

Prüffeld und Meßobjekt für Radiosonden

Allgemeines

Die freie Atmosphäre besitzt eine Feldverteilung mit Quellen und Senken bestimmter Meßgrößen. Eine Auswahl dieser Meßgrößen wird routinemäßig als Festzeitmessung in Form von Vertikalschnitten erfaßt. Als Meßgeräte dienen hierzu überwiegend Radiosonden, die an einem Ballon hängend frei aufsteigen und sich im allgemeinen auf die Bestimmung der Meßgrößen Luftdruck, Temperatur und Wasserdampfgehalt beschränken. Gemessen wird also eine zeitliche Folge von Wertetripeln. Die Aufstiegsstellen repräsentieren hierbei Gitterpunkte in der Ebene (wenn man die Höhenunterschiede der Aufstiegsstellen vernachlässigt), deren Lage in bezug auf ein Koordinatensystem nicht ganzzahlige Koordinatenwerte aufweist. Unter Anwendung der statischen Grundgleichung werden Höhen aus den gemessenen Werten errechnet und hieraus das Feld der Höhen gegebener isobarer Flächen dargestellt. Berücksichtigt man die Vertikalschnitte aller Gitterpunkte mit dem

gleichen Gewicht, so muß die Summe der Quadrate der Differenzen zwischen der durch Ausgleichen gewonnenen Feldverteilung und den Meßwerten zu einem Minimum werden.

Bezogen auf einen Vertikalschnitt vom Boden bis 30 km Höhe dauert ein Aufstieg mit dem Meßgerät etwa 100 min. Während dieser Meßdauer wird ein Meßbereich von etwa 100 K für die Temperatur, 1000 mbar für den Luftdruck und fast 100% relativer Feuchte durchlaufen. Die Auswertung wird vorgenommen, als wenn für die Dauer der Messung von 100 min der atmosphärische Zustand über der Aufstiegsstelle als Gitterpunkt „eingefroren“ erhalten bliebe. Das gilt sicherlich in guter Näherung wegen der vorgegebenen Erhaltungstendenz des Zustandes, zumal das aufsteigende Ballongespann mit dem Höhenwind driftet.

Aerologische Meßverfahren lassen sich in allgemeiner Form folgendermaßen beschreiben. Ein Trägerkörper

mit Meßfühlern für den Luftdruck, die Temperatur und den Wasserdampf wird mit einem wasserstoffgefüllten Gummiballon in die Höhe geschickt, wobei sich die Gegebenheiten der Temperatur, der Luftdichte, des Wasserdampfes und der äußeren Strahlung teils monoton, teils diskontinuierlich ändern. Dabei soll jeder Meßfühler nur diskret auf eine bestimmte Veränderliche ansprechen. Bei vorgegebenen Meßfühlern können die Arbeitsbedingungen des Meßvorgangs innerhalb enger Grenzen nur dadurch beeinflußt werden, daß man die Ventilation, das heißt die Steiggeschwindigkeit frei wählt.

Jeder Meßfühler wird vor dem Aufstieg üblicherweise isoliert unter Laboratoriumsbedingungen geeicht. Isoliert soll bedeuten, daß der Fühler für die Temperatur im Zuge der Eichungen schrittweise lediglich Temperaturänderungen ausgesetzt wird. Die Temperatur des Fühlers wird als Analogsignal (zum Beispiel eine Frequenz oder ein Code-Zeichen) erfaßt. Abweichend von den natürlichen Meßbedingungen wird die Eichung noch dazu in einem Flüssigkeitsbad durchgeführt, nicht in Luft. Eine entsprechende Festmengeneichung wird auch für die Meßfühler des Luftdrucks und des Wasserdampfes realisiert. Die tatsächlichen „Prüffeldbedingungen“ werden also bei der Eichung nicht beachtet.

Zum besseren Verständnis der Umweltbedingungen des Aufstiegs, die sich vor allem auf die Temperaturmessungen auswirken können, sollen im folgenden einige hydrodynamische Betrachtungen gegeben werden.

Hydrodynamik des Radiosondegespanns

Das Gespann als hydrodynamischer Meßkörper

Abb. 2.1 zeigt die im Deutschen Wetterdienst übliche Gespannanordnung für aerologische Aufstiege. Zusätzlich zum Ballon mit Radiosonde befindet sich am Gespann ein System von Tripelspiegeln für die Ballonortung mit dem Radargerät. Die Flächen des Radarreflektors sind entweder mit aluminisiertem Papier oder mit einem Drahtnetz bespannt.

Um das hydrodynamische Verhalten des Ballongespanns während des Aufstiegs in mathematische Form zu kleiden, soll nur der Fall des Radarreflektors mit Aluminiumfolie behandelt werden. Die Kantenlänge der quadratischen Fläche beträgt 90 cm. Für die weiteren Ansätze wird die vereinfachende Voraussetzung gemacht, daß eine gegenseitige Beeinflussung des Strömungsfeldes zwischen Ballon und Reflektor nicht gegeben ist, das heißt die Widerstandsbeiwerte beider Körper sollen sich so verhalten, als wenn sie getrennt voneinander vorhanden wären. Außerdem wird der Flächenwiderstand der Radiosonde vernachlässigt; sie wird nur als Masse berücksichtigt.

Eine Normalverteilung der Steiggeschwindigkeit ist naturgemäß nur in grober Annäherung zu erwarten. Änderungen der Mikrostruktur der Luft (ihres Turbulenzgrades), vertikale Luftbewegungen sowie Änderungen der Widerstandseigenschaften des Gespanns werden sich gleichermaßen in einer Abweichung der beobachteten Steiggeschwindigkeit von einer statistisch oder theoretisch gewonnenen Normalverteilung äußern. Bal-

lone sind schlecht definierte hydrodynamische Widerstandskörper, da sie während des Aufstiegs unsystematisch pulsierend ihre Form und damit ihren Widerstandsbeiwert ändern. Als definiert sind dagegen die Radarreflektoren mit einer Fläche von 0,81 m² quer zur Bewegungsrichtung des Gespanns anzusprechen. Da der Widerstandsbeiwert einer quadratischen Platte etwa 5,5 mal größer als derjenige einer Kugel ist, kann vermutet werden, daß die Unsystematik des Ballons durch die definierte Form des Reflektors gedämpft wird.

Der freie Auftrieb A ist gegeben als die Differenz der Masse der vom Ballon verdrängten Luft und der des Gespanns. Die Spannung der Ballonhülle erhöht zwar etwas den Druck des Wasserstoffs im Balloninnern. Durch die Einstrahlung von außen wird der Ballon sich dagegen gering ausdehnen. Man kann entsprechend in erster Näherung annehmen, daß das Verhältnis der Dichten Luft zu Wasserstoff über den ganzen Aufstieg konstant ist, und zwar gleich 1,4. Es sei ρ die Luftdichte, g die Schwerebeschleunigung, M die Masse des Gespanns (Ballon, Wasserstoff, Radiosonde und Zubehör), r der Radius des als kugelförmig angenommenen Ballons, dann gilt für den freien Auftrieb des Gespanns

$$A = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \left(1 - \frac{1}{1,4} \right) - M g \quad [2.1]$$

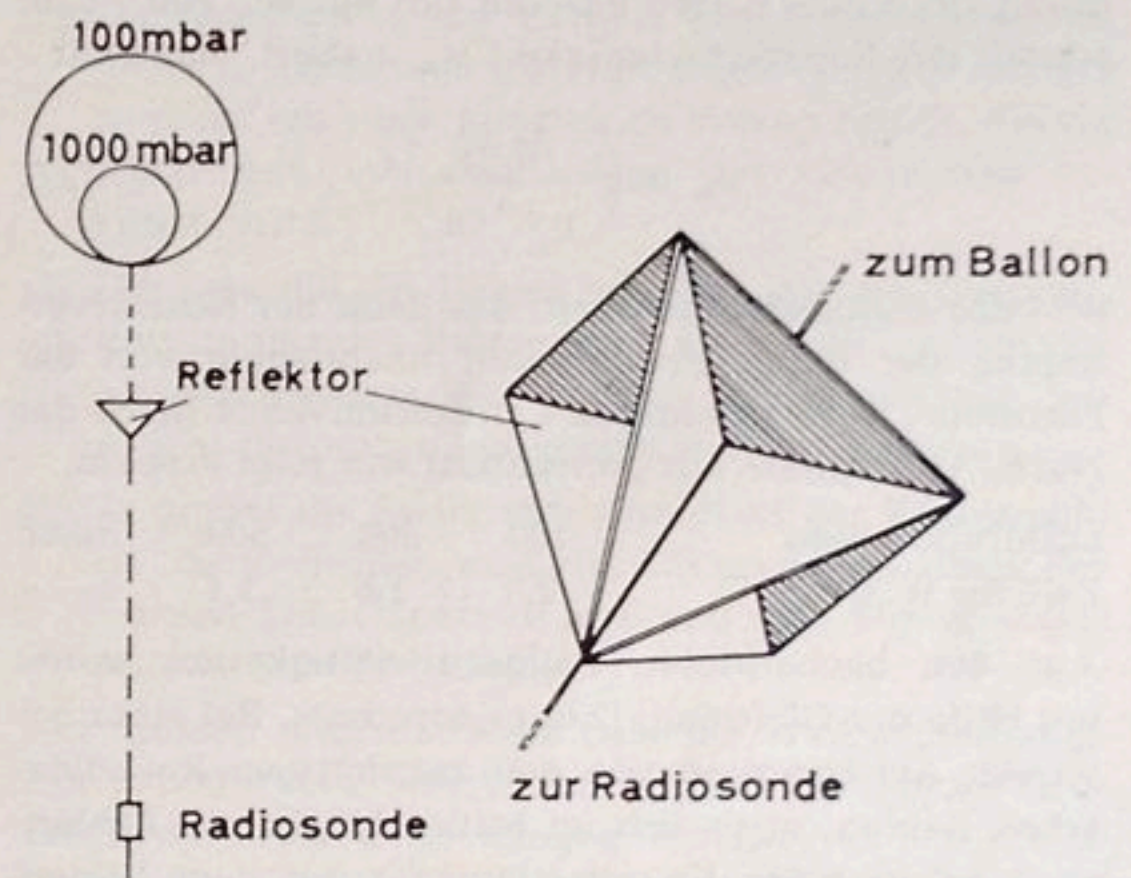


Abb. 2.1
Aerologisches Aufstiegsgerät mit Ballon, Radiosonde und Radarreflektor.

Der Widerstand W eines Körpers in strömendem Medium ist gleich Staudruck $\frac{\rho}{2} v^2$ (v gleich der Steiggeschwindigkeit des Ballons) multipliziert mit der Fläche F (Ballonquerschnitt πr^2 sowie quadratische Fläche des Radarreflektors R^2) und dem dimensionslosen Faktor des Widerstandsbeiwertes c (c_B und c_R getrennt für Ballon und Reflektor). Der Widerstand ergibt sich somit zu

$$W = \frac{\rho}{2} v^2 (\pi r^2 c_B + R^2 c_R) \quad [2.2]$$

Für stationäres Steigen gilt $A = W$. Es seien r_0 und ρ_0 der Ballonradius und die Luftdichte am Boden, dann erhält man aus Gleichung [2.1] für beliebiges ρ bei konstant angenommenem g

$$r^3 = r_0^3 \frac{\rho_0}{\rho} \quad [2.3]$$

und endlich unter Gleichsetzung von Gleichung [2.1] und [2.2] sowie Auflösung nach v

$$v = \left(\frac{7,79 r_0^3 \rho g - 2 Mg}{\rho \left[\pi r_0^2 \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{\frac{2}{3}} c_B + R^2 c_R \right]} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [2.4]$$

Bei früheren Aufstiegen wurden keine Fallschirme verwendet, falls Radarreflektoren aus Aluminiumfolie vorlagen, die eine ausreichende Bremswirkung auf das fallende Gespann nach Platzen des Ballons ausüben. Bei dem frei fallenden Gespann ist also überwiegend nur der Widerstandsbeiwert c_R des Reflektors wirksam. Für die Fallgeschwindigkeit des Gespanns gilt dann unter Vernachlässigung des freien Auftriebs

$$\frac{dv}{dt} = g - c_R \frac{R^2 \rho v^2}{2 M} \quad [2.5]$$

Die sich durch Integration ergebende Lösung der Gleichung stellt eine Kurve dar, die sich mit der Zeit t sehr schnell der Endgeschwindigkeit v_∞ nähert, und zwar

$$v_\infty = \left(\frac{2g M}{\rho R^2 c_R} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [2.6]$$

9/10 der Endgeschwindigkeit, das heißt der Normalverteilung der Fallgeschwindigkeit unabhängig von der Platzhöhe, wird in einigen Luftdruckniveaus (nach der Norm-Atmosphäre aus ρ ermittelt) wie folgt erreicht

Luftdruckniveau	100	200	500	mbar
Zeit für 9/10 v_∞	2,0	1,6	1,1	s

Aus den beobachteten Fallgeschwindigkeiten wurde mit Hilfe der Gleichung [2.6] c_R errechnet. Bei einer gewissen Abhängigkeit von den zugehörigen Reynoldszahlen ergab sich im Mittel 1,3. Dieser Zahlenwert ist in guter Übereinstimmung mit dem Widerstandsbeiwert für quadratische Platten, der in der Literatur mit 1,1 angegeben wird. Setzt man $c_R = 1,3$ in Gleichung [2.4] ein, so erhält man für c_B aus gemessenen Daten der Steiggeschwindigkeit den Wert 0,24. Für eine Kugel findet man in der Literatur in dem fraglichen Reynolds-Bereich übliche Werte um 0,20.

Zur theoretischen Abschätzung des Einflusses von Schwankungen der Widerstandsbeiwerte c_B und c_R auf die Normalverteilung der Steiggeschwindigkeit v bilden wir das vollständige Differential der Gleichung [2.4] mit Variierung von c_B und c_R und erhalten als relative Ab-

weichung $\frac{dv}{v}$ bei vorgegebenem $\frac{dc_R}{c_R}$ beziehungsweise $\frac{dc_B}{c_B}$ von 20%

	1000	500	100	mbar
$\frac{dc_R}{c_R} = 20\%$	5,7	4,7	2,4	$\frac{dv}{v} \%$
$\frac{dc_B}{c_B} = 20\%$	4,4	5,3	7,5	$\frac{dv}{v} \%$

Der wachsende Einfluß von $\frac{dc_B}{c_B}$ mit abnehmender Luftdichte erklärt sich durch den proportional $\left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{\frac{2}{3}}$ größer werdenden Ballonquerschnitt.

Hydrodynamische Mikrostruktur

Die in der Praxis beobachteten Abweichungen der Steiggeschwindigkeit von einer Normalverteilung sind größer, als es eine 20%-Schwankung der Widerstandsbeiwerte bei vorgegebenem freiem Auftrieb verursachen könnte. Das darf nicht überraschen. Vertikalbewegungen der Atmosphäre, Wasserablagerungen auf dem Ballon, aber auch diskrete Mikrostrukturen der Luft können Abweichungen in der Steiggeschwindigkeit erzeugen.

Der Parameter „Mikrostruktur“ im weitesten Sinne scheint darüber hinaus auch eine Bedeutung zu haben für den Mechanismus des Wärmeübergangs zwischen einem Temperaturmeßfühler und der umgebenden Luft. Das gilt vor allem dann, wenn die charakteristische Abmessung der Mikrostruktur in derselben Größenordnung liegt wie die Geometrie des Meßfehlers einschließlich seiner Schutzvorrichtung gegen den Störeffekt der Sonnenstrahlung. Ein Zusammenhang zwischen Mechanismen des Wärmeübergangs von Temperaturfühlern und der hydrodynamischen Struktur der umgebenden Luft ist durchaus plausibel. Denkt man zum Beispiel an ein Bimetall als Meßfühler, so hat man den Fall einer Platte oder eines aufgeschnittenen Zylinders, die gegenüber der strömenden Luft Wärme austauschen. Kenngröße für den Austausch ist die Grenzschicht. Der Wärmeübergang ist umgekehrt proportional der Dicke der Grenzschicht, die ihrerseits durch die vorgegebene Mikrostruktur des strömenden Mediums Luft bestimmt wird (mehr oder weniger laminar oder turbulent). Dieses Problem wird gesondert bei der Diskussion der Meßunsicherheit der Temperaturmessung in der freien Atmosphäre behandelt.

Lange bevor Radiosonden eingesetzt wurden, fand man, daß die Aufstiegs geschwindigkeit von frei steigenden und expandierenden Gummiballonen, die man zur Bestimmung des Höhenwindes mit optischen Theodoliten verwandte, bei vorgegebenem freiem Auftrieb von der horizontalen Windgeschwindigkeit abhängt.

Bereits 1917 teilte R. WENGER das Ergebnis von Berechnungen mit, aus denen hervorging, daß die Abweichung der Steiggeschwindigkeit des einzelnen Aufstiegs von der mittleren Steiggeschwindigkeit des Kollektivs aller betrachteten Aufstiege eine Funktion der Windgeschwindigkeit ist. Die Tabelle gibt einen Auszug seiner Ergebnisse.

Windgeschwindigkeit m/s	Abweichung der Steig- geschwindigkeit vom Mittel m/s
0,0 ... 0,2	-0,55
4,1 ... 6,0	-0,23
8,1 ... 10,0	0,00
12,1 ... 14,0	+0,10
16,1 ... 18,0	0,44
20,1 ... 22,0	1,12

R. WENGER gab eine plausible Erklärung für diese Korrelation. Er wies darauf hin, daß der Turbulenzgrad strömender Luft im allgemeinen mit zunehmender Windgeschwindigkeit steigt. Hierdurch bedingt nimmt der Widerstandsbeiwert des Ballons geringere Werte an, und er steigt schneller. Dieser Effekt wurde angeführt, weil wir später hieraus Analogieschlüsse auf Anomalien des Wärmeübergangs bei Thermometerfühlern ziehen wollen.

Es sei an dieser Stelle noch hinzugefügt, daß ein frei steigender Ballon nicht streng ein idealer Meßfühler für die Bestimmung des Höhenwindes ist. Sein hydrodynamisches Eigenverhalten kann in kleinem Maßstab Windverteilungen vortäuschen, die nicht reell sind. Diese Vorgänge sind vor einiger Zeit in den USA näher untersucht worden. Man legte in vertikaler Anordnung bis etwa 10 km Höhe Rauchspuren an und bestimmte aus ihrer Abdrift durch photogrammetrische Vermessung den Höhenwind. Gleichzeitig ließ man Ballone steigen, die mit üblichen Verfahren geortet wurden. Das hieraus gewonnene Windprofil wies Differenzen gegenüber der Rauchspurmethode auf. Bessere Übereinstimmungen konnte man erzielen, indem man die Oberfläche der Ballone durch Anbringung kleiner spitzer Körper „aufraute“. Offensichtlich verhindert diese Maßnahme das Ausbilden unregelmäßiger kalottenartiger Grenzschichten, die durch ihr wechselndes Ausmaß ein hydrodynamisch definiertes Verhalten des Ballons stören.

Idealisierter Wärmeübergang an Thermometerfühlern

Die Behandlung von Gesetzmäßigkeiten des Wärmeübergangs zwischen dem Thermometerfühler einer Radiosonde und der umgebenden Luft soll zunächst den Fall einer geordneten, laminaren Strömung voraussetzen, also einer Strömungsform, die sicherlich in der Praxis nicht vorliegt. Wie sind die Arbeitsbedingungen für einen beliebigen Meßfühler zu sehen, der auf Grund seiner Geometrie und seiner Wärmekapazität eine merkliche Anzeigetragheit besitzt? Die innere Leitfähigkeit des Fühlers soll vernachlässigt werden. Außerdem wird vorausgesetzt, daß der Fühler sich mit der Umgebung im Strahlungsgleichgewicht befindet. Der Mechanismus des Wärmeübergangs wird also in vereinfachter Form lediglich durch Konvektion bestimmt.

Es sei ϑ_L die wahre Lufttemperatur, ϑ die vom Meßfühler angezeigte, der Trägheitsbeiwert in s. Dann gilt die Definitionsgleichung

$$\vartheta_L - \vartheta = \alpha \frac{d\vartheta}{dt} \quad [2.7]$$

Ferner sei γ der in der freien Atmosphäre vorgegebene Temperaturgradient in der Einheit $^{\circ}\text{C/s}$ (das heißt der

Gradient, wie er der Radiosonde auf Grund ihrer Steiggeschwindigkeit erscheint). Weiter sei ϑ_{L_0} die Lufttemperatur zur Zeit $t = 0$. Für die wahre Lufttemperatur zur Zeit t ergibt sich dann

$$\vartheta_L = \vartheta_{L_0} - \gamma t \quad [2.8]$$

Liegen Aufstiegsabschnitte zunehmender Temperatur vor, so gilt entsprechend $+\gamma t$. Kombiniert man Gleichung [2.7] und [2.8] und löst sie durch Integrieren, erhält man

$$\vartheta - \vartheta_L = (\vartheta_0 - \vartheta_{L_0}) \frac{-t}{e^{\alpha}} + \gamma \alpha (1 - e^{-\frac{t}{\alpha}}) \quad [2.9]$$

Diese Beziehung gilt nicht nur für die Temperaturmessung. Sie ist auf alle Zustandsgrößen anzuwenden, die einen Gradienten aufweisen, und die von trägen Meßfühlern gemessen werden, die durch ihre Trägheitsbeiwerte gekennzeichnet sind.

Mit wachsender Zeit t nimmt Gleichung [2.9] die Form an

$$\vartheta - \vartheta_L = \gamma \alpha \quad [2.10]$$

Hieraus lassen sich für die Temperaturmessung in der freien Atmosphäre einige wichtige Aussagen ableiten

- (1) Der vom trägen Meßfühler angezeigte Gradient γ ist für Abschnitte mit quasi konstantem α gleich dem wirklichen Gradienten.
- (2) Die Temperatur des Fühlers bleibt gegenüber der wahren Lufttemperatur für einen Bereich mit $\gamma \alpha \approx \text{const}$ um einen konstanten Betrag zurück, dessen Vorzeichen von demjenigen des Gradienten bestimmt wird.
- (3) Die Zeit, die der Fühler benötigt, um die Temperaturdifferenz des Betrages $\gamma \alpha$ zu durchheilen, beträgt α s. Mit anderen Worten: Der Fühler gibt zur Zeit $(t + \alpha)$ die wahre Lufttemperatur zur Zeit t an.
- (4) Je größer die Steiggeschwindigkeit der Radiosonde ist, desto größer wird die Differenz zwischen der wahren Lufttemperatur und der vom Fühler angezeigten.

Wir müssen noch die Mechanik des Wärmeübergangs näher betrachten, die funktionelle Verknüpfung des Trägheitswertes α zu einigen Parametern. Um diese Mechanik aufzuzeigen, soll vom Bimetallthermometer ausgegangen werden. Analoge Gesetzmäßigkeiten liegen auch für andere Meßfühler vor. Die einfache Geometrie des Bimetalls bietet sich hierfür wegen der Überschaubarkeit der Verhältnisse an. Außerdem war das Bimetallthermometer in der Vergangenheit der dominierende Fühler für die Temperaturmessung in vielen Radiosondentypen. Einige Systeme verwenden sie bis zum heutigen Tage.

Nach HERGESELLS Ansatz ist der Trägheitsbeiwert

$$\alpha \sim \frac{M c}{U O} \quad [2.11]$$

das heißt gleich der Masse M multipliziert mit der materialabhängigen spezifischen Wärme c . U ist der Wärmeübergang, O die Oberfläche des Fühlers.

M und O sind für ein gegebenes Bimetall konstant. Für ebene, flächenparallel angeströmte Platten ist \bar{U} proportional $\left(\frac{v x \varrho}{\mu}\right)^{0,5}$, wobei v die Ventilation ist, ϱ die Luftdichte und μ die — temperaturabhängige — dynamische Zähigkeit. x ist eine Koordinate, und zwar die Länge der Platte parallel zur Anströmrichtung. Andererseits ist die Dicke der laminaren Grenzschicht verhältnismäßig zu $\left(\frac{\mu x}{v \varrho}\right)^{0,5}$. Für die Länge $x = 1$ ist also der Wärmeübergang umgekehrt proportional der Grenzschichtdicke.

Die theoretischen Zusammenhänge wurden experimentell im Laboratorium überprüft, indem man Bimetalle verschiedener Materialstärken und Abmessungen unter vorgegebener Übertemperatur unterschiedlichen Kombinationen von Luftdichte und Ventilation aussetzte und

die Angleichung der Temperatur des Fühlers an diejenige der Luft thermoelektrisch überwachte. Das Ergebnis zeigte, daß die Genauigkeit der Gleichung [2.11] gering ist, so lange man nicht die Materialstärke δ des Bimetalls mit berücksichtigt. Reduziert man für einen praktischen aerologischen Aufstieg die spezifische Wärme c sowie die dynamische Zähigkeit μ auf eine mittlere Aufstiegstemperatur, so kann man das experimentelle Ergebnis vereinfacht als Zahlenwertgleichung schreiben

$$\alpha = K \delta \sqrt[5]{x} (v \varrho)^{-0,46} \quad [2.12]$$

Die Konstante K ist für $t = -25^\circ\text{C}$ gleich 177, wenn man δ und x in cm, v in m/s und ϱ in gcm^{-3} angibt. Für Zimmertemperatur wird K zu 194.

Im folgenden Abschnitt soll untersucht werden, wie sich Radiosonden im Prüffeld „Freie Atmosphäre“ verhalten.