

Flugzeugmessungen der horizontalen Temperaturstruktur in der unteren Atmosphäre mit einer Feintemperatur-Meßeinheit

Von M. REINHARDT und O. FRANZ

Flugwissenschaftliche Forschungsanstalt München (früher Deutsche Forschungsanstalt für Segelflug)
Vortrag am 8. OSTIV-Kongreß, Köln (Deutschland), Juni 1960

Im Rahmen mehrerer Forschungsaufgaben, die das Institut für Flugraumforschung der Deutschen Forschungsanstalt für Segelflug (jetzt: Flugwissenschaftliche Forschungsanstalt München e. V.) unter der Leitung von Prof. Dr. W. Georgii zu bearbeiten hatte, erwies es sich als notwendig, daß die Temperatur als einer der atmosphärischen Grundparameter genauer, d. h. mit größerer zeitlicher und empfindlichkeitsmäßiger Auflösung, registriert werden mußte. Dies führte zu der Entwicklung einer relativ einfachen Temperaturmeßeinheit, die im folgenden beschrieben wird und mit deren Hilfe zum Teil aufschlußreiche Messungen durchgeführt wurden; davon werden einige Beispiele gezeigt.

Folgende Grundforderungen waren gestellt: Absolute Genauigkeit, besser als $\pm 0,5^\circ\text{C}$, relative Genauigkeit, besser als $\pm 0,2^\circ\text{C}$, Einstellzeit für Vollausschlag bei Temperaturänderungen von $T = \pm 4,0^\circ\text{C}$ nicht größer als $1/10$ sec., leichte Handhabung, geringes Gewicht, kontinuierliche Registrierung auf einem Meßschrieb zusammen mit anderen Flugparametern wie Staudruck, statischer Druck, Vertikalbeschleunigungen usw., Anschluß an 24-V-Bordnetze, leichte Austauschbarkeit für jede Art von Segel- bzw. Motorflugzeug, und zusätzliche optische Ablesbarkeit der Momentantemperatur. Dies führte zur Zusammenstellung einer Meßeinheit, die aus 3 Grundeinheiten besteht (s. Abb. 1):

1. Temperaturfühler (Pt 100)
2. Meßbrücke
3. Registriereinheit (SFIM-Schreiber A 20) mit Fernbedienung

Als *Temperaturfühler* wurde wegen seiner absoluten Reproduzierbarkeit ein auf ein Glimmerkreuz frei gewickelter Platindraht von 0,07 mm Stärke mit einem Abstand von ca. 5 mm von Einzelwindung zu Einzelwindung gewählt. Das Glimmerkreuz ist in einem vielfach durchbohrten Zylinderrohr montiert, das von einem zweiten Rohr als Strahlungsschutz umgeben ist. Die Montage erfolgt an einer aerodynamisch möglichst ungestörten Stelle, vor allem weit entfernt von Abgasöffnungen und Schraubenstrahl.

Abb. 1 Feintemperatur-Meßeinheit, bestehend aus (v.l.n.r.): Temperaturfühler Pt 100, Meßbrücke, Fernbedienung für Schreiber, optischer Vielschreiber SFIM A 20

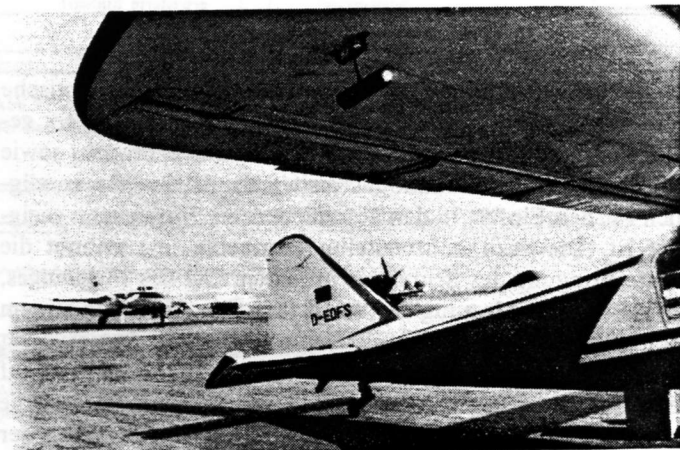
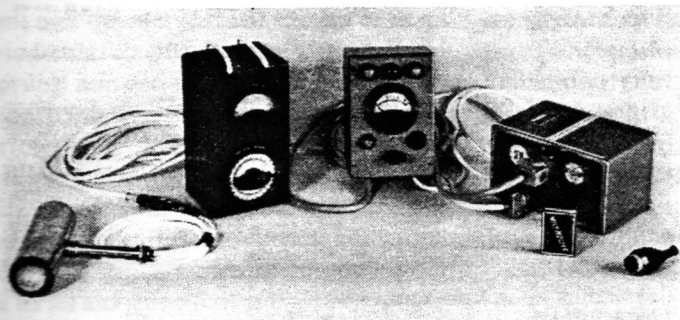


Abb. 2 Montage des Temperaturfühlers Pt 100 an der Tragfläche des Motorflugzeuges Do-27

Die *Meßbrücke* wurde zunächst so ausgelegt, daß mittels Handumschaltung ein Gesamtmeßbereich von $+40$ bis -60°C erfaßt wird, und zwar in Stufen zu je 4°C pro Einzelmeßbereich. Dies ist deswegen notwendig, um beim großen Gesamtmeßbereich von insgesamt 100°C eine ausreichende Auflösung zu erreichen. Gleichzeitig mußte darauf Rücksicht genommen werden, daß die Meßempfindlichkeit der Widerstandsbrücke nicht linear verläuft und in jedem Einzelmeßbereich auf die Skala des Anzeigeelementes abgeglichen werden muß. Eine gewisse Schwierigkeit besteht darin, daß sich bei normaler Brückenschaltung Anzeigegalvanometer und Registriergalvanometer gegenseitig beeinflussen und mechanische Erschütterungen des Anzeigegalvanometers als Meßwertänderung des Registriergalvanometers auftreten. Dies kann verhindert werden durch eine Doppelbrückenordnung, wie sie in Abb. 4 dargestellt ist.

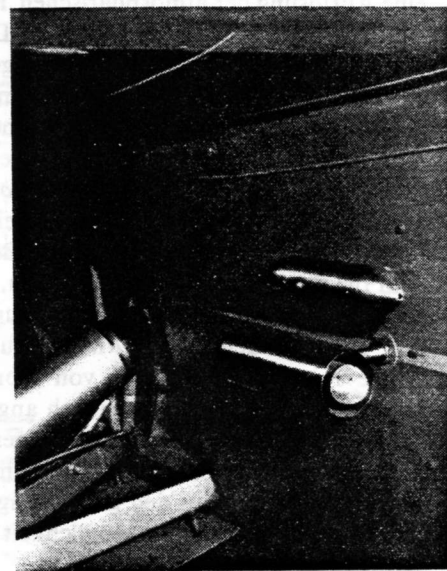


Abb. 3 Montage des Temperaturfühlers Pt 100 (untere Einheit) am Rumpf des Motorflugzeuges RW-3

Temperatur - Meßbrücke
 Meßbereich von -90°C bis +10°C
 unterteilt in 20 Bereiche zu je 5°C

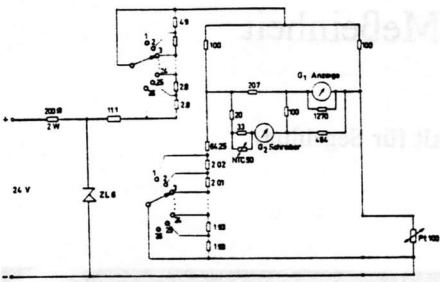


Abb.4 Schaltung der Meßbrücke (neue, von +40 °C auf -90 °C erweiterte Einheit)

Als *Registriereinheit* wurde der sehr handliche, optische Vielfachschreiber SFIM A 20 gewählt, der infolge seiner geringen Abmessungen, seines geringen Stromverbrauchs sowie seiner großen Auswahlmöglichkeiten der Meßwerke vorzüglich für den Einsatz in den verschiedensten Flugzeugen geeignet ist. Die dazu selbsterstellte Fernbedienung erlaubt die Unterbringung des Schreibers an jedem Ort des Flugzeuges, so z. B. für die Messung der Vertikalbeschleunigung in seinem Schwerpunkt. Mit der Fernbedienung kann der Papiervorrat im Schreiber kontrolliert werden; es können Zeitmarken auf den Schreiber gegeben werden, Kontrolllampen zeigen die richtige Funktion der automatischen Sekundenzeitmarke, der Handzeitmarke sowie der Lichtquellen an; außerdem erlaubt ein Schalter die Wahl von 3 verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten des Schreibers mit 0,25 mm/sec, 1 mm/sec und 5 mm/sec.

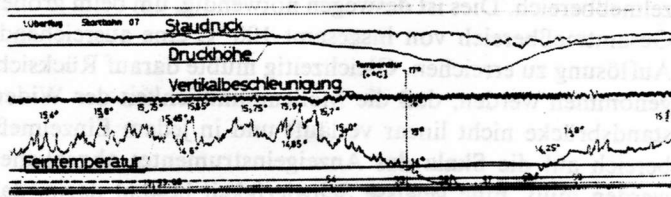


Abb.5 Originalregistrierung mit eingezeichnetem Temperaturmaßstab

Bei einer mittleren Fluggeschwindigkeit von 100 km/h läßt sich bei einer Einstellzeit des Galvanometers von ca. $1/10$ sec und bei der schnellen Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/sec eine Auflösung der atmosphärischen Temperaturelemente bis herab zu einer Größe von ca. 3 m Durchmesser erreichen. Natürlich ist damit noch nicht die eigentliche Mikrostruktur erfaßt, die ja herunterreicht bis zu Temperaturelementgrößen von wenigen Millimetern im Durchmesser (1) – es wird deswegen auch ausdrücklich nur von einer Temperaturfeinstruktur, nicht von einer Temperaturmikrostruktur gesprochen –; man hat jedoch mit dieser Meßeinheit eine Möglichkeit zur temperaturmäßigen Erfassung jener Bereiche, die maßgebend sind für die Bildung von Konvektion, von Wogen bzw. Wellen, atmosphärischen Zellularstrukturen u. a. m., also Bereiche, die heute dem Begriff «Mesostruktur» angehören.

Die Frage der Trennung von Horizontal- und Vertikalstruktur darf nicht als zu kritisch angesehen werden, da einmal das Verhältnis von Horizontalgeschwindigkeit zu Vertikalgeschwindigkeit sehr groß ist, zum anderen bei größeren Höhendifferenzen aus den gleichzeitig mitregistrierten Daten der Druckhöhe stets die Möglichkeit der Reduktion auf ein bestimmtes Niveau gegeben ist.

Das Problem der Staudruckerwärmung des Platindrahtes wurde untersucht; es wurde in der gewählten Anordnung des Meßelementes eine nahezu lineare Zunahme der Temperatur von $1/10$ °C pro 10 km/h im Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis 200 km/h gefunden, was ebenfalls mit Hilfe des gleichzeitig registrierten Staudruckes korrigiert werden kann. Die im folgenden gezeigten Registrierungsbeispiele wurden im wesentlichen einigen Flügen mit den beiden Motorflugzeugen RW-3-Multoplane und Dornier Do-27 entnommen. Von diesen beiden eignet sich das Flugzeug RW-3 besonders gut für Meßflüge innerhalb der Konvektionsschicht, d. h. für Flüge in der unteren Austauschschicht; es ist infolge seiner relativ geringen Flächenbelastung noch genügend feinfühlig, so daß es auch auf geringere Vertikalbeschleunigungen gut anspricht; die Do-27 mit ihrer höheren Flächenbelastung und ihrer höheren Fluggeschwindigkeit hingegen eignet sich mehr für Schnittflüge in der mittleren Troposphäre, also für Wellenmessungen.

In Abb.5 ist das Original eines Registrierstreifens dargestellt, in den der Temperaturmaßstab eingezeichnet ist; in seiner natürlichen Größe ist der Streifen 60 mm breit; 1 cm Registrierbreite entspricht darin etwa 1 °C; die Auswertegenauigkeit liegt damit bei einer Ablesegenauigkeit von 0,5 mm unter $1/10$ °C.

In den Registrierbeispielen (Abb. 6, 7, 8) sind nun Schnittflüge in verschiedenen Höhenstufen dargestellt, und zwar

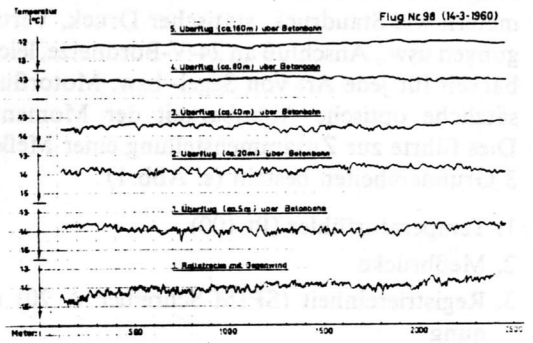


Abb.6 Temperaturregistrierung in verschiedenen Höhenstufen über der Betonstartbahn des Flughafens München-Riem

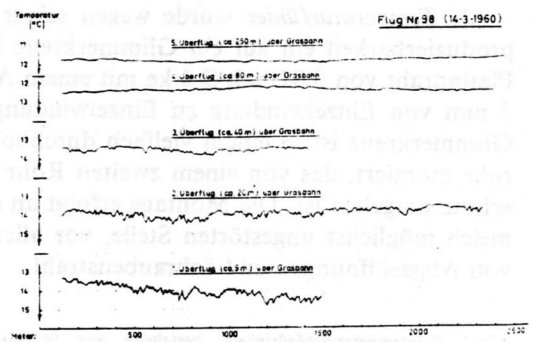


Abb.7 Temperaturregistrierung in verschiedenen Höhenstufen über der Grasstartbahn des Flughafens München-Riem

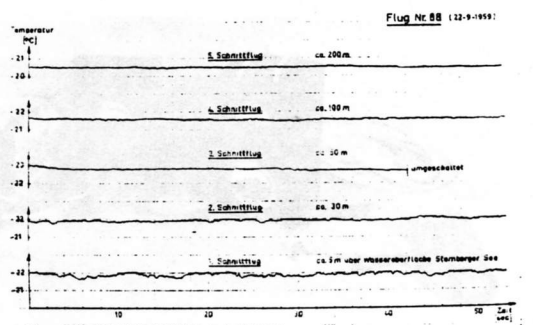


Abb.8 Temperaturregistrierung in verschiedenen Höhenstufen über dem Starnberger See

über der Betonstartbahn München-Riem, über der Grasstartbahn München-Riem und über dem Starnberger See. Es wurden dazu Tage einer Strahlungswetterlage mit gut ausgebildeter Konvektion in der Austauschschicht herausgesucht; außerdem wurde darauf geachtet, daß die Windrichtung stets parallel zur Flugrichtung gerichtet war und die Flugrichtung während der verschiedenen Höhenstufen nicht gewechselt wurde, was besonders in Anbetracht der Bodenordnung und damit der Größenbestimmung der Temperaturelemente wesentlich ist.

Die Auswertung zeigt, daß vor allem in den untersten Schichten starke Temperaturschwankungen auftreten, die z. B. auf der Betonstartbahn bis zu $1,5^{\circ}\text{C}$ auf 10 m Entfernung betragen können. Der quantenhafte Charakter nimmt – wie schon aus anderen Veröffentlichungen bekannt (2), (3) – mit der Höhe ab; Ausgleichs- und Mischungsvorgänge sorgen für einen Abbau der starken Temperaturgradienten, und nur einzelnen, energiereicheren Luftpaketen gelingt es, das Bodenturbulenzfeld zu verlassen, um als eigentliche Thermik den Bewegungsaustausch bis zur Inversion einzuleiten. Es kommt in den Originalregistrierungen weit besser zum Ausdruck als in den Auswertungen, daß die horizontalen Temperaturgradienten fast nie stetigen, sondern meist immer sprunghaften Charakter bis zur Höhe der Inversion zeigen. Diese «Sprungstellen» der Temperatur stimmen in vielen Fällen mit Änderungen der Vertikalgeschwindigkeit des Flugzeuges überein, d. h. das turbulente Bewegungselement des Aufwindes kann in seinen Ausmaßen und hinsichtlich seiner Grenzen in vielen Fällen mit dem Temperaturelement des Aufwindes identifiziert werden. Wenn es mit fortschreitender Meßtechnik gelingt, den Windvektor und seine turbulenten Schwankungen zusammen mit den Temperaturschwankungen vom Flugzeug aus zu bestimmen, dann wird es auch möglich sein, gewisse Korrelationsgrößen zwischen Temperatur- und Bewegungsgrößen in Abhängigkeit von der Höhe aufzustellen. Damit würde das Bild der Konvektion und ihres Ablaufes in der Austauschschicht weiter an Klarheit gewinnen.

Es scheint nach den bisherigen Messungen so zu sein, daß man eine Art Dreiteilung der Austauschschicht vornehmen kann, in eine Bodenschicht, in der die Schwankungsgrößen der Temperatur wie auch die der Bewegung beträchtlich sind; in eine mittlere Schicht, in der nach einer Aufwindformierung fast ausschließlich die Bewegungsgröße vorherrscht und die Übertemperatur im Aufwindgebiet kaum 1°C überschreitet, und in eine obere Schicht, die mit dem sog. «sub cloud layer» (4) übereinstimmt, in dem sich der Aufwind kurz vor dem Kondensationsstadium befindet und die Temperaturschwankungen wieder größer werden. Bezüglich der vielen Versuche, Aufwinde mit Hilfe einer reinen Temperaturdifferenzmessung zu lokalisieren, muß nach dem obigen gesagt werden, daß die Natur hier keine guten Angriffsmöglichkeiten bietet, da das Geschehen in der Konvektionsschicht nun einmal turbulent und quantenhaft ist. Fliegt der Segelflieger in einen Aufwindschlauch ein, dann trifft er am Rande einen Temperatursprung an, der ihm wohl eine bestimmte Indikation gibt; jedoch kann im nächsten Moment wieder ein Gegenanschlag erfolgen, da die Größe der Temperaturpakete in der Größenordnung der Flugzeugdimensionen liegt, solange sich das Segelflugzeug in den turbulenten Grenzschichten des Aufwindes befindet. Nur in sehr seltenen Fällen sind stetige Gradienten über eine größere Strecke vorhanden.

Es sei auf jeden Fall zum Trost gesagt, daß noch kein Segelflieger auf Grund der Verwendung eines Thermiksuchgerätes

auf der Basis der Temperaturdifferenzmessung Weltmeister wurde. Das schließt nicht aus, daß andere physikalische Ortungsmöglichkeiten eines Tages einfach und billig genug sein werden, um auch im Segelflugzeug Anwendung finden zu können.

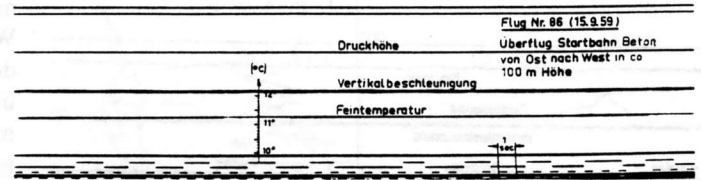


Abb. 9 Abendlicher Schnittflug bei völliger thermischer Lufruhe in ca. 100 m über der Betonstartbahn München-Riem

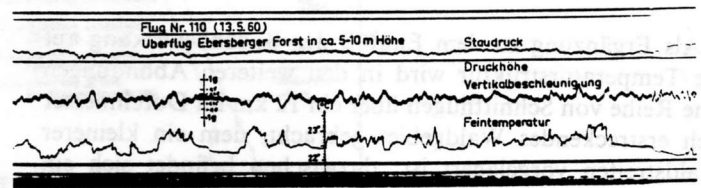


Abb. 10 Originalregistrierung eines Schnittfluges in 5–10 m Höhe über einem ausgedehnten Waldgebiet

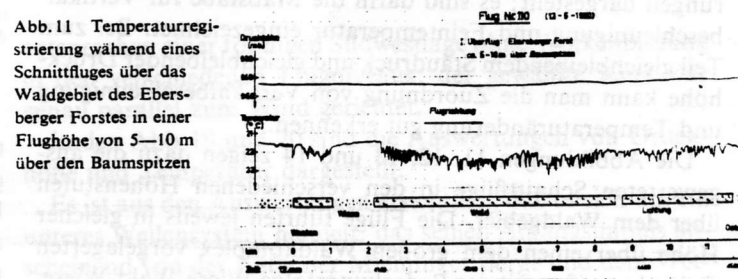
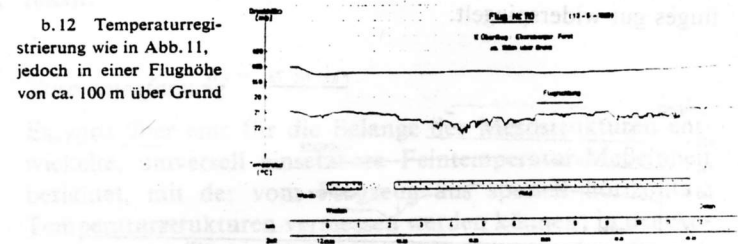


Abb. 11 Temperaturregistrierung während eines Schnittfluges über das Waldgebiet des Ebersberger Forstes in einer Flughöhe von 5–10 m über den Baumspitzen



b. 12 Temperaturregistrierung wie in Abb. 11, jedoch in einer Flughöhe von ca. 100 m über Grund

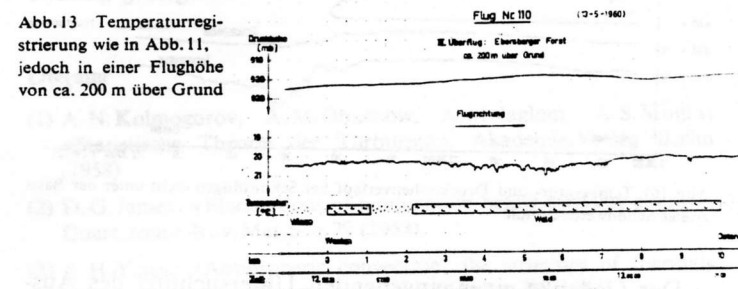


Abb. 13 Temperaturregistrierung wie in Abb. 11, jedoch in einer Flughöhe von ca. 200 m über Grund

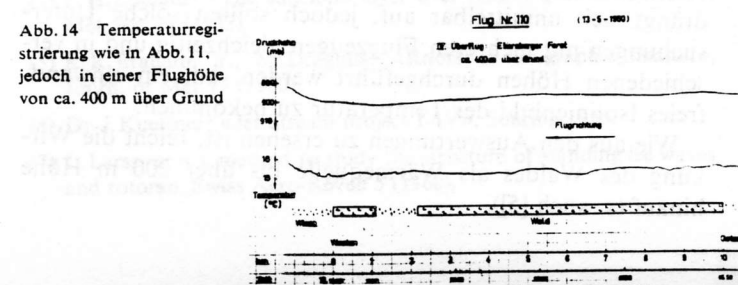


Abb. 14 Temperaturregistrierung wie in Abb. 11, jedoch in einer Flughöhe von ca. 400 m über Grund

Abbildung 9 zeigt zur Ergänzung einen abendlichen Schnittflug in ca. 100 m Höhe über der Startbahn München-Riem; der absolut geradlinige Verlauf der Feintemperatur weist auf eine völlig stabile Temperaturschichtung ohne Luftunruhe hin und beweist außerdem, daß flugzeugseitig keinerlei thermische Störung überlagert ist.

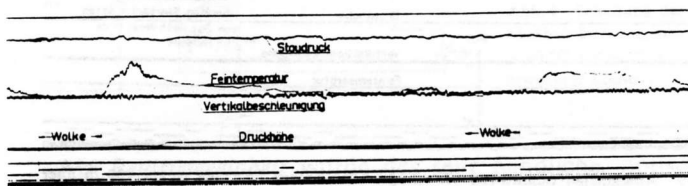


Abb. 15 Originalregistrierung zweier Schnittflüge dicht unter einer Cumulusbasis

Als Ergänzung zu dem Einfluß der Bodenbedeckung auf die Temperaturstruktur wird in den weiteren Abbildungen eine Reihe von Schnittflügen über ein 12 km im Durchmesser sich erstreckendes Waldgebiet gebracht, dem ein kleinerer Waldstreifen vorgelagert ist; dazwischen befindet sich ein breites Wiesenstück. Die Flüge wurden wieder an einem Tag mit gut ausgebildeter Konvektion durchgeführt. In Abbildung 10 ist zunächst ein Ausschnitt aus den Originalregistrierungen dargestellt; es sind darin die Maßstäbe für Vertikalbeschleunigung und Feintemperatur eingezeichnet. Bei zum Teil gleichbleibendem Staudruck und gleichbleibender Druckhöhe kann man die Zuordnung von Vertikalbeschleunigung und Temperaturänderung gut erkennen.

Die Abbildungen 11, 12, 13 und 14 zeigen dazu die ausgewerteten Schnittflüge in den verschiedenen Höhenstufen über dem Waldgebiet. Die Flüge führten jeweils in gleicher Höhe über einen dem großen Waldkomplex vorgelagerten Geländestreifen mit der Bedeckungsfolge Wiese-Wald-Wiese, was sich besonders im Temperaturverlauf des ersten Überfluges gut widerspiegelt.

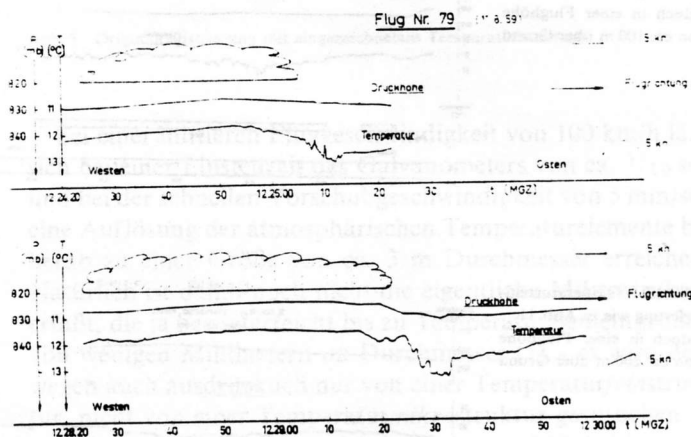


Abb. 16 Temperatur- und Druckhöhenverlauf bei Schnittflügen dicht unter der Basis zweier Schönwettercumuli

Der Gedanke einer eingehenden Untersuchung des Auslösemechanismus der Thermik an solch markanten Stellen drängt sich unmittelbar auf, jedoch sollten solche Untersuchungen mit mehreren Flugzeugen gleichzeitig und in verschiedenen Höhen durchgeführt werden, um ein einwandfreies Isolinienbild der Temperatur zu bekommen.

Wie aus den Auswertungen zu ersehen ist, reicht die Wirkung des Waldes als Wärmequelle bis über 200 m Höhe hinauf (s. auch [5]).

Als weiteres Beispiel für Feintemperaturmessungen werden zwei Schnittflüge dicht unter einer Cumulusbasis dargestellt.

Der mit «Wolke» bezeichnete Abschnitt der Originalregistrierung in Abb. 15 ist der Zeitabschnitt des unterflogenen, sichtbaren Teils der Wolke. Der ausgewertete horizontale Temperatur- und Druckhöhenverlauf in Abb. 16 läßt erkennen, daß die Erosion der Cumuli bevorzugt auf der gleichen Wolkenseite stattfindet, was wahrscheinlich auf die Wirkung der an diesem Tag gut ausgeprägten Windscherung unter und über der Inversion (Abb. 17) zurückzuführen ist; ferner findet man, daß das turbulente Abwindgebiet wesentlich wärmer ist, wofür eine mögliche Deutung in einem Mischungsvorgang unter Beteiligung wärmerer Luft über der Inversion liegt.

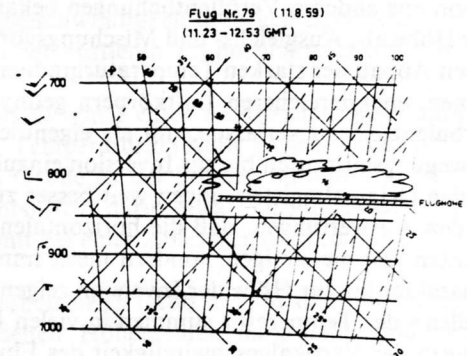


Abb. 17 Vertikale Temperatur- und Windschichtung zur Zeit der Schnittflüge in Abb. 15

Als letztes Beispiel soll die Anwendung der Feintemperatur-Meßeinheit auf die Untersuchung von Wellenstrukturen gezeigt werden. Da es mit einmotorigen Flugzeugen geringer PS-Zahl schwierig ist, das Wellenfeld in gleicher Druckhöhe zu durchfliegen (constant pressure flight), wurden die Flüge mit konstanter Motorleistung (constant power flight) durchgeführt, wobei sich dem Flugzeug die Vertikalbewegungen der Atmosphäre mitteilen und als Flugbahn ein Vektor aus Horizontalbewegung des Flugzeugs und Vertikalbewegung der Luft resultiert. Die Fixierung gewisser Brennpunkte, die mit dem Überfliegen markanter Bodenpunkte zusammenfal-

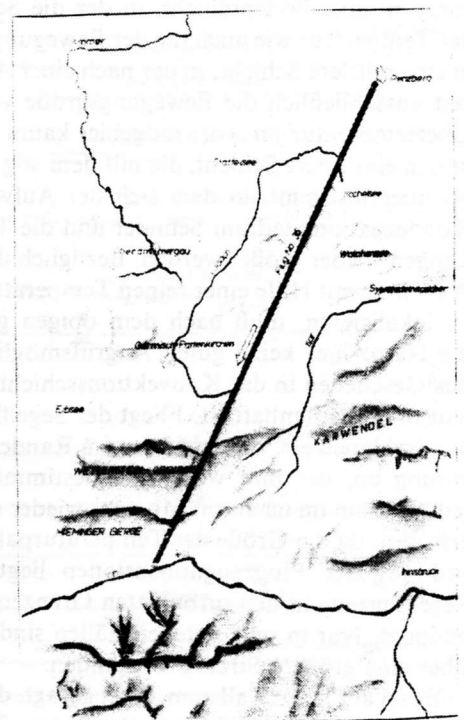


Abb. 18 Schnittpunktlinie der Wellenvermessung im Gebiet der Zugspitze

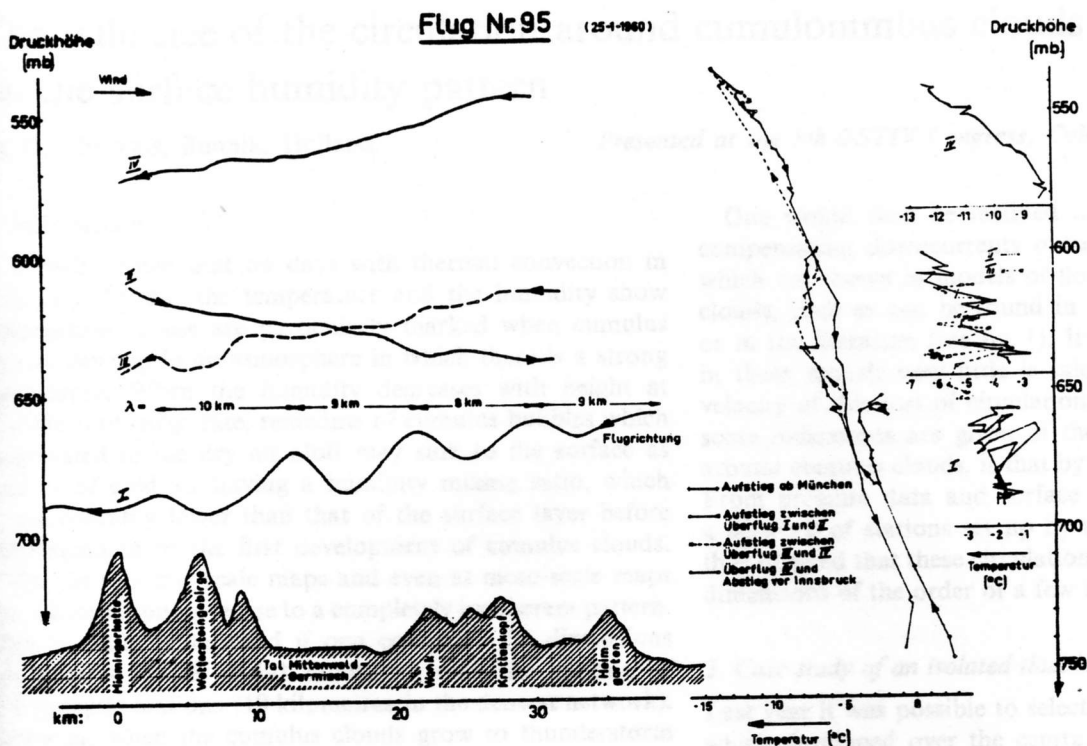


Abb. 19 Druckhöhenverlauf und Vertikalschichtung der Temperatur entlang den Flugbahnen I-IV

len, erlaubt die Projektion der Flugbahn auf das Bodenrelief. Im Falle eines Schwebeballons, der sich parallel zu den Stromlinien der Luft bewegt, erhält man bei Voraussetzung adiabatischen Geschehens eine konstante potentielle Temperatur, da das Stromlinienfeld der Luft parallel zum potentiellen Temperaturfeld verläuft; im Falle des Flugzeuges, das entlang einer konstanten Druckhöhe bzw. mit einer zusätzlichen horizontalen Eigengeschwindigkeit gegenüber der Luft das Wellenfeld schneidet, ergeben sich Abweichungen der potentiellen Temperatur, deren Bestimmung Rückschlüsse auf das gesuchte Stromlinienfeld der Luft erlaubt. Diese schon im «Mountain Wave»- bzw. «Jet Stream»-Projekt vorgeschlagene Methode (6) läßt sich auch für Wellensysteme in niedrigerer Höhe anwenden (7).

entsprachen einer föhnigen Südwestlage ohne Wolkenbildung in den verschiedenen Flugniveaus; der gewählte Kurs war genau parallel zum Wind gerichtet.

In den Abb. 19 und 20 sind die Auswertungen von Druckhöhe und Temperatur dargestellt.

Es ist aus den Auswertungen ersichtlich, daß es sich um ein unteres Wellensystem handelt, das seinen Anfangsimpuls anscheinend von der Kette der Mieminger Berge und dem Wetterstein erhalten hat und in der Höhe bis ca. 4500 m NN reicht.

Zusammenfassung

Es wird über eine für die Belange der Mesostrukturen entwickelte, universell einsetzbare Feintemperatur-Meßeinheit berichtet, mit der vom Flugzeug aus speziell horizontale Temperaturstrukturen vermessen werden können; in der Anwendung werden einige Registrierbeispiele aus dem Bereich der bodennahen Schicht, der Konvektion und der Wellenbildung gezeigt.

Literatur

- (1) A. N. Kolmogorov, A. M. Obuchow, A. M. Jaglom, A. S. Monin: «Statistische Theorie der Turbulenz», Akademie-Verlag Berlin (1958).
- (2) D. G. James: «Fluctuations of temperature below cumulus clouds», Quart. Journ. Roy. Met. Soc. 79 (1953).
- (3) A. H. Yates: «Atmospheric convection; the structure of thermals below cloud-base», Quart. Journ. Roy. Met. Soc. 79 (1953).
- (4) F. H. Ludlam: «The subcloud layer over land», Quart. Journ. Roy. Met. Soc. 79 (1953).
- (5) R. R. Braham, jr., M. Draginis: «Roots of orographic cumuli», Journ. of Met. 17 (1960).
- (6) Dr. J. Kuettner: «Jet Stream project I-IV», Soaring 1955.
- (7) L. Larsson: «A method to study the structure of standing lee waves and rotors», Swiss Aero-Revue 5 (1960).

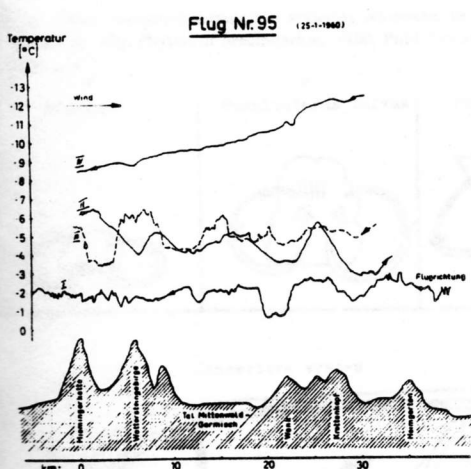


Abb. 20 Horizontaler Temperaturverlauf entlang den Flugbahnen I-IV

Die Abb. 18 zeigt die Schnittlinie, entlang welcher die Wellenvermessung erfolgte; sie verläuft von Penzberg im Alpenvorland über Kochelsee, Herzogstand, Wank, Wettersteingrat, Mieminger Kette nach Telfs im Inntal. Die Wetterverhältnisse