



Berichte des Deutschen Wetterdienstes

126

**Über ein neues Modell des Strahlungsbilanzmessers
nach Schulze**

von
Claus Uwe Däke



Zitationsvorschlag:

Däke, Claus U.: Über ein neues Modell des Strahlungsbilanzmessers nach Schulze. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1972.
(Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 126)

ISSN der Onlineausgabe: 2194-5969

ISSN der Druckausgabe: 0072-4130

Nutzungsbedingungen



Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz

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

Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Herausgeber und Verlag: :

Deutscher Wetterdienst
Frankfurter Straße 135
D- 63067 Offenbach am Main

Internet: www.dwd.de

Mail: bibliothek@dwd.de

Inhalt

	Seite
1. Einleitung	3
2. Aufbau des Bilanzmessers	5
3. Physikalische Beschreibung des Bilanzmessers; Ergebnisse von Messungen an dem Gerät	6
3.1. Absorptionsvermögen des Empfängers; Durchlässigkeit der Lupolen-Hauben ..	6
3.2. Temperatur des Gerätekerne	7
3.3. Verhalten des Empfängers bei veränderlicher Bestrahlung	7
3.4. Temperatur- und Druckabhängigkeit der Empfindlichkeit des Strahlungsempfängers	8
3.5. Richtungsabhängigkeit der Empfindlichkeit; Cosinusetz	10
4. Eichung von Strahlungsbilanzmessern	11
4.1. Eichung im kurzwelligen Spektralbereich (0,3 μm — 3 μm)	12
4.2. Eichung im langwelligen Spektralbereich (6 μm — 60 μm)	12
5. Ein Gerät zur Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung	14
6. Anhang. Betrachtungen zur Wirkungsweise des Bilanzmessers	16
6.1. Die Wärmebilanz der Empfangsfläche	16
6.2. Die Wärmeströme im Bilanzmesser	17
7. Ergebnisse	21
Literatur	22

Anschrift des Verfassers:

Dr. C. U. Däke, 2000 Hamburg 19, Eimsbütteler Marktplatz 1

Herausgeber und Verlag:

Deutscher Wetterdienst, Zentralamt, 6050 Offenbach a. M., Frankfurter Straße 135

Zusammenfassung

Es wird ein Strahlungsbilanzmesser für geophysikalische Untersuchungen beschrieben, mit dem außer der Strahlungsbilanz auch die auf eine horizontale Fläche von oben und unten einfallenden Strahlungsströme getrennt gemessen werden können. Neuartig an dem Gerät sind die Luftführung zur Temperierung des Meßgerätekerns und zur Belüftung der Lupolen-Abdeckhauben sowie die Verwendung von Halbleiter-Thermosäulen als Meßorgane. Durch geeignete Maßnahmen besitzt das Gerät kurz- und langwellig dieselbe Empfindlichkeit; außerdem folgt die Anzeige in ihrer Abhängigkeit vom Einfallswinkel praktisch genau dem Lambertschen Cosinusetz.

Zur Eichung von Strahlungsbilanzmessern im langwelligen Bereich wird ein neues Eichverfahren mit einer rotierenden Wasseroberfläche als Infrarotstrahlungsquelle beschrieben.

Ferner wird gezeigt, wie man aus der oberen Hälfte des Strahlungsbilanzmessers ein Gerät zur Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung entwickeln kann.

In einem Anhang wird die Wirkungsweise des Strahlungsbilanzmessers an Hand eines Ersatzschaltbildes für die Wärmeströme theoretisch behandelt; ein Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen wird durchgeführt.

Abstract

A new model of the SCHULZE-type balance meter for geophysical observations is described. With this it is possible to measure the radiation balance as well as the radiation directed upward and downward separately. Novelities are the way of leading the air through the apparatus to keep the temperature of the measuring core and to ventilate the Lupolen caps and the use of semiconductor thermocouples as sensitive elements. By special means the apparatus has the same sensitivity for short-wave and for long-wave radiation. The indication of the balance meter in its dependence on the angle of inclination is well according to the Lambert cosine law.

Further is described a new procedure for the calibration of balance meters in the long-wave region using a rotating water bath as a source of infrared radiation.

It is also shown how to develop an apparatus for measuring the long-wave radiation of the atmosphere by using the upper part of the new balance meter.

In an appendix the function of the balance meter is discussed theoretically based upon a simplified model for the heat currents. A comparison is carried out with the experimental results.

1. Einleitung

Die Strahlungsbilanzmesser sind geophysikalische Meßgeräte zur Bestimmung des Strahlungsdurchsatzes durch eine ebene, horizontale Fläche, d. h. zur Bestimmung der Differenz der von oben und von unten kommenden, diese Fläche durchsetzenden Strahlungsströme (im Englischen "net radiation"). Obwohl es heute auch schon kleine, sehr leichte Geräte gibt, die an aerologische Radiosonden angehängt werden können und eine Messung des Strahlungsdurchsatzes durch die Horizontalfläche in großen Höhen gestatten (1), (2), werden die zur Dauerregistrierung benutzten Strahlungsbilanzmesser im allgemeinen in 1 - 2 m Höhe über dem Erdboden aufgestellt und messen dort einen Strahlungsumsatz, der dem an der Erdoberfläche praktisch gleicht; daher versteht man unter der Strahlungsbilanz schlechthin die Differenz zwischen Ein- und Ausstrahlung am Erdboden.

Die in der Meteorologie vorkommenden elektromagnetischen Strahlungen lassen sich nach ihren Wellenlängen in zwei Bereiche einteilen: einen kurzwelligen Spektralbereich mit Wellenlängen etwa zwischen $0,3 \mu\text{m}$ und $3 \mu\text{m}$ für die direkte Sonnenstrahlung S' , für die durch Streuung der direkten Sonnenstrahlung an den Luftmolekülen entstehende Himmelsstrahlung H' und für die durch Reflexion von $S' + H'$ am Erdboden entstehende kurzwellige Reflexstrahlung R' , sowie einen langwelli-

gen Spektralbereich mit Wellenlängen zwischen etwa $6 \mu\text{m}$ und $60 \mu\text{m}$ für die Temperaturstrahlungen der Erdoberfläche E' und der Atmosphäre A' wie auch für die durch Reflexion von A' an der Erdoberfläche entstehende langwellige Reflexstrahlung r' . Letztere ist allerdings vergleichsweise gering und läßt sich darüber hinaus meßtechnisch nur sehr schwer von E' trennen, so daß unter E' zumeist die Summe dieser beiden Strahlungen verstanden wird. Aus den (ungestrichenen) Vertikalkomponenten S, H, R, E, A dieser Strahlungsströme ergibt sich die Strahlungsbilanz Q wie folgt:

$$Q = (S + H - R) + (A - E).$$

Die einzelnen Strahlungen sind so zusammengefaßt, daß in der ersten Klammer die kurzwelligen, nur tagsüber von Null verschiedenen Komponenten und in der zweiten Klammer die ständig wirkenden langwelligen Komponenten der Strahlungsbilanz Q stehen. Zur Abschätzung ihrer Größenordnungen sind in der nachfolgenden Tab. 1 einige Ergebnisse von Strahlungsmessungen am Meteorologischen Observatorium Hamburg aus dem Jahre 1965 (3) zusammengestellt.

Einer Veranschaulichung der Größenbeziehungen der einzelnen Strahlungskomponenten untereinander soll **Abb. 1** dienen; dort sind schematisch die Vertikalkomponenten der Strahlungsströme entsprechend ihrem Beitrag zur Jahressumme der Strahlungsbilanz 1965 (vergl. Tab. 1, Zeile a) eingezeichnet.

Tab. 1

Einige Ergebnisse von Messungen der kurzwelligen und langwelligen Komponenten der Strahlungsbilanz in Hamburg-Fuhlsbüttel im Jahre 1965 (3). Bezeichnungen im Text.

Zeitraum			Einheit	S	H	R	A	E	Q	
a	Jahressumme		$\frac{\text{kcal}}{\text{Jahr} \cdot \text{cm}^2}$	28,4	52,1	18,1	238,5	267,5	33,5	
	b	Monat Juni	$\frac{\text{kcal}}{\text{Monat} \cdot \text{cm}^2}$	4,48	8,62	2,99	21,38	24,11	7,38	
Monat Dezember		$\frac{\text{kcal}}{\text{Monat} \cdot \text{cm}^2}$	0,11	0,80	0,16	20,12	21,38	-0,51		
c	Juni	0-1 Uhr	min	$\frac{\text{cal}}{\text{Stunde} \cdot \text{cm}^2}$	-	-	-	24,0	28,0	-5,0
			max	$\frac{\text{cal}}{\text{Stunde} \cdot \text{cm}^2}$	-	-	-	33,5	35,5	-1,0
		12-13 Uhr	min	$\frac{\text{cal}}{\text{Stunde} \cdot \text{cm}^2}$	0,0	4,5	1,0	25,0	31,5	2,0
			max	$\frac{\text{cal}}{\text{Stunde} \cdot \text{cm}^2}$	35,0	46,0	14,0	33,0	38,5	45,0
	Dez.	0-1 Uhr	min	$\frac{\text{cal}}{\text{Stunde} \cdot \text{cm}^2}$	-	-	-	21,0	26,0	-5,0
			max	$\frac{\text{cal}}{\text{Stunde} \cdot \text{cm}^2}$	-	-	-	32,5	32,5	0,0
		12-13 Uhr	min	$\frac{\text{cal}}{\text{Stunde} \cdot \text{cm}^2}$	0,0	0,5	0,0	21,5	27,5	0,0
			max	$\frac{\text{cal}}{\text{Stunde} \cdot \text{cm}^2}$	6,5	12,5	3,5	32,0	32,5	7,0

Zur Messung der Strahlungsbilanz benötigt man Empfänger, die über den großen Wellenlängenbereich von 0,3 μm bis 60 μm gleichmäßig empfindlich sind. Wegen ihrer starken Selektivität kommen daher die aus Anwendungen in relativ schmalen Wellenlängenbereichen bekannten photochemischen und photoelektrischen Meßverfahren (wie photographische Photometer, Photozellen, -elemente, Halbleiterzellen u. ä.) für die Strahlungsbilanzmessung nicht in Betracht, und es verbleiben ausschließlich die kalorimetrischen Meßverfahren (4), (5). Bei diesen läßt man die Strahlung auf die geschwärzte Oberfläche eines Körpers fallen, wobei sie absorbiert wird und zu einer Erwärmung der Oberfläche führt. Auf Grund der so geänderten Temperaturverhältnisse setzt im Innern des Körpers ein Wärmestrom ein, der durch Messung der sich an einem Wärmewiderstand einstellenden Temperaturdifferenz bestimmt wird (6). Das Meßprinzip beruht also auf der Umwandlung eines elektromagnetischen Strahlungsstromes in einen Wärmestrom. Der Wirkungsgrad dieser Energietransformation ist durch das Absorptionsvermögen der Schwärzung gegeben. Die gleichmäßige Empfindlichkeit für alle genannten Wellenlängen wird durch die gleichmäßige Absorption einer „schwarzen“ Oberfläche gewährleistet. Die Temperaturerhöhung der Absorptionsschicht bzw. die Temperaturdifferenz an einem Wärmewiderstand im Innern des Empfängers ist dann ein Maß für die empfangene Strahlungsintensität (vergl. 6.1.). Sie wird auf vielfältige Weise bestimmt: mit Flüssigkeitsthermometern, mit Thermoelementen bzw. -säulen, mit Bimetallstreifen, mit Widerstandsthermometern und neuerdings auch mit Schwingquarzthermometern (2).

Die heute verwendeten Strahlungsbilanzmesser lassen sich in zwei Gruppen einteilen: in Geräte mit freier, ungeschützter Empfangsfläche und in Geräte mit einem

Schutz der empfindlichen Teile vor Wind, Regen und anderen Wettereinflüssen. Bei der ersten Gruppe werden die geschwärzten Empfangsflächen vom Wind gekühlt, so daß die Meßanzeige windabhängig ist. Durch verschiedene konstruktive Maßnahmen gelingt es, den Windeinfluß stark herabzudrücken, und zwar durch eine hohe innere Wärmeleitfähigkeit des Gerätes (7), durch kräftige künstliche Belüftung der Empfängerflächen (8), (9), durch Heizung der kälteren der beiden Empfängerflächen (10) oder durch Verwendung zweier unabhängiger Meßsysteme, von denen das eine „oben“ und das andere „unten“ zusätzlich beheizt wird, so daß sich der Windeinfluß bestimmen und eliminieren läßt (11), (12). Die zweite Gruppe von Strahlungsbilanzmessern verwendet zum Schutze der Empfangsflächen vor Witterungseinflüssen fast ausschließlich das 1953 von R. SCHULZE (13) in die Strahlungsmesstechnik eingeführte Polyäthylen „Lupolen-H“ der Firma BASF (14), (15), welches weitgehend die Bedingungen hoher optischer Durchlässigkeit im Spektralbereich von 0,3 μm bis 60 μm bei ausreichender chemischer Resistenz erfüllt. — Bei dieser groben Klassifikation der Strahlungsbilanzmesser sind nur die wichtigsten Vertreter der einzelnen Gerätetypen genannt. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer Bilanzmesserkonstruktionen, die nach denselben oder ähnlichen Prinzipien arbeiten. Eine Zusammenstellung der heute gebräuchlichen Strahlungsbilanzmesser findet man in den Berichten über die Vergleichsversuche an Strahlungsmessgeräten (16), die auch weitere Literaturangaben enthalten.

Das Interesse für Strahlungsbilanzmessungen geht aus von meteorologisch-geophysikalischen Fragestellungen. Hier ist die Kenntnis des Strahlungs- und Wärmehaushaltes der Erdoberfläche und der Atmosphäre von grundlegender Bedeutung für die Erforschung des Kli-

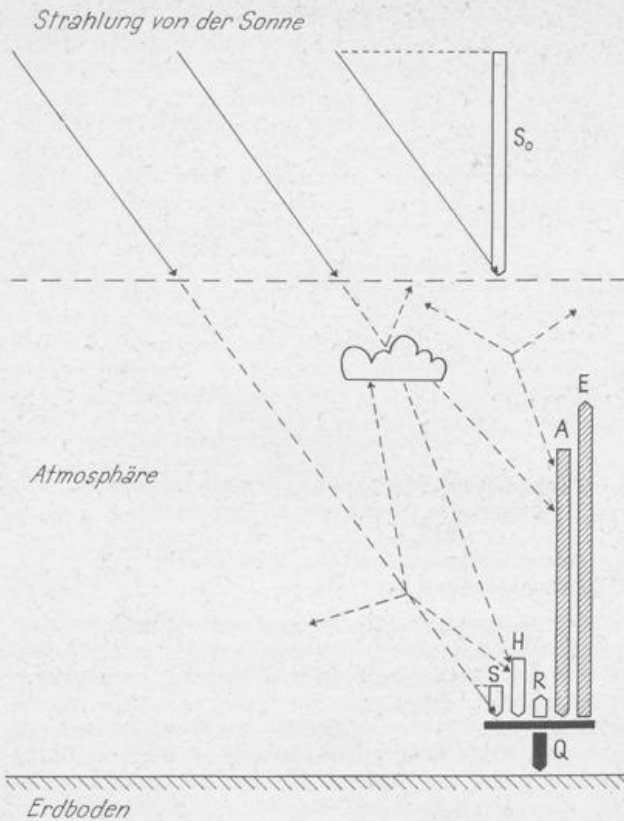


Abb. 1

Schematische Darstellung der auf die horizontale Flächeneinheit am Erdboden fallenden geophysikalischen Strahlungen. Die Länge der Pfeile entspricht den im Jahre 1965 in Hamburg-Fuhlsbüttel gemessenen Jahressummen der Strahlungen (vgl. Tab. 1, Zeile a). Weiße Pfeile: kurzwellige, schraffierte Pfeile: langwellige Strahlungen; schwarzer Pfeil: Strahlungsbilanz. $S_0 = 200 \text{ kcal/cm}^2 \cdot \text{Jahr}$: Vertikalkomponente der Sonnenstrahlung am Außenrand der Atmosphäre. Weitere Bezeichnungen im Text.

mas und der planetarischen Zirkulationen der Atmosphäre. Andere wichtige Anwendungsbereiche der Strahlungsbilanzmessungen liegen u. a. in der Bioklimatologie, der Medizin, der Agrarwissenschaft und auch auf technischen Gebieten. Jedoch kann in diesem Zusammenhang nicht näher auf sie eingegangen werden, und es sei auf die weiterführende Literatur verwiesen (z. B. (5)).

2. Aufbau des Bilanzmessers

Das Gerät ist nach demselben Prinzip aufgebaut wie der Bilanzmesser nach SCHULZE (14); das heißt, es gestattet durch Verwendung zweier voneinander praktisch unabhängiger Meßsysteme außer der Bilanzmessung

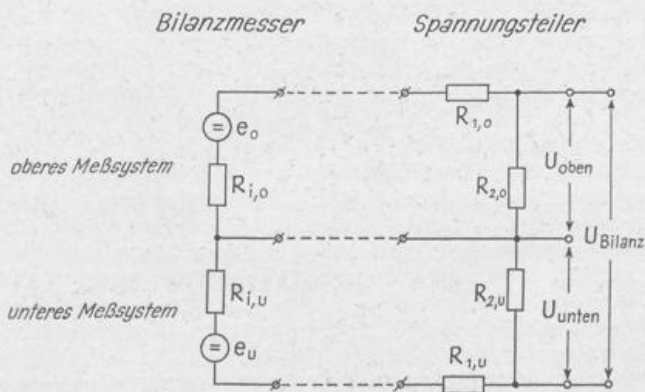


Abb. 2

Elektrische Schaltung des Bilanzmessers

auch eine getrennte Messung der von oben und unten einfallenden Strahlungsströme. Bei dieser Konstruktion können Unsymmetrien des Gerätes, vor allem unterschiedliche Empfindlichkeiten des oberen und unteren Systems, noch nachträglich ausgeglichen werden. Man kann z. B. die Widerstände der Spannungsteiler, die zur Anpassung der Empfindlichkeit der Meßsysteme an das Registriergerät notwendig sind, so wählen, daß gleiche Strahlungsintensitäten auch gleiche Ausschlagsweiten hervorrufen (vergl. Abb. 2). Die empfindlichen Empfängeranteile sind durch halbkugelschalige Hauben aus

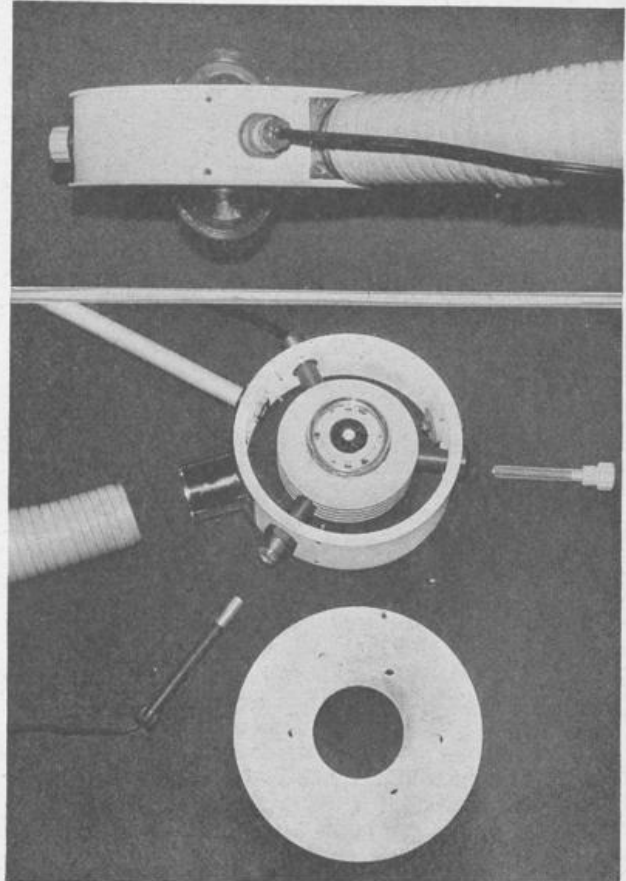


Abb. 3

Photographien des Strahlungsbilanzmessers
oben: Seitenansicht des zusammengebauten Bilanzmessers.
unten: Schräge Aufsicht bei geöffnetem Bilanzmessergehäuse.
Vorne: Belüftungsdeckel, Temperaturfühler
links: Belüftungsschlauch, Haltestab
rechts: Trockenmittelpatrone.

Lupolen-H, einem für alle in Frage kommenden Strahlungen durchlässigen Polyäthylen der BASF, vor Witterungseinflüssen geschützt. Eine Photographie des zur besseren Anschaulichkeit teilweise geöffneten Gerätes ist in Abb. 3 wiedergegeben, einen schematischen Querschnitt durch den eigentlichen Meßkörper zeigt Abb. 4.

Das Kernstück des Gerätes ist ein Zylinder aus Aluminium (100 mm ϕ , 26 mm hoch, etwa 500 g schwer) mit fünf tiefen Kühlrippen in der Mantelfläche (vergl. Abb. 4). Auf die Stirnflächen des Zylinders ist oben und unten je eine Empfängereinheit aufgesetzt, die - durch jeweils zwei Schrauben gehalten - in gutem thermischen Kontakt mit dem Aluminiumzylinder steht. Die Empfängereinheit besteht aus einem geschwärzten Empfangsblech, welches die Strahlung absorbieren soll, einer Thermosäule und einer Thermosäulenhalterung, die mittels Epoxydharz unter Druck aufeinander geklebt sind. Zur Messung der Erwärmung des Empfangsbleches werden Halbleiter-Thermosäulen, „Thermagotrons“ Type TL 0812 der Firma MCP Electronics, Alpertown, England, verwendet. In ihnen sind 48 einzelne Thermolemente

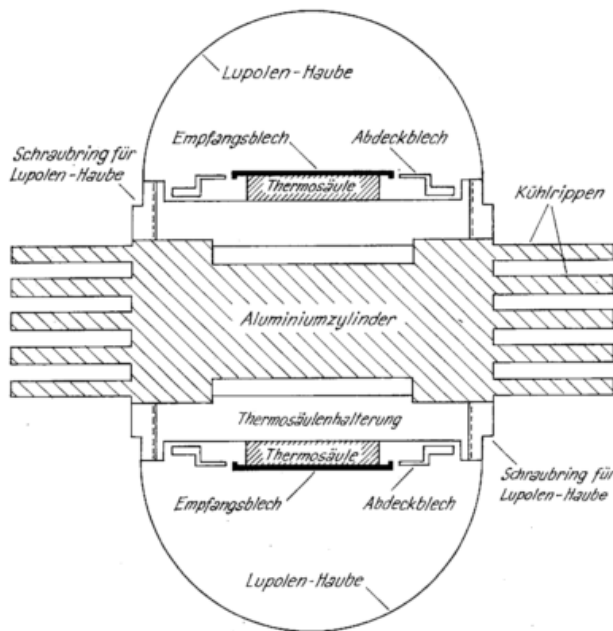


Abb. 4
Schematischer Vertikalschnitt durch den Meßkörper

aus einer Wismutlegierung (Bi-Sn-Sb) flächenförmig zusammengesetzt und durch Kupferbrücken elektrisch hintereinandergeschaltet. Die Thermosäulen sind etwa 22 mm lang, 13 mm breit und 4,2 mm hoch. Ihr elektrischer Widerstand beträgt bei Zimmertemperatur 2 bis 3 Ω (17). Das kreisrunde Empfangsblech (26 mm ϕ , 0,3 mm stark), dessen Rand zur größeren mechanischen Stabilität etwa 0,1 mm umgebördelt ist, und die Thermosäulenhalterung sind aus Aluminium gefertigt (vergl. 3.2.). Da die Metallflächen des Empfangsbleches und der Halterung, die die Thermosäule berühren, die einzelnen Thermoelemente nicht elektrisch kurzschließen dürfen, wurden die entsprechenden Aluminiumoberflächen dünn eloxiert (in einem 7prozentigen Schwefelsäurebad bei Zimmertemperatur mit 12 V Elektrodenspannung während 45 Minuten). Auf diese Weise erhält man eine ausreichende elektrische Isolierung bei gutem Wärmeübergang. Die elektrischen Anschlüsse der Thermosäulen werden durch Abdeckbleche, welche in ihrer Höhe verstellbar sind (vergl. 3.5.), vor Bestrahlung geschützt. Auf jede Thermosäulenhalterung ist schließlich ein Ring aufgeschraubt, auf den die halbkugelschalige Lupolenschutzhaube (Durchmesser ca. 58 mm, Lupolenstärke ca. 0,08 mm) aufgebunden bzw. -geklebt ist.

Dieser ganze Meßkörper ist thermisch isoliert an drei durchbohrten PVC-Stäben im Innern eines Gehäuses aus PVC aufgehängt (vergl. Abb. 3). Ein PVC-Stab enthält die elektrischen Anschlüsse zum Geräteinneren, in den zweiten wird ein Temperaturfühler eingeführt, der die Messung der Gerätetemperatur in einer Bohrung im Zentrum des Aluminiumzylinders ermöglicht, und in den dritten kann eine Patrone mit Trockenmittel (z. B. Silikagel) geschraubt werden, welches durch gebohrte Kanäle im Austausch mit den Lufträumen innerhalb der Lupolenhauben steht und ein Beschlagen des Haubeninneren an kalten Tagen verhindert.

In das PVC-Gehäuse wird aus einem kräftigen Tangentialgebläse (Redmond, C.C.C., St. Thomas, Ontario) über einen flexiblen Kunststoffschlauch ein starker Luftstrom geleitet (Luftmenge ca. 800 l/min). Er umstreicht die Kühlrippen des Meßkörpers und entweicht dann an der Ober- und Unterseite des Gerätes teils durch schmale, ringförmige Schlitze an der Basis der Lupolenhauben, teils durch je 6 Bohrungen (8 mm ϕ) in der oberen und unteren Deckplatte des Gehäuses, die unter verschiedenen Winkeln die Luftströme tangential

an die Lupolenhauben leiten. Die schrägen Bohrungen sind nicht auf die Symmetrieachse des Gerätes gerichtet, sondern weisen etwa 10 mm daran vorbei, so daß auf und über den Hauben noch zusätzlich eine Rotationsbewegung der ausströmenden Luft entsteht. Durch diese Luftführung wird erreicht, daß sich sowohl der Aluminiumkörper des Gerätes als auch möglichst alle Bereiche der Lupolenhauben stets auf Lufttemperatur befinden. Außerdem wird Tau, Regen und Schnee beseitigt.

An dem Bilanzmessergehäuse ist eine Aluminiumstange von 35 cm Länge befestigt, mit der das Gerät an einem Gerüst montiert werden kann. Eine Libelle ermöglicht dabei eine genaue Horizontierung des Gerätes. Der zusammengebaute Bilanzmesser hat bei einem Durchmesser von 170 mm und einer Höhe (ohne Hauben) von 50 mm ein Gewicht von 1,5 kg.

3. Physikalische Beschreibung des Bilanzmessers; Ergebnisse von Messungen an dem Gerät

3.1. Absorptionsvermögen des Empfängers; Durchlässigkeit der Lupolen-Hauben

Die Empfangsbleche der Thermosäulen sind mit Parsons Optical Black Lacquer geschwärzt, einem für Zwecke der Strahlungsabsorption allgemein verwendeten tiefschwarzen matten Lack. Sein integrales Absorptionsvermögen beträgt sowohl für die kurzwellige Strahlung der Sonne und des Himmels als auch für die langwellige Strahlung der Atmosphäre und des Erdbodens 98,5 % (18), (19). Sein Reflexionsfaktor für spiegelnde Reflexion ist nach einer ausführlichen, alle gängigen Schwärzungsmittel vergleichenden Untersuchung von Ramsey (20) für die genannten Spektralbereiche im Mittel kleiner als 0,5 % und überschreitet zwischen 0,4 μm und 40 μm an keiner Stelle den Wert 1,5 %. Das Absorptionsvermögen dieses Lackes ist damit sehr hoch und für die hier interessierenden Wellenlängen außerordentlich gleichmäßig. Auf die letztere Eigenschaft ist bei der Auswahl von Schwärzungen für Strahlungsempfänger der größere Wert zu legen, weil sich ein geringeres Absorptionsvermögen praktisch nur in einer unwesentlichen Verminderung der Empfindlichkeit des Empfängers auswirkt, während eine selektive Absorption zu fehlerhaften Ergebnissen führen kann. Die hervorragenden Eigenschaften von Parsons Black lassen sich allerdings nur bei sehr sorgfältiger Verarbeitung des Lackes erzielen; dazu ist es erforderlich, das sich leicht absetzende Farbpigment kräftig aufzurühren und durchzuschütteln und sowohl die Grundierung als auch den Lack mit einer Farbspritzpistole dünn und gleichmäßig auf die gut präparierte Unterlage aufzubringen.

Die Empfindlichkeit des Empfängers für die einfallenden Strahlungen hängt außer vom Absorptionsvermögen der Empfangsfläche auch von der Transparenz der Lupolenhaube ab (vergl. die theoretischen Erörterungen hierzu im Anhang, Kap. 6.1.). Viele Durchlässigkeitsmessungen am Polyäthylen haben gezeigt, daß die kurzwellige und die langwellige Transparenz verschieden sind. Dies wird begründet mit zwei Absorptionsbanden im langwelligen Bereich bei 6,8 μm und bei 13,8 μm , (vergl. (13), (21), mit unterschiedlichen Reflexionsgraden (kurzwellig 8 %, langwellig 13 %, nach SCHULZE (22)), sowie mit erhöhter Streuung im kurzwelligen Spektralbereich (23). Eigene Messungen an den verwendeten Lupolen-Hauben, die von der Firma Dr. B. Lange, Berlin, bezogen wurden und eine Materialstärke von 0,07–0,08 mm aufweisen, haben eine kurzwellige Durchlässigkeit von $(87 \pm 1) \%$ und eine langwellige Durchlässigkeit von $(77 \pm 1) \%$ ergeben. Dies sind Mittelwerte von Messungen an vier Hauben, die durch Einschalten der Hauben in den Strahlengang vor einem Panzeraktinometer Linke – Feußner gewonnen wurden. Als Strahlungsquelle diente im Kurzwelligen eine 300-W-Wolframfadenlampe, deren langwellige Strahlungs-

anteile durch Glasfilter abgeschnitten wurden; die langwellige Strahlungsquelle war eine geschwärzte Fläche mit einer Strahlungstemperatur von etwa 365° K. Zur Vermeidung einer Erwärmung der Hauben wurden diese durch einen Luftstrom von Zimmertemperatur angeblasen. Vergleichsweise wurde bei einer Haube auch die kurzwellige Transparenz vor einem der beschriebenen Thermosäulenempfänger gemessen. Dabei ergab sich innerhalb der Meßgenauigkeit dieselbe Durchlässigkeit wie vor dem Panzeraktinometer.

Um trotz der unterschiedlichen Transparenz der Hauben die Empfindlichkeiten der Empfänger für kurzwellige und für langwellige Strahlung einander anzugleichen, wurde in der Mitte der Absorptionsfläche ein kreisrundes Gebiet mit weißer Farbe bestrichen (vergl. Abb. 3), welches etwa 16 % der Empfangsfläche ausmacht (Berechnung dieses Wertes im Anhang, Kap. 6.1.). Die weiße Teilfläche setzt das mittlere Absorptionsvermögen der gesamten Empfangsfläche kurzwellig herab (weiße Farbe reflektiert kurzwellige Strahlung), während das langwellige Absorptionsvermögen nur sehr wenig verändert wird (weiße Farbe ist gegenüber langwelliger Strahlung praktisch „schwarz“). Auf diese Weise wird das Produkt aus der Transparenz der Hauben und dem mittleren Absorptionsvermögen der Empfangsflächen im kurz- und langwelligen Bereich gleich. Dann ist, wie die weiteren Ausführungen im Anhang zeigen, die vom Bilanzmesser abgegebene Spannung ein direktes Maß für die Größe der Strahlungsbilanz.

3.2. Temperatur des Gerätekerne

Der vom Kunststoffgehäuse umschlossene Kern des Gerätes ist ein Zylinder aus Aluminium, einem Material von hoher Wärmeleitfähigkeit und hoher spezifischer Wärme bei geringer Dichte*) (vergl. Tab. 2; nach Zeile e

die sonst bei plötzlichen Änderungen der Bestrahlungsstärke oder der Belüftungstemperatur auftreten könnten und zu größeren momentanen Fehlern in den Meßwerten der Strahlungsströme führen würden (vergl. Anhang, Kap. 6.1., wo in den Berechnungen die Gerätetemperatur T_G als zeitlich konstant oder nur sehr langsam veränderlich vorausgesetzt ist).

Die Beobachtung der Gerätetemperatur zeigt, daß sich bei einer sprunghaften Änderung der Belüftungstemperatur der neue Endwert der Gerätetemperatur mit einer Zeitkonstanten von etwa 3-4 Minuten einstellt. Da sich jede Zeitkonstante als ein Produkt $R \cdot C$ eines (Wärme-) Widerstandes und einer (Wärme-)Kapazität darstellen läßt, kann man aus dieser Zeitkonstanten und der bekannten Wärmekapazität des Aluminiumzylinders den Wärmewiderstand R bezüglich des Abtransportes von Wärmeenergie aus dem Zylinder durch die Kühlluft berechnen:

$$R \approx \frac{4 \text{ min}}{100 \text{ cal/grad}} = 0,04 \text{ grad} \cdot \text{min/cal.}$$

Nimmt man als Maximalwert für die in den Zylinder hineinfließende Energiestromdichte $1 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ an, also bei einer Empfangsfläche von $5,31 \text{ cm}^2$ einen Energiestrom von rund 5 cal/min , so kann aus diesen Werten die durch natürliche Bestrahlung maximal mögliche Temperaturerhöhung ΔT_G des Aluminiumzylinders gegenüber der Ventilationsluft abschätzen zu

$$\Delta T_G \approx 5 \text{ cal/min} \times 0,04 \text{ grad} \cdot \text{min/cal} = 0,2 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Aus diesem kleinen Wert ersieht man, daß sich wegen der kräftigen Belüftung des Gerätes auch bei hoher Bestrahlung die Temperatur im Gerätekerne nicht wesentlich verändert und praktisch stets gleich der Lufttemperatur ist.

Tab. 2
Wärmeeigenschaften einiger Gebrauchsmetalle
(nach LINKES Meteorologischem Taschenbuch (24)).

	Einheit	Ag	Cu	Al	Ms	Fe	Ni	
a	Wärmeleitzahl λ	$\frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{grad}}$	1,00	0,94	0,55	0,26	0,21	0,21
b	spez. Wärme c	$\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grad}}$	0,056	0,092	0,214	0,091	0,108	0,107
c	Dichte ρ	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	10,50	8,93	2,70	8,55	7,25	8,90
d	$\frac{\lambda}{c \cdot \rho}$	$\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$	1,70	1,15	0,95	0,33	0,27	0,22
e	$10^3 \cdot \frac{\lambda \cdot c}{\rho}$	$\left(\frac{\text{cal} \cdot \text{cm}}{\text{g} \cdot \text{grad}}\right)^2 \cdot \text{sec}^{-1}$	5,3	9,6	43,6	2,8	3,1	2,5

ist das Produkt aus Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärme, dividiert durch die Dichte, beim Aluminium erheblich größer als bei allen anderen Metallen). Die hohe Wärmekapazität des Gerätekerne von

$C = m \cdot c = 500 \text{ g} \cdot 0,214 \text{ cal/g} \cdot \text{grad} \approx 100 \text{ cal/grad}$ verhindert schnelle Änderungen der Gerätetemperatur,

*) Aluminium ist auch für die Herstellung der Empfangsbleche das günstigste Material. Zwar benötigt man zur Erzielung einer möglichst geringen thermischen Trägheit des Empfängers ein Metall mit kleiner spezifischer Wärme und geringer Dichte bei hoher Wärmeleitfähigkeit (vergl. Anhang 6.2.), so daß nach Tab. 2, Zeile d Silber und Kupfer vorzuziehen wären; aber Aluminium hat diesen Materialien gegenüber den Vorteil, daß man es nach dem Eloxalverfahren mit einer dünnen Oxydschicht zur elektrischen Isolierung der anliegenden Elemente der Thermosäule überziehen kann, während man bei Verwendung der anderen Metalle noch zusätzliche Isoliersubstanzen in den Wärmestrom einschalten müßte.

3.3. Verhalten des Empfängers bei veränderlicher Bestrahlung

Die wichtigste Größe zur Charakterisierung eines Strahlungsmeßgerätes ist neben seiner Strahlungsempfindlichkeit die Trägheit seiner Anzeige bei einer Veränderung der Bestrahlungsstärke. Zu ihrer Bestimmung wurde die Empfängereinheit auf einem Aluminiumzylinder befestigt, der innen hohl und von Wasser durchströmt war, so daß seine Temperatur durch einen temperaturstabilisierten Wasserkreislauf konstant gehalten werden konnte. Der Empfänger wurde intermittierend von einer Projektionslampe bestrahlt; die Belichtungszeiten und -pausen waren gleich lang und lagen jeweils zwischen 5 und 10 Minuten, so daß der Empfänger genügend Zeit hatte, sich jedesmal auf den Endzustand

einzustellen. Ein typischer zeitlicher Verlauf der auf einem Registriergerät beobachteten Ausschläge bei plötzlichem Abschalten der Bestrahlung ist in Abb. 5 halblogarithmisch aufgetragen.

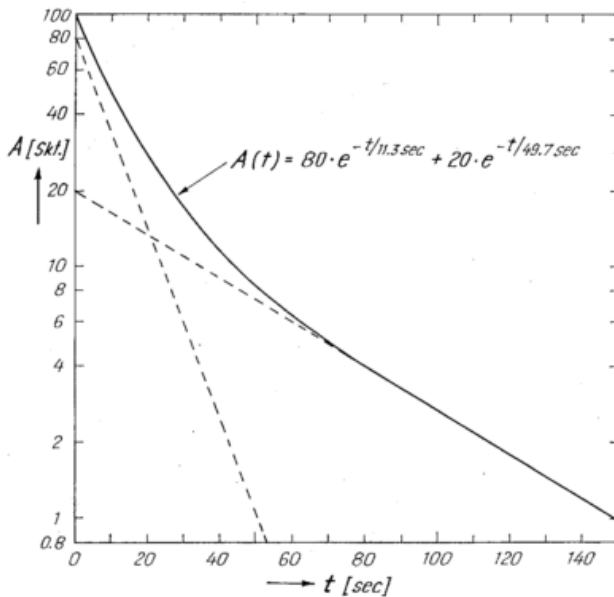


Abb. 5
Abklingen der Meßspannung A (Skt) mit der Zeit t (sec) nach Abschalten der Bestrahlung
gestrichelt: Zusammensetzung der Abklingfunktion aus zwei Exponentialfunktionen.

Bei den Auswertungen der Meßergebnisse ergab sich, daß die Kurven für ansteigende Ausschläge bei Einschalten und diejenigen für abfallende Ausschläge bei Ausschalten der Bestrahlung nach Spiegelung innerhalb der Meßgenauigkeit zur Deckung gebracht werden konnten. Dies bedeutet, daß sowohl die Zeitkonstanten der Exponentialfunktionen als auch die zugehörigen Amplitudenfaktoren, mit denen man die Kurvenverläufe beschreiben kann, beim Ein- und beim Ausschaltvorgang dieselben sind — ein Ergebnis, das mit der im Anhang wiedergegebenen einfachen Theorie der Thermosäulenempfänger übereinstimmt.

Der Vergleich der Kurvenverläufe für eine in üblicher Weise mit einer Lupolenhaube geschützte Empfänger-einheit und für einen ungeschützten Empfänger*) führte im Ergebnis zu gleichartigem zeitlichen Verhalten beider Anordnungen. Von den Lupolenhauben scheint somit kein Einfluß auf die beobachtete Instrumententrägheit auszugehen. Auch von der Stärke der äußeren Ventilation der Hauben ist die Trägheit nicht abhängig. Ein weiterer Vergleich der Anstiegszeiten an einem normal geschwärzten Empfänger und einem Empfänger, der nur eine sehr dünne Schwärzung trug, so daß die Aluminiumunterlage noch sichtbar durchschimmerte, ergab ebenfalls keine merklichen Unterschiede im zeitlichen Verhalten. Hieraus ist zu schließen, daß auch die Stärke der Schwärzungsschicht nicht als kritische Größe in die Zeitkonstante der Empfänger eingeht.

Die Analyse des Kurvenverlaufs von Abb. 5 ergibt, daß das zeitliche Verhalten der Halbleiter-Empfänger mit Aluminiumkappe bei sprunghafter Veränderung der Bestrahlung mit Abweichungen innerhalb weniger Prozent durch einen exponentiellen Ausdruck mit zwei Zeitkonstanten dargestellt werden kann. Dieser lautet für den Abklingvorgang:

$$A(t) = 80 \cdot \exp(-t/11,3 \text{ sec}) + 20 \cdot \exp(-t/49,7 \text{ sec}). \quad [1]$$

*) Bei Messungen am ungeschützten Empfänger muß die Zirkulation der Luft im Labor von den Empfangsflächen ferngehalten werden; außerdem muß die Konvektion der Luft über der durch Strahlungsabsorption erwärmten Empfangsfläche verhindert werden, was am einfachsten durch Kühlung des Empfängers auf einige Grad unterhalb der Zimmertemperatur erreicht wird.

Der erste Summand mit dem größeren Amplitudenfaktor ist nach der einfachen Theorie im Anhang (Kap. 6.2.) als diejenige Größe zu interpretieren, die im wesentlichen durch den Wärmewiderstand und die Wärmekapazität allein der Thermosäule gegeben ist, und deren Zeitkonstante aus den Materialwerten zu $\tau_a = 11$ sec abgeschätzt wird. Die bei den Berechnungen ebenfalls auftretenden Summanden mit wesentlich kleineren Zeitkonstanten und Amplitudenfaktoren sind bei dem hier angewandten graphischen Verfahren zur Bestimmung der Zeitkonstanten und Amplituden innerhalb der Meßgenauigkeit nicht feststellbar. Statt dessen findet man hier jedoch einen Summanden mit 20% Anteil an der Anfangsamplitude und der großen Zeitkonstanten von rund 50 sec, den die einfache Theorie nicht erbringt. Vielfache Messungen, auch solche mit langwelliger Strahlung, bei verschiedenen geometrischen Anordnungen lassen einen Meßfehler von solcher Größe ausgeschlossen erscheinen. Eine Interpretationsmöglichkeit ergibt sich erst dann, wenn man die einfache Theorie, die von konstanten Temperaturverhältnissen innerhalb eines jeden horizontalen Schnittes durch den Empfänger ausgeht, verläßt. Da die bei Bestrahlung sich erwärmende kreisrunde Aluminiumkappe, die auf die Thermosäule aufgeklebt ist, mit ihren Randzonen die rechteckige Thermosäule überragt, kann aus ihr die Wärme nicht gleichmäßig abfließen; dem Wärmestrom aus diesen Randgebieten stellt sich ein zusätzlicher Wärmewiderstand entgegen, was sich mathematisch in einem zusätzlichen Exponentialterm mit vergrößerter Zeitkonstante ausdrückt. Damit würde eine Vergrößerung der Trägheit des Empfängers qualitativ verständlich.

Weiterhin wurde das zeitliche Verhalten der Halbleiterempfänger bei Ein- und Ausschalten der Bestrahlung auch unter einem Luftdruck von nur etwa 10 Torr untersucht. Das Trägheitsverhalten ließ sich wiederum durch die Summe zweier Exponentialausdrücke darstellen; während die Zeitkonstanten praktisch dieselben sind wie bei normalem Luftdruck, weichen die Amplitudenfaktoren beträchtlich von den oben angegebenen ab. Die Abklingfunktion läßt sich gut durch eine zu [1] analoge Beziehung annähern, wenn man für die Amplitudenfaktoren je 50% einsetzt. Der höhere Anteil des Summanden mit der großen Zeitkonstanten weist darauf hin, daß der Empfänger bei sehr niedrigem Luftdruck auf Bestrahlungsänderungen träger reagiert als bei normalem Luftdruck. Eine einfache Deutung für diesen Druckeffekt konnte aus der im Anhang gebrachten einfachen Theorie der Empfänger heraus nicht gegeben werden.

3.4. Temperatur- und Druckabhängigkeit der Empfindlichkeit des Strahlungsempfängers

Von großer Wichtigkeit für den meßtechnischen Einsatz eines Strahlungsbilanzmessers ist die Kenntnis seiner Empfindlichkeit und deren Temperaturabhängigkeit. Obwohl die unten angegebene Meßmethode auch die absolute Größe der Strahlungsempfindlichkeit liefert, dienen die im folgenden mitgeteilten Untersuchungen hauptsächlich der Ermittlung der Temperaturabhängigkeit der von den Empfängern abgegebenen Spannung; auf die eigentliche Bestimmung der Empfindlichkeit wird in Kapitel 4. ausführlich eingegangen, welches sich mit der Eichung von Strahlungsbilanzmessern befaßt.

Zunächst mußte für die Halbleiter-Thermosäulen das Verhältnis von erzeugter Ursprungsspannung zur Temperaturdifferenz zwischen den beiden aktiven Flächen der Thermosäulen in seiner Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurde die Thermosäule mit gutem Wärmekontakt zwischen zwei dünnwandige, außen dünn eloxierte, wasserdurchströmte Gefäße aus Aluminium gebracht. Die Gefäße

waren in den Wasserkreislauf zweier Thermostate eingeschaltet, und es wurden die Wassertemperaturen im Zu- und Ablauf sowie die von der Thermosäule bei Temperaturdifferenz zwischen beiden Gefäßen abgegebene Spannung gemessen. Der Quotient ε aus erzeugter Ursprung und gemessener Temperaturdifferenz ist in Abhängigkeit von der Temperatur T der Thermosäule – dem Mittelwert der Gefäßtemperaturen – in Abb. 6 dargestellt.

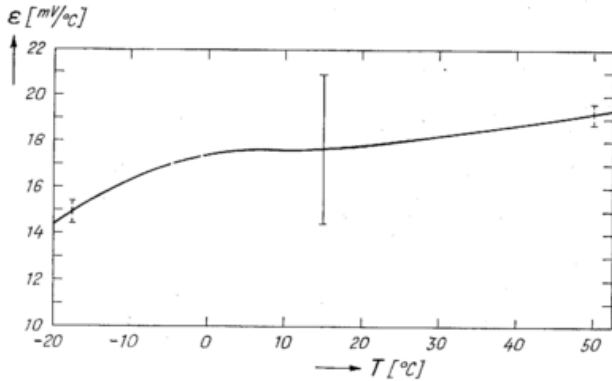


Abb. 6

Ursprung $\varepsilon(T)$ der Halbleiter-Thermosäulen in mV pro $^{\circ}\text{C}$ Temperaturdifferenz als Funktion der Temperatur T
 I Absoluter Fehler eines jeden Punktes der Kurve
 I relativer Fehler der einzelnen Kurvenpunkte untereinander

Die angegebene Methode liefert sicherlich den richtigen Verlauf der Temperaturabhängigkeit von ε ; dagegen kann die absolute Größe von ε noch mit einer Meßunsicherheit behaftet sein, weil die Temperaturdifferenz zwischen den Wassergefäßen nicht mit derjenigen zwischen den beiden empfindlichen Flächen der Thermosäule übereinzustimmen braucht. Dies ist dann der Fall, wenn auch schon im Wasser selbst, in den Aluminium- und in den Eloxalschichten ein Temperaturabfall erfolgt. Die Größe des letzteren ist nicht bekannt, da über die Wärmeleitungseigenschaften von eloxierten Schichten keine Meßwerte vorliegen; der Temperaturabfall in der dünnen Al-Schicht läßt sich abschätzen, und es zeigt sich, daß er wegen der guten Wärmeleitungseigenschaften des Aluminiums vernachlässigt werden kann; der Temperaturabfall im Wasser ist dagegen beträchtlich; er wurde eliminiert, indem in einem weiteren Experiment bei $T = 10^{\circ}\text{C}$ die Temperaturempfindlichkeit ε zwischen zwei gut leitenden Aluminiumstäben gemessen und dabei ein um etwa 30% höherer Wert festgestellt wurde. Daher sind die in Abb. 6 angegebenen Werte von $\varepsilon(T)$ um einen entsprechenden Betrag korrigiert worden. Der noch verbleibende mögliche Fehler wegen eines Temperaturabfalles in den Eloxalschichten ist für die folgenden Überlegungen ohne große Bedeutung, weil auch beim Strahlungsbilanzmesser sich auf jeder Seite der Thermosäule eine dünne Eloxalschicht befindet, und weil darüber hinaus die Temperaturempfindlichkeit der Thermosäule lediglich als Korrekturgröße in die Messung der Strahlungsempfindlichkeit der Empfänger und ihrer Temperaturabhängigkeit eingeht.

Um bei der Bestimmung der Strahlungsempfindlichkeit und ihrer Temperaturabhängigkeit die Meßfehler möglichst klein zu halten, wurde ohne Lupolenhaubenabdeckung der Thermosäulen gemessen, so daß Unsicherheiten in der Strahlungsabsorption und -emission der Hauben und Schwierigkeiten bei ihrer Belüftung (vergl. Kap. 4.2.) ausgeschaltet waren. Man muß insbesondere dafür sorgen, daß bei niedrigen Empfängertemperaturen der Taupunkt der umgebenden Luft nicht unterschritten wird, da sonst die Wärmebilanz der Empfangsfläche durch die entstehende Kondensations- bzw. Verdampfungswärme empfindlich gestört wird. Im einzelnen war der Meßaufbau der folgende:

Die Empfängereinheit war fest auf einen wasserdurchströmten Aluminiumzylinder geschraubt, dessen Temperatur über die Wassertemperatur geregelt und gemessen werden konnte. Sie ragte von unten vollständig in die Öffnung eines übergestülpten doppelwandigen, ebenfalls wasserdurchströmten Strahlungstopfes hinein. Die Innenflächen des Strahlungstopfes waren ebenso wie die Empfangsfläche der Thermosäule mit Parsons Black geschwärzt. Nachdem in den Innenraum ein Trockenmittel (Kalziumchlorid) gebracht worden war, wurde die Anordnung am Boden luftdicht abgeschlossen; so sollte die Luftfeuchtigkeit im Innern herabgesetzt und eine Taubildung an der Thermosäule verhindert werden. Die während jeder Einzelmessung über Thermostaten konstantgehaltenen Wassertemperaturen T_S im Strahlungstopf und T_G im Basiszylinder der Empfängereinheit wurden bei den verschiedenen Meßtemperaturen stets so eingeregelt, daß ihre Differenz jeweils etwa 3 bis 6°C betrug.

Bezeichnet T_A die Temperatur der Empfangsfläche, α_A den Absorptionskoeffizienten des Schwärzungsmittels für langwellige Strahlung und σ die Konstante des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes, so beträgt nach diesem Gesetz die resultierende Bestrahlungsstärke S der Empfangsfläche

$$S = \alpha_A \cdot \sigma \cdot (T_S^4 - T_A^4) \quad [\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}] \quad [2]$$

Die Temperatur T_A der Absorptionsfläche berechnet sich aus den Meßwerten T_G der Basistemperatur des Empfängers und der Thermosäulenspannung E bei Kenntnis der Temperaturempfindlichkeit ε der Thermosäule (vergl. Abb. 6) nach der Beziehung

$$\varepsilon = \frac{E}{T_A - T_G}$$

Die Auswertung zeigt, daß T_A nicht sehr stark von T_G abweicht (setzt man in Gl. [2] T_G anstelle T_A ein, so beträgt der Fehler in dem Zahlenwert der Bestrahlungsstärke S nur etwa 6%). Der Grund dafür, daß die Differenz der Werte T_A und T_G im Verhältnis zur Temperaturdifferenz $T_S - T_G$ so klein ist, liegt in der hohen Wärmeleitfähigkeit der Halbleiter-Thermosäulen.

Aus den Zahlenwerten der Bestrahlungsstärke S und der in der Thermosäule erzeugten Ursprungung E ergibt sich nun sofort die gesuchte, auf die Flächeneinheit der Empfangsfläche bezogene Strahlungsempfindlichkeit $\tilde{\varepsilon}$ des Empfängers:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{E}{S} \quad [\text{V}/\text{cal} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}]$$

Die Größe $\tilde{\varepsilon}$ ist in ihrer Temperaturabhängigkeit in Abb. 7, ausgezogene Kurve, dargestellt. Außerdem ist

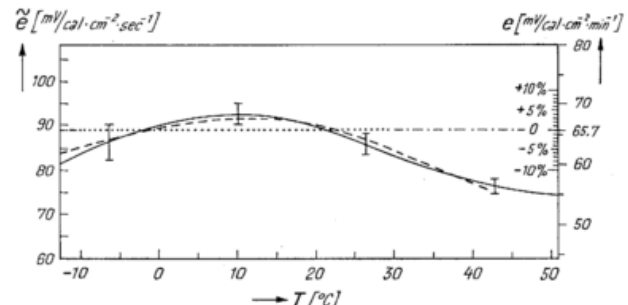


Abb. 7

Empfindlichkeit der Halbleiter-Empfänger in Abhängigkeit von der Temperatur.

- ausgezogene Kurve: linke Skala: gemessene absolute Strahlungsempfindlichkeit ohne Lupolenhaube; rechte Skala: Strahlungsempfindlichkeit mit Lupolenhaube
- gestrichelte Kurve: Relativmessung der Temperaturabhängigkeit eines vollständigen Bilanzmessers.
- strichpunktierte Kurve: mittlere Empfindlichkeit für Temperaturen zwischen -10°C und $+30^{\circ}\text{C}$.
- I mittlerer relativer Fehler jedes Kurvenpunktes

eine Kurve eingezeichnet (gestrichelt), die die Temperaturabhängigkeit der Anzeige eines kompletten Strahlungsbilanzmessers mit normal belüfteten Hauben wiedergibt. Diese zweite Kurve ist nach einem völlig anderen Verfahren gewonnen worden: Der Bilanzmesser wurde in das zeitlich konstante Strahlungsfeld zwischen einer Ultravitalux-Lampe und einer bewegten Wasseroberfläche gehängt und durch Einblasen von unterschiedlich temperierter Luft auf verschiedene Temperaturen gebracht. Gemessen wurde die erzeugte Spannung in Abhängigkeit von der Temperatur im Innern des Bilanzmesserkerns. Da die absolute Größe des Strahlungsstromes nicht bekannt war, kann man lediglich eine relative Aussage über die Temperaturabhängigkeit machen. Zum Vergleich mit der absoluten Messung von $\tilde{\epsilon}(T)$ ist das Ergebnis der Messung so in die Darstellung Abb. 7 eingezeichnet, daß die beiden Kurven möglichst wenig voneinander abweichen. Wie man sieht, stimmt das Temperaturverhalten beider Empfindlichkeiten sehr gut überein.

Für die praktische Arbeit mit Strahlungsbilanzmessern ist es von Vorteil, wenn man die Temperaturabhängigkeit der Geräte durch einfache Schaltungsmaßnahmen wie etwa den Einbau geeigneter temperaturabhängiger Widerstandskombinationen ganz beseitigen oder wenigstens verringern kann (s. z. B. (25)). Das ist bei der hier gefundenen Temperaturcharakteristik mit einem Maximum im mittleren Temperaturbereich mit einfachen Mitteln nicht möglich. Für sehr genaue Messungen der Strahlungsbilanz bleibt nur die gleichzeitige Registrierung der Gerätetemperatur und eine entsprechende Korrektur der Bilanzwerte nach der Kurve von Abb. 7. Für weniger genaue Messungen kann man im Temperaturbereich zwischen -10°C und $+30^{\circ}\text{C}$ mit einer mittleren Empfindlichkeit rechnen (in Abb. 7 die waagerechte punktierte Linie), die bei etwa 0°C und $+20^{\circ}\text{C}$ tatsächlich angenommen wird und die mit einem maximalen Fehler von $+4\%$ (bei $+10^{\circ}\text{C}$) bzw. einem solchen von -6% (bei -10°C und $+30^{\circ}\text{C}$) behaftet ist.

Schließlich wurden die Empfängereinheiten noch auf eine mögliche Luftdruckabhängigkeit ihrer Strahlungsempfindlichkeit untersucht. Zu diesem Zweck wurde ein Empfänger in einem evakuierbaren, mit einer 4 mm starken Glasplatte abgeschlossenen Metallgefäß montiert und von außen mit einer Wolframfadenlampe nach der Wechsellichtmethode bestrahlt. In dieser Anordnung wurden bei 18°C Zimmer- und Gerätetemperatur die Empfindlichkeiten bei Normaldruck und bei etwa 10 Torr Luftdruck miteinander verglichen. Es ergab sich, daß die Empfindlichkeit bei diesem Vorvakuumdruck um $(3,3 \pm 2,2)\%$ unterhalb derjenigen bei Normaldruck liegt. Die Druckabhängigkeit ist damit so gering, daß sie im Bereich der natürlichen Luftdruckschwankungen am Erdboden ohne Einfluß auf die Meßwerte der Strahlungsgrößen ist.

Dies ist ein Ergebnis, das mit den im Anhang wiedergegebenen theoretischen Überlegungen im Einklang steht. Abweichend von dem Verhalten der meisten aus Draht gewickelten Thermosäulen besitzen die hier verwendeten Halbleiter-Thermosäulen eine so hohe Wärmeleitfähigkeit, daß die luftdruckabhängige Wärmeabgabe der Empfangsschicht an die umgebende Luft dagegen zu vernachlässigen ist. Bemerkenswert ist allerdings, daß in diesem Fall bei den niedrigen Drucken eine Abnahme der Empfindlichkeit gefunden wurde, während man – wenn überhaupt – im Vakuum eher eine Zunahme der Empfindlichkeit erwarten würde. Sofern der geringe beobachtete Effekt nicht schon im Bereich der Genauigkeitsangabe der Empfänger liegt, könnte er eventuell durch eine Verminderung der Wärmeleitfähigkeit der relativ lockeren, viele Lufteinschlüsse enthaltenden Schwärzungsschicht bei den niedrigen Drucken hervorgerufen sein; in diesem Falle nämlich würde sich bei Bestrahlung des Empfängers eine etwas höhere

Oberflächentemperatur der schwarzen Schicht und damit auch eine vergrößerte Ausstrahlung derselben einstellen, wodurch an der Thermosäule eine verringerte Spannung erzeugt würde.

3.5. Richtungsabhängigkeit der Empfindlichkeit; Cosinusetz

Bei den Strahlungsmeßgeräten der Geophysik unterscheidet man Instrumente mit kugelförmiger Empfangsfläche, die den totalen, über alle Raumwinkel integrierten Strahlungsstrom messen, und Instrumente mit ebener Empfangsfläche, die bei waagerechter Aufstellung nur die vertikalen Komponenten der Strahlungsströme aufnehmen. Messungen nach dem letztgenannten Prinzip sind überall dort physikalisch sinnvoll, wo die Ein- bzw. Ausstrahlung von ebenen waagerechten Flächen wie etwa des Erdbodens oder einer Wasseroberfläche untersucht werden soll. Eine der Voraussetzungen für eine wirkungsproportionale Messung ist, daß das verwendete Instrument das Lambertsche Cosinusetz möglichst gut erfüllt; das heißt, jede unter einem beliebigen Einfallswinkel γ auf das richtig horizontierte Gerät einfallende Strahlung i_0 muß von diesem mit einer zu $i_0 \cdot \cos \gamma$ proportionalen Meßgröße angezeigt werden.

Die im folgenden mitgeteilten Untersuchungen an den Halbleiter-Empfängern beziehen sich ausschließlich auf die Höhenwinkelabhängigkeit ihrer Empfindlichkeit, also auf die Überprüfung hinsichtlich cosinusgetreuer Anzeige. Eine azimutale Abhängigkeit der Empfindlichkeit, d. h. Abhängigkeit von der Himmelsrichtung, aus der die Strahlung einfällt, kann bei den hier beschriebenen Empfängern wegen ihrer zur senkrechten Mittelachse rotationssymmetrischen Konstruktion ausgeschlossen werden.

Die Empfängereinheit war in vertikaler Lage auf einem hohlen Aluminiumzylinder montiert, der, an einen Thermostaten angeschlossen, von Wasser genau bekannter und konstantgehaltener Temperatur durchströmt wurde. Der Zylinder wiederum war auf einem um seine vertikale Achse drehbaren Drehtisch mit Winkелеinteilung so befestigt, daß der vertikale Durchmesser der Empfangsfläche mit der Drehachse zusammenfiel. Diese Anordnung wurde deshalb gewählt, weil bei ihr die Lage der Thermosäule zur Richtung der Schwerkraft bei jeder Winkelstellung dieselbe bleibt, und damit eine etwa vorhandene Lageabhängigkeit der Empfindlichkeit, wie sie bei anderen Strahlungsempfängern mit geringerer Wärmeableitung beobachtet wird (s. z. B. (26)), sich nicht störend auswirken kann. Der ganze Meßaufbau war allseitig im Abstand von 25–40 cm von schwarzen Wänden umgeben, die durch Anblasen mit Luft auf Zimmertemperatur gehalten wurden. Ein konstant laufender Motor drehte den Winkeltisch mit dem Empfänger langsam in ein paralleles Lichtbündel und wieder heraus. Ein Linienschreiber, der an den Empfänger angeschlossen war, zeichnete dabei selbsttätig die erwartete cosinusartige Registrierkurve auf. Bei der Auswertung wurde die Richtung für senkrechten Strahlungseinfall ($\gamma = 0^{\circ}$) auf dem Registrierpapier so festgelegt, daß aufsteigender und absteigender Teil der Kurve symmetrisch zu ihr lagen; die anderen Winkel waren dann durch die Zuordnung zwischen Papiergeschwindigkeit des Registrierstreifens und Winkelgeschwindigkeit des Drehtisches bestimmt.

Es wurden zwei Meßreihen durchgeführt: eine mit völlig ungeschützter Empfangsfläche, und eine zweite in normaler Anordnung mit einer Lupolenhaube, welche zur Konstanthaltung ihrer Temperatur kräftig belüftet wurde. Um bei der ersten Meßreihe Störungen durch Konvektion der Luft (kenntlich an unruhigen Registrierkurven) zu verhindern, war die Temperatur der Empfängereinheit wiederum um einige Grad C gegenüber der Lufttemperatur herabgesetzt.

Bei der Auswertung der Meßergebnisse ergab sich, daß die Höhendifferenz δ zwischen dem geschwärzten Empfangsblech und der Abdeckblende, die dieses Empfangsblech kreisförmig umgibt, in typischer Weise in die Größe der Abweichungen der Empfängercharakteristik vom idealen Cosinusetz eingeht. Die Höhendifferenz δ wurde daher als Parameter in die Messungen eingeführt, und die Höhenwinkelabhängigkeiten für verschiedene Parameter δ ausgemessen. Die Auswertung erfolgte in der Weise, daß zu jeder gemessenen Kurve diejenige ideale Cosinuskurve gesucht wurde, für die die Summe der relativen quadratischen Abweichungen zwischen Meßkurve und Idealkurve bei den Winkeln $\gamma = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 80^\circ, 85^\circ$ ein Minimum wurde. Als größter Einfallswinkel wurde noch $\gamma = 85^\circ$ berücksichtigt, weil bei noch flacherem Einfall die Meßwerte zu klein und damit relativ zu ungenau geworden wären (selbst $\cos 85^\circ$ beträgt nur noch 0,087). Die in den folgenden Kurven aufgetragenen Werte sind die aus jeweils mindestens drei Messungen durch Mittelung gebildeten relativen Abweichungen der gemessenen von den idealen Ausschlägen. Ist von einer über alle Einfallswinkel gemittelten relativen Abweichung die Rede, so wurde sie aus den Abweichungen für die einzelnen Winkel durch Bildung der mittleren quadratischen Abweichung gewonnen.

Für den Empfänger ohne Lupolenhaube ist in Tab. 3 die über alle Höhenwinkel gemittelte Abweichung $\bar{\Delta}$ der gemessenen von den idealen Werten in Abhängigkeit von der Höhendifferenz δ zusammengestellt. Ein ausge-

Tab. 3

Mittlere relative Abweichung $\bar{\Delta}$ vom ideal cosinusgerechten Verhalten beim ungeschützten Empfänger für verschiedene Höhendifferenzen δ .

δ [mm]	+1,5	+1,0	+0,5	+0,4	+0,25	0,0
$\bar{\Delta}$ [%]	16,8	12,5	6,1	4,2	1,8	3,9

prägtes Minimum der Abweichungen vom idealen Cosinusetz wurde hiernach in dem Fall gefunden, bei dem das Empfangsblech der Thermosäule das umgebende Niveau um 0,25 mm überragt. Die Winkelabhängigkeit der Abweichungen ist für diesen Fall in Abb. 8, Teilbild a, aufgetragen.

Dies Ergebnis, wonach die beste Annäherung an die Idealwerte bei geringfügig erhöhter Empfangsfläche zu erzielen ist, ist qualitativ leicht verständlich. Zu den großen Einfallswinkeln hin nimmt der Reflexionsfaktor der Schwärzungsschicht in geringem Maße zu, also die Empfindlichkeit des Empfängers ein wenig ab. Diese Verminderung der Empfindlichkeit wird jedoch bei überstehendem Empfangsblech teilweise durch eine Vergrößerung der Empfangsfläche kompensiert, weil in diesem Falle zu den großen Einfallswinkeln hin in wachsendem Maße auch Teile des umgebördelten Randes des Empfangsbleches bestrahlt werden. So ist es zu verstehen, daß auch bei „streifendem“ Einfall ($\gamma = 90^\circ$) noch eine - wenn auch geringe - Strahlungsintensität registriert wird, was bei niveaugleicher Empfangsfläche nicht der Fall ist.

Das Resultat der entsprechenden Messungen am lupolengeschützten Empfänger, welches in einzelnen in Abb. 8, b-h, dargestellt ist, zeigt ein ähnliches Verhalten in seiner Abhängigkeit von der Höhendifferenz δ ; jedoch ist das Minimum der Abweichungen vom Idealfall hier nicht so deutlich ausgeprägt. Die Höhendifferenz $\delta = 0,17$ mm ist als die günstigste anzusehen, aber auch bei $\delta = -0,04$ mm und bei $\delta = -0,26$ mm sind die Abweichungen von der Idealkurve nicht sehr viel größer. Es ist bemerkenswert, daß bei einer unter dem übrigen Höhenniveau stehenden Empfangsfläche selbst bei den größten Einfallswinkeln ($\gamma \approx 90^\circ$) noch positive Regi-

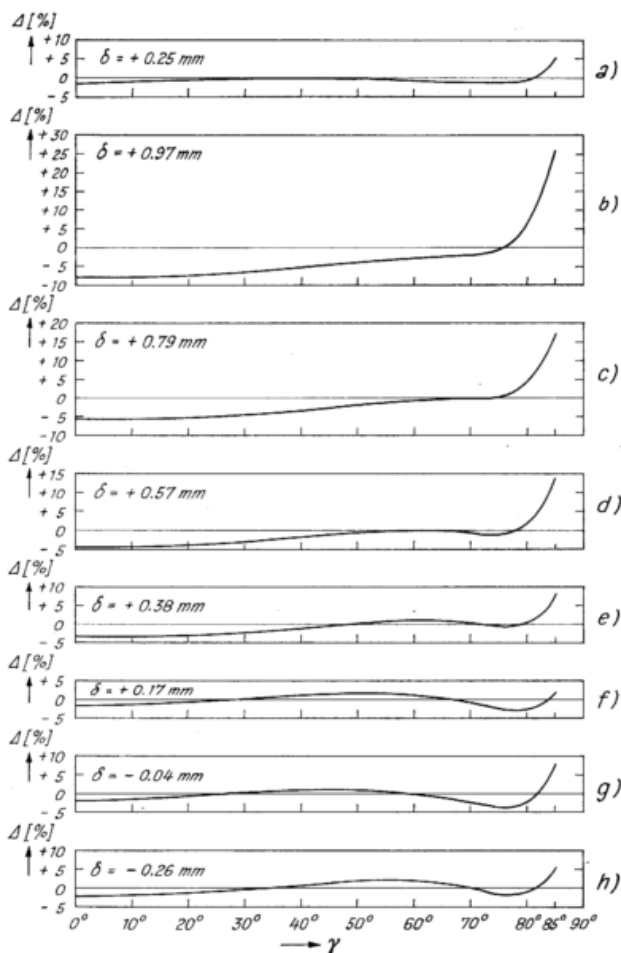


Abb. 8

Relative Abweichung Δ der Meßwerte vom Cosinusetz in Abhängigkeit vom Einfallswinkel γ für verschiedene Niveauunterschiede δ .

Teilbild a: ohne Lupolen-Haube
Teilbilder b-h: mit Lupolen-Haube

strierwerte beobachtet werden. Dieser Effekt ist auf die Streuung der sichtbaren Strahlung in der Lupolen-Halbkugelschale (23) zurückzuführen. Sein Einfluß macht sich besonders bei den großen Einfallswinkeln bemerkbar und wirkt sich qualitativ ähnlich aus wie eine überstehende Empfangsfläche.

War bei den Untersuchungen ohne Lupolenhaube die günstigste Angleichung an das ideal cosinusgerechte Verhalten der Empfängercharakteristik bei einer Höhendifferenz von $\delta = 0,25$ mm mit einer quadratisch über alle Höhenwinkel gemittelten Abweichung von $\bar{\Delta} = 1,8\%$ möglich, so läßt sich beim lupolengeschützten Empfänger eine entsprechende geringste Abweichung bei $\delta = 0,17$ mm mit $\bar{\Delta} = 2,4\%$ erreichen. Es ist also in jedem Fall zweckmäßig, die Empfangsfläche der Thermosäule um etwa 0,2 mm gegenüber dem sonstigen Niveau von Blenden, Abdeckblechen usw. anzuheben, um die geringe Richtungsabhängigkeit der Reflexion der Absorptionsschicht teilweise auszugleichen.

4. Eichung von Strahlungsbilanzmessern

Es empfiehlt sich, bei jedem Strahlungsbilanzmesser eine getrennte Eichung im kurzwelligen und im langwelligen Spektralbereich vorzunehmen, weil man insbesondere wegen der unterschiedlichen Durchlässigkeit der Lupolen-Hauben in den beiden Bereichen von vornherein mit der Möglichkeit unterschiedlicher Eichfaktoren rechnen muß. Bei den in dieser Arbeit beschriebenen Strahlungsbilanzmessern ist es darüber hinaus zweckmäßig, die obere und die untere Empfängereinheit

getrennt zu eichen; Unterschiede in den Eichfaktoren kann man dann durch geeignete Abschwächungswiderstände in den Meßleitungen (vergl. Abb. 2) ausgleichen.

4.1. Eichung im Kurzwelligen

Die Eichung im Kurzwelligen erfolgt, wie allgemein üblich, „vor Sonne“. Das Verfahren besteht darin, an einem klaren, wolkenlosen Tag die durch die direkte Sonnenstrahlung im Empfänger erzeugte Spannung zu vergleichen mit der Anzeige eines geeichten Pyrheliometers, z. B. eines Panzeraktinometers nach Linke-Feußner. Bei der Eichung ist der Einfluß der neben der direkten Sonnenstrahlung auch noch auf den Empfänger wirkenden übrigen Strahlungen (Himmelsstrahlung, atmosphärische Gegenstrahlung, Ausstrahlung der Empfangsfläche) auszuschalten. Man geht so vor, daß man die direkte Sonnenstrahlung mit einer Blende, deren Größe und Abstand mit dem Öffnungswinkel des Vergleichspyrheliometers korrespondiert, abwechselnd abschattet und wieder auf den Empfänger fallen läßt; man setzt dann die entsprechenden, vom Registriergerät angezeigten Ausschlagsdifferenzen in Relation zur Stärke der Sonnenstrahlung. Der Rhythmus von Abschattung und Bestrahlung richtet sich nach der Trägheit des Empfängers; bei den in dieser Arbeit beschriebenen Halbleiterempfängern hat er jeweils 3 Minuten betragen. Mehrfach wiederholte Eichungen desselben Empfängers nach dieser Methode bei verschiedenen Sonnenhöhen und Empfängertemperaturen ergaben einen Mittelwert der kurzwelligen Empfindlichkeit von $(66,0 \pm 2,4)$ mV/cal · cm⁻² · min⁻¹. Während die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Sonnenhöhe wegen ihres geringen Einflusses (vergl. Abb. 8, f) bei der Bestimmung dieses Wertes nicht berücksichtigt zu werden brauchte, wurde der Einfluß der verschiedenen Gerätetemperaturen beachtet und die jeweiligen gemessenen Empfindlichkeiten nach Abb. 7 auf eine mittlere, bei etwa 0°C und 20°C tatsächlich angenommene Empfindlichkeit umgerechnet.

Die geringe Zahl von „Strahlungstagen“, an denen eine ungestörte Eichung vor Sonne möglich ist, erlaubte nicht, mehrere Empfängereinheiten direkt an das geeichte Aktinometer anzuschließen. Um dennoch Aussagen über die kurzwellige Empfindlichkeit von verschiedenen Exemplaren von Halbleiter-Empfängern machen zu können, wurden im Labor unter der Strahlung einer 450-W-Xenon-Hochdrucklampe, deren Spektralverteilung derjenigen der Sonne ähnlich ist, fünf weitere Empfänger untereinander und mit dem direkt geeichten Empfänger bezüglich ihrer Empfindlichkeit verglichen. Der über diese sechs Empfänger gemittelte Wert der kurzwelligen Empfindlichkeit ergab sich zu 65,5 mV/cal · cm⁻² · min⁻¹. Die mittlere Abweichung der Empfindlichkeit der einzelnen Empfänger von diesem Mittelwert betrug $\pm 6,7\%$, die maximal beobachtete Abweichung für ein Exemplar lag bei 12,1%. Die Empfindlichkeitsverhältnisse der Empfänger untereinander waren auf $\pm 1,6\%$ reproduzierbar.

4.2. Eichung im Langwelligen

Die Eichung im Langwelligen ist beträchtlich aufwendiger und mit größeren Fehlermöglichkeiten behaftet als im Kurzwelligen, weil für den langwelligen Spektralbereich keine Strahlungsquellen vorhanden sind, die bei der gewünschten spektralen Zusammensetzung eine gebündelte, genügend intensive, zeitlich konstante Eichstrahlung liefern könnten. Man ist hier vielmehr auf die diffuse Schwarzkörperstrahlung angewiesen, die von einem innen geschwärzten, über den Empfänger gestülpten Hohlkörper ausgeht, der mit Strahlungstemperaturen etwa der am Erdboden vorkommenden Größenordnung strahlt. Die Hauptschwierigkeit bei diesem Verfahren besteht darin, daß man die Lupolen-Hauben

der Empfänger kräftig belüften muß. Sonst würden sie sich bei der Absorption von Strahlung in unkontrollierbarer Weise erwärmen und dann ihrerseits eine langwellige Strahlung aussenden, die die Eichung erheblich stören würde. Ein starker, zur Kühlung gegen die Haube geblasener Luftstrom würde aber auch die strahlende schwarze Oberfläche des Hohlkörpers treffen und deren Temperatur in einem Maße verändern, über das man keine genauen Aussagen machen kann; die Intensität der Eichstrahlung wäre so nicht genügend bekannt.

Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes wurde ein Experiment durchgeführt, welches wenigstens qualitativ die Veränderung der Oberflächentemperatur eines Strahlers beim Belüften zeigen sollte. Auf die innere, mit Parsons Black geschwärzte Strahlungsoberfläche eines doppelwandigen, von Wasser bekannter konstanter Temperatur durchströmten Eichgefäßes wurden an mehreren Stellen kleine Thermoelemente mit Epoxydharz aufgeklebt und dann ebenfalls geschwärzt. Da das Klebemittel in die Schwärzungsschicht eindringt und eine beträchtlich größere Wärmeleitfähigkeit als diese besitzt, entspricht die mit den Thermoelementen gemessene Temperatur sicher nicht genau der Oberflächentemperatur der Schwärzung; sie ist vielmehr höher als diese, wenn der Topf aufgrund seiner hohen Temperatur ausstrahlt, und niedriger im umgekehrten Fall. Aber dennoch geben diese Temperaturfühler einen gewissen Einblick in die Abkühlvorgänge innerhalb einer ausstrahlenden Oberfläche.

Im einzelnen ergaben die Untersuchungen beim Eichen eines Bilanzmessers, daß sich allein durch die Ausstrahlung der wärmeren schwarzen Schicht gegen den kühleren Bilanzmesser schon die Temperatur der schwarzen Oberfläche erniedrigt; bei einer Wassertemperatur im Strahlungstopf von 53°C und einer Temperatur des Bilanzmessers von 25°C zeigten die Temperaturfühler eine nur durch Ausstrahlung bedingte mittlere Temperaturabnahme um 1,4°C an. Bei seitlicher Belüftung der Anordnung durch einen 1 cm breiten Spalt zwischen dem Strahlungstopf und dem Bilanzmesser beobachtet man eine weitere Temperaturabnahme; sie betrug bei der sehr schwachen Belüftung mit etwa 1 m/sec Windgeschwindigkeit 2,1°C, bei einem Wind von etwa 3 m/sec bereits 3,6°C. Diese Ergebnisse zeigen, daß eine Eichung mit einem innen geschwärzten Eichtopf bei Belüftung des Meßgerätes nicht zu zuverlässigen Ergebnissen führen kann, zumal die in dem Experiment angewandten Windgeschwindigkeiten noch verhältnismäßig klein waren und zu einer vollständigen Kühlung der Lupolenhauben nicht ausreichen dürften.

Die Schwierigkeiten bei der genannten IR-Eichmethode beruhen auf einer zu geringen Wärmeleitfähigkeit der Schwärzungsschicht. Eine Verbesserung des Verfahrens ist daher durch Heranziehung anderer „schwarzer“ Stoffe mit größerem Wärmeleitvermögen zu erwarten. SCHIEDRUP - PAULSEN (27) hat in diesem Zusammenhang ein Eichverfahren entwickelt, bei dem ein ausgehöhlter Eisblock als schwarzer Strahler benutzt wird. Durch Berührung mit der wärmeren Luft schmilzt die oberste Eisschicht, so daß der Hohlraum stets mit einer dünnen Wasserschicht überzogen ist. Da Wasser in dem in Frage kommenden Spektralbereich annähernd wie ein schwarzer Körper ausstrahlt und die Oberflächentemperatur wegen der vergleichsweise guten Wärmeleitung nicht stark von der Schmelztemperatur des Eises abweichen sollte, hat man damit einen Eichstrahler von recht gut bekannter Strahlungstemperatur. Jedoch ist die Handhabung des schmelzenden Eises umständlich, und man kann nur mit einer einzigen Strahlungstemperatur eichen.

Ein anderes Eichverfahren geht direkt von einer ebenen Wasseroberfläche als „schwarzer Strahlungsquelle“ aus (28). Eine Modifizierung dieses Verfahrens ist das

nachfolgend beschriebene. Man läßt einen wassergefüllten Topf von 35 cm Durchmesser mit rund 80 U/min um seine vertikale Symmetrieachse rotieren. In das entstehende Rotationsparaboloid der Wasseroberfläche wird die untere Hälfte des Strahlungsbilanzmessers so hineingehängt, daß der Empfänger halbraumförmig von Wasser umgeben ist. Der Wasservorrat des Rotationsgefäßes ist an den Kreislauf eines Thermostaten angeschlossen; der Abfluß erfolgt durch ein Rohr in der Mittelachse des Topfes, der Zufluß durch 13 Düsen, die auf einem Radius des Topfes verteilt sind und ihr Wasser unter einem kleinen Winkel in die Rotationsoberfläche hineinspritzen.

Diese Art der Wasserzufuhr bewirkt, daß die strahlende Wasseroberfläche ständig durchbrochen und durchmischt wird. Es kann daher nicht zu einer merklichen Abkühlung der obersten Wasserschicht kommen, wie sie sonst für eine stehende oder nur schwach bewegte Wasseroberfläche vor allem im Ozean, aber auch im Labor beobachtet wird (s. z. B. (29)). Bei einer natürlichen Meeresoberfläche rechnet man mit einer Abkühlung der obersten Schicht um $0,6^{\circ}\text{C}$ bis $1,7^{\circ}\text{C}$, abhängig von den Temperatur-, Wind- und Feuchtigkeitsverhältnissen. EWING und MC ALISTER (30) haben gezeigt, daß die unter bestimmten Bedingungen gemessene Temperaturabnahme der Oberfläche um $0,6^{\circ}\text{C}$ gegenüber der Wassertemperatur in 15 cm Tiefe bei kräftiger Durchwirbelung des Wassers sofort verschwindet, sich aber bereits 12 sec nach Ende der Durchmischung wieder voll ausgebildet hat. Nach diesem Ergebnis kann man annehmen, daß die Wasseroberfläche des mit 80 Umdrehungen in der Minute umlaufenden Rotationstopfes durch das Einspritzen des Wassers genügend häufig durchbrochen und verwirbelt wird.

Als Temperatur der strahlenden Wasseroberfläche wird der Mittelwert aus Zufluß- und Abflußtemperatur genommen, die, wie die Messungen ergeben, bei genügend hohem Wasserdurchfluß (etwa 11 l/min) nicht wesentlich voneinander abweichen. Die Größe des Emissionskoeffizienten des Wassers wird mit $\alpha = 0,96$ angesetzt. Dies ist ein Wert, der von BOUDREAU (29) als „Mittelwert“ über die von verschiedenen Autoren gemessenen Emissionskoeffizienten angegeben wird. Neuere Arbeiten von BUETTNER und KERN (19) sowie CHARNELL (31) rechnen im Bereich zwischen $8\ \mu\text{m}$ und $12\ \mu\text{m}$ Wellenlänge zwar mit einem noch etwas höheren α ; jedoch ist dabei zu beachten, daß die Emission des Wassers an den Enden des hier betrachteten infraroten Spektralbereiches geringfügig abfällt und auch bei nichtsenkrechter Ausstrahlung, wie sie durch die paraboloidförmige Wasseroberfläche gegeben ist, etwas geringer ist, so daß für die Auswertung der Messungen am rotierenden Wasserstrahlungstopf ein Wert von $\alpha = 0,96$ als durchaus gerechtfertigt erscheint.

Bei einer genauen Bestimmung der auf den Bilanzmesser fallenden Strahlung muß man noch die Absorption und Wiederausstrahlung in der wasserdampfhaltigen Atmosphäre zwischen der Wasseroberfläche und der Lupolenhaube berücksichtigen. Geht man z. B. von einer Luft- bzw. Gerätetemperatur von 22°C und einer relativen Feuchte von 80 % in der Zwischenschicht mit einer mittleren Breite von 8 cm aus, so errechnet sich bei einer Strahlungstemperatur der Wasseroberfläche von 37°C ein Strahlungsverlust von 1,9 %, bei einer Strahlungstemperatur von 47°C ein solcher von 2,3 % der ohne Absorption bestimmten Empfindlichkeit (Absorptionskoeffizienten des Wasserdampfes aus LINKES Meteorologischem Taschenbuch (24)). Die Korrektur wegen der Strahlungsabsorption im Wasserdampf ist also für Temperaturdifferenzen bis zu 25°C zwischen Strahler und Bilanzmesser klein, und zu ihrer Berücksichtigung innerhalb der Meßgenauigkeit genügt eine Abschätzung.

Ein Beispiel einer Eichung nach der beschriebenen Wasserrotationsmethode ist in Abb. 9 wiedergegeben.

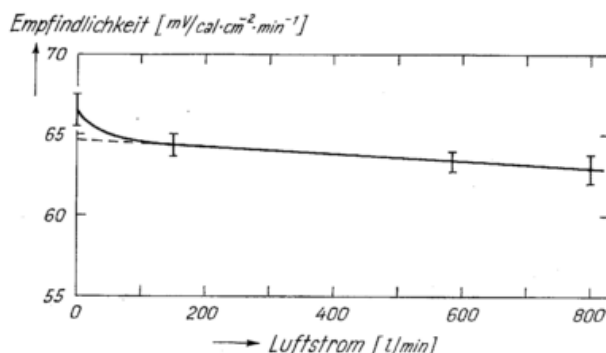


Abb. 9

Langwellige Empfindlichkeit eines Empfängers nach der Rotationswassermethode in Abhängigkeit von der Belüftungsstärke

Dort ist die bei einer Gerätetemperatur von 22°C und bei Wassertemperaturen von 37°C bzw. 47°C bestimmte Empfindlichkeit eines Empfängers aufgetragen in Abhängigkeit von der durch den Bilanzmesser geblasenen Luftmenge; die Einzelmeßwerte stimmen für beide Strahlungstemperaturen innerhalb der beobachteten Streuungen gut überein und sind daher in Abb. 9 auch nicht getrennt markiert.

Die Kurve zeigt eine geringe Abhängigkeit der nach der beschriebenen IR-Eichmethode bestimmten Empfindlichkeit von der Stärke der Belüftung. Ihr Verlauf wird so interpretiert, daß der gekrümmte Teil bei schwacher Belüftung den Abkühlereffekt der Lupolenhaube beschreibt. Erst bei einer Belüftungsstärke von etwa 100 bis 150 l/min (entsprechend etwa 5 m/sec Windgeschwindigkeit an der Haube) wird die Haube genügend ventiliert, so daß eine weitere Abkühlung bei stärkerer Belüftung nicht mehr erfolgt. Der weitere lineare Abfall der Empfindlichkeit wird dahingehend interpretiert, daß er durch eine geringe Abkühlung der Wasseroberfläche vorgetäuscht wird, die trotz der ständigen Durchwirbelung der Wasseroberfläche bei der starken Ventilation nicht vollkommen vermieden werden kann. Diese Oberflächenabkühlung durch Ventilation erfolgt in einer so dünnen Wasserschicht, daß sie sich auf die gemessene Abflußtemperatur des Wassers nicht auswirkt. Dennoch kann sie die Ausstrahlung beeinflussen, da bereits etwa 99 % der Strahlungsintensität aus der obersten, nur 0,1 mm dicken Wasserschicht stammen (s. z. B. (29)). Man kann die Beeinflussung durch diesen Effekt ausschalten, indem man den geraden Kurventeil auf die Ventilation Null extrapoliert. Dann erhält man als Empfindlichkeit des betrachteten Empfängers im langwelligen Bereich $64,7\ \text{mV/cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ bei einer Gerätetemperatur von 22°C , was nach Abb. 7 einer mittleren langwelligen Empfindlichkeit von $65,3\ \text{mV/cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ entspricht.

Aus der kurzwelligen Empfindlichkeit des betrachteten Halbleiter-Empfängers von $66,0\ \text{mV/cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ und dem langwelligen Wert von $65,3\ \text{mV/cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ bestimmt sich eine mittlere Empfindlichkeit von $65,7\ \text{mV/cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$; von dieser Größe weichen der kurz- und der langwellige Einzelwert um weniger als 1 % ab. Die mittlere Streuung betrug bei der kurzwelligen Eichung $\pm 3,6\%$. Im Langwelligen liegt sie zwar wesentlich niedriger, dafür sind aber hier vor allem bei der Festlegung des mittleren Absorptionskoeffizienten des Wassers und der Absorption im Wasserdampf gewisse Unsicherheiten enthalten, die maximal 2 - 3 % erreichen könnten. Insgesamt kann daher bei einer vorsichtigen Abschätzung aller möglichen Fehlerquellen davon ausgegangen werden, daß die mittlere Empfindlichkeit des Empfängers von rund $66\ \text{mV/cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ keine größeren Fehler als höchstens 4 - 5 % aufweist.

5. Ein Gerät zur Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung

Zur vollständigen Erfassung des Strahlungsklimas eines Ortes ist neben der Registrierung der Strahlungsbilanz und der kurzwelligen Strahlungsströme auch die fortlaufende Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung erforderlich, einer langwelligen Strahlung, die vor allem von den Wasser- und Kohlendioxidmolekülen der Erdatmosphäre ausgesandt wird und deren Intensität von der Wasserdampf- und Kohlendioxidkonzentration, vom Vorhandensein von Wolken oder Dunst sowie von der vertikalen Temperaturverteilung in der Atmosphäre abhängt. Diese langwellige Strahlung, die mit den Sinnesorganen direkt nicht wahrgenommen werden kann, trägt ganz erheblich zur Strahlungsbilanz am Erdboden bei und hat daher für das irdische Leben eine beträchtliche Bedeutung. Die Höhe ihrer sowohl tagsüber wie nachts vorhandenen Intensität führt man sich am besten durch einen Zahlenvergleich vor Augen; so ist z. B. in Hamburg die durch atmosphärische Gegenstrahlung zur Erdoberfläche transportierte Energiemenge im Jahresmittel etwa dreimal so groß wie die von der direkten Sonnen- und Himmelsstrahlung zugeführte Energiemenge (nach Tab. 1, Zeile a; vergl. auch Abb. 1).

Obwohl ihre mittlere Intensität mit 0,4 bis 0,5 cal/cm² · min (vergl. Tab. 1) eine für die meteorologische Strahlungsmessung leicht zugängliche Größenordnung besitzt, ist ihre Messung doch umständlich und vielfach recht ungenau. Dies hat zwei Gründe; zum einen strahlt jeder infrarotempfindliche Strahlungsmesser selbst wieder, so daß stets nur eine Differenz von zwei langwelligen Strahlungsströmen gemessen wird und die Ausstrahlungstemperatur der Empfangsfläche empfindlich in die Messungen eingeht; zum anderen empfängt ein infrarotempfindlicher Strahlungsempfänger bei Tage auch die kurzwellige Strahlung der Sonne und des Himmels, so daß die Messung der langwelligen Strahlungen stark beeinträchtigt wird. Nur durch diese Schwierigkeiten und durch die Möglichkeit, ihre mittlere Intensität auch aus den Zustandsgrößen der Atmosphäre unter Benutzung der bekannten Strahlungsdiagramme (32), (33), (34) berechnen zu können, ist es zu erklären, daß eine fortlaufende Registrierung der atmosphärischen Gegenstrahlung nur an sehr wenigen Orten auf der Erde durchgeführt wird.

Die meßtechnische Bestimmung der atmosphärischen Gegenstrahlung geschieht häufig durch gleichzeitige Registrierung der von oben einfallenden Strahlungen mit zwei verschiedenen Instrumenten, von denen das eine kurz- und langwellig empfindlich ist und das zweite nur die kurzwelligen Strahlungen empfängt. Durch Subtraktion beider Angaben ermittelt man dann den effektiven langwelligen Strahlungsstrom, d. h. die Differenz zwischen langwelliger Ein- und Ausstrahlung, aus der man bei Kenntnis der Ausstrahlungstemperatur schließlich die einfallende atmosphärische Gegenstrahlung berechnen kann. Dies Verfahren ist umständlich und ziemlich ungenau, vor allem dann, wenn die Zahlenwerte der voneinander zu subtrahierenden Größen etwa gleich sind; in diesen Fällen nämlich werden die auf die Größe der atmosphärischen Gegenstrahlung bezogenen relativen Meßfehler besonders groß. Aus den Zahlenwerten des Meteorologischen Observatoriums Hamburg (3) ergibt sich, daß bei einer angenommenen Meßunsicherheit von $\pm 5\%$ für jeden der beiden Empfänger der nach der genannten Methode bestimmte Wert der atmosphärischen Gegenstrahlung für einzelne Sommerstunden Fehler bis zu $\pm 22\%$ aufweist.

Es war daher das Ziel, ein neues Gerät zur Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung zu entwerfen und zu bauen, welches mit einem einzigen Strahlungsempfänger einen Teil der angesprochenen Schwierigkeiten vermeidet. Außerdem sollte es eine direkte Registrie-

rung der Meßwerte ohne rechnerische Zwischenschritte ermöglichen. Das neue Gerät wurde aus der oberen Hälfte des in den vorstehenden Kapiteln beschriebenen Strahlungsbilanzmessers mit Halbleiter-Thermosäulen entwickelt. Die wichtigsten Veränderungen sind die Verwendung einer Empfängereinheit mit vollständig geweißter Empfangsfläche, der Einbau einer Vorrichtung zur Konstanthaltung der Gerätetemperatur und der Anbau eines Himmelsringes zur Abschattung der direkten Sonnenstrahlung von dem Empfänger. Die sonstige vom Bilanzmesser übernommene Konstruktion, insbesondere die wärmeisolierte Aufhängung des Gerätekerne und die Belüftung der Lupolen-Haube, wurde nicht verändert. Eine Photographie des Gerätes ist in Abb. 10 wiedergegeben.

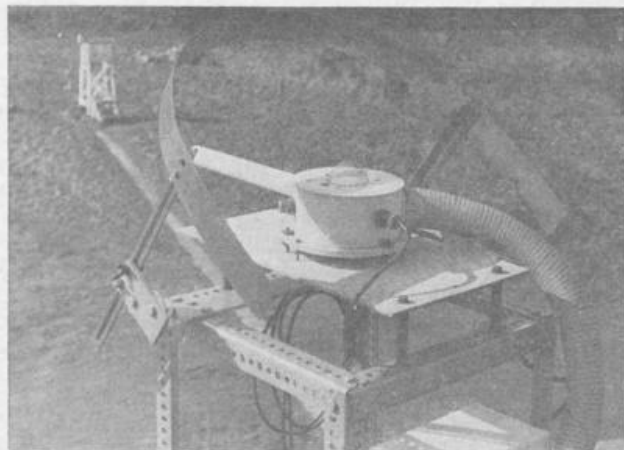


Abb. 10
Photographie des Gegenstrahlungsmessers

Die weiße Empfangsfläche soll einen möglichst hohen Anteil der kurzwelligen Sonnen- und Himmelsstrahlung reflektieren, während sie im langwelligen Spektralbereich gleichmäßig und mit einem hohen Prozentsatz absorbieren soll. Die zweite Forderung wird von praktisch allen matten weißen Anstrichen befriedigend erfüllt, da diese erfahrungsgemäß im Infrarot „schwarz“ sind. Dagegen wurde unter den käuflichen oder selbst hergestellten weißen Farben keine gefunden, die einen genügend hohen Reflexionsfaktor für die Strahlung der Sonne und des Himmels besitzt. Nach umfangreichen Vorversuchen erwies sich schließlich das folgende Weißungsverfahren als das am besten geeignete: Auf das aus Aluminiumband gedrückte Empfangsblech der Thermosäule wird zunächst in normaler Dicke eine Schicht eines weißen Titandioxydlackes aufgespritzt; dann wird auf diesen Untergrund eine etwa 1 mm dicke Schicht von reinem Magnesiumoxyd aufgeräuchert, welches beim Verbrennen von Magnesiumband in Form dichter, weißer Schwaden entsteht und sich leicht auf der über die Flamme gehaltenen Empfangsfläche niederschlagen läßt. Die so entstehende Weißung ist ziemlich locker, enthält viele Lufteinschlüsse und ist mechanisch nicht sehr stabil; aber diese schlechten mechanischen Eigenschaften können sich bei der waagerechten Lage der Thermosäule in der getrockneten, durch die Lupolenhaube geschützten Atmosphäre im Innern des Meßgerätes nicht nachteilig auswirken; ihnen stehen sehr gute optische Eigenschaften gegenüber.

Absorptionsmessungen und -vergleiche vor Sonne und vor der Strahlung eines innen geschwärzten Eichtopfes ergaben, daß der Absorptionskoeffizient der Weißung im kurzwelligen Gebiet nur etwa 4–5% desjenigen aus dem infraroten Spektralgebiet beträgt. Damit ergibt sich, daß die kurzwellige Strahlung, deren auf die Horizontalfläche bezogene Gesamtintensität nach Messungen des Meteorologischen Observatoriums Hamburg (3) in einzelnen Sommerstunden maximal den 2,5fachen Wert der atmosphärischen Gegenstrahlung erreichen kann,

sich auf die Messung der Gegenstrahlung in einer Erhöhung des wahren Meßwertes um bis zu 12 % auswirken kann. Bei dieser recht hohen Fehlmessung handelt es sich jedoch um einzelne, in sehr ungünstigen Fällen mögliche Momentanwerte. Die Betrachtung der Tagessummen der Strahlungen zeigt, daß im Mittel über 24 Stunden das Verhältnis von kurzwelliger zu langwelliger Strahlung in den Sommermonaten maximal den Wert 0,6 erreicht und in den Wintermonaten bis auf den Wert 0,05 zurückgeht (vergl. Tab. 1, Zeile b). Daraus errechnet sich ein Fehler in den Tagessummen der atmosphärischen Gegenstrahlung, der auf der Unvollkommenheit der Weißung beruht, von etwa 2,5 bis 3 % im Sommer und weniger als 0,3 % im Winter.

Um diese „Weißungsfehler“ weiter herabzudrücken, wurde an dem Gerät ein Himmelsring angebracht (vergl. Abb. 10), wie er bei der Messung der reinen Himmelsstrahlung zum Abschatten der direkten Sonnenstrahlung verwendet wird. Dann wirkt an kurzwelliger Strahlung nur noch die Himmelsstrahlung auf den Empfänger ein und wird von der weißen Empfangsfläche mit etwa 4 - 5 % ihrer Intensität absorbiert. Aus Messungen des Meteorologischen Observatoriums Hamburg ergibt sich, daß in einzelnen Sommerstunden die Intensität der Himmelsstrahlung maximal den 1,4fachen Wert der Intensität der atmosphärischen Gegenstrahlung erreichen kann. Danach kann es vorkommen, daß einzelne gemessene Momentanwerte der Gegenstrahlung als Folge des Einwirkens der Himmelsstrahlung noch bis zu 6-7% zu hoch angegeben werden. Derartige Fehler in den Tagessummen erreichen in Hamburg in den Sommermonaten aber nur noch 2 % und im Winter nur noch 0,2 %. Sie besitzen damit eine Größenordnung, die die durch andere Faktoren bestimmte Meßunsicherheit beim Gegenstrahlungsmesser nicht mehr überschreitet, und können daher im Rahmen der gesamten Meßgenauigkeit hingenommen werden.

Der Einbau einer Heizung und Temperaturregelung in den Aluminiumkörper des Gegenstrahlungsmessers erfolgte aus zwei Gründen; zum ersten setzt das unten beschriebene Verfahren zur elektrischen Kompensation der Ausstrahlung der Empfangsfläche eine Gerätetemperatur voraus, die von einem festen Wert höchstens um einige Grad abweicht, und zum anderen ist bei konstanter Gerätetemperatur auch der Temperatureinfluß auf die Empfindlichkeit des Halbleiter-Empfängers (vergl. 3.4.) ausgeschaltet. Ein Quecksilberkontaktthermometer mißt die Temperatur im Innern des Aluminiumkernes und schaltet bei Unterschreiten der Solltemperatur über ein Relais den Strom einer Heizwicklung ein, die den Aluminiumzylinder mantelförmig umgibt. An seiner Außenfläche ist der Zylinder wärmeisoliert, damit seine Abkühlung, die durch Ausstrahlung und Wärmeabgabe an die umgebende Luft erfolgt, genügend langsam vor sich geht. Um im Sommer wie im Winter eine Temperaturregelung zu erzielen, ist die Temperatur auf +30° C eingestellt. Sie wird auf etwa ±0,3° C konstant gehalten.

Das beschriebene Gerät, welches zur fortlaufenden Registrierung der atmosphärischen Gegenstrahlung A eingesetzt werden soll, liefert eine Spannung, die auch bei Vernachlässigung der kurzwelligen Empfindlichkeit nicht zu A proportional ist, sondern lediglich zur Differenz D zwischen der einfallenden Strahlung A und der vom Gerät wieder ausgesandten Strahlung $\sigma \cdot T^4$ (T = Gerätetemperatur; vergl. Anhang, Kap. 6.1.):

$$D = A - \sigma \cdot T^4 .$$

Es wurde deshalb eine elektrische Schaltung aufgebaut, die bei Eingabe der Meßspannung der Empfängerthermosäule und der Temperatur des Meßgerätes eine zu A proportionale Spannung erzeugt und an ein Registriergerät abgibt. Das prinzipielle Schaltbild ist in Abb. 11 wiedergegeben.

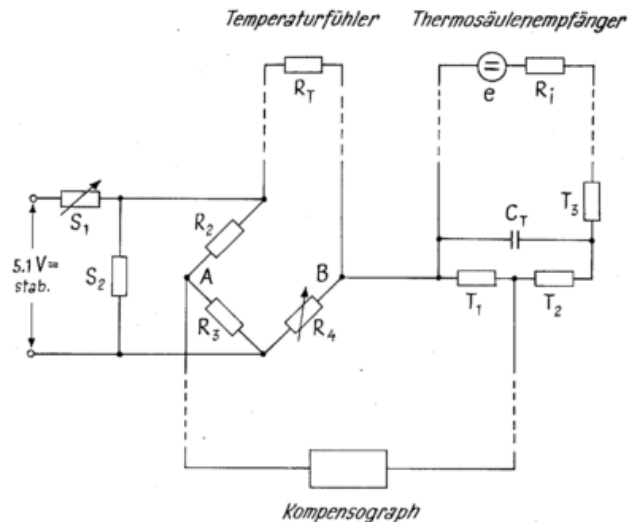


Abb. 11
Prinzipielle Schaltung zur direkten Registrierung der atmosphärischen Gegenstrahlung

Der rechte Teil der Schaltung stellt einen Spannungsteiler und ein Integrierglied für die Thermosäulenempfangsfläche dar. Mit dem Spannungsteiler wird die Empfindlichkeit des Empfängers (etwa 65 mV/cal·cm⁻²·min⁻¹) an diejenige des Registriergerätes - hier eines spannungsempfindlichen Kompensographen - angepaßt. Das Integrierglied mit der großen Zeitkonstanten $T_3 \cdot C_T \approx 80$ sec dient dazu, starke kurzperiodische Schwankungen der Meßspannung zu glätten. Diese Spannungsschwankungen werden durch die schnellen Temperaturschwankungen im Aluminiumkern des Gegenstrahlungsmessers hervorgerufen, die durch die Temperaturregelung in diesem Kern entstehen. Zwar sind die Amplituden der Temperaturschwankungen nur klein, aber sie wirken sich wegen der großen Temperaturempfindlichkeit der Halbleiter-Thermosäulen (vergl. Abb. 6) doch merklich auf die abgegebene Spannung aus. Die Integration der Meßspannung bringt keinen Nachteil für die Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung, da auch die Veränderungen der aus der ganzen Himmelshalbkugel kommenden langwelligen Strahlung langsam verlaufen.

Der linke Teil der Schaltung erzeugt die zu $\sigma \cdot T^4$ proportionale Spannung, die auf elektrischem Wege zu der geteilten Meßspannung des Thermosäulenempfängers hinzuaddiert werden muß, damit das angeschlossene Registriergerät einen zur Intensität der atmosphärischen Gegenstrahlung proportionalen Ausschlag anzeigt. Es wird davon ausgegangen, daß bei nicht allzu großen Abweichungen ΔT der Gerätetemperatur T vom festen Wert T_0 sich die Ausstrahlungsgröße $\sigma \cdot T^4$ ohne größere Fehler wie folgt entwickeln läßt:

$$\sigma \cdot T^4 = \sigma \cdot T_0^4 + 4 \cdot \sigma \cdot T_0^3 \cdot \Delta T . \quad [3]$$

Man kann zeigen, daß ein analog gebauter Ausdruck sich auch für die Brückenspannung U_{AB} der Temperaturmeßbrücke im linken Teil der Abb. 11 finden läßt. Voraussetzung dafür ist lediglich, daß die Meßbrücke für die Bezugstemperatur T_0 nicht wie sonst üblich auf Spannungslosigkeit abgestimmt wird, sondern daß sie im Gegenteil mit Hilfe des Regelwiderstandes R_4 stark verstimm wird. Setzt man für den Meßwiderstand $R_T(T)$, einen in den Gegenstrahlungsmesser eingeschobenen Platinwiderstand, die Entwicklung an:

$$R_T(T) = R_{T_0} + \Delta R_T(T) ,$$

so gilt für die Brückenspannung nach Abb 11:

$$U_{AB} = F \cdot \left\{ (R_3 \cdot R_T - R_2 \cdot R_4) + R_3 \cdot \Delta R_T \right\} . \quad [4]$$

Darin ist F ein Faktor, der für $S_2 \ll R_3, R_4$ und für nur kleine Veränderungen von R_T und R_4 praktisch unabhängig von diesen Veränderungen ist und außerdem proportional zu $1/S_1$ verläuft. Regelt man die Verstimmung der Brücke so ein, daß gilt:

$$\frac{4 \cdot \sigma \cdot T_0^3 \cdot \Delta T}{\sigma \cdot T_0^4} = \frac{R_3 \cdot \Delta R_T}{R_3 R_{T_0} - R_2 R_4},$$

d. h.
$$\frac{4 \cdot \Delta T}{T_0} = \frac{\Delta R_T(T)}{R_{T_0} - R_2 R_4 / R_3},$$

dann zeigen für kleine Temperaturschwankungen ΔT die Ausdrücke [3] und [4] dasselbe Temperaturverhalten. Man braucht dann schließlich nur noch die absolute Größe der Brückenspannung U_{AB} mit dem Stellwiderstand S_1 so einzuregulieren, daß das Verhältnis der Brückenspannung U_{AB} zur Ausstrahlungsgröße $\sigma \cdot T^4$ genau mit der heruntergeteilten Empfindlichkeit des Thermosäulenempfängers übereinstimmt. Dann ist die an den Kompensographen abgegebene Spannung proportional zur Summe aus der Meßgröße D des Thermosäulenempfängers und der Größe $\sigma \cdot T^4$ der Ausstrahlung seiner Empfangsfläche:

$$U_K \sim D + \sigma \cdot T^4 = A,$$

d. h. die Ausschläge des Kompensographen sind direkt proportional zur Intensität der atmosphärischen Gegenstrahlung.

Die Genauigkeit der Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung nach dem nunmehr vollständig beschriebenen Verfahren hängt von sehr vielen Einzelfaktoren ab. Die wichtigsten Fehlerquellen sind die nichtvollkommene Weißung der Empfangsfläche, die partielle Abdeckung des Himmels durch den Sonnenring und dessen Temperaturstrahlung, die Eigenstrahlung der Lupolen-Haube, und sonstige Einflußgrößen, die auch schon beim Strahlungsbilanzmesser die Meßgenauigkeit beeinflussen haben. Nach vorsichtiger Abschätzung der einzelnen Fehlermöglichkeiten kommt man zu dem Ergebnis, daß die momentane Anzeige des Gegenstrahlungsmessers ungünstigstenfalls in einzelnen Sommerstunden bis zu + 11 % fehlerhaft sein kann. In den Tagessummen ist mit einem mittleren relativen Fehler der gemessenen Gegenstrahlungswerte von höchstens ± 6 bis 7 % zu rechnen.

Diese Fehlertoleranzen sind, absolut gesehen, nicht gering. Bei ihrer Höhe muß man jedoch berücksichtigen, daß die Messung der langwelligen Komponenten der

$$Q_+ = (\tau_L^k \cdot \alpha_A^k \cdot I^k + \tau_L^l \cdot \alpha_A^l \cdot I^l + \alpha_A^l \cdot \alpha_L^l \cdot \sigma \cdot T_G^4 + \varrho_L^l \cdot \alpha_A^l \cdot \alpha_A^l \cdot \sigma \cdot T_A^4) \cdot F$$

Darin bedeutet:

T_G : Gerätetemperatur = Lufttemperatur = Temperatur der Lupolen-Hauben

T_A : Temperatur der Absorptionsschicht

$\Delta T = T_A - T_G$: Übertemperatur der Absorptionsschicht gegenüber der Bezugstemperatur der umgebenden Körper

F : Empfangsfläche

I : auf das Gerät fallende Strahlung

h : Wärmeleitvermögen zwischen der Absorptionsschicht und den umgebenden, auf der Temperatur T_G befindlichen Körper; h ist in erster Linie das Wärmeleitvermögen der Hintereinanderschaltung von Empfangsblech, Thermosäule und Klebeschichten

α : Absorptionskoeffizient

ϱ : Reflexionskoeffizient

τ : Koeffizient der Transparenz, $\alpha + \varrho + \tau = 1$

geophysikalischen Strahlungsströme aus den oben genannten Gründen erheblich schwieriger ist als beispielsweise die Messung der kurzwelligen Komponenten. Im Vergleich mit den Fehlerquellen, die in anderen Methoden zur Bestimmung der atmosphärischen Gegenstrahlung liegen, sind die Meßfehler des beschriebenen Gerätes nicht als hoch anzusprechen. Der große Vorteil dieses einfachen Gerätes beruht auf der Möglichkeit, die Intensität der atmosphärischen Gegenstrahlung bei jedem Wetter fortlaufend direkt registrieren zu können.

6. Anhang. Betrachtungen zur Wirkungsweise des Bilanzmessers

6.1. Die Wärmebilanz der Empfangsflächen

In der Absorptionsschicht des Empfangsbleches findet die Umwandlung von Strahlungsenergie in Wärmeenergie und umgekehrt (bei Strahlungsabsorption bzw. Ausstrahlung) statt. Im einzelnen verliert die Absorptionsschicht Energie

a) durch Wärmeleitung über das Empfangsblech und die Thermosäule in den Aluminiumzylinder sowie durch Wärmeabgabe an die Luft unter der Lupolen-Haube,

b) durch Ausstrahlung der Absorptionsschicht.

Sie gewinnt Energie

a) aus der von außen einfallenden kurzwelligen Strahlung*), die allerdings durch Extinktion an und in der Lupolen-Haube geschwächt wird,

b) aus der von außen einfallenden langwelligen Strahlung*), die ebenfalls an und in der Lupolen-Haube geschwächt wird,

c) durch die langwellige Ausstrahlung der Lupolen-Haube,

d) durch Reflexion eines Teils der von der Absorptionsschicht ausgesandten Strahlung an der Lupolen-Haube.

Bei dieser Aufzählung sind zahlenmäßig kleine Effekte wie Mehrfachreflektionen, Ausstrahlung der eigentlichen Thermosäule und anderer Körper innerhalb der Lupolen-Halbkugel, Wärmeabgabe der Thermosäule an die Luft, usw. nicht ausdrücklich aufgeführt. Formelmäßig lassen sich Wärmeverlust Q_- und Wärmegewinn Q_+ der Absorptionsschicht wie folgt darstellen, wobei die Reihenfolge der Summanden wie bei der Nennung der einzelnen Effekte gewählt wurde:

$$Q_- = (h \cdot \Delta T + \alpha_A^l \cdot \sigma \cdot T_A^4) \cdot F$$

... L : bezogen auf die Lupolen-Haube

... A : bezogen auf die Absorptionsschicht

... k : bezogen auf kurzwellige Strahlung

... l : bezogen auf langwellige Strahlung

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante
 $= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{grad}^4$
 $= 8,12 \cdot 10^{-11} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min} \cdot \text{grad}^4.$

Die bei Bestrahlung oder Ausstrahlung entstehenden Übertemperaturen ΔT der Absorptionsschicht sind klein gegenüber den absoluten Temperaturen T_A, T_G , so daß man ohne merklichen Fehler die Größe $\sigma \cdot T_A^4$ wie folgt entwickeln kann:

$$\sigma \cdot T_A^4 = \sigma \cdot T_G^4 + 4 \cdot \sigma \cdot T_G^3 \cdot \Delta T.$$

*) Die Aufteilung der Strahlungsströme in kurzwellige und langwellige Anteile ist erforderlich, weil die Transparenz der Lupolen-Hauben für diese Wellenlängenbereiche unterschiedlich ist.

Im Gleichgewichtszustand muß nun der Wärmeverlust der Absorptionsschicht gleich ihrem Wärmegewinn sein;

aus $Q_- = Q_+$ errechnet man für die Übertemperatur ΔT der Absorptionsschicht:

$$\Delta T = \frac{\tau_L^k \cdot \alpha_A^k \cdot I^k + \tau_L^l \cdot \alpha_A^l \cdot I^l - \alpha_A^l \cdot \sigma \cdot T_G^4 (1 - \alpha_L^l - \alpha_A^l \cdot \varrho_L^l)}{h + \alpha_A^l \cdot 4 \cdot \sigma \cdot T_G^3 \cdot (1 - \alpha_L^l \cdot \varrho_L^l)}$$

$$\approx \frac{\tau_L^k \cdot \alpha_A^k \cdot I^k + \tau_L^l \cdot \alpha_A^l \cdot (I^l - \sigma \cdot T_G^4)}{h + \alpha_A^l \cdot 4 \cdot \sigma \cdot T_G^3 \cdot (1 - \varrho_L^l)}$$

wobei die im letzten Schritt erfolgte Gleichsetzung von $\alpha_A^l \cdot \varrho_L^l$ und ϱ_L^l im Rahmen der Meßgenauigkeit von ϱ_L^l geschehen durfte.

Aus der letzten Gleichung liest man ab, daß nur dann die Empfindlichkeiten bezüglich kurzweiliger und langweiliger Strahlung dieselben sind, wenn das Produkt $\tau_L \cdot \alpha_A$ kurz- und langwellig denselben Wert besitzt. Wie schon oben ausgeführt (Kap. 3.1.), ist für das Schwärzungsmittel Parsons Black $\alpha_A^k = \alpha_A^l = 98,5\%$; nach eigenen Messungen an den verwendeten Lupolen-Hauben betragen deren Durchlässigkeiten $\tau_L^k = 87\%$ und $\tau_L^l = 77\%$. Damit sind also kurz- und langweiliger Wert von $\tau_L \cdot \alpha_A$ voneinander verschieden. Um sie aneinander anzugleichen, wurde ein Teil der Absorptionsfläche im Zentrum geweißt (vergl. Abb. 3). Der kreisrunde Fleck setzt den über die ganze Empfangsfläche gemittelten Absorptionsfaktor $\bar{\alpha}_A$ im kurzweiligen Bereich herab, während er ihn im langweiligen Spektralbereich nur sehr wenig verändert (weiße Farbe ist im Infraroten praktisch „schwarz“). Bezeichnet mit χ das Verhältnis von geweißter Fläche zu gesamter Empfangsfläche, so läßt sich der gemittelte Absorptionsfaktor wie folgt darstellen:

$$\bar{\alpha}_A = \alpha_w \cdot \chi + \alpha_s (1 - \chi).$$

(α_w : Absorptionsfaktor des weißen Teils,

α_s : Absorptionsfaktor des schwarzen Teils der Empfangsfläche).

Aus der Forderung $\tau_L^k \cdot \bar{\alpha}_A^k = \tau_L^l \cdot \bar{\alpha}_A^l$ ergibt sich dann für das Flächenverhältnis χ :

$$\chi = \frac{\tau_L^k \cdot \alpha_s^k - \tau_L^l \cdot \alpha_s^l}{\tau_L^k \cdot (\alpha_s^k - \alpha_w^k) - \tau_L^l \cdot (\alpha_s^l - \alpha_w^l)}$$

Mit den Werten $\alpha_s^k = \alpha_s^l = 98,5\%$, $\tau_L^k = 87\%$, $\tau_L^l = 77\%$, $\alpha_w^k = 20\%$, $\alpha_w^l = 90\%$ (Abschätzungen) erhält man für den weißen Anteil der Empfangsfläche

$$\chi = 16\%$$

d. h. 16% der gesamten Empfangsfläche müssen geweißt werden, was durch Aufbringen einer weißen Kreisfläche von 10,5 mm Durchmesser im Zentrum der Empfangsfläche auch geschehen ist. Der mittlere Absorptionsfaktor $\bar{\alpha}_A$ der Empfangsfläche besitzt dann kurzweilig den Wert 86% und langwellig den Wert 97%. Eine gewisse Unsicherheit in der Abschätzung der Zahlenwerte von α_w^k und α_w^l ist dabei nur von geringem Einfluß, weil die Eigenschaften der weißen Fläche in die Größe des mittleren Absorptionskoeffizienten nur zu $\chi = 16\%$ eingehen.

Nach der durch Auftragen des weißen Flecks erfolgten Angleichung der kurzweiligen und langweiligen Empfindlichkeiten des lupolengeschützten Empfängers kann man für die Übertemperatur der Absorptionsschicht schreiben:

$$\Delta T = \frac{\tau_L \cdot \bar{\alpha}_A}{h + \alpha_A^l \cdot 4 \cdot \sigma \cdot T_G^3 (1 - \varrho_L^l)} \cdot (I^k + I^l - \sigma \cdot T_G^4).$$

Wie im nachfolgenden Abschnitt noch im einzelnen dargelegt wird, ist für eine bestimmte Empfängereinheit die

von der Thermosäule erzeugte Ursprungsspannung E proportional zur Übertemperatur ΔT der Absorptionsschicht. Daher kann man obige Gleichung mit einem Proportionalitätsfaktor k auch in folgender Form schreiben:

$$E = k \cdot (I^k + I^l - \sigma \cdot T_G^4).$$

Eine solche Beziehung gilt nun sowohl für die nach oben gerichtete wie für die nach unten gerichtete Empfängereinheit des Strahlungsbilanzmessers; jedoch können – durch den mechanischen Aufbau, durch Streuung der Eigenschaften der Thermosäulen, usw. bedingt – für verschiedene Empfängereinheiten die Proportionalitätsfaktoren k unterschiedlich sein. Ihre Größe läßt sich experimentell bei der Eichung des Empfängers feststellen und durch elektrische Schaltungsmittel im Registrierring (Serien- oder Parallelwiderstände, vergl. Abb. 2) aneinander angleichen. Mit den korrigierten Werten k' der Proportionalitätsfaktoren gelten für die von der oberen bzw. unteren Empfängereinheit abgegebenen Spannungen U_o , U_u folgende Beziehungen:

$$U_o = k' \cdot (I_o^k + I_o^l - \sigma \cdot T_G^4)$$

$$U_u = k' \cdot (I_u^k + I_u^l - \sigma \cdot T_G^4)$$

(I_o , I_u : von oben bzw. von unten einfallende Strahlungsströme)

Durch Gegeneinanderschalten der beiden Empfängereinheiten läßt sich daraus unmittelbar die Bilanz der Strahlungsströme gewinnen:

$$U_{\text{Bilanz}} = U_o - U_u = k' \cdot (I_o^k - I_u^k + I_o^l - I_u^l) = k' \cdot (I_o - I_u).$$

Die vom Bilanzmesser abgegebene Spannung ist also ein direktes Maß für die Strahlungsbilanz.

6.2. Die Wärmeströme im Bilanzmesser

Die Energieaufnahme der Empfangsschicht durch Absorption von Strahlung führt zu einer Erwärmung der Schicht bis zu einem Gleichgewichtszustand, in dem Energiezustrom und -ableitung sich die Waage halten. Zwischen der Absorptionsschicht und dem Aluminiumkörper bzw. der umgebenden Luft hat sich dann eine Temperaturdifferenz ΔT ausgebildet, die zum Fließen von Wärmeströmen zwischen den einzelnen Temperaturpotentialen Anlaß gibt.

Im folgenden soll das zeitliche Verhalten dieser Wärmeströme genauer untersucht werden. Dabei wird ein Verfahren benutzt, das von COURVOISIER und WIERZEJEWski (6) theoretisch begründet und erfolgreich auf verschiedene kalorische Strahlungsmessgeräte angewendet worden ist. Das Verfahren geht aus von der Analogie zwischen den Wärmeströmungsvorgängen und den elektrischen Vorgängen und überträgt die bekannten Gesetze elektrischer Schaltkreise – vor allem das Ohmsche Gesetz und die Kirchhoffschen Regeln – auf den Fall von Wärmeströmen. Wichtigster Begriff dieser Theorie ist der des Wärmewiderstandes; dabei spielt die Art des Widerstandes keine Rolle; es kann sich sowohl um einen gewöhnlichen Leitungswiderstand in irgendeinem Körper handeln als auch z. B. um den Widerstand des langweiligen Strahlungsaustausches. Es tut der Anschaulichkeit der Betrachtungen auch keinen Abbruch, wenn letzten Endes die zahlenmäßige Größe der einzelnen Widerstände nicht so einfach gemessen oder aus den Körperabmessungen und Materialkonstanten berechnet werden kann wie in der Elektrizitätslehre, was daran

liegt, daß in der Wärmetechnik keine klare Trennung zwischen Leitern und Nichtleitern möglich ist und in fast jedem Fall Strahlungsübergänge eine zusätzliche Erschwernis bilden.

Wie im Falle des elektrischen Stromes wird mit Ersatzschaltbildern gearbeitet, also mit Modellen, die man durch geringere oder größere Kompliziertheit den tatsächlichen Verhältnissen im untersuchten Gerät möglichst gut anzugleichen sucht, die aber dennoch so einfach bleiben müssen, daß man sie in mathematisch noch übersichtlicher Form behandeln kann (vergl. z. B. die umfassenden Berechnungen von Wärmestrom-Ersatzschaltbildern für Strahlungsbilanzmesser bei Höhne (35)).

Ein solches Ersatzschaltbild für die in dieser Arbeit beschriebene Empfängereinheit gewinnt man durch Betrachtung aller möglichen Wärmeströme in dem Gerät. Die Quelle der Wärmeströme ist die Absorptionsschicht, die wichtigste Senke ist der massereiche Aluminiumzylinder, dessen Temperatur auch bei Aufnahme der stärksten möglichen Wärmeströme praktisch nicht verändert wird (vergl. Kap. 3.2.). Eine andere Senke kann die durchweg auf derselben Temperatur wie die Aluminiumzylinder befindliche Luft innerhalb der Empfängereinheit sein. Auch diejenigen Wärmeströme, die den Energieverlusten durch Ausstrahlung entsprechen, kann man sich auf irgendwelchen Körpern mit derselben Temperatur wie der Gerätetemperatur endend denken. Im Ersatzschaltbild werden somit alle Wärmeströme von der Absorptionsschicht, die die Übertemperatur $\Delta T = T_A - T_G$ angenommen hat, ausgehen und auf Körpern, die die Bezugstemperatur T_G besitzen, enden.

Zwischen diesen beiden Temperaturniveaus liegen die aus verschiedenen Materialien gefertigten Teile der Empfängereinheit, die zur Wärmeleitung beitragen. Jedes der Teilstücke besitzt einen Wärmewiderstand, aber auch eine Wärmekapazität, die von dem betreffenden Wärmestrom aufgeladen werden muß, was bedeutet, daß dieses Materialstück auf eine bestimmte Temperatur aufgeheizt werden muß. Die übereinander angeordneten homogenen Schichten der Empfängereinheit (Absorptionsschicht, Empfangsblech, Thermosäule, Isolierschichten beiderseits der Thermosäule) werden somit durch eine Hintereinanderschaltung von Widerständen mit parallelliegenden Kapazitäten dargestellt. Da man eine Wärmeabgabe durch Leitung bzw. Konvektion an die umgebende Luft oder durch Ausstrahlung bei keinem Teilstück schon von vornherein ausschließen kann, muß man im Ersatzschaltbild von jedem auf einer bestimmten Temperatur befindlichen Teilkörper auch eine direkte Wärmeleitverbindung zum Temperaturbezugspunkt durch Einzeichnen eines Widerstandes vorsehen. Auf diese Weise entsteht ein ziemlich kompliziertes Netzwerk aus hintereinandergeschalteten Widerständen mit parallel dazu liegenden Widerständen und Kapazitäten, das einer überschaubaren mathematischen Behandlung schon nicht mehr zugänglich ist. Um hier weiterzukommen, muß man Größe und Wirkung der verschiedenen Schaltelemente im einzelnen diskutieren und dann die gesamte Schaltung stark vereinfachen, indem man kleine Größen rigoros vernachlässigt. Bei der Erörterung der einzelnen Widerstände und Kapazitäten wird dabei sowohl von mehr grundsätzlichen Überlegungen als auch von experimentellen Ergebnissen auszugehen sein.

Die wichtigste Tatsache, von der bei der Aufstellung eines einfachen Ersatzschaltbildes für die Halbleiter-Empfänger ausgegangen wird, ist die, daß die Abmessungen der einzelnen Schichten in Richtung der Symmetrieachse des Empfängers wesentlich kleiner sind als in den Ebenen senkrecht dazu, so daß Randeffekte nur eine geringe Rolle spielen. Es wird also mit dünnen, ausgedehnten Schichten von gleichmäßigem Wärmeverhalten gerechnet. Aus vergleichenden Untersuchungen

der Empfindlichkeit der Empfänger in Normalluft und im Vorvakuum (vergl. Kap. 3.4.) ergibt sich, daß von den einzelnen Oberflächen der Schichten eine merkliche Wärmeabgabe an die umgebende Luft durch Wärmeleitung oder Konvektion nicht erfolgt. Außer bei der Absorptionsschicht ist bei den übrigen Schichten auch der Wärmeverlust durch Strahlung zu vernachlässigen, da die Mantelflächen der betreffenden Schichten sehr klein sind und die Thermosäule darüber hinaus durch eine Isolierschicht aus Kunststoff vor seitlicher Wärmeabgabe geschützt ist. Somit darf man ohne merklichen Fehler die zuletzt eingeführten direkten Wärmeleitverbindungen der einzelnen Temperaturpunkte zur Bezugstemperatur bei allen Schichten weglassen bis auf diejenige der Absorptionsschicht, die ja den bei manchen Empfängertypen ganz beträchtlichen Wärmeverlust der Absorptionsschicht durch Ausstrahlung beschreibt.

Von den Wärmekapazitäten kann man diejenigen der Absorptionsschicht und der beiden Isolierschichten außer Betracht lassen, da die Massen dieser Schichten im Vergleich mit denen der Thermosäule und des Empfangsbleches sehr gering sind. Aus Abschätzungen der Dimensionen und Materialkonstanten der betreffenden Schichten kann man weiterhin schließen, daß der Wärmeleitungswiderstand der aus einer Wismutlegierung gefertigten Thermosäule mindestens von der gleichen Größenordnung ist wie derjenige der übrigen Schichten. Das bedeutet, daß man die Thermosäule nicht als Körper von einheitlicher Temperatur auffassen darf; man muß vielmehr den Temperaturgradienten in der Thermosäule berücksichtigen und demgemäß im Ersatzschaltbild die Thermosäule in mehrere Schichten von praktisch konstanter Temperatur aufteilen, also durch ein ganzes System von Wärmewiderständen und -kapazitäten darstellen. Die praktische Durchrechnung mit abgeschätzten Zahlenwerten zeigt jedoch, daß man schon bei einer Einteilung der Thermosäule in zwei Schichten eine qualitativ richtige Beschreibung durch das Ersatzschaltbild erhält. Wenn man noch die Isolierschichtwiderstände gegenüber dem Wärmeleitungswiderstand der Thermosäule vernachlässigt, entsteht schließlich das in Abb. 12 wiedergegebene Ersatzschaltbild für das thermische Verhalten der Empfängereinheit.

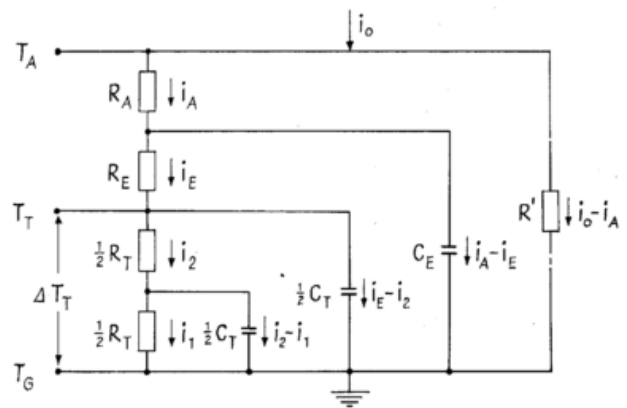


Abb. 12
Vereinfachtes Wärmestrom-Ersatzschaltbild der Thermosäulen-Empfänger

Darin bezeichnet R_A den Leitungswiderstand der Absorptionsschicht, R_E den Leitungswiderstand des Empfangsbleches, R_T den Leitungswiderstand der Thermosäule, R' den Ausstrahlungswiderstand der Absorptionsschicht, C_E die Wärmekapazität des Empfangsbleches und C_T die Wärmekapazität der Thermosäule; i_0 ist der gesamte, die Absorptionsschicht des Empfängers verlassende Wärmestrom. Die Bedeutung der anderen Wärmeströme geht aus der Abbildung eindeutig hervor.

Das Ziel der nun folgenden Berechnungen ist, aus dem Ersatzschaltbild einen Ausdruck für den durch Ausnutzung des Thermoeffektes elektrisch meßbaren Temperaturabfall an der Thermosäule zu gewinnen, also für die Größe

$$\Delta T_T = T_T - T_G = \frac{1}{2} R_T \cdot (i_1 + i_2) \quad [5]$$

Durch Anwendung des Ohmschen Gesetzes und der Kirchhoffschen Stromverzweigungsregel erhält man 4

$$\begin{aligned} & \frac{1}{16} \cdot \beta_E \cdot \beta_T^2 \cdot R_S \cdot \frac{d^3 i_1}{dt^3} + \left(\frac{1}{16} \cdot \beta_T^2 \cdot R_S + \frac{3}{4} \cdot \beta_E \cdot \beta_T \cdot R_S + \frac{1}{8} \cdot \beta_T' \cdot \beta_T \cdot R_S + \frac{1}{16} \cdot \beta_T^2 \cdot R_E \right) \cdot \frac{d^2 i_1}{dt^2} \\ & + \left(\frac{3}{4} \cdot \beta_T \cdot R_S + \beta_E \cdot R_S + \beta_T' \cdot R_S + \frac{3}{4} \beta_T \cdot R_E + \frac{1}{8} \cdot \beta_T \cdot R_T \right) \cdot \frac{d i_1}{dt} + R_G \cdot i_1 = R' \cdot i_0 \end{aligned} \quad [7]$$

Sie wird gelöst durch den Ansatz:

$$i_1(t) = i \cdot \exp(-t/\tau) + \delta. \quad [8]$$

Einsetzen dieses Ansatzes in die Differentialgleichung

$$\begin{aligned} & \tau^3 - \frac{1}{R_G} \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot \beta_T \cdot R_S + \beta_E \cdot R_S + \beta_T' \cdot R_S + \frac{3}{4} \cdot \beta_T \cdot R_E + \frac{1}{8} \cdot \beta_T \cdot R_T \right) \cdot \tau^2 \\ & + \frac{1}{R_G} \cdot \left(\frac{1}{16} \cdot \beta_T^2 \cdot R_S + \frac{3}{4} \cdot \beta_E \cdot \beta_T \cdot R_S + \frac{1}{8} \cdot \beta_T' \cdot \beta_T \cdot R_S + \frac{1}{16} \cdot \beta_T^2 \cdot R_E \right) \cdot \tau - \frac{1}{16} \cdot \frac{1}{R_G} \cdot \beta_E \cdot \beta_T^2 \cdot R_S = 0 \end{aligned} \quad [10]$$

Die erste Gleichung [9] gibt nach [8] den Endwert für $i_1(t)$ bei konstanter Einstrahlung nach Abklingen aller Einschaltvorgänge an: $i_1(\infty) = \delta$. Die zweite Gleichung [10] ist eine Gleichung dritten Grades für die Zeitkonstante τ des Einstellvorganges. Die Koeffizienten dieser Gleichung sind sämtlich von Null verschieden und abwechselnd positiv und negativ. Schon aus physikalischen Gründen müssen die drei Lösungen der Gleichung reell und im allgemeinen auch voneinander verschieden sein. Ohne Einsetzen spezieller Zahlenwerte kann man sie zwar nicht explizit angeben, aber das ist für die weiteren Überlegungen auch nicht erforderlich. Bezeichnet man die Lösungen mit τ_a, τ_b, τ_c und ordnet sie nach ihrer Größe $\tau_a \geq \tau_b \geq \tau_c$, dann lautet die vollständige allgemeine Lösung der Differentialgleichung [7]:

$$i_1(t) = a \cdot \exp(-t/\tau_a) + b \cdot \exp(-t/\tau_b) + c \cdot \exp(-t/\tau_c) + \delta \quad [11]$$

mit Koeffizienten a, b, c , die sich aus den Anfangsbedingungen ergeben.

Ein leicht überschaubarer Prozeß ist der Einschaltvorgang, bei dem der Wärmestrom i_0 zu einer bestimmten Zeit $t = 0$ sprunghaft einsetzt. Für $t < 0$ seien im Empfänger alle Wärmeströme vollständig abgeklungen gewesen, d. h. für $t < 0$ gilt: $i_0 = i_1 = i_2 = i_E = i_A = 0$. Dann entnimmt man dem Ersatzschaltbild die Anfangsbedingungen

$$i_E(0) = i_2(0) = i_1(0) = (0). \quad [12]$$

Wegen der immer gültigen Beziehungen

$$= R_T \cdot \left\{ \left(1 - \frac{\beta_T}{8\tau_a}\right) \cdot a \cdot \exp(-t/\tau_a) + \left(1 - \frac{\beta_T}{8\tau_b}\right) \cdot b \cdot \exp(-t/\tau_b) + \left(1 - \frac{\beta_T}{8\tau_c}\right) \cdot c \cdot \exp(-t/\tau_c) + \delta \right\} \quad [16]$$

In übersichtlicher Form lautet diese Beziehung:

$$\Delta T_T = R_T \cdot \left\{ A \cdot \exp(-t/\tau_a) + B \cdot \exp(-t/\tau_b) + C \cdot \exp(-t/\tau_c) + D \right\}. \quad [17]$$

Bevor die bisherigen Überlegungen durch ein Beispiel mit abgeschätzten Zahlenwerten für die Halbleiter-Empfänger konkretisiert werden, sollen noch kurz die Verhältnisse bei sich ändernder Bestrahlung untersucht werden. Dabei wird nach einem Verfahren vorgegangen, wie es erstmals SKEIB (36) in allgemeiner Form auf Strahlungsbilanzmesser angewandt hat.

Auch dieser umfassendere Fall wird durch die Differentialgleichung [7] beschrieben, nur ist der eingepreßte

Differentialgleichungen für die unbekanntenen Ströme i_1, i_2, i_E, i_A , die man durch wechselseitiges Einsetzen umwandeln kann in eine einzige Differentialgleichung dritter Ordnung für $i_1(t)$. Mit den Abkürzungen

$$\begin{aligned} R_S &= R_A + R', & \beta_E &= C_E \cdot R_E, \\ R_G &= R_S + R_E + R_T, & \beta_T &= C_T \cdot R_T, \\ & & \beta_T' &= C_E \cdot R_T, \end{aligned} \quad [6]$$

lautet diese:

[7] liefert zwei Gleichungen für die Unbekannten δ und τ :

$$\delta = \frac{R'}{R_G} \cdot i_0 = \frac{R'}{R' + R_A + R_E + R_T} \cdot i_0 \quad [9]$$

$$i_2 = i_1 + \frac{1}{4} \cdot \beta_T \cdot \frac{d i_1}{dt} \quad [13]$$

$$i_E = i_1 + \frac{3}{4} \cdot \beta_T \cdot \frac{d i_1}{dt} + \frac{1}{16} \cdot \beta_T^2 \cdot \frac{d^2 i_1}{dt^2} \quad [14]$$

kann man damit für die Anfangsbedingungen von i_1 schreiben:

$$i_1(0) = \frac{d i_1}{dt}(0) = \frac{d^2 i_1}{dt^2}(0) = 0.$$

Setzt man die genannten Anfangsbedingungen in die Lösung [11] der Differentialgleichung [7] ein, so erhält man drei Bestimmungsgleichungen für die Koeffizienten a, b, c , aus denen sich ergibt:

$$\begin{aligned} a &= -\delta \cdot \frac{\tau_a^2}{(\tau_a - \tau_b) \cdot (\tau_a - \tau_c)} < 0 \\ b &= +\delta \cdot \frac{\tau_b^2}{(\tau_a - \tau_b) \cdot (\tau_b - \tau_c)} > 0 \\ c &= -\delta \cdot \frac{\tau_c^2}{(\tau_a - \tau_c) \cdot (\tau_b - \tau_c)} < 0. \end{aligned} \quad [15]$$

Damit ist die Lösung der Differentialgleichung [7] für die Anfangsbedingungen [12] bekannt, und man kann jetzt nach [5] und [13] den Temperaturabfall an der Thermosäule berechnen:

$$\Delta T_T = \frac{1}{2} \cdot R_T \cdot (i_1 + i_2) = \frac{1}{2} \cdot R_T \cdot \left(2 i_1 + \frac{1}{4} \cdot \beta_T \cdot \frac{d i_1}{dt} \right)$$

Wärmestrom i_0 jetzt nicht mehr zeitlich konstant, sondern eine beliebig vorgegebene Funktion der Zeit: $i_0 = i_0(t)$. Es genügt jedoch, die Untersuchungen auf eine periodisch sich ändernde Bestrahlung zu beschränken, bei der man für $i_0(t)$ ansetzen kann:

$$i_0(t) = j_0 + j_1 \cdot \cos \omega t. \quad [18]$$

Jede kompliziertere, physikalisch sinnvolle Funktion $i_0(t)$ kann man sich aus solchen einfachen periodischen

Funktionen linear zusammengesetzt denken, und jede so gebildete Linearkombination von Funktionen, die die Differentialgleichung [7] erfüllen, ist auch wieder eine Lösung dieser Differentialgleichung, weil [7] linear in $i_1(t)$ ist. Zur Vereinfachung der Schreibweise fügt man zu [18] die zugehörige imaginäre Ergänzung hinzu, so daß die vorgegebene Funktion lautet [18]:

$$\tau_a \cdot \tau_b \cdot \tau_c \cdot R_G \cdot \frac{d^3 i_1}{dt^3} + (\tau_a \cdot \tau_b + \tau_b \cdot \tau_c + \tau_a \cdot \tau_c) \cdot R_G \cdot \frac{d^2 i_1}{dt^2} + (\tau_a \cdot \tau_b \cdot \tau_c) \cdot R_G \cdot \frac{d i_1}{dt} + R_G \cdot i_1 = R' \cdot i_0(t) \quad [19]$$

Die allgemeine Lösung dieser Differentialgleichung für nichtkonstantes $i_0(t)$ erhält man in üblicher Weise durch Addition einer partikulären Lösung dieser Gleichung zur allgemeinen Lösung der homogenen Gleichung ($i_0 = 0$), die durch [11], [10], [15] bereits angegeben ist.

$$\begin{aligned} & \kappa \cdot \exp(i\omega t) \cdot \left\{ -\tau_a \cdot \tau_b \cdot \tau_c \cdot R_G \cdot i \cdot \omega^3 - (\tau_a \cdot \tau_b + \tau_b \cdot \tau_c + \tau_a \cdot \tau_c) \cdot R_G \cdot \omega^2 \right. \\ & \left. + (\tau_a + \tau_b + \tau_c) \cdot R_G \cdot i \cdot \omega + R_G \right\} + \delta' \cdot R_G = j_0 \cdot R' + j_1 \cdot R' \cdot \exp(i\omega t) \end{aligned} \quad [21]$$

Daraus folgt:

$$\delta' = \frac{R'}{R_G} \cdot j_0 \quad [22]$$

$$\kappa = \frac{\frac{R'}{R_G} \cdot j_1}{1 - (\tau_a \cdot \tau_b + \tau_b \cdot \tau_c + \tau_a \cdot \tau_c) \cdot \omega^2 + i \cdot \omega \cdot (\tau_a + \tau_b + \tau_c) - \tau_a \cdot \tau_b \cdot \tau_c \cdot \omega^2 \cdot i \cdot \omega} \quad [23]$$

d. h. für Betrag und Phase der Amplitude κ von $i_1(t)$ gilt:

$$\begin{aligned} |\kappa| &= \frac{\frac{R'}{R_G} \cdot j_1}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot (\tau_a^2 + \tau_b^2 + \tau_c^2) + \omega^4 \cdot (\tau_a^2 \cdot \tau_b^2 + \tau_a^2 \cdot \tau_c^2 + \tau_b^2 \cdot \tau_c^2) + \omega^6 \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_b^2 \cdot \tau_c^2}} \quad [23a] \\ \text{arc } \kappa &= \text{arc tg } \frac{\omega \{ (\tau_a + \tau_b + \tau_c) - \tau_a \cdot \tau_b \cdot \tau_c \cdot \omega^2 \}}{1 - (\tau_a \cdot \tau_b + \tau_b \cdot \tau_c + \tau_a \cdot \tau_c) \cdot \omega^2} \quad [23b] \end{aligned}$$

Aus den beiden letzten Gleichungen entnimmt man:

- 1) für $\omega \ll 1/\tau_a, 1/\tau_b, 1/\tau_c$ ist $|\kappa| \approx j_1 \cdot R'/R_G$, $\text{arc } \kappa \ll \text{arc tg } 1$, $\text{arc } \kappa \approx 0$; d. h. für niedrige Frequenzen folgt der Wärmestrom i_1 und damit auch die Temperaturdifferenz an der Thermosäule vollständig und trägheitslos der Bestrahlung. Langsam schwankende Einstrahlungen werden amplituden- und phasenrichtig wiedergegeben.
- 2) für $\omega \gg 1/\tau_a, 1/\tau_b, 1/\tau_c$ ist $|\kappa| \ll j_1 \cdot R'/R_G$, $\text{arc } \kappa \gg 1$, $\text{arc } \kappa \approx \pi/2$; d. h. für sehr hohe Frequenzen folgt die Temperaturdifferenz über der Thermosäule nicht den augenblicklichen Schwankungen der Einstrahlung; bei hohen Frequenzen werden nur die Mittelwerte der Bestrahlung registriert.
- 3) für mittlere Frequenzen zwischen den eben betrachteten extremen Werten muß man erwarten, daß die Registrierung bei stark schwankender Bestrahlung die augenblicklichen Werte nicht richtig, sondern nach [23a] verkleinert und nach [23b] phasenverzögert wiedergibt.

Die Thermosäulenempfänger sind also je nach ihrer Konstruktion nur mehr oder weniger dafür geeignet, die bei kurzzeitigen Strahlungsänderungen auftretenden Momentanwerte richtig wiederzugeben; sie liefern jedoch exakt die besonders in der Klimatologie interessierenden Mittelwerte der Bestrahlungen, so etwa die stündlichen Strahlungssummen.

Zum Abschluß dieses Kapitels sollen die zahlenmäßigen Ergebnisse der Berechnungen wiedergegeben werden, die mit den angegebenen Formeln auf der Grundlage von abgeschätzten Werten für Wärmewiderstände und -kapazitäten der oben beschriebenen Empfänger-einheiten durchgeführt worden sind.

$$i_0(t) = j_0 + j_1 \cdot \exp(i\omega t) \quad [18]$$

Nach komplexer Durchführung der Rechnungen führt der Realteil der erhaltenen Beziehungen dann zu physikalischen Aussagen. Unter Verwendung der Bezeichnungen τ_a, τ_b, τ_c für die Lösungen von Gleichung [10] kann man die Differentialgleichung [7] auch in der Form schreiben:

Eine partikuläre Lösung gewinnt man durch den Ansatz

$$i_1(t) = \kappa \cdot \exp(i\omega t) + \delta', \quad \kappa \text{ komplex.} \quad [20]$$

Einsetzen von [20] und [18] in die Differentialgleichung [19] liefert die Beziehung

Die Wärmewiderstände werden im Fall der Wärmeleitung bestimmt nach der Formel

$$R = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{q},$$

im Fall der Wärmestrahlung nach

$$R = \frac{1}{4 \cdot \sigma \cdot T_G^3 \cdot \alpha_A^l \cdot F};$$

für die Wärmekapazitäten gilt:

$$C = c \cdot \varrho \cdot l \cdot q.$$

In diesen Formeln bedeutet

- | | |
|--|------------------------------------|
| λ : spezifische Wärmeleitfähigkeit | } des betreffenden Materialstückes |
| l : Länge | |
| q : Querschnitt | |
| c : spezifische Wärme | |
| ϱ : Dichte | |

weitere Bezeichnungen wie in 6.1.

Damit wird für das Empfangsblech E (Aluminium: $\lambda = 0,55 \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{grad}$, $c = 0,214 \text{ cal/g} \cdot \text{grad}$, $\varrho = 2,7 \text{ g/cm}^3$ (vergl. Tab. 2), $l = 0,3 \text{ mm}$, $q = 5,31 \text{ cm}^2$) in grober Annäherung:

$$R_E \approx 0,01 \text{ grad} \cdot \text{sec/cal}, \quad C_E \approx 0,1 \text{ cal/grad.}$$

Für die Thermosäule T (Wismutlegierung: $\lambda = 0,015 \text{ W/cm} \cdot \text{grad}$, $c = 0,0295 \text{ cal/g} \cdot \text{grad}$, $\varrho = 7,2 \text{ g/cm}^3$, $l = 0,40 \text{ cm}$, $q = 96 \cdot 0,023 \text{ cm}^2$, nach Angaben des Herstellers (17)), gilt entsprechend:

$$R_T \approx 50 \text{ grad} \cdot \text{sec/cal}, \quad C_T \approx 0,2 \text{ cal/grad.}$$

Für die Absorptionsschicht S (Ruß: $\lambda \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{grad}$, nach LINKES Meteorologischem Taschenbuch (24), $l = 0,05 \text{ mm}$, $q = 5,31 \text{ cm}^2$) wird abgeschätzt:

$$R_S \approx 5 \text{ grad} \cdot \text{sec/cal.}$$

Der Wärmewiderstand R' bezüglich der Ausstrahlung der Absorptionsschicht ($\alpha_A^1 = 0,97$, $\sigma = 8,12 \cdot 10^{-11}$ cal/cm² · min · grad⁴, $T_G \approx 293^\circ$ K, $F = 5,31$ cm²) ergibt sich angenähert zu

$$R' \approx 1400 \text{ grad} \cdot \text{sec}/\text{cal}.$$

Die weiteren Größen nach [6] haben demgemäß folgende abgerundete Werte:

$$\begin{aligned} R_S &\approx 1400 \text{ grad} \cdot \text{sec}/\text{cal}, & \beta_E &\approx 0,001 \text{ sec} \\ R_G &\approx 1450 \text{ grad} \cdot \text{sec}/\text{cal}, & \beta_T &\approx 10 \text{ sec} \\ & & \beta'_T &\approx 5 \text{ sec}. \end{aligned}$$

Mit diesen Zahlenwerten errechnet man als Lösungen der kubischen Gleichung [10] für die drei Zeitkonstanten die Werte

$$\begin{aligned} \tau_a &\approx 11 \text{ sec} \\ \tau_b &\approx 1,1 \text{ sec} \\ \tau_c &\approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ sec}. \end{aligned}$$

Die Koeffizienten A, B, C, D in [17] nehmen unter Berücksichtigung von [15], [16] die Werte an

$$\begin{aligned} A &\approx -0,95 i_0 \\ B &\approx -0,01 i_0 \\ C &\approx 0 \\ D &\approx +0,96 i_0, \end{aligned}$$

so daß sich schließlich für die Temperaturdifferenz an der Thermosäule angenähert ergibt:

$$\Delta T_T \approx 48 \cdot \left\{ 1 - 0,99 \cdot \exp(-t/11 \text{ sec}) - 0,01 \cdot \exp(-t/1,1 \text{ sec}) \right\} \cdot i_0 \quad [24]$$

Es ist jetzt zu diskutieren, wieweit durch diesen Ausdruck das tatsächliche Verhalten der Thermosäulenempfänger beschrieben wird.

Bei Bestrahlung des lupolengeschützten Empfängers mit der Intensität 1 cal/cm² · min wird in der Absorptionsschicht ein Wärmestrom von

$$i_0 = \tau_L \cdot \alpha_A \cdot F \cdot 1 \text{ cal}/\text{min} \approx 0,07 \text{ cal}/\text{sec}$$

erzeugt. Die Temperaturdifferenz ΔT_T erreicht nach [24] bei dieser Bestrahlung einen Endwert von

$$\Delta T_T(\infty) \approx 48 \cdot 0,07 \approx 3,3^\circ \text{ C}.$$

Da die Temperaturempfindlichkeit der Halbleiter-Thermosäulen bei Zimmertemperatur nach Abb. 6 rund 18 mV/grad beträgt, erhält man bei der Bestrahlungsstärke von 1 cal/cm² · min eine Urspannung von $3,3 \cdot 18 \approx 59$ mV an der Thermosäule. Dies ist ein Wert, der gut mit der experimentell ermittelten Empfindlichkeit der Empfänger von rund 65 mV/cal · cm⁻² · min⁻¹ im Einklang steht (vergl. 4.1., 4.2.).

Dagegen ist eine Übereinstimmung im zeitlichen Verhalten des Ausdrucks [24] mit den experimentellen Beobachtungen an den Empfänger-Einheiten nur teilweise gegeben (vergl. 3.3.). Die Zeitkonstante im ersten Summanden der Kurvendarstellung von Abb. 5 ist zwar praktisch identisch mit dem abgeschätzten Wert $\tau_a \approx 11$ sec, aber daneben tritt ein zweiter Summand auf, der eine wesentlich größere Zeitkonstante von rund 50 sec besitzt und der sich aus der beschriebenen einfachen Theorie nicht ableiten läßt. Daß bei der Auswertung der Messungen nach Abb. 5 der zweite Exponentialsummand von Gl. [24] nicht gefunden wurde, ist damit zu erklären, daß seine Amplitude und seine Zeitkonstante im Verhältnis zu den anderen sehr klein sind und daher aus dem Untergrund der Meßunsicherheit nicht hervortreten. Durch eine weitere Verfeinerung des zugrunde gelegten Ersatzschaltbildes Abb. 12, wie sie in 3.3. angedeutet wurde, läßt sich das Auftreten eines zusätzlichen Summanden mit einer größeren Zeitkonstanten zwar qualitativ verständlich machen, aber die zahlenmäßigen Berechnungen sind sehr kompliziert und umfangreich und führen schließlich zu Ergebnissen, die in quantita-

tiver Hinsicht nicht ganz befriedigend sind; daher soll auf ihre Wiedergabe im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden.

7. Ergebnisse

Es wird ein Strahlungsbilanzmesser für geophysikalische Untersuchungen beschrieben, der durch Verwendung zweier horizontaler, voneinander unabhängiger Empfängersysteme außer der Bilanzmessung auch eine getrennte Registrierung der von oben und der von unten einfallenden Strahlungsströme erlaubt. Die Empfänger sind durch Lupolen-Hauben vor Wind und sonstigen Witterungseinflüssen geschützt. Als Meßorgane werden neuartige Halbleiter-Thermosäulen aus einer Wismutlegierung verwendet. Der gesamte Meßkern des Gerätes ist wärmeisoliert im Innern eines Kunststoffgehäuses aufgehängt. Ein kräftiger Luftstrom durch das Gehäuse hält die Empfänger praktisch stets auf Lufttemperatur. Ein neues Belüftungssystem für die Hauben, bei dem diese durch Schlitze und schräggehende Kanäle aus verschiedenen Richtungen tangential angeblasen werden, sorgt dafür, daß die Temperatur der Hauben nicht wesentlich von der Luft- bzw. Gerätetemperatur abweicht; außerdem werden Tau, Regen und Schnee von den Hauben beseitigt.

Die Empfindlichkeit der Empfänger hat nach Auftragen eines weißen Fleckes auf die geschwärzte Empfangsfläche für kurzwellige und für langwellige Strahlungen denselben Wert; er liegt bei 65 mV/cal · cm⁻² · min⁻¹. Die Trägheit der Anzeige bei plötzlichen Bestrahlungsänderungen entspricht den Bedingungen der praktischen Anwendung der Strahlungsbilanzmesser. Innerhalb von 150 sec nach der Bestrahlungsänderung hat sich der Ausschlag dem Endwert bis auf weniger als 1% Abweichung genähert.

Die Empfänger zeigen eine Temperaturabhängigkeit der abgegebenen Meßspannung, die bei sehr genauen Messungen durch Korrektur der Werte nach einer angegebenen Kurve berücksichtigt werden muß; für normale Messungen genügt es, bei Temperaturen zwischen -10° C und $+30^\circ \text{ C}$ mit einer mittleren Empfindlichkeit zu rechnen, wobei Fehler zwischen höchstens $+4\%$ und -6% auftreten können. Eine Abhängigkeit der Meßwerte vom Luftdruck ist praktisch nicht vorhanden. Die quadratisch über alle Einfallswinkel der Strahlungen zwischen 0° und 85° gemittelte relative Abweichung der Anzeige vom Lambertschen Cosinusgesetz beträgt 2,4%.

Für die langwellige Eichung von belüfteten Strahlungsbilanzmessern wird ein neues Eichverfahren beschrieben, bei welchem als Infrarotstrahler eine rotierende Wasseroberfläche benutzt wird. Als mittlerer Meßfehler eines nach dieser Methode langwellig und nach dem bekannten Verfahren „vor Sonne“ kurzweilig geeichten Empfängers werden 4–5% angegeben.

Aus der oberen Hälfte eines Bilanzmessers wurde ein Gerät zur Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung entwickelt. Zur ausschließlichen Bestimmung der langwelligen Strahlungsströme wird eine geweißte Empfangsfläche verwendet. Ein elektrischer Vorschaltkasten erzeugt aus der Meßspannung bei konstant gehaltener Gerätetemperatur eine Spannung, die der atmosphärischen Gegenstrahlung direkt proportional ist; damit kann die Gegenstrahlung unmittelbar registriert werden.

In einem Anhang wird die Wirkungsweise der Thermosäulen-Empfänger theoretisch behandelt. Aus einem Ersatzschaltbild für die Wärmeströme in dem Gerät werden Beziehungen abgeleitet, die das experimentell beobachtete Verhalten der Empfänger gut beschreiben.

Die Untersuchungen wurden im Meteorologischen Observatorium Hamburg des Deutschen Wetterdienstes durchgeführt.

Herrn Professor Dr. R. SCHULZE möchte ich für die Übertragung und ständige Förderung dieser Arbeit sehr herzlich danken, ebenso dem Leiter des Sachgebietes Strahlung, Herrn D. W. COLLMANN, und allen Kollegen vom Observatorium für ihre vielfältigen Unterstützungen und wertvollen Anregungen.

Literatur

- (1) SUOMI, V. E.; KUHN, P. M.: An economical net radiometer. *Tellus* 10 (1958) S. 160—163.
- (2) KYLE, T. G.: A crystal radiometer with f. m. output. *J. Sci. Instrum.* 43 (1966) S. 750—753.
- (3) Meßergebnisse des Meteor. Observ. Hamburg für 1965, z. T. in Beilage z. *Mediz.-Meteor. Ber. des Meteor. Obs. Hamburg, Hamburg (monatl.)*; z. T. in *Solar Radiation and Rad. Balance Data, W. M. O., Leningrad (monatl.)*; z. T. unveröffentlicht.
- (4) LINKE, F.; MÖLLER, F.: *Atmosphärische Strahlungsforschung (Physik d. Atmosph. I)*, Handb. Geophysik, Bd. VIII, Berlin 1942—1961.
- (5) DIRMHORN, I.: *Das Strahlungsfeld im Lebensraum*. Frankfurt a. M. 1964.
- (6) COURVOISIER, P.; WIERZEJEWSKI, H.: Beiträge zur Strahlungsmeßtechnik. I: Die physikalischen Grundlagen der kalorischen Strahlungsmeßmethoden. II: Berechnung der Wirkungsweise kalorischer Strahlungsmeßinstrumente. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat, Ser. B* 1 (1949) S. 45—53, S. 156—199.
- (7) YANISHEVSKII, Y. u. D., *Trudy Glavn. Geofiz. Obs. Voejkova* 26 (1951) S. 88.
- (8) COURVOISIER, P.: Über einen neuen Strahlungsbilanzmesser. *Verhandl. Schweiz. Naturf. Ges.* 130 (1950) S. 152—153.
- (9) SUOMI, V. E.; FRANSSILA, M.; ISLITZER, N. F.: An improved net-radiation instrument. *J. Meteor.* 11 (1954) S. 276—282.
- (10) BAUMBACH, S., et al.: *Strahlungsumsatzmesser*. Sonderh. Techn. Mittl. Meteor. Amt NW-Deutschland, Hamburg 1950.
- (11) ALBRECHT, F.: Einige neue Meßgeräte für Ausstrahlung und Globalstrahlung. *Ann. Meteor.* 5 (1952) S. 97—121.
- (12) POHL, W.: Untersuchung an einem Strahlungsbilanzmesser, *Wiss. Mitt. Meteor. Inst. München* Nr. 2 (1954).
- (13) SCHULZE, R.: Optische Durchlässigkeit von Lupolen-H für Ultraviolett-Strahlung, sichtbares Licht und Infrarot-Strahlung. *Ann. Meteor.* 6 (1953/54) S. 127—128.
- (14) SCHULZE, R.: Über ein Strahlungsmeßgerät mit ultrarotdurchlässiger Windschutzhaube am Meteorologischen Observatorium Hamburg. *Geofis. pura e appl.* 24 (1953) S. 107—114.
- (15) FUNK, J. P.: Improved polythene-shielded net radiometer. *J. Sci. Instrum.* 36 (1959) S. 267—270.
- (16) Berichte I und II über die Vergleichsversuche an Strahlungsmeßgeräten beim Meteorologischen Observatorium Hamburg. Hamburg 1955 und 1956.
- (17) Datenblatt der Firma MCP Electronics, Alperton, England.
- (18) HARRIS, L.: The optical properties of metal blacks and carbon blacks. *Mass. Inst. Techn. & Eppley Foundat. f. Res., Monogr. Ser.* 1 (1967).
- (19) BÜTTNER, K. J. K.; KERN, C. D.: The determination of infrared emissivities of terrestrial surfaces. *J. geophys. Res.* 70 (1965) S. 1329—1337.
- (20) RAMSEY, W. Y.: Specular reflectance of paints from 0.4 to 40 μ . Manuscript of the U.S. Weather Bureau, National Weather Satellite Center, Meteorological Satellite Laboratory, Report No. 31, Washington, D. C. 1964.
- (21) AGGARWAL, S. A.; SWEETING, O. J.: Polyethylene: Preparation, structure and properties. *Chem. Rev.* 57 (1957) S. 665—742.
- (22) SCHULZE, R.: Über die Verwendung von Polyäthylen für Strahlungsmessungen. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. Ser. B* 11 (1962) S. 211—218.
- (23) QUENZEL, H.: Bestimmung der optischen Eigenschaften von Lupolen-H im Spektralbereich von 0,24 μ bis 15 μ und Entwicklung der benötigten Meßapparatur. Diplomarbeit Hamburg 1959.
- (24) BAUR, F.: *LINKES Meteorologisches Taschenbuch*. Neue Ausgabe, II. Band. Leipzig 1953.
- (25) RODSKJER, N.: A method to reduce the temperature influence on measurements with thermoelectric pyranometers. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. Ser. B* 13 (1965) S. 261—269.
- (26) COLLINS, B. G.: Determination of the cosine response of pyranometers. *J. Sci. Instrum.* 43 (1966) S. 837—838.
- (27) SCHIEDRUP-PAULSEN, H.: Some experiences with the calibration of radiation balance meters. *Arch. Geophys. Bioklimat. Ser. B* 15 (1967) S. 156—174.
- (28) AMBACH, W.; BESCHORNER, E.; HOINKES, H.: Über die Eichung des Strahlungsbilanzmessers nach R. SCHULZE (Lupolengerät). *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. Ser. B* 13 (1965) S. 76—95.
- (29) BOUDREAU, R. D.: Skin temperature of the sea as determined by radiometer. *Dept. of Oceanogr. and Meteor., Texas A&M Univ., A&M Proj., Ref. 65—15 T* (1965).
- (30) EWING, G.; McALISTER, E. D.: On the thermal boundary layer of the ocean. *Science* 131 (1960) S. 1374—1376.
- (31) CHARNELL, R. L.: Long-wave radiation near the Hawaiian islands. *J. geophys. Res.* 72 (1967) S. 485—495.
- (32) MÖLLER, F.: *Das Strahlungsdiagramm*. Reichsamt f. Wetterdienst, Berlin 1943.
- (33) YAMAMOTO, G.: On a radiation chart. *Sci. Rep. Tôhoku Univ. 5th Ser. Geophys.* 4 (1952) S. 9—23.
- (34) ELSASSER, W. M., *Atmospheric radiation tables*. *Meteor. Monogr.* 4 (1960) Nr. 23.
- (35) HÖHNE, W.: Ein Beitrag zur Strahlungsbilanz-Meßtechnik. *Abh. Meteor. Dienst DDR* 10 (1965) Nr. 74.
- (36) SKEIB, G.: Über das Verhalten von Strahlungsumsatzmessern im instationären Zustand. *Z. Meteor.* 10 (1956) S. 97—100.