

Berichte
des
Deutschen Wetterdienstes

Nr. 82
(Band 11)

DK 551.508.25 : 551.507.354 : 551.525

**Messungen der Bodenoberflächentemperatur
vom Hubschrauber aus**

von

Dieter Lorenz

(mit 25 Abbildungen und 9 Tabellen im Text
sowie 7 Bildtafeln im Anhang)

Offenbach a. M. 1962
Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes

Inhalt

	Seite
Zusammenfassung	3
Abstract	3
1. Einführung	3
1.1. Aufgabenstellung	3
1.2. Grundlagen der Meßmethodik	4
1.3. Experimentelle Erfordernisse	5
1.4. Bisherige Entwicklungen	5
2. Entwicklung eines Oberflächen-Radiometers zur Verwendung im Hubschrauber	6
2.1. Strahlungsempfänger und Verstärker	6
2.2. Optisches System	7
2.3. Modulation	8
2.4. Modulator-Temperatur	9
2.5. Halbleiter-Filter	11
2.6. Eichung und Verbesserung der Eichkonstanz	13
2.7. Anpassung der Geräte für Hubschraubermessungen	15
2.8. Einbau der Geräte in den Hubschrauber	16
3. Oberflächentemperatur-Messungen und ihre Ergebnisse	16
3.1. Meßflüge	16
3.2. Protokollierung und Auswertung	18
3.3. Systematische Fehler und Meßgenauigkeit	18
3.4. Mittelwerte und Schwankungen	20
3.5. Oberflächentemperatur der Fulda bei Guntershausen	22
3.6. Oberflächentemperatur von bewachsenem Boden	22
3.7. Oberflächentemperatur einiger besonderer Objekte	27
4. Schlußbetrachtung	28
Literatur	29

Die vorliegende Arbeit wurde als Dissertation (D 77) von der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Johannes-Gutenberg-Universität zu Mainz angenommen.

Die Entwicklungen und Untersuchungen der Arbeit erfuhren Förderung und Unterstützung von verschiedenen Seiten.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanzierte das unter der wissenschaftlichen Leitung von Herrn Professor Dr. F. Möller stehende Forschungsvorhaben.

Die Herren Dipl.-Phys. Grave (†) und Dipl.-Phys. Ringel von den Physikalisch-Technischen Werkstätten, Wiesbaden, leisteten vor allem durch einige Sonderanfertigungen Hilfe und Herr Prof. Dr. Welker, der Leiter des Siemens-Schuckert-Forschungslaboratoriums, überließ kostenlos einige Halbleiter-Filter.

Neben Herrn Professor Dr. F. Möller stand Herr Dr. H. J. Bolle dem Verfasser mit Rat und Tat zur Seite; Herr Mechanikermeister K. Dröll fertigte das Oberflächen-Radiometer an und übernahm den Einbau der Geräte in den Hubschrauber. Herr Prof. Dr. R. Mügge ermöglichte den Abschluß der Arbeiten an seinem Institut in Frankfurt a. M.

Ihnen allen sei für ihre Hilfe und ihr Entgegenkommen gedankt.

Anschrift des Verfassers:

Dr. D. Lorenz, Universitätsinstitut für Meteorologie und Geophysik,
Frankfurt a. M., Feldbergstraße 47

Zusammenfassung

Es wird über die Entwicklung eines Gerätes berichtet, das Messungen der Bodenoberflächentemperatur auf Grund der langwelligen Strahlung von einem Hubschrauber aus gestattet. Dieses Gerät benutzt als Strahlungsempfänger ein Bolometer bzw. ein Thermoelement der Physikalisch-Technischen Werkstätten, Wiesbaden, das nach der Wechsellichtmethode betrieben, in der Brennebene eines Parabolspiegels angebracht war. Der Einfluß von sichtbarer und infraroter Strahlung von weniger als $7,3 \mu$ Wellenlänge wurde durch ein optisch vergütetes Indium-Antimonid-Filter beseitigt.

Bei Benutzung des Thermoelementes als Strahlungsempfänger ergab sich eine Meßgenauigkeit von $\pm 0,9 \dots \pm 1,4^\circ \text{C}$, je nach den Meßbedingungen.

Vergleichende Messungen über verschiedenen Oberflächen von einem Hubschrauber aus zeigten, daß bei bewachsenem Boden die Unterschiede zwischen den einzelnen Meßobjekten (Wiesen, Felder, Wald) nur gering sind. Sie gingen selten über $\pm 2^\circ \text{C}$ hinaus und lagen damit in der gleichen Größenordnung wie die zeitlichen Temperaturschwankungen der Meßobjekte im Verlauf von etwa 10 bis 30 Minuten. Unbewachsene Oberflächen wiesen dagegen erhebliche Differenzen auf.

Abstract

The paper deals with the development of an instrument for measurements of surface temperatures from a helicopter by long wave radiation. The radiation receiver consists of a bolometer or a thermocouple (manufactured by Physikalisch-Technische Werkstätten, Wiesbaden) which is fitted in the focal plane of a parabolic mirror. The radiation is modulated by a chopper. Visible and infrared radiation below 7.3μ is eliminated by a coated indium-antimonide filter.

When the thermocouple is used as radiation receiver, the accuracy of measurements varied between $\pm 0.9 \dots \pm 1.4^\circ \text{C}$, according to the prevailing measuring conditions.

Comparison measurements over different surfaces from a helicopter showed the following results: Over grown soil the differences are very small between the various investigated objects (meadows, fields, forest). They rarely exceeded $\pm 2^\circ \text{C}$ and were of the same order as the temporal temperature fluctuations of the measured objects during periods of about 10 to 30 minutes. Over bare soil however considerable differences have been measured.

1. Einführung

1.1. Aufgabenstellung

Seit einigen Jahren bemüht man sich in der Meteorologie um die zahlenmäßige Erfassung der Wärmebilanz des Erdbodens. In diesem Zusammenhang kommt der Oberfläche des Bodens als Umsatzfläche eine besondere Bedeutung zu. An ihr wird der größte Teil der von Sonne und Himmel kommenden Strahlung absorbiert, ein Teil davon dringt als fühlbare Wärme in den Boden ein, ein anderer Teil wird an die Luft abgegeben; Niederschläge treffen hier auf, fließen ab,

dringen in den Erdboden ein oder gelangen durch Verdunstung wieder in die Luft. Auch eigene Strahlungsströme nehmen hier ihren Ausgang. Es ist daher nicht verwunderlich, daß man sich zur Erfassung der Wärmebilanz vor allem mit den meteorologischen Daten dieser Grenzfläche zwischen Erdboden und Atmosphäre beschäftigen muß.

Für die Berechnung der langwelligen Strahlungsströme ist insbesondere die Temperatur der Bodenoberfläche wichtig. Nun lassen sich diese Strahlungsströme zwar mit Meßgeräten erfassen, und solche Messungen werden auch in größerem Umfang durchgeführt,

aber man erhält auf diese Weise nur die Strahlungsverhältnisse an dem Ort, an dem das Gerät aufgestellt ist. Die Frage dabei ist, inwieweit die so gewonnenen Ergebnisse als repräsentativ für einen größeren Bereich angesehen werden können. Im Rahmen der heute möglichen Meßgenauigkeit kann man dies sicher tun, wenn man voraussetzt, daß der Himmel wolkenlos oder gleichmäßig bedeckt ist und daß die Erdoberfläche überall die gleiche Temperatur besitzt wie an dem Meßplatz. Das letztere wird man aber gerade bei der Vielgestaltigkeit der Erdoberfläche nicht erwarten können. Hier müssen experimentelle Untersuchungen einsetzen, die zeigen, welche Temperaturunterschiede die verschiedenen in der Natur vorkommenden Bodenoberflächen aufzuweisen haben.

Als Boden-Oberflächentemperatur wird bei dieser Betrachtungsweise die Temperatur der Strahlung empfangenden und Strahlung abgebenden Oberfläche des Erdbodens verstanden. Diese Oberfläche ist bei unbewachsenem Boden mit der Erdoberfläche praktisch identisch, bei bewachsenem dagegen wird sie teils durch die Vegetation, teils durch den freien Erdboden zwischen den Pflanzenteilen bestimmt; man erhält also bei der Oberflächentemperaturmessung in diesem Fall einen integralen Temperaturwert dieser Einzelelemente.

Lassen sich bei unbewachsenem Boden noch direkte Temperatur-Meßmethoden benutzen, z. B. mit Thermoelementen oder Mikrothermistoren, so ist dies an bewachsenen Oberflächen nicht mehr möglich, da sich nicht absehen läßt, an welcher Stelle hier ein repräsentativer Temperaturwert zu bekommen ist. Diese Schwierigkeiten lassen sich nur umgehen, wenn man die Temperatur auf Grund der langwelligen Ausstrahlung bestimmt. Die Anwendung dieser Methode ergibt sich deshalb ganz zwangsläufig. Allerdings erfordert sie einen erheblichen instrumentellen Aufwand. Es ist aus diesem Grunde nicht möglich, eine Anzahl von gleichzeitig arbeitenden Meßgeräten aufzustellen. Um mit einem einzigen Instrument vergleichbare Messungen von verschiedenen Oberflächen zu erhalten, müssen diese möglichst schnell nacheinander erfolgen. Es empfiehlt sich daher, die Messungen von einem Flugzeug bzw. einem Hubschrauber aus durchzuführen, denn nur mit Luftfahrzeugen sind hinreichend schnelle Ortsänderungen unabhängig von der Geländegestalt möglich.

Die vorliegende Arbeit hatte die Aufgabe, eine Apparatur zur Messung der Oberflächentemperatur von einem Hubschrauber aus zu entwickeln. Durch eine Anzahl von Meßflügen sollten ferner die Anwendungsmöglichkeiten der Meßmethodik aufgezeigt werden unter besonderer Berücksichtigung der bereits erwähnten Vergleiche zwischen den verschiedenen in der Natur vorkommenden Oberflächen.

1.2. Grundlagen der Meßmethodik

Der Zusammenhang zwischen der Temperatur einer schwarzen Oberfläche und der von ihr ausgehenden Gesamtstrahlung ergibt sich aus dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz

$$S = \sigma T^4, \quad [1]$$

worin S die von der Flächeneinheit pro Zeiteinheit in den Halbraum ausgesandte Strahlungsenergie, T die absolute Temperatur und σ eine Proportionalitätskonstante ist. Dieses Gesetz gilt jedoch nur für schwarze Körper, also Körper mit einem Absorptionsvermögen $\epsilon = 1$. Da die in der Natur vorkommenden Oberflächen eine nur sehr geringe selektive Absorption aufweisen, wie das z. B. Brooks (1) zeigt, so kann man ϵ in Gleichung [1] einsetzen. Eine weitere Korrektur ergibt sich aus der Tatsache, daß man bei der Messung von Ober-

flächentemperaturen nicht die gesamte aus dem Halbraum 2π kommende Strahlung mißt, sondern nur die aus einem Raumwinkel α kommende. Die Flächeneinheit eines Meßfühlers erhält daher von einer ausgedehnten Oberfläche mit dem Absorptionsvermögen ϵ die Strahlung

$$S_0 = \epsilon \sigma \frac{\alpha}{2\pi} T^4. \quad [2]$$

Daraus ergibt sich die Oberflächentemperatur zu:

$$T = \sqrt[4]{\frac{2\pi S_0}{\epsilon \sigma \alpha}} \quad [2a]$$

Diese Gleichung zeigt, daß man zur Berechnung von T außer der ausgesandten Strahlungsenergie S_0 und dem Öffnungswinkel α des Meßgerätes auch das Absorptionsvermögen ϵ der angemessenen Oberfläche kennen muß, das von Meßobjekt zu Meßobjekt verschieden sein kann. Da jedoch ϵ für die in der Natur vorkommenden Oberflächen bei senkrechtem bzw. nahezu senkrechtem Einfall der Strahlung in der Nähe von 1 liegt (vgl. Tab. 1), läßt sich sein Einfluß vernachlässigen.

Tab. 1

Absorptionskonstanten einiger meteorologisch wichtiger Körper für Infrarotstrahlung (λ_{\max} etwa 10μ) nach Falckenberg (2) und nach Schmidt (3)

heller Sand	0,892
hellgrauer Kalkstein	0,915
Kies	0,915
Tannennadeln	0,96
Wasser	0,965
Eis, glatt	0,965
Erdscholle mit Rasen	0,984
bereifte Oberflächen	0,985
Schnee	> 0,995

Die Angaben für Wasser, Eis und bereifte Oberflächen stammen von Schmidt, die übrigen von Falckenberg.

Der dadurch auftretende Fehler wird auch deshalb nur klein, weil man in der Praxis nicht den Betrag von S_0 experimentell bestimmt, sondern ein Meßgerät mit einer Oberfläche bekannter Temperatur T_0 z. B. mit einer Wasseroberfläche. Die auf Grund einer solchen Eichung gemessene Temperatur T einer Oberfläche mit dem Absorptionsvermögen ϵ entspricht dann der Temperatur, die die Oberfläche haben würde, wenn ihr $\epsilon = \epsilon_w$ wäre. Sie unterscheidet sich von der wahren

Oberflächentemperatur T durch den Faktor $\sqrt[4]{\frac{\epsilon_w}{\epsilon}}$, es ist also

$$T = \sqrt[4]{\frac{\epsilon_w}{\epsilon}} T_0. \quad [3]$$

Kennt man das Verhältnis ϵ_w/ϵ , so kann man aus [3] die wahre Oberflächentemperatur berechnen. Doch, wie erwähnt, ist der Unterschied von T und T_0 in der Regel gering. Nur in extremen Fällen, wie z. B. bei hellgrauem Kalkstein oder grobem Kies ($\epsilon = 0.915$ nach Tab. 1) erhält man für

$$\sqrt[4]{\frac{\epsilon_w}{\epsilon}} = 1,013,$$

was in dem Temperaturbereich von $0^\circ\text{C} \dots \dots 40^\circ\text{C}$ einen Unterschied zwischen der wahren Oberflächentemperatur T und der gemessenen T_0 von $T - T_0 = +4^\circ\text{C}$ ergibt.

Bei Strahlungsuntersuchungen interessiert meist gar nicht die wahre Oberflächentemperatur T ; man will hier die Ausstrahlung $S = \epsilon \sigma T^4$ berechnen. Für diesen Zweck benutzt man vielfach die Strahlungstemperatur T_S . Das ist die Temperatur, die ein schwarzer Körper haben würde, der die gleiche Strahlung ausstrahlt wie die Oberfläche mit dem Absorptionsvermögen ϵ bei der Temperatur T . Es ist also

$$T_S = \sqrt[4]{\epsilon} T. \quad [4]$$

Aus T_0 läßt sich T_S auf Grund der Beziehung

$$T_S = \sqrt[4]{\epsilon_w} T_0 \quad [4a]$$

berechnen.

Im folgenden soll nur noch T_0 betrachtet werden, T und T_S unterscheiden sich ja nur wenig davon und lassen sich überdies leicht aus T_0 berechnen.

Ein weiterer Punkt bedarf noch der Erörterung. Da das Absorptionsvermögen der in der Natur vorkommenden Oberflächen kleiner als 1 ist, wird ein geringer Prozentsatz der Gegenstrahlung reflektiert (bei Eichungen bildet dabei hauptsächlich die Strahlung des Meßgerätes die Gegenstrahlung). Die Gegenstrahlung geht also mit in die Messungen ein, und anstelle der Gleichung

$$\epsilon \sigma T^4 = \epsilon_w \sigma T_0^4,$$

aus der [3] berechnet wurde, gilt

$$\epsilon \sigma T^4 + (1 - \epsilon) G = \epsilon_w \sigma T_0^4 + (1 - \epsilon_w) G_0, \quad [5]$$

wobei $(1 - \epsilon) G$ und $(1 - \epsilon_w) G_0$ die reflektierten Anteile der Gegenstrahlung bei der Messung bzw. bei der Eichung sind. Auflösen der Gleichung [5] nach T ergibt

$$T = \sqrt[4]{\frac{\epsilon_w}{\epsilon} T_0^4 + \frac{1 - \epsilon_w}{\sigma \epsilon} G_0 - \frac{1 - \epsilon}{\sigma \epsilon} G}. \quad [6]$$

Man müßte also eigentlich zur Berechnung von T außer ϵ_w und ϵ die Gegenstrahlung bei Eichung und Messung G_0 bzw. G berücksichtigen. Da dies sehr umständlich ist und zudem die Differenzen sich meist innerhalb der Meßgenauigkeit bewegen, sieht man von einer Berücksichtigung der Gegenstrahlung jedoch ab und bezeichnet die ohne Berücksichtigung der Gegenstrahlung gemessene Strahlungstemperatur als effektive Strahlungstemperatur.

1.3. Experimentelle Erfordernisse

An ein Strahlungsmeßgerät zur Bestimmung der Oberflächentemperatur — es soll im folgenden als Oberflächen-Radiometer bezeichnet werden — müssen eine ganze Reihe von Forderungen gestellt werden, deren Erfüllung mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden ist, zumal sie sich zum Teil gegenseitig ausschließen.

1) Das Gerät muß den Nachweis sehr geringer Energien gestatten, da sich die Temperaturen der Erdoberfläche in mittleren Breiten zwischen etwa -30°C und $+60^\circ \text{C}$ bewegen ($243^\circ \text{K} \dots 333^\circ \text{K}$). Dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz entsprechend betragen die Strahlungsenergien nur $0,3 \dots 1,0 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ und weisen so nur geringe Differenzen gegenüber der Eigenstrahlung eines Strahlungsempfängers auf.

2) Da man die Temperatur eines definierten Flächenstückes messen will, darf das Meßgerät nur einen begrenzten Öffnungswinkel besitzen. Die dem Meßelement zur Verfügung stehende Energie wird dadurch noch auf einen Bruchteil reduziert.

3) Der Apparat muß so gebaut sein, daß die langwellige Strahlung das Meßelement ohne wesentliche

Schwächung erreicht. Wie man aus dem Wien'schen Verschiebungsgesetz leicht errechnen kann, liegt das Maximum der Strahlung für den hier interessierenden Temperaturbereich bei etwa 10μ . Glas und Quarz beispielsweise sind bei diesen Wellenlängen nicht mehr durchlässig; so dürfen z. B. Linsen aus diesen Materialien nicht verwendet werden.

4) Es muß vermieden werden, daß der Strahlungsempfänger durch kurzwellige etwa am Boden reflektierte Strahlung beeinflusst wird, denn diese kann stärker als die langwellige Eigenstrahlung sein und damit eine Messung unmöglich machen.

5) Ebenso dürfen Gehäusewandung des Gerätes, Halterungen und dgl. keine störende Strahlung verursachen, denn ihre Temperatur weicht vielfach nur wenig von der der Oberfläche ab, die man messen will. Solche Störungen machen sich besonders bei einer Änderung der Temperatur von Gehäuse und Halterungen bemerkbar.

6) Das Gerät darf seinerseits nicht die Oberflächentemperatur des Meßobjektes beeinflussen, darf also nicht zu nahe an dieses herangebracht werden.

7) Die Strahlung aus der Luftschicht zwischen Oberfläche und Meßgerät soll die Ergebnisse nicht beeinträchtigen. Dies läßt sich am ehesten durch einen möglichst geringen Abstand zur Oberfläche erreichen, was jedoch dem vorigen Punkt entgegensteht.

Die Erfüllung all dieser Forderungen macht einen erheblichen technischen Aufwand notwendig, eine Tatsache, die bis jetzt eine allgemeine Einführung des Meßverfahrens verhindert hat. Es hat aber nicht an Versuchen gefehlt, im Rahmen von Sonderuntersuchungen die Strahlungsmethode zur Messung von Oberflächentemperaturen einzusetzen, wie Veröffentlichungen von Falckenberg (4), Bolz (5), K. Wegener und Trojer (6, 7, 8), Albrecht (9), Malkus (10), Lorenz (11), Fimpel (12) und Dutton (13) zeigen.

Sollen die Messungen der Oberflächentemperatur von einem Flugzeug bzw. einem Hubschrauber aus durchgeführt werden, so ergeben sich zusätzlich zu den bereits angeführten 7 Forderungen noch weitere. Ein Gerät für diesen Zweck muß

8a) eine geringe Trägheit besitzen und

8b) unempfindlich gegen Erschütterungen sein.

Im übrigen muß der Öffnungswinkel des großen Abstandes vom Meßobjekt wegen besonders klein sein.

1.4. Bisherige Entwicklungen

In der Vergangenheit sind bereits Flugzeugmessungen der Oberflächentemperatur durchgeführt worden, zuerst von Albrecht (9) in den Jahren 1940—1944. Albrecht benutzte ein Mikrofilm-Bolometer nach Czerny, das er in die Brennebene eines Hohlspiegels setzte. Er bekam auf diese Weise einen Öffnungswinkel von nur $1,5^\circ$. Die Meßwerte wurden verstärkt und fotografisch registriert.

In zwei Punkten war das Meßverfahren allerdings noch unbefriedigend. Es war zu jener Zeit noch nicht möglich, die kurzwellige Strahlung auszuschalten und den Wasserdampfeinfluß aus der Luftschicht zwischen Bodenoberfläche und Flugzeug zu beseitigen. Albrecht half sich durch rechnerische Eliminierung. Er bestimmte bei einigen Flügen die Albedo und errechnete dann aus der Globalstrahlung die reflektierte kurzwellige Strahlung für die einzelnen Teile der Meßstrecke. Für die Berücksichtigung des Wasserdampf-Einflusses überflog er in verschiedenen Höhen ein Meßobjekt bekannter Oberflächentemperatur und bestimmte daraus den

Rückgang der Bolometer-Empfindlichkeit in Abhängigkeit vom Äquivalent-Niederschlagswasser (ppw).

Neuere Arbeiten stammen von Malkus (10) und Dutton (13). Leider enthalten diese Veröffentlichungen nur wenig technische Einzelheiten. Beide Geräte, bei Malkus ein von der Woods Hole Oceanographic Institution entwickeltes Instrument, bei Dutton das „Sea Surface Temperature Radiometer“ Modell 14—310 von Barnes, sind offensichtlich zur Messung von Meeresoberflächentemperaturen konstruiert. Das von Dutton benutzte Gerät besitzt dabei einen sehr großen Öffnungswinkel (20°), der es zu vergleichenden Oberflächentemperatur-Messungen über Land nicht geeignet erscheinen läßt (bei Malkus fehlt die Angabe des Öffnungswinkels).

Beide Geräte scheinen recht trägheitsarm zu sein und bei beiden ist wohl die kurzwellige Strahlung ausgeschaltet. Der Einfluß der Wasserdampfstrahlung aus der Zwischenschicht scheint bei Malkus nicht beseitigt zu sein, bei dem Barnes-Gerät, das Dutton benutzt, wird er dagegen durch eine Filterkombination unwirksam gemacht.

2. Entwicklung eines Oberflächen-Radiometers zur Verwendung im Hubschrauber

2.1. Strahlungsempfänger und Verstärker

Für die Entwicklung des Oberflächen-Radiometers standen als Strahlungsempfänger ein Bolometer und ein Thermoelement sowie ein zugehöriger Verstärker der Physikalisch-Technischen Werkstätten (= PTW; Prof. Dr. W. Heilmann), Wiesbaden (14) zur Verfügung.

Das Bolometer, eine Weiterentwicklung des Mikrofilm-Bolometers von Czerny, besteht aus einem evakuierten, zylinderförmigen Glasgefäß (Länge ca. 115 mm, ϕ ca. 15 mm) mit einem Kalium-Bromid-Fenster an der Vorderseite (ϕ ca. 12 mm). Es besitzt zwei etwa $0,05 \mu$ starke, mit Metall bedampfte Membranen, von denen die eine der Strahlung ausgesetzt wird (die andere dient nur der Temperatur-Kompensation). Beide Metallschichten sind Widerstände einer Wheatstoneschen Brückenschaltung (Widerstand größenordnungsmäßig 1 k Ω), die mit einer Spannung von 2 V betrieben wird.

Wegen der außerordentlich dünnen Metallschichten eignet sich das Bolometer nur für die Wechsellicht-Methode in Verbindung mit einem Verstärker. Durch eine Modulatorscheibe wird dabei das Bolometer-Fenster mit einer Frequenz von 12,5 Hz abgedeckt und wieder freigegeben. Infolge ihrer geringen Trägheit ändert die als Strahlungsempfänger benutzte Metallschicht dabei in der kurzen Zeit von $\frac{1}{2 \cdot 12,5}$ sec = 0,04 sec bereits ihren Widerstand, so daß an den beiden anderen Widerständen der Wheatstoneschen Brücke, die als Trafo-Wicklungen ausgebildet sind, eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 12,5 Hz entsteht. Die Größe dieser Wechselspannung, die allerdings noch erheblich verstärkt werden muß, ist ein Maß für die Strahlungsdifferenz zwischen Meßobjekt und Modulatorscheibe.

Auch das Thermoelement der PTW ist für Wechsellicht geeignet. Der Strahlungsempfänger besteht aus einer sehr dünnen, geschwärzten Metallfolie, die an zwei Metallstäben spezieller Legierungen angeschweißt ist. Er befindet sich wie beim Bolometer in einem evakuierten zylindrischen Glasgehäuse (ca. 10 mm ϕ , ca. 73 mm Länge) mit einem KBr-Fenster oder einer Linse aus KBr (für die vorliegenden Untersuchungen wurde ein Thermoelement mit einer KBr-Linse verwendet

ϕ 10 mm, Brennweite bei $\lambda = 10 \mu$ ca. 8,35 mm, Abstand Linsenfläche-Empfängerfläche = 1,0 mm).

Beide Strahlungsempfänger, Bolometer wie Thermoelement, sind für spektrometrische Untersuchungen im langwelligen Spektralbereich entwickelt worden. Ihre Empfängerflächen sind daher dem Spektrometerspalt angeglichen. So hatte die des benutzten Bolometers die Maße 1,5 mm \times 6,0 mm, die des Thermoelements 0,3 mm \times 2,0 mm.

Das robustere Instrument von beiden ist das Bolometer. Es ist damit eigentlich für Messungen im Hubschrauber prädestiniert, doch weist seine Strahlungsempfindlichkeit einen recht erheblichen Temperaturkoeffizienten auf. Deshalb wurde auch das Thermoelement zu den vorliegenden Untersuchungen mit herangezogen.

Der Verstärker der PTW, ein Selektiv-Verstärker für eine Frequenz von 12,5 Hz, läßt sich sowohl für Bolometer als auch für Thermoelemente verwenden, für jeden dieser Empfängertypen sind entsprechende Wicklungen des Eingangstransformators vorgesehen. Das Gerät ist 5stufig aufgebaut mit RC-Gliedern zwischen den einzelnen Stufen. Man erzielt auf diese Weise eine geringe Bandbreite und kann so den Rauschpegel relativ niedrig halten. Die Ausgangsspannung wird über einen hochohmigen Widerstand und einen Gleichrichter aus 4 Dioden in Graetz-Schaltung einem eingebauten Drehpulmeßinstrument zugeführt.

Der Grad der Verstärkung ist stufenweise regelbar. Bei voller Ausnutzung des Gerätes (Empfindlichkeitsstufe 9) ergibt sich eine etwa 10⁹fache Verstärkung (Spannungsverstärkung bei Benutzung des Bolometer-Eingangs), doch macht sich dabei der Rauschpegel schon sehr stark bemerkbar. Bei der vorliegenden Meßaufgabe wurde fast ausschließlich nur Empfindlichkeitsstufe 4 eingestellt, bei der nur $\frac{1}{3} \cdot 10^{-2}$ der vollen Verstärkung ausgenutzt werden. Für diesen Fall ist in Abb. 1 der Ausgangsstrom I_A in Abhängigkeit vom Eingangsstrom I_E und in Abb. 2 der Frequenzgang dargestellt. Es zeigt sich, daß der Verstärker fast im gesamten Meßbereich nahezu linear arbeitet und daß seine Halbwertsbreite weniger als 1,3 Hz beträgt.

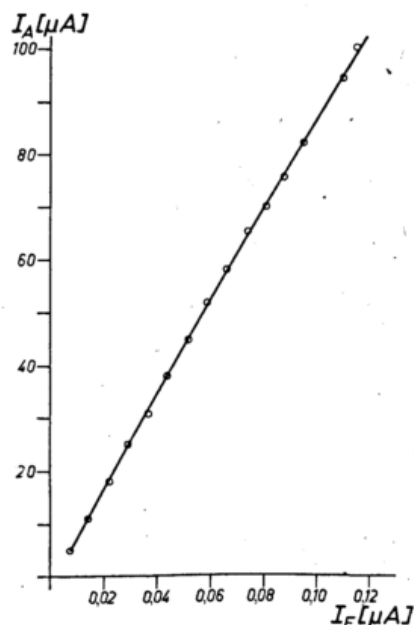


Abb. 1
Linearität des PTW-Verstärkers. Ausgangsstrom I_A in Abhängigkeit vom Eingangsstrom I_E (Empfindlichkeitsstufe 4, Thermoelement-Eingang)

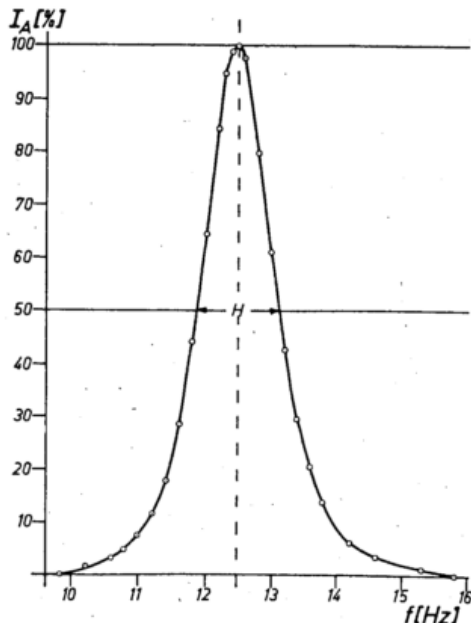


Abb. 2

Bandbreite des PTW-Verstärkers. Ausgangsstrom I_A (I_A bei 12,5 Hz gleich 100% gesetzt) in Abhängigkeit von der Frequenz f des Eingangssignals. Empfindlichkeitsstufe 4, Thermoelement-Eingang

Die Art der im Verstärker vorgenommenen Gleichrichtung hat zur Folge, daß man nur den Betrag von ΔS ermitteln kann, nicht aber sein Vorzeichen, d. h. es läßt sich bei den Messungen nicht entscheiden, ob die Temperatur der angemessenen Oberfläche größer oder kleiner als die des Modulators ist. Die PTW erklärten sich bereit, einen Kontaktgleichrichter für phasenrichtige Gleichrichtung zu konstruieren. Es handelt sich dabei um einen Polwender, der auf der Modulatorachse sitzt und bei jedem Umlauf die Ausgangsspannung viermal so umpolt, daß die vier Halbwellen der Wechselspannung entweder alle positiv oder alle negativ werden, je nach dem Vorzeichen der Strahlung. Bei diesem Gerät war das Problem der Übergangswiderstände an den Schleifkontakten nicht vollkommen gelöst, deshalb wurde es nur zur Vorzeichenbestimmung von Zeit zu Zeit kurz eingeschaltet, während für die Meßwerte die Dioden-Gleichrichtung beibehalten wurde.

2.2. Optisches System

Die eben beschriebenen Strahlungsempfänger besitzen einen sehr großen Öffnungswinkel. Sie machen deshalb für den vorliegenden Meßzweck ein optisches System notwendig, denn eine Verkleinerung des Öffnungswinkels durch ein Blendensystem würde die nutzbare Strahlungsenergie zu stark reduzieren. Linsensysteme aus Glas oder Quarz sind, wie erwähnt, im langwelligen Infrarot ($\lambda > 5 \mu$) nicht mehr durchlässig und scheiden daher aus, ebenso tun das Materialien wie Steinsalz, die zwar im langwelligen Strahlungsbereich durchlässig, aber gleichzeitig stark hygroskopisch sind, ganz abgesehen von ihrer Kostspieligkeit.

Die beste Lösung bietet ein Spiegelsystem mit Aluminiumbedampfung. Eine derart bedampfte Optik besitzt ein Reflexionsvermögen von weit über 90%. Nur muß man darauf achten, daß sie vom Hersteller nicht mit der üblicherweise aufgetragenen Quarzschutzschicht versehen wird, da dann durch die Quarzabsorption in dem hier wichtigen Spektralbereich (etwa 7 . . . 15 μ) das Reflexionsvermögen vermindert wird. Die Lebensdauer des Spiegelbelages wird zwar durch das Weglassen der Schutzschicht geringer, ist aber auch für den Einsatz im Labor und im Gelände völlig ausreichend. Der hier benutzte Spiegel war nach einjährigem Einsatz noch ohne Mängel.

Wegen ihres geringen Durchmessers konnten sowohl das Bolometer als auch das Thermoelement direkt im Strahlengang eines Parabolspiegels angebracht werden. Ein Newton'sches oder ein Cassegrain'sches System war damit überflüssig. Es stand ein Parabolspiegel von Weule, Goslar (Harz), mit 150 mm ϕ und 170 mm Brennweite zur Verfügung, der in eine verstellbare Halterung eingesetzt wurde. In der Brennebene des Spiegels befand sich der Strahlungsempfänger. Das ganze System wurde von einem Blechgehäuse umschlossen, dessen Vorderseite nicht völlig frei war, sondern zum Schutz gegen Staub und Feuchtigkeit eine 30 μ starke Folie aus Polyäthylen (Kalle-Suprathen) besaß.

Der Öffnungswinkel α dieses Systems ergibt sich bei Verwendung des Bolometers aus Spiegelbrennweite f und den Maßen der Empfängerfläche. Wie erwähnt, ist diese beim Bolometer rechteckig und beträgt $a \times b = 1,5 \text{ mm} \times 6,0 \text{ mm}$. Man erhält deshalb die Öffnungswinkel:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} &= \frac{a}{f} & \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2} &= \frac{b}{f} & [7a, b] \\ \alpha_1 &= 0,50^\circ & \alpha_2 &= 2,02^\circ. \end{aligned}$$

Die Fläche auf dem Erdboden, von der die empfangene Strahlung kommt, entspricht in ihrer Form der der Empfängerfläche, ist also ebenfalls ein Rechteck. Seine Maße a^* und b^* werden durch die Öffnungswinkel α_1 und α_2 sowie durch den Abstand h des Gerätes von der Erdoberfläche bestimmt:

$$a^* = 2 h \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} \qquad b^* = 2 h \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2} \quad [8a, b]$$

oder

$$a^* = \frac{h}{f} a \qquad b^* = \frac{h}{f} b \quad [8c, d]$$

Für $h = 100 \text{ m}$ ist

$$a^* = 0,88 \text{ m} \qquad b^* = 3,53 \text{ m}.$$

Bei Verwendung des Thermoelementes muß außer Spiegelbrennweite und Empfängerfläche noch die Brennweite der KBr-Linse berücksichtigt werden. Sie beträgt nach Angabe der Lieferfirma für eine Wellenlänge von 10 μ 8,35 mm (dieser Wert dürfte allerdings infolge von Fertigungsstreuungen nur auf etwa $\pm 10\%$ genau sein). Der Strahlungsempfänger ist 1,0 mm von der rückwärtigen Linsenfläche entfernt; das sind 4,24 mm Entfernung von der hinteren Hauptebene der Linse; es kommt also nur ein virtuelles Bild des Strahlungsempfängers zustande, dessen Größe sich bei einer Empfängerfläche von

$$a = 0,3 \text{ mm} \qquad b = 2,0 \text{ mm}$$

zu

$$a' = 0,6 \text{ mm} \qquad b' = 4,0 \text{ mm}$$

ergibt. Die weitere Berechnung von Öffnungswinkel und Meßfläche kann nun wie beim Bolometer erfolgen; man muß nur die Maße der wirklichen Empfängerfläche $a \times b$ durch die der virtuellen $a' \times b'$ ersetzen. Dann ergeben sich für das System Parabolspiegel mit $f = 170 \text{ mm}$ und Thermoelement mit KBr-Linse die Öffnungswinkel

$$\alpha_1 = 0,2^\circ \qquad \alpha_2 = 1,4^\circ,$$

und die Seiten des Rechtecks, aus dem die Strahlung den Strahlungsempfänger trifft, sind bei einem Abstand Erdoberfläche-Meßgerät von $h = 100 \text{ m}$

$$a^* = 0,36 \text{ m} \qquad b^* = 2,40 \text{ m}.$$

Nicht ganz einfach war die Justierung des optischen Systems, da zumindest beim Thermoelement nicht mit kurzwelliger Strahlung gearbeitet werden durfte. Die

KBr-Linse besitzt im sichtbaren einen anderen Brechungsindex als im langwelligen Bereich und damit eine andere Brennweite; bei $\lambda = 0,5 \mu$ ist $f = 7,77 \text{ mm}$, bei $\lambda = 10 \mu$ dagegen $8,35 \text{ mm}$. Aus diesem Grunde wurde die folgende Methode angewandt:

Die aus einem Schwarzstrahler von etwa 1800°C (Rohröfen von Heraeus, Hanau) kommende Strahlung wurde mit einem Parabolspiegel nahezu parallel gebündelt und fiel dann in das etwa 8 m entfernt aufgestellte Oberflächen-Radiometer. Dort wurde der Spiegel solange verschoben, bis das an den Strahlungsempfänger angeschlossene Meßinstrument maximalen Ausschlag zeigte. Ein nur für Infrarotstrahlung durchlässiges Filter — es wird später noch ausführlich besprochen

— bewirkte dabei, daß nur Strahlung mit einer Wellenlänge $\lambda > 7 \mu$ zur Wirkung kam.

2.3. Modulation

Sowohl das Bolometer als auch das Thermoelement sind auf die Wechsellichtmethode ausgerichtet, bei der man den Empfänger der Frequenz f entsprechend f mal in der Sekunde für $\frac{1}{2f}$ sec abdeckt und ihn ebensooft für $\frac{1}{2f}$ sec wieder freigibt. Man wendet diese Methode vor allem deshalb an, weil sich Wechselspannungen besser verstärken lassen als Gleichspannungen. Ein

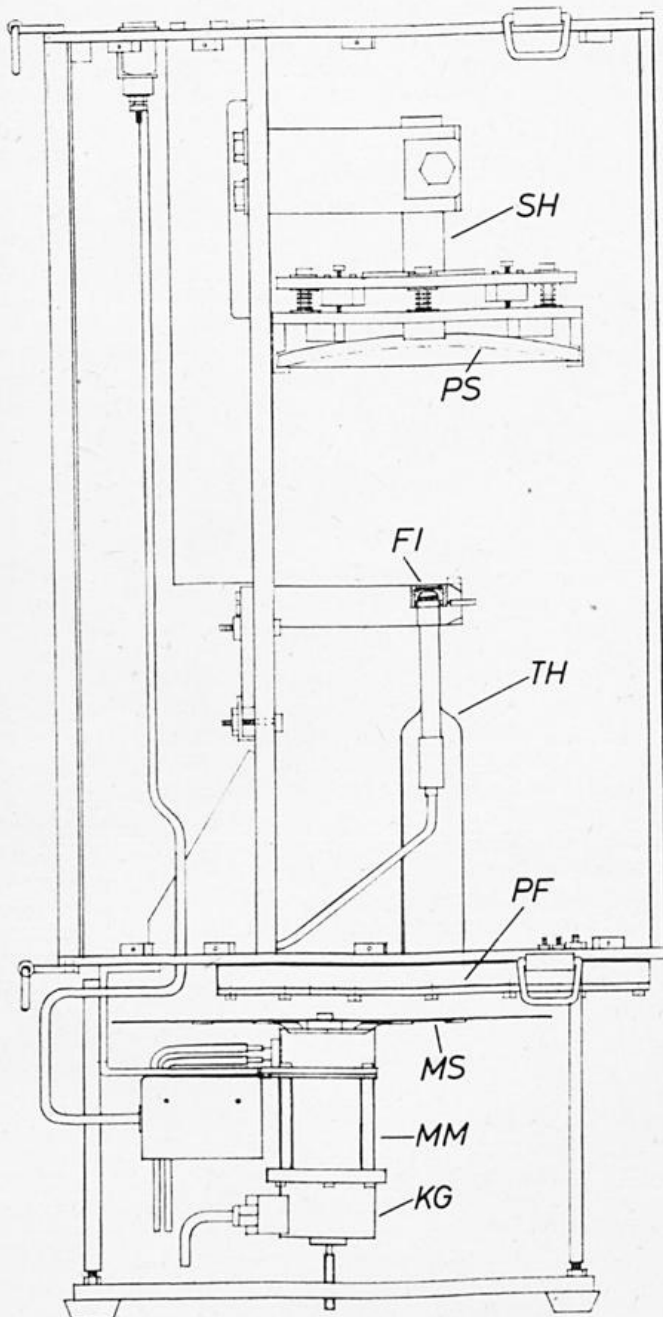


Abb. 3 a)

Schnitt-Zeichnung des Oberflächen-Radiometers. Maßstab 1 : 4. SH = Spiegelhalterung, PS = Parabolspiegel, FI = Fassung mit InSb-Filter, TH = Thermoelement, MS = Modulatorscheibe, MM = Modulator-Motor, KG = Kontaktgleichrichter

weiterer Vorteil ergibt sich aus der Tatsache, daß bei der Wechsellichtmethode nur die Strahlungsdifferenzen zwischen Meßobjekt und Modulatorscheibe das Meßsignal ausmachen. Temperaturänderungen von Strahlungsempfänger, Gehäuseteilen, Filter usw., die bei

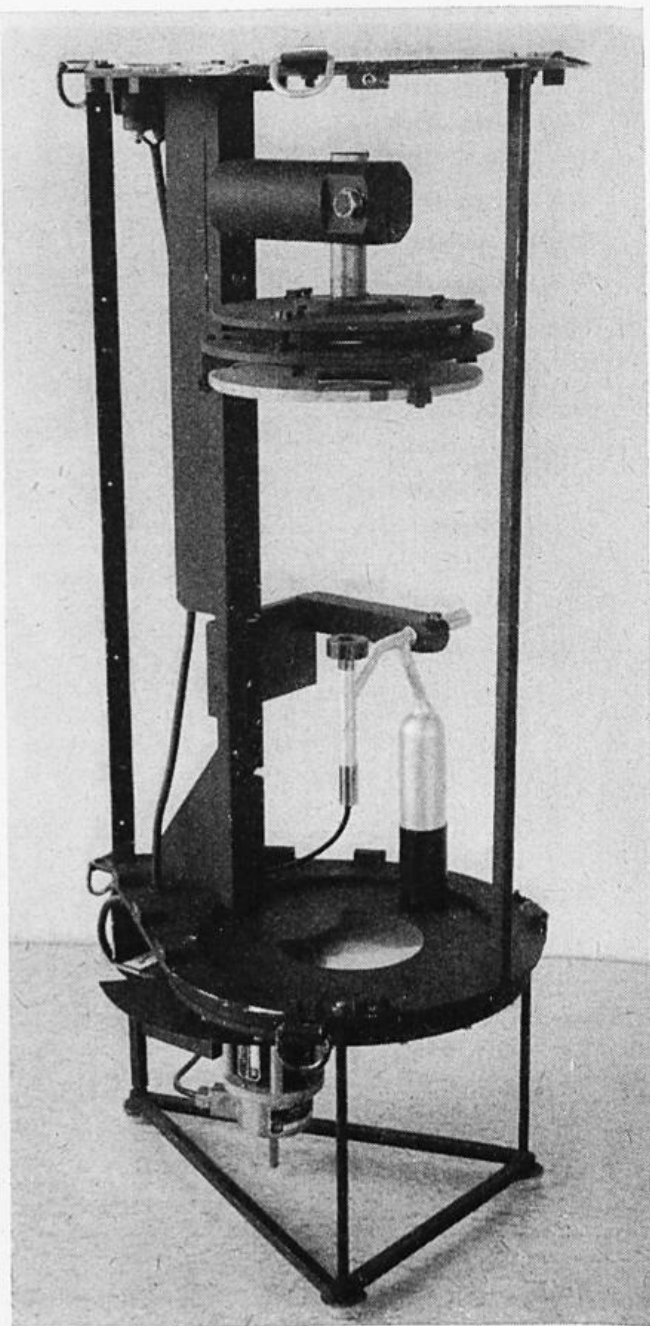


Abb. 3 b)

Oberflächen-Radiometer (Blechgehäuse abgenommen)

der Gleichlichtmethode zu Nullpunktverschiebungen führen, wirken sich infolgedessen hier nicht aus, wenn sich diese Teile zwischen Modulator und Strahlungsempfänger befinden.

Dies besagt, daß man die Modulatorscheibe am besten

vor das ganze Meßgerät setzt. Sie darf dann allerdings keinen zu großen Durchmesser besitzen, da sonst das Gerät zu unförmig und außerdem der Antrieb schwierig wird. Wegen der geringen Bandbreite des Verstärkers muß die Modulationsfrequenz von 12,5 Hz sehr genau eingehalten werden, was sich nur mit einem Synchronmotor durchführen läßt. Dieser hat wiederum den Nachteil einer nur geringen Zugkraft. Im vorliegenden Fall wurde ein Modulator von 220 mm Durchmesser benutzt, der vor einer Eintrittsblende von 86 mm Durchmesser rotierte, angetrieben durch einen Synchronmotor von Berger, Lahr, Type RSM 48/K (375 U/Min).

2.4. Modulator-Temperatur

Da man mit der Wechsellichtmethode die Differenz ΔS zwischen der von der Oberfläche 0 und der Modulatorscheibe M ausgehenden Strahlung

$$\Delta S = S_0 - S_M \quad [9]$$

mißt, muß man zur Bestimmung von S_0 außer ΔS auch S_M , die Eigenstrahlung der Modulatorscheibe, kennen. Diese läßt sich leicht aus der Temperatur T_M mit Hilfe des Stefan-Boltzmann'schen Gesetzes errechnen, wenn die Modulatorscheibe im Infraroten hinreichend schwarz ist. Ein Überzug von Tetenal-Optiklack totmatt erfüllte diese Forderung.

Zur Temperaturmessung der Modulatorscheibe wurde an deren beide Flügel je ein flacher Thermistor (Siemens-Thernewide, Type K 11/2 K) angekittet. Sie wurden hintereinander geschaltet und ihre Anschlüsse zu zwei isoliert auf der Motorachse angebrachten Messingringen geführt, auf denen je ein Schleifkontakt saß.

Die an diesen Schleifkontakten auftretenden Übergangswiderstände bereiteten einige Schwierigkeiten. Wurde für die Kontakte ein Metall verwendet, das härter als Messing war, so nutzte es die Messingringe sehr schnell ab oder beschädigte sie gar, wurde eine weichere Substanz benutzt, etwa Silber oder Kohle, dann traten meist nach kurzer Zeit schon Störungen auf. Anscheinend wurden aus dem Material kleine Spänchen herausgerissen, die sich auf die Kontaktringe setzten und nun bei jedem Umlauf die Schleifer kurz abhoben. Starke Schwankungen des Übergangswiderstandes waren die Folge. Schließlich erwies sich Silbergraphit (Hersteller: Dürrwächter & Co., Pforzheim und Carbon-AG., Frankfurt/Main) als brauchbar. Dieses Material ist einerseits sehr weich, andererseits ist sein Abrieb so fein, daß er in der Regel nicht zu einem Abheben der Schleifkontakte führt.

Die Übergangswiderstände waren es auch, die mit für die Wahl von Thermistoren sprachen. Denn sie besitzen Thermoelementen und Drahtwiderstands-Thermometern gegenüber einen hohen Eigenwiderstand und weisen außerdem einen großen Temperaturkoeffizienten auf. Ihre sonst vielfach störenden Eigenschaften, Nichtlinearität des Temperaturkoeffizienten und große Fertigungsstreuungen von Widerstand und Temperaturkoeffizient, wirken sich hier nicht nachteilig aus, da sie in die Eichung eingehen.

Die Messung des Thermistorenwiderstandes erfolgte durch Strommessung in einer Kompensationsschaltung, deren grundsätzlichen Aufbau Abb. 4a zeigt. B und B_K sind zwei Batterien gleicher Spannung, U, G ein Drehspul-Meßinstrument (Innenwiderstand = R_G), R der Gesamtwiderstand beider Thermistoren und R_K ein Kompensationswiderstand.

Für $R = R_K$ ist das Meßinstrument G stromlos, für den Fall $R \neq R_K$ fließt der Strom

$$I_G = U \left(\frac{1}{R + R_G} - \frac{1}{R_K + R_G} \right) \quad [10]$$

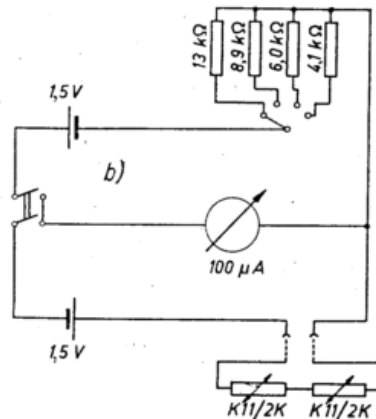
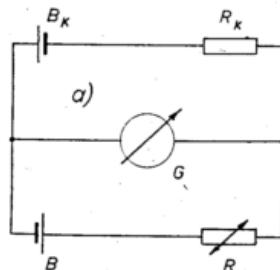


Abb. 4

a) Prinzip- und b) Detail-Schaltbild der Kompensationsschaltung zur Messung der Modulator-Temperatur

Da die Temperaturabhängigkeit eines Thermistors der Gleichung

$$R = a \cdot e^{\frac{b}{T}} \quad [11]$$

folgt (a und b sind dabei Konstanten, die von der äußeren Form und der Zusammensetzung der Halbleiter-Substanz abhängig sind) und demzufolge der Temperaturkoeffizient

$$\frac{dR}{dT} = - \frac{b}{T^2} a \cdot e^{\frac{b}{T}} \quad [12]$$

ist, ergibt sich der Temperaturkoeffizient der Kompensationsschaltung $\frac{dI_G}{dT}$ bei Verwendung von Thermistoren zu:

$$\frac{dI_G}{dT} = U \frac{\frac{a \cdot e^{\frac{b}{T}}}{\left(a \cdot e^{\frac{b}{T}} + R_G \right)^2} \cdot \frac{b}{T^2}}{\quad} \quad [13]$$

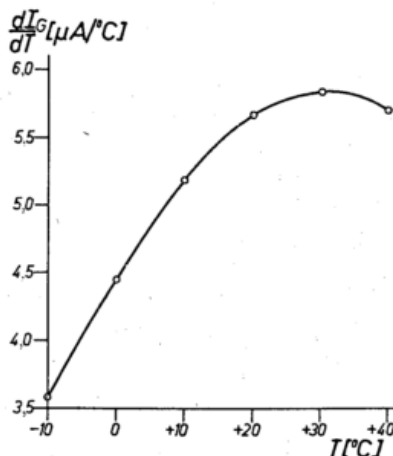


Abb. 5

Temperaturkoeffizient $\frac{dI_G}{dT}$ der Kompensationsschaltung zur Messung der Modulator-Temperatur in Abhängigkeit von der Temperatur T

Er ist, wie man sieht, von dem Temperaturkoeffizienten des Thermistors und der Speisespannung U abhängig. Der eine Faktor ist dabei durch den Thermistor fest vorgegeben und auch die Speisespannung läßt sich nicht beliebig wählen. Ist sie zu groß, dann heizt sich der Thermistor auf. Versuche ergaben, daß bei der vorliegenden Meßanordnung das Optimum 1,5 V beträgt.

Abb. 5 zeigt den unter diesen Voraussetzungen berechneten Temperaturkoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperatur, der demzufolge zwischen $+30^{\circ}\text{C}$ und -10°C um rund 40% von $5,7 \mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$ auf $3,5 \mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$ zurückgeht. Die Nichtlinearität spielt jedoch keine Rolle; sie hat lediglich zur Folge, daß die Eichkurve etwas gekrümmt ist.

Um die Ablesegenauigkeit des Meßgerätes zu erhöhen, wurde der gesamte Meßbereich des Modulator-temperatur-Gerätes durch den Einbau von verschiedenen Kompensationswiderständen R_K in vier sich überlappende Einzelbereiche unterteilt:

- Meßbereich 1: $-8,5^{\circ}\text{C} \dots +13,5^{\circ}\text{C}$
- 2: $+2,0^{\circ}\text{C} \dots +20,9^{\circ}\text{C}$
- 3: $+12,2^{\circ}\text{C} \dots +28,9^{\circ}\text{C}$
- 4: $+22,4^{\circ}\text{C} \dots +37,8^{\circ}\text{C}$

Als Kompensationswiderstände fanden normale Kohleschichtwiderstände Verwendung, nachdem Vorversuche gezeigt hatten, daß ihr Temperaturkoeffizient die Meßgenauigkeit nicht beeinträchtigt. Die Spannung von $2 \times 1,5 \text{ V}$ lieferten zwei Braunstein-elemente (Monozellen in Leak-Proof-Ausführung), und das Meßinstrument war ein $100 \mu\text{A}$ -Drehspulinstrument von 2 k Ω Innenwiderstand von Gossen, Erlangen. Abb. 4b zeigt das Detail-Schaltbild und Abb. 6 die Eichkurven dieser Meßanordnung.

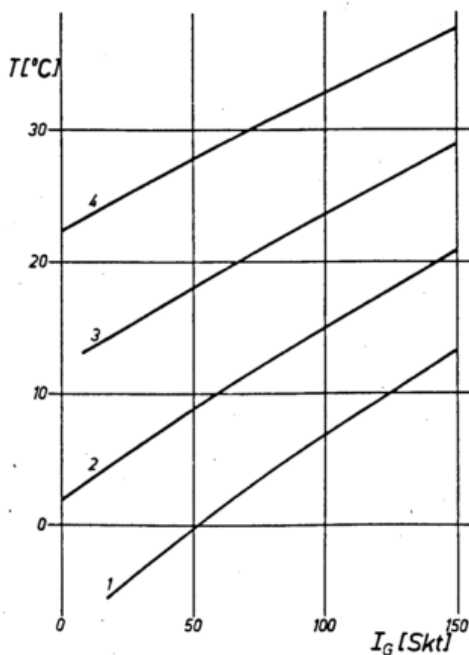


Abb. 6

Eichkurven für die 4 Meßbereiche des Modulator-Temperatur-Gerätes

Zwei Fragen sind nun noch zu untersuchen: Wie wirken sich Spannungsänderungen auf die Messungen aus und inwieweit ist die Temperatur der Thermistoren repräsentativ für die Modulatorscheibe?

Die Speisespannung U der Kompensationsschaltung geht nach den Gleichungen [10] und [13] sowohl in den Meßstrom I_G als auch in den Temperaturkoeffizienten $\frac{dI_G}{dT}$ unmittelbar ein; etwaige Änderungen müssen daher berücksichtigt werden. Ein starkes Absinken der

Batteriespannung war allerdings infolge der nur geringen Stromentnahme (maximal etwa 0,5 mA) nicht zu befürchten, zumal die benutzten Monozellen eine für Batterien große Kapazität besitzen. Zur Eliminierung kleiner Spannungsänderungen wurden vor und nach jeder längeren Messung anstelle der Thermistoren jeweils drei sogenannte Testwiderstände kurz angeschlossen, konstante Widerstände von 3,9 k Ω , 5,1 k Ω und 9,0 k Ω und mit ihnen die Abweichung der augenblicklichen Anzeige von der bei der Thermistoreinrichtung bestimmt. Die dabei ermittelten Differenzen wurden als Korrekturen an den Modulator-temperatur-Messungen angebracht; sie blieben in allen Fällen unter $0,3^{\circ}\text{C}$.

Bei der Frage, ob die Thermistoren-Temperatur repräsentativ für die Modulatorscheibe ist, mußte vor allem geklärt werden, ob sich etwa bei Temperaturänderungen eine unterschiedliche Trägheit von Modulatorscheibe und Thermistoren bemerkbar macht. Zu diesem Zweck wurde unmittelbar neben einem Thermistor ein Thermoelement zusätzlich angeklebt. Dann wurde die Scheibe in ein Kühlgefäß mit einer Lufttemperatur von 15°C gebracht, während sie zuvor eine Temperatur von fast 21°C hatte.

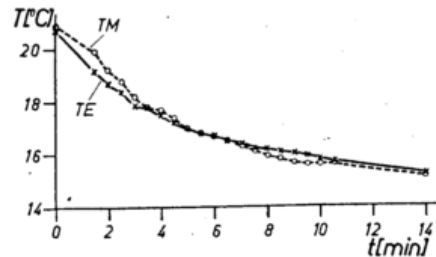


Abb. 7

Vergleich der Temperaturen von Modulator-Thermistoren TM und Thermoelement TE bei einer plötzlichen Änderung der Lufttemperatur. Weitere Erläuterungen im Text

Abb. 7 zeigt, daß die Temperaturen von Thermistoren und Thermoelement nur unwesentlich voneinander abweichen. Man muß dabei allerdings berücksichtigen, daß sich die Lufttemperatur in dem Kühlgefäß durch das Einbringen der wärmeren Modulatorscheibe erhöhte; sie stieg auf 17°C und sank erst im Laufe der Zeit wieder langsam auf 15°C ab. Durch den Versuch wurde also nur ein plötzlicher Sprung der Lufttemperatur von etwa 4°C realisiert.

Um das Verhalten der Thermistoren bei größeren Temperaturänderungen zu untersuchen, wurde die Modulator-Scheibe mit dem zusätzlich angeklebten Thermoelement genau in der Mitte zwischen zwei etwa 4 cm breite, erhitzte Messingplatten eingespannt und wiederum der Temperaturverlauf aufgezeichnet. Abb. 8

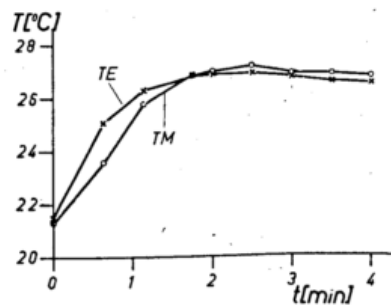


Abb. 8

Vergleich der Temperaturen von Modulator-Thermistoren TM und Thermoelement TE bei schneller Erwärmung des Modulators. Weitere Erläuterungen im Text

gibt eine dieser Kurven wieder. Die Meßpunkte zur Zeit Null sind dabei unmittelbar vor dem Einspannen aufgenommen. Man sieht, daß die Differenzen zwischen

Thermoelement und Thermistoren den größeren Temperaturunterschieden entsprechend zunehmen, daß der Anstieg der Thermistoren aber doch recht rasch vor sich geht. Nach Ablauf von 2 Minuten setzt bereits wieder die Abkühlung ein; deshalb liegen von hier an die Thermistor-Angaben über denen des Thermoelementes.

Diese Ergebnisse entsprechen der ruhenden Modulatorscheibe. Bei einer Rotation mit 375 U/Min. sind infolge der damit verbundenen Ventilation die Voraussetzungen für eine Temperaturgleichheit von Modulatorscheibe und Thermistoren noch wesentlich günstiger. Man kann die Thermistoren-Temperatur also durchaus als repräsentativ für die Modulatorscheibe ansehen.

Die oben beschriebene Kompensationsschaltung zur Messung des Thermistorenwiderstandes konnte nicht von Anfang an eingesetzt werden, da das dazu benötigte Drehspul-Meßinstrument infolge einer langen Lieferfrist erst zu einem relativ späten Termin zur Verfügung stand. Für die Zwischenzeit wurde eine Methode benutzt, bei der man ohne Meßinstrument auskommt. Obwohl sie nur im Labor Verwendung fand, soll sie im Hinblick auf andere Anwendungsmöglichkeiten hier kurz beschrieben werden.

Bei einem mit zwei Transistoren (OC 70) arbeitenden RC-Summer nach Rost (15) (Schaltbild s. Abb. 9a) wurde der Widerstand R von den Modulator-Thermistoren gebildet. Sie bestimmten damit zusammen mit der Kapazität C die Frequenz der erzeugten, im Kopfhörer K zu kontrollierenden Schwingung. Mit Hilfe eines Umschalters konnte anstelle der Thermistoren ein

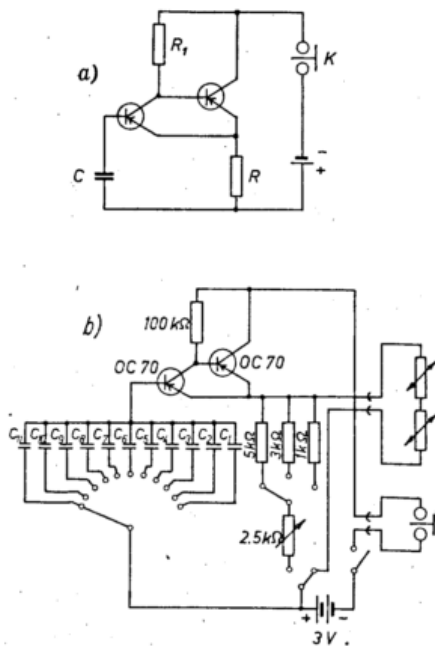


Abb. 9
a) Prinzip- und b) Detail-Schaltbild des RC-Temperatursummers

Drehpotentiometer angeschlossen werden, dessen Widerstand nun solange verändert wurde, bis beide, Thermistoren und Drehpotentiometer, die gleiche Tonhöhe erzeugten. In diesem Fall sind beide Widerstände genau gleich. Man braucht nun nur noch die Skala des Potentiometers in Temperaturwerten zu eichen. Der Temperaturkoeffizient der Thermistoren ist so groß und das menschliche Ohr so empfindlich für Tonunterschiede, daß man mit dieser Methode die Temperatur auf $\pm 0,2^\circ\text{C}$ genau bestimmen kann. Bei der praktischen Ausführung des Gerätes, deren endgültiges Schaltbild Abb. 9b zeigt, wurde der gesamte Meßumfang in drei

Einzelbereiche unterteilt und außerdem die Kapazität C in 11 Stufen einstellbar gemacht, um auf diese Weise einerseits die Ablesegenauigkeit zu erhöhen und andererseits die absolute Tonhöhe variieren zu können. Die Speisespannung war mit 3 V so gewählt, daß weder Thermistoren, noch Transistoren sich aufheizen konnten.

2.5. Halbleiter-Filter

Schon eingangs wurde erwähnt, daß ein Oberflächen-Radiometer nicht durch kurzwellige Strahlung, etwa vom Erdboden reflektierte Sonnenstrahlung, beeinflusst werden darf. Glücklicherweise kann man dies heute durch Halbleiter-Filter vermeiden. Insbesondere Indium-Arsenid (InAs) und Indium-Antimonid (InSb) eignen sich als Filtermaterialien für diesen Zweck. Sie reflektieren kurzwellige Strahlung und sind erst ab etwa $3,7\ \mu$ bzw. $7,3\ \mu$ durchlässig (vgl. Abb. 10). Allerdings

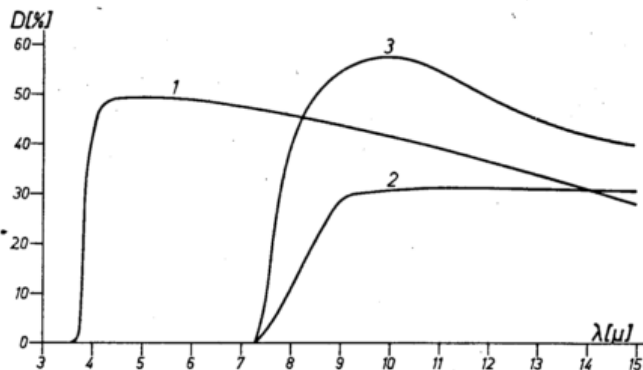


Abb. 10
Spektrale Durchlässigkeit von Halbleiter-Filtern; 1 = InAs, 2 = InSb, 3 = InSb, optisch vergütet

erreicht die Durchlässigkeit eines 0,5 mm dicken Filters aus InAs nur etwa 50% (bei $\lambda = 5\ \mu$; bei $\lambda = 10\ \mu$ ca. 45%) und bei einem 0,4 mm dicken InSb-Filter nur etwas über 30%.

Die Verluste beruhen in erster Linie auf Reflexion, daher lassen sie sich durch Aufdampfen eines $\lambda/4$ -Belages auf die Oberflächen — in der Optik als Antireflexbelag bekannt — wesentlich vermindern. Da sich dieser Belag streng genommen nur auf eine bestimmte Wellenlänge abstimmen läßt, wird durch ihn allerdings auch die Durchlässigkeitscharakteristik verändert. So steigt bei einem mit einem Antireflexbelag versehenen InSb-Filter die Durchlässigkeit zwar bei $\lambda = 10\ \mu$ von 30% auf knapp 60%, bei $\lambda = 15\ \mu$ aber nur von 30% auf 40%. Das ist jedoch nicht von Nachteil.

Man kann nämlich auf diese Weise den Einfluß von Absorption und Eigenstrahlung aus der Luftschicht zwischen Meßobjekt und Meßgerät erheblich reduzieren. Bekanntlich handelt es sich dabei um die Absorption und Emission der Wasserdampf-, Kohlendioxid- und Ozonbanden, von denen sich hier die Wasserdampfbanden im Bereich von 6 μ Wellenlänge sowie die Kohlendioxid- und Ozonbanden um 15 μ Wellenlänge auswirken können. Die Wasserdampfstrahlung, die den weitaus stärksten Einfluß ausübt, kommt hinter einem InSb-Filter nicht mehr zur Wirkung, da dieses ja erst ab 7,3 μ durchlässig ist. Die Kohlendioxid- und die Ozonbanden können sich zwar noch bemerkbar machen, werden aber durch die bei 15 μ Wellenlänge um $\frac{1}{2}$ geringere Durchlässigkeit als bei 10 μ in ihrer Wirksamkeit beschränkt. Ihr Einfluß ist bei einer Flughöhe von etwa 100 m in den meisten Fällen zu vernachlässigen, wie das die Ergebnisse der Meßflüge noch zeigen werden.

Im vorliegenden Fall wurde ein von $\lambda = 7,3\ \mu$ an durchlässiges InSb-Filter aus den Versuchslaboratorien

der Siemens-Schuckert-Werke, Erlangen, von 12 mm ϕ und 0,4 mm Dicke benutzt, das von den Leitz-Werken in Wetzlar beidseitig mit einem Antireflexbelag versehen worden war. Es war so gefaßt, daß es unmittelbar vor dem Bolometer-Fenster bzw. der Thermo-element-Linse aufgesteckt werden konnte.

Den großen Vorteilen der Halbleiter-Filter steht der Nachteil gegenüber, daß sich das Stefan Boltzmannsche Gesetz nicht mehr anwenden läßt, denn dieses gilt nur, wenn man die Gesamtstrahlung eines schwarzen oder grauen Körpers mißt. Mit dem Filter greift man nur einen bestimmten Spektralbereich heraus und hat dann noch nicht einmal eine von der Wellenlänge unabhängige Durchlässigkeit. In diesem Fall ist eine formelmäßige Darstellung des Zusammenhanges von

Strahlung und Temperatur schwierig. Deshalb wurde hier ein halbempirisches Verfahren angewandt, bei dem außer der Durchlässigkeit des InSb-Filters auch die der Polyäthylen-Folie berücksichtigt wurde. Polyäthylen besitzt einige Absorptionsbanden, insbesondere in der Gegend von 3,5, 7 und 15 μ Wellenlänge (vgl. (16)). Das KBr-Fenster vor dem Bolometer bzw. die KBr-Linse vor dem Thermoelement kann dagegen außer Betracht bleiben, da die Absorption dieses Materials bis über 20 μ hinaus praktisch konstant ist. Durch punktweise Multiplikation der Durchlässigkeitskurven von InSb-Filter und Polyäthylen-Folie wurde die Gesamtdurchlässigkeitskurve des Oberflächen-Radiometers in Abhängigkeit von der Wellenlänge bestimmt (Abb. 11) und diese dann mit der Planck'schen Strahlungskurve eines schwarzen Körpers der Temperatur T — eben-

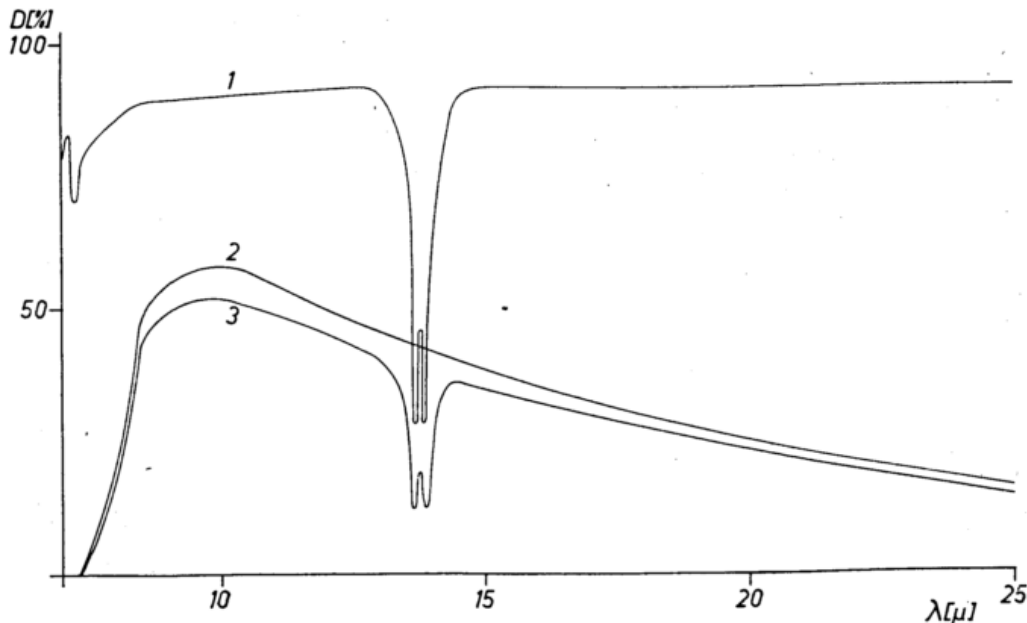


Abb. 11
Spektrale Durchlässigkeitskurve von Polyäthylenfolie (Kalle-Suprathen, 0,03 mm) (1) und optisch vergütetem InSb-Filter (2) sowie gemeinsame Durchlässigkeitskurve von Polyäthylenfolie und InSb-Filter (3)

falls wieder punktweise — multipliziert (Abb. 12). Durch Ausplanimetrieren der von dieser Kurve und der Abszisse begrenzten Fläche ergab sich der Betrag

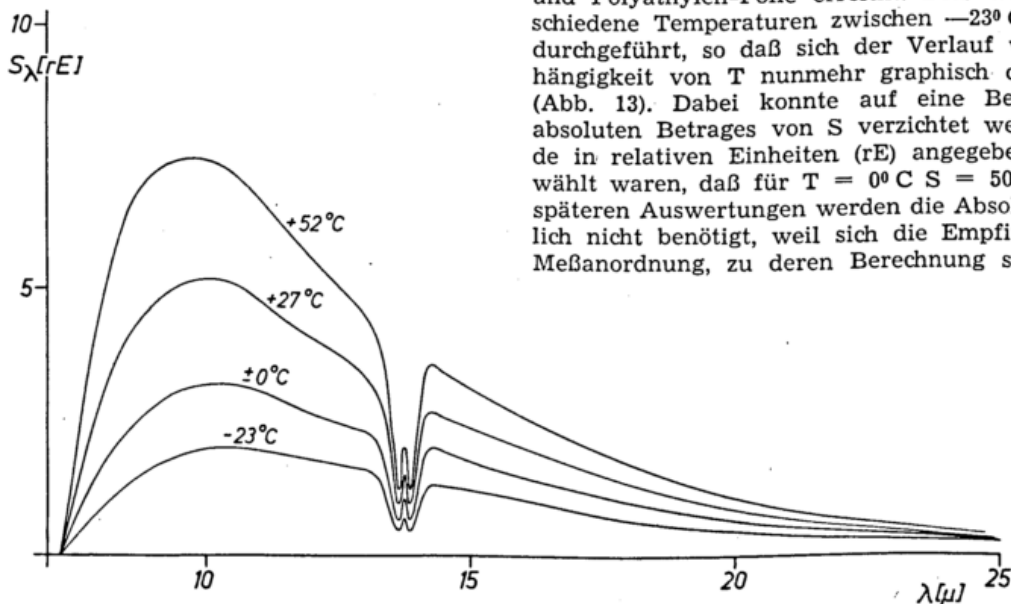


Abb. 12
Spektrale Energieverteilung der im Oberflächen-Radiometer wirksamen Strahlung eines schwarzen Körpers von -23°C , 0°C , $+27^{\circ}\text{C}$ und $+52^{\circ}\text{C}$

der Strahlung, die von einem schwarzen Körper der Temperatur T ausgesandt, den Strahlungsempfänger von Bolometer bzw. Thermoelement durch InSb-Filter und Polyäthylen-Folie erreicht. Dies wurde für verschiedene Temperaturen zwischen -23°C und $+52^{\circ}\text{C}$ durchgeführt, so daß sich der Verlauf von S in Abhängigkeit von T nunmehr graphisch darstellen ließ (Abb. 13). Dabei konnte auf eine Berechnung des absoluten Betrages von S verzichtet werden. S wurde in relativen Einheiten (rE) angegeben, die so gewählt waren, daß für $T = 0^{\circ}\text{C}$ $S = 500$ rE. Bei den späteren Auswertungen werden die Absolutwerte nämlich nicht benötigt, weil sich die Empfindlichkeit der Meßanordnung, zu deren Berechnung sie allein not-

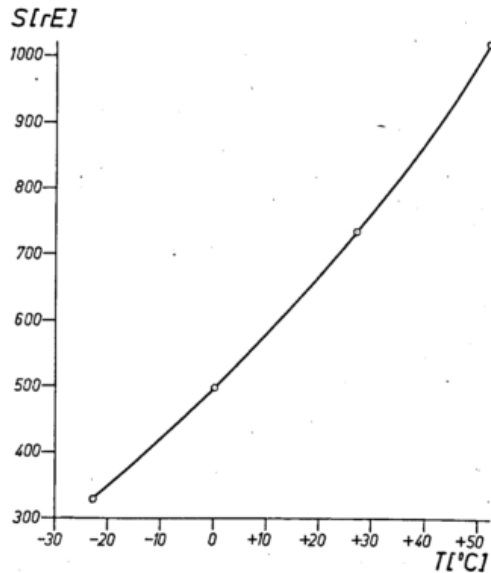


Abb. 13

Im Oberflächen-Radiometer wirksame Strahlung S eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von dessen Temperatur T

wendig wären, viel besser experimentell bestimmen läßt. Zur Auswertung von Eichungen und Messungen wurden die Werte der S-Kurve in einer S-Tabelle zusammengestellt, die S in Abhängigkeit von T in $1/10^{\circ}\text{C}$ -Schritten enthält.

Ein Antireflex-Belag läßt sich auf Halbleiter-Filter heute noch nicht mit der gleichen Festigkeit aufdampfen wie auf Glas. So ist es zu erklären, daß sich in der Zeit zwischen zwei Meßserien die $\lambda/4$ -Schicht auf der der Luft ausgesetzten Seite des Filters teilweise löste und ablätterte. Da eine Neuvergoldung des Filters aus technischen Gründen nicht möglich war, mußte es in diesem Zustand weiterbenutzt werden. Es war nun nur noch eine $\lambda/4$ -Schicht wirksam; infolgedessen änderte sich die Durchlaß-Charakteristik des Filters. Daher mußte für die weiteren Messungen die S-Kurve unter Verwendung der nun gültigen Durchlässigkeitskurve neu berechnet werden. Außerdem ging natürlich auch die Gesamtdurchlässigkeit des Filters und damit die Empfindlichkeit des Oberflächen-Radiometers zurück. Dieser Effekt war jedoch nicht so groß, daß durch ihn die Meßgenauigkeit beeinträchtigt wurde. Im übrigen ging er mit in die Eichungen ein, konnte also zu keinen Meßfehlern führen.

2.6. Eichung und Verbesserung der Eichkonstanz

Die Eichungen des Oberflächen-Radiometers wurden über einer Wasseroberfläche durchgeführt. Wasser eignet sich als Eichfläche besonders gut, weil es ein hohes Absorptionsvermögen im Infraroten besitzt (nach Tab. 1 $\epsilon = 0,965$) und weil es als Flüssigkeit so gut durchmischt werden kann, daß die Temperatur der Oberfläche mit der von einem Quecksilber-Thermometer etwa 1—2 cm darunter gemessenen übereinstimmt. Das Eichgefäß war eine quadratische Kunststoffschüssel, deren Inhalt durch einen Eintauch-Thermostaten (Braun-Thermomix I) umgepumpt und temperiert wurde. Temperaturen unter der Raumtemperatur wurden durch Einbringen von Eis erreicht, wobei allerdings erst nach Schmelzen aller Eisstückchen mit den Messungen begonnen werden konnte. Eine Oberflächen-Temperatur von genau 0°C ließ sich durch eine reine Eisfüllung des Eichgefäßes erreichen, denn bei Zimmertemperatur überziehen sich die Eisstückchen sofort mit einem Wasserhäutchen von 0°C .

Mit Hilfe dieser Vorrichtung wurden Eichreihen der Oberflächen-Temperatur aufgenommen. Ihre Auswertung ging folgendermaßen vor sich:

Aus den Messungen der Oberflächen-Temperatur T_0 und der Modulator-Temperatur T_M wurden mit Hilfe der S-Tabelle S_0 und S_M bestimmt und daraus

$$\Delta S = S_0 - S_M \quad [9]$$

gebildet.

In einem Eichdiagramm wurde dann der Ausschlag des im Verstärker eingebauten Meßinstrumentes A in Abhängigkeit von ΔS aufgetragen. Umgekehrt wurde bei den Messungen mit Hilfe des Eichdiagrammes aus der Anzeige des Verstärker-Meßinstrumentes ΔS bestimmt, wie bei der Eichung aus T_M der Wert von S_M ermittelt, dann

$$S_0 = S_M + \Delta S \quad [9a]$$

berechnet und nun in der S-Tabelle das zu S_0 zugehörige T_0 abgelesen. Dieses Verfahren ist zwar etwas umständlich, berücksichtigt aber dafür auch die Änderungen von ΔS mit der Temperatur.

In dieser Weise wurden im Labor eine ganze Reihe von Eichkurven für das Oberflächen-Radiometer mit dem Bolometer als Strahlungsempfänger ermittelt. Sie ergaben jedoch immer wieder eine andere Empfindlichkeit des Gerätes, so daß an eine Reproduzierbarkeit von Messungen nicht zu denken war. Nach zahlreichen Versuchen wurden schließlich folgende 3 Ursachen für diese Inkonstanz gefunden:

- 1) eine Abhängigkeit der Bolometer-Empfindlichkeit von der Temperatur,
- 2) eine Temperaturabhängigkeit des Gleichrichtersystems im Verstärker und
- 3) eine Einbrennzeit des Verstärkers von mehr als 1 Stunde.

Die Temperaturabhängigkeit des Bolometers erklärt sich aus der Art des Strahlungsempfängers. Es ist, wie weiter oben erwähnt, eine dünne mit Metall bedampfte Membrane. Die aufgedampfte Metallschicht ist dabei so dünn, daß sie bereits Halbleiter-Eigenschaften zeigt, und zu den Halbleiter-Eigenschaften gehört ja ein relativ großer negativer Temperatur-Koeffizient.

Der Nachweis geschah durch folgenden Versuch mit kurzwelliger Strahlung:

Paralleles Licht einer Reuterlampe fiel auf das Bolo-

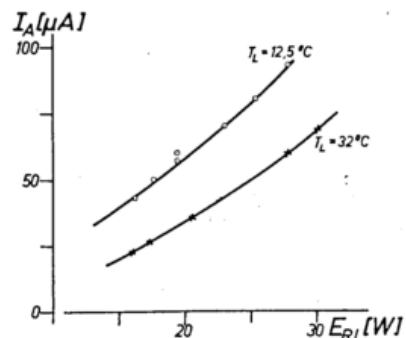


Abb. 14 a)

Empfindlichkeit des Bolometers BKS 198 (Ausgangsstrom I_A des PTW-Verstärkers in Abhängigkeit von der der bestrahlenden Reuterlampe zugeführten elektrischen Energie E_{RL}) bei Lufttemperaturen von $12,5^{\circ}\text{C}$ und 32°C

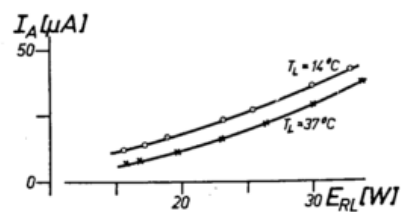


Abb. 14 b)

Empfindlichkeit des Bolometers BKS 344/II (Ausgangsstrom I_A des PTW-Verstärkers in Abhängigkeit von der der bestrahlenden Reuterlampe zugeführten elektrischen Energie E_{RL}) bei Lufttemperaturen von 14°C und 37°C

meter, das mit einer schwarzen Flügelscheibe moduliert wurde. Durch Ändern der an die Reuterlampe angelegten Spannung konnte die zugeführte Energie und damit die Strahlung variiert werden. Dies geschah bei Raumtemperaturen von 12,5 und 32° C, wobei dem Bolometer vor dem Versuch längere Zeit zur Verfügung stand, sich an diese Temperaturen anzugleichen. Das Ergebnis ist in Abb. 14a dargestellt. Es ist dabei der Ausschlag des Verstärker-Meßinstrumentes in Abhängigkeit von der der Reuter-Lampe zugeführten Leistung (in Watt) für die beiden verschiedenen Raumtemperaturen dargestellt. Die Temperaturerhöhung von 12,5° C auf 32° C hat demnach einen Rückgang der Empfindlichkeit von 30—50% zur Folge. Bei einem anderen untersuchten Bolometer war zwar die Temperaturabhängigkeit geringer, dafür blieb aber auch seine Empfindlichkeit erheblich hinter der des zuerst untersuchten zurück (Abb. 14b).

Der Effekt läßt sich ausschalten, wenn man das Bolometer auf konstanter Temperatur hält. Bei einer Apparatur, die in einem Hubschrauber verwendet werden soll, ist das aber kaum möglich. Versuche, mit einem Thermistor die Temperatur des Bolometers zu messen und die Bolometer-Empfindlichkeit dieser Temperatur entsprechend zu korrigieren, scheiterten wahrscheinlich deshalb, weil bei geringen Strahlungsenergien keine eindeutige Beziehung zwischen Außen- und Innentemperatur des Bolometers besteht. Das ist nicht verwunderlich, da das Bolometer evakuiert ist und außerdem sich im Betrieb die beiden Metallfilme infolge der Brückenspannung von 2 Volt bis auf Temperaturen von 50° C und mehr erwärmen.

Das Bolometer wurde deshalb durch das Thermolement ersetzt. Bei ihm ist zwar auch eine gewisse Temperatur-Empfindlichkeit vorhanden, denn der Strahlungsempfänger ändert wie jedes Metall mit der Temperatur seinen Widerstand, und es fließt dann in dem Kreis Thermoelement — Trafo-Wicklung ein anderer Strom. Der Temperaturkoeffizient von Metallen ist aber eine Zehnerpotenz geringer als der von Halbleitern und daher hier unerheblich.

Dieser Unterschied ließ sich bereits an Hand eines ganz groben Versuches zeigen. Bolometer bzw. Thermolement, mit einer schwarzen Flügelscheibe moduliert, wurden von einer Reuterlampe beleuchtet. Dann wurden sie von einem Föhngebläse 20 sec lang mit heißer Luft angeblasen. Dadurch ergaben sich im Mittel aus je 5 Versuchen Anzeigeänderungen (bei gleicher Lichtstärke der Reuterlampe) beim Bolometer von 76,0 auf 63,9 Skalenteilen (= -12,1 Skt.), beim Thermolement dagegen nur von 75,7 auf 77,7 Skt. (= +2,0 Skt.). Das bereits oben erwähnte unempfindlichere Bolometer wies bei diesem Versuch im Mittel aus 4 Einzelversuchen eine Anzeigeänderung von 71,7 auf 63,7 Skt. (= -8,0 Skt.) auf.

Auch die Temperaturabhängigkeit des Gleichrichter-Systems im Verstärker beruht auf dem hohen Temperatur-Koeffizienten der Halbleiter. In diesem Fall sind es die in Graetz-Schaltung benutzten Halbleiter-Dioden. Eine Graetz-Schaltung ist ja so aufgebaut, daß in jeder Halbperiode des Wechselstroms jeweils 2 Dioden in Durchlaß- und 2 Dioden in Sperr-Richtung betrieben werden. Da der Sperrwiderstand der Dioden nicht unendlich ist, fließt immer ein gewisser Rückstrom, um dessen Betrag der Meßstrom verkleinert wird. Ändert sich nun die Temperatur der Dioden, so ändert sich mit ihr der Sperr-Widerstand und damit über den Rückstrom auch der Meßstrom (die ebenfalls vorhandene Änderung des Durchlaßwiderstandes spielt in diesem Zusammenhang wegen des vorgeschalteten 100 kΩ-Widerstandes keine Rolle).

Ein Beispiel dafür bringt Abb. 15. Hier ist bei konstant gehaltener Eingangsspannung U_E aus einem RC-

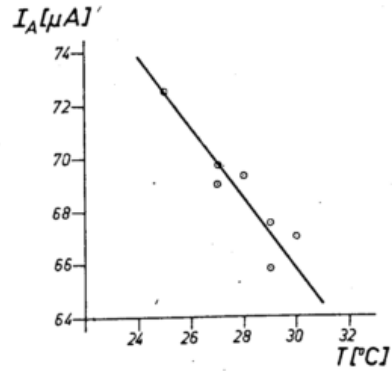


Abb. 15

Temperaturempfindlichkeit des Gleichrichters im PTW-Verstärker. Ausgangsstrom I_A des PTW-Verstärkers bei konstantem Eingangssignal in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T

Generator der Ausgangsstrom I_A des Verstärkers in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. Man sieht deutlich den Rückgang des Meßstromes mit steigender Temperatur, wenn auch die Einzelwerte erheblich streuen. Diese Streuung ist im übrigen nicht verwunderlich, da nicht die Temperatur der Dioden, sondern nur die Lufttemperatur gemessen wurde.

Zur Beseitigung dieses Effektes wurden auf Anraten der Physikalisch-Technischen Werkstätten je 2 Dioden durch 100 kΩ-Widerstände ersetzt und dafür der vorgeschaltete 100 kΩ-Widerstand entfernt (vgl. Abb. 16a und 16b).

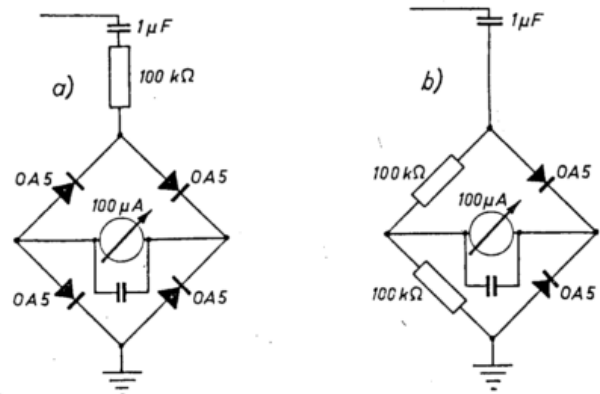


Abb. 16

Gleichrichter des PTW-Verstärkers a) vor und b) nach dem Umbau

Der Erfolg war am Verstärker leicht zu demonstrieren. Wurden die Dioden nun mit dem heißen Luftstrom eines Föhngebläses von Zimmertemperatur auf etwa 40 bis 50° C erwärmt, so ging der Ausschlag des Verstärkermeßinstrumentes nur noch um 1 Skt. zurück, um sich nach dem Abkühlen wieder auf seinen ursprünglichen Wert einzustellen.

Um schließlich den Einfluß der langen Einbrennzeit des Verstärkers herauszubekommen, wurde mit einem RC-Generator auf den Verstärker-Eingang ein konstantes Signal von exakt 12,5 Hz vom Moment des Einschaltens an gegeben und dann die Ausgangsspannung im Verlauf der Zeit verfolgt. Abb. 17, in der zwei solche Versuche dargestellt sind, läßt erkennen, daß die Ausgangsspannung über eine Stunde lang kontinuierlich zurückgeht und erst dann auf etwa 2% des Vollausschlages konstant ist. Der Verstärker mußte aus diesem Grunde mindestens eine Stunde vor Beginn der Messungen eingeschaltet werden. Um aber auch die nach diesem Zeitraum noch vorhandenen kleinen Schwankungen in der Verstärkung, sowie die geringen Temperatureinflüsse von Thermolement und Gleichrichter-Dioden zu eliminieren, wurde unmittelbar vor

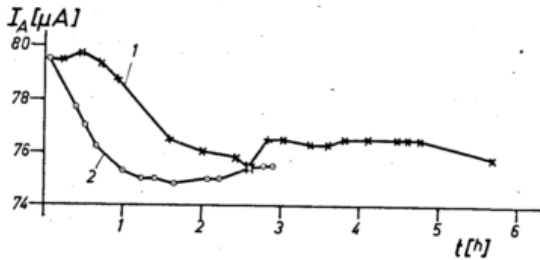


Abb. 17
„Einbrenn-Vorgang“ des PTW-Verstärkers. Ausgangsstrom I_A des PTW-Verstärkers bei konstantem Eingangssignal in Abhängigkeit von der Zeit t

und nach den Messungen eine Eichung vorgenommen und noch weitere Kontrollen dazwischen eingeschoben.

Die Eichkurven des Oberflächen-Radiometers zeigen noch eine Erscheinung, die auch dann vorhanden ist, wenn man alle bisher besprochenen Fehler ausschaltet: Sie gehen nicht durch den Nullpunkt, oder mit anderen Worten: Bei völliger Temperatur-Gleichheit von Modulatorscheibe und Wasseroberfläche wird vom Verstärker-Instrument noch immer eine geringe Strahlung ΔS angezeigt. Diese Erscheinung geht nicht etwa auf Meßfehler von Modulator- oder Wassertemperatur zurück, sondern ist durchaus reell. Sowohl das Wasser als auch der Modulator wurden bisher so behandelt, als seien sie schwarze Körper, sind es aber in Wirklichkeit nur näherungsweise (wie bereits mehrfach erwähnt, ist das Absorptionsvermögen von Wasser $\epsilon_w = 0,965$). Infolgedessen gilt streng genommen nicht

$$\Delta S = S_0 - S_M \quad [9]$$

sondern

$$\Delta S' = \epsilon_0 S_0 + (1 - \epsilon_0) G_0 - \epsilon_M S_M - (1 - \epsilon_M) G_M \quad [14]$$

wobei ϵ_M das Absorptionsvermögen der Modulatorscheibe und ϵ_0 das der Oberfläche, hier also $\epsilon_0 = \epsilon_w$ ist, sowie $(1 - \epsilon_0) G_0$ und $(1 - \epsilon_M) G_M$ die an der Wasseroberfläche bzw. am Modulator reflektierte Strahlung ist.

Man müßte also von rechts wegen zur Bestimmung von S_0 und damit T_0 jeweils den Ausdruck für $\Delta S'$ berechnen. In der Praxis ist dieses Verfahren jedoch viel zu umständlich, ganz abgesehen davon, daß die Fehler, die durch die Vernachlässigung entstehen, meist weit unterhalb der Meßgenauigkeit liegen.

Trägt man den Ausschlag A des Verstärker-Meßinstrumentes in Abhängigkeit von ΔS auf, so lautet die Gleichung dieser Eichkurve

$$\Delta S = \gamma A + (1 - \epsilon_0)(S_0 - G_0) - (1 - \epsilon_M)(S_M - G_M) \quad [15]$$

Das ist keine Gerade mehr. Die Abweichungen von der Geraden sind aber so gering, daß sie in den Eichkurven nicht in Erscheinung treten (Abb. 18 zeigt ein Beispiel dafür), zumal das Glied $(1 - \epsilon_M)(S_M - G_M)$ praktisch gleich Null ist. Die vom Modulator reflektierte Strahlung $(1 - \epsilon_M) G_M$ geht teils von diesem selbst aus und wird von dem Hohlspiegel des Oberflächen-Radiometers zurückgeworfen, teils kommt sie von den Innenwänden, Halterungen usw. des Oberflächen-Radiometers, die dasselbe Absorptionsvermögen ϵ_M wie der Modulator besitzen (Anstrich mit dem gleichen Mattlack) und nahezu die gleiche Temperatur wie der Modulator. Gleichung [15] vereinfacht sich also zu der Form

$$\Delta S = \gamma A + (1 - \epsilon_0)(S_0 - G_0) \quad [15a]$$

Für $A = 0$ wird $\Delta S = (1 - \epsilon_0)(S_0 - G_0)$, das ist der Betrag, den die Eichkurve auf der Abszisse abschneidet (s. Abb. 18).

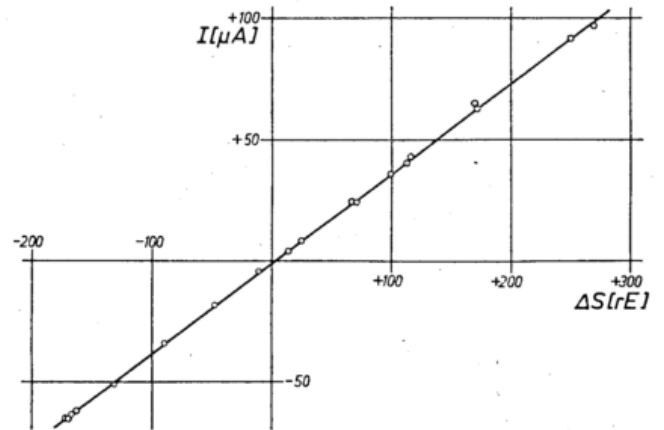


Abb. 18
Eichkurve des Oberflächen-Radiometers

2.7. Anpassung der Geräte für Hubschrauber-Messungen

War nun die Meßeinrichtung komplett für Laboruntersuchungen, so mußte sie nun noch „hubschrauber-tauglich“ gemacht werden. Dazu gehörte in erster Linie die Umstellung der Stromversorgung auf Batteriebetrieb. Um unabhängig vom Bordnetz zu sein, wurden sämtliche Geräte aus zwei hintereinander geschalteten Akkus von je 12 V und 32 Ah betrieben. Beim Verstärker wurden Heiz- und Anodenkreis getrennt versorgt, der Heizkreis mit Gleichstrom aus einem eigens von den Physikalisch-Technischen Werkstätten für diesen Zweck gebauten Gleichspannungs-Stabilisierungsgerät, der Anodenkreis unter Benutzung der im Verstärker eingebauten Gleichrichtungs- und Stabilisierungseinrichtungen mit einem Transistor-Wechselrichter. Versuche, für den Anodenkreis eine große Anodenbatterie zu benutzen, scheiterten wegen des zu großen Stromverbrauchs; die Batteriespannung sank im Betrieb viel zu schnell ab.

Einige Probleme gab es bei der Versorgung des Synchronmotors für den Modulatorantrieb. Wegen der geringen Bandbreite des Verstärkers muß hier die Frequenz eine außerordentlich hohe Konstanz aufweisen, unabhängig von Spannungs- und Temperaturschwankungen. Da ein Schwingquarz mit einer Frequenz von 1,6 kHz zur Verfügung stand, wurde zunächst versucht, einen Untersetzer aus 4 Flip-Flop-Stufen mit Transistoren zu bauen und mit diesem einen Leistungsverstärker zu steuern. Die Flip-Flop-Stufen arbeiteten aber nur in einem engen Temperaturbereich einwandfrei. Es wurde dann vom Institut für Elektrotechnik der Universität Mainz ein Transistor-Wechselrichter nach einem Schaltvorschlag von Intermetall gebaut ($U_E = 24 V$, $U_A = 220 V \approx$, 50 Hz), dessen Frequenz durch einen LC-Kreis gesteuert wurde. Dieser LC-Kreis erwies sich als hinreichend spannungs- und temperatur-unempfindlich. Der nachgeschaltete Leistungsverstärker war so dimensioniert, daß außer dem Synchronmotor auch noch der Anodenkreis des Verstärkers mitversorgt werden konnte.

Ein weiterer Punkt bei der Hubschraubertauglichkeit der Apparatur war die Erschütterungsempfindlichkeit von Verstärker und Strahlungsempfänger. Der Verstärker ist schon im Laborbetrieb recht empfindlich gegen Stöße. Sie koppeln in die beiden ersten Verstärkerstufen ein und werden dann mit verstärkt. Die Röhren der beiden ersten Stufen sind deshalb federnd aufgehängt.

Diese Methode bewährt sich zwar im Labor, im Hubschrauber dagegen fangen gerade diese beiden Röhren an zu schwingen und verursachen so einen Rauschpegel weit größer als das Meßsignal. Verbindet man die

zwei Röhren starr mit dem Chassis und stellt dann den ganzen Verstärker in Gummischüre eingehängt auf ein dickes Schaumgummipolster, so ist die Schwingungsdauer dieses Systems erheblich größer als der Frequenz von 12,5 Hz entspricht und der Rauschpegel sinkt auf ein normales Maß ab.

Von den beiden Strahlungsempfängern war nur das Thermoelement empfindlich gegen Erschütterungen. Da das ganze Oberflächenradiometer mit Gummischüren federnd aufgehängt wurde, war dieser Einfluß jedoch hinreichend klein.

2.8. Einbau der Geräte in den Hubschrauber

Zu den Meßflügen wurde ein Alouette-Hubschrauber benutzt. Er besitzt in einer Plexiglas-Kanzel zwei Pilotensitze nebeneinander und dahinter eine Sitzbank für 3 Personen. Nach dem Ausbau des einen Pilotensitzes kann ein kleiner quadratischer Schacht im Boden der Kanzel freigelegt werden. Über diesem Schacht wurde das Oberflächen-Radiometer in einem Gestell aus Winkelprofil (Dexion) an Gummischüren aufgehängt. Der Verstärker stand unmittelbar dahinter auf der Sitzbank, wie schon erwähnt, auf einem dicken Schaumgummipolster in Gummischüre eingehängt. Auf ihm war das Modulator-temperatur-Gerät befestigt, so daß mit einem Blick die Anzeigegeräte von Verstärker und Modulator-temperatur-Gerät übersehen werden konnten. Stromversorgungsgeräte und Akkumulatoren befanden sich teils unter der Sitzbank, teils vor dem Radiometer-Gestell auf dem Boden. Auf eine Registrierung der Meßwerte wurde bewußt verzichtet, da sie nur einen Sinn hat, wenn eine eindeutige Zuordnung von Meßwerten und Meßobjekten möglich ist, z. B. durch synchrone Fotoaufnahmen des Erdbodens. Im vorliegenden Fall wurden die Meßwerte in schneller Folge unmittelbar abgelesen und zusammen mit entsprechenden Bemerkungen über Meßobjekt, Uhrzeit, Flughöhe, Fluggeschwindigkeit und Wetter, insbesondere Bewölkung und Sonnenschein, auf Tonband gesprochen.

Für die schon erwähnten Eichungen vor, zwischen und nach den Messungen, die natürlich nur am Boden ausgeführt werden konnten, ließ sich der Schacht im Kanzelboden abdecken. Unter das Oberflächen-Radiometer wurde dann eine Schüssel mit Wasser gestellt, das mit einem Löffel kräftig durchrührt und dessen Temperatur mit einem normalen Quecksilber-Thermometer dicht unter der Wasseroberfläche bestimmt wurde. Die Bildtafeln I und II zeigen die in den Hubschrauber eingebauten Geräte bzw. die Anordnung für die Zwischen-Eichungen.

3. Oberflächentemperatur-Messungen und ihre Ergebnisse

3.1. Meßflüge

Während der Einbau der Meßgeräte in den Alouette-Hubschrauber in der Universität Mainz erfolgte, wurden die Meßflüge vom Flugplatz in Fritzlar (Nordhessen) aus vorgenommen. Diese Flüge sollten neben der Geräteerprobung die Anwendungsmöglichkeiten der Meßmethodik an Hand von Beispielen zeigen. Sie fanden in zwei Perioden statt, vom 22. bis 25. Juni und vom 17. bis 23. August 1960.

Während der Messungen im Juni kennzeichnete ein Festlandshoch mit Kern über Skandinavien die Wetterlage. Unter seinem Einfluß herrschte in Nordhessen hochsommerliches Strahlungswetter mit nur geringer Bewölkung, das zu Tageshöchsttemperaturen bis nahe 30° C führte. In der Zeit vom 16. bis 24. August dagegen wurde das Wetter durch eine zyklonale West-

lage bestimmt, die erst in den letzten Tagen in eine antizyklonale Südwestlage übergang. Es herrschte dabei meist bedecktes oder wechselnd wolkiges Wetter und an einigen Tagen traten anhaltende Niederschläge auf.

Die erste Meßserie diente vor allem der Erprobung von Meßmethodik und Geräten. Durch Messungen über der Eder bei Wega und über dem Edersee (Bildtafel III) sollte dabei der Einfluß der Luftschicht zwischen Oberfläche und Hubschrauber auf die Ergebnisse untersucht und die Reproduzierbarkeit der Messungen geprüft werden.

Die Messungen der zweiten Serie hatten in der Hauptsache den Vergleich verschiedener bewachsener Oberflächen zum Gegenstand, die ja im Bereich Mitteleuropas den größten Teil der Erdoberfläche ausmachen. Sie wurden nahe der Fulda bei Guntershausen und in der Nähe von Deute (Bildtafel III) ausgeführt. Daneben wurde ebenfalls wieder über Wasserflächen gemessen, aber auch über anderen Objekten wie einer geteerten Fläche, einem kleinen Dorf und dgl. Diese letztgenannten Messungen konnten jedoch aus Gründen der Flugsicherheit nur in wenigen Fällen stattfinden.

Die Meßflüge gingen im einzelnen wie folgt vor sich: Etwa 1 Stunde nach dem Einschalten des Verstärkers wurde unmittelbar vor dem Start die Anfangseichung durchgeführt. Nach einem Anflug von 10 bis 15 Minuten folgten die Oberflächentemperatur-Messungen im Wechsel mit Zwischeneichungen am Boden. Diese fanden bei der ersten Meßserie fast ausschließlich auf dem Sportplatz bei Wega, bei der zweiten auf dem von Guntershausen statt. Beide Plätze boten gute Landemöglichkeiten, aber auch günstige Bedingungen für die Zwischeneichungen, da aus der naheliegenden Eder bzw. Fulda das zur Eichung benötigte Wasser entnommen werden konnte. Außerdem bestand die Möglichkeit, jeweils von einer Brücke aus mit einem Schöpfthermometer die Wassertemperatur zu bestimmen. Vielfach wurde bei den Zwischenlandungen auch die Lufttemperatur gemessen. Den Abschluß der Messungen bildete eine Schluß Eichung unmittelbar nach der Landung in Fritzlar. Zu Beginn und Ende eines jeden Fluges wurde auch noch das Meßgerät für die Modulator-Temperatur mit den bereits beschriebenen Testwiderständen geprüft.

Die Meßobjekte für den Vergleich der einzelnen Oberflächen waren so gewählt, daß sie möglichst nahe beieinander lagen. Sie wurden angefliegen und der Hubschrauber in einer Höhe von etwa 300 Fuß (knapp 100 m) darüber nahezu zum Stehen gebracht. Nun wurden eine halbe bis mehrere Minuten lang, je nach den auftretenden Schwankungen, in ununterbrochener Folge die von PTW-Verstärker und Modulator-Temperatur-Gerät angezeigten Meßwerte auf Tonband gesprochen, dazu Angaben über das Meßobjekt, die Zeit, die Flughöhe und das Wetter, insbesondere über Sonnenschein und Beschattung. Zur Ergänzung konnten später auch Wetterbeobachtungen vom Flugplatz Fritzlar herangezogen werden.

Für die Untersuchungen über den Einfluß der Luftschicht zwischen Oberfläche und Meßgerät stand der Hubschrauber zunächst in einer Höhe von nur wenigen Metern über dem Fluß und stieg dann langsam über derselben Stelle stehend auf bis zu einer Höhe von maximal etwas über 900 Fuß (knapp 300 m). Diese Höhe war die Grenze, weil von da an das Meßfeld des Oberflächen-Radiometers zu groß wird und bei den unvermeidlichen Schwingungen des Hubschraubers außer dem Fluß dann schon Uferpartien mit einbezogen werden. Zur Erfassung größerer Höhendifferenzen wurde der Edersee im Horizontalflug in 600 Fuß (ca. 180 m) und 3000 Fuß (ca. 900 m) Höhe überfliegen. Das

Auswertung von Oberflächentemperatur-Meßflug

23. Aug. 1960, I

Blatt 13

Zeit	Höhe	T _M	T _M	T _M	S _M	ΔS	+	ΔS	S _O	T _O		
MEZ	Feet	B/Skt.	korr. Skt.	°C	rE	B/Skt.	-	rE	rE	°C		
		<i>An Pilot: "Nun nochmal über das Gebirgsfeld"</i>										
11.14	480	<i>Fliegen jetzt nochmals das Gebirgsfeld an. Jetzt geht gerade die Sonne wieder weg, während bis jetzt immer gesehen war, die allerdings durch Wolken verdeckt war. Jetzt kommt Sonne wieder heraus, aber nur durch die Halbkugel. - Ist jetzt schon wieder weg. Nun über dem Gebirgsfeld.</i>										
LGD		3/135	137	27,5	734	5	-	12	722	26,3	26,7	0,04
		"	"	"	"	8		21	713	25,4		0,49
		"	"	"	"	10		28	706	24,7	25,8	1,96
		<i>Manövriere abwärts zum Berg</i>										
		3/134	136	27,4	733	5	-	12	721	26,2		1,01
		"	"	"	"	4		9	724	26,5		0,16
		"	"	"	"	5		12	721	26,2		0,01
		"	"	"	"	3	-	6	727	26,8		0,49
		133	135	27,3	732	2		3	729	27,0	26,3	1,81
		"	"	"	"	3		6	726	26,7		0,36
		"	"	"	"	9		25	707	24,8		1,69
		132	134	27,2	731	5		12	719	26,0		0,01
		"	"	"	"	7		18	713	25,4		0,49
		131	133	27,1	730	6		15	715	25,6	25,6	0,25
		"	"	"	"	8		21	709	25,0		1,21
		130	132	27,0	729	4	-	9	720	26,1		-
		<i>Die Sonne ist jetzt wieder weg.</i>										
		3/130	132	27,0	729	3	-	6	723	26,4		1,09
		129	131	26,9	728	3		6	722	26,3		0,04
		128	130	26,8	727	4		9	698	23,8	24,8	5,29
		"	"	"	"	4	-	9	698	23,8		5,29
		127	129	26,7	726	4	-	9	697	23,7		5,76
		126	128	26,6	725	0		+4	729	27,0		0,81
		"	"	"	"	1	+	8	733	27,4		1,69
		<i>Jetzt kommt die Sonne wieder heraus</i>										
		3/126	128	26,6	725	3	+	14	739	28,0	27,6	3,61
		125	127	26,5	724	2	+	11	735	27,6		2,25
		"	"	"	"	4	+	17	741	28,2		4,41

Abb. 19
Musterblatt aus dem Protokoll eines Oberflächentemperatur-Meßfluges

Aufsteigen im Stehen verbot sich hier aus Sicherheitsgründen.

3.2. Protokollierung und Auswertung

Zur Protokollierung und Auswertung wurden die auf Tonband gesprochenen Messungen und Beobachtungen in ein Formular eingetragen, das Spalten für Meßwerte, Zeit und Flughöhe sowie für die Auswertung vorsah; die Durchführung der Auswertung wurde bereits in Abschnitt 2.6 beschrieben, sei hier aber nochmals kurz wiederholt. Mit Hilfe der Eichungen wurde für jeden Meßflug eine eigene Eichkurve gezeichnet. Dann erfolgte zunächst die Korrektur der Modulator-Temperatur-Anzeige T_M (Meßbereich und Meßwert in Skalenteilen) auf Grund der mit den Testwiderständen durchgeführten Kontrollen (vgl. Abschnitt 2.4.). Dieser Wert mußte mit Hilfe der Eichkurven des Modulator-Temperatur-Gerätes in einen Temperaturwert T_M ($^{\circ}\text{C}$) und der mit Hilfe der S-Tabelle (vgl. Abschnitt 2.5.) in einen Strahlungswert S_M (rE) umgerechnet werden. Aus der jeweils gültigen Eichkurve wurde die Anzeige ΔS (in Skalenteilen des Verstärker-Meßinstrumentes) ebenfalls in einen Strahlungswert umgewandelt, je nach dem Vorzeichen zu S_M addiert oder davon subtrahiert und damit die Strahlung S_0 (rE) der Oberfläche ermittelt. Aus dieser Zahl konnte schließlich, wieder unter Benutzung der S-Tabelle, die Temperatur T_0 ($^{\circ}\text{C}$) der Oberfläche bestimmt werden. In Abb. 19 ist als Muster ein Blatt des Meßfluges vom 23. August 1960 wiedergegeben.

3.3. Systematische Meßfehler und Meßgenauigkeit

Drei Möglichkeiten systematischer Meßfehler mußten vor einer Bearbeitung der Ergebnisse untersucht werden:

Flugerschütterungen, elektrische Störungen sowie der Strahlungseinfluß der zwischen Meßobjekt und Hubschrauber befindlichen Luftschicht, im folgenden kurz mit Zwischenschicht-Einfluß bezeichnet. Es wurde bereits früher erwähnt, daß der PTW-Verstärker und das Thermoelement erschütterungsempfindlich sind. Durch die geringe Bandbreite hat der Verstärker eine relativ große Zeitkonstante, so daß der Störimpuls nicht gleich wieder abklingt. Folgen mehrere Impulse aufeinander, so ergibt sich aus der Überlagerung der in der Amplitude abgeschwächten aber zeitlich auseinandergezogenen Impulse eine Nullpunktserhöhung. Ähnliche Erscheinungen können durch elektrische Störungen, etwa durch elektrische Funkenbildung, hervorgerufen werden.

Diese Fehlerquellen wurden bereits vor Beginn der Meßflüge untersucht, aber auch zwischendurch immer wieder überwacht. Zur Prüfung des Verstärkers allein wurde dessen Eingang durch einen entsprechenden Ersatzwiderstand überbrückt und dann der Ausschlag des Verstärker-Meßinstrumentes im Flug beobachtet. Dieser hätte exakt Null sein müssen, wenn der Verstärker völlig unempfindlich gegen Erschütterungen und elektrische Störungen gewesen wäre. Immerhin waren bei Empfindlichkeits-Stufe 4, bei der die Messungen ausgeführt wurden, noch keine Schwankungen zu erkennen. Bei einer Erhöhung der Verstärkung um das 100fache (Empfindlichkeits-Stufe 8) betrug sie selbst bei starken Erschütterungen während des Fluges weniger als 40 Skt., das sind, auf Empfindlichkeits-Stufe 4 umgerechnet, nur 0,4 Skt.

Wurde das Oberflächen-Radiometer an den Verstärker angeschlossen und dabei der Schacht des Hubschraubers abgedeckt und der Modulator-Motor abgestellt, so änderten sich die zuvor mit dem Verstärker

allein gemessenen Schwankungen nicht, wenn das Radiometer mit dem Bolometer ausgerüstet war. Bei Benutzung des Thermoelements als Strahlungsempfänger erhöhten sie sich dagegen. Im Schwebeflug, so wird das Stehen des Hubschraubers in der Luft bezeichnet, wurden bei Empfindlichkeitsstufe 4 Ausschläge bis zu 1 Skt. beobachtet; im Mittel lagen sie aber unter 0,5 Skt. Bei Horizontalflug von 80 Knoten erreichten die Schwankungen maximal bis zu 4 Skt. und im Mittel etwa 2,7 Skt. Demgegenüber treten die elektrischen Störungen vollkommen zurück.

Die Schwankungen haben zur Folge, daß beim Einsatz des Thermoelements die Meßwerte auch über einer völlig gleichmäßig temperierten Fläche nicht konstant sind, sondern im Schwebeflug um etwa 1 Skt. und im Horizontalflug um etwa 4 Skt. pendeln. Außerdem sind die Meßwerte im Mittel bei Schwebeflug um 0,5 Skt. und bei Horizontalflug um 2,6 Skt. zu hoch. Man darf also die Einzelablesungen nicht als repräsentativ ansehen, sondern muß sie zu Mittelwerten zusammenfassen. Diese Mittelwerte sind bei Messungen im Schwebeflug bereits in dieser Form brauchbar, der Fehler von 0,5 Skt. — das sind etwa $0,2^{\circ}\text{C}$ — liegt noch innerhalb der Ablesegenauigkeit. Bei Messungen im Horizontalflug muß dagegen der Betrag von 2,6 Skt. von den Meßwerten subtrahiert werden. Wegen dieser ungünstigen Verhältnisse wurden Messungen im Horizontalflug nur vorgenommen, wo sie im Schwebeflug nicht möglich waren, nämlich bei den Untersuchungen des Zwischenschicht-Einflusses über dem Edersee.

Der Zwischenschicht-Einfluß läßt sich auf verschiedene Weise theoretisch behandeln. Man kann beispielsweise die Eigenstrahlung einer Luftschicht aus einem Strahlungsdiagramm entnehmen, wenn man die Temperatur- und Feuchteverteilung der Schicht kennt, doch ist dieses Verfahren hier nicht zweckmäßig, weil man mit Hilfe des Strahlungsdiagrammes die Gesamtstrahlung berechnet, während hier infolge des Halbleiterfilters im Oberflächenradiometer wesentliche Teile der atmosphärischen Strahlung unwirksam sind. Es war daher einfacher, den Zwischenschicht-Einfluß experimentell durch spezielle Messungen zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden die bereits erwähnten Messungen im Schwebeflug über der Eder und der Fulda in Höhen von wenigen Metern über dem Wasserspiegel bis zu maximal knapp 300 m und die Flüge über dem Edersee in 180 m (600 Fuß) und 900 m (3000 Fuß) Höhe durchgeführt.

Bei den meisten Messungen ist der Zwischenschicht-Einfluß so klein, daß er von den durch Flugerschütterungen ausgelösten Schwankungen der Meßanzeige und den auch auf der Wasseroberfläche eines Flusses vorhandenen Temperaturunterschieden überdeckt wird. Lediglich bei den Untersuchungen über der Eder bei

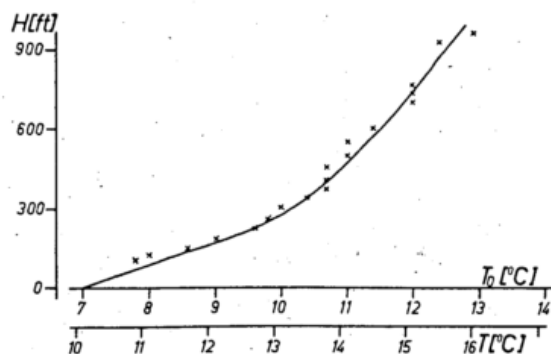


Abb. 20

Einfluß der Flughöhe auf die Oberflächentemperatur-Messung. Effektive Oberflächentemperatur T_0 bzw. wahre Oberflächentemperatur T in Abhängigkeit von der Flughöhe H (Eder bei Wega, 23. 6. 1960, 16.23 — 16.26 Uhr)

Wega im Juni 1960 waren die Differenzen zwischen Oberflächentemperatur und Lufttemperatur $T_0 - T_L$ so groß, daß der Zwischenschicht-Einfluß einen Betrag von mehreren Grad Celsius erreichte und damit deutlich erkennbar wurde. Das Ederwasser, das tief aus dem Edersee kommt, hatte seinerzeit eine Temperatur von etwa 10°C , während die Lufttemperatur in Bodennähe zwischen 23°C und 27°C betrug. Abb. 20 zeigt als Beispiel eine dieser Messungen über der Eder bei Wega vom 23. Juni 1960, wobei die gemessene Oberflächentemperatur in Abhängigkeit von der Höhe aufgetragen ist.

Die Kurve ist in mehrfacher Hinsicht sehr aufschlußreich. Ihre Extrapolation auf die Höhe Null ergibt eine Oberflächentemperatur von $7,0^{\circ}\text{C}$, mit einem Schöpfthermometer wurden dagegen $10,1^{\circ}\text{C}$ gemessen. Der Grund für diese Differenz ist der Unterschied zwischen effektiver und wahrer Oberflächentemperatur (vgl. Abschnitt 1.2.), der hier in besonders krasser Form zutage tritt. Während der Messungen war es fast wolkenlos, so daß die Gegenstrahlung außer einem geringen Kontinuum nur die Banden von Wasserdampf, CO_2 und Ozon aufwies. Von dieser Strahlung kann aber nur ein sehr geringer Teil durch das vergütete InSb-Filter auf den Strahlungsempfänger gelangen, während bei der Eichung das dicht über der Wasseroberfläche hängende Oberflächen-Radiometer eine im wesentlichen seiner Temperatur entsprechende Gegenstrahlung liefert. Eine Abschätzung, die diesen Tatsachen Rechnung trägt, läßt sich mit Hilfe von Gleichung [6] durchführen. Sie ergab für den vorliegenden Fall eine Differenz zwischen wahrer und effektiver Oberflächentemperatur von $2,6^{\circ}\text{C}$, einen Wert, der der tatsächlichen Differenz recht nahe kommt.

Weitere im Juni 1960 über der Eder bei Wega gemachte Messungen bei fast wolkenlosem Himmel liefern ähnliche Ergebnisse. Auch bei späteren Meßflügen zeigte sich der Unterschied zwischen effektiver und wahrer Oberflächentemperatur, jedoch in wesentlich geringerem Ausmaß, da bei den Messungen stets Bewölkung vorhanden war.

Um aus Abb. 20 außer der Effektivtemperatur T_0 auch die wahre Oberflächentemperatur T entnehmen zu können, wurde eine T -Abszisse zusätzlich eingezeichnet, die sich hinreichend genau durch eine Verschiebung der T_0 -Abszisse um $3,1^{\circ}\text{C}$ ergab.

Betrachtet man nun den Verlauf der Temperatur T_0 bzw. T in Abhängigkeit von der Flughöhe H des Hubschraubers, so stellt man eine stetige Temperaturzunahme fest, die in den untersten Schichten sehr stark ist und mit der Höhe langsam geringer wird. Der Grund für dieses Verhalten ist folgender: Die von der kalten Wasseroberfläche ausgehende Strahlung wird in der Luftschicht bis zu der jeweiligen Höhe des Hubschraubers von Wasserdampf, CO_2 und dem in sehr geringem Maße vorhandenen Ozon im Bereich bestimmter Banden absorbiert. Da die drei Gase in diesen Banden auch selbst ihrer Temperatur entsprechend strahlen, wird also die Strahlung der Oberfläche hier durch die der Luft ersetzt. Bei der Messung, die in Abb. 20 dargestellt ist, ist die Luft wärmer als die Oberfläche, das Oberflächen-Radiometer erhält also im Bereich der Wasserdampf-, CO_2 - und O_3 -Banden mehr Strahlung, als von der Oberfläche ausgeht und zeigt infolgedessen eine höhere Temperatur an. Die Differenz zwischen angezeigter und wahrer Oberflächentemperatur ist nicht nur von der Temperaturdifferenz $T_0 - T_L$, sondern auch von der Menge der absorbierenden Gase und damit vom Abstand Oberfläche — Hubschrauber abhängig. Wie sich theoretisch ableiten läßt, wird die Temperaturzunahme $\frac{dT}{dH}$ mit wachsendem Abstand immer geringer. Die Tatsache, daß in Abb. 20

T mit der Höhe immer weniger zunimmt, liegt aber auch daran, daß die Lufttemperatur mit der Höhe abnimmt, doch ist dieser Einfluß hier nur von untergeordneter Bedeutung. Von 0 bis 900 Fuß Höhe nimmt die Lufttemperatur im Mittel ja nur um etwa $1,5^{\circ}\text{C}$ ab.

Die für größere Höhen durchgeführten Messungen über dem Edersee zeigt Abb. 21 mit den Meßpunkten

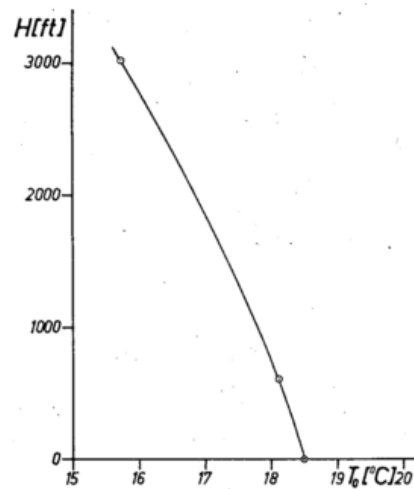


Abb. 21
Einfluß der Flughöhe auf die Oberflächentemperatur-Messung. Oberflächentemperatur T_0 in Abhängigkeit von der Flughöhe H (Edersee, 19. 8. 1960, 10.55 — 11.07 Uhr)

für 600 Fuß und 1000 Fuß Höhe. Dabei ist die wegen der starken Flugerschütterungen im Horizontalflug notwendige Korrektur bereits berücksichtigt. Die Oberflächentemperatur in der Höhe Null wurde mit einem Schöpfthermometer bestimmt und ist infolgedessen unsicher, denn bei einem stehenden Gewässer weist die Oberfläche eine andere Temperatur auf als das Wasser einige Zentimeter darunter. Die Differenz zwischen Oberflächentemperatur und Lufttemperatur $T_0 - T_L$ war hier positiv und betrug etwa $+2,5^{\circ}\text{C}$, doch ist dieser Wert wegen der Unsicherheit von T_0 in Höhe Null und von T_L ebenfalls nicht als zuverlässig anzusehen. Die Messungen ergeben daher nur die Größenordnung des Zwischenschicht-Einflusses für Höhen über 900 Fuß. Der Verlauf der Kurve ist ein gänzlich anderer als der in Abb. 20. Die Temperatur der Luft ist hier niedriger als die der Wasseroberfläche, infolgedessen nimmt die gemessene Oberflächentemperatur mit der Höhe ab, jedoch ziemlich gleichmäßig im ganzen Verlauf, soweit sich das auf Grund der 3 Meßpunkte sagen läßt. Die Ursache ist, daß hier die Abnahme der Lufttemperatur mit der Höhe der sich theoretisch ergebenden Abnahme von $\frac{dT}{dH}$ entgegenwirkt. Es kommt bei dem Zwischenschicht-Einfluß für größere Flughöhen also sehr darauf an, ob $T_0 - T_L$ positiv oder negativ ist. Bei geringen Höhen spielen diese Einflüsse dagegen keine Rolle, da hier die Temperaturabnahme zu klein ist.

Die Ergebnisse sämtlicher brauchbarer Meßreihen zur Bestimmung des Zwischenschicht-Einflusses (23. 6. 1960, vormittags, 23. 6. 1960, nachmittags, 25. 6. 1960, sowie die Messungen über dem Edersee vom 19. 8. 1960) wurden zu einem Korrekturdiagramm verarbeitet, in dem der Unterschied ΔT zwischen gemessener und wahrer Oberflächentemperatur in Abhängigkeit von $T_0 - T_L$, der Differenz zwischen gemessener Oberflächentemperatur und der Lufttemperatur am Boden dargestellt ist (Abb. 22). Die z. T. sehr starken Abweichungen der über dem Edersee gewonnenen Werte (die drei Punkte in der Nähe der Ordinate) rühren wahrscheinlich mehr von der Unsicherheit von T_0 in

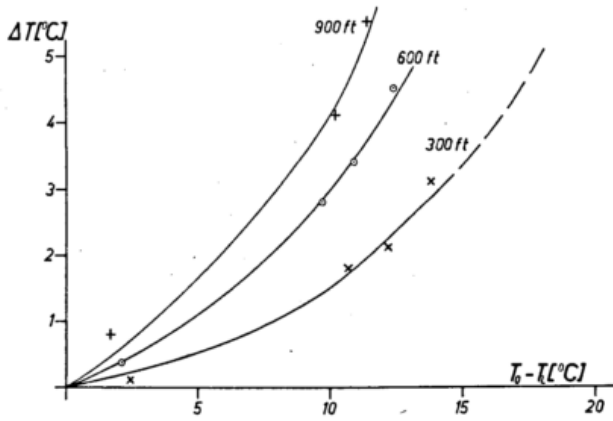


Abb. 22

Zwischenschicht-Korrektur ΔT in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen gemessener Oberflächentemperatur und Lufttemperatur am Boden $T_0 - T_L$ für $H = 300, 600$ und 900 Fuß

der Höhe Null und T_L her als von der Tatsache, daß $T_0 - T_L$ hier positiv ist. Das Diagramm läßt sich unmittelbar für die Korrektur der Meßwerte verwenden, wenn Flughöhe und Lufttemperatur am Boden bekannt sind.

Eigentlich müßte man bei der Auswertung die gemessene Oberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Temperaturprofil zwischen Boden- oder Wasseroberfläche und Hubschrauber betrachten, man kennt diese Verteilung aber in der Regel nicht. Nimmt man jedoch an, daß das Temperaturprofil bei allen Messungen etwa das gleiche ist, d. h., daß bei Änderungen der Lufttemperatur sich diese in allen Schichten um den gleichen Betrag ändert, so genügt es, die Abhängigkeit der gemessenen Oberflächentemperatur von der Lufttemperatur in Bodennähe T_L bzw. von der Differenz $T_0 - T_L$ zu betrachten. Diese Voraussetzung ist sicherlich in vielen Fällen nicht genau erfüllt, aber sie führt nur zu unerheblichen Fehlern, da der Zwischenschicht-Einfluß selbst gering ist.

Für die Meßflüge wurde als Optimum eine Flughöhe von etwa 300 Fuß gewählt. Diese Höhe ist einerseits klein genug, um nur einen geringen Zwischenschicht-Einfluß hervorzurufen, andererseits so groß, daß die Bodenverhältnisse nicht durch die Rotorbewegungen des Hubschraubers gestört werden und auch die Flugsicherheit noch gewährleistet ist.

Eine Abschätzung des Gesamtmeßfehlers ist zwar nicht schwierig, doch sind die Verhältnisse etwas unübersichtlich, da die Fehler je nach Meß- und Auswertebedingungen verschieden groß sind.

Folgende 3 Komponenten setzen sich zum Gesamtmeßfehler zusammen:

- 1) Fehler, die sich aus Änderungen der Meßempfindlichkeit im Verlaufe eines Meßfluges ergeben,
- 2) Fehler, die durch die Flugerschütterungen hervorgerufen werden und
- 3) Fehler, die auftreten, wenn man die Zwischenschicht-Korrektur vernachlässigt.

Da die unter 1) genannten Fehler sich aus Empfindlichkeitsänderungen von Oberflächen-Radiometer und Verstärker ergeben, sind sie abhängig von ΔS , werden also umso größer, je größer die Temperaturdifferenz zwischen Modulatorscheibe und der gemessenen Oberfläche ist. Man muß daher den Fehler relativ angeben. Dieser läßt sich aus den Abweichungen der einzelnen Eichpunkte sämtlicher im Verlauf eines Meßfluges durchgeführter Eichungen von der zur Auswertung benutzten mittleren Eichkurve bestimmen und ergibt

sich für die erste Meßserie $\leq \pm 10\%$, für die zweite infolge der in der Zwischenzeit vorgenommenen Verbesserungen dagegen $\leq \pm 5\%$.

Die durch die Flugerschütterungen ausgelösten Fehler sind bei der ersten Meßserie so klein, daß sie vernachlässigt werden können. Bei der zweiten betragen sie 1 Skt. für Einzelmessungen und 0,5 Skt. für die Mittelwerte, das sind, in Temperatur umgerechnet, Verbesserungen dagegen $\leq \pm 5\%$.

Vernachlässigt man schließlich, um die Auswertung etwas zu vereinfachen, den Zwischenschicht-Einfluß bei einer Flughöhe bis zu 300 Fuß und Temperaturdifferenzen $T_0 - T_L$ von weniger als $3,5^\circ\text{C}$, so ergibt sich daraus ein Fehler von maximal $0,4^\circ\text{C}$. Doch selbst bei Berücksichtigung der Zwischenschicht-Korrektur muß man noch mit schätzungsweise $\pm 0,2^\circ\text{C}$ Fehler rechnen wegen der Unsicherheiten sowohl der über das Temperaturprofil gemachten Annahmen als auch der Lufttemperatur am Boden, die ja meist in einiger Entfernung von dem Meßobjekt bestimmt wurde.

Aus den drei Einzelkomponenten ergibt sich für die Messungen der zweiten Serie (August 1960) im allgemeinen ein Maximal-Meßfehler von $\pm 0,9^\circ\text{C}$, wenn die Zwischenschicht-Korrekturen angebracht werden, andernfalls wächst der Fehler auf $\pm 1,1^\circ\text{C}$ an. Nur bei Objekten mit sehr hoher Temperatur (Teerstraßen und dgl.) wird der Maximalfehler noch größer; er beträgt dann $\pm 1,4^\circ\text{C}$. Will man keine Absolutwerte der Oberflächentemperatur bestimmen, sondern nur die Differenzen zwischen benachbarten Meßobjekten, so braucht man die unter 1) angeführten Fehler nicht einzubeziehen und erhält dann einen maximalen Meßfehler von $\pm 0,4^\circ\text{C}$ bzw. $\pm 0,6^\circ\text{C}$, je nachdem, ob man die Zwischenschicht-Korrektur berücksichtigt oder nicht. Bei den Messungen der ersten Serie (Juni 1960) muß man einen Maximalfehler von $\pm 2^\circ\text{C}$ annehmen.

3.4. Mittelwerte und Schwankungen

Bei den Messungen stand, wie erwähnt, der Hubschrauber in der Luft nahezu über ein und derselben Stelle, und die Meßwerte wurden in ununterbrochener Folge auf Tonband gesprochen. Zur Bearbeitung dieser Werte wurde aus den einzelnen Messungen — ihre Zahl pro Meßobjekt schwankte etwa zwischen 10 und 50 — ein Mittelwert gebildet und außerdem die mittlere Schwankung dieses Mittelwertes $\bar{\Delta}_M$ nach der Formel

$$\bar{\Delta}_M = \sqrt{\frac{[v^2]}{n(n-1)}} \quad [16]$$

berechnet, wobei $[v^2]$ die Summe der Fehlerquadrate und n die Zahl der Meßwerte ist. Die mittlere Schwankung ist in diesem Zusammenhang weniger ein Maß für den Meßfehler als vielmehr ein Wert, der anzeigt, wie groß die kurzzeitigen Schwankungen und die lokalen Unterschiede auf kleinem Raum sind. Sie wird in der Regel über ein und demselben Meßobjekt umso kleiner, je länger man mißt. Es erhebt sich daher sofort die Frage, wieviele Einzelmesswerte man für einen repräsentativen Mittelwert haben muß.

Um dies zu klären, wurden für einige Messungen mit mehr als 30 Einzelwerten zunächst für die ersten 10 Werte Mittel und mittlere Schwankung des Mittelwertes berechnet, dann dasselbe für die ersten 20 Werte wiederholt usw., bis schließlich alle Werte erfaßt wurden (bei Messungen über Wasser wurden die Schritte von 5 zu 5 Werten gewählt). Die so berechneten Zahlen der mittleren Schwankung wurden in Abhängigkeit von der Zahl n der Meßwerte aufgetragen. Abb. 23 zeigt diese Kurven. Bereits von 10 Einzelwerten an ist für alle Kurven die Schwankung unter $\pm 0,3^\circ\text{C}$ — das ent-

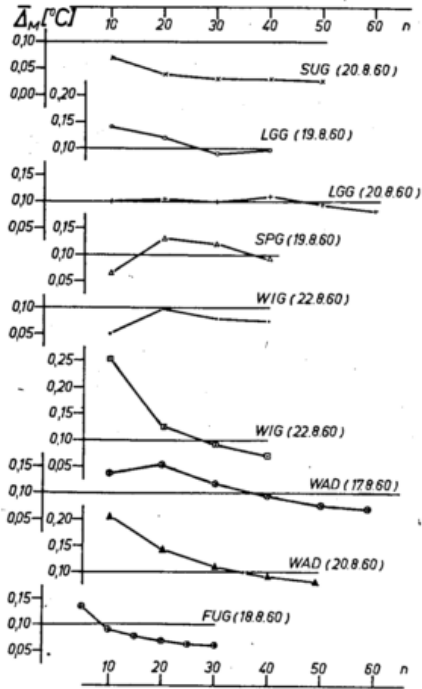


Abb. 23

Mittlere Schwankung der Oberflächentemperatur-Mittelwerte $\overline{\Delta}_M$ in Abhängigkeit von der Zahl der Einzelmesswerte n

spricht etwa der Ablesegenauigkeit des Meßinstrumentes im PTW-Verstärker — und von 30 Einzelwerten an kaum größer als $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Die Schwankung $\overline{\Delta}_M$ ist also für die Betrachtung der Mittelwerte unerheblich.

Führt man die gleiche Berechnung für die mittlere Schwankung der Einzelmessungen $\overline{\Delta}_E$ durch, die sich nach der Formel

$$\overline{\Delta}_E = \sqrt{\frac{[v^2]}{n-1}} \quad [17]$$

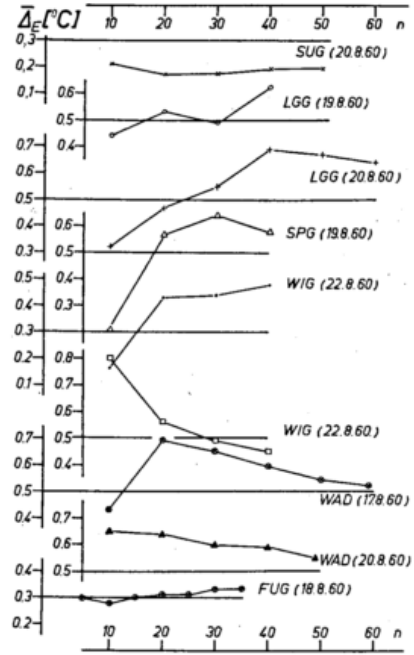


Abb. 24

Mittlere Schwankung der Oberflächentemperatur-Einzelwerte $\overline{\Delta}_E$ in Abhängigkeit von der Zahl der Einzelmesswerte n

errechnet, so erhält man für die gleichen Messungen die Abhängigkeit der Schwankung von der Zahl der Meßwerte, die Abb. 24 wiedergibt. $\overline{\Delta}_E$ geht nicht, wie $\overline{\Delta}_M$ für wachsendes n gegen Null, sondern nähert sich einem bestimmten Wert, der für die lokalen und zeitlichen Unterschiede des betreffenden Meßobjektes charakteristisch ist. Diese Zahl wird bereits für $n = 20$ Einzelmessungen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2^\circ\text{C}$ erreicht, bei Messungen über Wasser schon von $n = 10$ an.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Mittel-

Tab. 2
Oberflächentemperatur ($^\circ\text{C}$) der Fulda bei Guntershausen
19. — 23. 8. 1960

Datum, Zeit	T_0	$T_L(\text{SG})$	$T_0 - T_L(\text{SG})$	ΔT	$T_0(\text{korr.})$	T_W	$T_0 - T_W$	$\overline{\Delta}_E$
19. 8. 60, 09,17 Uhr	16,5	16,0	+0,5	0,0	16,5	17,2	-0,7	$\pm 0,3$
19. 8. 60, 09,53 Uhr	17,3	17,1	+0,2	0,0	17,3	17,2	+0,1	$\pm 0,3$
19. 8. 60, 15,40 Uhr	17,8	20,4	-2,6	-0,3	17,5	17,2	+0,3	$\pm 0,2$
20. 8. 60, 09,23 Uhr	16,2	15,3	+0,9	—	16,2	16,6	-0,4	$\pm 0,3$
20. 8. 60, 10,21 Uhr	16,4	14,8	+1,6	—	16,4	16,6	-0,2	$\pm 0,1$
22. 8. 60, 09,44 Uhr	14,8	21,1	-6,3	—	14,8	15,4	-0,6	$\pm 0,3$
22. 8. 60, 10,13 Uhr	15,2	21,1	-5,9	-0,7	14,5	15,4	-0,9	$\pm 0,4$
22. 8. 60, 10,45 Uhr	15,7	21,0	-5,3	-0,6	15,1	15,4	-0,3	$\pm 0,4$
23. 8. 60, 11,23 Uhr	18,6	24,9	-6,3	-0,7	17,9	18,0	-0,1	$\pm 0,3$
23. 8. 60, 15,42 Uhr	19,0	23,8	-4,8	-0,5	18,5	18,0	+0,5	$\pm 0,4$

T_0 Oberflächentemperatur (Messung mit Oberflächen-Radiometer)

$T_L(\text{SG})$ Lufttemperatur (Messung auf dem Sportplatz bei Guntershausen)

ΔT Zwischenschichtkorrektur (wenn —, entfällt ΔT wegen geringer Flughöhe)

$T_0(\text{korr.})$ korrigierte Oberflächentemperatur

T_W Wassertemperatur an der Oberfläche (Messung mit Schöpfthermometer)

$\overline{\Delta}_E$ mittlere Schwankung der Einzelwerte

werte repräsentativ für das jeweilige Meßobjekt und den jeweiligen Zeitpunkt der Messung sind, wenn man über mindestens 10 Einzelwerte verfügt. Ebenso ist die mittlere Schwankung der Einzelwerte $\overline{\Delta E}$ als eine charakteristische Größe für die Meßobjekte anzusehen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2^\circ\text{C}$, wenn mindestens 20 oder, bei Messungen über Wasser, mindestens 10 Einzelwerte vorliegen.

3.5. Oberflächentemperatur der Fulda bei Guntershausen

Im Rahmen der zweiten Meßserie wurde mehrfach die Oberflächentemperatur der Fulda bei Guntershausen bestimmt; die Ergebnisse dieser Messungen zeigt Tabelle 2. Dabei sind die Zwischenschicht-Korrekturen ΔT aus Abb. 21 entnommen. Nur bei einigen Werten fehlen sie, da in diesen Fällen die Flughöhe wesentlich unter 300 Fuß lag. Vergleicht man die Radiometermessungen der Oberflächentemperatur (T_0 , korr.) mit der Wassertemperatur in der Nähe der Oberfläche T_W auf Grund von Schöpfthermometermessungen, so zeigt sich, daß die Differenzen weniger als 1°C betragen. Man findet also die Absolutgenauigkeit, die sich aus der Fehlerabschätzung ergeben hatte, bestätigt.

In der Tatsache, daß die Differenz $T_0 - T_W$ in den meisten Fällen negativ ist, tritt wieder der Unterschied zwischen effektiver und wahrer Oberflächentemperatur zutage, der hier infolge der fast immer vorhandenen Bewölkung aber wesentlich geringer ist als bei den Messungen über der Eder bei Wega im Juni 1960, die bereits diskutiert wurden (s. Abschnitt 3.3.).

3.6. Oberflächentemperatur von bewachsenem Boden

Die Meßobjekte der zweiten Flugserie vom 17.—23. 8. 1960 waren vor allem Felder, Wiesen und ein Waldgebiet bei Guntershausen bzw. bei Deute, und zwar immer wieder die gleichen, deren Oberflächentemperatur Tag für Tag mehrfach bestimmt wurde, um auf diese Weise den Temperaturverlauf und die Differenzen der verschiedenen Oberflächen herauszufinden. Eine Beschreibung dieser Meßobjekte, ihre Kurzbezeichnung sowie ihre Höhe über NN enthält Tabelle 3,

Tab. 3
Die Meßobjekte im Raum von Guntershausen und Deute

Abk.	Beschreibung	Höhe (m über NN)
SG	Sportplatz bei Guntershausen	145
WEG	Weizenfeld bei Guntershausen	155 ... 160
SUG	Stoppelfeld, umgepflügt, bei Guntershausen	155
LGG	Feld mit größtenteils liegendem Getreide bei Guntershausen	160 ... 165
SPG	Stoppelfeld mit Getreidepuppen bei Guntershausen	150 ... 160
WIG	Wiesen auf der rechten Seite der Fulda zwischen Guntershausen und Grifte	145
RG	Rübenfeld bei Grifte	145
WAD	Wald (Mischwald) bei Deute (Lotterberg)	150 ... 305
LGD	Feld mit größtenteils liegendem Getreide bei Deute	240 ... 250
SUD	Stoppelfeld, umgepflügt, bei Deute	220 ... 240
RD	Rübenfeld bei Deute	220 ... 240

ihre Lage ist aus den Bildtafeln VI und VII zu ersehen; außerdem ist auf den Bildtafeln IV und V das Meßgelände in Luftaufnahmen dargestellt.

Die Messungen dieser Objekte sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Bei der Betrachtung dieser Zahlen fällt auf, daß die Temperatur aller Meßobjekte, auch die des einen unbewachsenen, umgepflügten Stoppelfeldes, nur wenig von der Lufttemperatur abweichen. Von einigen Ausnahmen abgesehen, sind die Differenzen nicht größer als $\pm 2^\circ\text{C}$ (deshalb konnte auch von den Zwischenschichtkorrekturen abgesehen werden). In derselben Größenordnung bewegen sich die Temperaturänderungen ein und desselben Meßobjektes von einer Messung zur nächsten in einem Zeitraum von 10—30 Min.

Weiterhin lassen sich aus Tabelle 4 einige qualitative Schlüsse ziehen. Man erkennt z. B., daß die Oberflächentemperatur des Feldes mit dem liegenden Getreide LGG in der Regel höher ist, als die der Wiese WIG und diese wiederum höher als die Oberflächentemperatur des Rübenfeldes RG. Der Wald bei Deute WAD erscheint als das Objekt mit der niedrigsten Oberflächentemperatur. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß er bis zu 150 m höher liegt als das Meßgelände bei Guntershausen.

Mit quantitativen Aussagen auf Grund der Tabelle muß man allerdings etwas vorsichtig sein, da es sich nicht um gleichzeitige Messungen handelt und die Differenzen zwischen den einzelnen Objekten nicht größer sind als die zeitlichen Schwankungen. Daher muß man vor einer genaueren Betrachtung versuchen, die Messungen auf gleiche Zeitpunkte zu beziehen.

Die einzelnen Messungen eines jeden Meßobjektes wurden dazu in ihrem zeitlichen Verlauf dargestellt und in den Teilen der Kurven, in denen alle Objekte einen gleichartigen Gang zeigten, für einen bestimmten Zeitpunkt interpoliert. Bei den Messungen vom 23. 8. 1960, 14.45 bis 16.30 Uhr, die in Abb. 25 als Beispiel dargestellt sind, war das für die Zeitpunkte 15.00 und 15.30 Uhr möglich.

In Abb. 25 ist neben dem Verlauf der Oberflächentemperatur auch die Bewölkung in Sonnennähe angedeutet; je nach der Dichte der Wolken sind ein, zwei oder drei Striche gezogen. Man kann auf diese Weise

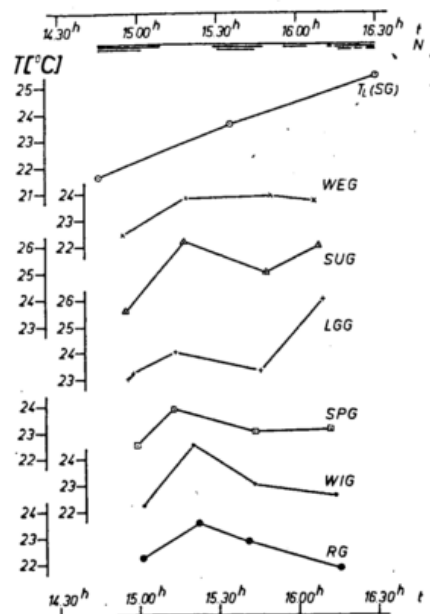


Abb. 25

Zeitlicher Verlauf der Oberflächentemperatur T_0 nach den Messungen vom 23. 8. 1960, 14.45 — 16.30 Uhr bei Guntershausen

Tab. 4
Oberflächentemperatur (°C) in der Nähe von Guntershausen und Deute
zwischen dem 17. u. 23. August 1960

Datum, Zeit	TL (Fz)	TL (SG)	WEG	SUG	LGG	SPG	WIG	RG	WAD	LGD	SUD	RD	
17. 8. 60, 15.45—16.45 Uhr	1	19,9			22,1	20,9	19,2	18,7					
	2			20,2	21,0				18,2				
	3			20,2	21,4		19,1						
	4				20,2		18,9						
	5	19,4					19,1		17,7				
18. 8. 60, 15.40—16.45 Uhr	1	20,8			20,6	19,7	20,4	18,6					
	2			19,8	18,6		18,6						
	3			19,5	18,1	18,9		18,2					
	4	19,4		18,8	18,9	18,5	18,9	18,5	18,0				
19. 8. 60, 09.10—10.05 Uhr	1		15,9	17,7	16,4	17,1	17,9						
	2	16,6				17,9		17,9	17,5				
	3		17,4	18,0	17,4	18,0							
19. 8. 60, 14.30—14.55 Uhr	1	18,0	20,1	20,3	18,8	18,5	17,8	15,8	17,7				
	2	18,5	20,3	18,7	18,3	20,5	20,7	18,9	18,6				
20. 8. 60, 09.15—11.25 Uhr	1		15,3	16,5	17,2	16,8	16,0	16,0	15,1	13,4			
	2	14,2		15,6	16,1	16,3	15,3	15,6	14,5	14,1		15,0	
	3		14,8	15,3	15,6	15,2	14,6	13,7	13,1	12,2	12,9	13,4	12,8
	4	14,0		13,5	13,9	13,6	14,1	14,6	14,3	11,6	13,2		
	5		14,0					14,4		12,8	14,0	14,6	14,0
22. 8. 60, 10.10—10.58 Uhr	1		21,1	20,0	23,4	20,7	22,5	23,9	22,1				
	2	20,0	21,0	21,1	24,3	23,0	22,7	23,9	22,3				
23. 8. 60, 10.45—11.45 Uhr	1	22,6	23,2	23,0	23,9	24,2	23,4	22,9	22,1	22,0	27,0	23,9	23,3
	2	23,4	25,3	24,5	25,6	26,1	24,1	23,5	22,9	23,4	26,1		
23. 8. 60, 14.45—16.30 Uhr	1	24,2	21,6	22,4	23,6	23,1	22,5	22,2	22,2	21,0	23,0	21,7	21,6
	2		23,6	23,8	26,2	24,0	23,9	24,5	23,5				
	3	23,9		23,9	25,0	23,3	23,0	23,0	22,8	21,8	24,1	22,7	22,2
	4		25,4	23,7	26,0	26,0	23,1	22,6	21,8				

TL(Fz) Lufttemperatur auf dem Flugplatz Fritzlar

TL(SG) Lufttemperatur auf dem Sportplatz bei Guntershausen (SG)

WEG, SUG usw. siehe Tabelle 3

erkennen, in welchem Maße die Oberflächentemperatur auf Schwankungen der Bewölkung reagiert und wie sehr es bei den Messungen darauf ankommt, zu welchem Zeitpunkt sie gemacht wurden. Die Interpolation läßt sich daher, wie erwähnt, nur vornehmen, wenn alle Kurven einen gleichartigen Verlauf zeigen.

Aus Abb. 25 lassen sich einige interessante Schlüsse ziehen, die noch besprochen werden. Zuvor soll aber ein Vergleich der durch Interpolation gewonnenen Werte zweier wettermäßig sehr verschiedener Termine (20. 8. 1960, 10.00 Uhr und 22. 8. 1960, 10.30 Uhr) durchgeführt werden. Er vermittelt den besten Eindruck von den Differenzen, die zwischen den verschiedenen Oberflächen bestehen, und den Gründen, die zu ihrer Ausbildung führen.

Am 20. 8. 1960, 10.00 Uhr; lagen alle Meßobjekte im Schatten, der Himmel war mit Altostratus opacus bedeckt und 10 Min. später begann es zu regnen. Am

22. 8. 1960, 10.30 Uhr, befanden sich dagegen nur ein dünner Cirrus (5/10) und etwas Stratocumulus in Horizontnähe am Himmel; die Meßobjekte waren längere Zeit besonnt. In Tabelle 5, die außer den Oberflächentemperaturen T_0 auch die Differenzen zwischen Oberflächen- und Lufttemperatur $T_0 - T_L$, die mittlere Schwankung der Einzelwerte ΔE und die Symbole \blacksquare für Schatten und \odot für Sonnenschein enthält, kann man diese wetterbedingten Unterschiede bereits an der Lufttemperatur T_L (SG) erkennen, die am 20. 8. 1960 15,0° C und am 22. 8. 1960 21,1° C aufwies. Dementsprechend unterscheiden sich auch die Oberflächen zu beiden Terminen, doch nicht nur in der Höhe der Temperatur, auch die Differenzen der einzelnen Oberflächen untereinander sind recht verschieden.

Bei Sonnenschein (22. 8. 1960) ist das umgepflügte Stoppelfeld SUG am wärmsten. Seine Temperatur liegt um etwa 3° C über der der Luft, was sich wohl

Tab. 5

Oberflächentemperatur (°C) verschiedener Meßobjekte bei Guntershausen am 20. 8. 1960, 10.00 Uhr und am 22. 8. 1960, 10.30 Uhr

	Datum, Zeit	Wetter	T _L (SG)	WEG	SUG	LGG	SPG	WIG	RG
T ₀ (°C)	20. 8. 60, 10.00 Uhr	■	15,0	15,5	15,9	15,9	15,1	15,0	14,1
	22. 8. 60, 10.30 Uhr	⊙	21,1	21,1	24,3	22,4	22,5	23,9	22,2
T ₀ -T _L (SG) (°C)	20. 8. 60, 10.00 Uhr	■	—	+0,5	+0,9	+0,9	+0,1	0,0	-0,9
	22. 8. 60, 10.30 Uhr	⊙	—	0,0	+3,2	+1,3	+1,4	+2,8	+1,1
$\overline{\Delta}_E$ (°C)	20. 8. 60, 10.00 Uhr	■	—	±0,2	±0,2	±0,6	±0,3	±0,2	±0,2
	22. 8. 60, 10.30 Uhr	⊙	—	±0,4	±0,3	±1,1	±0,4	±0,5	±0,3

- T₀ Oberflächentemperatur
 T_L(SG) Lufttemperatur (Messung auf dem Sportplatz bei Guntershausen)
 $\overline{\Delta}_E$ mittlere Schwankung der Einzelwerte
 ■ Meßobjekte im Schatten
 ⊙ Meßobjekte besonnt
 WEG, SUG usw. siehe Tabelle 3

aus der dunklen Farbe des Bodens und der damit gegebenen guten Strahlungsabsorption im Kurzwelligen erklärt. Auch die Wiese WIG besitzt eine gute Strahlungsabsorption; sie weist ebenfalls eine relativ hohe Temperatur auf. Dasselbe sollte man eigentlich von dem Rübenfeld RG erwarten, denn auch Rübenblätter sind ziemlich dunkel gefärbt. Hier liegt die Oberflächentemperatur aber nur um 1° C über der Lufttemperatur. Der Grund für dieses Verhalten ist nicht völlig klar. Möglicherweise besitzen die Rübenblätter einen geringeren Absorptions-Koeffizienten im Langwelligen als Gras und andere Pflanzenteile, und es wird deshalb eine andere Oberflächentemperatur vorgeschätzt. Ebenso ist es möglich, daß die fleischigen Rübenblätter eine stärkere Verdunstung aufweisen als Gras und deshalb wirklich eine geringere Oberflächentemperatur haben. Schließlich wäre auch denkbar, daß das ganze Gelände, auf dem das Rübenfeld (RG) sich befindet — es liegt mehrere hundert Meter von den anderen Meßobjekten entfernt, links der Fulda (vgl. Bildtafel VI) — als Ganzes niedrigere Temperaturen aufweist. Das ist aber sicher nicht der Fall, denn auch bei gelegentlichen Messungen über anderen Rübenfeldern zeigten diese immer niedrigere Temperaturen als die umgebenden Felder (die Messungen des Rübenfeldes bei Deute RD (s. Tabelle 3) weisen in dieselbe Richtung).

Die niedrige Temperatur des Weizenfeldes WEG am 22. 8. 1960 ist demgegenüber leicht zu begründen. Es handelte sich nämlich um ein Feld, auf dem das Getreide noch senkrecht stand. Mißt man über einem solchen Feld die Oberflächentemperatur mit einem Radiometer von oben, so erfaßt man dabei nicht nur die Spitzen der Ähren, sondern sieht ziemlich tief zwischen die einzelnen Getreidehalme hinein in einen Raum, der beschattet ist, da vormittags um 10.30 Uhr die Sonne nur unter einem Winkel von etwa 45° C über dem Horizont steht. Die hellgelbe Farbe des kurz vor dem Schnitt stehenden Getreides und die damit verbundene geringere Absorption im Kurzwelligen trägt zwar ebenfalls zu der relativ niedrigen Oberflächentemperatur mit bei, ist hier aber von untergeordneter Bedeutung. Das zeigt ein Vergleich mit dem Feld mit liegendem Getreide LGG, welches sicher die gleiche kurz-

wellige Absorption aufweist, auf dem die Temperatur jedoch mehr als 1° C höher ist.

Am 20. 8. 1960, 10.00 Uhr, sind die durch die Besonnung hervorgerufenen Unterschiede verschwunden. Weder ist das Weizenfeld WEG wesentlich kälter als die übrigen Objekte, noch sind das umgepflügte Stoppelfeld SUG und die Wiese WIG viel wärmer als diese. Die Differenzen zwischen den einzelnen Oberflächen und gegenüber der Lufttemperatur sind geringer als 1° C. Lediglich das Rübenfeld RG fällt auch hier aus der Reihe; seine Temperatur liegt um fast 1° C unter der Luft.

Der in Abb. 25 dargestellte Verlauf der Oberflächentemperatur vom 23. 8. 1960, nachmittags, ergänzt die soeben behandelten Tatsachen. Die Messungen begannen bei völlig bedecktem Himmel, doch hatte 10 Minuten zuvor noch die Sonne geschienen. Das umgepflügte Stoppelfeld SUG hatte sich während dieser Zeit aufgeheizt und war um 14.55 Uhr noch um 0,7° C wärmer als das Feld mit dem liegenden Getreide LGG, das wie die übrigen Meßobjekte bereits seine „Schattentemperatur“ angenommen hatte. Auffallend ist die niedrige Temperatur der Wiese WIG, die denselben Wert aufwies wie das Rübenfeld RG, ein Fall, der nur bei wenigen (später angeführten) Messungen auftrat.

Vor der nächsten Messung (15.13 — 15.20 Uhr) nahm die Bewölkung wesentlich ab, und obwohl noch eine dünne Wolkendecke vorhanden war, setzte Erwärmung ein; die Oberflächen stellten sich auf „Sonnenscheintemperaturen“ um. SUG wurde etwa 2° C wärmer als die übrigen Objekte. Die Temperatur der Wiese WIG stieg ebenfalls stark an, und WIG wurde damit in Übereinstimmung mit den „Sonnenschein-Werten“ in Tabelle 5 die wärmste der bewachsenen Oberflächen. Die übrigen Meßobjekte erwärmten sich nur um 1 bis 1½° C, und das Rübenfeld wies auch jetzt wieder die niedrigste Temperatur auf, die es im weiteren Verlauf beibehielt. Um 15.30 Uhr erneut einsetzende dichte Bewölkung leitete einen Abschnitt mit wechselnder Bedeckung ein. Die Oberflächentemperaturen zeigten infolgedessen keinen einheitlichen Verlauf mehr, da sich Besonnung und Beschattung während der Messungen abwechselten.

Tab. 6

Auf gleiche Zeitpunkte bezogene Oberflächentemperaturen (°C) Umgebung von Guntershausen und Deute, 17.—23. 8. 1960

Datum, Zeit	Wetter	T _L (Fz)	T _L (SG)	WEG	SUG	LGG	SPG	WIG	RG	WAD	LGD	SUD	RD
17. 8. 60 16.00 Uhr	☒ ⊙	19,7			20,2	21,1		19,2		18,2			
16.30 Uhr	☒	19,5			20,2	20,2		19,0		17,8			
18. 8. 60 16.00 Uhr	☒ ⊙	20,3			19,6	18,2	19,0	18,7	18,3				
16.30 Uhr	☒	19,6			18,7	18,6	18,9	18,5	18,0				
19. 8. 60 09.30 Uhr	☒ ⊙	16,4	16,4	17,8	16,7	17,7	17,8	(17,7)	(17,3)				
19. 8. 60 14.40 Uhr	☒ ⊙	18,0	(20,0)	20,2	18,8	18,6	17,9	15,9	17,7				
20. 8. 60 09.30 Uhr	☒	14,0	15,2	16,2	17,0	16,7	15,9	16,0	15,1	(13,0)			
10.00 Uhr	☒	14,1	15,0	15,5	15,9	15,9	15,1	15,0	14,1	13,9		14,9	
10.30 Uhr	☒	14,0	14,6	14,8	15,2	15,0	14,5	13,7	13,1	12,5		13,7	
22. 8. 60 10.30 Uhr	⊙	19,6	21,1	21,1	24,3	22,4	22,5	23,9	22,2				
23. 8. 60 11.10 Uhr	☒ ⊙	23,0	24,0	23,9	24,8	25,1	23,7	23,1	22,4	23,4	(27,0)	23,6	23,0
23. 8. 60 15.00 Uhr	☒	24,1	22,2	22,8	24,1	23,3	22,5	22,0	22,0	(20,9)	(22,8)	(21,5)	(21,5)
15.30 Uhr	☒ ⊙	23,9	23,4	23,8	25,7	23,7	23,4	23,9	23,2	21,4	23,5	22,2	21,9

Tab. 6 a

Differenz zwischen Oberflächentemperatur und Lufttemperatur T₀ — T_L(SG) für die in Tab. 6 angegebenen Werte (°C)

Datum, Zeit	Wetter	T _L (SG)	WEG	SUG	LGG	SPG	WIG	RG	WAD	LGD	SUD	RD
19. 8. 60 09.30 Uhr	☒ ⊙	16,4	+1,4	+0,3	+1,3	+1,4	(+1,3)	(+0,9)				
19. 8. 60 14.40 Uhr	☒ ⊙	(20,0)	(+0,2)	(-1,2)	(-1,4)	(-2,1)	(-4,1)	(-2,3)				
20. 8. 60 09.30 Uhr	☒	15,2	+1,0	+1,8	+1,5	+0,7	+0,8	-0,1	(-2,2)			
10.00 Uhr	☒	15,0	+0,5	+0,9	+0,9	+0,1	0,0	-0,9	-1,1		-0,1	
10.30 Uhr	☒	14,6	+0,2	+0,6	+0,4	-0,1	-0,9	-1,5	-2,1		-0,9	
22. 8. 60 10.30 Uhr	⊙	21,1	0,0	+3,2	+1,3	+1,4	+2,8	+1,1				
23. 8. 60 11.10 Uhr	☒ ⊙	24,0	-0,1	+0,8	+1,1	-0,3	-0,9	-1,6	-0,6	(+3,0)	-0,4	-1,0
23. 8. 60 15.00 Uhr	☒	22,2	+0,6	+1,9	+1,1	+0,3	-0,2	-0,2	(-1,3)	(+0,6)	(-0,7)	(-0,7)
15.30 Uhr	☒ ⊙	23,4	+0,4	+2,3	+0,3	0,0	+0,5	-0,2	-2,0	+0,1	-1,2	-1,5

- T_L(Fz) Lufttemperatur auf dem Flugplatz Fritzlar
- T_L(SG) Lufttemperatur auf dem Sportplatz bei Guntershausen
- WEG, SUG usw. siehe Tabelle 3
- ☒ Meßobjekte im Schatten
- ⊙ Meßobjekte besont
- ☒ ⊙ Meßobjekte abwechselnd beschattet und besont
- () Wert ist extrapoliert

Eine Übersicht über sämtliche Oberflächentemperaturwerte, die auf gleiche Zeitpunkte bezogen werden konnten, bietet Tabelle 6. Zur besseren Beurteilung der Messungen ist dabei für jeden Zeitpunkt in der Spalte „Wetter“ durch die bereits aus Tab. 5 bekannten Symbole angegeben, ob die Meßobjekte im Schatten lagen (☒), ob sie besont waren (⊙) oder ob Beschat-

tung und Sonnenschein abwechselten (☒ ⊙). Sind einzelne Zahlen eingeklammert, so mußte für sie die Meßkurve ein kleines Stück über den ersten oder letzten Meßpunkt hinaus extrapoliert werden; diese Werte sind daher etwas weniger genau als die anderen.

Die Tabelle 6 vermittelt auch in den Teilen, die noch nicht aus Tabelle 5 bekannt sind, dieselben Erkennt-

nisse, wie sie bereits erörtert wurden, wenn auch nicht in so prägnanter Form. Darüber hinaus gestattet sie einen Vergleich mit dem Wald bei Deute WAD und den dort gelegenen Feldern LGD, SUD und RD. Die Felder zeigen untereinander ein ähnliches Verhalten wie die bei Gunterhausen gelegenen, während die Oberfläche des Waldes in der Regel um etwa 10°C kälter als die der Felder ist. Das ist verständlich, da das Oberflächenradiometer zwischen Ästen und Zweigen hindurch sehr tief in den Wald hineinmißt, zum Teil sogar bis auf den Boden. Die Oberflächentemperatur ist dort bei Tage verständlicherweise wesentlich niedriger als an den äußeren Teilen der Bäume.

Die mittlere Schwankung der Einzelwerte ist für den Vergleich vom 20. 8. 1960, 10.00 Uhr, und 22. 8. 1960, 10.30 Uhr, mit in Tabelle 5 aufgenommen. Diese Werte sind für den 22. 8. 1960, 10.30 Uhr, wie die Temperaturen interpoliert, da sie zu dieser Zeit einen einheitlichen Gang zeigten. Für den 20. 8. 1960, 10.00 Uhr, ist

dagegen die Schwankung der letzten vor 10.00 Uhr gemessenen Werte angeführt; eine Interpolation erschien hier nicht sinnvoll, da die Schwankungen der nach 10.00 Uhr gemessenen Werte durch den um 10.10 Uhr einsetzenden Regen beeinflusst sind.

Bei einem Vergleich der beiden Termine stellt man fest, daß die mittlere Schwankung der Einzelwerte $\overline{\Delta}_E$ bei Besonnung fast doppelt so groß wie bei bedecktem Himmel ist. Infolge der größeren Einstrahlung bei Sonnenschein treten nicht nur höhere Temperaturen auf, sondern auch stärkere räumliche und zeitliche Temperaturunterschiede. Man kennt das ja bereits aus Feinregistrierungen der Lufttemperatur. Die einzelnen Meßobjekte zeigen untereinander kaum Unterschiede; lediglich das Feld mit dem liegenden Getreide macht davon eine Ausnahme: Es weist etwa die dreifache Schwankung der übrigen Objekte auf. Das geht in erster Linie auf die sehr uneinheitliche Beschaffenheit des Feldes zurück, auf dem ein Durcheinander von

Tab. 7

Mittlere Schwankung der Einzelwerte $\overline{\Delta}_E$ (°C) der in Tab. 4 enthaltenen Oberflächentemperaturmessungen

Datum, Zeit		WEG	SUG	LGG	SPG	WIG	RG	WAD	LGD	SUD	RD
17. 8. 60 15.45-16.45 Uhr	1			±0,9	±0,5	(±0,5)	±0,5				
	2		(±0,2)	±0,5				(±0,3)			
	3		±0,4	±0,6		±0,3					
	4			±0,4		±0,3					
	5					±0,4		±0,5			
18. 8. 60 15.40-16.45 Uhr	1			±0,5	±0,6	±0,4	±0,4				
	2		(±0,2)	±0,4		±0,3					
	3		±0,3	±0,2	±0,3		±0,4				
	4	-0,4	±0,3	±0,3	±0,4	±0,3	±0,3				
19. 8. 60 09.10-10.05 Uhr	1	±0,2	±0,2	±0,7	±0,4						
	2			±0,6		±0,5	±0,5				
	3	±0,2	(±0,5)	±0,6							
19. 8. 60 14.30-14.55 Uhr	1	±0,4	±0,6	±0,5	±0,6	(±0,4)	(±0,4)				
	2	±0,5	±0,5	±0,4	±0,6	±0,5	±0,4				
20. 8. 60 09.15-11.25 Uhr	1	±0,1	±0,2	±0,8	±0,3	±0,3	±0,2	±0,6			
	2	±0,2	±0,2	±0,6	±0,3	±0,2	±0,2	±0,8		(±0,3)	
	3	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,3	±0,3	±0,1	±0,2
	4	±0,2	(±0,1)	±0,3	±0,3	±0,3	±0,2		±0,3		
	5					±0,3		±0,6	±0,3	±0,2	(±0,1)
22. 8. 60 10.10-10.58 Uhr	1	±0,4	±0,3	±0,8	±0,4	±0,5	±0,3				
	2	(±0,4)	±0,4	±1,3	±0,4	±0,4	±0,4				
23. 8. 60 10.45-11.45 Uhr	1	±0,2	±0,4	±0,6	±0,4	±0,4	±0,3	±0,7	±1,1	(±0,1)	±0,2
	2	±0,3	(±0,4)	±0,9	±0,7	±0,9	(±0,2)	±1,2	±1,2		
23. 8. 60 14.45-16.30 Uhr	1	(±0,2)	(±0,3)	±0,4	(±0,3)	±0,3	±0,3	±0,5	(±0,5)	±0,3	±0,3
	2	(±0,2)	(±0,3)	(±0,2)	(±0,3)	(±0,2)	±0,3				
	3	±0,2	±0,4	±0,4	(±0,2)	±0,4	±0,6	±0,7	(±0,4)	±0,3	±0,2
	4	(±0,3)	(±0,3)	±0,6	(±0,3)	±0,2	±0,3				

Die Zahlen sind eingeklammert, wenn zu ihrer Berechnung weniger als 20 Einzelwerte zur Verfügung standen.

WEG. SUG usw. siehe Tabelle 3

mehr oder minder stark am Boden liegenden Getreide mit Stellen abwechselte, an denen die Halme noch einigermaßen aufrecht standen.

Die mittlere Schwankung der Einzelwerte $\overline{\Delta E}$ für alle in Tabelle 6 aufgeführten Zeitpunkte wie die Oberflächentemperaturwerte zu interpolieren, war nicht sinnvoll, da die ΔE -Werte selten einen einheitlichen Verlauf zeigten. Es sind deshalb in Tabelle 7 die mittleren Schwankungen der Einzelwerte für alle Originalmessungen zusammengestellt, also für alle Oberflächentemperaturmessungen, die Tabelle 4 enthält. Soweit der Berechnung weniger als 20 Einzelwerte zugrunde liegen, wurden die Zahlen in Klammern gesetzt.

Die Werte bestätigen die bereits aus den $\overline{\Delta E}$ -Angaben der Tabelle 5 gezogenen Schlüsse, wenn auch nicht in so klarer Weise. Darüber hinausgehende neue Ergebnisse sind aus Tabelle 7 nicht zu gewinnen.

3.7. Oberflächentemperatur einiger besonderer Objekte

Außer den bisher behandelten Ergebnissen liegen noch eine Reihe von Einzelmessungen an einigen besonderen Objekten vor, von denen Tabelle 8 die meisten enthält. Die hier angeführten Meßobjekte sind ein Betonplatz (BPF), ein geteerter, sogenanntes Hallenvorfeld (HVF) und mit Teerpappe gedeckte Dächer der

Flugzeughallen (HDF) am Flugplatz Frittlar, eine geteerte Straße in der Nähe von Homberg (TE) und zum Vergleich mit bewachsenen Oberflächen der Rasen des Frittlarer Flugfeldes (RF) bzw. ein Getreidefeld (GF) nahe der Teerstraße TE. Die Differenzen $T_0 - T_L$ sind hier so groß, daß die Zwischenschicht-Korrekturen bei einer Flughöhe von 300 Fuß nicht mehr vernachlässigt werden können. Diese Höhe hatte der Hubschrauber jedoch nur bei den Messungen am 23. 8. 1960, 14.21 bis 14.25 Uhr, während die übrigen aus viel geringeren Höhen gemacht wurden. Bei ihnen besteht auf Grund dieser Tatsache die Möglichkeit, daß sie etwas durch den Rotor des Hubschraubers beeinflusst (Abkühlung der Oberflächen) sind.

Man ersieht aus Tabelle 8, daß im Gegensatz zu den bewachsenen Oberflächen einzelne unbewachsene ganz erhebliche Differenzen zur Lufttemperatur aufweisen können. Am stärksten ist die Aufheizung von geteereten Plätzen und Straßen und fast noch stärker wegen der schlechten Wärmeableitung von teerpappgedeckten Dächern. Diese Tatsache ist als solche bereits längst bekannt, kann jetzt aber mit zuverlässigen Meßwerten auch quantitativ belegt werden.

Interessant ist übrigens noch, daß die mittlere Oberflächentemperatur eines kleinen Dorfes KD (Tabelle 9) nur etwa 3° C mehr als die einer nahegelegenen Wiese betrug (vergleichbare Angaben der Lufttemperatur liegen für diesen Fall nicht vor). Das liegt einerseits

Tab. 8
Oberflächentemperatur (°C) einiger besonderer Meßobjekte im Raum Frittlar 23. — 25. 6. 60 und 23. 8. 60

Datum, Zeit	Wetter	Meßobjekt	T_0	T_L (Fz)	$T_0 - T_L$ (Fz)	ΔT	T_0 (korr.)	$\overline{\Delta M}$	$\overline{\Delta E}$	n
23. 6. 1960, 16.58 Uhr	☉	BPF	35,7	27,3	+8,4	—	35,7	±0,1	±0,2	5
17.04 Uhr	☉	BPF	35,3	27,3	+8,0	—	35,3	±0,1	±0,3	14
25. 6. 1960, 11.01 Uhr	☉	HVF	46,0	25,1	+20,9	—	46,0	—	—	3
23. 8. 1960, 12.02 Uhr	☉	HVF	41,0	23,4	+17,6	—	41,0	—	—	2
12.00 Uhr	☉	RF	28,0	23,4	+4,6	—	28,0	±0,1	±0,5	18
23. 8. 1960, 14.24 Uhr	☉	HVF	38,3	24,2	+14,1	+3,0	41,3	±0,2	±1,0	29
14.23 Uhr	☉	HDF	41,6	24,2	+17,4	+4,6	46,2	±0,2	±0,6	8
14.21 Uhr	☉	RF	26,1	24,2	+1,9	+0,2	26,3	±0,2	±0,5	7
24. 6. 1960, 13.57 Uhr	☉	TE	43,1	26,9	+16,2	—	43,1	±0,1	±0,4	11
14.07 Uhr	☉	TE	44,9	27,0	+17,9	—	44,9	±0,1	±0,9	41
ca. 14.15 Uhr	☉	GF	28,7	27,1	+1,6	—	28,7	±0,2	±0,8	14

- T_0 Oberflächentemperatur
- T_L (Fz) Lufttemperatur (Messung auf dem Flugplatz Frittlar)
- ΔT Zwischenschicht-Korrektur (wenn —, entfällt ΔT wegen geringer Flughöhe)
- T_0 (korr.) korrigierte Oberflächentemperatur
- $\overline{\Delta M}$ mittlere Schwankung des Mittelwertes
- $\overline{\Delta E}$ mittlere Schwankung des Einzelwertes } (nur für $n \geq 5$)
- n Zahl der Einzelmessungen
- ☉ Meßobjekte besontt
- BPF Betonplatz am Flugplatz Frittlar
- HVF Hallenvorfeld (geteerter Platz), Flugplatz Frittlar
- HDF Dächer der Flugzeughallen am Flugplatz Frittlar
- RF Rasen des Flugplatzes Frittlar
- TE Teerstraße bei Homberg
- GF Getreidefeld bei Homberg

Tab. 9
Oberflächentemperatur ($^{\circ}\text{C}$) eines kleinen Dorfes (KD)
und einer Wiese (WIG) im Raum Guntershausen
(17. 8. 1960)

Datum, Zeit	Wetter	Meß- objekt	T_0	$\overline{\Delta}_M$	$\overline{\Delta}_E$	n
17. 8. 1960, 16.36 Uhr	☀	KD	21,8	$\pm 0,6$	$\pm 2,8$	23
17. 8. 1960, 16.35 Uhr	☀	WIG	19,1	$\pm 0,1$	$\pm 0,4$	28

T_0 = Oberflächentemperatur
 $\overline{\Delta}_M$ = mittlere Schwankung des Mittelwertes T_0
 $\overline{\Delta}_E$ = mittlere Schwankung der Einzelwerte
n = Zahl der Einzelmessungen

daran, daß der Himmel bei den Messungen völlig bedeckt war, andererseits aber auch daran, daß die Oberflächenstruktur eines Dorfes neben Gebäuden, befestigten Straßen und Plätzen sehr viel bewachsenen Boden aufweist, der eine wesentlich niedrigere Temperatur besitzt, als z. B. die Dächer von Häusern. Die größere mittlere Schwankung der Einzelwerte $\overline{\Delta}_E$ von $\pm 2,8^{\circ}\text{C}$ zeigt diese Unterschiede deutlich auf.

Über einem geschlossen bebauten Areal wird man sehr viel höhere Oberflächentemperaturen erwarten müssen, die wahrscheinlich noch über denen der in Tabelle 8 enthaltenen Betonfläche liegen dürften, wenn nicht gerade beschattete Teile gegenüber den besonnten überwiegen. Leider konnten keine Messungen dieser Art durchgeführt werden, da sie sich nicht mit den Flugsicherheitsbestimmungen vereinbaren ließen.

4. Schlußbetrachtung

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Meßmethode im allgemeinen und die hier benutzte Geräteanordnung im besonderen sich gut bewährten. Mit verhältnismäßig einfachen Mitteln ließ sich bereits eine absolute Meßgenauigkeit von $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ bis $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ erreichen. Darüber hinaus ist die Ausbaufähigkeit des Verfahrens zu erkennen. Mit einer Verbesserung der Halbleiterfilter oder einer Kombination mit anderen Filtermaterialien wäre der Zwischenschicht-Einfluß völlig zu beseitigen und es könnten dann größere Flughöhen für die Messungen gewählt werden. Die Auswertemethodik ließe sich vereinfachen, wenn man anstelle der schwarzen Modulatorscheibe eine verspiegelte so anbringen würde, daß ein Vergleichsstrahler konstanter Temperatur auf den Strahlungsempfänger gespiegelt würde. Alle Überlegungen, die sich auf die Änderung der Modulator-Temperatur beziehen,

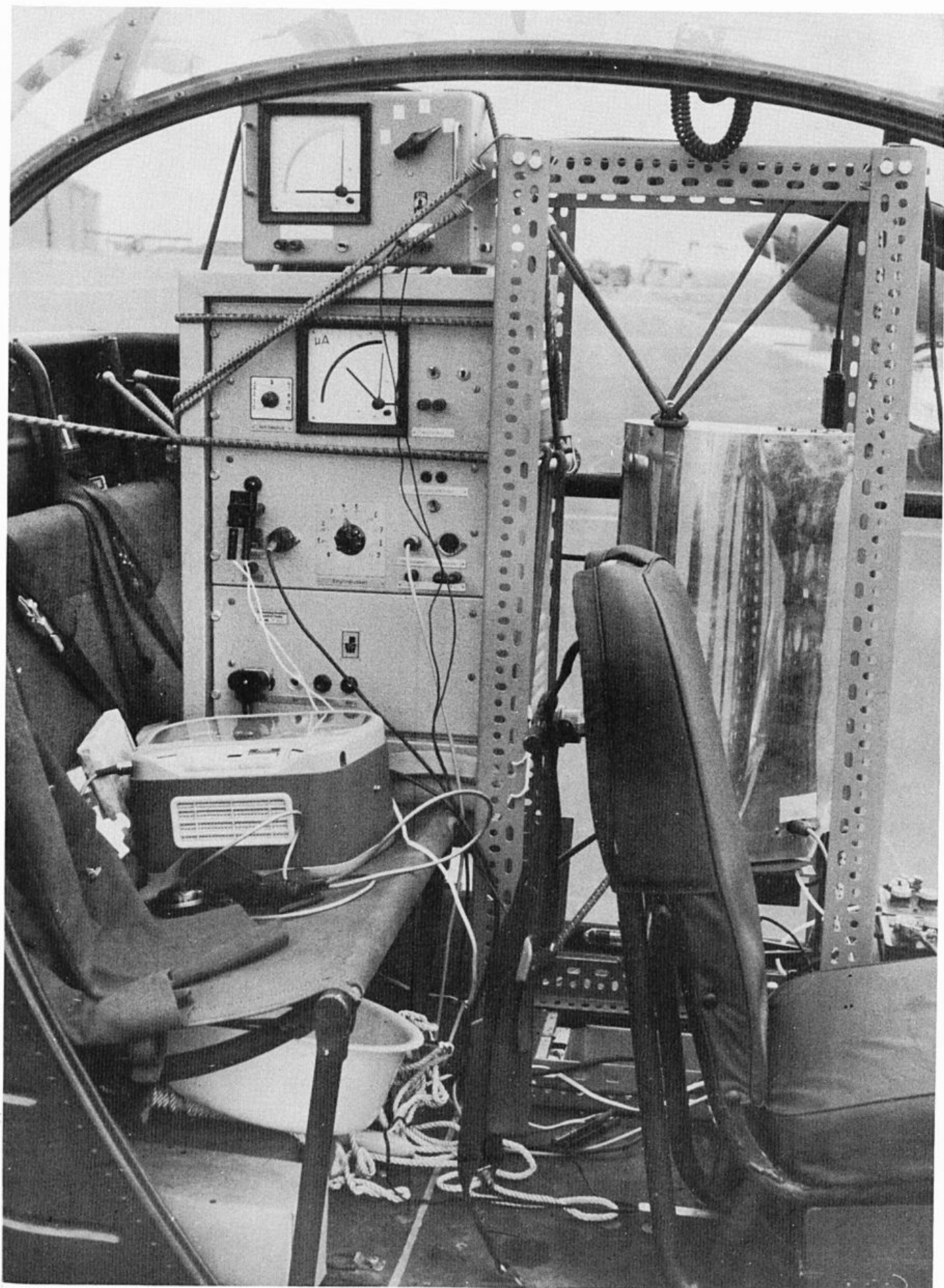
könnten so unberücksichtigt bleiben, und das Meßinstrument im Verstärker ließe sich sogar unmittelbar mit einer Temperatur-Skala versehen. Schließlich könnten bei Beschaffung eines neuen, trägheitsärmeren Verstärkers (das wäre u. a. durch eine Erhöhung der Modulations-Frequenz zu erreichen) die Messungen im Horizontalflug mit Flächenflugzeugen ausgeführt werden. Allerdings wäre es dann auch notwendig, die Meßwerte zu registrieren und mit Hilfe synchroner Luftaufnahmen eine sichere Zuordnung von Meßobjekt und Wert herzustellen.

Aus den Meßergebnissen geht hervor, daß zwischen den verschiedenen bewachsenen Oberflächen keine großen Temperaturunterschiede bestehen. Es ist daher wohl möglich, die Werte der langwelligen Ausstrahlung und der langwelligen Strahlungsbilanz, die über Rasen gemessen werden, in erster Näherung auch auf andere bewachsene Oberflächen zu übertragen. Nicht möglich ist das dagegen für unbewachsene Flächen, für geteerte oder betonierte Plätze, Straßen, Häuser und dergleichen, da hier die Unterschiede der Oberflächentemperatur zu groß sind. Auch die Gesamtstrahlungsbilanz — kurzwellige plus langwellige — kann nicht ohne weiteres auf andere Oberflächen übertragen werden, da in den kurzwelligen Anteil die Albedo eingeht, von der man weiß, daß sie sich für verschiedene bewachsene Oberflächen unterscheidet.

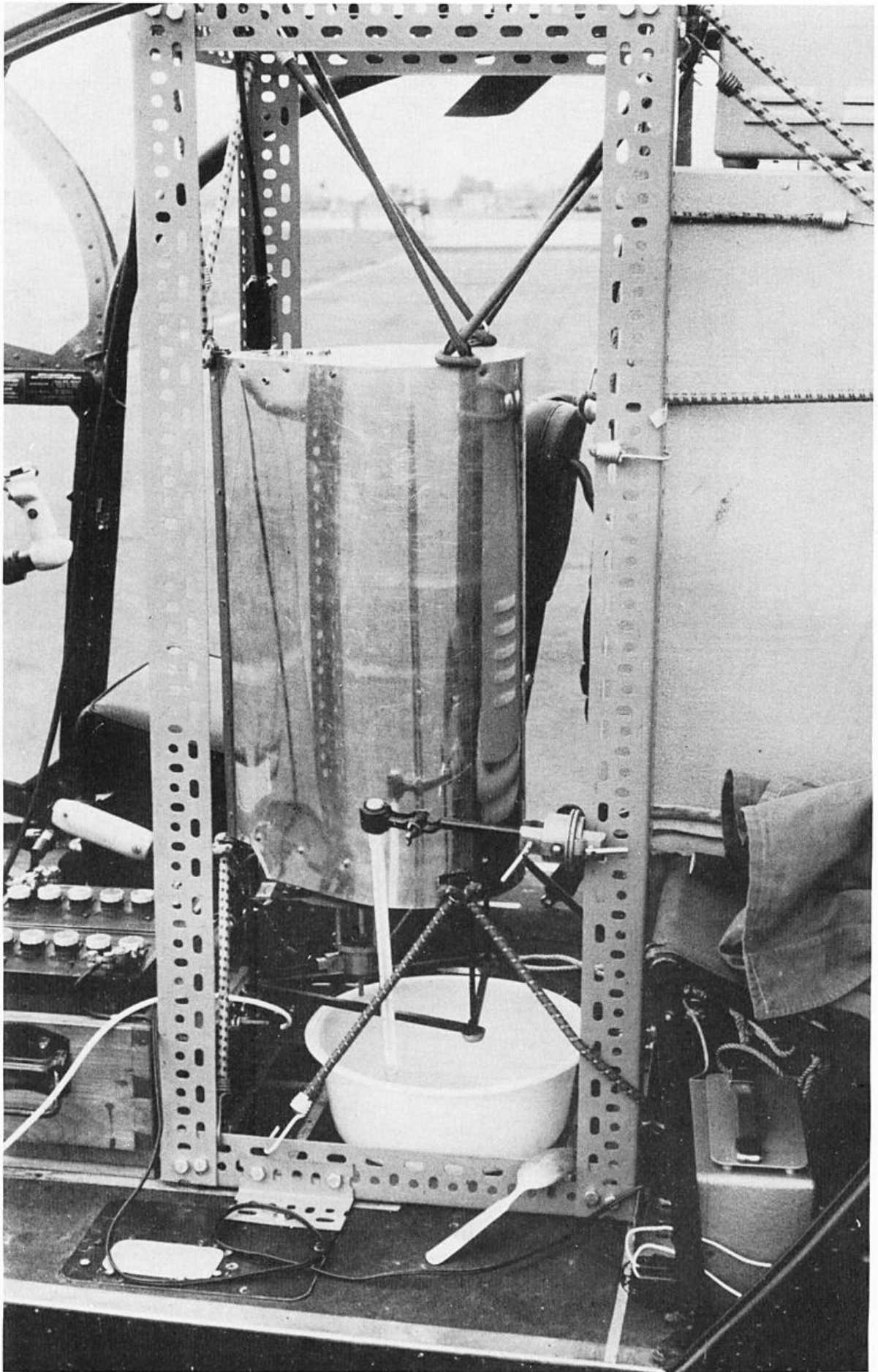
Weiterhin wird es möglich sein, mit dem Oberflächen-Radiometer vom Flugzeug oder Hubschrauber aus sehr rasch geländeklimatische Kartierungen vorzunehmen. Als Beispiel für die praktische Nutzenanwendung sei hier nur auf die Geländekartierung bei einer Spät- oder Frühfrostlage hingewiesen. Der weitere Ausbau der Meßmethodik erscheint durchaus lohnend und soll daher in Angriff genommen werden.

Literatur

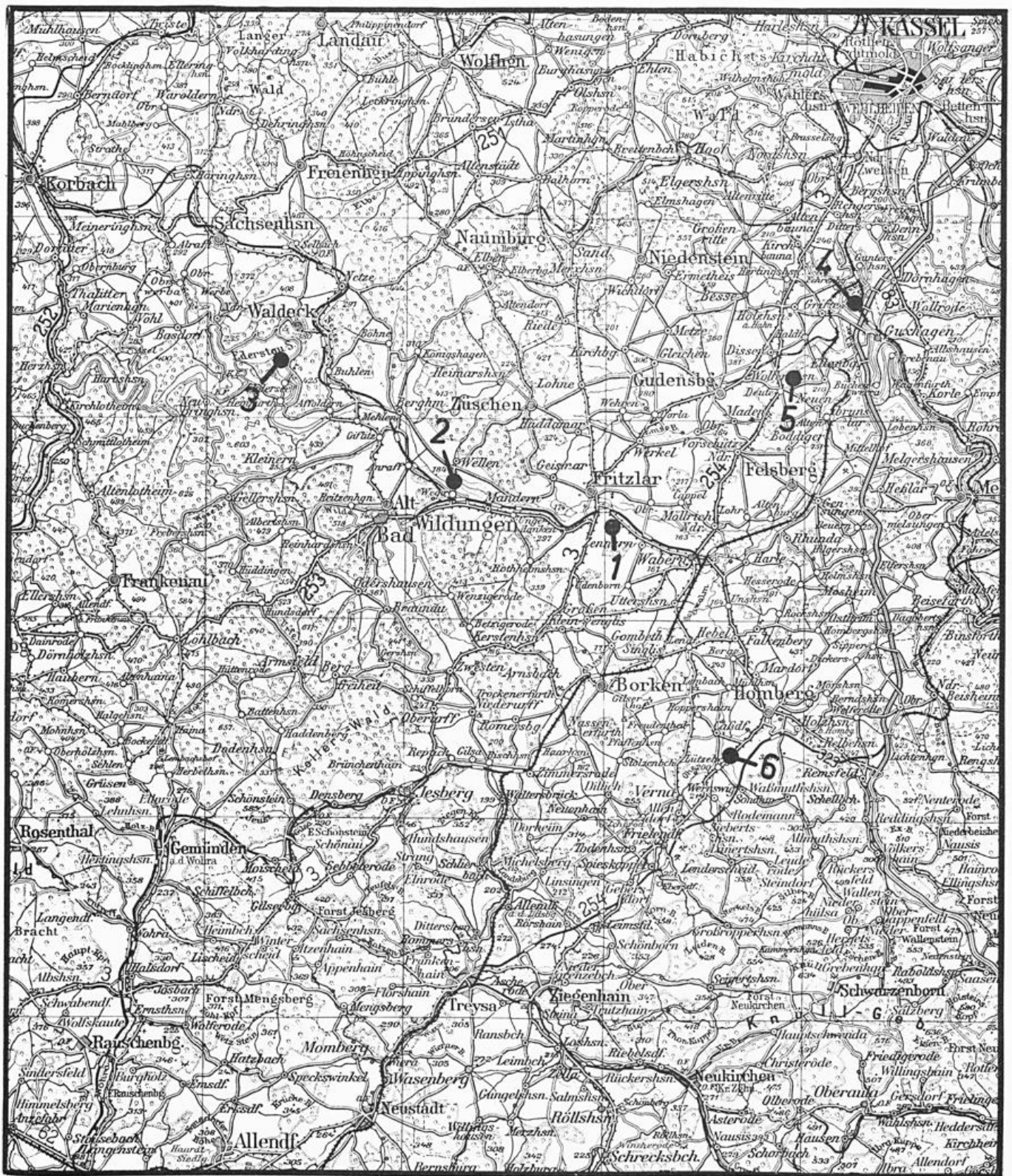
- (1) Brooks, F. A.: Atmospheric radiation and its reflection from the ground. *J. Meteor.* **9**, 41 (1952)
- (2) Falckenberg, G.: Absorptionskonstanten einiger meteorologisch wichtiger Körper für infrarote Wellen. *Meteor. Z.* **45**, 334 (1928)
- (3) Schmidt, E.: Die Wärmestrahlung von Wasser und Eis, von bereiften und benetzten Oberflächen. *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens* **5**, 1 (1934)
- (4) Falckenberg, G.: Apparatur zur Messung der Himmelsstrahlung und Bodentemperatur. *Meteor. Z.* **45**, 422 (1928)
- (5) Bolz, H. M.: Der Einfluß der infraroten Strahlung auf das Mikroklima. *Abh. Meteor. Hydrol. Dienst DDR* Nr. 7 (1951)
- (6) Wegener, K.: Die Strahlung des Bodens. *Meteor. Z.* **55**, 133 (1938)
- (7) Wegner, K. u. Trojer, H.: Die Temperaturstrahlung der Erde und ihre Messung. *Ann. Hydrogr.* **67**, 424 (1939)
- (8) Trojer, H.: Temperatur-Strahlungsmessungen mit dem Parabolspiegel. *Meteor. Z.* **57**, 149 (1940)
- (9) Albrecht, F.: Mikrometeorologische Temperaturmessungen vom Flugzeug aus. *Ber. Dt. Wetterd. US-Zone* Nr. 38, 332 (1952)
- (10) Malkus, J. St.: Trade cumulus cloud groups: some observations suggesting a mechanism of their origin. *Tellus* **9**, 33 (1957)
- (11) Lorenz, D.: Untersuchungen mit dem ARDONOX, einem neuen Gerät zur Messung von Oberflächen-temperaturen. *Meteor. Rdsch.* **13**, 54 (1960)
- (12) Fimpel, H.: Untersuchung des Gesamtstrahlungs-pyrometers „Ardonox“ auf seine Eignung zur Messung der Strahlungstemperatur einer Gras-oberfläche. *Dipl.-Arb. Univ. München* 1960
- (13) Dutton, J. A.: Space and time response of air-borne sensors for the measurement of ground parameters. *Techn. Rep. No. 1, Univ. Wisconsin Dep. Meteor. Sept. 1959 (Contract Nonr. (1202) 07 and Contract DA-36-039-SC-80282)*
- (14) Grave, G.: Thermoelemente und Bolometer für Strahlungsmessungen im infraroten Spektralbereich. *Elektronik* **7**, Nr. 3 (1958)
- (15) Rost, R.: *Kristalloden Technik*. Berlin 1956. S. 268
- (16) Schulze, R.: Optische Durchlässigkeit von Lupolen H für Ultraviolett-Strahlung, sichtbares Licht und Infrarot-Strahlung. *Ann. Meteor.* **6**, 127 (1954)



Bildtafel I
Geräte zur Messung der Bodenoberflächentemperatur im Alouette-Hubschrauber.
Links der PTW-Verstärker und darüber das Modulator-temperatur-Gerät; vor dem
Verstärker das Tonbandgerät. Rechts, durch den Pilotensitz z. T. verdeckt, das
Oberflächen-Radiometer



Bildtafel II
Oberflächen-Radiometer im Alouette-Hubschrauber. Unter dem
Radiometer die Wasserschüssel für die Zwischen-Eichungen



1 : 300 000



Bildtafel III

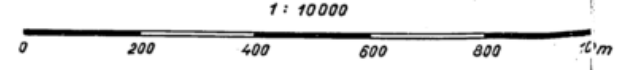
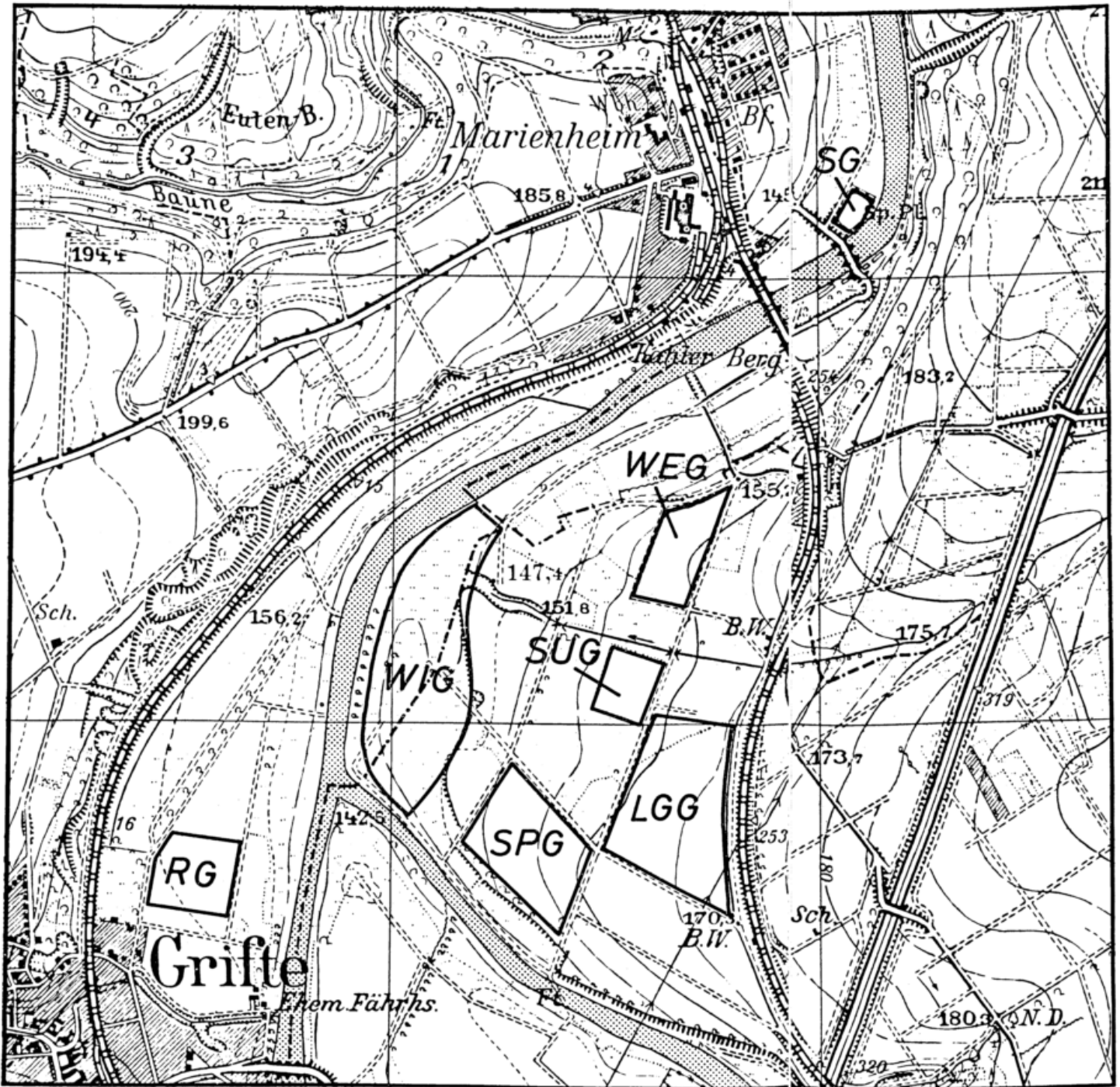
Übersichtskarte des Meßgebietes. Kartengrundlage: Übersichtskarte Mitteleuropa 1 : 300 000. Mit Genehmigung des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt a. M. — 1 = Flugplatz Fritzlar, 2 = Eder bei Wega, 3 = Edersee, 4 = Meßobjekte bei Guntershausen, 5 = Meßobjekte bei Deute, 6 = Meßobjekte bei Homberg



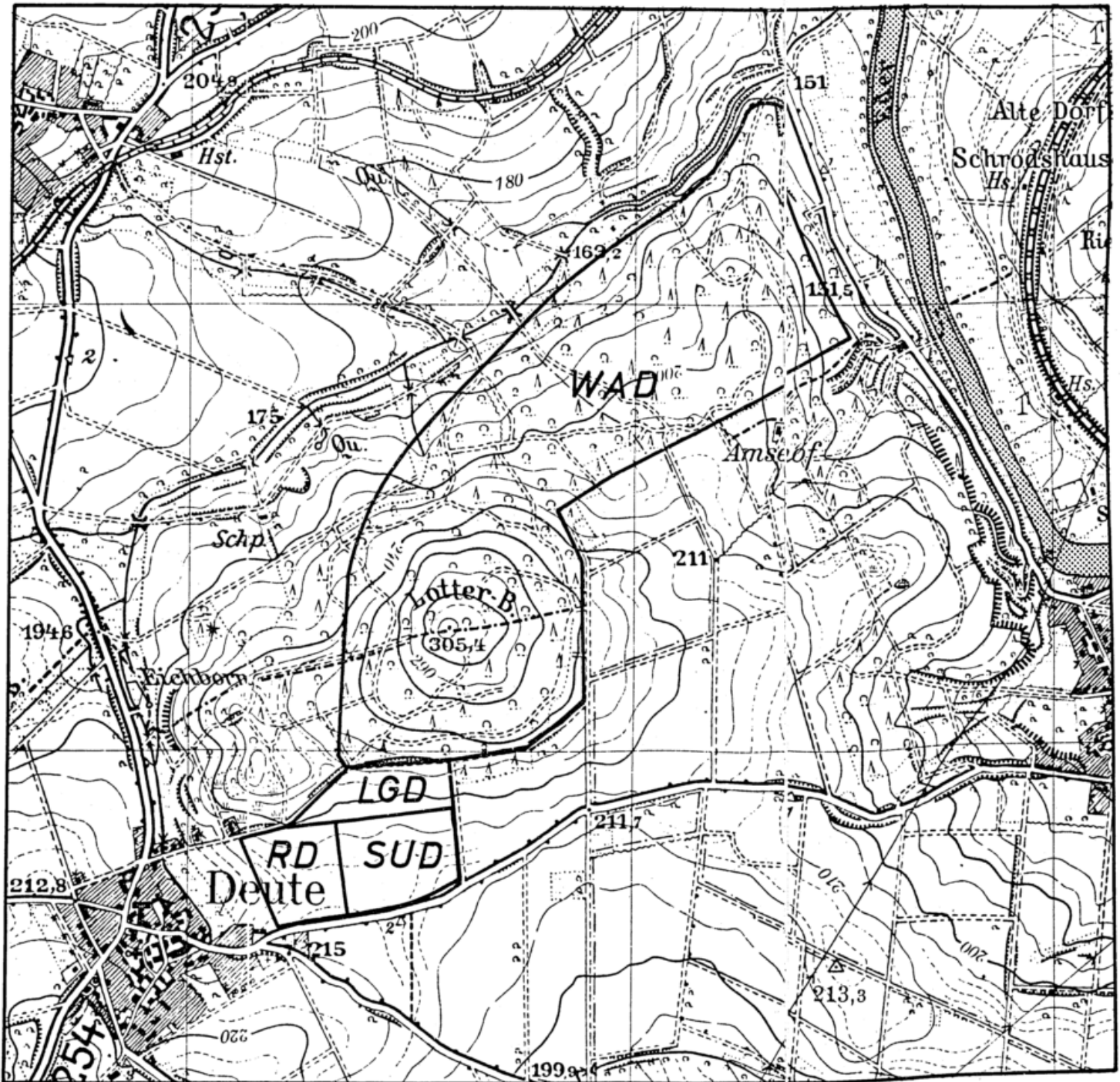
Bildtafel IV
Luftaufnahme des Meßgeländes bei Guntershausen. Freigegeben durch Ministerium für Wirtschaft und Verkehr, Mainz unter Nr. 00468



Bildtafel V
Luftaufnahme des Meßgeländes bei Deute. Freigegeben durch
Ministerium für Wirtschaft und Verkehr, Mainz unter Nr. 00467



Bildtafel VI
 Lageplan der Meßobjekte bei Guntershausen. Mit Genehmigung des Hessischen Landesvermessungsamtes, Wiesbaden vom 10. 5. 1961 - Az. 5402/61 - Lfd. N°101



1 : 10000



Bildtafel VII
 Lageplan der Meßobjekte bei Deute. Mit Genehmigung des Hessischen Landesvermessungsamtes, Wiesbaden vom 10. 5. 1961 — Az. 5402/61 — Lfd. Nr. 4