometer nicht in Frage.

Bei den hier zu beschreibenden Versuchen wurde das Prinzip der amerikanischen Radiosonde (13) benutzt,

bei der ein Dezimeterwellensender der Frequenz 403 MHz durch eine Tonfrequenz zwischen 0 und 200 Hz frequenzmoduliert wird. Die Tonfrequenz entsteht als Kippschwingung in einem Relaxationskreis, dessen frequenzbestimmendes Glied ein Widerstand ist. Ein dargestellt ist, dient zur Messung der Lufttemperatur, ein elektrolytischer Widerstand zur Messung der Luftfeuchtigkeit.

Die Umschaltung von einem der genannten Widerstände zum andern erfolgt durch einen Kontaktarm, der auf einer Kontaktleiste gleitet. Auf dieser sind abwechselnd Verbindungen zu den verschiedenen Widerständen angebracht. Der Kontaktarm ist mit der Barometerdose, die den Luftdruck mißt, verbunden. Jeder Stellung des Kontaktarmes auf der Leiste entspricht ein bestimmter Luftdruck. Für jede der etwa 80 bis 150 Umschaltungen, die im Laufe eines Aufstieges erfolgen können, ist der entsprechende Luftdruck durch eine Eichkurve festgelegt.

Die Funkausstrahlung der Radiosonde wird an der Bodenstation empfangen und die Modulationsfrequenz einem Frequenzschreiber zugeführt. Das Bild der so entstehenden Registrierung zeigt Abb. 5, wobei allerdings statt der Registrierung einer Feuchtigkeitsmessung bereits die eines Hypsometers aufgenommen wurde.

Der wahrscheinliche Fehler der Luftdruckmessung wird für die amerikanische Radiosonde mit  $\pm 6$  mb, der der Temperaturmessung mit  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  angegeben. Für andere Konstruktionen sind die Fehlergrenzen jedenfalls nicht wesentlich enger. Für die meteorologische Verwertung der von der Radiosonde gelieferten Daten ist insbesondere die Genauigkeit der Luftdruckmessung nicht befriedigend. Die Fehler der Vidiedose, die heute praktisch von allen Radiosonden als Druckmeßelement verwendet wird, wurden oben bereits erwähnt (2).

Abgesehen von der grundsätzlichen Bedeutung dieser Fehler ist bei dem großen Druckmeßbereich (von 1000 bis rund 1 mb), der jetzt von aerologischen Druckmeßgeräten verlangt wird, ein dem Absolutbetrage nach konstanter Fehler kaum tragbar, weil einer konstanten Druckänderung bei zunehmender Höhe rasch wachsende Höhenunterschiede entsprechen. Während die Meßgenauigkeit am Boden noch etwa  $\pm 5\%$  beträgt, ist die relative Ungenauigkeit der Luftdruckmessung in 15 km Höhe schon  $\pm 5\%$ , in 30 km Höhe  $\pm 50\%$

Die Bestimmung des Luftdruckes aus der Siedetemperatur hat den Vorteil, daß die Änderung der Siede-

temperatur mit dem äußeren Druck (s. S. 4), ebenso wie die Abnahme des Luftdruckes mit der Höhe durch eine logarithmische Funktion dargestellt wird. Der relative Fehler der Luftdruckmessung mittels Hypsometer wächst also bei abnehmendem Druck nur langsam an. Für Schwefelkohlenstoff, die Substanz, mit der die weiter unten beschriebenen Versuche zum größten Teile durchgeführt worden sind, ist der relative Fehler der Druckmessung in Abhängigkeit vom Druck selbst in Abbildung 3 dargestellt. Dabei ist eine Temperaturmeßgenauigkeit von  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  angenommen worden. Diese Annahme entspricht ungefähr der Genauigkeit, die bei den unten beschriebenen Versuchen erreicht wurde und bedeutet gleichzeitig eine Meßgenauigkeit für den Luftdruck am Erdboden, die mit  $\pm 6,2$  mb etwa der der aerologischen Barometerdosen entspricht. In Abbildung 3 ist zum Vergleich die relative Meßgenauigkeit der Vidiedose eingezeichnet, ausgehend von einem wahrscheinlichen Fehler von  $\pm 6$  mb (konstant über den ganzen Aufstieg). Die hypsometrische Messung zeigt sich vom Boden bis etwa 4 km Höhe um einen geringen Betrag schlechter, dagegen in 18 km Höhe schon um den Faktor 10, in 30 km Höhe um den Faktor 100 überlegen. Die Faktoren ändern sich natürlich, wenn man hinsichtlich der Ausgangsgenauigkeiten etwas geänderte Werte benutzt, erhalten bleibt jedoch stets das Ansteigen der Fehlergeraden der Vidiedose unter  $45^\circ$  und der relativ flache Verlauf der schwach gekrümmten Kurve für den Relativfehler des Hypsometers.

Den ersten Vorschlag zur Verwendung des Hypsometers bei der aerologischen Luftdruckmessung machte wohl G. S t ü w e, woraufhin die Versuche des Verfassers 1934/35 durchgeführt wurden (5). Später hat B. S c h r ö d e r (13) auf die Vorteile einer Verwendung des Hypsometers bei Radiosondmessungen hingewiesen. Seit 1948 wurden auch in Amerika Versuche zur hypsometrischen Druckmessung bei Radiosonden gemacht (8).

Die hypsometrische Methode konnte allerdings mit der Druckmessung durch Vidiedose erst in Konkurrenz treten, nachdem die Möglichkeit einer brauchbaren elektrischen Temperaturmessung eine Meßgenauigkeit von  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  erreichbar machte.

Bei den hier vorgenommenen, wie auch bei den amerikanischen (8) Versuchen zur aerologischen Luftdruckmessung wurde Schwefelkohlenstoff als Siedeflüssigkeit benutzt. Diese Wahl wurde (s. Tabelle 1) durch seinen bequem gelegenen Siedepunkt nahegelegt. Wegen der relativ geringen Temperaturdifferenz gegen die Außenluft ist wenig Heizenergie erforderlich. Sein Schmelzpunkt liegt genügend tief, um eine Kondensation in fester Form auszuschließen, seine Dichte ist genügend groß, so daß kein „Kaltlufteinbruch“ befürchtet zu werden braucht. Seine Nichtleitereigenschaft ermöglicht die Verwendung des Halbleiter-Temperaturfühlers ohne besondere Isolierung.

Es wurden 24 Versuche mit Schwefelkohlenstoff und einer mit Tetrachlorkohlenstoff als Hypsometersubstanz durchgeführt. Bei letzterem Versuch wurden zur Erzielung eines brauchbaren Frequenzbereiches zwei in Serie geschaltete Temperaturmeßelemente verwendet. Da der Temperaturkoeffizient des Widerstandes mit zunehmender Temperatur erheblich sinkt, ist der Tetrachlorkohlenstoffversuch ungenauer als die übrigen. Im übrigen ergab er dieselben einwandfreien Resultate. Die Siedesubstanz (zwischen 100 und 170 g) befand sich in einem normalen Thermosgefäß von  $\frac{1}{2}$  Liter Inhalt, das an der Radiosonde befestigt war (Abbildung 4). Die Substanzmenge könnte bei weniger behelfsmäßiger Anordnung und Verwendung kleinerer Thermosgefäße bedeutend herabgesetzt werden. Bei den ersten durchgeführten Versuchen entwich der Dampf der Siedesubstanz durch ein leichtes Ventil ins Freie, nachdem er das

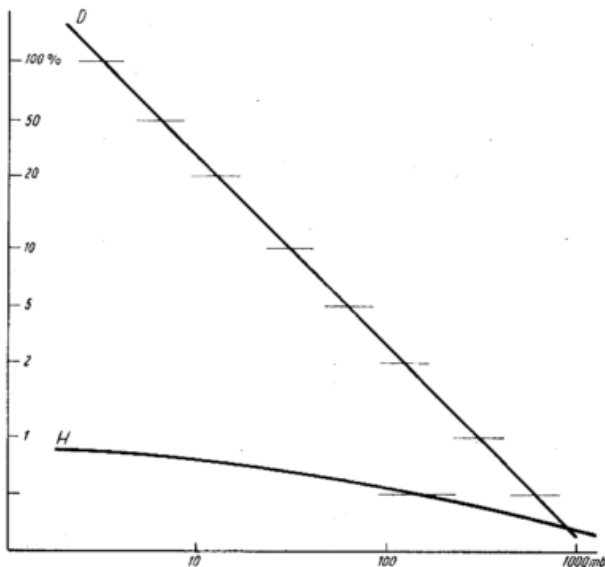


Abb. 3  
Relativer Fehler der aerologischen Luftdruckmessung in Abhängigkeit vom Luftdruck.  
D: Vidiedose (Genauigkeit  $\pm 6$  mb)  
H: Hypsometer (Temperaturmeßgenauigkeit  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ )

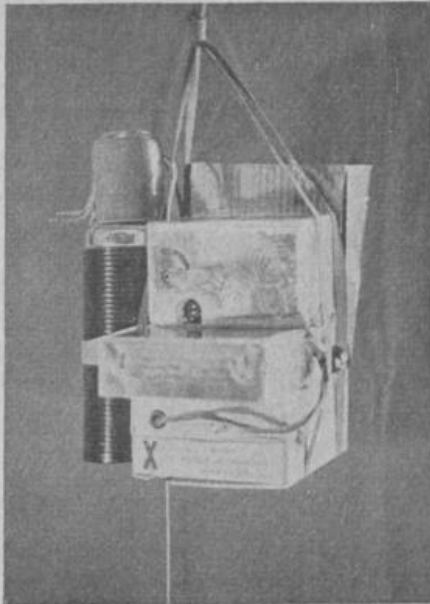


Abb. 4  
Amerikanische Radiosonde mit angebautem Hypsometer

Thermometerrohr durchströmt hatte, bei allen späteren wurde eine Einrichtung, wie sie in Abbildung 1 gezeigt wurde, benutzt.

Die Hypsometerflüssigkeit wurde vor dem Start der Radiosonde mittels einer kleinen Akkumulatorenbatterie durch einen in die Flüssigkeit hineingehängten Widerstandsdraht bis zum Sieden erwärmt. Diesen Vorgang des Vorheizens zeigt Abbildung 5 ganz unten am Ende der Siedetemperaturkurve. Man erkennt deutlich das Ansteigen der Temperatur bis zu dem bei Bodenluftdruck zunächst konstanten Siedepunkt. Beim Start wurde die Heizung abgenommen. Bei richtig bemessener Menge der Siedeflüssigkeit genügt deren Wärmekapazität, um das Sieden während des Aufstiegs bei immer geringer werdendem Luftdruck aufrechtzuerhalten. Die pro Zeiteinheit verdampfte Substanzmenge hängt von der Geschwindigkeit der Änderung des Luftdrucks und damit von der Steiggeschwindigkeit des Ballons ab, da die jeweils vorhandene Menge der Siedeflüssigkeit genügend Wärmekapazität besitzen muß, um außer den unvermeidlichen Wärmeübergangsverlusten hinreichend Wärme abgeben zu können, um einen Dampfstrom durch das Thermometerrohr aufrechtzuerhalten. Andererseits würde eine zu große Menge Siedeflüssigkeit die verdampfte Substanzmenge so stark ansteigen lassen, daß ein innerer Überdruck im Thermometerrohr den angezeigten Druck gegenüber dem Druck der Außenluft zu hoch erscheinen läßt. Die Wahl der Substanzmenge ist daher durch das Verhältnis der Verdampfungswärme zur spezifischen Wärme der Flüssigkeit und durch die äußere Wärmeableitung für jedes aerologische Hypsometer und jede Substanz festgelegt.

Die Halbleiterthermometer wurden vor dem Aufstieg an drei Fixpunkten mit einem von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geeichten Quecksilberthermometer verglichen: Bei der Siedetemperatur von Schwefelkohlenstoff, abhängig vom jeweiligen Luftdruck bei etwa 44° C, bei der Umwandlungstemperatur von Natriumsulfat (32,38° C) und beim Eispunkt. Die Übereinstimmung mit der von amerikanischer Seite herausgegebenen Soll-Eichkurve erwies sich als vollständig. Wie sich später zeigte, ergab sich der größte Teil des Fehlers der Messungen durch die Ungenauigkeit des Frequenzmessers, der im Maximum eine Gesamtabweichung von 0,4° C verursachte. Diese Fehler ließen sich jedoch durch Nacheichung des Frequenzschreibers mit einem Tonfrequenznormal ausschalten. Die Genauigkeit der Mes-

sung der Siedetemperatur kann unter Ausschaltung des systematischen Anteils des Recorderfehlers auf  $\pm 0,2^{\circ}$  C geschätzt werden.

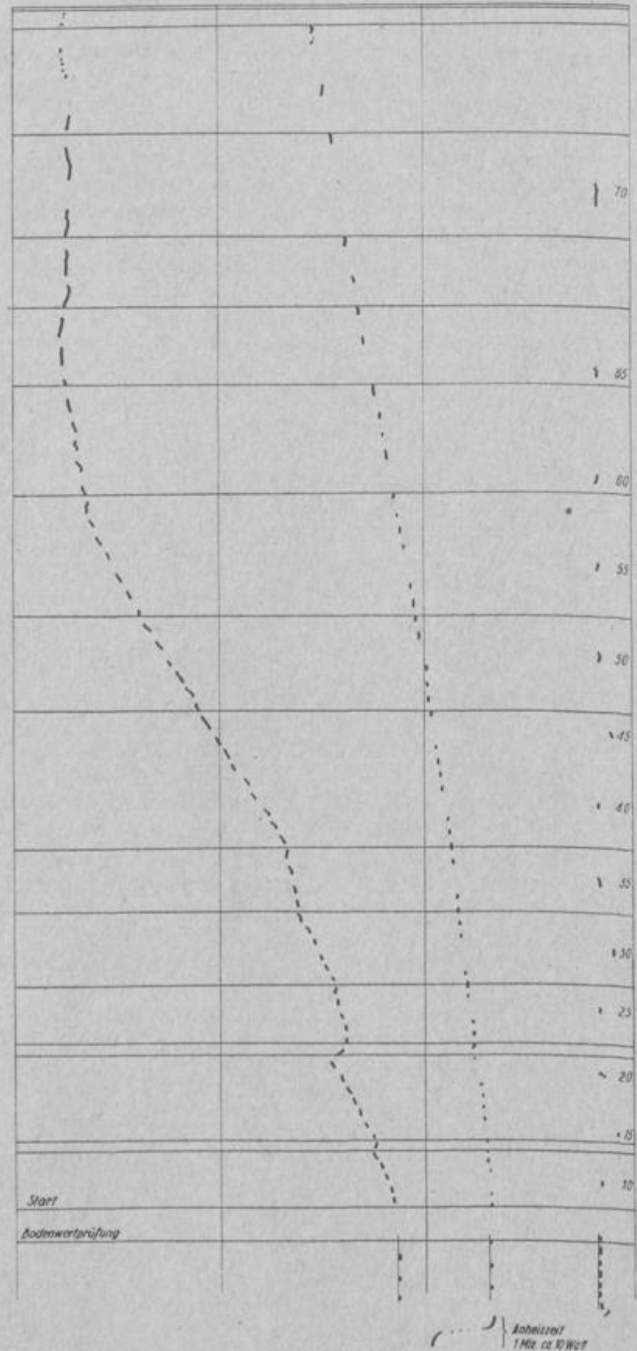


Abb. 5  
Registrierung eines Radiosondenaufstiegs mit Luftdruckmessung mittels Hypsometers und Vidiedose.  
4. Hypsometeraufstieg München-Riem, 7. 12. 1949 10.17 GCT  
Bodenwerte: 956.4 mb, Temperatur 11.1 / 9.0° C,  
Feuchte 76%, Wind 230° 3,1 m/s, 5/8 sc 1/8 ac 1/8 cs.  
Der Aufstieg wurde bis zum Platzen des Ballons ausgewertet.

Eine der so gewonnenen Registrierungen ist in Abb. 5 abgebildet. Sie zeigt einen Aufstieg vom 7. 12. 1949. Die Zeit schreitet von unten nach oben fort. Die Unterbrechungen der Registrierkurven selbst geben die Zeitpunkte der von der Vidiedose bewirkten Umschaltungen an, jeder Umschaltung ist durch eine hier nicht abgebildete Eichkurve ein bestimmter Druckwert zugeordnet. Die kurzen Stücke der Registrierung am rechten Rande des Registrierpapiers dienen der Identifizierung der Umschaltungen mit den Punkten der Eichkurve und der Kompensation vom Sendergang verursachter Frequenzänderungen.

Die Registrierung beginnt unten mit der Aufzeichnung der Temperatur des Hypsometerthermometers während der Anheizperiode. Das Thermometer wird von Zimmertemperatur bis zum Siedepunkt des Schwefelkohlenstoffs erwärmt. Weiter oben folgt der Vergleich der von der Radiosonde gelieferten Maßwerte mit den durch das übliche Instrumentarium ermittelten Werten von Luftdruck (rechts) und Lufttemperatur (links) am Boden vor dem Start, gekennzeichnet durch das Wort Bodenwertprüfung. Die nächste waagrecht durchgezogene Gerade gibt den Zeitpunkt an, zu dem der Ballon losgelassen wurde. Die von dem mit „Start“ bezeichneten Zeitpunkt ausgehende, weiter links verlaufende Kurve gibt den Temperaturverlauf während des Aufstiegs wieder. Man erkennt die im Verlauf des Aufstiegs (von rechts nach links) abnehmende Temperatur, die wechselnden Gradienten, eine bei etwa 2000 m Höhe liegende Temperaturumkehr von rund 5° C (etwa 6 Minuten nach dem Start) und den allmählich erfolgenden Übergang von der Troposphäre zur Stratosphäre (etwa 26 Minuten nach dem Start beginnend). 43½ Minuten nach dem Start wurde der Aufstieg durch Platzen des Ballons beendet. Die weiter rechts verlaufende unterbrochene Kurve stellt die Registrierung der Siedetemperatur von Schwefelkohlenstoff dar. Daß für den überstrichenen Druckbereich nur ½ der Schreibbreite ausgenutzt wurde, beruht auf der Charakteristik der Halbleiterthermometer. Zur Zeit der Durchführung des Versuches standen Thermometer mit größeren Widerstandskoeffizienten noch nicht zur Verfügung. Eine Feuchtigkeitsregistrierung wurde bei diesem Aufstieg nicht vorgenommen.

Die Auswertung der Registrierung der Siedetemperatur geschah graphisch nach der von H. v. S i e m e n s (9) angegebenen Dampfdruckformel für Schwefelkohlenstoff:

$$\log p \text{ mm} = -\frac{1578.8}{T} + 1.75 \log T - 0.003874 T + 4.67948,$$

die zum Gebrauch auf Millibar umgerechnet wurde. Tabelle 2 gibt einige Zahlenwerte des Dampfdrucks und der erreichbaren Druckmeßgenauigkeit (Temperaturfehler ± 0,2° C).

Tab. 2 Luftdruck und Siedetemperatur von Schwefelkohlenstoff

Siedetemperatur °C	Luftdruck mb	Empfindlichkeit mb/°C	Relative Genauigkeit der Druckmessung bei Temperaturmeßgenauigkeit ± 0,2° C
47	1032		
40	822	30	± 6,6 ‰
30	579	24	6,9
20	396	18	7,4
10	263	13	7,9
0	169	9,4	8,7
-10	104	6,5	9,5
-20	61,6	4,2	10,1
-30	34,7	2,7	11,2
-40	18,7	1,6	12,0
-50	9,34	0,94	13,2
-60	4,41	0,49	14,2
-70	1,91	0,25	15,8

Die hier verwendete Apparatur gestattet gleichzeitig an demselben Ballon zwei völlig voneinander unabhängige Luftdruckmessungen durchzuführen. Man gewinnt auf diese Weise eine bisher in der Aerologie nicht gekannte Möglichkeit, die Eigenschaften der verschiedenen Luftdruckmesser gegeneinander zu kontrollieren. Die zahlenmäßigen Resultate des in Abbildung 5 gezeigten Aufstiegs gibt die Tabelle 3 wieder. Sie enthält die aus-

gewerteten Luftdrucke sowohl der Vidiedose wie des Hypsometers für die in der Abbildung durch waagerechte Linien hervorgehobenen Niveaus.

Tab. 3 Beispiel einer Hypsometermessung (Vergleich Hypsometer-Vidiedose nach dem Aufstieg vom 7. 12. 1949)

Druckanzeige Dose	Druckanzeige Hypsometer	Differenz
956 mb	(956) mb	—
871	871	0
856	854	- 2
738	744	+ 6
724	728	+ 4
653	659	+ 6
571	574	+ 3
518	524	+ 6
403	411	+ 8
334	335	+ 1
255	260	+ 5
200	206	+ 6
166	172	+ 6
147	152	+ 5
124	128	+ 4
103	105	+ 2

Ein Teil der genannten 24 Versuche kann wegen Mängeln der Radiosonde-Apparatur, die mit dem Hypsometer nicht in Beziehung stehen, mangelnder Innehaltung der vorstehend erläuterten Bedingungen (zuviel Siedeflüssigkeit bzw. zu enges Ventilrohr bei den ersten Versuchen) oder wegen zu geringer erreichter Höhe zur Beurteilung der Methode nicht herangezogen werden. Zwölf technisch einwandfreie Versuche erreichten den Druck von 200 mb (rund 11 km Höhe). Ihre Ergebnisse gestatten einen Vergleich mit der Druckanzeige der Vidiedose am gleichen Ballon. Die Differenz Hypsometer — Vidiedose ist in Tabelle 4 wiedergegeben.

Tab. 4

Druckdifferenzen zwischen Hypsometer und Vidiedose am gleichen Ballon

Druckniveau	200 mb	100 mb	50 mb	30 mb	20 mb
Versuch Nr. 4 v. 7. 12. 49	+ 6	+ 2	—	—	—
Versuch Nr. 9 v. 6. 3. 50	+ 2	—	—	—	—
Versuch Nr. 10 v. 3. 3. 51	+ 14	—	—	—	—
Versuch Nr. 13 v. 7. 4. 51	+ 9	+ 13	+ 4	+ 9	—
Versuch Nr. 14 v. 26. 4. 51	+ 5	+ 6	+ 5	+ 6	—
Versuch Nr. 17 v. 25. 8. 51	+ 4	+ 4	+ 4	+ 2	—
Versuch Nr. 18 v. 12. 9. 51	+ 2	+ 2	+ 6	+ 6	+ 9
Versuch Nr. 19 v. 21. 9. 51	- 6	0	+ 2	+ 2	+ 1
Versuch Nr. 20 v. 24. 9. 51	0	- 2	- 3	- 3	—

Der Versuch Nr. 21 vom 19. 11. 51 wurde mit Tetrachlorkohlenstoff als Siedesubstanz durchgeführt, um festzustellen, ob bei Wechsel der Substanz irgendwelche unerwarteten Effekte auftraten. Das war nicht der Fall, lediglich die Differenz gegenüber der Druck-

dosenanzeige war vergrößert (bei 250 mb: 22 mb, bei 200 mb: 23 mb, bei 150 mb: 18 mb, bei 100 mb: 15 mb, bei 70 mb: 12 mb), was sich zwanglos auf die bei der höheren Siedetemperatur geringere Empfindlichkeit der Halbleiterthermometer zurückführen läßt.

Die Versuche Nr. 22 und 23 wurden mit zwei voneinander unabhängigen Hypsometern, die sich am gleichen Ballon befanden, durchgeführt. Es liegen also für diesen Aufstieg drei gleichzeitige Luftdruckmessungen vor: die zweier Hypsometer und die der Druckdose. Die Ergebnisse sind für die ausgewerteten Niveaus, die sich leicht vermehren ließen, in Tabelle 5 dargestellt. Die Differenzen liegen fast ausnahmslos in dem zu erwarteten Streubereich.

Die Mehrzahl der Differenzen aller angeführten Versuche, ebenso wie in den auswertbaren Bereichen der nur teilweise brauchbaren Versuche, die hier nicht im einzelnen angeführt wurden, ergeben eine schwache positive Abweichung des Hypsometers gegenüber der Druckdose. Trotzdem diese zum großen Teil in den gemeinsamen Streubereich fällt, ist ein Verdacht auf eine systematische Natur des Effektes nicht von der Hand zu weisen. Wenn auch nicht sicher ist, ob nicht die benutzten Vidiedosen einen kleinen systematischen Restfehler besitzen, kann man versuchen, den Effekt auf Grund der möglichen Fehlerquellen des Hypsometers zu erklären.

Tab. 5 Ergebnisse eines Aufstiegs mit drei voneinander unabhängigen Luftdruckmeßorganen (2 Hypsometer und Vidiedose). 5. 12. 51, 1204 GCT

Druckanzeige Vidiedose D mb	Druckanzeige Hypsometer I HI mb	Druckanzeige Hypsometer II HII mb	HI-D	HII-D	HI-HII
886	880	882	- 6	- 4	- 2
775	782	784	+ 7	+ 9	- 2
684	674	678	-10	- 6	- 4
648	643	645	- 5	- 3	- 2
600	605	609	+ 5	+ 9	- 4
426	432	431	+ 6	+ 5	+ 1
380	385	380	+ 5	0	+ 5
335	343	334	+ 8	- 1	+ 9
305	306	302	+ 1	- 3	+ 4
260	261	257	+ 1	- 3	+ 4
194	195	192	+ 1	- 2	+ 3
147	147	143	0	- 4	+ 4

Bei der Diskussion des Hypsometers für die Messung des Luftdruckes am Boden sind eine Reihe derartiger Fehlermöglichkeiten besprochen worden. Da die für aerologische Zwecke in Frage kommende Genauigkeit um mehr als eine Größenordnung geringer ist als die für eine Luftdruckmessung am Erdboden, sind auch die Anforderungen an die Temperaturmessung entsprechend geringer. Dementsprechend sind die weiter vorn angegebenen Sicherungsvorkehrungen mit einfacheren Mitteln durchführbar. Bei dem hier praktisch benutzten Verfahren liegt die größte Ungenauigkeit im Frequenzschreiber. Sieht man hiervon ab, so würde die Benutzung von Halbleiterthermometern mit größeren Temperaturkoeffizienten unter Innehaltung eines genügend geringen Meßstromes gestatten, die Genauigkeit zu steigern. Mit Rücksicht auf die vorstehend angedeuteten Grenzen ist eine Fälschung der Druckmessung durch die bei den Bodenmessungen diskutierten Effekte bei richtigen Dimensionen des Apparates und der Siedeflüssigkeit kaum zu erwarten.

Eine Fehlermöglichkeit, die bei allen aerologischen Temperaturmessungen eine große Rolle spielt, ist die

Anzeigeverzögerung der Thermometer. Die hier verwendeten Halbleiterthermometer stellen sich bei der beim Radiosondeaufstieg herrschenden Ventilation von 5—6 m/s bis herab zu Luftdrücken von der Größenordnung 50 mb innerhalb 2 Sekunden praktisch völlig auf die Lufttemperatur ein. Diese Angabe für die Thermometerträgheit gilt jedoch nur für die Messung der Lufttemperatur und ist für die Betrachtung der Trägheit der Temperaturmessung im Hypsometer nicht zu gebrauchen. Man muß vielmehr einen grundsätzlichen Unterschied in Betracht ziehen zwischen der bei der Lufttemperaturmessung vorliegenden Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion ohne Phasenänderung der an der Übertragung beteiligten Substanz und dem Wärmeübergang durch kondensierenden Dampf. Bei Wärmeübergang durch reine Leitung bzw. Konvektion spielt die Trägheit eine analoge Rolle wie bei der Messung der Lufttemperatur. Die Wärmeübertragung durch Kondensation (resp. Verdampfung) an der Thermometeroberfläche ist ganz wesentlich wirksamer. Man kann den Einfluß dieser Tatsache abschätzen durch Vergleich der Wärmemengen, die ein Thermometer, das um einen bestimmten geringen Betrag wärmer ist als der umgebende Dampf, an diesen abgibt und derjenigen, die es aus derselben Dampfmenge aufnimmt, wenn es um den gleichen Betrag kälter ist. Da es sich um eine geringe Temperaturdifferenz handeln soll, bei der die Strömung um das Thermometer praktisch ungeändert bleibt, kann man auch gleiche Dampfmenngen, die mit dem Thermometer in Wärmeaustausch treten, zugrunde legen. Führt man diese Abschätzung für Schwefelkohlenstoff bei normaler Siedetemperatur (also unter Bodendruck) durch, so erweist sich die Wärmeübertragung durch Kondensation um mehr als eine Größenordnung wirksamer als die Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion. Zieht man außerdem die Tatsache in Betracht, daß einer bestimmten Temperaturdifferenz in großen Höhen eine immer größer werdende Dampfdruckdifferenz entspricht, so sieht man, daß ein Nachhinken des Hypsometerthermometers als Fehlerquelle praktisch nicht in Frage kommt, solange der Dampf eine höhere Temperatur besitzt als das Thermometer. Das ist beim aerologischen Aufstieg normalerweise der Fall, da ja die Wärmequelle in der Siedeflüssigkeit innerhalb des Isoliergefäßes liegt, vom Thermometer fort durch die Zuleitungen jedoch dauernd Wärme abströmt. Wesentlich ist, daß der Dampf hinsichtlich der Temperatur des Thermometers immer gesättigt bleibt.

Kritisch werden die Verhältnisse, wenn das Thermometer aus irgendeinem Grunde Übertemperatur besitzt und dabei nicht von Flüssigkeit bedeckt ist. In diesem Falle geht der Temperaturausgleich nur langsam vor sich, da der Wärmeübergang nur durch Leitung und Konvektion geschieht. Da die Ventilation des Thermometers, um einen Druckabfall durch Strömungseffekte zu vermeiden, nur schwach sein darf, kann besonders in Bodennähe der Fall eintreten, daß das Thermometer auf die dem Bodendruck entsprechende Siedetemperatur erwärmt war, sich nach dem Start bei zu geringer Wärmeableitung nicht rasch genug abkühlt, abtrocknet und dann so lange eine zu hohe scheinbare Siedetemperatur zeigt, bis die überschüssige Wärme bei abnehmender Außentemperatur durch die Zuleitungen des Temperaturfühlers abgeflossen ist. Praktisch kann man diesem Effekt leicht entgegenzutreten durch genügend große Dimensionierung der Zuleitungsdrähte zum Thermometer und gegebenenfalls durch Überziehen des Thermometers mit einem Strumpf, der genügend Kondensat aufnimmt, das durch seine Verdampfungswärme bei kurzzeitig auftretender Übertemperatur für raschen Ausgleich sorgt. Der Strumpf darf natürlich nicht durch chemische oder Kapillarkräfte den Gleichgewichtsdampfdruck merklich ändern.

## 7. Ausblick

Aus der Möglichkeit einer hypsometrischen Messung des Luftdrucks ergeben sich einige aussichtsreiche Schlussfolgerungen für die künftige Radiosondenentwicklung:

Es muß möglich sein, unter Verwendung gleichartiger Meßelemente für Luftdruck und Temperatur eine vollelektrische Radiosonde zu bauen, bei der kein mechanisch wirkendes Bauelement einen Einfluß auf die Messung ausüben kann. Als Meßelemente könnten Halbleiterthermometer oder andere trägheitsarme elektrische Meßfühler Verwendung finden. Bei dieser Radiosonde würden Luftdruck und Temperatur (sowie gegebenenfalls eine Bezugsgröße zur Festlegung von Nullpunktänderungen) gleichzeitig und gleichwertig gemessen (z. B. als Modulationsfrequenzen einer Trägerfrequenz aufgeprägt). Die Übertragung der Meßwerte könnte im Gegensatz zu den sonst bisher gebauten Sonden praktisch stetig erfolgen. Nach Trennung der Modulationsfrequenzen im Empfänger besteht die Möglichkeit einer unmittelbaren Registrierung der Temperatur in Abhängigkeit vom Luftdruck. Diese könnte so erfolgen, daß eine ganze Reihe bisher notwendiger Arbeitsgänge überhaupt fortfallen würde: Eingehen in Eichkurven, Zeichnen des Aufstiegs und Auswahl der Hauptdruckflächen. Es könnten vielmehr die Hauptdruckflächen und die den Aufstieg charakterisierenden markanten Punkte der Registrierung unmittelbar entnommen werden, was Sicherheit, Genauigkeit und Geschwindigkeit der Auswertung erheblich erhöhen würde. Die technisch mögliche Koppelung eines Integrierwerkes (mechanisch oder elektrisch) mit der Registriervorrichtung würde sogar eine vollautomatische Berechnung der Geopotentialwerte ermöglichen und damit die aerologischen Meßergebnisse der meteorologischen Praxis erheblich rascher zur Verfügung stellen können, als das zur Zeit möglich ist.

Weiter erscheint wesentlich, daß eine derartige Radiosonde keinerlei mechanischer Vorbereitung zum Aufstieg bedarf, da ja keine beweglichen Teile mehr die Messung beeinträchtigen können. Auch eine individuelle Eichung der Geräte wird voraussichtlich nicht mehr erforderlich sein, da der elektrische Abgleich der mit bestimmter Toleranz hergestellten gleichartigen Temperaturmeßelemente für Temperatur, Siedetemperatur und Feuchttemperatur (oder Taupunkt) sauber genug durchgeführt werden kann, um die Innehaltung einer brauchbaren Fehlergrenze zu garantieren.

## 8. Literatur

(1) Kleinschmidt, E.: Handbuch der meteorologischen Instrumente. Leipzig (1935).

- (2) Schachinger, E.: Die Temperaturkorrekturen von Aneroiden neuerer Bauart. *Ann. Hydrogr.* **69**, 121 (1941).
- Machens, R.: Über die Temperaturkorrekturen selbstfedernder Barometerdosen. *Diss. Univ. Berlin* (1941).
- (3) Chree, C.: *Phil. Mag.* March 1898, 305.  
Mohn, H.: Das Hypsometer als Luftdruckmesser. *Vidensk. Selsk. Skrifter.* **1**, Nr. 2 (1899).
- Hecker, O.: Bestimmung der Schwerkraft auf dem Atlantischen Ozean. (Referat) *Z. Instrum.* **23**, 282 (1903).
- Samel, P.: Verwendbarkeit von Siedethermometern und Quecksilberbarometern zur Höhenmessung. *Diss. Univ. Marburg* (1910).
- (4) Grützmaker, F.: Untersuchungen und Verbesserungen Fuess'scher Siedeapparate zum Höhenmessen. *Z. Instrum.* **17**, 193 (1887).
- (5) Müller, H. G.: Erfahrungen mit dem Hypsometer als Druckmeßgerät im Flugzeug. *Erf. Ber. Dt. Flugwetterd.* **4**, Sbd., 39 (1935).
- (6) Koppe, H.: Unveröff. Ber. Inst. Luftfahrtmeßtechnik und Flugmeteorologie TH Braunschweig (1942).
- (7) Gelbke, W.: Zum Einsatz meteorologischer Instrumente an Bord von Schiffen. *2. Mitt.* (1946).
- (8) General Electric Rev. Januar 1949. Unveröff. Laboratoriumsber. *Gen. Electr. Camp.* Febr. 1948.
- Barrett, E. W., Herndon, L. R. u. Carter, H. J.: A preliminary note on the measurement of water-vapor content in the middle stratosphere. *J. Meteor.* **6**, 367 (1949).
- dieselben: Some measurements of the distribution of water-vapor in the stratosphere. *Tellus* **2**, 302 (1950).
- (9) Siemens, H. v.: Über Dampfdruckmessungen und Thermometrie bei tiefen Temperaturen. *Ann. Phys.* **4**, **42**, 871 (1913).
- (10) Weise, E.: *Z. Techn. Phys.* **18**, 467 (1937).  
Becker, J. A., Green, C. B. u. Pearson, G. L.: The Bell System. *Techn. J.* **26**, 170 (1947).
- (11) Weickmann, L. u. Keil, K.: Über Radiosondenkonstruktionen. Berlin (1937), Nachtrag (1939).
- (12) Schulze, R.: Zum Einsatz der Radiosonde in der Meteorologie. *Ann. Meteor.*, **1**. Beih. (1950).
- (13) Diamond, H.: Hinman, W. S. jr., Dummore, F. W. u. Lapham, E. G.: An improved radio-sonde and its performance. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **21**, 325 (1940).





