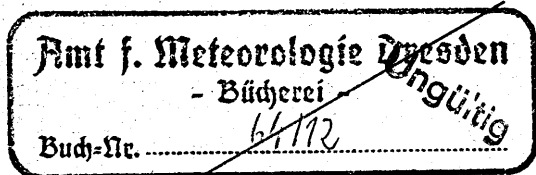


VERÖFFENTLICHUNGEN DES METEOROLOGISCHEN UND HYDROLOGISCHEN
DIENSTES DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK

Nr. 14

J. Georgi

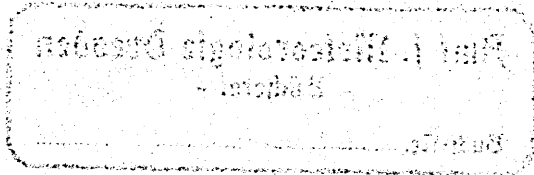
Kleines Absolut-Pyrheliometer



1954

AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

~~Deutscher Wetterdienst
Wetteramt Dresden
ungültig~~



Erschienen im Akademie-Verlag GmbH, Berlin W 8, Mohrenstraße 39
Lizenz-Nr. 100/103/53
Satz und Druck: (IV/5/1) Paul Dünnhaupt, Köthen, L 145/53
Bestell- und Verlagsnummer: 2022/14
Preis: DM 12.50
Printed in Germany

Inhalt

	Seite
1. Kurzer Überblick über die gebräuchlichsten Pyrheliometer, besonders für Feldgebrauch	7
2. Das Kalorimeterprinzip in der Strahlungsmessung	10
3. Das in sich eichfähige kleine Pyrheliometer Mod. I 1940/50 mit 5-kg-Panzer	13
4. Die Verwendung eines thermisch trägen Meßkörpers	16
5. Das verbesserte Mod. II von 1950/51 mit Thermosflasche	18
6. Die Wärmeausbreitung im Meßkörper	23
7. Der zu erwartende Gang der Erwärmung und Abkühlung des Meßkörpers	26
a) Die Abkühlungsfunktion	28
8. Was ergeben die Messungen zu diesen Erwartungen?	31
a) Die Meßmethode	31
b) Das Ergebnis: anfangs lineare Erwärmung	33
9. Zusatz betreffend die Meßgenauigkeit mittels des Chronographen	38
10. Versuch einer Deutung des un stetigen Verlaufes der Erwärmung	41
11. Erwärmungsversuche mit künstlichem Strahler	46
12. Zur Dreiteilung der Erwärmungskurve nach Abb. 12	51
13. Die Eichvorrichtung	53
14. Das Galvanometer	56
15. Das übrige Zubehör	
a) Parallaktisches Stativ	58
b) Heizvorrichtung	59
c) Einstellvorrichtung für das Sonnenbild	59
d) Die Hg-Thermometer	60
16. Die Bestimmung des Umrechnungswertes	66
a) Die spezifische Wärme des Meßkörpers aus Kupfer	60
b) Die Schwärzung und ihre Absorption für Sonnenstrahlung	61
c) Der Umrechnungswert (Eichwert)	67
17. Zusammenfassung	69
a) Messung mit Stoppuhr	70
b) Messung mittels Chronographen	70

Inhalt

c) Messung mittels Uhersignals	71
d) Auswertung und Verbesserungen	72
e) Verwendung zur Bestimmung des Trübungsfaktors nach Linke ..	72
Dank	72
Schrifttum	73

Anhang I. Bemerkung zur Auswertung der Abkühlungskurven

1. Endwert t_e	75
a) Nach dem Dufourschen Theorem	76
b) Aus der Neigung der Kurve	76
2. Empfindlichkeit (Regsamkeit) und Trägheitsbeiwert n. J. Hartmann	77
a) Rechenschema von J. Hartmann	77
b) Ableitung aus der Halbwertszeit	78
3. Berechnung der entsprechenden Exponentialkurve	79
Schrifttum zum Anhang I	80

Anhang II. Drei Zahlentafeln zur Auswertung von Strahlungsmessungen

Tab. 1. Umrechnung der Bemporad-Luftmassen M_{760} auf wahre, durchstrahlte Luftmasse $M = M_{760} \cdot \frac{B}{760}$	82
Tab. 2. Umrechnung der gemessenen Intensität J der Sonnenstrahlung auf J_m bei mittlerer Sonnenferne	82
Tab. 3. Zur Berechnung der wahren Orts- oder Sonnenzeit aus mittlerer Ortszeit und Zeitgleichung	83

Verzeichnis der Abbildungen

1. Kupferkugel-Pyrheliometer von 1939. S. 11.
2. Kleines Absolut-Pyrheliometer Mod. I 1940/50 mit 5-kg-Panzer. S. 14.
3. Erwärmung des Instrumentes an Strahlungstagen. S. 17.
4. Kleines Absolut-Pyrheliometer Mod. II 1950/51 mit Thermosflasche. S. 20.
5. Temperatúrausbreitung im Meßkörper bei Bestrahlung. S. 24.
- 5a. Erwärmung des Meßkörpers an gutem Strahlungstag. S. 28.
6. Normal-Abklingkurve für Mod. II; S. 29.
- 6a. im linear-log. Netz. S. 29.
7. Chronograph und Vorrichtung zum Erwärmen des Meßkörpers. S. 32.
8. Graphische Ausgleichung von je 10 Chronographen-Markierungen. S. 34.
9. Durchlaufzeiten für die einzelnen Skalenteile 1 bis 40,
Rechts entsprechende Darstellung wie in Abb. 8. S. 37.
10. Künstlicher Strahler für 100°C , als Schwarzer Körper ausgebildet. S. 46.
- 10a. Diffuse und gerichtete Strahlung im Pyrhelio- und Aktinometer. S. 47.
11. Meßreihe mit künstlichem Strahler bis 50 Skt. S. 49.
12. Skalenteil-Durchlaufzeiten der Meßreihe aus Abb. 11, roh und ausgeglichen. Kurve dreigeteilt, vom Anfang an linear, dann parabolisch, dann exponentiell. S. 49.
13. Verbesserung der Durchlaufzeiten für 5 Skt, wenn passive Lötstelle ihre Temperatur um 1.Skt in 60 s ändert. S. 50.
14. ₁ Neu-Eichung der Thermosäule, ₂ Kontrolle des inneren und äußeren Thermokreises, ₃ Vergleichung beider Hg-Thermometer. S. 54.
15. Lichtbild des Strahlungsmessers Mod. II und des parallaktischen Uhrwerkstatives. S. 58.
16. Spezifische Wärme von Kupfer nach verschiedenen Autoren. S. 61.
17. Verbesserung der gemessenen Strahlungsenergie in %, wenn die Innentemperatur des Instrumentes von 20°C abweicht. S. 61.

1. Kurzer Ueberblick über die gebräuchlichsten Pyrheliometer

Die beiden gebräuchlichen Arten von Absolut-Pyrheliometern sind das elektrische Kompensations-P. von K. ÅNGSTRÖM (1893)¹⁾ und das kalorische P. von ABBOT (Water-flow 1905, als Kompensations-Water-flow nach SHULGIN verbessert 1932; Water-stir 1912). Das ABBOTsche System wurde in Deutschland auf R. SÜRINGS Anregung durch F. HENNING u. C. TINGWALDT (PTR), sowie durch K. FEUSSNER als „Potsdamer Absolut-Pyrheliometer“ fortentwickelt. Diese Art von Meßgeräten ist besonders für große Strahlungslaboratorien geeignet, wo sie ausschließlich für grundsätzliche Untersuchungen und als Hauptnormal zum Anschluß der zahlreichen Aktinometer, d. h. Sekundär-Instrumente dient. Von diesen seien hier nur beispielsweise genannt: das „Silverdisk“-Aktinometer von C. G. ABBOT 1909, verbessert 1930; W. A. MICHELSONS Bimetallaktinometer 1908, verbessert von MARTEN 1912 und BÜTTNER 1928; das Quarzlin sen-Aktinometer von DORNO und THILENIUS 1920; Universal-Aktinometer von F. LINKE 1921; MOLL-GORCZYNSKI-Aktinometer 1923; LINKE-FEUSSNER-Panzer-Aktinometer 1932 u. a. m.

Den kalorischen Pyrheliometern gegenüber ist das elektrische Kompensations-P. von K. ÅNGSTRÖM sowohl als Hauptnormal des Strahlungsinstitutes wie auch als Feld-Instrument verwendbar. Bei ihm wird bekanntlich das durch K. ÅNGSTRÖM 1886/93 eingeführte, etwa gleichzeitig unabhängig von F. KURLBAUM (PTR) entdeckte und seither äußerst fruchtbar gewordene Prinzip benutzt, zwei identische Meßgeräte zu verwenden, deren eines den Strahlungsstrom der Sonne oder anderer Strahler in Wärme umsetzt, während der andere Zwilling beschattet, aber sonst unter den gleichen äußeren Bedingungen sich entweder abkühlt oder durch Elektroheizung solange meßbar erwärmt wird, bis die Sonnenwärme durch den elektrischen Strom gerade kompensiert ist²⁾.

¹⁾ Literaturhinweise auf die Standard-Veröffentlichungen wolle man aus W. MÖRIKOFERS Zusammenfassung von 1939 [14] entnehmen.

²⁾ Grundsätzlich nicht, praktisch nur wenig vom Kompensationsprinzip verschieden ist das wegen des einfacheren Aufbaues vordringende Prinzip

Bei den meisten Strahlungsmessern bereitet, wie später noch zu erörtern sein wird, die Bestimmung des während der Dauer der Einstrahlungsmessung erfolgenden Wärmeverlustes durch Strahlung, Leitung und Konvektion als Bedingung jeder Absolutmessung, ja schon seine Konstanz als Bedingung der Reproduzierbarkeit sekundärer Messungen erhebliche Schwierigkeiten. Dagegen eliminieren sich bei der K. ANGSTRÖMSCHEN Methode die Umweltfaktoren, die auf beide Zwillinge gleichzeitig wirken, ohne daß sie zahlenmäßig bekannt sein müßten. Dieses Prinzip ist daher auch, als schönes Beispiel einer konvergenten Entwicklung, auf die kalorimetrischen Absolutgeräte von ABBOT, HENNINGTINGWALDT und FALCKENBERG in neuerer Zeit angewendet worden.

Beim ANGSTRÖMSCHEN elektrischen Kompensations-Pyrheliometer ergibt sich der Umrechnungswert von dem für Temperaturgleichheit der Zwillinge (geschwärzte Pt- oder Manganin-Lamellen etwa $20 \times 2 \times 0,01 - 0,001$ mm) erforderlichen Strom i auf gleichzeitige Strahlenintensität der Sonne usw. bei genau gleicher Länge beider Lamellen:

$$Q = \frac{r i^2}{4,18 b a} \cdot 60 \text{ (cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}\text{)}$$

wobei r den spez. elektrischen Widerstand der Lamellen bedeutet, b die Breite, a den Absorptionskoeffizienten, und $4,18$ Joule = 1 gcal.

Aus der Schwierigkeit, selbst im Laboratorium Abmessungen und Widerstand der Lamellen hinreichend genau zu messen, ganz zu schweigen von dem Absorptionsvermögen; worüber noch zu sprechen sein wird, erhellt ohne weiteres, daß „der Angström“ bei Messungen im Felde nur solange absolute Strahlungswerte gibt, wie man sicher sein kann, daß die bei der Fertigung gemessenen Werte noch unverändert bestehen. Eine jahrzehntlange Konstanz

der Substitution. Eine einzige Empfangsfläche wird zuerst durch Strahlung, dann elektrisch geheizt, bis das die Fläche von hinten berührende Thermolement gleichen Ausschlag des Galvanometers liefert. Oder es erfolgt sogleich eine Eichung des Galvanometers in $\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ durch stufenweise veränderte elektrische Heizung. Nach Vorgang von W. GERLACH (Ann. Phys. 38, 1912, bei Bestimmung der Konstanten des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes), u. a. Substitutions-Pyrheliometer von T. E. AURÉN (Met. Z. 1935, 197) und F. E. VOLOCHINE (Protokoll Int. Strahl.-Komm. Oxford 1936, 36; Met. Rdsch. 5, 1952, 181). Schwierig ist Verwirklichung gleicher A u s s t r a h l u n g bei getrennter Messung und Eichung (s. a. S. 74).

der Schwärzung¹⁾, die außerdem zweifellos hygroskopisch ist, kann nicht erwartet werden, wird aber in praxi vorausgesetzt. Verf. sieht in der variablen Absorption von Wasserdampf die Ursache von Korrosionen der Zinkschicht, die wiederholt zum spontanen Abblättern der Schwärzung und dadurch zur Änderung des Umrechnungswertes beim Ängström-Pyrheliometer führte, so an dem Hauptnormal Nr. 70 in Upsala, s. Met. Z. 1930, 52—56, und an dem Ängström Nr. 128 des Met.-Physikal. Observatoriums Davos am 22. 10. 1924, gerade in einer Periode internationaler Vergleichsmessungen, s. Int. Strahl.-Kommiss. Oxford 1936, S. 35²⁾.

¹⁾ Nach [12] S. 636 besagte die Vorschrift, worauf sich allein K. ÄNGSTRÖMS Messungen bezogen, daß die identischen zwei Lamellen (ursprünglich aus Platin-, später aus Manganinblech) zuerst mit einer dünnen Zinkschicht überzogen wurden, die chemisch in Platinschwarz umgewandelt wurde. Diese Schicht von Platinmohr wurde vermittels einer besonderen Vorrichtung noch mit Kerzenruß überzogen.

Da nach Seite 64, die durch E. HASCHÉ [10 a] S. 56 f. untersuchte Absorption zweier frisch von der Herstellerin des „Ängström“, Fa. ROSE-Upsala gelieferter Lamellen sich als überraschend gering und weit schlechter als nach den alten Messungen von K. ÄNGSTRÖM erwiesen hat, müßte dringend festgestellt werden, bis zu welchem Jahre und Instrument noch die Schwärzung genau nach der o. a. Vorschrift ausgeführt wurde, — wann somit ein Sprung in der Größe des Absorptions-Koeffizienten als wahrscheinlich betrachtet werden darf.

Was die Bestimmung der Instrumentkonstanten durch Messung betrifft, um daraus den Eichfaktor absolut, d. h. ohne Zuhilfenahme irgendwelcher Vergleichsmessungen abzuleiten, so dürfte die Messung der wirksamen Länge und Breite der beiden Streifen, besonders aber die Kontrolle ihrer überall gleichmäßigen Dicke schon zu den schwierigeren physikalischen Messungen gehören, erst recht die Messung ihres Ohmschen Widerstandes ohne Störung durch die Klemmbacken, wozu K. ÄNGSTRÖM (a. a. O., Fig. 5) eine besondere, ingenieure aber empfindliche Meßanordnung erdacht hatte.

²⁾ In [22] S. 94. hat Verf. angeregt, eine Normal-Schwärzungsfarbe zu schaffen, die allen Strahlungsmeßgeräten mit ebenen Auffangflächen überall auf der ganzen Erde den gleichen effektiven Absorptionskoeffizienten sichert. Die Internationale Strahlungskommission würde sich ein besonderes Verdienst um die praktische Meßtechnik erwerben, wenn sie diese Frage bevorzugt in die Hand nehmen wollte. Diese Farbe muß fertig angesetzt in handlichen Tuben in der für den Gebrauch geeigneten Verdünnung von einer einzigen Stelle zu beziehen sein, da die Erfahrung gezeigt hat, daß auch bei Verwendung des gleichen Grund-Rezeptes beim Selbst-Ansetzen, schon wegen der sehr verschiedenen Absorption käuflichen Rußes, das Ergebnis unterschiedlich ausfallen kann. Vgl. hierzu auch Abschnitt 16, S. 61 ff.

Aber nicht nur die geringste Veränderung an einer der beiden Lamellen, sondern auch die im allgemeinen nicht wahrnehmbare Änderung eines Übergangswiderstandes im Pyrheliometer oder eines Kontakt-Potentials in dem die Temperaturgleichheit der Lamellen messenden Thermokreis, ebenso eine Konstanten-Änderung des den Heizstrom messenden Amperemeters würde eine Absolutmessung illusorisch machen. Die größte Gefahr besteht aber darin, daß man, etwa auf Forschungsreisen nach schwierigen Transporten solange an den ursprünglichen Eichwerten festzuhalten gezwungen ist, wie eine äußere Beschädigung nicht feststellbar ist, — während tatsächlich gewisse, äußerlich nicht erkennbare Veränderungen inzwischen bereits eingetreten sein mögen. Daher muß selbst ein so hervorragendes Gerät wie der Angström bei Messungen im Felde, d. h. auf Expeditionen, Bergbesteigungen usw. vorsichtshalber als Relativ-Instrument betrachtet werden, dessen Umrechnungswert erst nach der Rückkehr durch Vergleich mit einem Hauptnormal nachzuprüfen ist. Wird eine Veränderung des Eichwertes gefunden, so liegt eine besondere Aufgabe in der Feststellung, wann sie unterwegs eingetreten sein kann.

Hier besteht also eine offenkundige Lücke: Es fehlt ein Strahlungsmeßgerät für Feldgebrauch mit jederzeit nachprüfbarem Eichwert für Strahlungsforscher, Institute, Wetterwarten usw. fern von einem Strahlungsinstitut mit Hauptnormal; bedeutet doch der Transport eines geeichten Aktinometers in den meisten Fällen eine Gefahr für den Eichwert. Es fehlt vor allem für Forschungsreisen [1], um so mehr, je schwieriger und länger sie sind. Ein solches Gerät dürfte sogar weniger genau anzeigen, als ein Hauptnormal im strengen Sinne. Aber sein Eichwert müßte überall, auch unter den primitivsten Umständen im Expeditionszelt nachprüfbar oder nach etwaigen Reparaturen neu bestimmbar sein. Im folgenden sollen die darauf gerichteten Versuche und ihr Ergebnis dargestellt werden.

2. Das Kalorimeterprinzip in der Strahlungsmessung

Von vornherein empfahl sich das Kalorimeterprinzip, jedoch aus verschiedenen Gründen, so wegen des sicheren Temperaturausgleiches (18, S. 14) und wegen der Benutzung auch in den Polargegenden nicht als Wasser-, sondern als Metallkalorimeter. Eine Kupferkugel von etwa 1 kg Masse, hochglänzend poliert und

vernickelt, war in einem kleinen, mit hochglänzendem Aluminiumblech bekleideten Holzkasten auf isolierenden Spitzen gelagert, der übrige Raum zur Vermeidung von Konvektionsströmen mit Glaswolle ausgefüllt. Die Kugel (Abb. 1) war von vorne und

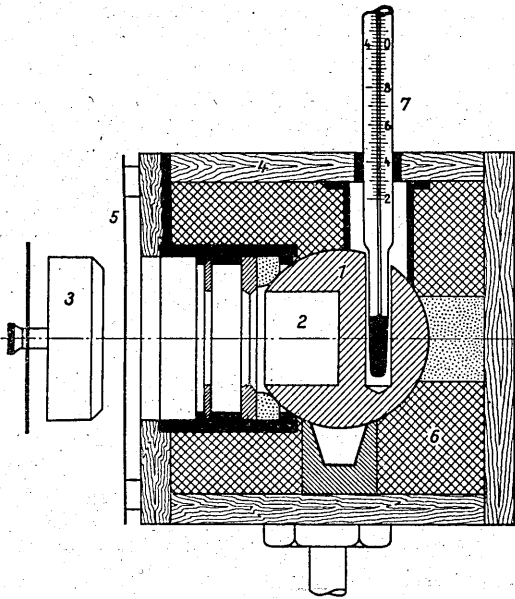


Abb. 1. Kupferkugel-Pyrheliometer von 1939. 1 = Kugel, 2 = Kalorimetertopf, 3 = Verschuß, 4 = Holzkasten mit blanker Al-Bekleidung, 5 = äußerer Strahlungsschutz, 6 = Glaswolle zur Vermeidung von Konvektion, 7 = Thermometer, dessen Strahlungsschutz hier nicht dargestellt wurde.

oben angebohrt: letztere Bohrung erlaubte, ein empfindliches Hg-Thermometer einzuführen. Der thermische Kontakt wurde durch Hg-Amalgam hergestellt. Vorne war ein Zylinder von 20 mm Durchmesser und ebensolcher Tiefe ausgedreht und geschwärzt, davor befand sich eine aus starkem Metall ausgedrehte Blende, die von der Kugel sorgfältig isoliert war. Vor der hochglänzenden Vorderfläche des Kästchens befand sich ein ebensolcher äußerer Strahlungsschutz. In gleicher Weise war der zum Verschuß der Eintrittsöffnung dienende Deckel sorgsam isoliert.

Gemessen wurde die Erwärmungsgeschwindigkeit der Kugel, woraus sich zusammen mit bekannter Masse und spezifischer Wärme die dem Strahlungsstrom entnommene Wärmeenergie in $\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ergab. Für die Durchführung von Versuchsmessungen 1939/40 schulde ich meinem damaligen Mitarbeiter, jetzigen Nachfolger Dozent Dr. habil. S. BAUMBACH besonderen Dank. Leider zeigte sich, daß auch bei verschlossener Eintrittsöffnung, ja selbst durch Seiten- und Rückwand des Kästchens hindurch die Kugel von Strahlungswärme der Sonne erreicht wurde, so daß trotz des hohen Wasserwertes eine noch bessere Abschirmung sich als notwendig erwies, was Veranlassung zu umfangreichen Isolations-Versuchen gab. Zugleich war aber bereits klar geworden, daß mit dieser Kugel niemals routinemäßige Messungen der Sonnenstrahlung gelingen würden. Die Messung der Erwärmungsgeschwindigkeit sollte freilich nur im Anfang der Erwärmung erfolgen, wo man noch vom Einfluß der Konvektion frei zu bleiben hoffen durfte. Die Messung mußte um so fehlerfreier sein, je besser die Abschirmung gelingen würde. Doch für den Rückgang auf die Außentemperatur forderte der große Wasserwert der Kugel im Verein mit ihrer guten Isolation, je nach der gewünschten Angleichung, 15—30 min, während normale Serienmessungen im Abstand von etwa 2 min ausgeführt zu werden pflegen. Andererseits konnte auch die verbreitete Methode des Abwartens eines Gleichgewichtszustandes zwischen Einstrahlung und gleichzeitigem Verlust nicht verwendet werden, weil die Erwärmungszeit der massiven Kupferkugel dafür viel zu lang, und ihre Einstellung auf den Augenblickswert der Strahlung viel zu träge war¹⁾. Hierdurch war der Weg für die weiteren Versuche vorgeschrieben: a) stärkere Panzerung gegen ungewolltes Eindringen der messenden Strahlung und Einwirkung der Umgebung; b) rasche Zurückführung der Temperatur des Meßkörpers auf diejenige der Um-

¹⁾ Lange, nachdem dieses Kupferkugel-Strahlungskalorimeter eben wegen dieser praktischen Unbequemlichkeit bereits dem Museum einverleibt war, stieß Verf. auf einen Bericht von J. MAURER, dem verdienten Schweizer Strahlungsforscher [6] und mit dessen Hilfe auch zu weiterem Schrifttum [5, 7], wonach bereits in den achtziger Jahren derartig schwere Kupferkörper sowohl für Ein- wie Ausstrahlung von H. F. WEBER, unterstützt durch C. CHRISTIANSEN, und später von J. MAURER erfolgreich verwendet wurden. Man muß die experimentelle Gewandtheit und Ausdauer jener Forscher bewundern, die sich durch die uns zu un bequem erscheinende lange Wiederangleichung an die Lufttemperatur nicht entmutigen ließen.

gebung: nach jeder Messung sollte der Meßkörper mit den ihn umgebenden Metallteilen des Instrumentes in thermischen Kontakt gebracht werden; c) Hierfür war wesentliche Verringerung der Masse des Meßkörpers notwendig, was einerseits rascheren Temperaturanstieg, also größere Empfindlichkeit mit sich bringen würde, andererseits eine noch wesentlich bessere thermische Isolierung in der Meßstellung erforderte.

3. Das in sich eichfähige kleine Pyrheliometer Mod. I 1940/50 mit 5 kg-Panzer

Abb. 2 zeigt das Ergebnis des zweiten Versuches: das kleine, in sich eichfähige Pyrheliometer Mod. I, begonnen 1940, beendet 1950. Ein an der Vorderseite geschwärtzter, durch Eindrehen spitzwinkliger Rillen hinsichtlich seiner Absorption verbesserter Meßkörper 1 kann durch die Öffnung in der Deckelplatte 7 und den Verschuß 8 von der Sonnen- und anderen Strahlung getroffen werden. Er wird durch drei starke, straff gespannte, durch besondere Schrauben 4 regelbare Seidenfäden thermisch ausgezeichnet isoliert und auch bei jeder Neigung des Instrumentes unbeweglich gehalten. Ein oder mehrere Thermoelemente sind in feine Bohrungen eingelassen. Die passiven oder „kalten“ Lötstellen befinden sich im Inneren des vielfach schwereren, ebenfalls aus Kupfer gearbeiteten „Ausgleichskörpers“ 2, dessen jeweilige Temperatur vermittle des empfindlichen Hg-Thermometers 5 gemessen wird.

Durch 3 ist die mechanische Vorrichtung angedeutet, wodurch nach Beendigung jeder Messung der Meßkörper 1 auf den Ausgleichskörper gepreßt wird. Die notwendige Federung wird bewirkt durch die Elastizität der Seidenfäden und der sie stützenden Stahldrahthalter oberhalb von 4. Der von draußen ins Innere führende Hebel ist luftdicht eingeschliffen, damit auch Messungen im Vakuum möglich sind. Doch kommt dieser Fall, wobei der Wärmeverlust des Meßkörpers — auf Strahlung und molekulare Leitung beschränkt — ein Minimum sein würde, für die normalen Strahlungsmessungen nicht in Betracht. Daher ist bei der endgültigen Ausführung auf diese Komplikation verzichtet worden. An diesem Hebel ist innen ein kleines Zahnrad befestigt, das in ein größeres eingreift und vermittle eines Steilgewindes die parallele Hebung und Senkung des Meßkörpers bewirkt.

Die Panzerung gegen Umwelteinflüsse, ein massiver Messingzylinder, wiegt 5 kg, so daß von der Seite und von hinten der Meß-

körper als gegen jeden Umwelteinfluß geschützt erachtet wurde. Es erschien besonders wichtig, auch das Eindringen jeder nicht zur eigentlichen Messung notwendigen Wärmemenge durch die vordere Eintrittsöffnung zu vermeiden. Seit S. P. LANGLEY begrenzt man den Querschnitt des zur Messung bestimmten Strahlungsstromes durch das nach ihm benannte Blendensystem mit

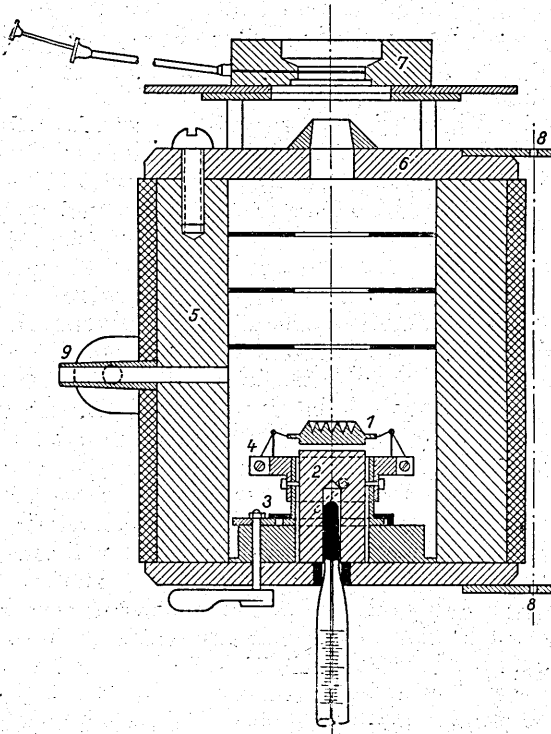


Abb. 2. Kleines Absolut-Pyrheliometer Mod. I 1940/50. 1 = Meßkörper mit tiefen Rillen, an Seidenfäden aufgehängt, die in der Abbildung straff gespannt zu denken sind. 2 = Ausgleichkörper mit eingesetztem Thermometer. 3 = Getriebe zum axialen Bewegen des Meßkörpers. 4 = justierbare Halterung der Haltefäden. 5 = Metallgehäuse (5 kg), außen vernickelt, poliert und isoliert, mit 6 = Deckel- und entsprechender Bodenplatte. 7 = Verschuß. 8 = Visier. 9 = Rohrstopfen zum Evakuieren (dann 6 durch Flußspat-Fenster verschlossen).

von außen nach innen abnehmender Öffnung. Die letzte, dem Meßorgan unmittelbar vorgesetzte Blende bildet den für die Messung maßgebenden Querschnitt. Hierbei werden die konzentrisch überstehenden Ränder aller Blenden erwärmt, und soweit sie nicht reflektiert wird, geht diese Wärme in das Instrument über. Schon nach Versuchen F. KURLBAUMS 1899 [8] sind besonders Strahlungsreflexe an der inneren Fläche der dem Meßorgan nächsten Blende als gefährliche Fehlerquelle anzusehen; dies deckt sich mit ganz unabhängigen Rechnungen und Versuchen von H. WEICKMANN jr. 1939 [8a]. Da noch zu zeigen sein wird, daß die thermische Konstanz der hier verwendeten Panzerung trotz ihres bereits unbequemen Gewichtes noch nicht befriedigte, sollte als vermeidbare Erwärmungsquelle die Bestrahlung der Langley-Blenden überhaupt umgangen werden, indem die den Durchmesser des Strahlungsstromes begrenzende Blende ganz nach außen gelegt wurde. Die zwischen ihr und dem Meßkörper befindlichen Blenden erhalten keine Sonnenstrahlung, sondern fangen nur diffuse Himmels- und Streustrahlung ab und bilden Windschutzkammern.

Als Nachteil dieser Anordnung kann erscheinen, daß am Rand der jetzt bis etwa 12 cm von dem Meßkörper abstehenden Eintrittsblende Beugungserscheinungen entstehen, die vielleicht nicht mehr vom Meßkörper erfaßt werden. Da aber die Energie dieser Diffraktionserscheinungen nach außen hin sehr schnell auf kleinste Werte absinkt, genügt deswegen eine Vergrößerung des Durchmessers der Auffangfläche um 1—2 mm. Dies ist ohnehin erforderlich, da bei dieser Blendenanordnung die Auffangfläche groß genug sein muß, um auch bei kleinen Einstellungsungenauigkeiten und trotz der Wanderung der Sonne während einer Messung von etwa 2 min Dauer den vollen Strahlungsstrom stets zu erfassen. Die Bewegung des Strahlenbündels auf dem Meßkörper beträgt 1,06 mm/min. Die Unbequemlichkeit einer Nachführung nach jeder Messung erscheint gering gegenüber der Fernhaltung jeder entbehrlichen Erwärmung der Innenteile des Instrumentes. Im übrigen lag bei Mod. I die Eintrittsöffnung an der Spitze eines polierten Metallkonus, um etwaige Temperaturstrahlung ins Innere infolge Erwärmung des Blendenrandes so gering wie möglich zu halten.

4. Die Verwendung eines thermisch trägen Meßkörpers

Prof. W. J. H. MOLL hatte 1913 die nach ihm benannte Thermosäule konstruiert (deren Prinzip übrigens bereits 1895 von P. CERMAK-Graz angegeben und sowohl für Messung geringer Schwankungen der Lufttemperatur, wie für ein Aktinometer verwirklicht worden war, Wied. Ann. 56, 1895, 353—59), wobei die thermische Trägheit der strahlungsabsorbierenden Organe aufs äußerste verringert war und dadurch die zur thermischen Stabilisierung der passiven Lötstellen erforderliche thermisch träge Masse ebenfalls auf wenige Gramm verkleinert werden konnte. Daher muß begründet werden, weswegen hier wieder als scheinbarer Rückschritt eine so schwere, thermisch träge Masse angewendet wurde. Entscheidend ist, daß das *Verhältnis* des Wasserwertes der bestrahlten Haardrähte oder Lamellen zu demjenigen der passiven Lötstellen samt träger Masse möglichst klein ist, etwa 10^{-3} oder weniger. Bei CERMAK und MOLL betragen die beiden Massen für ein einfaches Thermoelement mg und g. Wenn aber hier aus anderem Grunde, nämlich um die Abkühlungsfunktion mit größerer Sicherheit festzustellen, das aufnehmende Organ selbst eine Masse der Größenordnung 5 g erhalten mußte, ergab sich hiernach etwa 5 kg als notwendige träge Masse. Sie mußte auf jeden Fall so groß sein; daß ihre Temperaturänderung während einer Einzelmessung, also etwa während einer Minute, gegenüber der gleichzeitigen Erwärmung des Meßkörpers zu vernachlässigen sei oder wenigstens nur einen kleinen Korrektionsbetrag ergebe. Denn in sie ist die passive Lötstelle des Thermoelementes eingebettet, die also völlig an ihren Temperaturänderungen teilnimmt. Würde während einer Messung, d. h. während der Zeit, während derer Meß- und Ausgleichskörper thermisch nahezu vollständig getrennt sind, die träge Masse mit Ausgleichskörper und passiver Lötstelle um einen kleinen Temperaturbetrag erwärmt werden, so würde um genau denselben Temperaturbetrag die Erwärmung des Meßkörpers zu niedrig gemessen werden. Es muß also jede einzelne Messung für diejenige Geschwindigkeit der Temperaturänderung der passiven Lötstelle korrigiert werden, wie sie gerade in diesem Augenblick vorhanden ist.

Mehrmonatliche Messungen zeigten indessen, daß die Temperaturstabilität der schweren Panzerung noch immer nicht genügte, um den Temperaturgang während der einzelnen Messung selbst

von nur 30 s Dauer zu vernachlässigen. Er wurde bei zahlreichen Ablesungen mitgemessen und für je 10 min bestimmt; ein Kurvenblatt ließ die Verbesserung entnehmen, die der betreffenden Meßdauer für 5 Skalenstriche entsprach. Leider wechselte unter dem Einfluß von Strahlung, Lufttemperatur und Wind die Geschwindigkeit der Temperaturänderung recht stark, wodurch auch die

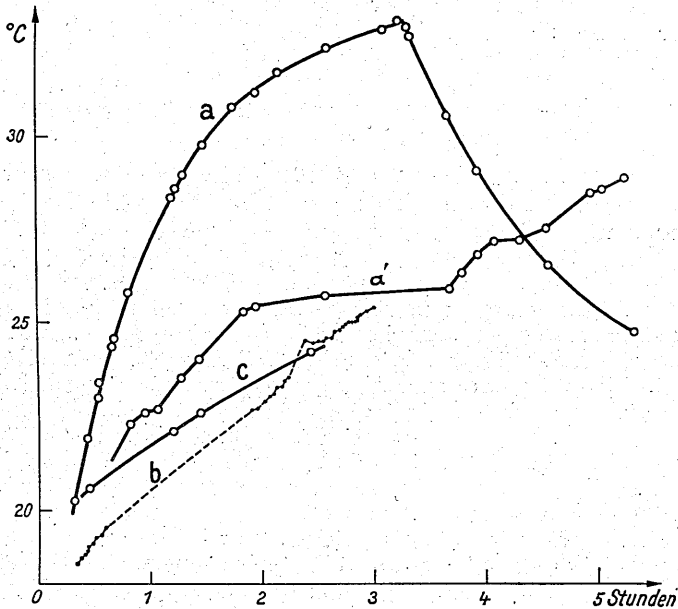


Abb. 3. Erwärmung des Instrumentes. a = Mod. I im Freien erwärmt, im Zimmer abgekühlt (6. 6. 1950). Lufttemperatur im Freien etwa 29°, im Zimmer 22° C. a' = dasselbe bei durch ci zeitweise verringerter Einstrahlung, Luft 22° C (3. 6. 1950). b = dasselbe Instrument außen mit Baumwolle und Al-Folie isoliert (12. 6. 1950). c = Mod. II (22. 7. 1950).

Verbesserung mühsamer wurde, als man für ein Gebrauchsinstrument gewünscht hätte. Abb. 3 zeigt unter a) die Erwärmung des Gerätes mit hochglänzender Außenseite an einem besonders warmen Strahlungstage, unter a') dasselbe an einem Tage mit wechselnd cirröser Bewölkung; unter b), nachdem das Gerät mit mehreren Lagen dicker Baumwoll-Dichtungsschnur und diese mit Alu-

miniumfolie umwickelt worden war. Man erkennt zwar eine erhebliche Verbesserung, doch bleibt die unerwünscht starke Abhängigkeit von den Umweltfaktoren, wie man besonders am letzten, oberen Teil der Kurve erkennt. Kurve c) stellt die innere Erwärmung des daraufhin neu konstruierten Modells II dar, wobei unter Umgehung einer Metallmasse Meß- und Ausgleichskörper in einer Thermosflasche untergebracht sind, durch welches Hilfsmittel also ein viel leichter Ausgleichskörper doch thermisch träger gemacht wurde.

5. Das verbesserte Mod. II von 1950/51 mit Thermosflasche

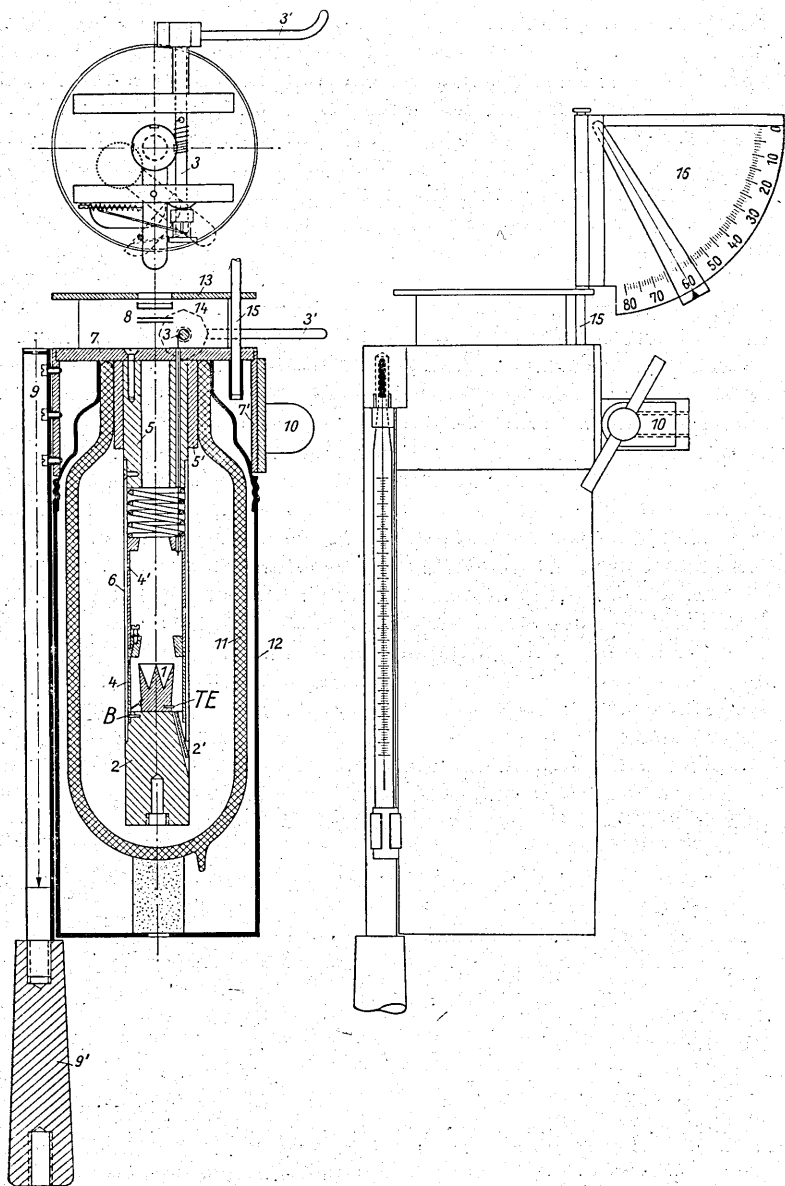
Abb. 4 zeigt das nach den Erfahrungen mit dem in Abschnitt 3 geschilderten Gerät entwickelte Modell II (1950/51)¹⁾. Neben den bisher berührten physikalischen Fragen ließ es auch die wirtschaftliche Überlegung erwünscht erscheinen, den recht erheb-

¹⁾ Obwohl dieses Instrument von verschiedenen Seiten für den praktischen Gebrauch gewünscht wurde, wird man verstehen, daß es zuvor in eingehenden Versuchsreihen auf etwa mögliche Fehlerquellen untersucht werden sollte. Hierbei haben sich mancherlei Abänderungen ergeben, mit denen z. Z. noch experimentiert wird, ohne daß dadurch freilich das Grundprinzip geändert worden wäre. Die Versuche betreffen u. a. die Verwendung eines erheblich schwereren Meßkörpers von beiläufig 18 g statt 7 g bei der beschriebenen Ausführung; mechanische Erleichterungen für den Gebrauch, so die Auswechselbarkeit des Thermoelements mittels Schrauben an Stelle der bisherigen Lötung; leichteren Ausbau von Meß- und Ausgleichskörper, etwa zum Zwecke der Neuschwärzung; schließlich den Einbau einer ringförmigen Thermosäule, um mit dem gleichen Instrument auch zwischendurch die Intensität der Himmelsstrahlung in einem Gebiet von etwa 15° Radius um die Sonne (aber ohne diese selbst) zu erfassen, — mit ähnlichem Zweck aber einfacheren Mitteln als die von F. LINKE [23] vorgeschlagene Verwendung zweier Aktinometer mit verschieden großem Öffnungswinkel, oder die Verbindung eines besonderen Pyranometers für Sonnenumgebung mit dem Pyrheliometer nach ABBOT [24], oder die Verwendung eines Aktinometers mit abgeblendeter Sonnenscheibe nach N. N. KALITINE [25]. Ferner wird versucht, unter Verwendung desselben Galvanometers die Temperatur des Ausgleichskörpers statt durch ein Thermoelement mit einem Halbleiter-Widerstand zu überwachen. Damit nicht eine besondere Stromquelle hierfür erforderlich ist, wird die benötigte Spannung von einer, vorne in den Instrumentenkopf eingebauten Großflächen-Thermosäule geliefert. — Schließlich ist vorgesehen, die Nachführung des Pyrheliometers im Stundenwinkel durch den Motor des Chronographen besorgen zu lassen.

lichen feinmechanischen Aufwand des Mod. I im Interesse eines niedrigeren Preises bei etwaiger Serienfertigung herabzusetzen, soweit dies ohne Beeinträchtigung der Wirkung, insbesondere auch der physikalischen und mechanischen Übersichtlichkeit möglich erschien. Wenn der eine oder andere Strahlungsphysiker oder Instrumentenbauer meinen sollte, man sei in der Vereinfachung vielleicht schon zu weit gegangen, so möchte die Einstellung, die Verf. bei seinen Instrumenten-Entwicklungen allgemein verfolgte, nämlich nur denjenigen technischen Aufwand als berechtigt zu betrachten, der durch den Verwendungszweck des betr. Gerätes notwendig gemacht wurde, hieraus erkannt werden. Er betrachtet nicht als einen Rückschritt, sondern als einen Erfolg, daß die Beschränkung auf das wirklich Wesentliche ihm erlaubte, das erste Instrument der neuen Ausführung fast ganz mit Hilfe einer primitiven Drehbank selbst herzustellen.

Wie in Abb. 2 ist wieder 1 der Meßkörper, diesmal mit einer einzigen, spitzwinkligen Rille¹⁾, 2 der Ausgleichkörper mit Bohrungen für die „kalte“ Lötstelle sowie für ein Hg-Thermometer. Während in Abb. 2 die Meßstellung, d. h. der Meßkörper frei schwebend dargestellt war, gibt Abb. 4 die Ruhestellung wieder, wobei der Meßkörper auf den Ausgleichkörper gepreßt wird. Die Bewegung des Meßkörpers um etwa 5 mm nach oben erfolgt durch eine Welle 3 mit kleinem Handhebel, wobei sich eine kräftige Seidenschnur aufwickelt, die das Rohr 4, worin wieder der Meßkörper durch drei Seidenfäden regelbar verspannt ist, gegen eine Spiralfeder nach oben zieht. Gleichzeitig damit wickelt sich auf einer mit Reibung von der Achse 3 mitgenommenen Rolle eine zweite Seidenschnur auf, die den Verschuß öffnet und bei Rückgang des Meßkörpers in die Ruhestellung wieder schließt.

¹⁾ Das bereits auf S. 13 erwähnte Eindrehen spitzwinkliger Rillen in die Auffangfläche erfolgte, um durch den Zwang zu mehrfachen Reflexionen einen größeren Bruchteil der auffallenden Strahlung zur Absorption zu bringen. Nachträglich konnten wir feststellen, daß E. SCHMIDT [18, S. 11] bereits 1927 die Emission (also auch die Absorption im umgekehrten Strahlengang) spitzwinkliger Keilnuten besonders groß fand „wegen der Erhöhung der Emission durch die vielfachen Reflexionen“, — in der uns nur interessierenden Richtung normal zur Auffangfläche. Trotzdem sind weitere Versuche im Gange, um vielleicht durch andere Oberflächenformen noch näher an die Strahlung des Schwarzen Körpers heranzukommen und im gleichen Maße von der unterschiedlichen Absorptionskraft der verschiedenen Schwärzungen unabhängiger zu werden (s. auch S. 74).



Die Erwärmung des Meßkörpers wird gemessen durch ein Thermoelement in feiner Bohrung, dessen passive Lötstelle innerhalb des Ausgleichkörpers liegt („innerer Thermokreis“). Dessen Temperatur, die nach dem Vorhergehenden jederzeit bekannt sein muß, wird mit Hilfe eines zweiten Thermoelementes gemessen („äußerer Thermokreis“), dessen aktive Lötstelle an ihn angepreßt ist, während die zugehörige passive Lötstelle in einem am Kopf des Instrumentes befindlichen Metallklotz liegt, dessen Temperatur durch ein in ihn eingelassenes Thermometer gemessen wird, siehe Abb. 4 rechts.

Der ganze Innenteil, d. h. das eigentliche Meßgerät ist mittels eines kräftigen Hohlkörpers 5 aus Isolierstoff an der Grundplatte 7 befestigt. Er wird ganz von einer gewöhnlichen, überall käuflichen $\frac{1}{2}$ l-Thermosflasche umgeben, die einfach mittels einer Kork- oder Gummizwischenlage auf den Teil 5 aufgeschoben und ebenso leicht wieder abgezogen werden kann und durch die gewöhnliche, jede solche Flasche umgebende Blechhülle festgehalten und geschützt wird. Dies ist dadurch möglich, daß das zugehörige, mit dem bekannten, eingepreßten Gewinde versehene Oberteil der Blechhülle im Kopfteil 7 und 7' befestigt wurde. Der einzige Nachteil dieser unbezweifelbaren Verbesserung ist darin zu sehen, daß nun die Feststellung der Temperatur des Ausgleichkörpers nicht mehr, wie bei Mod. I, durch ein hinten eingestecktes Hg-Thermometer möglich ist, sondern durch den äußeren Thermokreis erfolgen muß. Demgegenüber ist die Zerbrechlichkeit der Thermosflasche unerheblich, da sie sofort durch eine Ersatzflasche austauschbar ist. Aber selbst wenn keine Thermosflasche mehr zu Gebote steht, können die Messungen trotzdem fortgesetzt werden:

Abb. 4 Kl. Abs.-Pyrheliometer Mod. II 1950/51. 1 = Meßkörper. 2 = Ausgleichskörper mit Thermometerbohrung. 2' = Aussparung für passive Lötstelle, durch Kupferkeil verschlossen. 4 = Aufhängung des Meßkörpers an drei Seidenfäden mit Spanschrauben. Rohr 4 mit Verlängerung 4' mittels Welle 3 und Seidenschnur gegen Spiralfeder nach oben zu bewegen (Meßstellung). 5 = Isolierstück. 6 = Tragrohr, an Kopfstück (7 = Kopfplatte, 7' = Außenrohr) befestigt. 8 = Verschluss, mit Welle 3 gekuppelt. 9 = Visier. 10 = Befestigung. 11 = Thermosflasche. 12 = deren Blechgehäuse. 13 = äußerer Strahlungsschutz. 14 = FarbfILTER. 15 = Achse für den rechts in Ansicht dargestellten Pendel-Höhenmesser. 16, 3' = Handgriff zum Drehen der Aufzugswelle 3. 5' = Gummidichtung, 9' = Handgriff zum Nachführen. TE = feine Bohrung für die aktive Lötstelle des Thermoelementes. B = Bohrung im Ausgleichkörper, die nach S. 54 beim Ausbau des Meßkörpers wichtig ist. Vgl. auch das Lichtbild Abb. 15.

Dann wird ein Hg-Thermometer in den Ausgleichskörper eingesetzt, wozu in der Blechhülle bereits eine Öffnung vorgesehen wurde; der notwendige Wärmeschutz wird bewirkt, indem man die Blechhülle mit Watte, Wollstrümpfen usw. ausstopft. Die Verwendung eines Thermosgefäßes zum Schutz von Strahlungsempfängern ist schon altbekannt (z. B. ABBOTS Water-flow-Pyrheliometer und dessen Abarten; G. FALCKENBERG, Experimentelles z. Absorpt. u. Emiss. d. atm. Eigenstrahlung dünner Luftschichten, Met. Z. 1931, 135).

Ziffer 9 bezeichnet das Visier, das durch ein U-Profil von der Länge des ganzen Instrumentes gebildet wird, um dadurch die Einstellung auf Sonne zu verfeinern. Am Hinterende, wo das Sonnenbildchen durch die vordere Lochblende auf einem weißen Felde mit Einstellmarke entworfen wird, kann ein Handgriff aufgeschraubt werden, um das Gerät der Sonne nachzuführen, wenn keine Feinschraube für den Stundenwinkel zu Gebote steht. 10 ist das Verbindungsstück zum parallaktischen Stativ. Für die Einstellung auf wechselnde Sonnen-Deklination ist zunächst keine Feinbewegung vorgesehen. Sie erfolgt durch entsprechende Verstellung um dieses Gelenk, das danach durch einen kräftigen Handgriff wieder festgestellt wird.

Unter dem der Kopf- oder Grundplatte 7 vorgesetzten Strahlungsschutz 13 befinden sich außer dem bereits genannten Verschluss zwei „Potsdamer Normalfilter“ [14, 19] RG 2 und OG 1, die ich dem Entgegenkommen des Meteorologischen Hauptobservatoriums in Potsdam verdanke, sowie die Anschlüsse für das Galvanometer. Bisher wurden zum Umschalten auf die beiden Thermokreise die Stecker des Galvanometeranschlusses umgesteckt; stattdessen kann ein Umschalter eingebaut werden.

Gegenüber den mehr als 5 kg des ersten Gerätes wiegt Mod. II nur noch etwa $1\frac{1}{2}$ kg. Der Öffnungswinkel, gemessen von der Mitte des Meßkörpers aus, beträgt 5° oder in der üblichen Angabe $2 \times 2\frac{1}{2}^\circ$. Die hierbei mitgemessene Himmelsfläche verringert sich gegenüber der üblichen Öffnung von $2 \times 5^\circ$ auf etwa $\frac{1}{4}$, von 78 auf 19 Quadratgrade.

Zum Abschluß der Beschreibung soll noch angedeutet werden, weswegen der Meßkörper aus Kupfer anstatt aus dem die Wärme noch besser leitenden Silber gefertigt wurde: Zwar besitzt Kupfer nur 90% des Wärmeleitungsvermögens von Silber. Andererseits beträgt seine spezifische Wärme 165% von derjenigen des Silbers. Wenn also Meßkörper aus beiden Metallen gleiche Abkühlungs-

geschwindigkeit haben sollten, so müßte der silberne um mehr als die Hälfte schwerer, also auch erheblich größer ausfallen, wö-
 durch die Wärmeleitung von der Auffangfläche bis zur Basis und
 zum Thermoelement tatsächlich längere Zeit in Anspruch nehmen
 würde, als in dem kleineren, kupfernen Meßkörper, bei gleichem
 Querschnitt beider um die Hälfte mehr! Den einzigen wirklichen
 Vorteil bedeutete die Verwendung von Silber durch die geringere
 Änderung der spezifischen Wärme mit der Temperatur (zwischen
 0° und 100° C Silber 2,2%, Kupfer 4,5%). — Wo es dagegen auf
 schnellste Wärmeleitung, also auf einen hohen Temperaturlei-
 tungskoeffizienten ankommt, etwa bei der Herstellung großflächi-
 ger Thermosäulen, ist Silber mit 1,73 (cm^2/s) dem Kupfer mit 1,16
 weit überlegen, bei kurzen, „regsamen“ Thermosäulen auch schon
 durch seine geringere spezifische Wärme allein¹⁾.

6. Die Wärmeausbreitung im Meßkörper

Es muß zugegeben werden, daß über die Ausbreitung der
 Wärme im Meß- und Ausgleichkörper und ihre eventuelle Stö-
 rung durch die besondere Formgebung, sowie durch die einge-
 führten Thermolemente und Thermometer keine exakte Vorstel-
 lung besteht. Die theoretische Schwierigkeit wurde bereits von
 O. CHWOLSON [10] S. 163 f. betont und bedauert. Es ist zu hoffen,
 daß die am Davoser Observatorium bei W. MÖRIKOFER [19 bis 21]
 begonnenen, bedeutsamen Arbeiten diese Lücke ausfüllen werden.
 Hier wurde versucht, wenigstens die Bohrung für das Thermo-
 element möglichst fein zu machen und der eindringenden Wärme
 überall starke Kupferquerschnitte und kurze Wege zur Verfügung
 zu stellen. Es ist selbstverständlich und auch durch die Beobach-
 tung bestätigt, daß die endliche Wärmeleitungsgeschwindigkeit
 eine gewisse Verzögerung zwischen dem Entstehen der Wärme in
 der absorbierenden Vorderfläche und ihrer Einwirkung auf das
 hinten liegende Thermolement bewirkt. Dies erkennt man daran,
 daß die Bewegung des Galvanometers sich noch über 1 oder 2
 Zehntel eines Skalenteiles fortsetzt, nachdem der Strahlungsstrom

¹⁾ Die hier beschriebenen Strahlungsmesser wurden gesetzlich geschützt
 nicht aus wirtschaftlichen Erwägungen, sondern nur zur Verhinderung un-
 befugten Nachbaues, wobei, wie Beobachtungen an anderen meteorologi-
 schen Instrumenten lehrten, u. U. für das richtige Arbeiten wesentliche Ge-
 sichtspunkte nicht berücksichtigt werden.

bereits unterbrochen wurde. Wir glauben, diese Verzögerung dadurch unschädlich gemacht zu haben, daß wir vor Beginn der Temperaturmessung den nach etwa 3—4 s eintretenden stationären Zustand des Wärmeflusses abwarten.

In Abb. 5 ist versucht worden, die Temperaturänderung im Meßkörper schematisch darzustellen, unter Annahme eines zylindrischen Metallkörpers M , der an seiner Hinterfläche, die mit dem Ort des Thermoelements gleichgesetzt wird, die Temperatur T_h messen läßt, wenn gleichzeitig an seiner bestrahlten Vorderfläche die Temperatur T_v herrscht. Der in Wirklichkeit nicht unwesentliche Wärmewiderstand der Schwärzungsschicht sowie der daran entstehende Verlust soll hierbei außer Betracht bleiben.

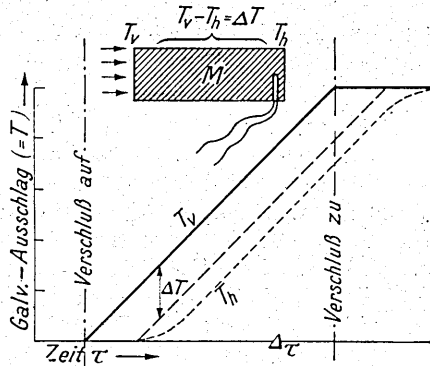


Abb. 5. Temperaturschichtung im Meßkörper M von der bestrahlten Vorderfläche $= T_v$ zum Hinterende (Thermoelement) $= T_h$ (gestrichelt).

Im Augenblick der Öffnung des Verschlusses beginnt daher die Temperatur an der Vorderfläche zu steigen; es entsteht ein Temperaturgefälle zum Hinterende hin, dementsprechend schreitet die Erwärmung durch M von links nach rechts fort, bis sie nach der kleinen Zeit $\Delta\tau$ an der Hinterfläche eintrifft und das Thermoelement zu reagieren beginnt. Der Gang von T_h entspricht genau dem Gang von T_v , nur um $\Delta\tau$ verspätet. Nach Schließen des Verschlusses hört der Temperaturanstieg T_v sofort auf, derjenige von T_h um $\Delta\tau$ später, was an einem genügend regsamen Galvanometer gut zu beobachten ist.

In Wirklichkeit besitzt der Meßkörper nicht diese einfache Gestalt. Die Ausbreitung der Wärme von links nach rechts wird daher ungleichförmig erfolgen. Es kann z. B. vorkommen, daß die Wärme auf dem kürzesten Weg nur einen sehr geringen Querschnitt vorfindet, so daß der Anstieg von T_h zuerst sehr langsam, und erst später rascher erfolgt. Diese Verzögerung des Temperaturanstieges an der Hinterseite ist in Abb. 5 durch die punktierte Kurve angedeutet worden. Aber es ist sicher: Wenn wir nur genügend lange abwarten, bis sich diese örtlichen Ungleichmäßigkeiten des Wärmeflusses ausgeglichen haben, so dürfen wir — stets konstante Einstrahlung vorausgesetzt — die Änderung von T_v der Änderung von T_h gleichsetzen, also eine stationäre Erwärmung $dt/d\tau$ annehmen.

Tatsächlich zeigt auch die Messung der Zeitabstände, in denen der Galvanometerzeiger von der Öffnung des Verschlusses ab die einzelnen Teilstriche der Skala passiert, deutlich die anfänglich verzögerte Erwärmung bei T_h . Im praktischen Falle wurde z. B. beobachtet, daß, wenn das zweite bis sechste Skalenintervall jeweils in 4 s durchlaufen wurde, das erste Intervall vom Öffnen des Verschlusses ab etwa 5 s erforderte. Für die Wärmeleitung von der Absorptions- bis zur Hinterfläche des Meßkörpers nach Abb. 4 einschließlich der ungleichförmigen Wärmeausbreitung wird also als $\Delta\tau$ ein Zeitraum von etwa 1 s in Anspruch genommen. Die zeichnerische Darstellung ergibt, daß mit Sicherheit vom Beginn des zweiten Skalenintervalles, d. h. vom Passieren des Skalenstriches 1 ab stationärer Zustand anzunehmen ist, während im ersten Intervall, zwischen den Marken Null und 1, die Erwärmung noch beschleunigt erfolgt. Daher hat sich als praktisch erwiesen, etwa den Nullpunkt bei spannungslosem Thermoelement auf 29 Skt zu legen, die Meßzeit aber zu zählen vom Durchgang des Zeigers durch den Skalenstrich 30. Diese Erfahrung wurde gewonnen unter den besonderen Gegebenheiten des dabei verwendeten ZEISSschen Schleifen-Galvanometers (vgl. Abschnitt 7); bei Verwendung eines anderen Galvanometers muß die Methode evtl. sinngemäß abgewandelt werden.

Als Beispiel für den tatsächlichen Unterschied zwischen der zum Durchlaufen des ersten und der folgenden Skalenintervalle nötigen Zeit seien die Werte von 17 Meßreihen am 1. 7. 1952 in Hamburg-Großborstel wiedergegeben. Unterhalb der Uhrzeit in MEZ. folgt die Durchlaufzeit für das Intervall 1, darunter das Mittel der folgenden 5 Intervalle in sec:

26 Der zu erwartende Gang der Erwärmung und Abkühlung des Meßkörpers

7,58h	9,21	9,45	9,50	10,29	11,33	11,38	11,44	11,48	12,08	12,34	12,41	12,50	12,59	13,04	13,10	13,17h
5,3s	4,5	4,2	3,8	4,0	5,2	4,0	3,9	4,3	3,8	3,9	4,0	3,5	3,9	4,1	3,5	4,0s
4,1s	3,7	3,7	3,7	3,5	3,3	3,5	3,3	3,5	3,5	3,5	3,3	3,4	3,2	3,3	3,4	3,2s

Mittel aus 17 Werten für Intervall 1: 4,1s, 2—6: 3,5s,
also Verzögerung im Intervall 1 0,6s.

Mit diesen Eigenschaften gehört das neue Pyrheliometer zusammen mit ABBOTS „Silverdisk“ in die Gruppe VI, Nicht-stationär arbeitende Instrumente mit periodischer Bestrahlung nach W. MÖRIKOFER [20, S. 52]. Sollte es nach dem Verfahren der elektrischen Ersatz-Schaltung nach COURVOISIER & WIERZEJEWSKI [20, S. 160 ff.] untersucht werden, so ist deren Empfänger E unser Meßkörper 1, ihr Mantelkörper M unser Ausgleichkörper 2 zugleich der Metallteile 4, 4' und 6. Die von diesen Verfassern bei den verschiedenen Näherungen zugrunde gelegten Voraussetzungen (dort S. 171, 173, 186, 187, 188) erfahren hier folgende Änderungen: Voraussetzung 2: Es besteht auf E konstante Temperatur-Differenz zwischen der Absorptionsfläche A und dem Thermoelement. Voraussetzung 5, 10 und 11 entfallen. Hinzu treten neue Voraussetzungen 12: Temperatur des Mantelkörpers T_M = Temperatur des Empfängers T_E im unbestrahlten Zustand E_0 ; 13: Erwärmung des Empfängers $dU_E/d\tau$ ist proportional der Einstrahlung S .

7. Der zu erwartende Gang der Erwärmung und Abkühlung des Meßkörpers

Nehmen wir wie stets eine für die Meßdauer konstante Sonnenstrahlung, sowie konstante Umgebungstemperatur an, so wird, falls wir die soeben behandelte anfängliche Verzögerung der Erwärmung infolge des endlichen Wärmeweges zwischen Empfangsfläche und Meßpunkt außer Betracht lassen, folgender Gang der Erwärmung des Meßkörpers zu erwarten sein: Der gleichförmige solare (oder künstliche) Strahlungsstrom würde für sich allein eine ebenso gleichförmige Erwärmung des Meßkörpers bewirken, dargestellt durch eine unter dem Winkel $dt/d\tau$ vom Nullpunkt ausgehende Gerade.

Nach dem NEWTONSchen Abkühlungsgesetz erleidet aber ein über die Umgebung erwärmter Körper eine Abkühlung proportional seiner Übertemperatur. Bezeichnen wir mit dem echten Bruch β die „Regsamkeit“ des Meßkörpers (wobei $1/\beta = a$ den Trägheitsbeiwert bezeichnet, siehe Anhang), die von Masse, spezifischer Wärme und Oberfläche abhängt, so wird die Anstiegs geschwindigkeit am Ende der 1. Minute tatsächlich $\beta (dt/d\tau)$. Wir können β als kleinen Winkel auffassen, um den am Ende jeder Minute die ursprünglich unter dem Winkel $dt/d\tau$ vom Ursprung

ausgehende Gerade erneut zur Abszissenachse hingebogen wird, bis die Kurve horizontal verläuft, also Gleichgewicht zwischen minütlicher Einstrahlung und Wärmeverlust eingetreten ist. Als Beispiel folgen tatsächliche Meßwerte vom 1. 7. 1952, 12.05^h MEZ, gewonnen in Hamburg-Großborstel:

Minute.....	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Einstrahlung ohne Verlust.....	0	1,70	3,40	5,10	6,80	8,50	10,2	11,9	13,6	15,3	17,0	18,7	20,4 °C
Gemessene $\frac{dt}{dz}$..	0	1,70	3,18	4,33	5,20	5,88	6,45	6,95	7,35	7,67	7,94	8,15	8,32 °C
Wärmeverlust....		0,00	0,22	0,77	1,60	2,67	3,75	4,95	6,25	7,63	9,06	10,55	12,08 °C
Desgl. je min. (= Abkühlungs- Geschwindigkeit)		0,0	0,22	0,55	0,83	1,02	1,13	1,20	1,30	1,38	1,43	1,49	1,53 °C
Verbleibende Er- wärmung je min.		1,70	1,48	1,15	0,87	0,68	0,57	0,50	0,40	0,32	0,27	0,21	0,17 °C

In der 12. Minute beträgt also der Wärmeverlust je min bereits 1,53°, der Überrest der minütlich eingestrahnten 1,70° also nur noch 0,17°/min. Da aus der letzten Zahlenreihe eine Halbwertszeit der annähernd logarithmischen Kurve von etwa 3 min folgt, würde sich zur 15. Beobachtungsminute eine Erwärmung von nur noch 0,09°/min, bei 18 min von 0,04°/min finden; bei 21 min ist mit einer resultierenden Temperatur des Meßkörpers von 8,90° bereits nahezu die Gleichgewichtstemperatur erreicht. Deren direkte Messung ist im allgemeinen schwierig, weil die Abkühlungsgeschwindigkeit ja von der Temperaturdifferenz zur Umgebung abhängt, deren Temperatur auf längere Zeit nicht konstant ist, ebenso wie auch der solare Strahlungsstrom durch Änderungen des atmosphärischen Trübungszustandes beeinflusst wird. Überhaupt hätte es wenig Sinn, die oben wiedergegebenen Zahlenreihen, z. B. die indirekt gefundene Abkühlungskurve näher zu analysieren, da bereits unser Ausgangswert von 1,70°/min nur durch die Tangente im Kurvenursprung bestimmt ist. Später wird gezeigt werden, daß das NEWTONSche Abkühlungsgesetz ohnehin für die ersten Meßwerte nicht gilt.

Die oben wiedergegebenen Temperaturwerte beziehen sich auf einen kupfernen Meßkörper von 7,025 g. Trotz dieser großen thermischen Masse reagiert die Gleichgewichtstemperatur momentan auf irgendwelche Schwankungen des solaren Energiestromes, etwa durch vorüberziehende, feinste Wolkenteilchen. Nur das Ausmaß der Schwankungen ist geringer als bei den üblichen, sehr leichten Meßkörpern in Lamellen- oder Drahtform. Es ist also durchaus möglich, mit diesem Gerät auch Strahlungsregistrierungen auszuführen, freilich nur in relativem Strahlungsmaß. Unter Voraus-

setzung der Konstanz der Sonnenstrahlung über einige Minuten ließe sich sogar für diese „statischen“ Registrierungen eine Eichung mit dem gleichen Gerät nach der hier beschriebenen „dynamischen“ Methode gewinnen. Ein ähnliches, mit schwerem Meßkörper registrierendes Strahlungsgerät hat bereits 1919 MARVIN aus dem ABBOTSchen „Silverdisk“ entwickelt, wie ja auch unser

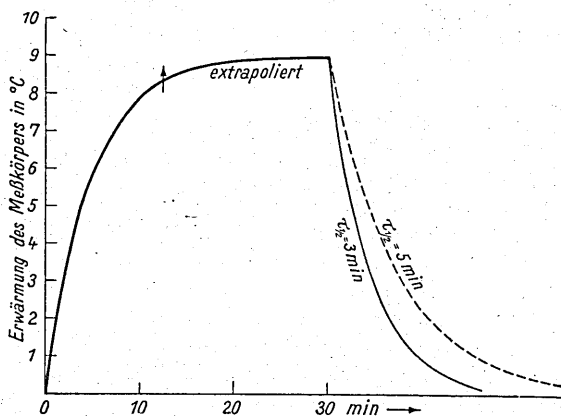


Abb. 5a. Erwärmung des Meßkörpers an gutem Strahlungstag. (1. 7. 1952, 12.08 h). Bis zum Pfeil beobachtet, danach mit Halbwertszeit 3 min extrapoliert, desgl. Abklingen mit Halbwertszeiten 3 und 5 min.

Gerät mit diesem die größte Verwandtschaft hat. Abb. 5 a stellt die oben bereits behandelte Erwärmungskurve dar, bis zum Gleichgewichtszustand extrapoliert, mit Abklingkurven für Halbwertszeit 3 und 5 min.

a) Die Abkühlungsfunktion

Wenn es möglich sein sollte, die Abkühlung je min für jede Übertemperatur des Meßkörpers und genauer als nach der soeben benutzten Methode festzustellen, dann könnte durch Hinzufügen dieser Werte zu den entsprechenden Meßwerten der tatsächlichen Erwärmung die wahre Einstrahlung gefunden werden. Diese Abkühlungswerte sollten sich ja im Laboratorium recht genau messen lassen, wenn man einmal dem Meßkörper eine gewisse Übertemperatur erteilt und nun am Galvanometer das Angleichen auf die Umgebungstemperatur von Minute zu Minute mißt. Weil diese „Normal-Abkühlungskurve“ als individuelle, aber zeitlich unveränderliche Funktion des einzelnen Strahlungsmessers für die an-

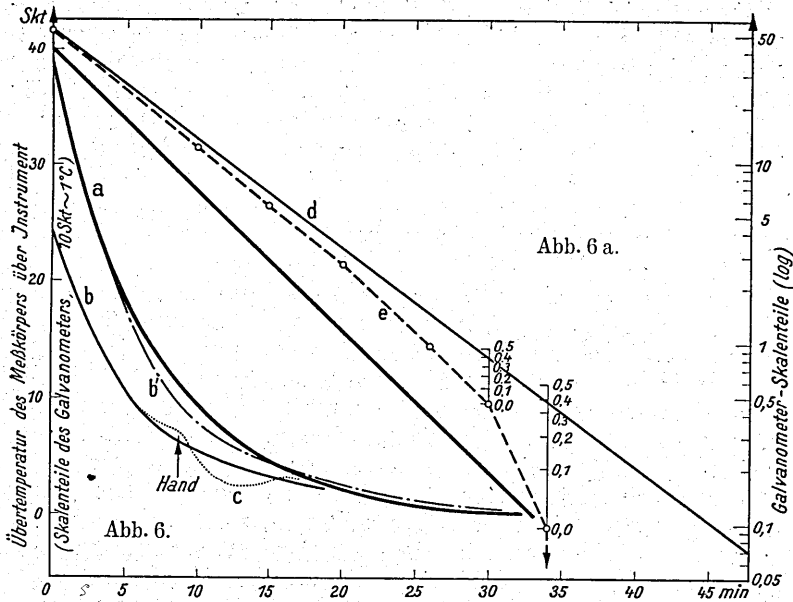


Abb. 6 (links unten). a = Normal-Abklingkurve Mod. II 5. 8. 1950, ausgezogen. b = dieselbe für Mod. I, 2. 7. 1950, dünn ausgezogen, b' = dieselbe parallel auf Kurve a verschoben, strichpunktiert. c = dieselbe vom 6. 6. 1950. Bei „Hand“ der Versuch, die unerwünschte Abkühlung des 5 kg-Panzers durch kurzes Auflegen der Hand zu korrigieren; punktiert. Skala links.

Abb. 6 a (rechts oben). Normalkurve vom 5. 8. 1950 aus Abb. 6 in log-Maßstab dargestellt, um Endwert zu extrapolieren (Skala rechts). e = rohe Messungen bei Annahme der Endtemperatur $10,0^{\circ}$. d = berichteter Endwert $9,6^{\circ}$ Skt.

gestrebten Absolutmessungen eine entscheidende Bedeutung zu haben schien, wurde viel Mühe darauf verwendet, sie einwandfrei zu erhalten, s. Abb. 6. Dank der großen „Regsamkeit“ des verwendeten Galvanometers gelangen zahlreiche gute Abklingkurven bis hinab zu Temperaturdifferenzen von 1 bis $0,5^{\circ}$ C, entsprechend einer Beobachtungszeit von 10–15 min. Durch Vergleich der aufeinanderfolgenden Halbwertzeiten und auch nach anderer im Anhang dargelegter Art ergaben sich diese Kurven als reine Exponentialkurven, also im linear-logarithmischen Netz als Gerade, s. Abb. 6 a, Linienzug e zwischen 0 und 20 min.

Aber obgleich die Genauigkeit der Einzelmessungen mit abnehmender Temperaturdifferenz und entsprechend flacher verlaufendem Kurvenzug zunimmt, änderten sich mit Fortführung der Beobachtungen die Halbwertszeiten so stark, daß gerade der für uns wichtige Endteil nicht mehr als Exponentialkurve betrachtet werden darf. Als Beispiel folgen die am 22. 7. 1950 gewonnenen Werte:

Temperaturintervall °C	5..2,5	2,5..1,25	1,25..0,625	0,625..0,312	0,312..0,156	0,156..0,078	0,078..0,039
Halbwertszeit in min	4,85	4,65	4,70	4,70	4,70	4,00	2,50

Die Ursache dieser Abweichung ist ebenso einleuchtend wie ihre Unvermeidbarkeit. Bei diesen geringen Temperaturspannen und den langen Beobachtungszeiten kann nicht mehr damit gerechnet werden, daß die Temperatur der Umgebung (der Instrument-Innenteile, besonders des Ausgleichskörpers mit der passiven Lötstelle) konstant bleibt. Änderungen der Raumtemperatur, Einfluß des Beobachters selbst, auch die während der Abkühlung vom Meßkörper an das Instrument abgegebene Wärme bewirken kleine Temperaturgänge, die aber in diesem Bereich von gleicher Größenordnung werden, wie der zu messende Temperaturgang. Ein Extrapolieren des wahren Endwertes aus der logarithmischen Kurve ist nicht möglich; in Abb. 6b ist versucht worden, die im linear-logarithmischen Netz als Gerade erscheinende Abklingkurve so zu legen, daß die Abweichungen auch von den letzten Meßpunkten möglichst klein werden.

Die Darstellung Abb. 6 zeigt übrigens in Kurve *b* eine Abklingmessung an dem ersten Modell des Strahlungsmessers nach Abb. 2. Trotz der 5 kg schweren Metallpanzerung weicht die Kurve erheblich mehr von der Exponentialkurve ab, als bei Mod. II mit seiner durch eine Thermosflasche vergrößerten thermischen Trägheit. Kurve *c* stammt ebenfalls von Mod. I. Hier zeigte während der Abklingmessung die Instrumenttemperatur Neigung zur Abkühlung. Daher wurde etwa zur 8. Minute versucht, diese Abkühlung durch kurzes Auflegen der Hand zum Stehen zu bringen. Das Ergebnis ist angesichts der großen Metallmasse doch überraschend!

Aus den verwendbaren Messungen wurde in schon erwähnter Weise eine Normalkurve gewonnen, hiermit Verbesserungswerte, die sich auf die Zeit als praktisch verwendete Unbekannte beziehen, daraus eine Kurve (in Abb. 13 gestrichelt) und Zahlen-tafel für das in Frage kommende Bereich, ausgedrückt in Bruch-

teilen von Sekunden, die von einer gemessenen Gesamtzeit für den Durchgang des Zeigers durch 5 Skalenintervalle abzuziehen sind.

Es ergibt sich aus diesen Darlegungen, daß wir erwarten können, daß bei gleichbleibender Einstrahlung

1. die in gleichen Zeitabständen gemessene Erwärmung des Meßkörpers nach einer logarithmischen Kurve abnimmt, um nach etwa 30 min den Endwert, d. h. die Temperatur der Umgebung praktisch, also auf etwa 1% genau zu erreichen. Bei einer Halbwertszeit von 5 min erfolgt Angleichung

in 5 min auf 50%	in 25 min auf 3,12%
10 25	30 1,56
15 12,5	35 0,8
20 6,25	

2. erwarten wir, daß der Wärmeverlust des Meßkörpers durch Strahlung, Leitung und Konvektion mit zunehmender Erwärmung ebenfalls einer logarithmischen Kurve folgt, die aus der für größere Differenzen sicher gemessenen Halbwertszeit auch für geringe Temperaturspannen extrapoliert werden kann und darf, womit sich die Erwärmung des Meßkörpers zuzüglich der Verluste, also der solare Strahlungsstrom ergibt.

3. Unter der erlaubten Voraussetzung, daß die etwa auftretenden Temperaturänderungen der passiven Lötstelle während der Meßdauer von 0,5 bis 1 min linear verlaufen, kann auch diese Wirkung durch Überwachen der Temperatur des Instruments (Ausgleichkörpers) unter Zurückführung auf die jeweilige Meßdauer unschädlich gemacht werden.

8. Was ergeben die Messungen zu den Erwartungen 1 und 2?

a) Die Meßmethode

(i) Eine Strahlungsmessung mit dem beschriebenen Pyrheliometer kann mit einer gewöhnlichen Stoppuhr ausgeführt werden, indem man die Zeit feststellt, die der Galvanometerzeiger zum Durchlaufen der z. B. 5 Skalenintervalle Nr. 2—6 braucht, — wobei freilich nur eine große Anzahl solcher Einzelmessungen bei vermutlich ungeänderten Strahlungsverhältnissen einen Eindruck über die Größe der zufälligen Fehler zu vermitteln vermag.

(ii) Eine bessere Methode, die gleichzeitig mehrere Meßpunkte mit gegenseitig abschätzbarer Genauigkeit liefert, könnte sich an die ABBOTSche Methode der Silverdiskmessungen anschließen. Sie

setzt voraus, daß ein in genauem Zeitabstand regelmäßig wiederkehrendes Signal zur Verfügung steht, etwa der laute Sekunden-schlag einer Pendeluhr. Für unsere Zwecke würde ein solches, alle 5 s wiederkehrendes Signal am günstigsten sein; der Beobachter würde bei jedem Signal den Stand des Galvanometers ablesen und etwa dem Protokollführer zurufen. Diese Art der Messung empfiehlt sich z. B. in der Arktis, wo die Uhrsignale dem Beobachter im Freien telephonisch aus dem Winterhaus über-mittelt werden, wohin die Ablesungen auf gleiche Weise durchge-rufen werden. Da jede Einzelablesung unter gleichen Bedingungen gewonnen wurde, ist jede einzelne Meßreihe von 5—10 Einzelab-lesungen unter sich ausgleichsfähig.

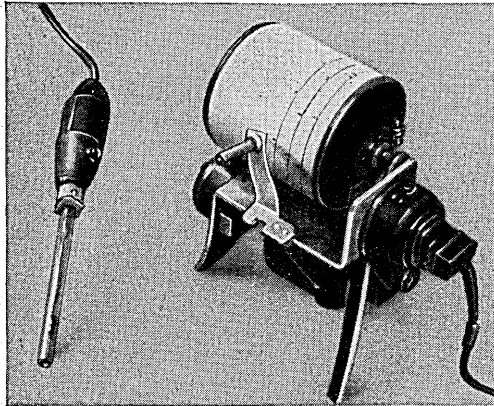


Abb. 7. Chronograph und Vorrichtung zum Erwärmen des Meßkörpers (links).

(iii) Steht, wie meistens, nur ein einziger Beobachter zur Ver-fügung, dann hat sich in mehrjährigem Gebrauch die im folgenden ausführlicher zu beschreibende Registrierung einer Anzahl von Zeitdifferenzen zwischen den Zeigerdurchgängen durch die ein-zelnen Skalenstriche als ebenso bequem wie zuverlässig erwiesen. Auf die Achse eines Grammophonlaufwerkes mit Synchronmotor wurde eine zweite Schnecke gesetzt, die über ein größeres Zahn-rad eine gewöhnliche meteorologische Registriertrommel (ohne Uhrwerk) in etwa 1 min einmal umlaufen läßt (Abb. 7). Vor der Trommel ist ein federnder Bleistifthalter angeklemt, der durch Fingerdruck auf einen seitlichen Fortsatz den Bleistift nach links auszulenken und dadurch an dem sonst geraden Strich eine

Zeitmarke zu machen erlaubt. Dies geschieht bei jedem Vorübergang des Galvanometerfadens an einem Skalenstrich, so daß nun an Stelle einer einzelnen Messung mit der Stoppuhr 6 bis 11, wenn gewünscht auch beliebig viele Zeitmarken von jeder Messung vorliegen. Wird die Umlaufszeit der Trommel genügend oft mittels der Stoppuhr kontrolliert, so ergibt sich aus dem Abstand der Zeitmarken auch die Zeitdifferenz in Sekunden. Nach jeder Messung wird der Bleistifthalter um wenige Millimeter nach links verschoben, so daß schließlich an einem Strahlungstag der Registriestreifen in der üblichen Größe 28×9 cm von 30—40 parallelen Geraden mit mehr oder weniger zahlreichen Zeitmarken bedeckt ist, die entsprechend dem Protokollblatt, das die Anfangszeit, Luft- und Instrumenttemperatur und sonstige Beobachtungen enthält, beziffert werden. Um die einzelnen Meßreihen leichter zu übersehen, wird zweckmäßigerweise die Vollendung des 5. und 10. Skalenintervalles markiert, indem man unmittelbar nach der eigentlichen Zeitmarke noch einmal eine Marke tastet.

Mit dem aus Umlaufsdauer und Umfang (93,3 mm) bekannten Vorschub in mm je Sekunde wird ein Auswertmaßstab gezeichnet, mit dessen Hilfe der Abstand der einzelnen Zeitmarken auf $1/10$ s ausgemessen und nach Abb. 8 auf mm-Papier aufgetragen wird; als Ordinate je 5 mm ein Skalenteil, nicht besonders beschriftet; als Abszisse die betreffenden Durchgangszeiten, $0,1 \text{ s} = 1/2 \text{ mm}$. Die Punkte werden in der üblichen Weise durch eine stetige, möglichst einfache Kurve zeichnerisch ausgeglichen, um die unvermeidlichen, später noch zu erörternden zufälligen Fehler auszumerzen, da an Strahlungstagen in den allermeisten Fällen während einer Meßreihe von $1/2$ bis 1 min Dauer mit konstanten Strahlungsverhältnissen nicht nur hier, sondern bei allen Pyrheliometermethoden gerechnet werden muß und darf.

b) Das Ergebnis: anfangs lineare Erwärmung

Die Erfahrung aus mehr als 500 Meßreihen mit weit über 5000 Einzelpunkten zeitigte das ganz unerwartete und zunächst unerklärliche Ergebnis, daß in dem hier allein in Betracht kommenden Temperaturintervall von $0-1^\circ \text{C}$ oberhalb der Umgebungstemperatur, also während des Durchlaufens der ersten 10 Skalenintervalle des Galvanometers ein gesetzmäßig von der Tangente im Ursprung abbiegender Verlauf der Erwärmungskurve nicht zu erkennen war. Vielmehr ließ sich stets in diesen vielen hundert Fällen die Verbindungslinie der ersten 5—10 Meßpunkte im Rahmen der

Meß- und Darstellungsgenauigkeit durch eine Gerade ersetzen, woran sich die Verbindungslinie der folgenden Meßpunkte mit einem deutlichen Knick anschloß, der in Abb. 8 durch eine schräg-stehende Marke angedeutet ist. Die Verbindungsgeraden der ersten Meßpunkte im „linearen Gebiet“ sind gestrichelt nach rechts durchgezogen. Auch die Verbindungslinie der wenigen Punkte rechts von dem Knick ist der Einfachheit halber als Gerade gezeichnet, doch würde dies, wie später gezeigt wird, bei Berücksichtigung weiterer Meßpunkte nicht mehr zulässig sein; zunächst sollen nur die linearen Verhältnisse zwischen dem Anfangs- und Knickpunkt betrachtet werden.

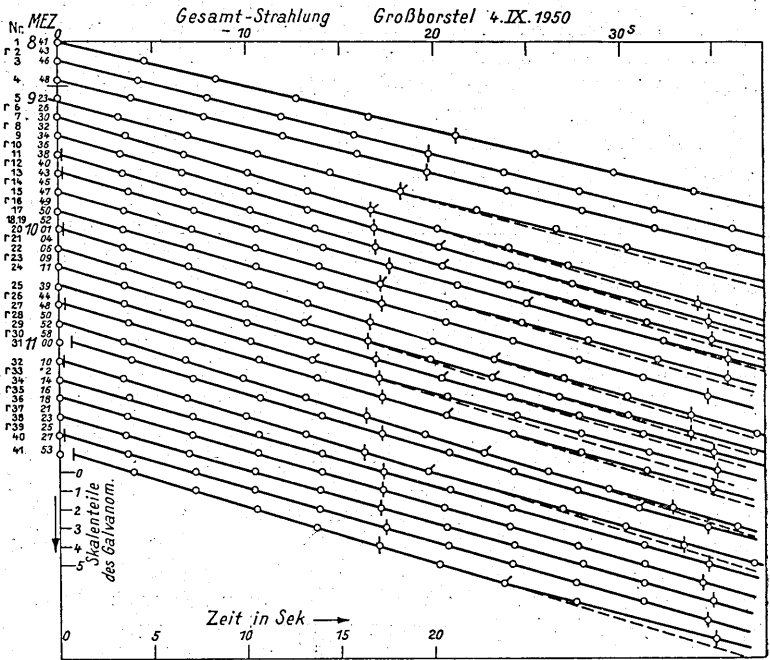


Abb. 8. Graphische Ausglei chung von je 10 Markierungen mittels des Chronographen.

Bevor auf die vermutliche Ursache dieser Erscheinung eingegangen wird, seien noch einige Bemerkungen zu Abb. 8 und dem zugrundeliegenden Meßverfahren zugefügt. Die Verwendung eines

besonderen Schreibgerätes wurde nur sehr ungern in Erwägung gezogen, erwies sich aber als notwendig, weil bei Verwendung der Stoppuhr auch bei anscheinend konstantem Strahlungszustand die Durchlaufzeit für meistens 5 Skalenteile um mehrere Zehntelsekunden schwankte. Dies konnte daher rühren, daß bei stetiger Bewegung des Zeigers der Durchgang durch den ersten und fünften Skalenstrich nur mit einer Ungenauigkeit einiger Zehntel Sekunden erfaßt ist, oder aber, daß trotz gleichförmiger Zunahme der Thermospannung der Zeiger sich nicht ganz gleichförmig bewegt (was in der Tat beobachtet wurde). Es konnte aber auch sein, daß solche kleinen Differenzen in einer Unvollkommenheit des Pyrheliometers ihren Grund hatten. Kam noch der bekannte, auch aus den Registrierungen häufig ersichtliche physiologische Faktor hinzu, daß der erste Durchgang gerade infolge der Angespanntheit des Beobachters auf diesen Augenblick durch innere Blockierung verzögert wird, und daß beim zweiten Kontakt häufig bewußt nach der anderen Seite gegengesteuert wird, so war ersichtlich, daß man einer größeren Zahl gleichwertiger Meßpunkte bedürfe, um derartige Zufälligkeiten zu erkennen und auszuschalten. Solche 5 bis 10 Einzelmessungen erlaubt das einfache Schreibgerät zu gewinnen, so daß es nun leicht gelingt, einzelne Fehlmessungen herauszufinden und durch Ausgleichen zu beseitigen, aber auch solche Meßreihen auszuschließen, während derer sich der solare Energiestrom tatsächlich, etwa infolge des Durchzuges auch der kleinsten Wolkenflocke, änderte. Es darf noch einmal betont werden, daß trotz der großen thermischen Masse des Meßkörpers die Erwärmungsgeschwindigkeit augenblicklich auf jede derartige Änderung der Einstrahlung, z. B. auch auf momentan vergrößerte Durchlässigkeit der Luft, reagiert.

Am rechten Rande von Abb. 8 ist lfd. Nr. und Uhrzeit jeder Messung angegeben. Mit r wurden Messungen mit Rotfilter bezeichnet, die wegen ihrer hiervon abweichenden, aber untereinander ähnlichen Neigung auf einem besonderen, hier nicht wiedergegebenen Blatte dargestellt sind. Als Anfangspunkt dient der bequemen Ablesung halber der Skalenstrich 30 des Schleifengalvanometers, als Endpunkte also 35 bzw. 40 Skt, während der Nullpunkt auf 29 Skt gelegt wird. Ob die Voraussetzung zutrifft, daß nach Durchlaufen des Intervalls 29/30 Skt der Temperaturanstieg linear erfolgt, ergibt sich aus der Darstellung nach Abb. 6. Es empfiehlt sich, zeitweise auch den Zeitpunkt des Öffnens des Verschlusses mit zu tasten, um das thermische Verhalten des Meßkörpers möglichst

genau kennen zu lernen, vor allem nach jedem Eingriff in das Instrument. Zum Beispiel müßte sich ein nach Auswechslung des Thermoelementes etwa verschlechterter Kontakt der Lötstelle mit der Kupfermasse durch eine Vergrößerung der „Anlaufzeit“ anzeigen. Ein Mittelwert dieser Anlaufzeit für einen Strahlungstag wurde auf S. 26 mitgeteilt. Hierdurch ist man auch imstande, bei Verwendung eines beliebigen Galvanometers mit anderem Parswert die zum Durchlaufen des Anlaufwertes erforderliche Skalenstrecke festzustellen und sie der jeweiligen Meßdauer anzupassen.

In Abb. 8 erkennt man mehrere graphisch berichtigte Anfangspunkte, z. B. 9^{23} , 11^{00} , 11^{53} . Die auf dem Registrierstreifen durch Doppeltasten markierten Endpunkte des 5. und 10. Skalenintervalles sind durch senkrechte Striche gekennzeichnet. Bei gleichmäßiger Strahlung müßten alle so bezeichneten Punkte senkrecht untereinander liegen, was hier in gewissem Maße von 9^{30} ab der Fall ist.

Fiele nun der Knick in der Erwärmungskurve stets auf den gleichen Abstand vom Meßbeginn, so würde man darin irgendeine instrumentelle Eigenheit sehen, die herauszukorrigieren wäre, aber keine grundsätzliche Bedeutung beanspruchen kann. Aber darin liegt ja gerade das Besondere dieser Erscheinung, daß sie ganz unregelmäßig auftritt, ja auch in dem betrachteten Intervall ganz ausbleiben kann. Bei den 23 Messungen der Abb. 6 endigt der lineare Verlauf innerhalb des dargestellten Zeitintervalles von 38 s beim Skalenstrich: —, —, —, 5, 5, 6, 6, 7, 5, —, 7, 5, 6, 4, 6, 7, 9, 6, —, —, —, —, 7. Dabei bedeutet der Strich, daß die Punktfolge im ganzen, dargestellten Bereich, das in dieser Darstellung etwa $1,2^\circ$ umfaßt, linear verläuft. Die Erscheinung hat also sehr un stetigen Charakter, kann jedenfalls weder mit dem NEWTONschen Abkühlungsgesetz in Einklang gebracht, noch aus Instrumenteigenschaften erklärt werden.

Die Zufälligkeit dieses Verhaltens wird gut illustriert durch Abb. 9, worin zwei pyrheliometrische Meßreihen vom 1. Juli 1952 $7,58^h$ und $12,08^h$ MEZ dargestellt sind. Die rechte Bildhälfte stimmt (zur Abszissenachse spiegelbildlich) mit der Darstellungsweise in Abb. 8 überein, ist nur in kleinerem Maßstabe weiter als dort fortgeführt worden. Man erkennt deutlich, daß die Andauer des linearen Kurvenverlaufes bei beiden Meßreihen sehr verschieden ist. Am frühen Morgen dauert er nur etwa 30 s, während derer das Galvanometer auf 8 Skt = $0,8^\circ$ C gestiegen ist. Zu Mittag hält sich der lineare Verlauf (entgegen dem zu Erwartenden) während

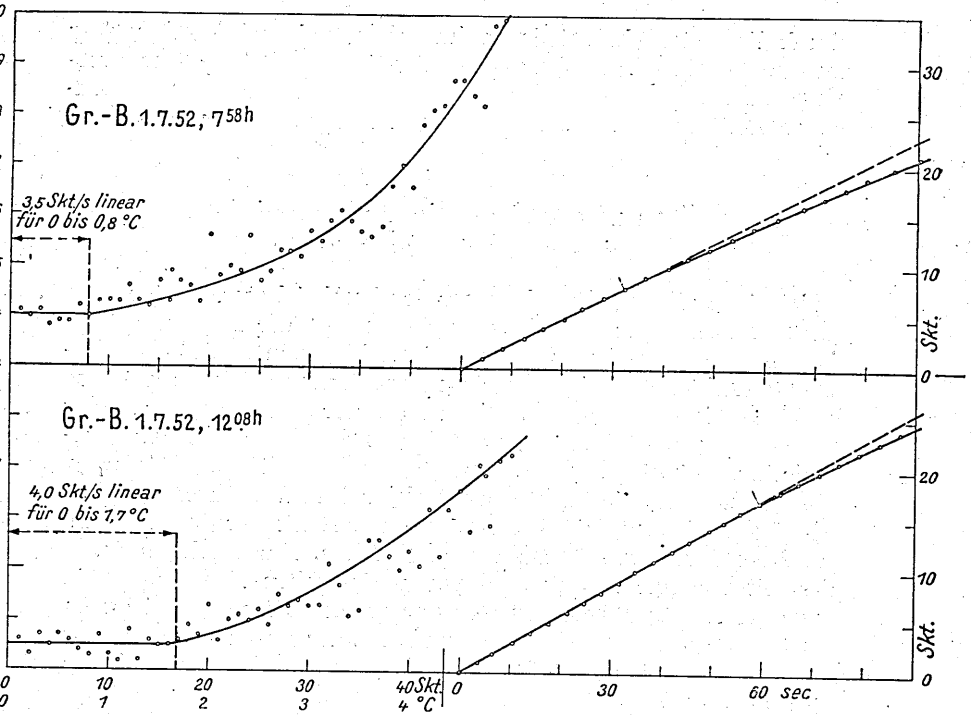


Abb. 9. Rechts: Erwärmungskurve entsprechend Abb. 8; links: Durchlaufzeiten für die einzelnen Skalenteile von 1 bis 40 (Siehe Berichtigung auf S. 74).

einer vollen Minute, während derer das Galvanometer auf 17 Skt = 1,7° C gestiegen ist.

Auf der linken Hälfte der Darstellung sind die Zeitdifferenzen in Sekunden einzeln aufgetragen, die zum Durchlaufen der ersten 50 Skalenteile benötigt wurden, was einer Erwärmung des Meßkörpers um ungefähr 5° C entspricht. Die Zeitwerte sind der Aufzeichnung des Chronographen entnommen worden. Die Streuung der Einzelwerte und die Berechtigung ihrer Behandlung als zufälliger Fehler wurde bereits behandelt.

Abb. 8 und 9 stehen als Beispiel für beliebig viele, derartige Darstellungen, die insgesamt wohl schlüssig beweisen dürften, daß wir es im Stadium geringen Temperaturüberschusses über die Umgebung mit einem linearen Verlauf der Erwärmungskurve, also in dieser bildlichen Darstellung mit konstanten Durchlaufzeiten

durch die ersten Skalenteile zu tun haben, während der Übergang zu zunehmenden Zwischenzeiten, also zu sich asymptotisch verringernder Temperaturzunahme, un stetig und bei zufällig streuenden Zeitpunkten bzw. Temperaturen eintritt.

9. Zusatz betreffend die Meßgenauigkeit mittels des Chronographen

Bei einem Trommeldurchmesser des beschriebenen Gerätes von 93,3 mm und einem Umlauf von 45 s beträgt der Papiervorschub 6,51 mm/s, oder mehr als 0,6 mm je Zehntelsekunde. Da die Ablesung leicht auf 0,3 mm getrieben werden kann, kann sie also leicht 0,1 bis 0,05 s liefern. Wenn bei guter Strahlung der Zeiger des Galvanometers 5 Skt in etwa 15 s durchwandert, dann bedeutet die Ablesung auf 0,1 s eine Meßgenauigkeit von 0,7%.

Freilich lehrte die Erfahrung auch, daß an den Chronographen erhebliche Genauigkeitsanforderungen gestellt werden müssen, um diese Meßgenauigkeit zu verwirklichen. Dazu gehören u. a. Freiheit von totem Gang und von periodischen Fehlern, die ja beide bei Zahnradübertragungen vorkommen können, und genau zentrischer Lauf der Schreibtrommel. Da der Synchronmotor vom periodenkonstanten Stadtnetz seinen Antrieb erhielt, wurde der Antrieb für fehlerfrei angesehen. Die Überwachung erfolgte dadurch, daß regelmäßig nach mehreren Meßreihen die Dauer eines vollen Trommelumlaufes, meistens mehrmals, gemessen und notiert wurde. Meistens unterschieden sich die Umlaufzeiten nur um 0,1 bis 0,2 s. Selbst bei einer schlechten Reihe, z. B. 45,2, 45,7, 45,6, 45,9, 45,8, Mittel 45,6 s beträgt die größte Abweichung eines Umlaufes vom Mittel nur 0,4 s, was bei gleichmäßiger Verteilung auf den ganzen Umlauf die Einzelmessung von z. B. 5 s Dauer nur um 0,04 s unsicher machen würde. Bei unregelmäßiger, etwa sprunghafter Verteilung der Umlauffehler dürften diese Sprünge bei der graphischen Ausgleichung der Meßreihen erkannt werden.

Daß aber, wie leider erst nachträglich erkannt wurde, diese Kontrolle der Umlaufzeit stets zwischen den gleichen Marken etwaige starke Ungleichmäßigkeiten innerhalb eines Umlaufes nicht erfaßt, geht aus dem folgenden, kurzen Bericht über Vergleichsmessungen in Potsdam hervor.

Mehrere Monate nach vorläufiger Fertigstellung der ersten Fassung dieser Arbeit ergab sich im September 1951 durch Entgegen-

kommen und Hilfe von Herrn Prof. Dr. H. PHILIPPS, dem Direktor des Meteorologischen und Hydrologischen Dienstes der DDR, die Möglichkeit, mit dem hier beschriebenen Gerät Vergleichsmessungen am Meteorologischen Hauptobservatorium Potsdam auszuführen, dessen Normalinstrumente, u. a. das Abbottsche Silverdisk-Aktiometer Nr. 12, den 2. Weltkrieg unversehrt überstanden haben. Hierbei konnte die Selbsteichbarkeit des neuen Instrumentes unter Beweis gestellt werden, da nur das Pyrheliometer und der Chronograph von Hamburg mitgenommen waren, die Messungen in Potsdam aber mit einem von dort freundlicherweise zur Verfügung gestellten Schleifengalvanometer des Observatoriums mit mir unbekanntem Parswert, Widerstand usw. erfolgten. Nach Beendigung der Strahlungsmessungen wurde diese Kombination unter den Augen der Kollegen in der hier auf S. 55 beschriebenen Weise vermittle zwei gewöhnlicher Hg-Thermometer geeicht, wodurch sich der Umrechnungsfaktor $1 \text{ Skt} = 0,1136^\circ \text{ C}$ ergab, gegenüber der Kombination mit dem Hamburger Schleifengalvanometer, wobei $1 \text{ Skt} = 0,0971^\circ \text{ C}$.

Der Vergleich mit den in überaus dankenswerter Weise von den Mitarbeitern der Abteilung Strahlungsforschung (Leiter Dr. H. WÖRNER), den Herren Dr. H. HINZPETER und Dipl.-Met. K.-H. GRASNICK ausgeführten Messungen des Observatoriums ergab im arithmetischen Mittel von 33 Vergleichen eine Abweichung von $-0,002 \text{ cal/cm}^2 \text{ min} = \sim 0,2\%$, um die das neue Gerät zu hoch anzeigte, bei angenommener wirksamer Absorption von 98%.

Jedoch lagen einzelne meiner Messungen erheblich höher als die entsprechenden Potsdamer Werte, und zwar solche, wobei die Chronographenlinie (Abb. 8) besonders früh und stark geknickt war. Der hierdurch nahegelegte Verdacht, daß sich dem Meßergebnis eine Störung durch kleine Schwankungen des Chronographenumlaufes überlagere, bestätigte sich, als nach der Rückkehr eine große Anzahl von Blindmessungen derart ausgeführt wurden, daß einfach alle 5 s nach einem Chronometer Zeitmarkierungen ausgeführt wurden. Es wird vermutet, daß beim Anlassen des selbstanlaufenden Synchronmotors zu Beginn jeder Einzelmessung die endgültige Geschwindigkeit erst nach einer gewissen Einschwingzeit erreicht wird, wodurch gerade die ersten Zeitmarken am meisten beeinflußt sein können, während dieser Fehler über die volle Umlaufzeit verschwindet. Bei dem ersten, selbstgefertigten Chronographen können auch ungleichmäßige Reibungswiderstände in dem Untersetzungsgetriebe unterlaufen sein.

Diese Erfahrung sollte zur Vorsicht mit selbstanlaufenden Synchronuhrwerken mahnen. Die Überlagerung des synchronen Wechselfeldes von 50 U/min durch ein zusätzliches Drehfeld bewirkt, daß der Synchronismus nicht mehr unter allen Umständen besteht, sondern von der Belastung abhängt. Während ein nicht selbstanlaufender Synchronmotor bei Überlast sofort stehen bleibt, läuft der selbstanlaufende mit einem gewissen Schlupf weiter, bis er bei Rückgang der Belastung wieder in den synchronen Bereich zurückkehrt, oder bei weiterer Zunahme stehen bleibt. Der erstere Fall kann vorkommen, wenn zum Betätigen von Schaltorganen kurzzeitig ein größeres als das normale Drehmoment abverlangt wird.

Daher wurde sogleich ein neuer Chronograph entworfen und durch die Feinmechanische Werkstätte W. EIGENBRODT, Hamburg 39, unter Vermeidung der erkannten Fehlerquellen gebaut¹⁾. Als Antrieb dient nun ein selbstanlaufender Synchronmotor der AEG vom Schnellläufertyp SSE, bei dem der Läufer mit 3000 U/min rotiert, diese Drehzahl aber durch ein uhrwerkartiges Getriebe auf 1 U/min der Abtriebachse herabgesetzt wird. Für die Wahl dieses Motortyps sprach die Vermutung, es würden etwaige unregelmäßige Belastungen am Trommelumfang sich über das Getriebe nicht so leicht bis zum Läufer fortpflanzen, wie bei den üblichen, langsamlaufenden Synchronmotoren z. B. des Typs AEG SS 1 mit 375 U/min.

Die Schreibtrommel wurde aus einem Leichtmetall-Gußkörper ausgedreht, um nicht durch Abweichungen von der genauen Zylinderform Zeitfehler zu ergeben; nach Einbau der spangenlosen Papierbefestigung nach A. LANG wurde die Trommel genau ausgewuchtet, um beim Umlauf den Motor nicht ungleichmäßig zu belasten. Das Trommelgewicht wurde an der Motorseite durch ein

¹⁾ Dieser einfache Chronograph wird auch für andere Zwecke verwendet werden können, wo es sich darum handelt, Abkling- oder Anstiegskurven beliebiger Meßgeräte aufzunehmen. Auch ist eine Vorrichtung vorgesehen, um den Taster elektromagnetisch zu betätigen. Sollte z. B. dieser Strahlungsmesser sich einbürgern, so ist zur Steigerung der Genauigkeit und Bequemlichkeit eine Vorrichtung realisierbar, wobei der Durchgang des Zeigers vor bestimmten Skalenstrichen lichtelektrische Impulse auslöst, die nach entsprechender Verstärkung den Chronographen betätigen und die „persönlichen“, sowie die zufälligen Fehler ausschalten.

Der Chronograph ist auch dort ohne Änderung verwendbar, wo kein synchronisierter Wechselstrom von 50 Perioden/s zur Verfügung steht. Mittels eines modernen, weitgehend periodenkonstanten Wechselrichters (z. B. von Firma Kupfer-Asbest-Co., Heilbronn a. N.), kann man aus Gleichstromnetzen beliebiger Spannung oder aus Sammlern Wechselstrom 50 Per./s zum Antrieb gewinnen.

Kugellager abgefangen, so daß keine seitlichen oder axialen Kräfte auf die Motorachse einwirken konnten; die andere Seite der Trommel ist in einer Spitze gelagert.

Zunächst wurde die Gleichmäßigkeit des Umlaufes nachgeprüft, indem etwa während zwanzig Trommelumdrehungen die 60 Sekunden eines Chronometers auf die Trommel getastet und dann ausgemessen wurden. Die Gleichmäßigkeit des Umlaufes erwies sich als bemerkenswert. Am 3. 7. 1952 wurden 11 Minuten lang hintereinander die Sekundenmarken ausgeführt; die 11 Marken für die erste, zwei bis 60. Sekunde liegen durchweg auf denselben Geraden senkrecht zu den parallelen Grundlinien. Einzelne, offensichtlich zufällige Abweichungen erreichen 0,1 s, fallen aber mit Sicherheit der manuellen Ausführung der Zeitmarken, also dem Beobachter zur Last.

In einem Punkt blieb das Ergebnis zunächst noch hinter den Erwartungen zurück: Bei eingehender Untersuchung mit Hilfe des Chronometers zeigte sich im Gang der Schreibtrommel eine zwar sehr schwache sinusförmige Periode dem vollen Umlauf überlagert, vermutlich infolge einer geringen Exzentrizität des Minutenrades im Getriebe, die sich künftig vermeiden lassen wird. In diesem Falle wurde der Fehler dadurch unschädlich gemacht, daß der äquidistante Auswertmaßstab mit einem Parswert $1 \text{ s} = 4,5 \text{ mm}$ entsprechend leicht verzerrt umgezeichnet wurde¹⁾.

10. Versuch einer Deutung des un stetigen Verlaufes der Erwärmung

Wir möchten versuchsweise annehmen, daß der Knick der Erwärmungskurven dem Beginn des konvektiven Austausches ent-

¹⁾ Anm. b. d. Korr.: Das Getriebe dieses, heute aus der Meßtechnik nicht mehr hinwegzudenkenden Synchronmotors führt am Anfang jedes neuen Umlaufs der Abtriebswelle zur gleichen gegenseitigen Stellung der Getrieberäder, so daß die Nullstellung als fehlerfrei zu betrachten ist. Demgegenüber sind geringfügige, durch die Massenfertigung bei billigem Preise bedingte Ungleichmäßigkeiten während des Umlaufes bei normalem Gebrauch überhaupt nicht bemerkbar. Für höchste Genauigkeit, wie hier, können die Getrieberäder durch den Uhrmacher nachgewälzt, oder Getriebe mit geringster Ungleichförmigkeit aus der großen Menge ausgesucht werden. — Doch sind selbst in „synchronisierten“ 50 Hz-Stadtnetzen schon primär gewisse Unregelmäßigkeiten möglich, da der Synchronismus an einer Anzeigevorrichtung überwacht und bei Erreichen einer gewissen Abweichung, besonders in Zeiten stark wechselnder Belastung, von Hand korrigiert wird.

spricht. Daß man diesen im statistischen Mittel als stetig betrachten und berechnen kann, schließt ja nicht aus, daß er als einzelnes Phänomen betrachtet quantenhaft auftritt, also zufallsbedingt erscheint. Von BÜTTNER u. ALBRECHT (Gerl. Beitr. 22, 1929, 14) wurden bereits Darlegungen von R. SEELIGER (Phys. Zschr. 26, 1925, 282) auf die Aktinometrie angewendet, wonach die Wärmeabgabe eines Körpers von T° in ruhender Luft von T_L°

$$W = K p^c (T - T_L)^a$$

ist; für den Exponenten a wurde 1,233 gefunden. p^c ist eine Funktion des Luftdruckes, K eine von der Art des Gases abhängige Konstante. Der Wert von W hat unter der Bezeichnung „äußere Wärmeleitung“ eine große Rolle in der Erforschung der Gesetze der Wärmeübertragung durch Strahlung und Leitung gespielt. Sie stellt danach nur einen Teil des Gesamtwärmeverlustes dar, wie sich aus der bereits 1817 durch DULONG und PETIT aus umfangreichen Versuchen gewonnenen Abkühlungsformel ergibt:

$$W = \frac{S}{PC} [H(u^T - u^T_L) + K p^c (T - T_L)^a]$$

wobei S = Oberfläche, P = Masse, C = spez. Wärme, u die Strahlungskonstante 1,0077 von DULONG und PETIT, H und K Konstanten bedeuten, und $a = 1,232$ gefunden wurde, also nur um $1/1000$ von dem heute angenommenen Wert abweichend! Hieraus geht hervor, daß für die geringen Temperaturunterschiede, wie sie in Strahlungsmessern auftreten, das Strahlungsglied vernachlässigt und nur das Konvektion und Leitung repräsentierende rechte Glied verwendet werden darf. BÜTTNER und ALBRECHT veranschlagen a. a. O. S. 22 für ein bestimmtes, von ihnen untersuchtes Aktinometer das Verhältnis von Leitung usw. zum Strahlungsverlust wie 10^5 zu 1.

Man kann z. B. aus den Reflexionserscheinungen an der Oberfläche dem Boden aufliegender, überwärmter Luftschichten schließen, daß dünne, flächenhaft ausgebreitete Schichten lange Zeit im instabilen Gleichgewicht bestehen können, während das Einsetzen des vertikalen Austausches wenn nicht die Erscheinung völlig zerstört, so doch an der Unruhe und dem zeitweisen Verschwinden des Spiegelbildes erkannt wird. Auch hierbei liegt in der Auslösung des schließlich zur adiabatischen Temperaturverteilung führenden Austausches ein Zufallsmoment, da der auslösende Einfluß den durch die Zähigkeit der Luft und die Reibungsdämpfung

der notwendigen Ersatzströmung bedingten Grenzwert überwinden muß. (Siehe auch bei [2].)

Beispiele für die Zähigkeit flacher Luftschichten und für eine „zellulare“ Zwischenform zwischen Ruhe und turbulenter Bewegung bieten die geradezu unwahrscheinlich schönen Aufnahmen von K. CHANDRA: Instability of fluids heated from below, Proc. R. Soc. London **164**, 1936, 231—42, Pl. 3—6. S. 233 heißt es: „Das Experiment zeigte, daß eine Luftschicht im Gleichgewicht blieb trotz höherer Temperatur an ihrer Unterseite. Wenn die Bodenplatte erwärmt wurde, konnte man in der Kammer keine Bewegung sehen, bis die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite einen Grenzwert erreichte, dessen Betrag von der Schichtdicke abhing. Zum Beispiel wurde bei einer Dicke von 10 mm erst Bewegung beobachtet, wenn die Temperaturdifferenz $11,4^{\circ}\text{C}$ überstieg.“ SCHMIDT und SAUNDERS: On the motion of a fluid heated from below, ebendort **165**, 1938, 216—288, bringen in Pl. 2 ebenfalls sehr instruktive Photos und folgern auf S. 228: „Die Größe des Wärmeüberganges wurde für jedes Stadium gemessen. Seine Zunahme beim Übergang von zellulärer zu turbulenter Bewegung ergab sich geringer als beim Übergang von der Ruhe (molekulare Leitung siehe Fig. 3, S. 233) zu zellularem Austausch.“

Zwar betonen BÜTTNER und ALBRECHT a. a. O., daß sich in engen Kanälen, also auch zumeist in dem Zwischenraum zwischen Meßkörper und Strahlungsmesser Konvektionsströmungen nicht ausbilden könnten. Aber in *einer* Richtung, zur Einstrahlungsöffnung hin, steht ja jeder Strahlungsmesser mit einem großen Luftraum in Verbindung. Daraus darf geschlossen werden, daß bereits die Neigung des Gerätes, d. h. geographische Breite und Tageszeit einen Einfluß auf die Auslösung der Konvektion im Inneren besitzen werden. Sicher haben ihn auch Luftdruck- und besonders Windschwankungen, die, bis zum Meßkörper vordringend, einen bereits vorgebildeten Warmlufttropfen zur Ablösung zu bringen vermögen.

Eben diese Erscheinung glaubt Verf. aus Abb. 8 und zahllosen gleichartigen Darstellungen zu erkennen. Er sieht eine Stütze dieser Auffassung darin, daß frühmorgens, also bei geringen Einstrahlungswerten und kleinem Höhenwinkel, die Linearität häufig bis über den 10. Skt. hinaus besteht: Die geringere Einstrahlung bewirkt eine geringere Erwärmung der Schwärzungsschicht, daher auch einen geringeren Temperaturgradienten in ihr, der sich in einer geringeren Erwärmung der die schwarze Fläche bedek-

kenden Luftschicht äußern muß. (Gegenteilige Beobachtungen siehe jedoch S. 36 u.) Er sieht aber auch eine Stütze darin, daß selbst bei starker Einstrahlung, wie in Abb. 6, 11⁴¹ — 11²⁷, die Konvektion nicht notwendigerweise einsetzt, sondern bei zufälligem Fehlen der auslösenden Ursachen auch unterbleiben kann. Allerdings ist eine solche Folge linearer Messungen bei starker Strahlung selten; häufig kommt es dagegen vor, daß bei einzelnen Messungen zwischendurch der Knick ausbleibt. Früher als beim 5. Meßpunkt wurde der Knick nur ganz vereinzelt gefunden, s. Abb. 6, 10⁴¹ und 10⁴⁸. Falls also diese Deutung zutreffend ist, würde sie besagen, daß bei dieser instrumentellen Anordnung konvektiver Austausch zwischen der Oberfläche des Meßkörpers und der umgebenden Luft bei Vorhandensein auslösender Faktoren bereits oberhalb einer Temperaturdifferenz von 0,5° C eintreten kann.

Hieraus wird ersichtlich, weswegen nicht, wie bei vielen Strahlungsmessern üblich, das Wärmegleichgewicht abgewartet wird. Dank seiner besonders guten thermischen Isolierung würde, wie erwähnt (Abb. 5 a), der Meßkörper sich nicht nur um etwa 3°, wie etwa die Lamelle des Michelson-Aktinometers, sondern um etwa 10° über die Umgebung erwärmen. Es müßte also stets mit Konvektion und deren Zufälligkeiten im Einzelfall gerechnet werden.

Daß Konvektion nicht gleichzeitig mit Erwärmung auftreten muß, zeigen auch Messungen von H. SENFTLEBEN: Eine einfache Methode zur gleichzeitigen Bestimmung der spez. Wärme, der inneren Reibung und des Wärmeleitungsvermögens von Gasen (Z. f. angew. Physik 5, 1953, 33—39). Er erwärmt einen dünnen, axial durch einen rohrförmigen Rezipienten von etwa 2 cm ϕ gespannten Draht durch Stromwärme. Der Wärmeverlust an die Umgebung entspricht der Änderung der Stromwärme, die nötig ist, um die anfängliche Übertemperatur des Drahtes von z. B. 20° C gegen die Wandung wiederherzustellen. Da die ursprünglichen Messungen stets bei ansteigenden Drucken vorgenommen wurden, sind sie für unseren Fall nicht beweiskräftig. Verf. schuldet Herrn Prof. Dr. SENFTLEBEN, Recklinghausen, besonderen Dank dafür, daß seiner Bitte entsprochen wurde, die gleichen Versuche auch bei konstantem Druck und geringeren Temperaturdifferenzen durchzuführen, und teilt mit freundlicher Genehmigung die betreffende briefliche Mitteilung hier mit (Hervorhebung von mir, G).

„... Inzwischen habe ich die beabsichtigten Messungen anstellen lassen, nämlich die Wärmeabgabe eines dünnen

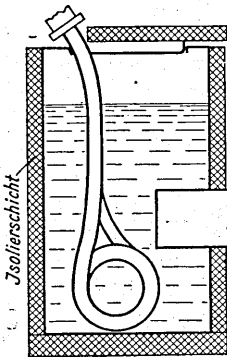
Drahtes an Luft und andere Gase bei kleinen Temperaturdifferenzen. *Es hat sich gezeigt, daß der erste Anstieg der Erwärmung stets linear mit der Temperaturdifferenz ist, und daß erst später eine Krümmung der Kurven erfolgt.* Bei Luft erfolgt ein merkliches Einsetzen der Krümmung bei unseren Verhältnissen (horizontaler Draht von etwa 0,05 mm ϕ) bei einer Temperaturdifferenz von etwa 10 Grad, in Äthylchlorid, einem viel schwereren Gase mit Molekulargewicht von etwa 64,5 ist die Abweichung schon bei etwa 0,5° C festzustellen. Dies entspricht genau der von Ihnen gegebenen Deutung, daß die Konvektion erst bei etwas höheren Temperaturdifferenzen einsetzt und nicht sofort bei einem sehr kleinen ΔT . Die Konvektion in Äthylchlorid ist infolge des stärkeren Auftriebs und der kleineren inneren Reibung wesentlich größer als in Luft. Allerdings ist das Einsetzen der Konvektion bei den hiesigen Messungen nicht unstetig, sondern setzt ganz allmählich ein, so daß eine genaue Festlegung des Beginns der Konvektion nicht möglich ist. Ich halte es aber für möglich, durch geeignete Apparaturen, z. B. durch senkrechte Stellung des Drahtes und engeres Gefäß diesen Punkt schärfer zu fixieren. Ich glaube wohl, daß man auf diese Weise Wärmeleitfähigkeiten ohne Mitwirkung von Konvektion mit einiger Genauigkeit messen könnte... gez. H. SENFTLEBEN.“

Daß bei einem dünnen Draht in verhältnismäßig weitem Gefäß die Konvektion keine merkbare und zufällige Verzögerung erleidet, ist geometrisch leicht einzusehen, da der Ablösung auch der geringsten erwärmten Gasmenge kein Hindernis entgegensteht, vor allem nicht das bei einer horizontal ausgedehnten Kontaktfläche größte Hindernis: das Heranführen des notwendigen Ersatzes für die sich ablösenden und aerostatisch aufsteigenden Luftquanten auf Luftbahnen von häufig erheblichem Bewegungswiderstand. Würde man bei den gleichen Versuchen etwa eine dünne, horizontale Platte verwenden, so würde sich wahrscheinlich eine ähnlich unstetige Ablösung ergeben, wie bei uns¹⁾.

¹⁾ Anm. b. d. Korr.: Inzwischen hatte Herr Prof. SENFTLEBEN die Freundlichkeit, die am Schlusse seines o. a. Briefes erwähnte Modifikation zu untersuchen. Wie er am 25. 7. 1953 mitteilt, bildet sich in einem senkrecht stehenden Rohr von 5 mm ϕ mit zentralem, vertikalen Heizdraht die Konvektion wesentlich später aus als in dem bisher verwendeten horizontalen Rohr, d. h. erst bei erheblich größeren Temperaturdifferenzen. Bei Luft ist bis zu $\Delta t = 25^\circ \text{C}$ überhaupt kein Einsatz der Konvektion zu bemerken; bei Äthyl-

11. Erwärmungsversuche mit künstlichem Strahler

Nachdem so die Zurückführung der gefundenen Unstetigkeit bei der Erwärmung des Meßkörpers auf den Einsatz konvektiver Luftbewegung an der Oberfläche des Meßkörpers an Wahrscheinlichkeit gewonnen hat, wurde angestrebt, diese Erscheinung auch im Laboratorium zu untersuchen. Nun war klar, daß die früheren Versuche, die wahre Erwärmung durch Anbringen einer durch Abklingversuche gewonnenen Abkühlungskurve zu messen, selbst bei Überwindung der oben dargelegten meßtechnischen Schwierigkeiten nicht erfolgreich sein konnten. Denn bei jenen Abkühlungsversuchen mußte man stets vom konvektiven Zustand der den Meßkörper umgebenden Luft ausgehen. Und man darf als gewiss annehmen, daß die Temperaturdifferenz, bei der eine einmal bestehende Konvektion bei weiterer Abkühlung erlischt, wesentlich verschieden ist von dem Punkt, wo, vom Temperaturgleichgewicht ausgehend, die erste Konvektion entsteht.



Um die Erwärmungskurve unter kontrollierten äußeren Umständen zu gewinnen, wurde ein „Schwarzer Körper“ nach Abb. 10 improvisiert, indem ein Tauchsieder über einen Schiebewiederstand nur so stark belastet wurde, daß das Wasser, womit eine Blechbüchse mit eingebauter Strahlungskammer gefüllt war, eben am Sieden, also auf 100°C blieb.

Abb. 10. Künstlicher Strahler für 100°C , als Schwarzer Körper ausgebildet.

Eine technische Schwierigkeit mußte hier überwunden werden, die überall dort auftritt, wo mit einem für „parallele“ Sonnenstrahlung gebauten Strahlungsmesser der divergente Strahlungsfluß einer nahen Strahlungsquelle gemessen werden soll. Da in unserem Pyrheliometer der Meßkörper etwa 15 cm von der Front-

chlorid ist er bei etwa 15° feststellbar... Prof. S. hält es auch für denkbar, durch Verwendung eines an Stelle des bisherigen Heizdrahtes flächenhaft geformten Heizkörpers den von mir gefundenen „Knick“, d. h. einen mit plötzlicher Ablösung verbundenen, schroffen Übergang vom molekularen zum konvektiven Austausch im Experiment zu verwirklichen.

platte entfernt ist, war tatsächlich die auf ihn auftreffende divergente Strahlung so schwach, daß das Galvanometer nur 2—3 Skt (entsprechend einer Erwärmung von $0,2\text{--}0,3^\circ\text{C}$) anstieg. Daher wurde, entsprechend der Führung von Licht durch einen an der Oberfläche total reflektierenden Glasstab, ein „Strahlungsrohr“ von $10\text{ mm } \phi$ aus beiderseits hochglänzend versilbertem dünnen Kupferblech so in das Pyrheliometer eingesetzt, daß die die Strahlungskammer verlassende 100° -Strahlung beim Austritt erfaßt und verlustfrei dem Meßkörper zugeleitet wurde. Hierdurch wurde zugleich verhindert, daß ein erheblicher Teil der diffusen Strahlung zu unerwünschter Erwärmung der inneren, den Meßkörper umgebenden Instrumententeile diene.

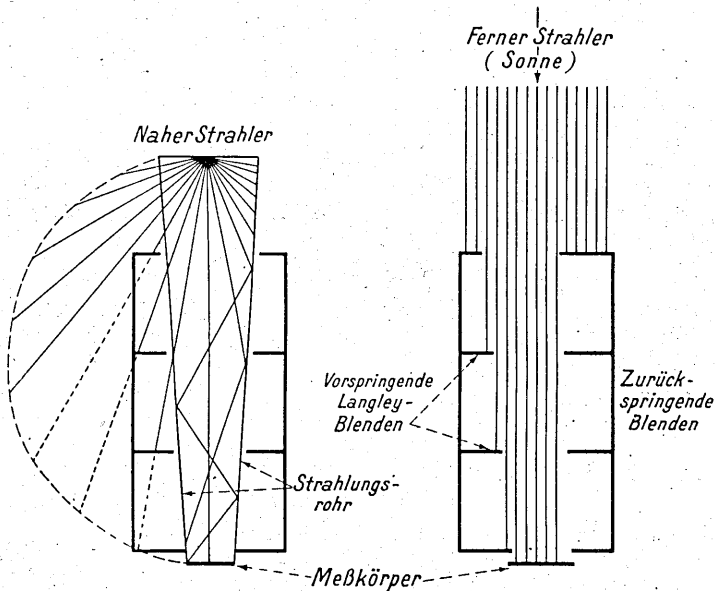
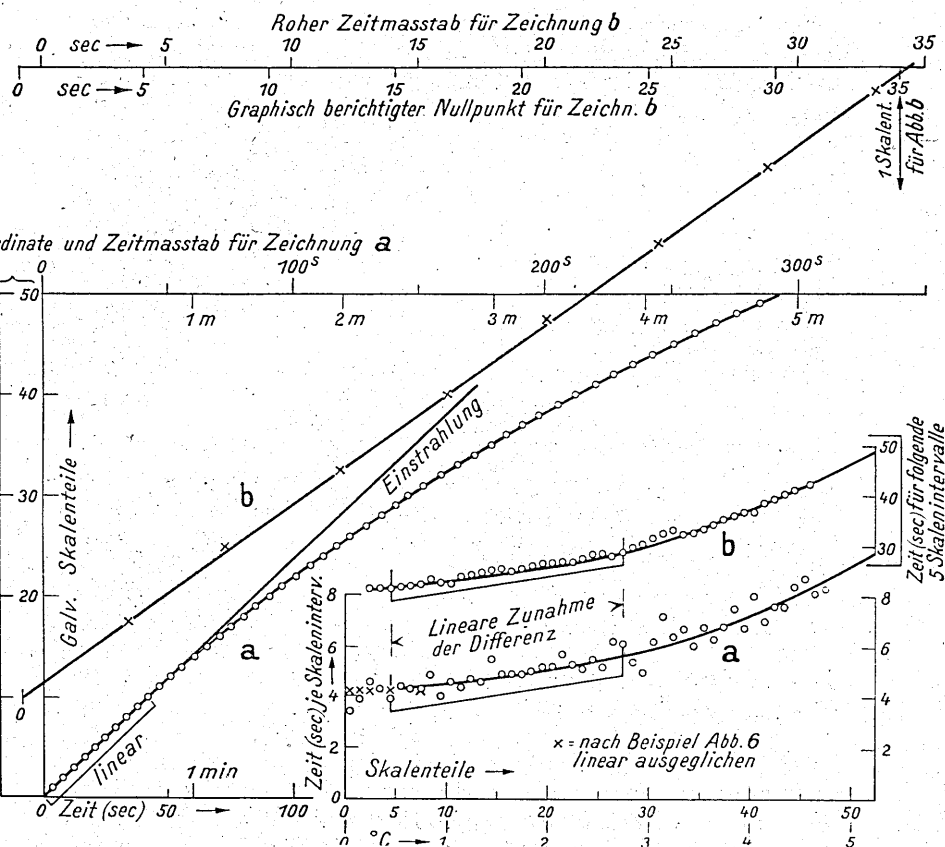


Abb. 10a. Diffuse und gerichtete Strahlung im Pyrhelio- und Aktinometer.

In Abb. 10a wurde versucht, diese Verhältnisse schematisch darzustellen. Rechts ist der Tubus eines Strahlungsmessers mit den üblichen nach innen vorspringenden LANGLEY-Blenden in der linken Hälfte dargestellt, worin gerichtete oder „parallele“ Strahlung von der Sonne oder einem anderen sehr fernen Strahler einfällt (die Richtungsdivergenz von $1/2^\circ$ in der Sonnenstrahlung kann

hierbei außer Betracht bleiben, jedoch nicht bei genaueren Untersuchungen über die geometrische Ausbreitung des Sonnenlichtes hinter Blenden). In der rechten Hälfte der rechten Zeichnung ist dagegen die Wirkungsweise der auf S. 15 begründeten, nach innen zurückspringenden Blenden veranschaulicht, die in den hier beschriebenen Strahlungsmessern I und II verwirklicht wurden. Links ist der gleiche Tubus dargestellt, in den diffuse oder besser divergente Strahlung einfällt. Die Länge der Strahlen bis zum begrenzenden Halbkreis stellt den \cos des Austrittswinkels dar und entspricht der Bestrahlungsstärke. Man erkennt, ein wie geringer Teil der gesamten, von dem nahen Strahler ausgehenden Strahlung tatsächlich den Meßkörper erreicht. Dies ist sehr zu berücksichtigen, wenn man bei Laborversuchen den Strahlungsstrom etwa einer Lampe in absoluten Einheiten messen will. Man muß hiernach damit rechnen, daß das Meßergebnis an einem nahen Strahler zu gering ausfällt. Zugleich ist im linken Bild die Wirkungsweise des Strahlungsrohres angedeutet, wobei die mehrfachen Reflexionen nur an zwei Strahlen durchgeführt wurden, und wobei es günstig wirkt, daß die Strahlen größter Energie unter flachen Winkeln, also mit nur geringem Reflexionsverlust auf den Meßkörper gespiegelt werden.

In Abb. 11 und 12 ist eine Probe der auf diese Weise gewonnenen Ergebnisse wiedergegeben. Abb. 11a zeigt, ähnlich der Darstellung in Abb. 5a, die gemessene Erwärmungskurve, hier bei einer Einstrahlung von etwa $0,9 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$. Die Abszisse stellt die Beobachtungszeit dar (bis 300 s), die Ordinate in zwei gleichberechtigten Skalen die Galvanometerteile und die Temperatur. Auch hier wieder liegen die ersten 8 Meßwerte, wie aus der vergrößerten Darstellung Abb. 11b klar hervorgeht, sehr genau auf einer Geraden! Daß der Anfangspunkt verspätet getastet wurde und daher zeichnerisch extrapoliert werden mußte, ist darauf zurückzuführen, daß eine wärmeisolierende Platte zwischen Strahler und Pyrheliometer sehr vorsichtig weggezogen werden mußte. Da auch alle anderen, im Laboratorium gewonnenen Erwärmungskurven ebenso wie die Messungen im Freien vor Sonne ausnahmslos ein anfänglich lineares Ansteigen zeigen, kann dessen Realität wohl kaum mehr bezweifelt werden. Die Messungen vor Sonne wurden sogar mit zwei verschiedenen Pyrheliometern des neuen Typs mit Meßkörpern von 7 und $14\frac{1}{2} \text{ g}$ ausgeführt. Abb. 12 stellt die gleichen Messungen in Differenzen dar, entsprechend Abb. 9 links. Vgl. auch die Ausführungen Abschn. 12, S. 51.



b. 11. a: Meßreihe I vom 9. 4. 1953 mit künstl. Strahler 100°C (emp.-Zeit-Kurve). b: Die acht ersten Werte linear ausgeglichen.

Abb. 12. Meßreihe I vom 9. 4. 1953 mit künstlichem Strahler 100°C (1. und 5. Differenzen)¹⁾.

¹⁾ Anm. b. d. Korr.: In der Reinzeichnung Abb. 12 hätten die durch Kreuze dargestellten Meßpunkte im Gebiet linearer Erwärmung, d. h. konstanter Differenz zwischen 0 und 5 Skt durch eine horizontale Gerade verbunden sein sollen. Die Meßpunkte im Bereich linearer Zunahme der Differenzen, zwischen 5 und 27 Skt, sind durch geneigte Gerade ausgeglichen zu denken parallel den darunter gezogenen geneigten Geraden, statt durch schwach gekrümmte Linien.

Wenn die ersten 5—10 Messungen es aber regelmäßig erlauben, die unvermeidlichen Beobachtungsfehler linear auszugleichen mit dem Ergebnis, daß die Differenzen aufeinander folgender Meßwerte gleich groß sind, so scheint dies nur den einzigen Schluß zu erlauben, daß in diesem „linearen“ Bereich die Wärmeverluste des Meßkörpers vernachlässigbar gering sind im Vergleich zu der Erwärmung durch die Sonnenstrahlung oder einen künstlichen

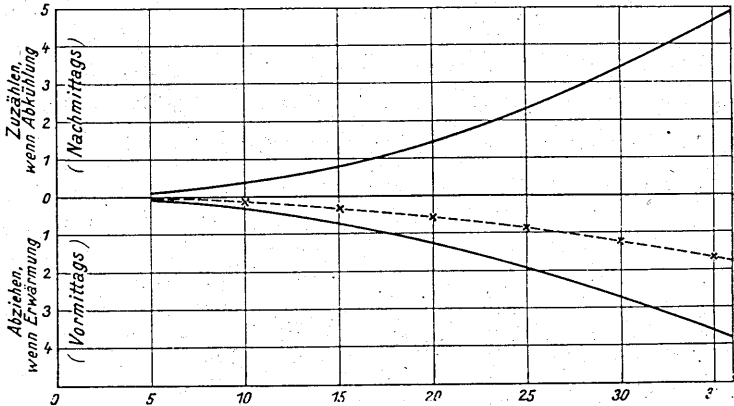


Abb. 13. Verbesserung der Durchlaufzeiten für 5 Skt, wenn passive Lötstelle ihre Temperatur um 1 Skt in 60 s ändert.

Strahler ähnlicher Intensität. Trifft die Annahme eines derartigen, gewissermaßen „verbotenen“ verlustfreien Meßbereiches zu, dann erfordert die Strahlungsmessung keine Korrektur für Wärmeverlust, sondern nur noch für etwaige Änderung der inneren Instrumenttemperatur und damit der Temperatur der passiven Lötstelle während der kurzen Meßdauer von etwa 15 bis 30 s, gerechnet für das Durchlaufen der ersten 5 Skalenteile. Diese Änderung darf für derart kurze Zeiten als linear betrachtet werden. Zudem hat man es durch einen Kunstgriff in der Hand, sie stets gering zu halten, so daß diese Korrektur keine Schwierigkeiten bietet. Abb. 13 zeigt dieses Korrektionsblatt. Die untere Hälfte, bei sich erwärmendem Strahlungsmesser von den Meßwerten abzuziehende Verbesserungswerte, kommt im allgemeinen für den Vormittag in Betracht, die obere Hälfte mit für Abkühlung des Instrumentes zuzuzählenden Verbesserungen für den Nachmittag.

Die gestrichelte Kurve in Abb. 13 gibt die stets abziehende Verbesserung der Meßwerte für den Fall, daß man längere Zeit hindurch das Galvanometer beobachtet und daher den linearen Anfangsbereich überschritten hat. Dies kann z. B. notwendig werden, wenn ein nur wenig empfindliches Galvanometer zur Verfügung steht.

Die Einzelmessung beschränkt sich unter der Voraussetzung, daß der Verlauf der Innentemperatur durch Stichproben überwacht wird, darauf, nach Erreichen der Nullstellung des Galvanometers z. B. 29 Skt) durch den auf dem Lichtbild Abb. 15 unter 17 sichtbaren Drehgriff, nachdem der Chronograph in Lauf gesetzt wurde, zugleich den Verschuß zu öffnen und den Meßkörper in Meßstellung zu bringen. Nach Durchgang des Galvanometerzeigers durch eine individuelle Zahl von Skalenteilen, innerhalb deren die Wärmeströmung im Meßkörper stetig geworden ist (hier z. B. 1 Skt), wird das Passieren des Anfangsstriches (z. B. Skt 30) auf den Chronographen getastet und ebenso die folgenden 5 bis 10 Durchgänge. Die auf Zehntelsekunden ausgemessenen Zeitabstände der Chronographen-Marken werden nach Abb. 8 eingetragen und linear ausgeglichen. Die Zeit zum Durchlaufen von fünf Skalenteilen (z. B. 21,19 s) wird in den für das Instrument bekannten und jederzeit nachprüfbareren Eichwert (z. B. hier 19,02) dividiert. Der Quotient liefert den Strahlungsstrom in $\text{cal/cm}^2\text{min}$ (zum Beispiel $19,02 : 21,19 = 0,899 \text{ cal/cm}^2\text{min}$). Falls sich die Temperatur der passiven Lötstelle merklich änderte, ist die rohe Meßzeit von z. B. 21,19 s mit Abb. 13 vor Ausführen der Division zu verbessern.

12. Zur Dreiteilung der Erwärmungskurve nach Abb. 12

Abbildung 12 gibt die Zeitdifferenzen der Durchgänge durch aufeinander folgende Skalenstriche. Kurve *a* enthält in kleinen Kreisen die rohen Meßwerte, in Kreuzen die linear nach Abb. 11b ausgeglichenen acht Anfangswerte mit berichtigtem Anfangspunkt. Hier die Zahlenwerte:

Meßwerte	0	3,4	7,3	11,9	16,2	20,1	24,5	28,8	33,1	38,0	42,0	46,6
Differenz		3,4	3,9	4,6	4,3	3,9	4,4	4,3	4,3	4,9	4,0	4,6
ausgeglic.	-0,9	3,3	7,5	11,7	16,6	20,2	24,5	28,8	33,0			
Differenz		4,2	4,2	4,2	4,3	4,2	4,3	4,3	4,2	Mittel f. 1 Skt = 4,24 ^s		
										Mittel f. 5 Skt = 21,19 ^s		

Nur diese acht, ohne Zwang durch eine Gerade auszugleichenden Meßwerte kommen für die Strahlungsmessung zur Verwendung.

Jedoch ist es nicht uninteressant, auch den weiteren Verlauf der Erwärmungskurve aus Abb. 11 in Form der ersten Differenzen in Abb. 12 zu verfolgen.

Nach den früheren Ausführungen sollte man erwarten, daß nach Einsetzen der, wie bekannt, bei dieser Anordnung den Wärmeverlust durch Leitung und Strahlung weit überwiegenden Konvektion die Gerade sogleich in eine logarithmische Kurve übergeht, mit zunehmend anwachsenden Differenzen aufeinanderfolgender Einzelmessungen nach $\Delta\tau = \alpha(t - t_e)$, wobei t die Temperatur des Meßkörpers, t_e diejenige des Pyrheliometers bzw. Ausgleichskörpers, α den Trägheitsbeiwert bedeutet, wobei $\alpha = 1/\beta$, wenn β den Regsamkeits-Beiwert darstellt, und $\alpha \geq 1 \geq \beta$.

Aber dieser erwartete Übergang findet in allen bisher vorliegenden Laboratoriumsmessungen nicht statt. Es folgt vielmehr in Abb. 12 a, und noch besser erkennbar in 12 b, in der Kurve der aufeinanderfolgenden Differenzen Skt 1—5, Skt 2—6 usw. ein Übergang mit nicht zunehmend, sondern gleichförmig anwachsenden Differenzen, der hier bis 27 Skalenteile reicht und einer Parabel entspricht. Erst dann scheint der Übergang zur logarithmischen Kurve vor sich zu gehen, zugleich mit einem zweiten Knick der Kurve in Richtung auf größere Steilheit.

Es ist nicht uninteressant, mit diesem Befund einer zweimaligen Zustandsänderung der den Meßkörper umgebenden Luft mit zunehmender Temperaturdifferenz gegen die Wandung den früher auf S. 43 gebrachten Auszug aus der Arbeit von SCHMIDT und SAUNDERS 1938 zu vergleichen, worin zwei verschiedene, bei zunehmender Temperaturdifferenz aufeinanderfolgende Arten des Austausches, eine zellulare und eine stärkere turbulente Form unterschieden werden.

Mehrfach wurde beim Übergang vom linearen in den gekrümmten Teil der Erwärmungskurve (nicht zu verwechseln mit dem linearen Teil der Differenzkurve) in den Darstellungen nach Abb. 8 ein besonders starkes Herausfallen des nächsten Meßwertes gefunden, als ob die einsetzende Konvektion bestrebt sei, sogleich den Wert der Erwärmungskurve herzustellen, der ohne die anfängliche Linearität erreicht worden wäre. Ganz entsprechend scheint in Abb. 12, auch in anderen hier nicht mitgeteilten Meßreihen eine besonders starke Streuung der Einzelwerte beim Übergang vom parabolischen zum logarithmischen Kurventeil einzutreten.

Diese Besonderheiten der Erwärmungskurve erhalten dann praktische Bedeutung, wenn Strahlungsmessungen das lineare Anfangs-

gebiet überschreiten sollten. Während die gestrichelte Verbesserungskurve in Abb. 13 noch eine vom Anfang an logarithmische Erwärmungskurve voraussetzt, müßte sie in Wirklichkeit sowohl den linearen Anfangsbereich wie den späteren parabolischen, und erst dann den logarithmischen Temperaturanstieg berücksichtigen.

Zum Schluß soll noch eine vielfach gemachte Beobachtung mitgeteilt werden, die vielleicht auch für die Deutung der Vorgänge zwischen Meßkörper und Wandung herangezogen werden muß: Es wäre zu erwarten und trifft auch öfters ein, daß die Konvektion um so früher einsetzt, je stärker die Einstrahlung ist. Aber in vielen Fällen tritt das Umgekehrte ein, so besonders bei den Messungen durch das Rotfilter RG 2, das die Erwärmungsgeschwindigkeit des Meßkörpers stark herabsetzt. Hier ist das lineare Gebiet oft auffallend schlecht ausgeprägt, so daß vermutet wird, daß für den Übergang vom linearen zum gekrümmten Verlauf der Erwärmungskurve nicht nur die Übertemperatur des Meßkörpers maßgebend ist, sondern zugleich auch die Zeit, während derer eine gewisse Übertemperatur besteht.

Alle diese Fragen stehen in Verbindung mit der Frage, unter welchen Umständen das Newtonsche Abkühlungsgesetz anwendbar ist. Es mag sein, daß die in dem Schrifttum zum Ausdruck kommende Unsicherheit, in welchem Temperaturbereich dieses Gesetz gilt, von dem je nach der Meßanordnung verschiedenen Zustand der umgebenden Luft abhängt. So gibt z. B. CHWOLSON in (10), S. 20 an, es sei nur unterhalb einer Temperaturdifferenz von 5°C annähernd gültig. Dagegen findet HARTMANN (Anhang, Lit. Nr. 4), „daß innerhalb der hier in Frage kommenden Grenzen (d. h. für einen Temperaturunterschied bis zu 20°C über die Umgebung) der Gang des Thermometers jedenfalls mit sehr großer Annäherung durch das Newtonsche Abkühlungsgesetz dargestellt wird“.

13. Die Eichvorrichtung

Eine Absolutmessung der Sonnenstrahlung setzt voraus, daß die Erwärmung des Meßkörpers in $^{\circ}\text{C}$ auch auf lange Zeit mit der gleichen, bekannten Genauigkeit gemessen wird (woraus sich die Größe des mittleren Fehlers ergibt). Wenn auch versucht wurde, das neue Gerät gegen Beschädigungen auf schwierigen Transporten unempfindlich zu machen, so könnte etwa bei einer Entfernung von ins Innere eingedrungenem Wasser oder Schmutz die

Thermosäule beschädigt werden. Ebenso bildet erfahrungsgemäß jedes elektrische Meßinstrument einen locus minoris resistantiae. Es sollte daher die Möglichkeit bestehen, sowohl das Thermoelement wie auch das Galvanometer jederzeit nachzuprüfen oder nach etwa erforderlicher Auswechslung von Thermoelement, Meßschleife usw. eine neue Eichung durchzuführen.

Dies geschieht nach Abb. 14,1, vermittels des aus dem Gerät auszubauenden¹⁾ Ausgleichskörpers (2) und eines ähnlichen, ebenfalls

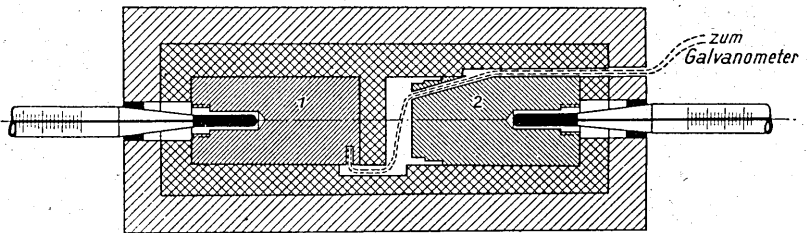


Abb. 14.1

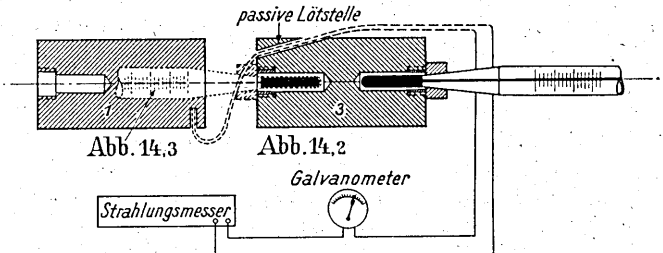


Abb. 14. 1 Neu-Eichung der Thermosäule, 2 Kontrolle des inneren und äußeren Thermokreis, 3 Vergleichung beider Hg-Thermometer.

¹⁾ Bei loser Seidenschnur (Abb. 4 bei 3) löst man die den Ausgleichskörper haltenden drei Schrauben und zieht ihn vorsichtig ab, bis das Rohrstück 4 mit dem Meßkörper erscheint. Nun steckt man die drei beigegebenen Sicherungsstifte so in die drei Bohrungen B von Teil 4, daß dieser mit dem Ausgleichkörper fest verbunden bleibt. Anderenfalls könnte die Thermosäule während der Entfernung von Ausgleichkörper und Teil 4 leicht beschädigt werden. Nun kann man beide Teile leicht herausziehen und hat im Inneren von Teil 4 Meßkörper und Thermosäule leicht zugänglich vor sich. Beim Wiedereinsetzen muß die federnde Kupplung zwischen Teil 4 und 4' richtig einrasten! Die Thermosäule ist durch eine feine Madenschraube in ihrer Bohrung im Meßkörper festgeklemmt.

aus Kupfer gefertigten Körpers (1). Beide werden in ein kleines Kästchen aus Isolierstoff so eingelegt, daß die Thermometerbohrungen nach außen gerichtet sind. Die passive Lötstelle befindet sich im Ausgleichskörper. Die aktive Lötstelle wird in den Klotz 1 ebenso eingeklemmt, wie sie es im Meßkörper war, und das Galvanometer wird ebenso angeschlossen. Nun werden die beiden Hg-Thermometer mit möglichst gutem Kontakt in die Bohrungen eingesetzt (evtl. mit Hilfe eines Tropfens Wasser oder dgl.), und man erwärmt den Klotz 1, bis das Galvanometer einen kräftigen Ausschlag zeigt. Nun wird das Kästchen geschlossen und das Abklingen wird in gleichmäßigem Rhythmus an beiden Thermometern und am Galvanometer beobachtet und notiert. Die ersten Ablesungen pflegen weniger zuverlässig zu sein, weil bei großer Temperaturdifferenz das Hg-Thermometer im erwärmten Kupferklotz möglicherweise der Abkühlung desselben nicht völlig folgen konnte. Der lineare Verlauf der Eichkurve zeigt, wie weit die Eichung gelungen ist. Tatsächlich wird ja nur ein ganz kleiner Temperaturbereich von 5 oder 10 Skt entsprechend 0,5 bis 1,0° C für die Strahlungsmessung gebraucht. Hiernach kann also nur mit Hilfe zweier geprüfter Hg-Thermometer¹⁾ eine neue, vollständige Eichung des Pyrheliometers und Galvanometers gemeinsam ausgeführt werden; es kann daraus also auch der Umrechnungswert in $\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ nach jedem Eingriff oder Schaden neu bestimmt werden.

Besonders wichtig ist die Möglichkeit, etwaige Veränderungen der Apparatur durch öftere Kontrolle festzustellen, auch ohne daß äußerlich feststellbare Schäden erst den Anlaß dazu geben. Dies kann in einfacherer Weise geschehen, ohne die empfindliche Thermosäule ausbauen zu müssen. Wir benutzen eine zweite Thermosäule als — bei bekannter Temperaturdifferenz ihrer Lötstellen — bekannte Spannungsquelle eines Stromkreises, der die eigentliche Thermosäule des Strahlungsmessers und das Galvanometer umfaßt. Erhalten wir bei gleicher Spannung immer denselben Galvanometerausschlag, so besagt dies, daß der Widerstand, den Thermosäule und Galvanometer darstellen, unverändert geblieben ist, woraus auf unveränderten Zustand der empfindlichen Teile geschlossen werden darf. Denn der Bruch eines Thermo- oder Galvanometer-

¹⁾ Im äußersten Fall sogar, wenn nur noch ein einziges Thermometer vorhanden ist, das dann nur zeitweise zur Temperaturkontrolle von Kupferklotz 2 in diesen eingesetzt wird, sonst im Klotz 1 verbleibt.

drahtes würde sich bei dieser Messung ebenso zeigen, wie ein eventueller Kurzschluß oder Körperschluß.

Hierzu bedient man sich nach Abb. 14, des schon beschriebenen Kupferklotzes 1, sowie eines dem Ausgleichskörper gleichenden Klotzes 3. In beide wird das Reserve-Thermoelement in genau gleicher Weise eingebaut, wie es im Meß- und Ausgleichkörper der Fall sein würde. Es wird ebenso mit dem Galvanometer verbunden, aber unter Zwischenschaltung des Strahlungsmessers selbst in Ruhestellung, d. h. Meßkörper an Ausgleichskörper angepreßt.

Kupferklotz 1 wird erwärmt, und man nimmt, wie oben beschrieben, die Abfallkurve beider Thermometer und des Galvanometers auf. Diese Eichung muß immer wieder gefunden werden, solange Strahlungsmesser und Galvanometer unbeschädigt sind. Natürlich darf diese Kontroll-Eichkurve nicht versehentlich zur Berechnung von Strahlungswerten verwendet werden.

Schließlich ermöglicht Kupferklotz 3 durch zwei gegenüber angebrachte Thermometerbohrungen einen Vergleich der beiden Eichthermometer nach Abb. 14.

14. Das Galvanometer

Aus Gründen technischer Einfachheit¹⁾ wird die Temperaturänderung des Meßkörpers nur durch ein einziges Thermoelement gemessen, das einen Widerstand von wenigen Ohm besitzt. Hiernach kommt als Meßgerät nach alter Erfahrung nur ein Galvanometer mit geringem inneren Widerstand (etwa 10Ω) in Betracht mit einer Empfindlichkeit von mindestens $4 \mu\text{V/Skt}$ oder bei einem Gesamtwiderstand von etwa 15Ω einer Stromempfindlichkeit von etwa $3,10^{-7} \text{ A/Skt}$. Zur Benutzung im Freien soll es unempfindlich gegen Wind, Feuchte, Temperatur und deren Änderung sein, außerdem möglichst kurze Einstellzeit und gute Nullpunkt Konstanz aufweisen. Wie für meteorologische Messungen zuerst von WILHELM

¹⁾ Ein Thermoelement darf metallischen Kontakt im Meßkörper besitzen. Mehrere Th.-E. müßten sorgfältig elektrisch isoliert, aber thermisch möglichst gut leitend eingesetzt werden, was besonders unterwegs leicht zu Störungen führen kann und das Auswechseln und Nacheichen erheblich kompliziert. Auch wächst bekanntlich die Stromstärke nicht entsprechend der Zahl der zu einer Thermosäule vereinigten Elemente infolge des gleichzeitig wachsenden Ohmschen Widerstandes.

SCHMIDT gefunden, später durch GEIGER und AMANN (3) bestätigt, eignet sich das Schleifengalvanometer von Carl Zeiss, Jena, besonders, indessen sind auch fast alle anderen modernen, niedrigohmigen Galvanometer mit Zeiger oder, wenn die Stromquelle keine Schwierigkeit macht, auch mit Lichtzeiger verwendbar. Dagegen kommen, wie der ÄNGSTRÖMSche Versuch hinreichend lehrte, Spiegelgalvanometer wegen ihrer Erschütterungs-Abhängigkeit weniger in Frage.

Gegenüber mechanischen Strahlungsmessern wie dem Silverdisk und Michelsons Bimetall-Aktinometer bedeutet zweifellos die Notwendigkeit eines Galvanometers in unserem Falle eine beträchtliche Verteuerung. Doch wird heute jedes Institut, das Strahlungsmessungen ausführen will, und ebenso jede moderne Expedition ohnehin mindestens über ein Galvanometer für klein- oder bioklimatologische Zwecke usw. verfügen, das in den meisten Fällen auch für die Strahlungsmessungen benutzt werden kann. Bei Neuanschaffungen sollte durch geeignete Auswahl des inneren Widerstandes auf die Möglichkeit thermoelektrischer Messungen Rücksicht genommen werden. Auch wird das Vorhandensein eines dafür geeigneten Instrumentes erfahrungsgemäß zu entsprechenden Untersuchungen anregen. — Bei Verwendung im Freien wird das Galvanometer zweckmäßigerweise auf einem leichten, aber festen Holzstativ befestigt, wie es die Feldmesser verwenden, um nicht den unvermeidlichen Erschütterungen des Tisches unterworfen zu sein, worauf geschrieben und der Chronograph betätigt wird und worauf eventuell der Strahlungsmesser aufgestellt ist.

Es darf besonders darauf hingewiesen werden, daß das von Carl Zeiss, Jena, bis 1945 gebaute Schleifengalvanometer noch recht groß und schwer ist. Inzwischen liegen reiche Erfahrungen hinsichtlich der Standfestigkeit der modernen Dauermagnet-Legierungen vor, mittels derer das so wichtige Meßgerät erheblich verkleinert und erleichtert werden könnte, wofür Verf. bereits Vorschläge gemacht hat. Seine Anregung freilich, eine Ausführung des Schleifengalvanometers in vereinfachter und daher auch verbilligter Ausführung herauszubringen, hat bisher bei der Herstellerfirma keinen Anklang gefunden, obwohl festzustehen scheint, daß in der jetzigen Ausführung mehrere Feinstellungen zur genauen Einstellung des Schleifenträgers zwischen den Magnetpolen nur in der Fabrik, niemals bei einem Benutzer in Tätigkeit gesetzt worden sind. Es wäre sicher auch für die Firmen nicht uninteressant, wenn auf Meteorologen-Tagungen auch über derartige

Fragen innerhalb der interessierten Sachkundigen eine Meinungsforschung erfolgen könnte¹⁾.

15 a. Parallaktisches Stativ

Da nach S. 15 auf sorgfältige Nachführung zur Sonne zu achten ist, aber auch überhaupt zur Erleichterung von Serienmessungen, sollte

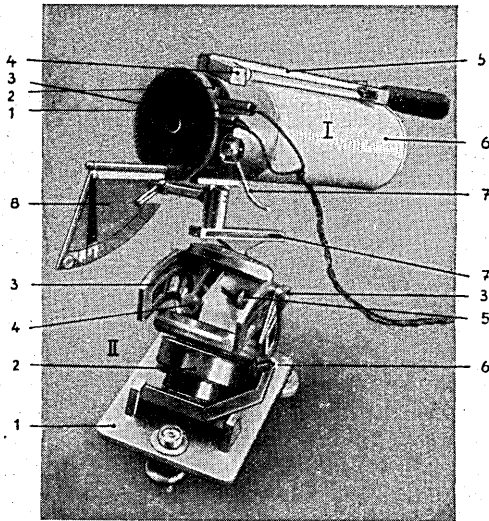


Abb. 15. I Strahlungsmesser, II Stativ.

1 = Vorgesetzte Strahlungsschutzplatte; die Eintrittsöffnung für die zu messende Strahlung von 1,0 cm² Fläche liegt in der eigentlichen Frontplatte des Gerätes. 2 = Hebel für Filterscheibe. 3 = Galvanometer-Anschlüsse. 4 = Metallklotz, worin Thermometer und passive Thermolötstelle zur Messung der Innentemperatur. 5 = U-Schiene mit Handgriff zum Nachführen; enthält zugleich das Einstellvisier. 6 = Schutzhülle für die Thermosflasche. 7 = Drehgriff zur Bewegung des Meßkörpers in Meß- bzw. Ruhestellung; gleichzeitig entsprechende Bewegung des Verschlusses. 8 = Abnehmbarer Pendel-Höhenwinkelmesser.

II. Parallaktisches Uhrwerk-Stativ für Strahlungsmesser.

1 = Grundplatte mit Libelle und Horizontierschrauben. 2 = 24 Stunden-Uhrwerk. 3 = Einstellung auf Orts-Polhöhe mit Feststellung. 4 = Feinbewegung zur Deklinations-Einstellung. 5 = Festklemmschraube dafür. 6 = Ausrückbare Feinbewegung für wahlweisen Anschluß eines Synchronmotors. 7 = Schieber zum Ausbalanzieren des exzentrischen Instrumentengewichts.

¹⁾ Anm. b. d. Korr.: Inzwischen hat CARL ZEISS, Jena, ein völlig neues Modell des Schleifengalvanometers herausgebracht, das mit verschiedenen Verbesserungen und Bequemlichkeiten versehen und abgebildet ist in Druckschrift CZ 32-805-1, dessen Eignung für diese Messungen aber noch unbekannt ist.

nur ein parallaktisches Nachführstativ für Strahlungsmesser verwendet werden, mit Feinbewegung im Stundenwinkel, während Polhöhe und Deklination von Hand eingestellt werden können. Vom Verf. sind zwei Tischstative angegeben worden: eines, das zur Normalausrüstung dieses Strahlungsmessers gedacht ist, in einfachster Ausführung, sowie in vollkommenerer Ausführung mit Nachführung durch Uhrwerk, zugleich mit Anschluß für jederzeit anzubauenden Antrieb durch Synchronmotor und mit Feinbewegung auch der Deklination (Abb. 15). Hier ist zugleich die Außenansicht des Pyrheliometers dargestellt.

15 b. Heizvorrichtung

Bei der Wichtigkeit der Abkühlungsfunktion (Halbwertszeit) des Meßkörpers sollte diese unter allen praktisch vorkommenden extremen Verhältnissen von Lufttemperatur und -druck usw. festgestellt werden können, auch wenn gerade weder die Sonne noch eine geeignete Lichtquelle zur Verfügung steht, um dem Meßkörper eine Anfangserwärmung von einigen °C zu erteilen, deren Abklingen am Galvanometer verfolgt wird. In Abb. 7 links ist ein elektrischer Gasanzünder abgebildet, der mit Hilfe eines Glasrohrs und zweier Drahtenden so umgeändert wurde, daß er von vorne in den Strahlungsmesser eingeführt werden kann, so daß die Heizspirale etwa 2 mm vor dem Meßkörper zu stehen kommt. Es bedarf nur eines Schalterdruckes von wenigen Sekunden, um den Galvanometerfaden bis zum Skalenende zu treiben. Wenn sich dieses kleine Gerät für die Dauer als notwendig erweisen sollte, könnte es, statt jetzt mit 220 oder 110 V, auch für Niederspannung oder zur Betätigung durch eine Flamme oder andere Wärmequelle eingerichtet werden.

15 c. Einstellvorrichtung

Die zugleich als Handgriff dienende Visiervorrichtung könnte verbogen sein. Um wieder den richtigen Ort des kleinen Sonnenbildchens der Lochblende zu finden, kann an Stelle des nach S. 54 zu entfernenden Ausgleichskörpers ein Zentrierglas aufgesetzt werden, womit das Gerät auf die Sonne gerichtet wird, so daß das Visier entsprechend korrigiert werden kann. Ebenfalls auf diese Weise kann der Meßkörper durch Betätigung der Justierschrauben der drei Seidenfäden notfalls neu zentriert werden. — Beides kann aber auch ersetzt werden durch direkten Einblick in den Tubus mit Hilfe eines vor die halbe Öffnung gehaltenen Spiegels.

15 d. Hg-Thermometer

Für die Eichung sind genaue, nicht zu träge Hg-Thermometer vorausgesetzt. Sie werden in den genormten Abmessungen gefertigt, wie die Thermometer für die vom Verf. angegebene Thermometer- und Psychrometerschleuder, nur mit erhöhtem Ausschlag von etwa $5 \text{ mm}/^\circ\text{C}$, in $1/10^\circ$ geteilt, so daß $1/100^\circ$ noch zu schätzen ist. Daher können auf einem Thermometer nur wenig über 20° untergebracht werden, sie werden daher in folgenden, übergreifenden Meßbereichen hergestellt: -38 bis -6° , -8 bis $+14^\circ$, 12 bis 34° , 32 bis 52° . Welche Meßbereiche benötigt werden, richtet sich nach dem Klima des Meßortes. Es ist zweckmäßig, von vornherein auch Reservethermometer vorzusehen.

16. Die Bestimmung des Umrechnungswertes

Bezeichnet c die spez. Wärme des Meßkörpers in cal, m seine Masse in g, F den Querschnitt des auftreffenden Strahlenbündels in cm^2 , A den Absorptionskoeffizienten der geschwärzten Oberfläche, Δt die Erwärmung in $^\circ\text{C}$, die einer Wanderung des Galvanometerfadens um 5 Skt entspricht. τ die dafür notwendige Zeit in s, so gilt

$$J = \frac{m \cdot c \cdot \Delta t \cdot 60}{F \cdot A \cdot \tau} + V\% \text{ (cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}\text{)},$$

wobei unter V die etwaigen Verbesserungen verstanden sind. Im folgenden sollen die verschiedenen Faktoren diskutiert werden.

a) Die spezifische Wärme des Meßkörpers aus Kupfer

Bei dem zu den Messungen von 1950 bis 1952 verwendeten Instrument Mod. II war $m = 7,025 \text{ g}$, $F = 1,00 \text{ cm}^2$. Nach Abb. 16 ist die spez. Wärme von Kupfer von der Temperatur abhängig, so daß bei Verwendung eines Umrechnungswertes für mittlere Temperatur eine entsprechende Zusatzverbesserung angebracht werden muß, wenn bei höherer oder wesentlich tieferer Temperatur gemessen würde. Es ist bekannt, daß die spez. Wärme von dem Reinheitsgrad des Metalles abhängt. Trotzdem ist die starke Streuung der bisher verwendeten Werte erstaunlich. Die in Abb. 16 durch Kreuze bezeichneten Werte sind einer umfangreichen Tabelle XIII, Naturkonstanten (F. C. GAUSS, Fünfstellige ... log. u. trig. Tafeln, 76.—79. Aufl. 1904, S. 162) entnommen. Der Wert im Kreis wurde von O. CHWOLSON [4] bei seinem Pyrheliometer verwendet, im

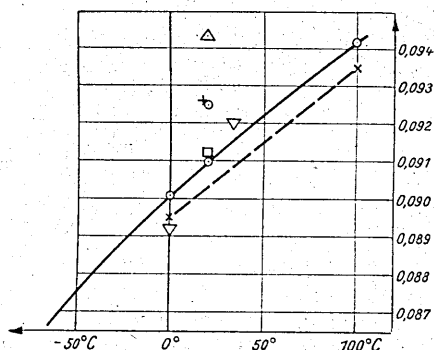


Abb. 16. Spezifische Wärme von Kupfer nach verschiedenen Autoren.

Zeichenerklärung im Text.

Ordinate = cal_{15°}

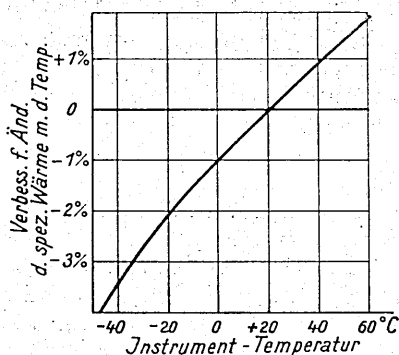


Abb. 17. Verbesserung der gemessenen Strahlungsenergie in %, wenn die Innentemperatur des Instrumentes von 20° C abweicht.

liegenden Dreieck von J. MAURER [5] bei seinem kalorischen Ausstrahlungsmesser, beide ohne Temperaturangabe, das stehende Kreuz von H. F. WEBER-Zürich [6] für sein kalorisches Pyrheliometer von 1884 für 13—21° C. Der Wert im Quadrat wurde von C. CHRISTIANSEN-Kopenhagen [7] benutzt. Die ausgezogene Kurve beruht auf Werten des Tabellenwerkes von D'ANS-LAX 1949. Es wird sich hiernach als zweckmäßig erweisen, die Kupferteile etwa zu fertiger weiterer Instrumente dieser Bauart möglichst aus derselben Kupferstange herzustellen und deren spezifische Wärme bei etwa drei Temperaturen zu messen, wozu bereits Vorversuche angestellt wurden (stehendes Dreieck bei 0° und 34° C). Die Strahlungsmessungen von 1950 bis 1952 wurden mit 0,91 berechnet, während nach den neuesten Tabellenwerten 0,92 wohl richtiger gewesen wäre. Abb. 17 gibt die wahrscheinlichste Verbesserungskurve in Prozent der nach der Formel S. 60 gefundenen Strahlungsintensität.

b) Die Schwärzung

Die Feststellung, wieviel Hundertteile der auffallenden Strahlungsenergie durch die geschwärzte Oberfläche des Meßkörpers in Wärme umgesetzt werden, wird von nahezu allen Autoren als besonders schwierig bezeichnet, vor allem, wenn diese Angabe für ein größeres Wellenlängenbereich erfolgen soll. Man darf sogar ohne Übertreibung sagen, daß durch die noch heute

bestehende Unsicherheit des Absorptionskoeffizienten die tatsächliche Meßgenauigkeit bestimmt wird, und daß diese daher etwa eine Zehnerpotenz geringer ist, als die verschiedenen Instrumente sie leisten könnten.

Nach F. KURLBAUM [8], einem unserer bedeutenden Erforscher der Temperaturstrahlung um die Jahrhundertwende, soll eine die Strahlung meßbar absorbierende Schicht möglichst schwarz sein und soll alle Wellenlängen gleichmäßig absorbieren. „Eine solche Schicht gibt es jedoch nicht, und es ist wichtig, die selektiven Eigenschaften zu kennen, da sie eine ungewöhnlich wichtige Fehlerquelle bilden können.“ So sind Ruß und Platinmohr, die bisher wichtigsten Schwärzungsmittel, für Wärmestrahlen von etwa $20\ \mu$ völlig durchscheinend, während sie mit abnehmender Wellenlänge immer besser absorbieren. Daher erscheint eine sehr dünne Rußschicht für das Auge, d. h. für Licht von der Wellenlänge $500\ m\mu$ bereits völlig schwarz, wenn sie die von einer Strahlungsquelle von $100^\circ\ C$ ausgehende Strahlung mit Maximum bei $8\ \mu$ erst zu 40% absorbiert!

Die angeführte Arbeit bringt auch Messungen der Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite verschieden dicker Rußschichten. Es besteht das auch von K. ÅNGSTRÖM [9] hervor gehobene Dilemma, daß dünne Schwärzungsschichten zwar wegen ihres geringen Wärmewiderstandes günstig sind, aber einerseits einen zu geringen Bruchteil der auftreffenden Strahlung absorbieren, andererseits auch die selektive Reflexion von der Unterlage hindurchlassen. Dickere Schwärzungsschichten sind zwar stärker absorbierend, aber wegen ihrer schlechteren Wärmeleitung ungünstig. O. CHWOLSON [10], dessen Übersicht: „Über den gegenwärtigen Zustand der Actinometrie“ auch heute noch eine Fundgrube wertvollster Hinweise darstellt, betont, daß schlechte Wärmeleitung nicht nur den Wärmedurchgang zum Meßkörper hindert, sondern zugleich bedeutet, daß die Außenseite der Rußschicht sich beträchtlich über die Temperatur des Meßkörpers erwärmt. Dies hat aber zur Folge, daß eine beträchtliche Wärmemenge bereits von der Oberfläche der Rußschicht durch Strahlung, Leitung und Konvektion weggeführt wird, die den metallenen Meßkörper überhaupt nicht erreicht und sich jeder Nachweisung entzieht.

Weil die Schichtdicke und sonstige Beschaffenheit der Schwärzungen eine so große Rolle spielt, gewährleisten auch gewisse Rezepte noch keine völlig gleichartigen Schichten und Absorptionskonstanten. So findet z. B. E. HASCHÉ [10a] die Absorptionschicht

aus „Albrecht-Schwarz“ (Ruß in Bernsteinlack) hinsichtlich gleichmäßiger Streuung und Höhe der Absorption als die beste der von ihm untersuchten Schwärzungen, während das gleiche Rezept bei Schwärzungsversuchen seitens des Instrumentenamtes Nord des Deutschen Wetterdienstes in Hamburg eine Schicht mit deutlichem Glanz lieferte. Andererseits fand HASCHÉ die Schwärzung des Angström-Pyrheliometers weitaus schlechter, als den Messungen von K. ÅNGSTRÖM von 1888 bis 1898 [12] entnommen wurde. Sicher besitzt auch Ruß verschiedener Herstellung abweichende Eigenschaften, die bis zum Vorkommen spiegelnder C-Kristallflächen variieren können. Daß Kerzenruß infolge der Beimischung kleiner Öltröpfchen abweichende Absorption besonders bei flach auffallenden Strahlen besitzt, ist bekannt. Vielfach wird Platinmohr nach bestimmtem Rezept galvanisch niedergeschlagen, und dieses Verfahren wird sogar als das einzig genau reproduzierbare betrachtet. Demgegenüber schildert CHWOLSON [4] die von ihm gefundene Unzuverlässigkeit dieser Methode. Es ist daher nur verständlich, daß sich im Schrifttum überwiegend unverbindliche Absorptionswerte finden, vgl. die von ALBRECHT [11] für meteorologische Zwecke an verschiedenen Orten gegebenen Zusammenstellungen (selbst für das von HASCHÉ sehr genau untersuchte Albrecht-Schwarz gibt Albrecht an: „Im Kurz- und Langwelligen ca. 96%“). Ein derartiger Spielraum ist heute nicht mehr tragbar und entspricht, wie bereits bemerkt, auch nicht der instrumentell möglichen Meßgenauigkeit.

Hinzu kommen Bedenken hinsichtlich der zur Absorptionsmessung fast nur verwendeten Reflexionsmethode. Zwar ergibt sich die Absorption A anscheinend leicht aus der Reflexion, weil $A = 1 - R$. Aber wenn A bereits 96% und mehr beträgt, so ist der reflektierte Anteil der auffallenden Strahlung sehr schwach und entsprechend ungenau meßbar, da ja diese geringe Strahlung sich obendrein bei der hier vorauszusetzenden diffusen Reflexion über die ganze Halbkugel verteilt, wovon das Meßgerät (Bolometer, Thermosäule) jeweils nur einen kleinen Ausschnitt erfaßt. Ein sehr instruktives Beispiel für diese experimentellen Schwierigkeiten stellt die bereits angeführte Arbeit von E. HASCHÉ (10a) dar, worin das Absorptionsvermögen wichtiger Schwärzungen und Weißungen mit modernsten Meßgeräten und kritischer Übersicht untersucht wurde, insbesondere sein Verlauf bei großen λ . Trotzdem muß der Verfasser enttäuscht feststellen, daß sich (Tab. 16, S. 81) Absorptionswerte bis fast 200% ergeben haben, während 100% der theoretischen

tische Höchstwert ist (während der Gang mit λ hiervon nicht berührt wird).

Besonders interessiert die Untersuchung der Schwärzung des Ångströmschen Pyrheliometers (a. a. O., Tab. 6 u. 9), deren Ergebnis lapidar zusammengefaßt wird: „Die schlechteste Schwärzung ist die des Pyrheliometers.“ Nicht nur bleibt die Absorption weit hinter der der Albrecht-Schwärzung zurück; auch das Lambertsche cos-Gesetz wird infolge der stark bemerkbaren geometrischen Reflexion nur sehr mangelhaft befolgt. Dabei handelt es sich nicht etwa um ein vielleicht jahrzehntelang benutztes Pyrheliometer, sondern die betreffenden Streifen waren eigens von der schwedischen Herstellerfirma bezogen worden. Da angenommen werden muß, daß ihre Schwärzung peinlich genau nach der von K. ÅNGSTRÖM [12] gegebenen Vorschrift ausgeführt worden ist, ihr Absorptionsvermögen für verschiedenes λ sowie die Streuung nach dem cos-Gesetz aber von K. ÅNGSTRÖM selbst sorgfältig untersucht und publiziert worden ist, so klafft hier ein vor der Hand nicht überbrückbarer Widerspruch. Seine mit noch heute zu bewundernder methodischer Feinheit und Sorgfalt ausgeführten Messungen ergaben eine Absorption je nach Dicke der auf Platinmohr aufgetragenen Rußschicht von 98,3 bis 98,8% für Sonnenstrahlung, von 98,5% im Mittel aller untersuchten Wellenlängen mit einem wahrscheinlichen Fehler von $\pm 0,5\%$. Freilich konnte man beim Studium der Versuchsprotokolle bereits zu dem Ergebnis kommen, daß die innere Genauigkeit der Ångströmschen Bolometermessungen vielleicht überschätzt worden ist. Auch wurden derart hohe Absorptionswerte späterhin nur ganz vereinzelt gefunden, so von KERKHOF [13] für frisch niedergeschlagenen Kampferuß, und von HASCHÉ a. a. O. für (wahrscheinlich ebenfalls frisch hergestelltes) Albrecht-Schwarz. Sie werden auch bei weitem nicht erreicht bei den hervorragenden, sich allerdings auf das ferne UR ($\approx 8 \mu$) beziehenden, aber in sich sicheren Emissionsmessungen von berußtem Platinmohr durch F. KURLBAUM [8], dessen Höchstwerte 95,3 und 94,9% ergaben. Es sei nur angedeutet, wie viel leichter und früher sich angesichts der bedauerlichen Diskrepanz zwischen der Ångström- und Smithsonian-Skala (3,5 bis 5,8% [14]) eine Entscheidung hätte fällen lassen, die möglicherweise sogar zur dauernden Anerkennung der ersteren als Absolutskala geführt hätte, wenn die Ångström-Schwärzung mit geeigneteren Methoden nachgeprüft und ihr Absorptionskoeffizient entsprechend herabgesetzt worden wäre, vor allem für länger im Gebrauch befind-

liche Pyrheliometer (hierzu [10] S. 15/16). Selbst F. E. VOLOCHINE, hervorragender Strahlungsspezialist und langjähriger Mitarbeiter des berühmten russischen Strahlungsphysikers W. A. MICHELSON, gibt für das von ihm mit gewissen technischen Verbesserungen ausgestattete Ångström-Pyrheliometer eine Absorption von nur 97% an, also trotz Anwendung modernster Hilfsmittel 1,5% weniger, als von K. ÅNGSTRÖM 1898 bestimmt und bis heute zur Berechnung der Eichkonstante traditionell angenommen [16]. Dabei ist mindestens seit 1932 klar, daß die wahre Absolutskala näher an der Ångström- als an der Smithsonian-Skala von 1913 liegt. Dies wurde noch in neuerer Zeit bestätigt durch die ausgezeichneten Untersuchungen von J. GUILD [12a] bei der Schaffung eines absoluten Strahlungsnormals für das Nat. Phys. Lab. Teddington, wonach das untersuchte Ångström-Pyrheliometer nur 0,45% zu niedrig, dagegen ein als Prototyp der Smithsonian-Skala untersuchtes Silverdisk-Aktinometer 2,2% zu hoch anzeigend befunden wurde.

Wenn demgegenüber vom Verf. in [29] als heute wahrscheinlichster Wert die historische Ziffer der Smiths. revis. scale 1913 $1,94 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ genannt wurde, so ergab sich dieser Wert erst nach einer Erhöhung des nicht gemessenen „UV- und UR-Zuschlages“ um $0,04 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Da dieser auch an den Ångström-Messungen angebracht werden müßte, bleibt das hier mitgeteilte Verhältnis beider Skalen zum wahrscheinlichsten Wert unbeeinflusst. —

In der gleichen Arbeit berichtet GUILD über die Messung der Absorption von Ruß, der zur Schwärzung seines Absolut-Strahlungsmessers verwendet worden war. Durch Vergleich mit der diffusen Reflexion von Magnesiumoxyd auf Silber nach PRESTON findet er für seine Schwärzung im Sichtbaren 98,19%, im nahen Ultrarot 98,13% Absorption, also auch nahe K. ÅNGSTRÖMS Wert.

Wie schwierig das Problem der Absorptionsmessung auch heute noch ist, mag aus einem Beispiel ersehen werden: KERKHOF [13] hat in seiner schon erwähnten Arbeit die Absorption einer großen Zahl von Schwärzungen in verschiedenen Spektralbereichen des Sichtbaren und des UV gemessen. Er findet Kampferuß als die bestabsorbierende Schwärzung mit 98,4% Absorption im UV und im Sichtbaren (390 bis 680 $m\mu$). Aber für aufgedampftes Wismutweiß findet er am Thermolement, das die Absorption mißt, den 2 $\frac{1}{2}$ -fachen Thermostrom, wie vorher bei Kampferuß! Gewiß ist bekannt, daß sich die Absorption vieler Weißungen (z. B. Magnesiumhydroxyd) mit zunehmender Wellenlänge im UR 100% nähert.

Aber im Sichtbaren ist zweifellos die Absorption fast null, also auf jeden Fall sehr viel geringer als für Ruß.

Daher haben zuerst RÖNTGEN und EXNER bei ihrem 1874 aus dem BUNSENSchen Eiskalorimeter entwickelten absoluten Strahlungsgerät (mit Nachfolgern W. A. MICHELSON und F. E. VOLÓCHINE), besonders aber A. BARTOLI und E. STRACCIATI [15] 1891 das *Kalorimeterprinzip* verwendet, indem sie die Sonnenstrahlung in ein ringsum von Wasser umspültes Gefäß fallen ließen und die Erwärmung des Wassers maßen, — ein seitdem besonders in der Hand von C. G. ABBOT so ungemein fruchtbar gewordenes Prinzip. Wäre die Eintrittsöffnung klein gegenüber der inneren Oberfläche des Gefäßes, so hätte man einen 100% schwarzen Absorber als Gegenstück des 100% emittierenden Schwarzen Körpers nach KIRCHHOFF, wobei es bei hinreichender relativer Verkleinerung der Eintrittsöffnung schließlich auch belanglos wird, ob die Innenwand überhaupt geschwärzt ist. Man sieht also, daß die bisher zahlenmäßig nicht genau genug anzugebende Absorption der Schwärzung in dem Maße ihre bisherige Bedeutung verliert, wie die geometrische Bedingung des Schwarzen Körpers verwirklicht werden kann. Selbst wenn im allgemeinen topfartige Gebilde verwendet werden müssen, durch deren fehlende Stirnfläche die zu messende Strahlung eintritt, ist es klar, daß ein großer Teil der etwa noch am Boden des Topfes reflektierten Strahlung von den Wänden aufgefangen wird. Die Gesamtabsorption wird also auf jeden Fall besser sein, als wenn dieselbe Schwärzung auf einer ebenen Fläche der Strahlung entgegengesetzt würde. Die zahlenmäßige Feststellung des hierbei gewonnenen Betrages ist freilich schwierig, weil sie davon abhängt, wie genau das \cos -Gesetz von der Schwärzung erfüllt wird (s. K. FEUSSNER [15a]).

Für das hier beschriebene kleine Pyrheliometer wurde versucht, diese Verbindung einer Absorption durch Schwärzung und Formgebung in möglichst einfacher Weise zu verwirklichen, indem in den Meßkörper von vorne eine fast bis zu seinem Boden reichende, spitzwinklige Rille eingedreht wurde. Hierdurch sollte sowohl alle gerichtet reflektierte, wie zum großen Teil auch die diffus reflektierte Strahlung nach dem Grunde der Rille, also zur dort eingesetzten Thermosäule hin geworfen werden. Die Schwärzung erfolgte nach CROVA und K. ÅNGSTRÖM durch Niederschlagen von Platinschwarz und darauf folgendes Berußen, allerdings nicht vermittels einer Flamme (da hierbei die Schichtdicke schwieriger zu

kontrollieren ist und der Ruß auch dem innersten Grund der Rille ausweicht), sondern durch Auftragen einer Aufschwemmung von Terpentinruß in Aceton unter Zusatz einer Spur Lack mit Hilfe des Pinsels. Die Absorption wurde zu 98% geschätzt. Als aber dann zur Kontrolle der Visiervorrichtung der Meßkörper während der Bestrahlung durch die Sonne durch die eine Hälfte der Eintrittsöffnung direkt beobachtet wurde (vgl. S. 59), erschien der so sorgfältig geformte und geschwärzte Meßkörper zum Erschrecken hell erleuchtet, also mindestens im Sichtbaren recht kräftig reflektierend. Infolge dieses Schocks wurde von da ab vorübergehend die Absorption irriger Weise nur mit 96% in Rechnung gestellt. Damals war das ältere Ergebnis von E. SCHMIDT ([18], vgl. S. 19) noch nicht bekannt, wonach tatsächlich die Absorption einer solchen scharfen und spitzwinkligen Rille für senkrecht auftreffende Strahlung erheblich über derjenigen einer gleichartigen ebenen Fläche liegt. Da die Absorption unserer Schwärzung auf einer solchen aber mindestens 96% beträgt, muß die Gesamtabsorption des Meßkörpers nicht unerheblich höher angenommen werden. Es dürfte hiernach ersichtlich sein, daß ein Verfahren geschaffen werden muß, um denjenigen Wert, von dem zur Zeit die Meßgenauigkeit des Pyrheliometers abhängt, in möglichst einfacher Weise für verschiedene Wellenlängenbereiche festzustellen. Dies scheint heute das Zentralproblem der Pyrheliometrie, selbst der Normalinstrumente zu sein, die ja dem schwarzen Körper nur näher kommen, als ebene geschwärzte Flächen, ohne ihn zu verifizieren. Eine interessante Erläuterung hierzu ist der Umstand, daß bei dem Potsdamer Absolut-Pyrheliometer einzig dadurch eine Mehranzeige von 1% entstand, daß der zuvor aus dünnem Kupferblech gefertigte Boden des Absorptionstopfes von K. FEUSSNER durch Quarzglas ersetzt wurde.

Zum Schluß sei besonders auf die Zusammenstellung von Reflexionswerten verschiedener Schwärzungen bei W. SCHÜEPP [19], S. 277, hingewiesen.

c) Der Umrechnungswert

Jetzt sind wir in der Lage, wenigstens einen vorläufigen Umrechnungswert für die Gewinnung der absoluten Werte der Sonnenstrahlung usw. aus unseren korrigierten Beobachtungszeiten und den Instrument-Daten zu erhalten. Wir setzen in die Formel S. 60 folgende Werte ein:

$$J = \frac{\begin{matrix} \text{(g)} & \text{(c)} & \text{(\text{^\circ} C f. 5 Skt)} \\ 7,025 \cdot 0,091 \cdot 0,4855 \cdot 60 \end{matrix}}{\begin{matrix} 1,00 \cdot 0,98 \cdot \tau_{\text{(korr)}} \\ \text{(cm}^2\text{)} \quad \text{(A)} \quad \text{(evtl. f\u00fcr Temp.-\u00c4nd. d. passiven} \\ \text{L\u00f6tstelle korr. Beob.-Z. in sec f. 5 Skt)} \end{matrix}} = \frac{19,02}{\tau_{\text{(korr)}}} \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$$

(Beobachtungszeit $\tau_{\text{(korr)}} = 19,02$ s ergibt $J = 1,00$ cal cm⁻² min⁻¹).

Hierin sind noch nicht ber\u00fccksichtigt: die m\u00f6glicherweise nach k\u00fcftigen Messungen sich ergebende Abweichung des nach blo\u00dfer Sch\u00e4tzung angenommenen Absorptionswertes der Schw\u00e4rzung im Bereich von $\lambda = 0,3$ bis 3μ f\u00fcr Sonne, f\u00fcr entsprechend l\u00e4ngere Wellen bei Messung von Strahlung aus niedriger temperierter Quelle; ferner die Abh\u00e4ngigkeit der Ausstrahlung des Me\u00dfk\u00f6rpers von der Temperatur nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz.

Neuerdings hat K. WEGENER [27], fr\u00fcher auch schon W. COBLENTZ [28] darauf hingewiesen, da\u00df den Einstrahlungsmessungen gleichzeitig auch stets Ausstrahlungsvorg\u00e4nge des Me\u00dfk\u00f6rpers gegen die Atmosph\u00e4re \u00fcberlagert sind. Verf. hat in \u00dcbereinstimmung mit ALDRICH & ABBOT in [29] dargelegt, da\u00df die tats\u00e4chlich durch die Einstrahlungs\u00f6ffnung hinausgehende Strahlung des Me\u00dfk\u00f6rpers etwa abh\u00e4ngig ist von dem Fl\u00e4chenwinkelverh\u00e4ltnis, das hei\u00dft vom Fl\u00e4chenverh\u00e4ltnis der Eintritts\u00f6ffnung zur ganzen Halbkugel mit gleichem Abstand vom Me\u00dfk\u00f6rper. Der vom Me\u00dfk\u00f6rper ausgehende dunkle Strahlungsstrom wird in den meisten F\u00e4llen nahezu kompensiert durch die Gegenstrahlung der Atmosph\u00e4re. Seine Gr\u00f6\u00dftwerte kann er erreichen bei gro\u00dfer H\u00f6henlage in Gebirgen, besonders in den Polargebieten, wo unter Umst\u00e4nden der Wasserdampf als haupts\u00e4chlich f\u00fcr die Gegenstrahlung verantwortlicher Bestandteil der Atmosph\u00e4re nur in geringer Menge vorhanden ist. In [29] sind Absch\u00e4tzungen gegeben, die zeigen, da\u00df diese Fehlerquelle heute noch unter der Me\u00dfgenauigkeit unserer Strahlungsmesser liegt. Bei dem hier beschriebenen Mod. II betr\u00e4gt die Eintritts\u00f6ffnung weniger als $1/1000$ der Halbkugel gleichen Abstandes vom Me\u00dfk\u00f6rper; der m\u00f6gliche Fehler wird daher noch geringer als der a. a. O. abgesch\u00e4tzte Wert, darf also mindestens au\u00dferhalb jener extremen Klimate vernachl\u00e4ssigt werden. Ein anderer m\u00f6glicher Einflu\u00df der Temperatur, der ebenfalls s\u00e4mtliche Strahlungsmesser betrifft, k\u00f6nnte dadurch entstehen, da\u00df nach CHWOLSON [10] S. 148 die Strahlungsf\u00e4higkeit, demnach auch die Absorption einer beru\u00dften Oberfl\u00e4che sich in hohem Grade mit der Temperatur der Fl\u00e4che \u00e4ndert. Ebendort ist auf S. 16 auch auf

einen merklichen Einfluß der Feuchte der absorbierenden Schicht hingewiesen worden¹⁾).

Unbekannt ist die Temperaturabhängigkeit des ganzen Systems aus Strahlungsmesser und Galvanometer. Versuche, wobei Strahlungsmesser und Galvanometer gleichen Temperaturen ausgesetzt waren, ergaben Halbwertszeiten der Abkühlung des Meßkörpers ohne ausgesprochenen Gang:

Temperatur des Raumes	Halbwertszeit
33° C	4,45 min
17° C	4,88 „
2,5° C	4,80 „

Brauchbare Werte dürften sich ergeben, wenn etwa auf einer Expedition im Laufe des Jahres mehrere Eichungen bei sehr verschiedenen Temperaturen ausgeführt werden.

Nicht berücksichtigt ist bisher auch die Änderung der spezifischen Wärme c des Meßkörpers mit der Temperatur. Jedoch kann dies leicht mit Hilfe von Abb. 17 geschehen. Überhaupt können etwaige sich später noch ergebende Verbesserungen nachträglich angebracht werden, wenn nur stets mit der Veröffentlichung etwaiger Strahlungsmessungen von vornherein Luft- und Instrument-Temperatur mitgeteilt wird, wie auch der Luftdruck. Geschieht dies, so dürfte schon jetzt dem Gebrauch des vorstehend beschriebenen Gerätes kein grundsätzliches Bedenken entgegenstehen, er dürfte vielmehr unter gewissen Umständen Vorteile bieten.

17. Zusammenfassung

Nach der notgedrungen ausführlichen Darstellung könnte der entmutigende Eindruck entstehen, daß das neue Gerät für den praktischen Gebrauch doch allzu unbequem sei. Selbstverständlich erfordern Absolutmessungen gewisse Korrekturen, worauf bei einem Sekundär-Instrument verzichtet werden kann. Aber die etwas mühsame Berechnung derselben ist doch für Hunderte oder vielleicht Tausende von Messungen nur ein einziges Mal auszuführen und in handlichen Korrekturentafeln niederzulegen, solange eben das Gerät mechanisch intakt bleibt. Andererseits mußte das besondere Ergebnis unserer Bemühungen, die Nachprüfbarkeit oder Neueichung nach etwaigen Reparaturen auch unter Expeditionsbedingungen, ausführlich dargelegt werden, da mit diesem Falle

¹⁾ Vgl. hierzu die soeben erschienenen, ausgezeichneten Darlegungen in [30].

immerhin gerechnet werden muß, trotz aller Bemühungen, das neue Gerät mechanisch widerstandsfähig zu machen.

Demgegenüber sind die Messungen selbst überaus einfach, ebenso die normale Umrechnung auf absolutes Strahlungsmaß. Vorteilhaft für die Gleichmäßigkeit der Messungen ist Beibehalten des gleichen Aufstellungsortes, indem man entweder das Stativ mit PolhöhenEinstellung fest stehen läßt und nur täglich die Deklination ändert, oder es nur auf die festliegenden Fußplatten aufsetzt.

a) Messung mit Stoppuhr

Bei Benutzung des Zeiss-Schleifengalvanometers stellt man den Galvanometerzeiger auf 29 Skt¹⁾); öffnet den Verschuß, setzt die Uhr beim Durchgang durch Skt 30 in Gang und bei Skt 35 still (bzw. bei einem anderen Galvanometer nach einem ebenfalls etwa 0,5° C entsprechenden Ausschlag), schließt den Verschuß und notiert Laufzeit und Sonnenhöhe, in Abständen auch Temperatur des Gerätes, des Ausgleichskörpers und der Luft, sowie gelegentlich Luftdruck. Nach etwa 30 s ist der Zeiger wieder am „Nullpunkt“ bei 29 Skt angelangt und das Gerät, nachdem auf Sonne nachgestellt wurde, zu neuer Messung bereit, die im allgemeinen im Abstand von je 2 min ausführbar ist.

b) Mit Chronograph

Wie nach a), nur daß man kurz nach Öffnen des Verschlusses das Laufwerk in Gang setzt und beim Passieren der sämtlichen 5 Skt 30, 31, ... 35 Zeitmarken ausführt. Nach der letzten wird das Pyrheliometer verschlossen, das Laufwerk angehalten und der soeben ausgeführte Schrieb entsprechend dem Protokoll numeriert.

Zeigt das äußere Thermoelement ein stärkeres Zurückbleiben hinter der Lufttemperatur an, so empfiehlt sich zur Vermeidung einer Korrektur für Temperaturänderung des Ausgleichskörpers, nach Abziehen der Thermosflasche den Meßkörper durch Erwärmen oder Abkühlen wieder auf die Lufttemperatur oder sogar etwas nach der anderen Seite zu bringen. Ist man nicht eilig, so kann man auch zwecks Erwärmens des Ausgleichskörpers den

¹⁾ ... oder, wie oben näher ausgeführt, bei geringer Strahlungsintensität auf einen anderen Punkt, von wo aus der Zeiger bis zum Passieren des Angangspunktes der Zeitmessung etwa 4 s braucht und somit in das lineare Gebiet der Temperaturzunahme eingetreten ist. Bei anderen Galvanometern ändere man sinngemäß; Verf. ist an allen Erfahrungen aus der Praxis sehr interessiert!

Meßkörper in *Ruhestellung* durch den geöffneten Verschuß von der Sonne bestrahlen lassen.

c) Mit Uhrsignal

Bereits in Abschnitt 8a auf S. 32 war darauf hingewiesen worden, daß die Ablesung auch zu gleichen Zeitabständen erfolgen könne. Geht man davon aus, daß bei einiger Übung eine Ablesung mit Durchsage oder Notieren des Meßwertes allenfalls in Abständen von je 5 s möglich ist, und steht demgemäß alle 5 s ein Summer- oder sonstiges gut hörbares Zeichen einer guten Uhr zu Gebote, so vertauschen in unserer Umrechnungsformel auf S. 60 nur Δt und τ ihre Rollen, indem jetzt $\tau = 5$ s eingesetzt und für dieses Zeitintervall der Temperaturanstieg des Meßkörpers, in Skalenteilen des Galvanometers gemessen, bestimmt wird. Die Formel lautet dann mit den Zahlenwerten von S. 68:

$$J = \frac{\Delta t \text{ je Skt} \cdot 7,025 \cdot 0,091 \cdot 60 \cdot 0,0971 \cdot (\text{korr.}) \text{ Zahl d. Skt in 5 s}}{1,00 \cdot 0,98 \cdot 5 \text{ s}}$$

$$= 0,761 \cdot (\text{korr.}) \text{ Zahl d. Skt in 5 s}$$

(in 5 s gemessene 1,314 Skt ergeben 1,00 cal/cm²min),

wobei sich, genau wie zuvor, die Korrektion nur auf den eventuell festgestellten Gang der Innentemperatur wegen Änderung der Temperatur der passiven Lötstelle während der Meßzeit bezieht, falls sich der Meßwert stets auf Einzelmessungen mit linearem Verlauf, also im verlustfreien Gebiet erstreckt.

Die zeichnerische Darstellung und Ausgleichung geschieht ganz entsprechend Abb. 8 mit dem einzigen Unterschied, daß nun die Abzisse in gleiche Zeitabstände unterteilt wird, während die individuellen Meßwerte in Zehntelskalenteilen nach unten abgetragen werden. Der Maßstab muß, wie auch bei der Anordnung nach Abb. 8 stets so gewählt werden, daß der Anfang der Erwärmungskurve bzw. die Ausgleichgerade nicht zu flach verläuft, wodurch die Genauigkeit der Ausgleichung leiden würde.

Daß auch diese Methode zum gleichen Ergebnis führt, zeigt die Ausrechnung des Zahlenbeispiels auf S. 51. Wurden dort 21,19 s zum Durchlaufen von fünf Skalenteilen gebraucht, so ergibt dies 1,181 Skt in 5 s, multipliziert mit obigem Faktor $0,761 = 0,899$ cal/cm²min. Nach S. 68 erhält man $19,02 : 21,19 = 0,898$.

d) Auswertung

Chronographenschrieb mit dem oben beschriebenen Lineal in 0,1 s ausmessen, auf Millimeterpapier abtragen und ausgleichen,

entsprechend Abb. 8. Meßzeit für die 5 linearen Skt entnehmen, ebenso wie bei Stoppuhrmessung den dort abgelesenen Wert.

Verbesserungen: (i) bei rascher Temperaturänderung des Instrumentes (Ausgleichskörpers) die S. 50 beschriebene Verbesserung nach Abb. 13). (ii) Falls Instrumenttemperatur erheblich von $+ 20^{\circ}\text{C}$ abweicht, sollte man das Endergebnis nach Abb. 17 für Änderung der spezifischen Wärme des Meßkörpers verbessern.

Resultat: Durch Einsetzen der Meßzeit in die Endformel (S. 60). Angabe der Energie des Strahlungsstromes in $\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$.

e) *Verwendung zur Bestimmung des Trübungsfaktors nach LINKE*

Falls der *Trübungsfaktor* nach LINKE bestimmt werden soll, entnehme man mit Hilfe der eventuell graphisch interpolierten Messungen des Höhenwinkels der Sonne die durchstrahlte Luftmasse nach BEMPORAD (Linke, Met. Taschenbuch II und V), reduziere sie mit hier als Anhang II beigefügter Tab. 1 und Luftdruckmessung auf wahre durchstrahlte Luftmasse, rechne nach Tab. 2 die gemessenen Sonnenintensitäten auf mittleren Sonnenabstand um (diese Werte dürfen nicht klimatologisch oder bioklimatologisch verwendet werden! [17]) und trage sie in das „Neue Trübungsdiagramm“ nach LINKE von 1942 ein (für Gesamt-, Rot- und Kurzstrahlung bei Schleicher & Schüll, Einbeck (Hann.) (siehe aber [26]). Dies wird trotz der Problematik eines solchen komplexen Trübungsfaktors empfohlen, um vergleichbare Werte zu erhalten.

Für mannigfache Anregung und Unterstützung danke ich meinen früheren Mitarbeitern, außer dem schon genannten Dr. habil. S. BAUMBACH, den Herren Dr.-Ing. W. OLBERS, Dr. Walter WAGNER und den technischen Mitarbeitern der Instrumentenabteilung Nord des Deutschen Wetterdienstes in Hamburg. Ebenso schulde ich größten Dank für manchen Rat und tatkräftige Hilfe Herrn Professor Dr. F. KNAUER, Inst. f. Physikal. Chemie der Universität Hamburg.

Mein Dank gilt auch dem Meteorologischen und Hydrologischen Dienst der DDR und dem Akademie-Verlag für vielfaches, verständnisvolles Entgegenkommen.

Schrifttum

1. J. GEORGI, Meßgerät der direkten Sonnenstrahlung für Expeditionen. „Polarforschung“ Bd. II, 1950, S. 353—356; ders.: Ein kleines, in sich eichfähiges Pyrheliometer. Ann. d. Met. **4**, H. 1—6 (1951) 227—236.
2. U. a. R. GEIGER, Das Klima der bodennahen Luftschicht. 2. Aufl. 1942, S. 13 ff., 115 ff.
3. R. GEIGER u. H. AMANN, Forstmeteorologische Messungen usw. Forstwiss. Zentralbl. **1931**, 809—817.
4. O. CHOWLSON, Wilds Repert. f. Met. **16**, Nr. 5 (1893).
5. J. MAURER, Math. u. Naturwiss. Mitt. Akad. d. Wiss. Berlin **1887**, 495—503.
6. H. F. WEBER 1884 nach J. MAURER, Met. Z. **29** (1912) 561—570.
7. C. CHRISTIANSEN, Wied. Ann. **19** (1883) 267—283.
8. F. KURLBAUM, Wied. Ann. **67** (1899) 846—858.
- 8a. H. WEICKMANN jr., Erfahrungen bei Strahlungsmessungen usw. Gerl. Beitr. **55** (1939) 411—470.
9. K. ÄNGSTRÖM, Wied. Ann. **26** (1885) 253—287.
10. O. CHWOLSON, Wilds Repert. f. Met. **15**, Nr. 1 (1892).
- 10a. E. HASCHÉ, Üb. d. Absorpt.-Vermögen d. Schwärzungen usw. Ann. d. Phys. **8** (1931) 47—88; **14** (1932) 342—352.
11. F. ALBRECHT, in: F. LINKE, Met. Taschenb. II. 1933, S. 47 f.; dass. V. 1939, S. 205; E. KLEINSCHMIDT, Hdb. d. Met. Instr. 1935, S. 117.
12. K. ÄNGSTRÖM, Wied. Ann. **67** (1899) 633—648.
- 12a. J. GUILD, Proc. R. Soc. London A **161** (1937) 1—38; Int. Strahl.-Komm. Oxford 1936, Anl. 9. — Messung der vom Empfänger reflektierten Strahlung; neuerdings durch kippbaren Hohlspiegel verbessert von F. J. GILHAM. Brit. Journ. of Appl. Physics **4** (1953) 151—55.
13. F. KERKHOFF, Ann. d. Phys. **31** (1938) 315—336.
14. W. MÖRIKOFER, Met. Strahlungsmeßmethoden, in: ABDERHALDEN, Hdb. d. biolog. Arb. Meth. 1939, Abt. II T. 3 H. 7, S. 4004—4245. Neueste Zusammenfassung, Literatur über das ganze Gebiet!
15. A. BARTOLI u. E. STRACCIATI, Nouvo Cimento **29** (1891) 63.
- 15a. K. FEUSSNER, Met. Z. **53** (1936) 305.
16. Bei CHR. THAMS, Mitt. Schweiz. Zentr. Anst. Zürich **1948**, 78.
17. J. GEORGI, Reduktion der Strahlungsmessungen auf mittlere Sonnenentfernung. Geofisica pure e appl. **19** (1951) 44—46.
18. E. SCHMIDT, Wärmestrahlung thermischer Oberflächen bei gewöhnlicher Temperatur. Beihefte z. Gesundheits-Ingenieur Reihe 1, H. 20. 1927.
19. W. SCHÜEPP, Die Bestimmung der Komponenten der atm. Trübung aus Aktinometermessungen. Arch. Met. Geophys. Biokl. Ser. B, Bd. I, H. 3—4 (1949) 257—346.
20. P. COURVOISIER u. H. WIERZEJEWSKI, Beiträge z. Strahlungsmeßmethodik. Ebenda Bd. I, H. 1—2 (1948) 45—53, 156—199.

21. P. BENER, Untersuchung über die Wirkungsweise des Solarigraphen Moll-Gorczyński, ebenda Bd. II, H. 3 (1950) 188—249.
22. J. GEORGI, Solarkonstante und meteorolog. Strahlungsmessung. Ann. d. Met. 5, H. 3—5 (1952) 83—96 (Kleinschmidt-Heft).
23. F. LINKE, „Vorbereitende Betrachtungen“, in Hdb. d. Geophysik Bd. VIII, Berlin 1942, S. 66, und Gerl. Beitr. 50 (1937) 376.
24. Annals of the Astrophysical Observatory of the Smithsonian Inst. VI (1942) 42.
25. N. N. KALITINE, De la radiation de la voûte céleste autour du soleil... OMI, Internationale Strahlungskommission. Protokoll der Sitz. in Frankfurt a. M. 1932, Anl. 18, S. 66—71.
26. W. COLLMANN, Einige Korrekturen für LINKES Unterlagen zur Bestimmung des Trübungsfaktors. Ann. d. Met. 4 (1951) 485.
27. K. WEGENER, Die Sonnenstrahlung u. ihre Messung. Geofisica pura e appl. 22 (1952) H. 3/4.
28. Internationale Strahlungskommission, Protokolle der Sitzungen in Oxford 1936. Leyde 1937. S. 12.
29. J. GEORGI, Bemerkung zur Solarkonstanten. Zeitschr. f. Meteorologie 5 (1951) 136—139.
30. P. COURVOISIER, Zur Definition d. Sonnenstrahl. (Beitr. z. Strahlungsmethodik IV). Arch. Met. Geophys. Biokl. Ser. B, Bd. 5, H. 2 (1954) 125—145.

Nachschrift zu S. 13 und 19 Anm, betreffend die Erhöhung des Absorptionsvermögens durch Anbringen spitzwinkliger Rillen: Erst im letzten Augenblick mußte ich feststellen, daß dieser Kunstgriff bereits vor fast einem halben Jahrhundert von CH. FÉRY in die Strahlungsforschung eingeführt wurde (Quelque conséquences de l'emploi d'un récepteur sélectif dans la mesure de l'énergie rayonnante. C. R. 148, 1909, 1043). Er verwendete ein „plissiertes“, geschwärztes Kupferblech, wovon er sagt, es absorbiere und strahle senkrecht zur Gesamtfläche wie ein schwarzer Körper, d. h. ohne Reflexions- und Diffusionsverlust; Absorptionsfaktor = 1 oder 100%.

Er führte auch, soweit ich sehe, das Prinzip der Substitution ein (s. S. 7, Anm. 2) und baute das erste Pyrheliometer nach diesem neuen Verfahren.

Berichtigung: In Abb. 9, S. 37 muß es oben statt 3,5 Skt/s linear heißen: 4,00 s/Skt linear; unten statt 4,0 Skt/s: 3,50 s/Skt linear.

Anhang I

Bemerkung zur Auswertung der Abkühlungskurven¹⁾

In den Fällen, worin von vornherein mit konvektivem Austausch des Meßkörpers mit seiner Umgebung zu rechnen ist, hängt die Genauigkeit der Messung der in Wärme umgewandelten Strahlungsenergie in erster Linie ab von der Kenntnis der Abkühlungsfunktion in ihrem letzten, von der Endtemperatur nur wenig entfernten Teile. Da dieser durch direkte Messung nur schwer mit genügender Genauigkeit feststellbar ist, dürften einige Winke über die möglichst bequeme Herleitung der einer Exponentialkurve entsprechenden Zwischen- und Endwerte erwünscht sein.

Die meisten Ableitungen setzen stillschweigend voraus, daß t_e , die mit der Umgebungstemperatur identische Endtemperatur des sich abkühlenden Körpers bekannt sei. In unserem Falle soll gerade diese Endtemperatur genauer errechnet werden, als sie durch direkte Messung feststellbar ist. Natürlich ließe sich die Meßgenauigkeit der Temperatur der Umgebung, also hier des Ausgleichskörpers, beliebig steigern, was aber das Gerät für die normalen Strahlungsmessungen komplizierte und seinen Gebrauch erschwerte, und nur den seltenen Abkühlungsmessungen zugute käme.

1. Endwert t_e

Die Berechnung kann nur unter der Voraussetzung erfolgen, daß die gemessene Abkühlungskurve tatsächlich einer Exponentialfunktion entspricht. Wieweit dies der Fall ist, ergibt sich aus der

¹⁾ Anm. b. d. Korr.: Dieses Problem ist inzwischen in einer mathematisch geschlossenen Form dargestellt und durch eine Tabelle neu gemessener Thermometer-Trägheitswerte bereichert worden von Dipl.-Met. E. PAULY, Die Trägheit in der Thermometrie. Technische Mitteilung des Instrumentenwesens des Deutschen Wetterdienstes Nr. 26. Instrumentenamt Nord, Hamburg 1953. (Anschrift: Hamburg 4, Circusweg 3).

Übereinstimmung der Endwerte, die aus verschiedenen Kombinationen von Meßwerten und aus verschiedenen Teilen der t/τ -Kurve gewonnen wurden, siehe das Zahlenbeispiel am Schluß des folgenden Abschnittes.

a) Berechnung mit Hilfe des DUFOURSchen Theorems (1864) [1]. Es seien t_1 bis t_3 drei Meßwerte in gleichen Zeitabständen, deren erste und zweite Differenzen mit a und b bzw. $a - b$ bezeichnet werden.

Aquidistante Temperaturablesungen	t_1	t_2	t_3
erste Differenzen		a	b
zweite Differenzen		$a - b$	

Dann kann die zugehörige End- oder Umgebungstemperatur, t_e , der die Kurve asymptotisch zustrebt, auf folgende drei Arten gefunden werden:

$$t_e = t_2 - \frac{a \cdot b}{a - b} = t_1 - \frac{a^2}{a - b} = t_3 - \frac{b^2}{a - b}$$

DUFOURS Zahlenbeispiel: $t =$	13,8°	11,6°	10,0°
erste Differenzen	2,2	1,6	
zweite Differenz		0,6	

$$t_e = 11,6 - \frac{2,2 \cdot 1,6}{0,6} = 13,8 - \frac{2,2^2}{0,6} = 10,0 - \frac{1,6^2}{0,6} = 5,7^\circ.$$

Auf die am Strahlungsmesser gewonnenen Werte vom 5. 8. 50 (Abb. 6 und Spalte 2 im Schema S. 77) angewendet, ergab sich der Endwert t_e aus den folgenden Minutenkombinationen: 0, 5, 10 min: 9,2 Skt; 5, 10, 15: 10,3; 10, 15, 20: 10,0; 15, 20, 25: 9,8; 20, 25, 30: 9,6; 25, 30, 35: 9,2; 4, 8, 12: 9,7; 8, 12, 16: 10,0; 2, 6, 10: 8,8 (!); 20, 24, 28: 10,5. Mittel 9,71° Skt.

b) Aus der Neigung verschiedener Teile der Kurve [2]. Es sei t_e die gesuchte Endtemperatur, t_1 und t_2 beliebige Punkte der $t/\tau =$ Kurve, $\text{tang}_{1,2}$ Tangenten an der Kurve in den Punkten t_1 und t_2 .

$$t_e = t_1 + \text{tang}_1 \left(\frac{t_2 - t_1}{\text{tang}_2 - \text{tang}_1} \right).$$

Hierin geht jede Unregelmäßigkeit in der zeichnerischen Darstellung der Abkühlungskurve ein, wie sie beim Neuanlegen des Kurvenlineals kaum vermeidbar ist. Sie mag daher vorteilhaft sein, wenn die Meßwerte oder die Meßzeiten stark streuen und zunächst graphisch ausgeglichen werden sollen. Bei zuverlässigen Meßwerten stellt das DUFOURSche Theorem den weitaus besseren und zugleich bequemeren Weg dar.

2. a) Empfindlichkeit (besser „Regsamkeit“ [3]) β und Trägheitsbeiwert $\alpha = 1/\beta$. Berechnung nach HARTMANN 1897 [4]

Wenn wieder t_e die Endtemperatur, gefunden nach Abs. 1, t_n und t_{n+1} zwei im Abstand von z. B. 1 min einanderfolgende Temperaturablesungen bedeuten, dann ist nach dem NEWTONSchen Abkühlungsgesetz $t_n - t_{n+1} = \beta (t_n - t_e)$, woraus

$$(1) \quad \beta = \frac{t_n - t_{n+1}}{t_n - t_e} = \frac{t_{n+1} - t_{n+2}}{t_{n+1} - t_e} = \text{usw.},$$

und umgeformt

$$(t_n - t_e) - (t_{n+1} - t_e) = (t_n - t_e) \cdot \beta,$$

woraus

$$(2) \quad \begin{aligned} t_{n+1} - t_e &= (t_n - t_e) (1 - \beta) \\ t_{n+2} - t_e &= (t_n - t_e) (1 - \beta)^2 \\ &\dots \dots \dots \\ t_{n+x} - t_e &= (t_n - t_e) (1 - \beta)^x. \end{aligned}$$

Hieraus ist mittels der nach 1 gefundenen Endtemperatur t_e und der nach 2a Gl. (1) gefundenen mittleren Regsamkeit β die theoretische Abkühlungskurve zu berechnen, die der empirisch gewonnenen am nächsten kommt.

Schema für die Berechnung der Regsamkeit β nach HARTMANN

Spalte 1	2	3	4	5	6	7
$n \text{ min}$ $\tau_0 \rightarrow \tau_e$	t_n (Skt)	$t_n - t_e$ (Skt)	$t_n - t_{n+1}$ (Skt)	$\beta = \frac{t_n - t_{n+1}}{t_n - t_e}$	Sp. 3 be- rechn. mit β n. Gl. (2)	Kontrolle von Sp. 6
0	62,0	52,0	6,9	0,132	(52,0)	
1	55,0	45,1	5,9	30	44,9	
2	49,2	39,2	5,2	32	38,9	
3	44,0	34,0	4,7	38	33,6	
4	39,3	29,3	4,1	40	29,1	
5	35,2	25,2	3,3	30	25,1	
6	31,9	21,9	3,0	37	21,7	
7	28,9	18,9	2,7	43	18,8	
8	26,2	16,2	2,2	36	16,2	
9	24,0	14,0	2,0	43	14,1	
10	22,0	12,0	1,7	38	12,1	
11	20,4	10,4	1,4	40	10,5	$52 \cdot 0,8645^{10} = 12,12$
	usw.			usw.		(s. u.)

Berechnung von β abbrechen, sobald Unsicherheit zu groß. Mitteln, evtl. nach graphischer Darstellung. Aus ersten 20 Werten folgt $\beta = 0,1355$, $1 - \beta = 0,8645$, $\alpha = 1/\beta = 7,380$. t_e nach Messung $10,0^\circ$ Skt, nach Rechnung (Zif. 1a) $9,71^\circ$ Skt. Da $0 < \beta \leq 1$, $\alpha \geq 1$. Größte Regsamkeit = kleinste Trägheit = 1.

b) Ableitung des Trägheitsbeiwertes aus der Halbwertszeit

Aus

$$(3) \quad t_n = t_e + (t_0 - t_e) e^{-\beta \tau} \quad [5]$$

folgt Regsamkeitsbeiwert

$$(4) \quad \beta = \frac{1}{\tau_n} \ln \frac{t_0 - t_e}{t_n - t_e}; \quad \text{wenn } \frac{t_0 - t_e}{t_n - t_e} = V, \beta = \frac{1}{\tau_n} \ln V$$

$$(5) \quad \tau_n = \frac{1}{\beta} \ln \frac{t_0 - t_e}{t_n - t_e} = \frac{1}{\beta} \ln V = \alpha \ln V$$

$$(6) \quad \alpha = \frac{\tau_n}{\ln V}, \text{ der Trägheitsbeiwert.}$$

Werden auf der Kurve die Punktpaare gesucht, wofür V , das Verhältnis des höheren zum tieferen Meßwert, jeweils den gleichen, vorgegebenen Wert hat, so müssen diesen Punktpaaren jeweils gleiche Zeitabstände entsprechen. Soll der kleinere Meßwert jeweils die Hälfte des größeren ausmachen, so ist die zugehörige Zeitdifferenz (in s, min oder einem anderen, für sämtliche zusammengehörigen Berechnungen beizubehaltenden Zeitmaß) die sogenannte „Halbwertszeit“ $\tau_{1/2}$. Auch jede andere vorgegebene Zahl für V stellt ein für alle Teile einer Exponentialkurve gleich großes Maß für die Angleichgeschwindigkeit dar. Ausgehend von z. B. 64 Einheiten eines beliebigen Meßwertes werden in jeweils gleichen Zeiten τ_v folgende Einheiten erreicht, und α ist:

$$V = 4/3: 64 \ 48 \ 36 \ 27 \ \dots \ \alpha = \tau_{1/4} / \ln 4/3 = \tau_{1/4}: 0,2877$$

$$V = 2: 64 \ 32 \ 16 \ 8 \ \dots \ \alpha = \tau_{1/2} / \ln 2 = \tau_{1/2}: 0,6931$$

$$V = 4: 64 \ 16 \ 4 \ 1 \ \dots \ \alpha = \tau_{1/4} / \ln 4 = \tau_{1/4}: 1,3863$$

Für die Herleitung von α oder β aus der Halbwertszeit usw. gilt das gleiche wie für die Entnahme des Neigungswinkels aus der Kurve nach 1b. Auch hier machen sich unvermeidbare Ungenauigkeiten der Zeichnung nachteilig bemerkbar. Zweckmäßiger ist es, im Gegenteil die Halbwertszeit aus dem nach 2a berechneten Mittel aus zahlreichen Einzelwerten der Regsamkeit zu berechnen. Auf unser Beispiel unter 2a angewendet, wurde eine mittlere Halbwerts-

zeit von 4,9 min aus der Kurve bestimmt. Aus dem Mittelwert für die ersten 20 Werte der Regsamkeit $\beta_m = 0,1355$ ergibt sich stattdessen, und zweifellos mit weit größerer Zuverlässigkeit die Halbwertszeit zu $0,6931 : \beta = 5,12$ min.

3. Berechnung und Zeichnung der den Meßwerten entsprechenden Exponentialkurve

a) Nach HARTMANN [4] ergab sich oben unter

$$(2) \quad t_{n+1} - t_e = (t_n - t_e) (1 - \beta)^\tau,$$

was mit Hilfe der im Rechenschema für β (unter Ziff. 2a) bereits enthaltenen Werte leicht mittels des Rechenstabes auszurechnen ist, auf welchem man sich den Wert $1 - \beta = 0,8645$ durch eine Marke bezeichnet und jeden Wert des Produktes nur neu mit 0,8645 multipliziert, siehe dort Spalte 6. Bei ausgedehnten Kurven oder bei infolge fortgesetzter Multiplikation zu befürchtender Unsicherheit empfiehlt sich gelegentliche Kontrolle durch direkt berechnete Werte etwa für $\tau = 20, 40$ usw., siehe Spalte 7.

b) Aus der üblichen Formel [2, 5]

$$t_n = t_e + (t_0 - t_e) e^{-\beta \tau}$$

Winke zur Auswertung mit dem Rechenstab bei [6].

Zusammenstellung: Der Regsamkeits- bzw. Trägheitsbeiwert des Wärmeausgleiches nach NEWTON

HARTMANN 1897 [4]: E (Empfindlichkeit), positiver, echter Bruch, der sich bei wachsender Empfindlichkeit der Grenze $+1$ nähert.

$$E = \frac{t_n - t_{n+1}}{t_n - t_e} = \frac{t_{n+1} - t_{n+2}}{t_{n+1} - t_e}; \quad t_{n+x} = t_e (t_n - t_e) (1 - E)^x.$$

Bezeichnen wir $E = -\beta$ (Regsamkeitsbeiwert), Temperaturdifferenz gegen Umgebung $t - t_e = Dt$, so können wir schreiben:

$$-\beta = \frac{dt}{d\tau} : Dt. \text{ „Wartezeit“ } w = \frac{1}{E} \left(= \frac{1}{\beta} \text{ oder } = \alpha, \text{ s. u.} \right).$$

KOHLRAUSCH [2]: Trägheitskonstante k aus $t - t_e = -k \frac{dt}{d\tau}$, integriert $t - t_e = A e^{\frac{\tau}{k}}$. Mit $1/k = \beta$ ergibt sich auch hier:

$$-\beta = \frac{dt}{d\tau} : Dt.$$

GRIMSEHL 1938 [5]: $\frac{dt}{d\tau} = -k(t - t_e) \quad t = t_e + (t_0 - t_e)e^{-k\tau}$
 in unserer Schreibweise: wenn $k = \beta$: $-\beta = \frac{dt}{d\tau} : Dt$.

FRANKENBERGER [3]: $\frac{dE}{d\tau} = -\beta(E - E_0)$.
 $0 < \beta < 1 =$ Regsamkeitsbeiwert oder reziproker Trägheitsbeiwert
 $\frac{1}{\beta} = \infty > \alpha > 1 =$ Trägheitsbeiwert

Ausgleichszeit $\tau = \alpha \cdot \ln \frac{E_1 - E_e}{E_2 - E_e}$,

Halbwertszeit $\tau_{1/2} = \alpha \cdot \ln 2 (= 0,6931)$

Aus Halbwertszeit folgt $\alpha = \frac{\tau_{1/2}}{\ln 2}$, $\beta = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}}$.

Regsamkeit wächst mit wachsendem $\left\{ \frac{dt}{d\tau} \right.$ bei gleichem Temperatur-
 Trägheit wächst mit abnehmendem $\left. \frac{dt}{d\tau} \right\}$ unterschied Dt zur gleichen Zeit τ .

Auch hier finden wir mit den vorherigen Abkürzungen

$$-\beta = \frac{dt}{d\tau} : Dt.$$

Literatur

1. DUFOUR, CHARLES, Prof. d. Astronomie a. d. Univ. Lausanne: Recherches faites dans le but de déterminer la température de l'air par la marche d'un thermomètre non équilibré. Extrait du Bull. de la Soc. Vaudoise des sci. nat. Nr. 52, 1864. Auszug: Met. Zeitschr. **14** (1897), 276—277. (Über einen Satz der Thermometrie).
2. Z. B. KOHLRAUSCH, F., Praktische Physik 18. A. 1943. S. 160.
3. FRANKENBERGER, E., Annal. d. Met. **1** (1948) 53. Auch: Folgsamkeit-Unfolgsamkeit, KOHLRAUSCH, F. Lehrb. d. prakt. Phys. 11. A. 1910. S. 192.
4. HARTMANN, J., Über einen Satz der Thermometrie. Met. Zeitschr. **14** (1897) 45—50. Gibt auch Fehlerberechnung bei plötzlicher und stetiger Änderung der End- bzw. Umgebungstemperatur (Lufttemperatur), sowie für die „Wartezeit“, nach welcher bei stetiger Änderung der Lufttemperatur diese mittels eines noch so trägen Thermometers genau abgelesen werden kann. — Im gleichen Bande der M. Z. 1897 finden sich zum selben Thema noch weitere Beiträge:
 H. HERGESELL, Die Ergebnisse der 1. Int. Ballonfahrt 13/14. 11. 1896, ebd. S. 121—141, worin auf S. 126—128 die Frage des Angleichens der Temperaturangaben an die Umgebung behandelt wird.

- H. HERGESELL, Theoret. u. exp. Untersuch. üb. d. Verhalten von Thermometern, insbesondere solcher, die schnell wechselnden Temperaturen ausgesetzt sind. Ebd. 433—448.
5. Z. B. GRIMSEHL, E., Lehrbuch der Physik. In älterer Aufl., u. a. der 3. von 1914, fehlt das Minuszeichen im Exponenten (e^{-k}), wurde aber später berichtigt. RUDEL, Zur Bestimmung der Einstellträgheit von Thermometern. Met. Zeitschr. 28 (1911) 90—93. Hier ist allerdings α , da es nicht die Trägheit, sondern die Regsamkeit bedeutet, durch unser β zu ersetzen. Auf S. 91 ist das Abklingen in gleichen Zeiten mit den Werten: 80, 60, 45, $33\frac{3}{4}$... nicht ein Beispiel für $V = 4$, sondern $V = 3/4$. (Vgl. auch 3).
 6. ROHRBERG, A., Wegweiser durch die Mathematik II. Berlin 1950, S. 87. Bei einer Neuauflage wäre eine noch ausführlichere Behandlung derartiger, viel gebrauchter Abkühlungs- oder Angleichungskurven erwünscht. PAULY, E., Die Trägheit in der Thermometrie, s. S. 75 Anm.

Anhang II

Tabelle 1. Umrechnung der Bemporad-Luftmassen M_{760} auf wahre, durchstrahlte Luftmasse $M = M_{760} \cdot \frac{B}{760}$

a) auf	0,0%	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9%		
%												
+ 2,	102,	774,9	775,7	776,4	777,1	777,9	778,7	779,4	780,2	781,7	782,5	
+ 1,	101,	767,2	768,0	768,3	769,5	770,3	771,1	771,8	772,5	773,3	774,1	774,9
+ 0,	100,	759,6	760,3	761,1	761,9	762,7	763,4	764,2	764,9	765,7	766,5	767,2
- 0,	99,	760,3	759,6	758,9	758,1	757,3	756,5	755,8	755,0	754,3	753,5	752,7
- 1,	98,	752,7	752,0	751,2	750,5	749,7	749,0	748,2	747,5	746,7	745,9	745,1
- 2,	97,	745,1	744,4	743,6	742,9	742,1	741,4	740,7	729,9	739,1	738,3	737,6
- 3,	96,	737,6	736,9	736,1	735,1	734,5	733,8	733,0	732,3	731,5	730,7	730,0
- 4,	95,	730,0	729,2	728,5	727,7	727,0	726,2	725,5	724,7	723,9	723,1	722,4
		+ 1,0%	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1%	

b) auf $\pm 1\%$

$- 4\% \quad - 3\% \quad - 2\% \quad - 1\% \quad 0 \quad + 1\% \quad + 2\% \quad + 3\%$
 $B \text{ (mm Hg)} = 725,1 - 733,4 - 740,9 - 748,5 - 756,2 - 763,8 - 771,4 - 779,0 - >$

Beispiel: $B = 770,5 = 760 + 1,4\% \text{ od. } 760 \cdot \frac{101,4}{100}$ $M = M_{760} \cdot \frac{101,4}{100}$ $B = 738,3 = 760 - 2,8\% \text{ od. } 760 \cdot \frac{97,2}{100}$

(Zehntel a. unt. Rand!) $M = M_{760} \cdot \frac{97,2}{100}$. Bem.: Die jeweils rechte Zahlensäule gehört noch in dieses Intervall. Genau mußte die Tabelle 1 lauten z. B.: | 775,0 - 775,7 | 775,8 - 776,4 | 776,5 - 777,1 | usw.

Tabelle 2. Umrechnung der gemessenen Intensität J der Sonne

% v. J	-3,3 96,7	-3,2 96,8	-3,1 96,9	-3,0 97,0	-2,9 97,1	-2,8 97,2	-2,7 97,3	-2,6 97,4	-2,5
Dat.	22/12-15/1 15/1-22/12	16/1-21/1 21/12-16/12	22/1-26/1 15/12-11/12	27/1-30/1 10/12-7/12	31/1-2/2 6/12-3/12	3/2-5/2 2/12-30/11	6/2-8/2 29/11-27/11	9/2-11/2 26/11-24/11	12/2 23/11
% v. J	-1,6 98,4	-1,5 98,5	-1,4 98,6	-1,3 98,7	-1,2 98,8	-1,1 98,9	-1,0 99,0	-0,9 99,1	-0,8
Dat.	5/3-6/3 3/11-2/11	7/3-7/3 1/11-31/10	8/3-9/3 30/10-29/10	10/3-11/3 28/10-27/10	12/3-13/3 26/10-25/10	14/3-15/3 24/10-23/10	16/3-17/3 22/10-22/10	18/3-18/3 21/10-20/10	19/3 19/10
% v. J	+0,1 100,1	0,2 100,2	0,3 100,3	0,4 100,4	0,5 100,5	0,6 100,6	0,7 100,7	0,8 100,8	0,9
Dat.	4/4-5/4 3/10-3/10	6/4-7/4 2/10-1/10	8/4-8/4 30/9-29/9	9,4-10/4 28/9-27/9	11/4-12/4 26/9-26/9	13/4-14/4 25/9-24/9	15/4-16/4 23/9-22/9	17/4-18/4 21/9-20/9	19/4 19/9
% v. J	+1,8 101,8	1,9 101,9	2,0 102,0	2,1 102,1	2,2 102,2	2,3 102,3	2,4 102,4	2,5 102,5	2,6
Dat.	6,5-7/5 2,9-1/9	8/5-9/5 31/8-30/8	10/5-11/5 29/8-28/8	12/5-13/5 27/8-25/8	14/5-15/5 24/8-23/8	16/5-17/5 22/8-21/8	18/5-20/5 20/8-18/8	21/5-22/5 17/8-16/8	23/5 15/8
Z. 1	l zum Meßwert zu addierende Korr. in % desselben				Z. 2 erste Jahreshälfte, von l oben → r unten			Z. 3 z	
	r mit dem Meßwert zu multipl. Korr.-Faktor								

Berechnung der gemessenen Intensität J der Sonnenstrahlung auf Intensität J_m bei mittlerer Sonnenferne.

-2,8 97,2 3/2 - 5/2 2/12 - 30/11	-2,7 97,3 6/2 - 8/2 29/11 - 27/11	-2,6 97,4 9/2 - 11/2 26/11 - 24/11	-2,5 97,5 12/2 - 14/2 23/11 - 21/11	-2,4 97,6 15/2 - 16/2 20/11 - 19/11	-2,3 97,7 17/2 - 18/2 18/11 - 16/11	-2,2 97,8 19/2 - 21/2 15/11 - 14/11	-2,1 97,9 22/2 - 23/2 13/11 - 12/11	-2,0 98,0 24/2 - 25/2 11/11 - 10/11	-1,9 98,1 26/2 - 28/2 9/11 - 8/11	-1,8 98,2 1/3 - 2/3 7/11 - 6/11
-1,1 98,9 14/3 - 15/3 24/10 - 23/10	-1,0 99,0 16/3 - 17/3 22/10 - 22/10	-0,9 99,1 18/3 - 18/3 21/10 - 20/10	-0,8 99,2 19/3 - 20/3 19/10 - 19/10	-0,7 99,3 21/3 - 22/3 18/10 - 17/10	-0,6 99,4 23/3 - 24/3 16/10 - 15/10	-0,5 99,5 25/3 - 25,3 14/10 - 13/10	-0,4 99,6 26/3 - 27/3 12/10 - 11/10	-0,3 99,7 28/3 - 29/3 10/10 - 9/10	-0,2 99,8 30/3 - 31/3 8/10 - 8/10	-0,1 99,9 1/4 - 1/4 7/10 - 6/10
0,6 100,6 13/4 - 14/4 25/9 - 24/9	0,7 100,7 15/4 - 16/4 23/9 - 22/9	0,8 100,8 17/4 - 18/4 21/9 - 20/9	0,9 100,9 19/4 - 19/4 19/9 - 18/9	1,0 101,0 20/4 - 21/5 17/9 - 16/9	1,1 101,1 22/4 - 23/4 15/9 - 14/9	1,2 101,2 24/4 - 25/4 13/9 - 13/9	1,3 101,3 26/4 - 27/4 12/9 - 11/9	1,4 101,4 28/4 - 29/4 10/9 - 9/9	1,5 101,5 30/4 - 31/4 8/9 - 7/9	1,6 101,6 1/5 - 2/5 6/9 - 5/9
2,3 102,3 16/5 - 17/5 22/8 - 21/8	2,4 102,4 18/5 - 20/5 20/8 - 18/8	2,5 102,5 21/5 - 22/5 17/8 - 16/8	2,6 102,6 23/5 - 25/5 15/8 - 13/8	2,7 102,7 26/5 - 28/5 12/8 - 10/8	2,8 102,8 29/5 - 31/5 9/8 - 7/8	2,9 102,9 1/6 - 4/6 6/8 - 4/8	3,0 103,0 5/6 - 8/6 3/8 - 31/7	3,1 103,1 9/6 - 12/6 30/7 - 26/7	3,2 103,2 13/6 - 18/6 25/7 - 21/7	3,3 103,3 19/6 - 26/6 20/7 - 12/7

1. Jahreshälfte, von l oben → r unten

Z. 3 zweite Jahreshälfte, von r unten → l oben

Beisp.: Am 4. März g
 $J_m = 1,17 - 1,7\% =$
 oder $1,17 \cdot 98,3 = 1,15$

mittlerer Sonnenferne.

	-2,2 97,8 19/2 -21/2 15/11-14/11	-2,1 97,9 22/2 -23/2 13/11-12/11	-2,0 98,0 24/2 -25/2 11/11-10/11	-1,9 98,1 26/2 -28/2 9/11- 8/11	-1,8 98,2 1/3 - 2/3 7/11- 6/11	-1,7 98,3 3/3 - 4/3 5/11- 4/11
0	-0,5 99,5 25/3 -25,3 14/10-13/10	-0,4 99,6 26/3 -27/3 12/10-11/10	-0,3 99,7 28/3 -29/3 10/10- 9/10	-0,2 99,8 30/3 -31/3 8/10- 8/10	-0,1 99,9 1/4 - 1/4 7/10- 6/10	0,0 100,0 2/4 - 3/4 5/10- 4/10
	1,2 101,2 24/4 -25/4 13/9 -13/9	1,3 101,3 26/4 -27/4 12/9 -11/9	1,4 101,4 28/4 -29/4 10/9 - 9/9	1,5 101,5 30/4 -31/4 8/9 - 7/9	1,6 101,6 1/5 - 2/5 6/9 - 5/9	1,7 101,7 3/5 - 5/5 4/9 - 3/9
	2,9 102,9 1/6 - 4/6 6/8 - 4/8	3,0 103,0 5/6 - 8/6 3/8 -31/7	3,1 103,1 9/6 -12/6 30/7 -26/7	3,2 103,2 13/6 -18/6 25/7 -21/7	3,3 103,3 19/6 -26/6 20/7 -12/7	3,4 103,4 27/6 -11/7 11/7 -27/6

l oben

Beisp.: Am 4. März gemess. 1,17 cal.
 $J_m = 1,17 - 1,7\% = 1,17 - 0,02$;
 oder $1,17 \cdot 98,3 = 1,15 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

Tabelle zur Berechnung der wahren Ortszeit (WOZ = Sonnenzeit)
aus Mittlerer Ortszeit (MOZ) plus Zeitgleichung (Zgl)

MFZ = Bahn- oder Rundfunkzeit

MOZ = MEZ - 4 min für jeden Längengrad westl. 15° E

Datum	Zgl. (min)	Datum	Zgl. (min)	Datum	Zgl. (min)
Jan. 1.— 2.	- 4	Juni 2.— 7	+ 2	Okt. 13.—17.	+14
3.— 4.	- 5	8.—12.	+ 1	18.—22.	15
5.— 6.	- 6	13.—16.	0	23.—31.	16
7.— 9.	- 7	17.—21.	- 1	Nov. 1.—13.	16
10.—12.	- 8	22.—26.	- 1	14.—18.	15
13.—14.	- 9	Juli 27.— 1.	- 3	19.—23.	14
15.—17.	-10	2.— 7.	- 4	24.—26.	13
18.—20.	-11	8.—13.	- 5	27.—29.	12
21.—25.	-12	Aug. 14.— 7.	- 6	30.	11
26.—30.	-13	8.—13.	- 5	Dez. 1.— 2.	11
Feb. 31.—23.	-14	14.—18.	- 4	3.— 5.	10
März 24.— 1.	-13	19.—22.	- 3	6.— 7.	9
2.—16.	-12	23.—26.	- 2	8.— 9.	8
7.— 9.	-11	27.—30.	- 1	10.—11	7
10.—13.	-10	31.	0	12.—13.	6
14.—17.	- 9	Sept. 1.— 2.	0	14.—15.	5
18.—20.	- 8	3.— 5.	+ 1	16.—17.	4
21.—23.	- 7	6.— 8.	2	18.—19.	3
24.—27.	- 6	9.—11.	3	20.—21.	2
28.—30.	- 5	12.—14.	4	22.—23.	+ 1
April 31.— 2.	- 4	15.—17.	5	24.—25.	0
3.— 5.	- 3	18.—20.	6	26.—27.	- 1
6.— 9.	- 2	21.—23.	7	28.—29	- 2
10.—13.	- 1	24.—26.	8	30.—31.	- 3
14.—17.	0	27.—29.	9	Jan. 1.— 2.	- 4
18.—22.	+ 1	30.	10		
23.—27.	2	Okt. 1.— 2.	10		
Mai 28.— 5.	3	3.— 5.	11		
6.—23.	4	6.— 8.	12		
Juni 24.— 1.	3	9.—12.	13		

Beispiel: 6. Jan. WOZ = MOZ - 6 min
15. Okt. WOZ = MOZ + 14 min