Zeitschrift: Bericht über das Geobotanische Forschungsinstitut Rübel in Zürich

Herausgeber: Geobotanisches Forschungsinstitut Zürich

Band: - (1939)

Artikel: Meteorologische Strahlungsmessmethoden für biologische und ökologische Untersuchungen

Autor: Mörikofer, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-377470

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

METEOROLOGISCHE STRAHLUNGS-MESSMETHODEN FÜR BIOLOGISCHE UND ÖKOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

Von *W. Mörikofer.*

(Aus dem Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos)

Mit 19 Abbildungen.

In den letzten Jahrzehnten hat die meteorologische Strahlungsforschung ganz bedeutende Fortschritte gemacht, die sich einesteils auf die Entwicklung und Verbesserung der Meßmethoden, andernteils auf die Gewinnung und Verarbeitung systematischen Beobachtungsmaterials beziehen. Nun bieten aber Untersuchungen der natürlichen Strahlungsströme von Sonne und Himmel nicht nur für Meteorologie, Klimatologie und Geophysik großes Interesse; auch andere, weite Forschungsgebiete, für die die Strahlungsforschung nicht Selbstzweck ist, sind an ihren Resultaten stark interessiert. Zu diesen gehören in erster Linie manche Disziplinen der Biologie, wie Botanik, Zoologie, Ökologie, Physiologie, Medizin, Bakteriologie und Hygiene; doch auch weitere Arbeitsgebiete wie Agrarforschung, Architektur und Heizungswissenschaft müssen sich mit den natürlichen Strahlungsvorgängen befassen.

Für alle diese Forschungszweige, vorab für die biologischen, handelt es sich meist darum, die Wirkungen der Strahlung in Beziehung zu deren qualitativen und quantitativen Eigenschaften zu setzen. Meist genügt für solche Untersuchungen die Kenntnis der allgemeinen klimatologischen Eigentümlichkeiten der natürlichen Strahlungsvorgänge nicht, sondern deren Eigenschaften und vor allem ihre Intensität müssen für den einzelnen Versuch bestimmt werden. So wird es für den biologischen Strahlungsversuch meist notwendig sein, durch häufige Stichproben oder noch besser durch kontinuierliche Aufzeichnungen den Verlauf der Strahlung während der ganzen Versuchsdauer zu verfolgen; dieses Erfordernis kann im einen Fall für die kurzdauernde Bestrahlung eines Präparates, im andern Fall für die eine Vegetationsperiode umfassende Entwicklung einer Pflanze Gültigkeit erlangen.

Das Bedürfnis der Biologie nach eigenen Strahlungsmessungen ist nicht neu, und es wurden für biologische Untersuchungen bereits seit langem gelegentlich Strahlungsmeßmethoden benützt und beschrieben. Neu ist jedoch die Tatsache, daß im letzten Jahrzehnt eine Reihe von Strahlungsmeßmethoden entwickelt wurde, die sich für die Zwecke biologischer Untersuchungen wesentlich besser eignen, als was früher hiefür zur Verfügung gestanden hatte. Wir sind deshalb zu der Aussage berechtigt, daß es heute für den Biologen viel leichter als noch etwa vor zehn oder zwanzig Jahren ist, mit geringer Mühe Strahlungsmessungen anzustellen, deren Genauigkeit seinen Bedürfnissen durchaus genügt.

Hierbei ist entscheidend, daß auch Methoden, die wegen ihrer Fehlerquellen der meteorologischen oder geophysikalischen Forschung keine Fortschritte bieten können, als Hilfsmittel bei Strahlungsuntersuchungen in Medizin, Biologie und Ökologie wertvolle Dienste zu leisten vermögen. Für solche Untersuchungen dürfte es im allgemeinen genügen, daß die physikalischen Hilfsmittel die gleiche Genauigkeit besitzen wie die, mit der die biologischen Strahlungswirkungen selbst festgestellt und quantitativ erfaßt werden können. Nun ist es natürlich nicht möglich, ein allgemeines Maß für die Genauigkeit anzugeben, mit der bei biologischen Untersuchungen gearbeitet werden kann. Angesichts der großen individuellen Variabilität der biologischen Reaktionen auf Strahlungsvorgänge darf man aber doch wohl annehmen, daß zur Beurteilung dieser Wirkungen eine Kenntnis dieser applizierten Strahlungsintensitäten oder Strahlungssummen mit einer Genauigkeit von $\pm 10\,\%$ im allgemeinen genügen dürfte. Und mit einer solchen Fehlergrenze darf für eine Reihe neuerer Meßmethoden gerechnet werden; viele von diesen genügen auch wesentlich strengeren Genauigkeitsansprüchen. Häufig dürfte für biologische Zwecke auch eine noch geringere Genauigkeit ausreichend sein; doch sei immerhin dringend davor gewarnt, in solchen Fällen zu ganz unsicheren Methoden (wie etwa zum einfachen Schwarzkugelthermometer, vgl. unten S. 29) zu greifen, da bei solchen Instrumenten unter Umständen die störenden Einflüsse anderer Faktoren größer sein können als die gesuchte Wirkung der Strahlung.

Im Nachfolgenden soll nun über die einfachen Strahlungsmeßmethoden, die sich besonders für Strahlungsuntersuchungen in der Biologie und verwandten Disziplinen eignen, berichtet werden. Wir

können uns dabei weitgehend auf eigene Untersuchungen am Davoser Observatorium über praktische Eignung und Genauigkeit der verschiedenen Methoden stützen. Entsprechend dem Zwecke dieser Darstellung sollen die präziseren, aber komplizierteren Methoden nur kurz berührt, jedoch nicht ausführlicher behandelt werden; das Schwergewicht soll dagegen auf die Erörterung derjenigen Verfahren gelegt werden, deren Benutzung ohne besondere Kenntnisse und große Kosten und mit verhältnismäßig wenig Zeitaufwand möglich ist [1]).

1. Grundtatsachen der atmosphärischen Strahlungsvorgänge.

Die Auswahl geeigneter Strahlungsmeßmethoden hat sich weitgehend nach den Feinheiten der Fragestellung zu richten — eine Forderung, die selbstverständlich erscheint, häufig aber zu wenig Beachtung findet. So ist zu bedenken, daß manche meteorologische Strahlungsmeßinstrumente nur die Sonnenstrahlung erfassen, andere dagegen außerdem auch noch die diffuse Himmelsstrahlung; unter Umständen muß auch noch die Reflexstrahlung des Bodens oder der Umgebung Berücksichtigung finden. Die kalorimetrischen Meßinstrumente reagieren gleichmäßig auf alle Spektralbereiche und zeigen die gesamte Strahlungsenergie an. Andere Methoden sind dagegen selektiv und messen infolgedessen nur einzelne Spektralbereiche.

Schon aus diesen wenigen Unterscheidungen ergibt sich, wie wichtig es für den Biologen ist, sich schon vor der Aufnahme von Strahlungsmessungen Klarheit zu verschaffen, welche natürlichen Strahlungsquellen und Spektralbereiche für seine Fragestellung von Interesse sind. Auch praktische Fragen wie die Entscheidung zwischen Einzelablesungen, Registrier- und Summationsverfahren erfordern eine sorgfältige Abklärung. Um dem Leser dieser Darstellung bei diesen schwierigen Vorarbeiten behilflich zu sein, sollen alle diese grundsätzlichen Gesichtspunkte an dieser Stelle kurz erörtert werden. Zu diesem Zwecke muß zuerst an einige Eigenschaften der Strahlungsvorgänge in der Natur erinnert werden.

---

[1]) Für ausführlichere Darstellung der komplizierteren wie der einfacheren Strahlungsmeßmethoden vgl. Mörikofer [1]).

Die Strahlung der Sonne erstreckt sich von zirka 290 mμ im Ultraviolett über das ganze sichtbare Gebiet bis ins Ultrarot, wo sie bei 3000 mμ wieder verschwindend schwach wird. Seine größte Intensität besitzt das Sonnenspektrum außerhalb der Atmosphäre im Blau (bei 460 mμ), nach Durchlaufen der Atmosphäre im Gelb (bei etwa 550 mμ), somit stets im sichtbaren Spektrum. Das sichtbare Gebiet erstreckt sich von 360 mμ bis 760 mμ, unterhalb 360 mμ liegt das Ultraviolett, oberhalb 760 mμ das Ultrarot. In der zum Erdboden gelangenden Sonnenstrahlung beträgt die Gesamtenergie des sichtbaren Bereichs nicht ganz 50 %, die des Ultrarots etwas über 50 % und die des Ultravioletts etwa 1 bis 2 % der gesamten Strahlung. Die Wärmestrahlung der Sonne beschränkt sich somit nicht, wie fälschlicherweise häufig angenommen wird, auf das ultrarote Gebiet, sondern sie erstreckt sich über das ganze sichtbare Gebiet bis ins Ultraviolett und hat sogar ihr Maximum im Sichtbaren. Die unrichtige Anschauung ist wohl dadurch entstanden, daß im Ultrarot die Wärmewirkungen dominieren und einzig genauer bekannt sind, während der Wärmestrahlung im sichtbaren Gebiet auch noch Lichtwirkung, derjenigen im Ultraviolett spezifische biologische Effekte zukommen.

Der Ausdruck „Strahlung" ist die allgemeine Bezeichnung für die Emission elektromagnetischer Energie; er umfaßt den ganzen Spektralbereich der Sonnenemission. Im Gegensatz dazu erstreckt sich das „Licht" nur über das dem menschlichen Auge zugängliche Gebiet der Strahlung und gibt, genau genommen, eine seiner spektralen Empfindlichkeitskurve entsprechende Wirksamkeit wieder. Die Augenempfindlichkeit hat ihr Maximum bei 555 mμ und fällt nach beiden Seiten relativ schnell ab (vgl. Abb. 15 *A*); für eine gegebene Intensität hat infolgedessen das Auge im Violett, Blau und Rot eine sehr viel geringere Empfindlichkeit als im Gelb und Grün. Bei Untersuchungen, die sich über das sichtbare Gebiet hinaus erstrecken, sollte man deshalb konsequenterweise nicht von „Licht", sondern stets von „Strahlung" sprechen.

Die Strahlung wird gewöhnlich durch die Energiezufuhr in der Zeiteinheit und auf die Flächeneinheit ausgedrückt und zwar meist in Grammkalorien pro cm² und Minute (nicht Sekunde). So beträgt die kontinuierlich einfallende Intensität der Sonnenstrahlung am äußeren Rande der Erdatmosphäre, die als Solarkonstante be-

zeichnet wird, im Mittel 1.94 gcal/cm²min, am Erdboden variiert die Intensität der Sonnenstrahlung im allgemeinen zwischen 0.5 und 1.5 gcal/cm²min. Die Umrechnung in andere Energieeinheiten ist durch folgende Beziehungen gegeben:

1 gcal/min	=	69,7 Milliwatt
1 Watt	=	14,34 gcal/min
1 Wattsekunde	=	0,2389 gcal = 10^7 Erg.

Die Einheit der Beleuchtung mit sichtbarem Licht ist das Lux (Meterkerze); diese wird erzeugt durch die Lichtstärke einer Kerze im Abstande von 1 m. In Deutschland ist hiefür die Hefnerkerze gebräuchlich, in Amerika, England und Frankreich die Internationale Kerze; diese ist nach Definition 11 % stärker als die Hefnerkerze.

Die einfallende Sonnenstrahlung passiert die Atmosphäre nicht ungestört, sondern sie wird teilweise durch Absorption in Wärme umgewandelt, teilweise durch Reflexion, Brechung und Beugung aus ihrer Richtung abgelenkt und nach allen Richtungen zerstreut (= diffundiert). Im Gegensatz zur Absorption bleibt bei der Diffusion die Strahlung als solche erhalten und kommt uns als diffuse Himmelsstrahlung wieder zu. Da die diffuse Himmelsstrahlung aus der Sonnenstrahlung entsteht, kann sie nur Licht von deren spektraler Beschaffenheit enthalten. Da die Diffusion jedoch vor allem die kurzen Wellenlängen stark betrifft, ist der spektrale Schwerpunkt des diffusen Himmelslichtes gegen kurze Wellen verschoben; daher erscheint uns der wolkenlose Himmel blau und nicht weiß. Sogar im Ultraviolett ist die diffuse Himmelsstrahlung recht beträchtlich und meist stärker als die Sonnenstrahlung.

Die Gesamtenergie der Himmelsstrahlung ist größenordnungsmäßig rund zehnmal schwächer als die der Sonnenstrahlung am Erdboden. Trotzdem ist die diffuse Himmelsstrahlung nicht als unwichtig anzusehen. Ihre Bedeutung beruht darauf, daß sie nicht nur bei schönem Wetter, sondern auch bei bewölktem und bedecktem Himmel ständig in Erscheinung tritt und deshalb eine viel größere Häufigkeit des Auftretens besitzt als die ungestörte Sonnenstrahlung. Infolgedessen wachsen die Energiesummen der diffusen Strahlung zu ähnlicher Größenordnung an wie die Wärmesummen der direkten Sonnenstrahlung.

In der praktischen Strahlungsforschung ist es gebräuchlicher, nicht die direkte Sonnenstrahlung und die diffuse Himmelsstrahlung ge-

trennt zu messen, sondern ihre Gesamtwirkung auf die Horizontalfläche; diese Größe wird neuerdings häufig als Globalstrahlung bezeichnet. Solche Messungen sind für biologische Fragen viel aufschlußreicher als Messungen der direkten Sonnenstrahlung allein; dabei wird die bei jeder Witterung wirklich einfallende Strahlung berücksichtigt, während bei Beobachtungen der direkten Sonnenstrahlung nur schöne Tage zur Messung gelangen und die beträchtlichen Strahlungssummen der diffusen Himmelsstrahlung an bewölkten oder trüben Tagen gänzlich unberücksichtigt bleiben.

Von den meisten Körpern in der Natur wird die Sonnen- oder Himmelsstrahlung teilweise reflektiert. In der Strahlungsklimatologie ist speziell die Strahlungsreflexion vom Erdboden, von den Pflanzen, Gebäuden usw. von Bedeutung; vor allem für aufragende Körper wie Menschen, Tiere, Pflanzen, Hauswände kann die Reflexstrahlung einen beträchtlichen Strahlungszuwachs erzeugen. Das Reflexionsvermögen (die Albedo) ist für die verschiedenen Körper sehr ungleich; über sein durchschnittliches Verhalten gegenüber Sonnen- und Himmelsstrahlung geben die Zahlen der Tabelle 1 Auskunft, die besagen, wieviel Prozente der auffallenden Strahlung reflektiert werden.

Tabelle 1. Reflexionsvermögen (Albedo) in Prozenten

Schnee: neu	80–90
alt	40–70
Wasser	(5)–75
Sand	12–50
Rasen	17–32
Ackerboden	12–16
Wald	5–18
Glas	(20)–92
menschliche Haut	30–40

Besonders groß ist in der Natur demnach die Reflexion an Schnee, Wasser und hellem Sand. Für langwellige, dunkle Wärmestrahlung ist dagegen die Albedo ganz gering.

Neben der direkten, der diffusen und der reflektierten Sonnenstrahlung, die im sichtbaren Spektrum und in den anstoßenden Bereichen liegen, treten in der Natur stets auch langwellige Strahlungsströme auf, die im langwelligen Ultrarot zwischen 3000 und 50000 mμ ihren Sitz haben. Wie jeder Körper, dessen Temperatur

vom absoluten Nullpunkt verschieden ist, emittiert auch der Erdboden bzw. seine Bedeckung durch Pflanzen, Schnee usw. ständig Wärmeausstrahlung, deren Betrag (gemäß dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz) vom Emissionsvermögen und der Temperatur der strahlenden Fläche abhängig ist. In ähnlicher Weise emittiert auch die Atmosphäre selbst eine langwellige Wärmestrahlung, die sogenannte „Gegenstrahlung"; ihr Spektralgebiet liegt ähnlich wie das der Erdausstrahlung, ihr Betrag ist meistens etwas kleiner. Diese beiden Strahlungsströme wirken einander entgegen, indem die Wärmeausstrahlung des Erdbodens eine Abkühlung, die Gegenstrahlung der Atmosphäre eine Erwärmung des Bodens und seiner Bedekkung hervorrufen. Gewöhnlich mißt man ihre Differenz, die sogenannte „effektive" oder „nächtliche Ausstrahlung".

An sich sind diese langwelligen Strahlungsströme von Erde und Atmosphäre ganz bedeutend, umso mehr als sie bei Tage und bei Nacht vor sich gehen; ihre Beträge sind deshalb von ähnlicher Größenordnung wie die Einstrahlungsströme von Sonne und Himmel. Ihre praktische Bedeutung für strahlungsbiologische Fragen entspricht jedoch diesen Beträgen nicht ganz, einmal weil Bodenausstrahlung und atmosphärische Gegenstrahlung sich weitgehend kompensieren, und sodann weil alle übrigen Körper wie Pflanzen, Tiere usw. in ähnlicher Weise ausstrahlen, so daß den Strahlungsgewinnen meist auch Strahlungsverluste gegenüberstehen.

2. Grundsätzliche Gesichtspunkte für die Wahl geeigneter Strahlungsmeßinstrumente für biologische Strahlungsuntersuchungen.

Nach den vorangegangenen Ausführungen über die in der Natur auftretenden Strahlungsströme und ihre wichtigsten Eigenschaften sollen nun im Nachfolgenden die Gesichtspunkte erörtert werden, nach denen sich die Wahl für bestimmte Zwecke geeigneter Meßmethoden zu richten hat. Dabei sollen vor allem die Bedürfnisse ökologischer und strahlungsbiologischer Untersuchungen mit natürlicher Strahlung erörtert werden.

In erster Linie ist zu prüfen, welche Strahlungsart man überhaupt zu messen wünscht; danach richten sich Konstruktion und Montierung der Meßgeräte. Neben der direkten Sonnenstrahlung

darf die bisher zu wenig beachtete diffuse Himmelsstrahlung nicht übersehen werden. Ganz besonders deutlich wird ihre Bedeutung bei bedecktem Himmel, wo sie allein in Erscheinung tritt; in diesem Falle würde sich bei Berücksichtigung der direkten Sonnenstrahlung allein Strahlungslosigkeit ergeben, während schon der Augenschein das Vorhandensein beträchtlicher Bestrahlung und Beleuchtung lehrt. Für biologische Strahlungsuntersuchungen wird die Messung der Sonnenstrahlung allein nur in Ausnahmefällen, wo etwa auch der biologische Vorgang vor der diffusen Himmelsstrahlung geschützt ist, in Frage kommen; ebenso wird man meistens auch nicht die diffuse Himmelsstrahlung allein dem Versuchsobjekt zukommen lassen und der Messung zugänglich machen, sondern die gesamte Einstrahlung von Sonne und Himmel. Im biologischen Freiluftexperiment sind ja Versuchspräparat oder lebende Pflanze stets der vollen Einstrahlung von Sonne und Himmel ausgesetzt. Für den Biologen, der parallel zu seinen Bestrahlungsversuchen auch die verabreichte Strahlung bestimmen will, sind deshalb vor allem diejenigen Strahlungsmeßinstrumente wichtig, die die aus der oberen Hemisphäre einfallende, eventuell dazu auch noch die aus der unteren Hemisphäre reflektierte Strahlung anzeigen. Die meisten dieser Instrumente (Pyranometer und Photometer) haben eine horizontale Auffangfläche; sie messen somit diejenige Strahlungsmenge, die von Sonne und Himmel auf eine etwa dem horizontalen Erdboden vergleichbare Fläche fällt. Für manche Probleme wäre es hinwiederum interessant, statt des Strahlungsgenusses einer horizontalen Fläche den einer allseitig von der Strahlung gleichmäßig getroffenen Oberfläche zu messen, wie sie am besten von einer Kugel repräsentiert wird und den Strahlungsgenuß freistehender Körper (wie Mensch, Pflanze, Gebäude usw.) wiedergibt (Kugelflächenpyranometer); solche Instrumente sprechen nicht nur auf Sonnen- und Himmelsstrahlung an, sondern auch auf Reflexstrahlung vom Erdboden. Den gesamten Strahlungsumsatz des Erdbodens oder einzelner Körper unter Berücksichtigung auch der unsichtbaren, langwelligen Ein- und Ausstrahlungsströme mißt man mit Strahlungsbilanzmessern und verwandten Apparaten; auf diese komplizierteren Verfahren soll hier nicht eingegangen werden.

Für Messungen der direkten Sonnenstrahlung allein muß vor der strahlungsempfindlichen Fläche ein Vorsatzrohr angebracht sein, das

die diffuse Himmelsstrahlung allseitig abschirmt. Dieser Vorsatztubus muß mittels eines Diopters genau nach der Sonne gerichtet und der Sonnenbewegung sorgfältig nachgeführt werden; da die diffuse Strahlung der nächsten Sonnenumgebung besonders intensiv ist, ist es wichtig, den Öffnungswinkel des Tubus klein zu halten. Instrumente zur Messung der direkten Sonnenstrahlung werden gewöhnlich als Aktinometer oder Pyrheliometer bezeichnet, unter Umständen als Photometer.

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt, der bei der Wahl von Strahlungsmeßinstrumenten einer sorgfältigen Abklärung bedarf, betrifft den spektralen Empfindlichkeitsbereich; manche Instrumenttypen besitzen für den ganzen Bereich der Sonnen- und Himmelsstrahlung eine gleichmäßige Empfindlichkeit, andere sprechen nur in begrenzten Bereichen an und innerhalb dieser auch nicht mit durchwegs gleicher Empfindlichkeit. Wo es sich nicht um die Bevorzugung bestimmter selektiver Bereiche handelt, stehen die kalorimetrischen Methoden im Vordergrund, die im ganzen natürlichen Strahlungsbereich gleichmäßige Empfindlichkeit besitzen und die Strahlung im absoluten, physikalisch definierten Maße der Kalorie anzeigen; die Resultate dieser Instrumente sind unter sich ohne weiteres vergleichbar. Solche kalorimetrische Instrumente zur Messung der Sonnenstrahlung und der Globalstrahlung von Sonne und Himmel stehen in den Pyrheliometern, Aktinometern und Pyranometern in großer Zahl zur Verfügung; auch die Instrumente, die auf langwellige Ein- und Ausstrahlung ansprechen, beruhen auf dem kalorimetrischen Prinzip. Mit Hilfe selektiv durchlässiger Strahlungsfilter kann der Empfindlichkeitsbereich der kalorimetrischen Meßapparate in Teilbereiche unterteilt werden, wobei unter Anwendung geeigneter Korrektionen wieder absolute Strahlungsintensitäten in Kalorien resultieren.

Im Gegensatz dazu sind die Photometer auf Grund ihres Meßprinzipes selektiv, indem die zur Messung benutzte Lichtwirkung nur auf Strahlung gewisser Spektralbereiche anspricht. Zur Messung des sichtbaren Gebietes eignen sich primär die optischen Photometer, die auf der Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges beruhen, außerdem aber auch verschiedene andere selektive Photometer, deren Bereich sich über mehr als das ganze sichtbare Spektrum erstreckt und unter Umständen durch Vorschalten geeigneter Filter

der Augenempfindlichkeit weitgehend angepaßt werden kann; als solche kommen besonders das Selenphotoelement und das Graukeilphotometer in Betracht.

Ganz besonderes Interesse bringen Medizin und Hygiene dem Ultraviolettbereich um 300 mμ entgegen, da eine Reihe wichtiger biologischer Effekte in diesem Gebiete liegen. Für genauere Messungen in diesem Bereiche wird meist die photoelektrische Kadmiumzelle verwendet, die kostspielig und kompliziert zu handhaben ist; bequemer und für die meisten biologischen Fragen wohl hinreichend genau ist das UV-Dosimeter.

Der dritte Gesichtspunkt, der bei der Wahl meteorologischer Strahlungsmeßmethoden sorgfältige Beachtung erfordert, bezieht sich auf das Erfassen der zeitlichen Beziehung. So muß unterschieden werden zwischen Instrumenten, die Momentanwerte liefern, Integrations- oder Summationsapparaten, die Strahlungssummen ergeben, und Registriergeräten, die den Verlauf der Strahlung kontinuierlich aufzeichnen und die Entnahme von Einzelwerten wie auch von Strahlungssummen gestatten.

Die meisten Strahlungsmeßinstrumente liefern primär Momentanwerte der Strahlung. Bei biologischen Bestrahlungsversuchen können jedoch Einzelmessungen nur ausnahmsweise genügen, wenn die Dauer des Versuches so kurz ist, daß die Variationen der Strahlung als unbedeutend angesehen werden dürfen. Handelt es sich um mehrstündige und eventuell variable Bestrahlung, so können unter günstigen Umständen dichte Reihen von Einzelmessungen in Frage kommen; in den meisten Fällen genügen dann jedoch nur Summations- oder Registrierinstrumente. Dies gilt ganz besonders für Fälle, wo es sich darum handelt, zu Experimenten oder Naturvorgängen, die sich über Tage, Wochen oder über eine ganze Vegetationsperiode erstrecken, den gleichzeitigen Strahlungsgenuß zu bestimmen. Momentanwerte können in diesem Falle, auch bei noch so dichter Folge der einzelnen Messungen, den großen Variationen im Tages-, Jahres- und Witterungsverlauf bestenfalls im Durchschnitt gerecht werden, und es wäre eine schwierige Aufgabe, durch Einzelmessungen charakteristische Werte für Strahlungsverhältnisse dieser Periode bestimmen zu wollen.

Gerade für solche Zwecke, wo man in erster Linie die Gesamtmenge der Einstrahlung, nicht aber die Einzelheiten ihres Ver-

laufes kennen möchte, sind die wenigen Methoden einer selbsttätigen Strahlungsintegration besonders wertvoll. Hieher gehören in erster Linie der Bimetallaktinograph, das Destillationsluzimeter und das Graukeilphotometer.

Das eingehendste Verfahren zur Strahlungsaufzeichnung besteht in der kontinuierlichen Registrierung des Strahlungsverlaufes mittels elektrischer Registrierapparaturen, die mit thermoelektrischen Aktinometern und Pyranometern kombiniert werden. Da aus den Kurven der Registrierapparate sowohl Einzelwerte wie Summen der Strahlung entnommen werden können, stellen diese die umfassendste Strahlungsaufzeichnung dar; trotzdem ist vor der Auffassung zu warnen, als ob dies auch in jedem Falle die erstrebenswerteste Apparatur wäre. Gute elektrische Registriervorrichtungen sind meist recht teuer, erfordern eine delikate Behandlung und sorgfältige Auswertung sowie häufige Eichungen mit Ableseinstrumenten. Die Tatsache, daß von solchen Registrierapparaturen die Strahlung selbsttätig aufgezeichnet wird, bedeutet somit keineswegs eine Zeitersparnis, da eben auch die Überwachung und Auswertung viel Zeit erfordert.

Alle diese teils grundsätzlichen, teils mehr praktischen Gesichtspunkte, die sich auf die Fragen der Strahlungsart, des Spektralbereiches und der Beobachtungsweise beziehen, bedürfen einer sorgfältigen Abklärung, bevor man an die Anstellung von Strahlungsmessungen für biologische Zwecke herantritt. Nur unter dieser Voraussetzung kann mit einer eindeutigen und wissenschaftlich wertvollen Ausbeute der Strahlungsbeobachtungen gerechnet werden. Auch wo von früheren Untersuchungen Instrumente zur Verfügung stehen, ist sorgfältig die Frage zu prüfen, ob sie der vorgesehenen Fragestellung hinreichend entsprechen.

3. Kalorimetrische Methoden zur Messung der direkten Sonnenstrahlung.

Bei den kalorimetrischen Instrumenten zur Messung der Sonnenstrahlungsenergie wird die auffallende Sonnenstrahlung von einer geschwärzten Fläche absorbiert, d. h. in Wärme umgewandelt; die dadurch hervorgerufene Erwärmung der Auffangfläche kann nach verschiedenen Verfahren gemessen werden, meist geschieht dies thermoelektrisch, gelegentlich auch mechanisch oder thermometrisch.

Um nur die Sonnenstrahlung allein zur Wirkung gelangen zu lassen und gleichzeitig den Windeinfluß auszuschließen, sind diese Instrumente (Pyrheliometer, Aktinometer) mit einem Tubus versehen, der mittels eines Diopters nach der Sonne gerichtet wird und einen geeigneten Öffnungswinkel besitzt; immerhin ist zu beachten, daß auch in die Instrumente zur Messung der Sonnenstrahlung allein stets etwas Strahlung aus den lichtstarken Partien der nächsten Sonnenumgebung hineingelangt. Neben den kostspieligen und teilweise nicht ganz einfachen Präzisionsinstrumenten, wie sie durch das absolute Kompensationspyrheliometer von Ångström, das Silverdiskpyrheliometer von Abbot und das Bimetallaktinometer von Michelson in seinen verschiedenen Modifikationen repräsentiert werden, soll hier speziell auf das thermoelektrische Pyrheliometer von Moll-Gorczynski [2]) hingewiesen werden; dieses ist wesentlich billiger als die übrigen genannten Instrumente, ist leicht zu handhaben und verbürgt eine mittlere Genauigkeit der Resultate von 1 bis 3%.

In dem von der Firma Kipp & Zonen in Delft fabrizierten Pyrheliometer Moll-Gorczynski (Abb. 1), ist am hinteren Ende eines kurzen Tubus zur Abschirmung der Himmelsstrahlung eine Mollsche

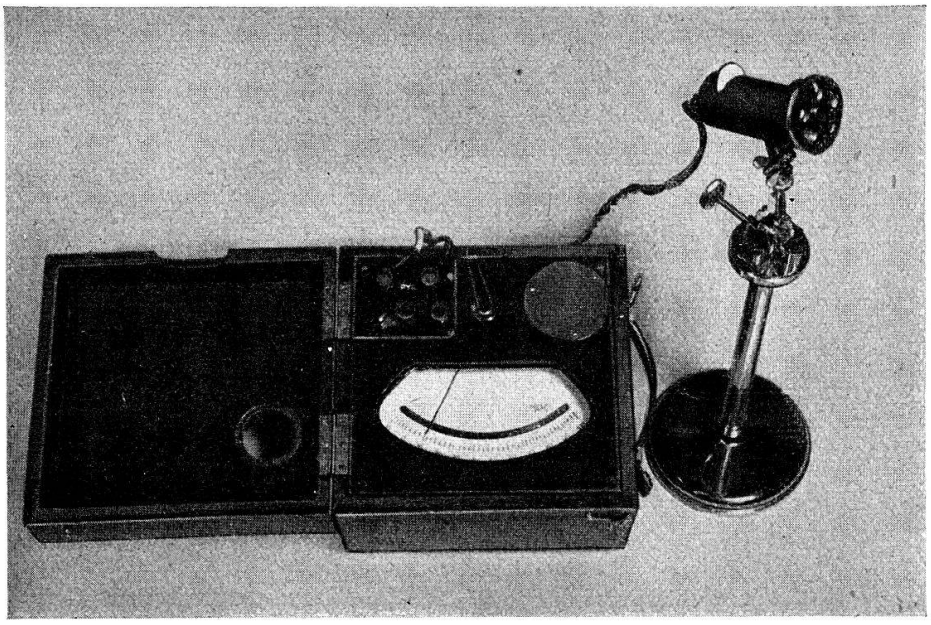


Abb. 1.

Thermoelektrisches Pyrheliometer Moll-Gorczynski mit Zeigergalvanometer.

Thermosäule angebracht; die durch die Bestrahlung dieser Säule entstehende Erwärmung erzeugt einen schwachen elektrischen Strom (Thermostrom), der durch ein Kabel zu einem in der Empfindlichkeit geeigneten Zeigergalvanometer geleitet und mit diesem gemessen wird; die Einteilung des Galvanometers gibt zunächst nur Skalenteile, die zur Bestimmung der Strahlungsintensität in gcal/cm²min mit einem Eichfaktor zu multiplizieren sind. Bei einzelnen Pyrheliometern dieses Modells wurde eine Abhängigkeit der Empfindlichkeit (also auch des Eichfaktors) von der Temperatur gefunden; in diesem Falle sollte zur Steigerung der Meßgenauigkeit ein mit der Temperatur veränderlicher Eichfaktor verwendet werden. Auch vom Wind können die Angaben des Instrumentes etwas beeinflußt werden; zum Schutze kann der hintere Teil des Tubus in eine Wattepackung gehüllt werden.

Der Tubus ist mit Hilfe des daran angebrachten Diopters genau nach der Sonne zu richten und ihrer Verschiebung stets nachzudrehen. Die Apparatur ist wenigstens zehn Minuten vor Beginn der Messungen an den Beobachtungsplatz zu stellen, damit sie mit der Lufttemperatur ins thermische Gleichgewicht kommt. Das Galvanometer selbst muß vor direkter Sonnenbestrahlung geschützt werden, da es sonst gefälschte Werte anzeigt. Vor und nach jeder Strahlungsablesung muß in einem Rhythmus von je zwanzig Sekunden auch die Nullage abgelesen und der Auswertung die Differenz zwischen Ausschlag und mittlerer Nullage zugrunde gelegt werden. Um die Reibung in den Spitzenlagern zu überwinden, muß man vor jeder Ablesung an einer Seitenwand des Galvanometers leicht klopfen. Für sorgfältige Meßreihen empfiehlt es sich, in einer kontinuierlichen Serie in Zeitabständen von je zwanzig Sekunden alternierende Ablesungen der Nullage und des Strahlungsausschlages vorzunehmen und 3 bis 6 Ausschläge den gemittelten Werten der Nullage zuzuordnen.

Die Bestimmung des Eichfaktors des Pyrheliometers hat durch eingehende Parallelmeßserien mit einem anderen Instrument von genau bekannter Empfindlichkeit zu erfolgen. Der Eichfaktor gilt genau nur für die Kombination des betreffenden Pyrheliometers mit dem zugehörigen Galvanometer und Kabel, da durch Änderung des Widerstandes dieser Teile auch eine Empfindlichkeitsänderung hervorgerufen werden kann.

Durch Verwendung geeigneter Glasfilter kann man den ganzen Spektralbereich der Sonnenstrahlung noch unterteilen. Zu diesem

Zwecke ist vor dem Tubus (vgl. Abb. 1) ein drehbarer Filterring angebracht, in dem Glasfilter eingesetzt sind. An Stelle der in den letzten Jahren von Kipp & Zonen gelieferten Filter, die in optischer Beziehung nicht so günstig sind, empfiehlt es sich, die Filter RG 2 und OG 1 von Schott & Gen. zu verwenden, die sich wegen ihrer Durchlässigkeit besonders gut für aktinometrische Messungen eignen und für diesen Zweck international eingeführt sind. Das Gelbglas OG 1 läßt alle langwellige Strahlung oberhalb 524 mμ, das Rotglas RG 2 diejenige oberhalb 623 mμ durch. RG 2 verwendet man am besten in einer Dicke von 1,5 mm, OG 1 in einer solchen von 2,4 mm. Wenn man die mit einem solchen Filter gemessenen Strahlungswerte um 13 % erhöht bzw. mit 1,13 multipliziert, erhält man die wahren Strahlungsenergien der Sonnenstrahlung von 524 mμ bzw. 623 mμ bis zum langwelligen Ende des Sonnenspektrums und zwar befreit von allen Absorptions- und Reflexionsverlusten.

Auf Grund von Messungen der kalorischen Sonnenstrahlung mit Rotfilter, Gelbfilter und ohne Filter kann man nach Anbringung der genannten Korrektion von 13 % die Energie der Totalstrahlung und dreier Teilbereiche berechnen. Es ist dann

T	Totalstrahlung
RG 2	Rot und Ultrarot ($>$ 623 mμ)
OG 1–RG 2	Gelb und Grün (524 bis 623 mμ)
T–OG 1	Blau und Violett ($<$ 524 mμ).

Von diesen Bereichen umfaßt der langwellige RG 2 etwa zwei Drittel der ganzen Strahlungsenergie, der mittlere OG 1–RG 2 ist nur schmal, schließt jedoch das Maximum des Energiespektrums im Gelb ein, und der kurzwellige T–OG 1 zeigt die relativ größten klimatischen Variationen.

Eine Öffnung im Filterring bleibt für die Messung der Totalstrahlung frei, in eine weitere kann für denselben Zweck ein planparalleles Quarzplättchen als Windschutz eingesetzt werden. Da Quarz für Sonnenstrahlung vollkommen durchlässig ist, erfolgt durch dieses bei starkem Wind notwendige Quarzplättchen keine selektive Absorption sondern lediglich ein Reflexionsverlust von 8 bis 10 % der auffallenden Strahlung. Den genauen Betrag dieses Reflexionsverlustes und die daraus sich ergebende Korrektion kann man durch alternative Messungen mit freier Öffnung und mit Quarzplättchen selbst bestimmen.

Im Pyrheliographen Moll-Gorczynski ([2], [3], [4]) ist das dem geschilderten Pyrheliometer zugrunde liegende Meßprinzip zur Konstruktion eines kostspieligen aber vorzüglichen Registrierapparates zur fortlaufenden Aufzeichnung der Sonnenstrahlungsintensität ausgebaut.

Entsprechend dem Zweck dieses Aufsatzes, eine Übersicht der für Biologen wichtigen Strahlungsmeßmethoden zu geben, soll auf die Instrumente zur ausschließlichen Messung der Sonnenstrahlungsintensität nicht näher eingegangen werden. So wichtig für Astrophysik, Geophysik, Meteorologie und Klimatologie die Kenntnis der Strahlungsenergie der Sonne zur Beurteilung der solaren Emission, der Durchlässigkeit der Atmosphäre und des solaren Strahlungsklimas ist, so wenig kann die Berücksichtigung der Sonnenstrahlung allein bei der Beurteilung einer experimentellen Bestrahlung oder des natürlichen Strahlungsgenusses genügen. Abgesehen von vereinzelten Versuchsanordnungen, wo die diffuse Himmelsstrahlung systematisch ferngehalten wird, muß unter natürlichen Strahlungsbedingungen stets auch noch mit der Wirksamkeit der Himmelsstrahlung gerechnet werden. Würde man bei diesen Untersuchungen nur die direkte Sonnenstrahlung allein berücksichtigen, so würde man zu unrichtigen Resultaten gelangen, ganz besonders bei bewölktem Himmel, wo die Sonnenstrahlung gänzlich wegfällt, die Himmelsstrahlung jedoch tagsüber ständig wirksam bleibt.

4. Kalorimetrische Methoden zur Messung der Globalstrahlung von Sonne und Himmel.

Sehr viel wichtiger für biologische Strahlungsuntersuchungen als die Messung der direkten Sonnenstrahlung allein, ist, wie oben schon angeführt wurde, die ständige Aufzeichnung der von Sonne und Himmel einfallenden Globalstrahlung. Nur auf diese Weise kann alle dem biologischen Versuchsobjekt ständig und bei jeder Witterung zufallende Strahlung einwandfrei erfaßt werden. Solche Messungen werden deshalb bei biologischen Strahlungsuntersuchungen noch viel mehr Eingang finden müssen, als dies bisher der Fall war. Erfreulicherweise können heute für diese Fragestellung wesentlich mehr und geeignetere Methoden empfohlen werden als noch vor zehn Jahren. Die Instrumente zur Messung der Wärmeeinstrahlung von Sonne

und Himmel werden, soweit nicht besondere Bezeichnungen gebräuchlich sind, Pyranometer genannt.

Da die Globalstrahlung einerseits die in ihrer Richtung variable Sonnenstrahlung, andererseits die aus allen Richtungen einfallende Himmelsstrahlung umfaßt, besitzen die Pyranometer im allgemeinen eine fest montierte Auffangfläche. Für diese kommen zwei eindeutig definierte Auffangrichtungen in Betracht. So nimmt eine horizontale Fläche von aller Strahlung nur die Vertikalkomponente auf, sie gestattet, den Strahlungsgenuß der horizontalen Erdoberfläche anzugeben. Andererseits setzt die Kugelfläche der Strahlung aus jeder Richtung eine im wesentlichen senkrechte Auffangfläche entgegen, sie mißt den Strahlungsgenuß eines aufrechten, frei exponierten Körpers (Mensch, Tier, Pflanze, Gebäude usw.); dabei nimmt sie auch Reflexstrahlung vom Erdboden auf. Die beiden Auffangflächen der horizontalen Ebene und der freistehenden Kugel sind demnach in ihrem Verhalten gegenüber der auffallenden Strahlung eindeutig definiert und repräsentieren zudem in der Natur vorkommende Expositionsbedingungen. Aus konstruktiven Gründen besitzen die meisten Pyranometer eine horizontale Auffangfläche, nur Schwarzkugelthermometer und Destillationsluzimeter haben Kugelgestalt. Bei biologischen Bestrahlungsversuchen, wo es sich darum handelt, den Strahlungsgenuß einer geneigten Auffangfläche (z. B. eines Pflanzenblattes, einer Hautpartie, eines Berghanges) zu messen, sollte man darauf sehen, die Auffangfläche des benutzten Pyranometers parallel zur bestrahlten Fläche zu orientieren; bei einzelnen, z. B. den thermoelektrischen Pyranometern, wird dies leicht möglich sein, bei anderen bestehen grundsätzliche, in der Konstruktion begründete Schwierigkeiten. Wo jedoch eine solche Anpassung der Auffangfläche nicht beabsichtigt ist, muß auf gute Horizontierung derselben geachtet werden.

Mit den Pyranometern wird man meistens die globale Einstrahlung von Sonne und Himmel messen. Doch besteht auch die Möglichkeit, durch Vorschalten eines ovalen Pappschirmes in einer Distanz von mindestens einem halben Meter mit Hilfe eines Stativs die direkte Sonnenstrahlung abzuschirmen und so allein die Himmelsstrahlung zu messen. Die Größe der Abschirmfläche soll ausreichen, um die Auffangfläche mitsamt der Glasumhüllung während 10 bis 20 Minuten vor direkter Sonnenbestrahlung zu schützen; doch soll anderer-

seits von der Himmelsstrahlung nicht mehr abgeschattet werden, als unbedingt notwendig ist. Durch Differenzbildung zwischen der Global- und der reinen Himmelsstrahlung kann schließlich auch die Wirkung der Sonnenstrahlung allein auf die Auffangfläche ermittelt werden.

Die Eichung eines Pyranometers kann durch Vergleichung mit einem geeichten Instrument gleicher Konstruktion erfolgen oder nach dem eben genannten Differenzverfahren mit Hilfe eines Aktinometers. In diesem Falle wird die Intensität der direkten Sonnenstrahlung mit einem Aktinometer direkt gemessen und mit ihrer Wirkung auf die horizontale oder kugelförmige Auffangfläche des Pyranometers verglichen; hierbei müssen die Unterschiede der Einfallwinkel berücksichtigt werden.

Da bei Pyranometern die Erreichung des nötigen Windschutzes durch Vorschalten eines Tubus nicht möglich ist, sind die meisten Pyranometer mit einer Glasumhüllung (Scheibe, Halbkugel, Kugel) bedeckt. Es ist klar, daß alle diese Glasflächen stets peinlich sauber zu halten sind. Zur Bestimmung der Nullage sind die Pyranometer mit einer Schutzkappe (womöglich aus weiß überzogener Pappe) zu bedecken.

Zu den ältesten Instrumenten, die zur Messung der Wärmeeinstrahlung von Sonne und Himmel benutzt werden, gehören die verschiedenen Formen des Insolations- oder Schwarzkugelthermometers. Doch haben Erfahrung und Theorie in neuerer Zeit gelehrt, daß die verbreitetsten Ausführungen dieses Prinzips groben Fehlereinflüssen unterliegen und neben der Strahlung auch auf andere Faktoren, wie Wind und Lufttemperatur, reagieren. Bei solchen Fehlermöglichkeiten führt das noch heute bei biologischen Untersuchungen gelegentlich geübte Verfahren, ein gewöhnliches Quecksilberthermometer mit blanker oder geschwärzter Kugel der Sonne zu exponieren und damit Strahlung oder die „Temperatur in der Sonne“ messen zu wollen, erst recht zu gänzlich wertlosen und nicht vergleichbaren Zahlen; die Strahlungsaufnahme eines solchen blanken Thermometers hängt vor allem von seiner Unsauberkeit ab, seine Anzeige im übrigen hauptsächlich von Temperatur und Luftbewegung. Daß ein derartiges Instrument im Sonnenschein höhere Werte anzeigt als im Schatten, beweist noch gar nichts für seine Brauchbarkeit. Für wissenschaftliche Zwecke verwendbar sind nur solche Instrumente, deren quantitative Angaben wesentlich genauer sind, als was uns physikalische Überlegungen allein schon bieten.

Um die störenden Einflüsse von Lufttemperatur und Wind zu vermeiden, hat man schon lange (W. Herrschel 1874) angefangen, die geschwärzte Quecksilberkugel mit einer weiten, mehr oder weniger evakuierten Glasumhüllung zu umgeben (Abb. 2). Doch der Erfolg ist nicht befriedigend, da nun diese störenden Einflüsse auf die Glasumhüllung wirken, und diese ihrerseits den Wärmehaushalt der Quecksilberkugel durch Strahlung und Leitung beeinflußt. Infolgedessen ist die Anzeige des Instrumentes unter gleichen Strahlungsbedingungen bei niedriger Lufttemperatur viel niedriger als bei hoher.

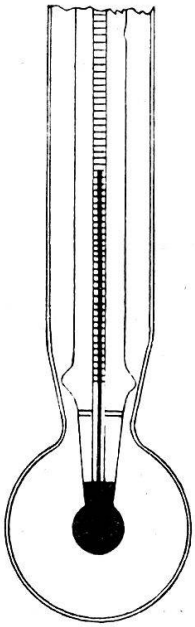


Abb. 2.
Einfaches Schwarzkugelthermometer.

Es ist deshalb völlig zwecklos, die Schwarzkugelthermometerablesungen als solche als Maß für die Strahlung zu verwenden; eher könnte die Übertemperatur des Schwarzkugelthermometers über die Lufttemperatur als Strahlungsmaß dienen.

Zur Vermeidung dieser Schwierigkeit verwendet man häufig eine Kombination eines Schwarzkugelthermometers mit einem analog von einer Hüllkugel umgebenen Thermometer mit blankem Quecksilbergefäß (Marié-Davy 1885). Als Maß für die Einstrahlung wird bei dieser Kombination die Differenz der Temperaturangaben beider Instrumente genommen. Leider ist auch dieses Differentialthermometer Arago-Davy von Temperatur und Wind abhängig, da auch

das blanke Thermometer sich bedeutend über Lufttemperatur erwärmt; die Messungen auch mit diesem Instrument sind somit keineswegs fehlerfrei und unter sich vergleichbar. Im übrigen ist zu beachten, daß die Messungen verschiedener Schwarzkugel- oder Differentialthermometer in Graden untereinander nicht verglichen werden können, da bei den verschiedenen Konstruktionen das Verhalten gegenüber der Strahlung ganz ungleich ist.

Ein bedenklicher Mangel der Schwarzkugel- und der Differentialthermometer besteht auch darin, daß ihre Empfindlichkeit im Laufe der Jahre durch eine Verschlechterung des Vakuums der Hüllkugel abnimmt. Es empfiehlt sich deshalb, nur gealterte und mehrfach mit neuem Vakuum versehenen Doppelthermometer für regelmäßige Messungen zu verwenden und sie von Zeit zu Zeit mit einem Standardinstrument zu vergleichen. Zudem nimmt mit zunehmendem Gasgehalt im Zwischenraum nicht nur die Empfindlichkeit ab, sondern auch der unerwünschte Einfluß von Wind und Lufttemperatur zu.

Durch alle die angeführten Fehlereinflüsse geht auch dem Differentialthermometer mit zwei getrennten Hüllkugeln der Vorzug eines einfachen und doch brauchbaren Instrumentes verloren, und es kann nicht nachdrücklich genug vor der Verwendung eines einfachen Schwarzkugel- oder eines Differentialthermometers bei Untersuchungen gewarnt werden, wo eine Vergleichung der gefundenen Strahlungswerte geplant ist. Es existiert eine einzige Ausführungsform des Schwarzkugelthermometerprinzips, bei der die störenden Einflüsse weitgehend vermindert sind, so daß damit Momentanwerte der Einstrahlung mit befriedigender Genauigkeit bestimmt werden können. Leider ist dieses Instrument, das in Abb. 3 und 4 abgebildet ist, in der Literatur und in der Praxis kaum bekannt und im Handel noch nicht eingeführt.

Albrecht[5]) hat nämlich theoretisch bewiesen, daß die Windabhängigkeit vollkommen und die Temperaturabhängigkeit weitgehend vermieden werden kann, wenn man das geschwärzte und das blanke Thermometer in eine gemeinsame Glasumhüllung V einschließt. Nach einem Vorschlag von Robitzsch kann ferner die selektive Reflexion der blanken Thermometerkugel durch einen weißen Aufstrich M von Magnesiumoxyd bedeutend verbessert werden. Das in Abb. 3 und 4 abgebildete Doppelthermometer wird mit den Kugeln nach oben aufgestellt, so daß alle Strahlung ungehindert darauf auf-

fällt. Man kann den Quecksilbergefäßen Kugelgestalt oder Halbkugelform mit ebener Oberfläche (nach Kalitin) geben, je nachdem man ein Kugel- oder ein Horizontalflächenpyranometer wünscht. Will man mit dem Instrument auch Bodenreflexstrahlung messen, so schwärzt man das Schwarzkugelgefäß *S* allseitig, andernfalls gibt man ihm eine geweißte Unterseite (Abb. 4).

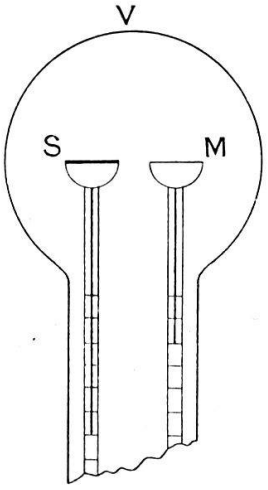


Abb. 3
Schema des Doppelthermometers Albrecht-Kalitin.

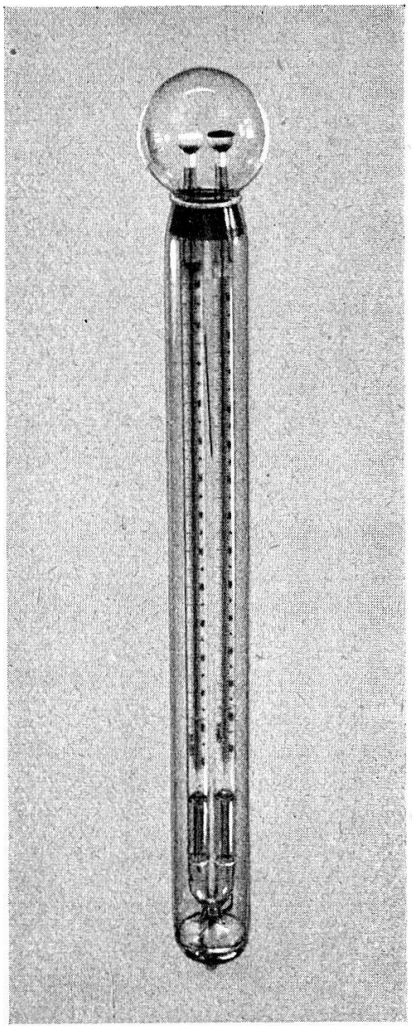


Abb. 4
Doppelthermometer Albrecht-Kalitin.

Solche Doppelthermometer, bei denen die Vorschläge von Albrecht, Kalitin und Robitzsch verwirklicht sind, sind im allgemeinen nicht eingeführt und im Handel nicht ohne weiteres erhält-

lich. Doch ließen wir uns ein solches von der Firma R. Fueß in Berlin-Steglitz nach Spezialauftrag anfertigen und haben damit sehr gute Erfahrungen gemacht. Unsere eingehende kritische Überprüfung (vgl. Prohaska [27] und Mörikofer [1]) hat ergeben, daß dieses Instrument die Momentanwerte der Globalstrahlung mit einem Fehler von weniger als ± 10 % zu bestimmen gestattet. Allerdings ist das Instrument sehr träge, so daß seine Einstellung 10 bis 20 Minuten erfordert; Schwankungen der Einstrahlung bei veränderlicher Bewölkung vermag es infolgedessen nicht schnell und richtig zu folgen.

Die Empfindlichkeit dieses Doppelthermometers ist nicht konstant, sondern sie nimmt mit steigender Strahlung und Thermometerdifferenz beträchtlich ab; da jedoch diese Abnahme stets gleichmäßig verläuft, kann diesem Umstande durch entsprechende Korrektionen oder durch Verwendung eines variablen Eichfaktors leicht Rechnung getragen werden. In diesem Falle und durch kleine konstruktive Verbesserungen könnte zweifellos eine Fehlergrenze von ± 5 % erreicht werden [27]). Im übrigen ist es klar, daß auch bei diesem Instrument nicht mit Thermometerdifferenzen gerechnet werden sollte, sondern mit daraus berechneten Kalorien; nur so läßt sich Vergleichbarkeit unter verschiedenen Doppelthermometern und mit anderweitig gewonnenen Strahlungswerten erreichen. Hiefür ist eine Eichung des Instrumentes in Kalorien mit Hilfe eines anderen geeigneten Strahlungsmeßinstrumentes erforderlich. Die Empfindlichkeit ist etwa von der Größenordnung von 1° Temperaturdifferenz zwischen dem schwarzen und dem geweißten Thermometer für je 0,1 gcal/cm²min; doch nimmt sie, wie eben angeführt, für starke Strahlung beträchtlich ab.

Vor der Verwendung einfacher Schwarzkugelthermometer oder Arago-Davyscher Doppelthermometer mit getrennten Hüllkugeln muß nach diesen Ausführungen dringend gewarnt werden. Das Albrecht-Kalitinsche Doppelthermometer mit gemeinsamer Hüllkugel kann dagegen für Aufgaben empfohlen werden, wo es genügt, Momentanwerte der Wärmeeinstrahlung mit einer Genauigkeit von rund ± 5 % zu bestimmen. Eine solche Genauigkeit wird für die meisten Zwecke der Ökologie, der Agrarmeteorologie und der Biologie hinreichen. Aber gerade für solche Untersuchungen, wo die Versuchsdauer nicht Stunden und Tage, sondern Wochen und Monate dauert, läßt sich der gesamte Strahlungsgenuß durch Einzelablesungen keines-

wegs in genügender Weise erfassen. So besteht eben ein schwerwiegender praktischer Nachteil des Doppelthermometers darin, daß er dem Bedürfnis nach Strahlungssummen über längere Zeit nicht zu genügen vermag.

Zur Bestimmung von Strahlungssummen über den ganzen Tag wird man deshalb in Zukunft wieder mehr zu einem ganz alten Instrument greifen, zum Destillationsluzimeter Bellani (1836). Dieses Instrument, dessen Funktionieren und Theorie nicht sehr übersichtlich sind, begegnet in wissenschaftlichen Kreisen beträchtlichem Mißtrauen. Auf Grund einer Untersuchung, die neuerdings auf Wunsch der Internationalen Strahlungs- und der Agrarmeteorologischen Kommission am Observatorium Davos [6]) durchgeführt wurde, kann jedoch die Feststellung gemacht werden, daß mit diesem Instrument Strahlungssummen mit einer Genauigkeit von ± 10 % gewonnen werden können.

Das Prinzip des Destillationsluzimeters, das neuerdings von Henry [7]) näher untersucht und verbessert worden ist, ist in Abb. 5 schematisch dargestellt. Eine innere, evakuierte Glaskugel *G*, die den oberen Teil des Instrumentes bildet, ist teilweise mit farblosem reinem Alkohol gefüllt. Bei Bestrahlung erwärmt sich dieser und beginnt wegen des gesteigerten Dampfdruckes zu verdampfen und durch ein Glasrohr *R* zu destillieren, das über den Alkoholspiegel *A* emporragt und durch die Kugel *G* nach unten führt. Der überdestillierte Alkohol sammelt sich nun im unteren Teile des Glasrohres *S*; seine während der Expositionszeit überdestillierte Menge kann an der in Kubikzentimetern kalibrierten und mit Teilstrichen von je 0,2 cm^3 versehenen Glasröhre abgelesen werden und stellt ein Maß für die auf die Kugel aufgefallene kurzwellige Wärmestrahlung von Sonne, Himmel und Bodenreflex dar. Wegen der Kugelgestalt der Auffangfläche treffen Sonnen-, Himmels- und Reflexstrahlung aus allen Richtungen symmetrisch und in der Mitte auch senkrecht auf das Instrument auf. Durch den Umstand, daß nur langsam wachsende Differenzen des Alkoholstandes in der Meßröhre abgelesen werden können, eignet sich das Instrument nicht zur Bestimmung von Momentanwerten; dafür hat es den für praktische Verwendung wichtigen Vorzug, mehrstündige oder Tagessummen selbsttätig zu integrieren.

Für die Empfängerkugel *G* wird entweder farbloses oder dunkelblaues Glas verwendet, früher war sie wohl auch schwarz. Zum

Schutz gegen den Windeinfluß ist die eigentliche Empfängerkugel *G* noch mit einer farblosen Hüllkugel *H* umgeben; der Zwischenraum ist zur Verminderung des Wärmeaustausches mehr oder weniger evakuiert.

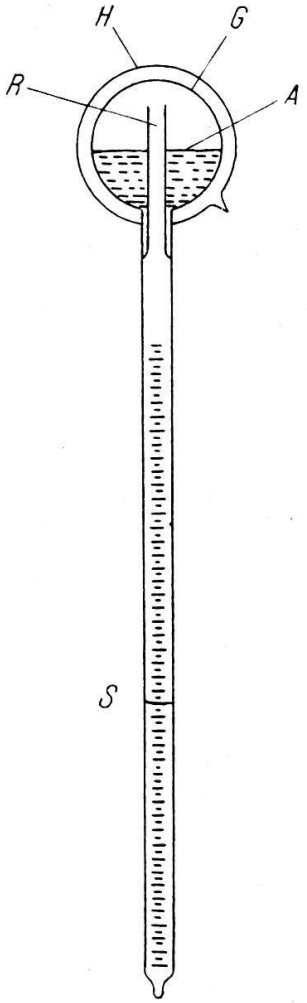


Abb. 5

Schema des Destillationsluzimeters Bellani.

Die innere Kugel *G* ist vollkommen luftleer gemacht, d. h. sie darf gar keine Luft, sondern nur Alkoholdampf enthalten. Von der Güte der Luftleere ist die Empfindlichkeit und Korrektheit des Instrumentes stark abhängig; schon beim Eindringen geringer Luftmengen wird das Gerät unempfindlich und fehlerhaft. Es ist deshalb notwendig, von Zeit zu Zeit die Güte des Vakuums nachzuprüfen. Zu diesem Zwecke bringt man den Alkohol zuerst möglichst voll-

ständig in das Meßrohr *RS*, so daß sich darin kein Alkoholdampf mehr befindet. Hierauf stellt man das Luzimeter mit der Kugel nach unten in ein Gefäß mit kaltem Wasser, in dem das ganze Instrument untertaucht. Wenn sich (etwa nach einer Stunde) Temperaturgleichgewicht eingestellt hat, vergleicht man den Stand des Alkoholspiegels in der Glaskugel und im Meßrohr. Befindet sich Luft in der Glaskugel, so übt sie einen Druck aus, so daß die Flüssigkeit im Glasrohr ansteigt. Ist das Vakuum gut, so sollte der Alkoholspiegel in der Glaskugel und im Rohr ungefähr gleich hoch stehen; immerhin muß schon wegen der Kapillarität mit einem Ansteigen der Flüssigkeit im Rohr um einige Millimeter gerechnet werden.

Das Prinzip des Destillationsluzimeters dürfte sich für die Verwendung einer gefärbten Empfängerkugel leicht verstehen lassen. In diesem Falle ist die Absorption der von Sonne, Himmel und Erdboden auf das ganze Instrument auffallenden Strahlung in der dunklen Kugel stärker als im farblosen Meßrohr; dadurch entsteht in der Kugel eine stärkere Temperaturerhöhung und ein höherer Dampfdruck. Diese Erklärung durch verschiedene Strahlungsabsorption versagt jedoch beim vollständig farblosen Instrument; allerdings lehrt auch die Erfahrung, daß beim farblosen Instrument die destillierte Alkoholmenge, also auch die Empfindlichkeit, nur etwa halb so groß ist als beim Instrument mit dunkelblauer Kugel. Für das farblose Luzimeter muß man deshalb zur Erklärung seiner Wirkungsweise wohl annehmen, daß die ständige, durch Lufttemperatur und Luftbewegung verursachte Abkühlung der durch Bestrahlung erzeugten Übertemperatur am dünnen Meßrohr sich stärker auswirkt als an der Empfängerkugel mit ihrer viel größeren Wärmekapazität. Dadurch wird der Dampfdruck über dem Alkoholspiegel in der Kugel größer als im Rohr, und die Destillation erfolgt von der Kugel in das Rohr. Aus Vergleichen mit verschiedenfarbigen Luzimeterkugeln kann man schließen, daß das Instrument für alle Spektralbereiche des Sonnenspektrums einigermaßen ähnliche Empfindlichkeit besitzt.

Dadurch, daß die beiden Alkoholspiegel sich in gleicher Lufttemperatur befinden, wird das Instrument in der Hauptsache von der Temperatur unabhängig. Es wäre deshalb unrichtig, zu glauben, daß man das Luzimeter durch Konstanthalten der Temperatur des Meßrohres (z. B. mit Wasserkühlung oder durch Schützen vor Bestrahlung) verbessern könne; man würde damit gerade das Gegenteil

erreichen. Eine kleine Temperaturabhängigkeit ist allerdings für das Luzimeter zu erwarten; da bei höherer Temperatur Dampfdruck und Destillation des Alkohols etwas gesteigert sind, wird dann auch die Empfindlichkeit des Systems etwas größer sein.

Nach Angabe von Henry[7]) soll das Luzimeter für diffuse Himmelsstrahlung etwas weniger empfindlich sein als für direkte Sonnenstrahlung. Es wird auch angegeben, daß das Instrument sich nicht nur zur Integration von direkter Sonnen-, diffuser Himmels- und reflektierter Wärmestrahlung eigne, sondern auch zur Messung der Verdunstung und der nächtlichen Ausstrahlung. Im letzteren Falle wird eine Abnahme der Alkoholmenge im Meßrohr beobachtet; sie ist um so größer, je höher der Alkoholstand im Meßrohr ist. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich, für die Bestimmung von Tagessummen das Luzimeter abends neu einzustellen, so daß sich nachts nur wenig Alkohol im Meßrohr befindet.

Das Destillationsluzimeter wird von verschiedenen Thermometerfabriken (so von Thurneyssen in Paris und von R. Fueß in Berlin) hergestellt; es eignet sich vor allem für Bestimmungen der Tagessummen der von Sonne, Himmel und Erdboden auf eine freistehende Kugel einfallenden Wärmestrahlung. Wird das Instrument nur einige Stunden exponiert, so kann man damit die Strahlungssummen der entsprechenden Zeitdauer oder die mittleren stündlichen Strahlungssummen messen. Das Luzimeter ist an einem leicht zugänglichen Orte mit möglichst freiem Horizont aufzustellen. Es ist speziell darauf zu achten, daß keine unbeabsichtigte Reflexstrahlung vom Boden oder von den Seiten her auf das Instrument fällt; heller Boden (z. B. Betonfläche) oder eine helle Hauswand erhöht die Angaben beträchtlich.

Das Luzimeter soll mit der Kugel nach oben in einem Stativ (Abb. 6) gut befestigt sein, damit es nicht durch Windstöße erschüttert wird. Das Stativ soll auf der Nordseite des Instrumentes stehen, damit das Meßrohr während des ganzen Tages der Sonne gleich ausgesetzt ist wie die Kugel.

Vor dem Gebrauch ist das Instrument umzudrehen, damit die Hauptmenge des Alkohols in die Kugel fließt; dann wird es wieder aufgerichtet und dabei dafür gesorgt, daß das Flüssigkeitsniveau im Meßrohr etwas über dem Nullpunkt der Teilung steht. Hierauf wartet man etwa fünf Minuten, ehe man die Anfangsablesung vornimmt;

diese Frist ist notwendig, damit der Alkohol von den Glaswänden herabfließt und sich im Meßrohr bzw. in der Kugel sammelt. Bei starker Strahlung empfiehlt es sich, die während dieser Wartezeit auffallende Strahlung durch gleichzeitige Messung mit einem zweiten Luzimeter zu berücksichtigen oder wenigstens eine der Zeitdauer entsprechende rechnerische Korrektion anzubringen.

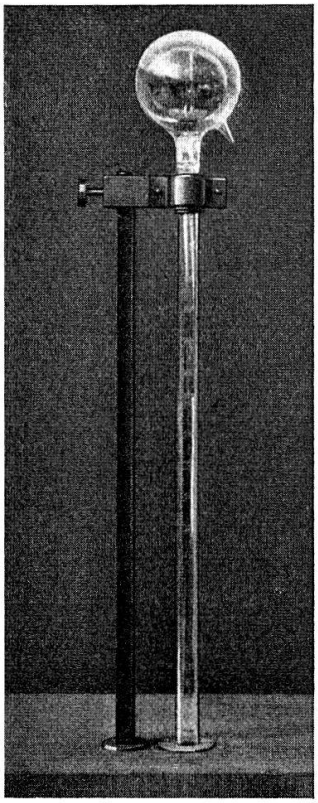


Abb. 6
Destillationsluzimeter Bellani.

Je nach der Fragestellung beträgt die Expositionsdauer 24 Stunden oder eine kürzere Zeit. Nach Ende der Exposition wird der Stand des in der Zwischenzeit in die Röhre überdestillierten Alkohols abgelesen; die Differenz gegen den Anfangsstand bildet ein Maß für die in der Zwischenzeit eingefallene Strahlungssumme. Falls die Exposition nicht ganz kurz war, empfiehlt es sich, den Apparat nach jeder Ablesung neu einzustellen und nach fünf Minuten mit einer neuen Meßreihe zu beginnen. Für die regelmäßige Bestimmung von Tagessummen ist es angezeigt, die Schlußablesung und Neueinstellung

abends nach Sonnenuntergang vorzunehmen, um auf diese Weise den störenden Einfluß der nächtlichen Rückdestillation möglichst klein zu halten. In Zeiten großer Strahlungssummen muß das Luzimeter außer abends auch noch mittags abgelesen und neu eingestellt werden, weil sonst die Gefahr besteht, daß der Alkohol die Teilung des Meßrohres übersteigt. Dies gilt jedoch nur für die empfindlicheren und deshalb empfehlenswerteren Luzimeter mit farbiger (blauer) Kugel; bei den Geräten mit farbloser Kugel genügt die Länge des Meßrohres stets für Tagessummen. Wo eine zweimalige Ablesung am Tage aus praktischen Gründen nicht möglich ist, muß man deshalb für die Sommermonate zu Luzimetern mit farbloser Kugel Zuflucht nehmen; doch sollten diese nicht längere Zeit als notwendig verwendet werden, da sich bei ihnen nach Henry eine Verschlechterung des Vakuums stärker bemerkbar macht und wegen der geringeren Empfindlichkeit die Ablesungen an sich ungenauer sind.

Da der Dampfdruck von der Temperatur abhängig ist, kann man unter Umständen eine Temperaturkorrektion anbringen; nach Henry [7]) addiert man zu dem abgelesenen Alkoholvolumen pro Grad Temperaturerhöhung 0,2 cm^3. Eine solche Korrektion ist jedoch nur notwendig, wenn die Endtemperatur stark von der Anfangstemperatur abweicht; erstreckt sich die Beobachtungszeit über einen ganzen Tag, so erscheint die Korrektion überflüssig.

Eine andere Korrektion läßt sich dagegen auf keinen Fall umgehen. Die Empfindlichkeit des Luzimeters ist nämlich nicht für alle Stellen des Meßrohres gleich, sondern sie nimmt ab, je höher der Alkohol im Meßrohr steht. Die einem Kubikzentimeter destillierten Alkohols entsprechende Kaloriensumme ist deshalb gleichfalls nicht konstant, sondern nimmt mit wachsender Höhe des Alkoholstandes zu. Glücklicherweise läßt sich eine Reduktionstabelle leicht aufstellen, man benötigt dazu allerdings noch ein zweites ähnliches Luzimeter. Die Bestimmung der Reduktionsgrößen beruht auf der Tatsache, daß der Fehler bis zu einer Alkoholmenge von 5 cm^3 im Meßrohr klein bleibt und darüber zunächst nur unmerklich anwächst. Man exponiert deshalb gleichzeitig das zu eichende Luzimeter mit einem zweiten und läßt die Alkoholmenge beim ersten kontinuierlich anwachsen, beim zweiten jedoch nicht über 4 bis 5 cm^3 ansteigen, sondern stellt es immer wieder neu auf niedere Stände ein. Durch häufige Ablesungen (etwa alle zehn Minuten) erhält man die beiden

Kurven der rohen Ablesungen und der ihnen entsprechenden wahren Werte. Nach jedem Umstellen des Vergleichsinstrumentes muß für das Zusammenfließen des Alkohols fünf Minuten gewartet und dieser Ausfall natürlich auch beim zu untersuchenden Instrument berücksichtigt werden.

Die Empfindlichkeit zweier Luzimeter gleicher Konstruktion ist sehr ähnlich, so daß ihre Angaben innerhalb weniger Prozente übereinstimmen. Luzimeter von verschiedener Konstruktion, Herstellung oder Glasfarbe besitzen jedoch ganz verschiedene Empfindlichkeit, so daß ihre Kubikzentimeterangaben auf keinen Fall miteinander vergleichbar sind.

Bisher wurden die mit Luzimetern gewonnenen Resultate meist nur in relativen Einheiten (cm^3) verglichen; doch besitzen diese keine allgemeine physikalische Bedeutung und sind auch nicht mit den Resultaten anderer Meßmethoden vergleichbar. Aus unseren eigenen Untersuchungen hat sich jedoch ergeben, daß eine Eichung des Luzimeters in Kalorien durchaus möglich ist, so daß ihre Resultate in absolutem Maße ausgedrückt werden können. Erst eine kalorische Eichung gibt die Möglichkeit, die Messungen mit denen weiterer Luzimeter und anderer Strahlungsmeßinstrumente zu vergleichen und den Resultaten eine physikalische Deutung zu geben.

Wer kalorische Eichungen selbst durchführen will, benötigt dafür zwei Luzimeter möglichst ähnlicher Konstruktion, so daß ihre Angaben mit großer Sicherheit aufeinander bezogen werden können, und außerdem ein Aktinometer. Vorgängig der kalorischen Eichung ist für beide Luzimeter eine Tabelle der Empfindlichkeitskorrekturen aufzustellen und ihre gegenseitige Empfindlichkeitsrelation zu bestimmen. Für die Eichung selbst exponiert man beide Luzimeter, womöglich an einem wolkenlosen Tage, schützt jedoch durch einen kleinen Pappschirm das eine vor direkter Sonnenbestrahlung; dieses empfängt somit nur Himmels- und Reflexstrahlung, das andere außerdem noch direkte Sonnenstrahlung. Die Differenz der Angaben beider Luzimeter, umgerechnet auf die Empfindlichkeit des vollbestrahlten Instrumentes, entspricht dann der Wirkung der direkten Sonnenstrahlung während der Eichdauer, die womöglich einige Stunden umfassen soll. Gleichzeitig bestimmt man in kurzen Zeitabständen die Intensität der direkten Sonnenstrahlung entweder mit Aktinometermessungen oder auf Grund einer Registrierung. Dann kann das

Zeitintegral der direkten Sonnenstrahlungsenergie über die ganze Versuchsdauer der Menge destillierten Alkohols nach Anbringung der notwendigen Reduktionen gleichgesetzt werden. Da die Strahlung auf die Luzimeterkugel stets symmetrisch auffällt, ist eine Umrechnung der Sonnenstrahlung auf Horizontalfläche nicht nötig, eine Vergleichung der Resultate mit den Angaben von Pyranometern mit horizontaler Auffangfläche jedoch streng nicht möglich. Im Gegenteil lehrt die Erfahrung, daß das Luzimeter stets größere Strahlungsenergien anzeigt als Horizontalflächenpyranometer, da es Sonnen- und Himmelsstrahlung immer unter günstigstem (symmetrischem) Einfallswinkel aufnimmt und außerdem noch Reflexstrahlung erhält.

Die Resultate kalorischer Eichungen können Differenzen von 5 bis 10 % ergeben; speziell im Winter scheint die Empfindlichkeit des Luzimeters etwas geringer zu sein als im Sommer. Zur Orientierung sei angegeben, daß für die uns bekannten Luzimeter der Eichwert etwa 20 bis 25 gcal/cm² pro Kubikzentimeter überdestillierten Alkohols beträgt. Die Berechnung der Strahlungs- und speziell der Tagessummen erfolgt für ein geeichtes Luzimeter in einfacher Weise, indem man an den abgelesenen Anfang- und Endwerten die oben erörterte Empfindlichkeitskorrektion anbringt, dann ihre Differenz berechnet und mit dem Kalorieneichwert multipliziert.

Theorie und Kritik des Destillationsluzimeters Bellani sind noch nicht abgeschlossen. Nichtsdestoweniger läßt sich auf Grund unserer eigenen Untersuchungen das Urteil gewinnen, daß dieses Instrument sehr viel bessere Dienste leistet, als man im allgemeinen von ihm erwartet. Wo es sich darum handelt, Tagessummen der kurzwelligen Wärmeeinstrahlung von Sonne, Himmel und Umgebung auf einen frei exponierten Körper zu messen, kann das Destillationsluzimeter benutzt werden, sofern sich eine Unsicherheit der Resultate von etwa 10 % mit den Anforderungen der Fragestellung verträgt. Diese Voraussetzung dürfte für die meisten Aufgaben einer angewandten Strahlungsforschung, etwa in Biologie, Ökologie und Agrarmeteorologie, der Fall sein.

Ein wertvoller Vorzug bei der Verwendung des Luzimeters als Hilfsinstrument besteht neben der leichten Handhabung und dem niedrigen Preis auch darin, daß es mehrstündige bzw. Tagessummen der Strahlung selbsttätig integriert, so daß seine Auswertung mit geringem Zeitaufwand verbunden ist. Bei hinreichender Instruk-

tion kann das Instrument auch von ungeschulten Hilfskräften abgelesen und besorgt werden. Es ist dringend zu empfehlen, die abgelesenen Alkoholmengen nicht als relative Vergleichsdaten zu benutzen, sondern ihnen durch Anbringen der Empfindlichkeitskorrektion und des Kalorienwertes absolute Bedeutung zu geben; ebenso ist es notwendig, von Zeit zu Zeit die Güte des Vakuums und den Eichfaktor nachzuprüfen.

Anschließend an diese älteren Strahlungsmeßgeräte sollen nun noch einige einfache, neuere Registrierapparate für Globalstrahlung von Sonne und Himmel besprochen werden. In erster Linie ist hier

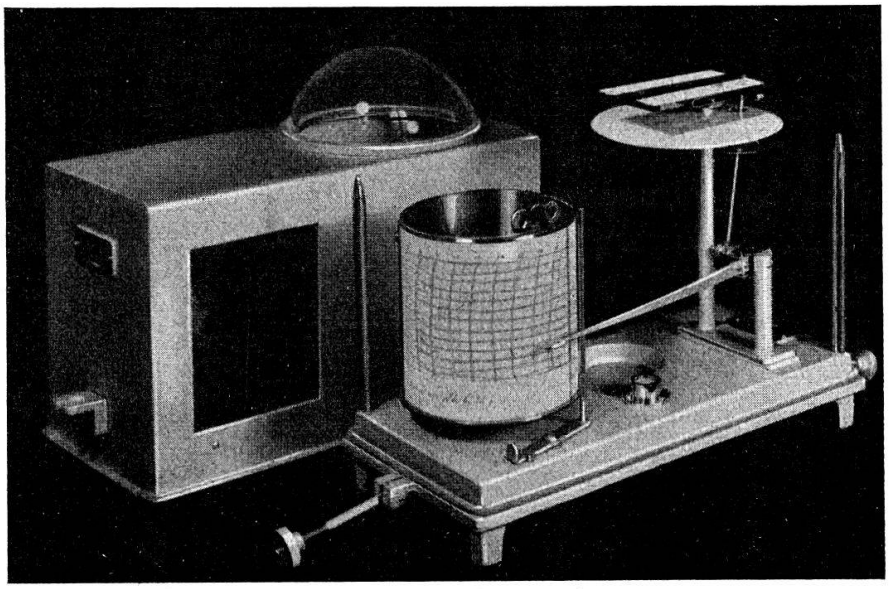


Abb. 7

Bimetallaktinograph Robitzsch.

der Bimetallaktinograph Robitzsch [8]) zu nennen, wohl das einzige Strahlungsregistrierinstrument, das den Strahlungsverlauf mittels Tintenregistrierung auf einer Registriertrommel kontinuierlich aufzeichnet. Bei diesem Instrument (Abb. 7) werden eine schwarze und zwei weiße horizontale Bimetallamellen, die durch eine geschliffene Glashalbkugel im Schutzgehäuse vor Niederschlag und Wind geschützt sind, durch die Globalstrahlung getroffen und wegen ihres ungleichen Absorptionsvermögens verschieden erwärmt; durch Gegenschaltung der weißen gegen die schwarze Lamelle wird das Instrument von der Temperatur selbst unabhängig. Die Verbiegung dieses Systems

wird durch ein Hebelsystem vergrößert und mittels Tintenregistrierung auf der Registriertrommel aufgezeichnet.

Der Bimetallaktinograph zeigt die kalorische Energie über den ganzen Spektralbereich der Sonnen- und Himmelsstrahlung an; immerhin scheint er für Ultrarot etwas unempfindlicher zu sein als für sichtbare Strahlung. Das Instrument muß stabil und gut horizontal aufgestellt werden. Das Fenster des Registrierkastens soll gegen Norden gerichtet sein, damit nicht durch das Fenster bei tiefem Sonnenstande einzelne Teile der inneren Apparatur von Strahlung getroffen und ungleich erwärmt werden; dem gleichen Zwecke dient ein unterhalb der Bimetallamellen angebrachter horizontaler Metallteller, der weiß gestrichen ist.

Die Ausführung des Aktinographen, der für klimatologische Untersuchungen Tag und Nacht und bei jeder Witterung im Freien zu stehen hat, hat sich im allgemeinen als wetterbeständig erwiesen. Die Gummidichtungen an der Glashalbkugel und am unteren Rande des Schutzkastens müssen gelegentlich erneuert werden. Das Beschlagen der Innenseite der Glasglocke läßt sich vermeiden, wenn man in das Gehäuse ein Schälchen mit Chlorkalzium stellt. Reif- und Taubildung auf der Außenseite der Glaskugel verhindert man durch einen sehr dünnen Aufstrich von Glysantin, welches nur etwa 2 % der Strahlung absorbiert.

Die Einstelldauer des Aktinographen ist relativ groß und beträgt für einen Ausschlag von 1 gcal/cm² min etwa 15 bis 20 Minuten. Momentanwerte sind deshalb nur bei ausgeglichenen Strahlungszuständen reell, nicht dagegen bei Schwankungen. Durch diese Trägheit des Instrumentes sind die aufgezeichneten Kurven ziemlich stark verzeichnet und ausgeglichen; die im Einzelfall dadurch entstehende Verschiebung gleicht sich jedoch in der Integration über Zu- und Abnahmen wieder aus.

Der Aktinograph wird von R. Fueß in Berlin-Steglitz hergestellt, und zwar mit einem Uhrwerk für siebentägigen, viertägigen oder eintägigen Umlauf, auf Wunsch auch mit umschaltbarer Trommel für Tages- oder Wochenumlauf. Für eine Übersicht über den Strahlungscharakter der einzelnen Tage genügt der Wochenumlauf, ebenso für Zwecke, wo angenäherte Kenntnis der Strahlung ausreicht. Wenn es sich jedoch darum handelt, strahlungsklimatologische Resultate zu gewinnen und dabei auch den Tagesgang der Strahlung ins Auge zu

fassen, so empfiehlt es sich, eine Trommel mit Tagesumlauf zu verwenden, da bei rascherem Umlauf die Genauigkeit der Auswertung und die Sicherheit der zeitlichen Zuordnung wesentlich größer ist.

In Abb. 8 ist ein verkleinerter Ausschnitt einer Registrierung mit Tagesumlauf wiedergegeben. An dem betreffenden Tage herrschte wolkenloses Strahlungswetter bis nach Mittag, hierauf kam starke, wechselnde Bewölkung vor die Sonne, nach 16 Uhr dunkle Böenwolken. Vor Sonnenaufgang, nach 6 Uhr, erkennt man die diffuse Strahlung der Dämmerung.

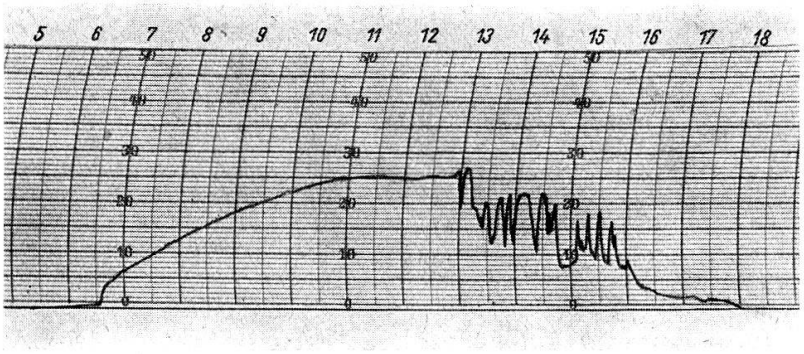


Abb. 8

Registrierung des Bimetallaktinographen.
(halbe natürliche Größe.)

Wichtig für die Auswertung von Momentanwerten und von Strahlungssummen ist die vorherige Festlegung der Nullinie, die häufig nicht mit der Basislinie des Registrierpapieres zusammenfällt. Normalerweise nimmt man die Tagesverlängerung der Nachtlinie als Nullinie an und zieht sie mit feinem Bleistift aus. Nach Sonnenuntergang macht sich gelegentlich ein Nachhinken der Einstellung auf die Nullinie bemerkbar, das oft mehrere Stunden dauert und somit nicht reelle Dämmerungsstrahlung anzeigt; praktisch fällt jedoch bei Auswertung von Tagessummen dieser Fehler wegen der Kleinheit der umschriebenen Fläche kaum in Betracht.

Die Auswertung der Registrierkurven kann nach Momentanwerten und nach Strahlungssummen erfolgen. Zur Entnahme von Momentanwerten wird die Höhe der senkrechten Ordinaten über der Nullinie entsprechend der Teilung der Registrierstreifen in ganzen und in ungefähren Zehntelmillimetern abgelesen und mit dem Eichfaktor E multipliziert. Momentanwerte dürfen den Registrierungen dieses

Aktinographen nur entnommen werden, wenn die Intensität der Globalstrahlung vorher mindestens 20 Minuten lang keine bedeutenden Änderungen gezeigt hat; andernfalls sind die Kurven verzerrt und ausgeglichen und die Momentanwerte nicht reell.

Der Bimetallaktinograph eignet sich jedoch vor allem zur Bestimmung von Strahlungssummen. Die Auswertung erfolgt am besten durch Auszählung oder durch Ausmessung der Registrierfläche. Bei der Auszählung bestimmt man die Zahl der durch die Teilung des Registrierpapieres gegebenen Flächeneinheiten und multipliziert sie mit dem durch eine vorgängige Eichung festgelegten Kalorienwert einer Einheit. Etwas genauer als die Auszählung ist die Planimetrierung der von der Nullinie und der Registrierkurve umschriebenen Fläche mit Hilfe eines einfachen Polarplanimeters (etwa von der Firma A. J. Amsler & Co. in Schaffhausen); hierbei werden Unregelmäßigkeiten im Kurvenverlauf besser erfaßt als durch Auszählen. Das Ergebnis der Planimetrierung ist dann mit dem einem cm^2 entsprechenden Kalorienwert zu multiplizieren, wodurch man die für die Beobachtungsperiode gültige Strahlungssumme in $gcal/cm^2$ erhält. Bezeichnet man mit E den für Momentanwerte gültigen, einem Millimeterausschlag entsprechenden Eichfaktor in $gcal/cm^2min$ und mit h die Länge einer Stunde auf der Registrierung in mm, so beträgt der Kalorienwert K eines cm^2 der ausgemessenen Fläche

$$K = \frac{E \cdot 60 \cdot 100}{h} \text{ gcal/cm}^2.$$

Bei Tagesumlaufregistrierung ist $h = 11{,}2$ mm, bei Wochenumlauf 1,67 mm; daraus ergibt sich für Tagesumlauf $K = 536\ E$, für Wochenumlauf $K = 3600\ E$.

Bei schnell wechselnder Bewölkung umschreibt bei Wochenumlaufregistrierung wegen der kleinen Zeitskala und der Trägheit des Instrumentes die Registrierkurve manchmal kaum noch ein Flächenstück, oder die Fläche wird durch Registriertinte voll ausgefüllt. In diesem Falle empfiehlt es sich, die Fläche zweimal zu planimetrieren, indem man das eine Mal dem oberen, das andere Mal dem unteren Rand der ausgefüllten Fläche nachfährt und das Mittel beider Auswertungen nimmt.

Der Eichfaktor des Bimetallaktinographen wird nach dem Differenzverfahren bestimmt, wonach der von der Sonnenstrahlung allein

verursachte Ausschlag des Aktinographen der mit einem Aktinometer gemessenen und auf Horizontalfläche umgerechneten Sonnenstrahlung gleichgesetzt wird. Wegen der Trägheit des Aktinographen muß die Abschattung etwa 20 Minuten dauern und die gleichzeitige Aktinometermessung auf den Schluß dieser Abschattungsperiode fallen. Durch graphische Interpolation wird der Verlauf der Registrierkurve für diesen Zeitpunkt ergänzt. Dieses Verfahren ist nur an mehr oder weniger wolkenlosen Tagen anwendbar.

Sämtlichen von R. Fueß in den Handel gebrachten Robitzsch-Aktinographen wird ein Eichschein mitgegeben, der auf einer Eichung von Prof. Robitzsch beruht; auf diesem ist eine Eichkonstante mitgeteilt, die als reziproker Wert des von uns oben benutzten Eichfaktors E definiert ist und angibt, wieviele Millimeter der von einer Strahlungsintensität von 1 gcal/cm²min erzeugte Ausschlag beträgt.

Wie Mörikofer und Thams [9]) gezeigt haben, führen die von Prof. Robitzsch bis Juli 1938 bestimmten Eichkonstanten infolge eines grundsätzlichen Fehlers bei der Eichung seines Standardinstrumentes zu Strahlungsintensitäten und Wärmesummen, die um 40 bis 50 % zu hoch sind. Da die Beweisführung von Mörikofer und Thams von der Internationalen Strahlungskommission wie auch von Robitzsch selbst als richtig anerkannt wird, ergibt sich für Benützer von Bimetallaktinographen die Notwendigkeit, zu prüfen, ob ihr Instrument mit einem richtigen oder einem falschen Eichschein versehen ist; Eichscheine bis Juli 1938 dürften durchwegs unrichtig sein. Diese Instrumente sollten am ehesten beim Hersteller oder an einem Strahlungsinstitut neu geeicht werden.

Abgesehen von diesem grundsätzlichen Eichfehler, der den früheren Bimetallaktinographen anhaftet, hat sich das Instrument nach Untersuchungen von Mörikofer und Thams [10]) recht gut bewährt. Momentanwerte der Globalstrahlung können den Registrierkurven mit einer Genauigkeit von ± 10 % entnommen werden, allerdings nur bei gleichmäßigen Strahlungsverhältnissen, während bei starken Strahlungsschwankungen die Kurven infolge der großen Trägheit des Instrumentes stark verzerrt sind. Für Tagessummen der Strahlung, die durch Planimetrieren der Strahlungskurve gewonnen werden, ist die Sicherheit wesentlich größer als für Momentanwerte; ihr mittlerer Fehler beträgt nur etwa ± 5 %. Seine Hauptbedeutung hat der Bi-

metallaktinograph somit für die Gewinnung von Tagessummen der Globalstrahlung. Wichtig für die praktische Verwendbarkeit des Instrumentes ist auch seine bequeme und leichte Handhabung. Der Aktinograph ist das einzige Strahlungsregistrierinstrument, das die kostspieligen und Spezialkenntnisse erfordernden elektrischen und photographischen Registrierverfahren vermeidet und eine mechanische Registrierung mit Tintenaufzeichnung verwendet. Durch diesen Umstand ist seine Bedienung nicht schwieriger als etwa die eines Thermographen und kann ohne Bedenken auch einer ungeschulten Hilfskraft übertragen werden; etwas mehr Übung erfordert allerdings die Auswertung der Registrierstreifen.

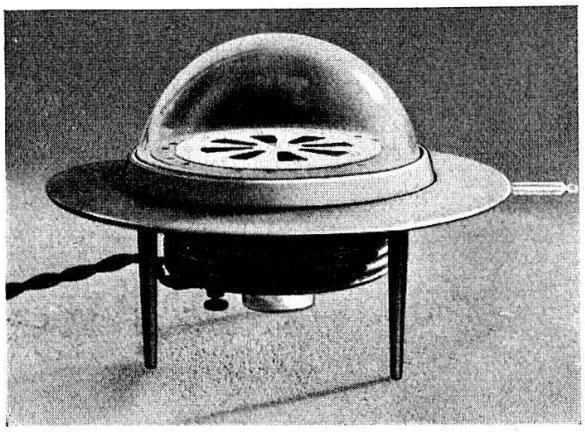


Abb. 9

Sternpyranometer Linke.

Mit etwas größeren Ansprüchen an Geschicklichkeit und physikalische Kenntnisse wie auch mit größeren Kosten ist bei den thermoelektrischen Pyranometern zu rechnen; dafür ist bei ihnen die Genauigkeit wesentlich gesteigert, besonders für die Gewinnung von Momentanwerten. Beim Sternpyranometer (Abb. 9) von Linke [11]) sind 8 weiße mit 8 schwarzen Kreissektoren kombiniert und auf der Unterseite durch Thermoelemente verbunden. Die Auffangfläche ist durch eine Glaskugelschale geschützt. Zur Ablesung verwendet man das Zeiger- und Spiegelgalvanometer „Mirravi" von Hartmann & Braun; doch können die Angaben des Instrumentes mit einer elektrischen Registriervorrichtung auch laufend aufgezeichnet werden. Die Empfindlichkeit des Sternpyranometers ist nicht ganz konstant, sondern sie nimmt mit steigender Sonnenhöhe etwas ab; es muß

deshalb mit einer Unsicherheit seiner Angaben von einigen Prozenten gerechnet werden.

Die weiteste Verbreitung unter den thermoelektrischen Pyranometern hat das von Kipp & Zonen in Delft konstruierte Solarimeter Moll-Gorczynski [2, 3]) gefunden, bei dem die Globalstrahlung auf eine horizontale Mollsche Thermosäule auffällt. Bei den älteren Formen (Abb. 10) ist die Thermosäule *s* von einer Glashalbkugel von

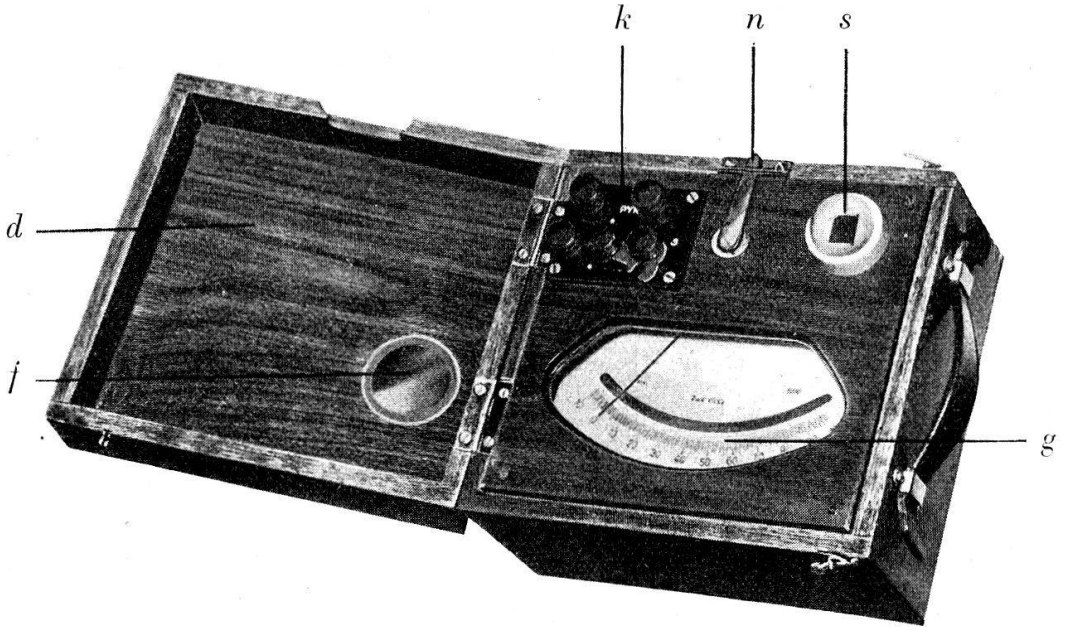


Abb. 10

Solarimeter Moll-Gorczynski für direkte Ablesung.

30 mm Durchmesser bedeckt und in einer Ecke des hölzernen Galvanometerkastens direkt eingebaut. Der Ausschlag wird an einem Galvanometer (Millivoltmeter) mit 110teiliger Skala *g* mittels Zeigers und Spiegelablesung beobachtet. Durch Schließen des Kastendeckels *d* wird die Solarimetersäule beschattet und die Nullage kann durch das Fenster *f* abgelesen werden. Einstellen läßt sich der Nullpunkt mittels des Schiebers *n*; doch kann die Einstellung kaum hinreichend genau vorgenommen werden, so daß vor und nach jeder Strahlungsablesung auch eine Nullpunktablesung stattfinden muß. Am Klemmenbrett *k* kann durch den Widerstand die Empfindlichkeit variiert und außerdem ein Pyrheliometer Moll-Gorczynski angeschlossen werden.

So handlich diese Kombination der Thermosäule mit dem Galvanometer in einem einzigen Gerät erscheint, so ist sie grundsätzlich doch etwas verfehlt. Für ein Solarimeter soll der natürliche Horizont nirgends beschränkt sein, und doch ist bei dieser Konstruktion der Beobachter gezwungen, zur Ablesung seinen Kopf senkrecht über die Skala zu halten, um den Vorzug der Spiegelablesung voll auszunutzen; dabei wird ein Teil der diffusen Himmelsstrahlung abgeschirmt und der Ausschlag geht merkbar zurück.

Während bei den älteren Ausführungen, wo die Thermosäule mit einer Glashalbkugel von 30 mm Durchmesser bedeckt war, die Konstanz der Nullage wie der Empfindlichkeit wenig befriedigend ist,

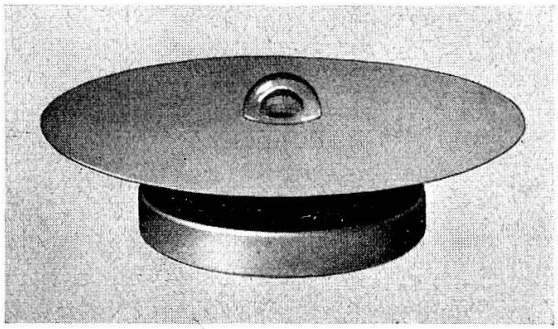


Abb. 11

Solarimeter Moll-Gorczynski mit zwei Glashalbkugeln.

sind die Bedingungen sehr viel günstiger bei den neueren Konstruktionen, wo die Thermosäule in einen großen Gußsockel mit weiß gestrichenem Schutzschild eingelassen und durch zwei Glashalbkugeln von 30 und 50 mm Durchmesser bedeckt sind (Abb. 11). Bei dieser Konstruktion ist der Fehler der Messungen auf wenige Prozente reduziert.

Das Solarimeter kann für Einzelablesungen mit einem Zeigergalvanometer (wie in Abb. 1 und 10) oder für kontinuierliche Aufzeichnung mit einer elektrischen Registrierung kombiniert werden.

Einen praktischen Fortschritt bedeutet es, besonders für Zwecke der biologischen Strahlungsforschung, daß neuerdings dazu ein elektrolytischer Milliamperestundenzähler (Abb. 12) erhältlich ist, der die Strahlungssummen selbsttätig integriert [2]). Nach unseren Erfahrungen ist allerdings die Empfindlichkeit dieser Zähler nicht ganz

konstant und unter anderem auch von der Temperatur abhängig; speziell bei schwachen Intensitäten werden sie unempfindlich.

Grundsätzlich besitzt ein derartiges Integrationsinstrument (Totalisator) eine sehr große praktische Bedeutung. Für alle Verwendungszwecke, wo nicht Einzelheiten des Tagesganges, sondern nur die Tagessumme der Einstrahlung gewünscht wird, ermöglicht der

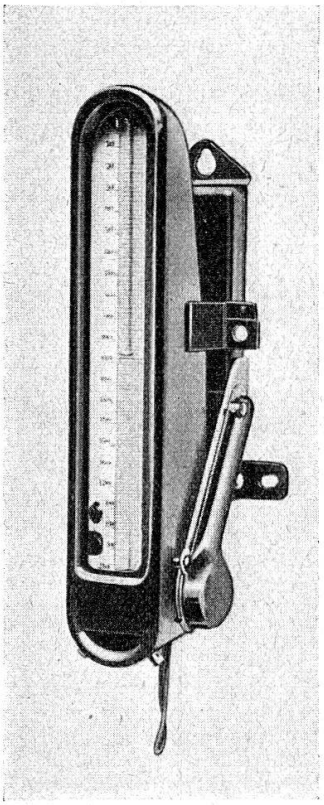


Abb. 12

Elektrolytischer Milliamperestundenzähler.

Integrationszähler die Umgehung der kostspieligen und in Bedienung und Auswertung umständlichen Registrierapparatur und liefert selbst die tägliche Strahlungssumme nach Multiplikation mit dem Eichfaktor in einer einzigen Zahl. Für viele, vor allem klimatologische und ökologische Aufgaben dürfte eine solche Gewinnung von Tagessummen durchaus genügen. Wie gezeigt wurde, stellen allerdings die heutigen Elektrolytzähler wegen der Ansprechschwelle, der inkonstanten Empfindlichkeit und der Temperaturabhängigkeit noch keine

restlos befriedigende Lösung des Problems dar. Infolge dieser Einflüsse muß im Durchschnitt mit einem Fehler der Tagessummen von 10 bis 20 % gerechnet werden.

5. Selektive Methoden zur Messung der sichtbaren Strahlung von Sonne und Himmel.

Neben den kalorimetrischen Methoden, die die gesamte Energie der Strahlung in Kalorien zu bestimmen gestatten, können bei biologischen Strahlungsuntersuchungen häufig auch selektive Verfahren wertvolle Dienste leisten. Zwar lassen sich ihre Resultate primär nur in relativen Lichteinheiten ausdrücken; doch genügen diese als relatives Vergleichsmaterial innerhalb gegebener Versuchsbedingungen, und unter noch näher zu erörternden Bedingungen können sie sogar in Kalorien umgerechnet werden. Die Verwendung selektiver Methoden mit beschränktem Spektralbereich ist in zwei Fällen speziell angezeigt: einmal wenn der Empfindlichkeitsbereich der Methode sich einigermaßen mit dem spektralen Wirkungsbereich des zu untersuchenden biologischen Vorganges deckt; und sodann in allgemeinerem Sinne unter der Voraussetzung, daß auch die selektive Methode innerhalb gewisser Fehlergrenzen als relatives Vergleichsmaß für die kalorischen Energien zu dienen vermag; von dieser Voraussetzung wird am Ende dieses Abschnittes noch die Rede sein. Wenn auch in der Überschrift dieses Abschnittes von „sichtbarer Strahlung" gesprochen wird, so sollen hier nicht etwa die komplizierteren optischen oder visuellen Photometer behandelt werden. Sondern die beiden zu behandelnden Methoden haben eine selektive Empfindlichkeit, deren Bereich und Verlauf sich nur angenähert mit der Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges deckt.

Die rapide Entwicklung der Selensperrschichtzellen [12]) in der Technik hat die Möglichkeit gegeben, diese Geräte auch für meteorologische und biologische Strahlungsuntersuchungen zu verwenden. Der Sperrschichteffekt besteht darin, daß an einem Halbleiter zwischen zwei metallischen Elektroden, von denen die eine lichtdurchlässig ist und bestrahlt wird, eine elektromotorische Kraft auftritt; da diese von der Anlegung einer Hilfsspannung unabhängig ist, es sich somit um direkte Umwandlung von Lichtenergie in elek-

trische Energie handelt, werden solche Sperrschichtzellen oder Halbleiterzellen neuerdings häufig als Photoelemente bezeichnet.

Das Prinzip eines Photoelementes ist in Abb. 13 schematisch dargestellt. Zwischen der metallischen Trägerelektrode t und der äußerst dünnen, lichtdurchlässigen Vorderelektrode v liegt eine Halbleiterschicht h, an deren einer Seite sich eine Sperrschicht s befindet, die eine stark unipolare und durch Bestrahlung veränderliche Stromdurchlässigkeit besitzt. Auf die Vorderelektrode v ist zwecks Strom-

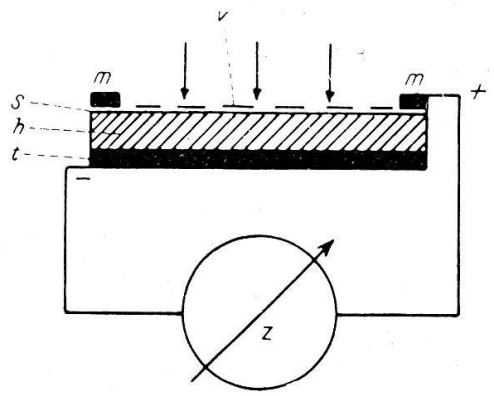


Abb. 13

Schema eines Photoelementes (Vorderwandzelle)
t = Trägerelektrode; h = Halbleiterschicht; s = Sperrschicht; v = lichtdurchlässige Vorderelektrode; m = Metallring zur Stromabnahme; z = Zeigermeßinstrument.

abnahme ein Metallring m aufgesetzt. Der bei Belichtung erzeugte Strom ist so stark, daß er mit einem Zeigerinstrument z (Mikroamperemeter) abgelesen werden kann. Als Halbleiter werden gewisse Substanzen (besonders Kupferoxydul und Selen) benutzt, die sich in kristallinem Zustand befinden und infolge Störungen im regelmäßigen Kristallaufbau ein geringes, unipolares elektrisches Leitvermögen besitzen. Die anfänglich gebauten Kupferoxydulphotoelemente, bei denen die Sperrschicht teils an der Hinterwand, teils an der Vorderwand des Halbleiters liegt, sind wegen gewisser Mängel heute gänzlich aufgegeben, und es werden meist nur noch Selenphotoelemente nach dem Vorderwandprinzip konstruiert.

Solche Selenzellen-Beleuchtungsmesser werden von mehreren Firmen in verschiedenen Ausführungen hergestellt, ein Beispiel ist in Abb. 14 abgebildet. Diese Instrumente messen gewöhnlich die von

Sonne und Himmel auf die Horizontalfläche auffallende Strahlung. Da diese Intensität für die Zelle schädlich ist, wird sie durch ein geeignetes Schwächungsfilter in hohem Maße reduziert; in Abb. 14 ist ein Platinopalglasfilter nach Pettersson darüber gestülpt, durch

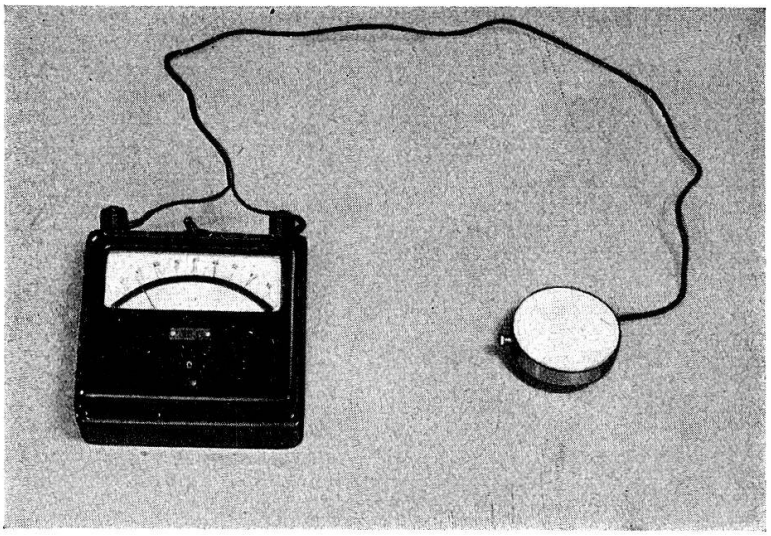


Abb. 14

Photoelektrischer Beleuchtungsmesser:
Selensperrschichtzelle mit Platinopalglasfilter und Mikroamperemeter.

das die Strahlung völlig diffus gemacht und auf $^1/_{100}$ ihres ursprünglichen Wertes geschwächt wird. Die Strahlung wird am Mikroamperemeter abgelesen, dessen Skala direkt in Lux geeicht ist; es besitzt zwei umschaltbare Empfindlichkeitsbereiche, so daß unter Weglassung bzw. Benutzung des Platinopalglasfilters ein sehr großer Bereich von ganz geringer Helligkeit bis zu voller Sonnenbestrahlung gemessen werden kann.

Die spektrale Empfindlichkeitskurve der Selenzellen fällt, wie man aus Abb. 15 *P* ersehen kann, einigermaßen mit der visuellen Empfindlichkeit des menschlichen Auges zusammen; mit diesen Zellen wird somit angenähert das sichtbare Licht gemessen. Doch können bei verschiedenen Zellen beträchtliche Abweichungen des Bereiches auftreten; auch ist es der Technik gelungen, nötigenfalls den Bereich in das benachbarte Ultrarot auszudehnen. Unter Umständen ist es von Interesse, den Empfindlichkeitsbereich der Zellen

durch Vorschalten von Filtern zu unterteilen; auf diese Möglichkeit werden wir unten noch zurückkommen.

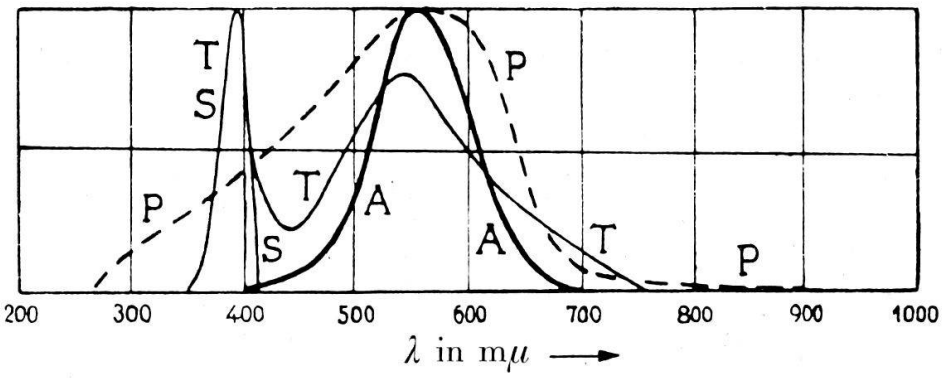


Abb. 15

Spektrale Empfindlichkeitskurven:
A = menschliches Auge;
P = Selenphotoelement;
S = Schwellenwert beim Graukeilphotometerpapier;
T = Tonwert beim Graukeilphotometerpapier.

Photostrom und Photospannung sind bei Photoelementen nur für kleinere Beleuchtungsstärken der Lichtintensität proportional; für große Beleuchtungsstärken werden diese Instrumente relativ unempfindlicher. Die Abweichung von der Linearität zwischen Beleuchtung und Photostrom wird umso stärker, je größer die Beleuchtungsstärke und der äußere Widerstand im Vergleich zum inneren werden; da der innere Widerstand im Verhältnis der Beleuchtungsstärke abnimmt, tritt dieses ungünstige Widerstandsverhältnis somit gleichfalls bei hohen Lichtintensitäten auf. Linearität ist somit nur bei mäßiger Beleuchtungsstärke gewährleistet. Außerdem sind die Angaben des Instrumentes von Temperatur, Auffallwinkel, Schaltbereich und anderen Faktoren etwas abhängig. Vor allem jedoch reagiert das Photoelement auf intensive Bestrahlung mit starker Ermüdung, indem die Empfindlichkeit sofort zurückgeht; bei Verdunklung erholt sich die Empfindlichkeit sofort wieder auf den früheren Betrag, so daß mit einer dauernden Nachwirkung nicht gerechnet werden muß. Daneben kommt es allerdings auch vor, daß neue Photoelemente eine Alterung zeigen, die nicht wieder zurückgeht, jedoch nach hinreichender Vorbelichtung die Empfindlichkeit einen mehr oder weniger konstanten Wert annehmen läßt.

Da Vergleichsmessungen der Helligkeit eine konstante Empfindlichkeit zur absoluten Voraussetzung haben, muß für solche Messungen darauf gesehen werden, alle Ursachen von Empfindlichkeitsänderungen und von Proportionalitätsabweichungen sorgfältig zu vermeiden. Die wichtigste Vorsichtsmaßnahme besteht darin, die Photoelemente nie einer zu intensiven Bestrahlung auszusetzen. Eine Beleuchtung von 1000 Lux hat sich als diejenige Grenze erwiesen, unterhalb welcher der Photostrom der Beleuchtung proportional und eine Überbelichtung ausgeschlossen ist; auch Beleuchtungen von wenigen 1000 Lux scheinen nur schwache Ermüdung und geringe Abweichungen von der Proportionalität hervorzurufen. Die Ortshelligkeit von Sonne und Himmel kann jedoch rund 100000 Lux betragen und im Hochgebirge unter Umständen über 150000 Lux steigen. Zur Messung solcher Intensitäten ist deshalb die Strahlung auf etwa den hundertsten Teil zu schwächen. Dies kann erfolgen durch Vorschalten von mehreren Milchgläsern oder von Neutralgläsern, z. B. dem Schottschen Grauglas NG 5, mit mattierten Oberflächen. Dieses schwächt pro Millimeter Dicke die durchgehende Strahlung ungefähr auf die Hälfte; seine Absorption ist im sichtbaren Gebiet nahezu gleichmäßig, für genauere Untersuchungen ist immerhin einer geringen Selektivität durch Anbringen einer Korrektion Rechnung zu tragen.

Als Schwächungsfilter wird häufig auch das Platinopalglasfilter von Pettersson verwendet (vgl. Abb. 14). Bei diesem ist die untere, rauhe Seite eines Milchglases durch Kathodenzerstäubung mit einer dünnen Platinschicht überzogen; bei dieser Behandlung gelangt an die tiefer liegenden Stellen der rauhen Fläche weniger Platin, so daß das Filter wie ein Lochsieb wirkt. Durch geeignete Bestäubung läßt sich die Dicke der Platinschicht so abstimmen, daß die Lichtdurchlässigkeit des Filters zwischen 50 % und 0,1 % variieren kann. Bei einzelnen Photoelementgeräten kann ein solches Pettersson-Filter, das die Lichtintensität gerade auf $^1/_{100}$ reduziert, mitbezogen werden; es ist klar, daß die platinierte Schicht sorgfältig vor Berührung geschützt werden muß, damit ihre Durchlässigkeit keine Änderungen erleidet.

Da die mit den Photoelementen gelieferten Mikroamperemeter meist keine große Einstellgenauigkeit besitzen, muß unter Berücksichtigung der verschiedenen Fehlereinflüsse je nach dem Meßbereiche schätzungsweise mit einer Unsicherheit der Resultate in Lux von etwa

3 bis 8 % gerechnet werden. Es liegt nun nahe, solche Photoelemente durch Vergleiche mit kalorimetrischen Meßinstrumenten in Kalorien zu eichen, um auf diese Weise mit dem handlichen Selektivinstrument Energiewerte in kalorischem Maße zu erhalten; dabei wird die Unsicherheit der Resultate allerdings noch etwas vergrößert, da die zahlenmäßige Relation zwischen der Strahlung des sichtbaren Bereiches und der Gesamtemission zwar weitgehend, jedoch nicht vollständig konstant ist. Auf Grund eigener Erfahrungen glauben wir immerhin, daß auch die mittels einer kalorischen Eichung berechneten Resultate von Photoelementen innerhalb einer Fehlergrenze von ± 10 % liegen werden.

Zur Registrierung kann das Photoelement an ein Schlagbügelgalvanometer geeigneter Empfindlichkeit angeschlossen werden, zur Bestimmung von Strahlungssummen an einen elektrolytischen Milliamperestundenzähler oder an einen Drehzähler, in dem ein umlaufender Scheibenanker ein Zählwerk betätigt. Über Erfahrungen mit solchen Summationsgeräten im klimatologischen Dauerbetrieb liegen noch keine Veröffentlichungen vor.

Da die Sperrschichtphotoelemente gemäß Abb. 15 *P* eine beträchtliche Breite des Empfindlichkeitsbereiches aufweisen, ist von verschiedenen Autoren versucht worden, besonders interessierende Teilbereiche durch Vorschalten geeigneter Filter gesondert zu messen. Im Vordergrunde steht dabei die Anpassung der Instrumentempfindlichkeit an die Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges (vgl. Abb. 15 *A*). Vorschalten des Schottschen Grünfilters VG 1 (in 1 bis 2 mm Dicke) genügt für manche Zwecke und speziell auch für Messungen der sichtbaren Sonnen- und Himmelsstrahlung. Für höhere Ansprüche und für Messungen an Lichtquellen mit diskontinuierlicher Emission muß eine Kombination mehrerer Filter Platz greifen. Da hierbei jedoch eine Überkompensation in einzelnen Spektralbereichen nicht zu vermeiden ist, hat Dresler [13]) eine geeignete Filteranordnung angegeben, bei der die Kombination auf einen Teil der gesamten Fläche beschränkt bleibt, die dabei hervorgerufene Überkompensation dagegen auf dem Rest der Fläche durch Verwendung einzelner Filter wieder korrigiert wird. Bei der Dreslerschen Kombination werden ein je 1 mm starkes Grünfilter VG 2 und ein Gelbfilter OG 1 von Schott & Gen. in der Weise kombiniert, daß 80 % der Photoelementfläche von beiden Filtern gemeinsam überdeckt werden, während das

Grünfilter allein nur 14 % und das Gelbfilter 6 % der Fläche bedeckt; das Gelbfilter verschafft der Kombination die notwendige Rot- und das Grünfilter die Blauempfindlichkeit, die bei durchgehender Verwendung beider Filter verschwinden würden. Durch Verschiebung der drei Flächenanteile lassen sich Unterschiede in der spektralen Empfindlichkeit einzelner Zellen ausgleichen; die Richtigkeit der Filterung muß in einzelnen Teilbereichen überprüft werden.

Unter wesentlich allgemeineren Gesichtspunkten haben verschiedene Autoren den verhältnismäßig breiten Empfindlichkeitsbereich der Selensperrschichtzelle durch eine Serie aneinander anschließender Filter unterteilt, um auf diese Weise schmale Spektralbereiche zu messen, die als praktisch monochromatisch angesehen werden dürfen. So hat Seybold [14]) neben anderen Kombinationen eine Serie von 20 Schottschen Glasfiltern angegeben, die teils einzeln, teils in Kombination bis zu vier Filtern vor das Photoelement geschaltet werden und sich vorzüglich zur Unterteilung seines Empfindlichkeitsbereiches in zwölf Teilgebiete eignen; für Grün mußte noch ein grün gefärbtes Zelloidinscheibchen zu Hilfe genommen werden. Bei Vorschalten vor ein Selenphotoelement, dessen Empfindlichkeitsbereich von 260 bis 750 mμ reicht (mit Maximum bei 580 mμ), erhält man die in Tabelle 2 angegebenen Teilbereiche, für die außer dem optischen

Tabelle 2. Filterkombinationen für Selenphotoelemente (nach Seybold).

Komb. Nr.	Filter: Schott & Gen.	Optischer Schwerpunkt mμ	Halbwertsbreite mμ	Durchlässigkeit %
1	UG 2 + BG 12	365	340–390	21
2	BG 12 + BG 2 + GG 3	435	420–450	4,2
3	BG 1 + BG 3 + BG 7 + GG 5 .	450	432–468	6,6
4	GG 7 + BG 12	490	482–496	0,4
5	BG 9 + BG 7 + Zelloidin . . .	520	506–535	1,3
6	VG 2 + VG 3 + OG 1 + BG 11	560	556–570	6,5
7	OG 2 + VG 3 + BG 7	570	565–584	6,5
8	RG 1 + VG 2	600	590–608	0,9
9	RG 2 + BG 7	655	632–684	3,0
10	RG 5	680	650–740	66
11	RG 8	710	680–740	66
12	RG 7	730	730–740	66

Schwerpunkt das Gebiet der Halbwertsbreite und die für den Teilbereich geltende mittlere Durchlässigkeit angegeben ist.

Zeller [15]) gibt eine Auswahl anderer Schott-Filter und Filterkombinationen, die nach seinen Angaben in Tabelle 3 zusammengestellt sind. Die in Klammer gesetzten Filterkombinationen sind gleichzeitig vor die Selenzelle vorzuschalten; das Minuszeichen bedeutet die rechnerische Differenz der mit den einzelnen Kombinationen gemessenen Strahlungswerte.

Tabelle 3. Filterkombinationen für Selenphotoelemente (nach Zeller).

Filter und Filterkombinationen: Schott & Gen.	Schwerpunkt mμ	Bereich mμ
BG 17	sichtbar	350–800
(BG 17 + RG 8)	(750)	700–800
(BG 17 + RG 1) – (BG 17 + RG 8)	650	600–700
(BG 17 + GG 11) – (BG 17 + RG 1)	550	500–600
BG 17 – (BG 17 + GG 11)	425	350–500

Ferner haben auch Eckel und Sauberer [16], [17]) sich eingehend mit der Unterteilung des Empfindlichkeitsbereiches der Selenzelle durch Filter und Filterkombinationen befaßt. Als geeignetste Aus-

Tabelle 4. Filter zur Differenzbildung für Selenphotoelemente (nach Sauberer und Eckel).

Filterdifferenz: Schott & Gen.	Optischer Schwerpunkt (mμ) vor Selenzelle
GG 2 – GG 3	423
GG 3 – GG 5	440
GG 5 – GG 7	466
GG 7 – GG 11	487
GG 11 – OG 1	515
OG 1 – OG 2	546
OG 2 – RG 1	590
RG 1 – RG 2	623
RG 2 – RG 5	646
RG 5 – RG 8	683
RG 8 – RG 9	714

wahl kann man wohl die beiden in Tabelle 4 und 5 wiedergegebenen Serien ansehen. Bei der Auswahl in Tabelle 4 werden zwölf Schottsche Filter von 2 mm Stärke mit scharfer kurzwelliger Abfallkante und gleichmäßiger, großer Durchlässigkeit im Langwelligen verwendet, wobei durch Differenzbildung der Resultate der Messungen je zweier aufeinanderfolgender Filter elf schmale Spektralbereiche herausgeschnitten werden.

In der anderen, in Tabelle 5 wiedergegebenen Filterserie von Sauberer und Eckel liefern einzelne Filter oder Filterkombinationen selbst schon einen beidseitig eng begrenzten Bereich und ermöglichen dadurch eine direkte Unterteilung des gesamten Empfindlichkeitsgebietes in Teilbereiche. Bei dieser Serie sind elf Schottsche Glasfilter einzeln oder in Kombination so angewendet, daß sie elf einander teilweise etwas überschneidende Bereiche ergeben.

Tabelle 5. Filter zur Messung schmaler Spektralbereiche vor Selenphotoelementen (nach Sauberer und Eckel).

Komb. Nr.	Filter: Schott & Gen.	Optischer Schwerpunkt mμ	Bereich mμ
1	UG 1 + BG 12	377	330–405
2	BG 12 + NG 5	435	350–510
3	BG 12 + VG 9	475	440–510
4	VG 9 + NG 5	525	430–630
5	BG 18 + OG 2 + NG 5	590	550–670
6	BG 18 + RG 1	630	600–680
7	BG 18 + RG 2	640	630–680
8	RG 2 + NG 5	660	600–850
9	RG 5	700	650–850
10	RG 8	735	700–850
11	RG 9	760	700–850

Die Angaben der Tabelle 5 über den Durchlässigkeitsbereich der Filter gelten für ein von 360 bis ca. 850 mμ, also auch für Rot empfindliches Photoelement. Die Farbgläser sind durchwegs 2 mm dick, bei einigen wurde zur Schwächung und damit zur Einengung des etwas zu breiten Bereiches noch ein Neutralfilter NG 5 von 3 mm Stärke hinzugefügt. Für Messungen mit Blau- und Grünfiltern, die auch im

Rot und Ultrarot durchlässig sind, muß ein diese langwellige Strahlung absorbierendes Filter vorgeschaltet werden (vgl. z. B. Nr. 1), oder es muß ein Photoelement mit geringer Rotempfindlichkeit benützt werden, da sonst der mitgemessene Rotanteil starke Verfälschungen verursachen kann.

Für Untersuchungen, wo nicht eine so starke Unterteilung des Bereiches notwendig ist, wird man am ehesten die Filterkombinationen Nr. 2, 3, 4, 5 und 7 der Tabelle 5 benützen. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß auch vor die Farbfilter stets noch ein an der Oberfläche mattiertes Glas zu setzen ist, um die eindringende Strahlung diffus zu machen; andernfalls ist die Reflexion an der Vorderseite stark richtungsabhängig und dadurch ungleichmäßig. Auch hierfür empfiehlt sich das Platinopalglasfilter, sofern es nicht zu undurchlässig ist.

Mittlere Durchlässigkeit und Breite des Bereiches der einzelnen in den Tabellen 2 bis 5 angegebenen Filter und Filterkombinationen sind ganz ungleich [17]). Die mit diesen Filtern an den photoelektrischen Beleuchtungsmessern abgelesenen Werte sind infolgedessen für die verschiedenen Bereiche untereinander nicht vergleichbar; sie dürfen auch nicht etwa als Lux oder Kalorien angesehen werden, sondern lediglich als Relativzahlen, deren Vergleichseinheit nur für jeden einzelnen Bereich einigermaßen konstant ist. Filtermessungen vor Photoelementen können demnach nur zur Untersuchung zeitlicher oder örtlicher Unterschiede innerhalb der einzelnen Bereiche benutzt werden. Einzig eine kalorische Eichung in Filterbereichen, bei der sowohl Photoelement wie kalorimetrisches Aktinometer hinter demselben Filter gemessen werden, gibt die Möglichkeit, die Resultate der Filtermessungen mit geringem Fehler in Kalorien auszudrücken.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß die Sperrschichtphotoelemente für manche Probleme meteorologischer Strahlungsmessungen sich vorzüglich eignen; dabei zeichnen sich die Selenphotoelemente vor den Kupferoxydulzellen durch größere Empfindlichkeit, geringere Temperaturabhängigkeit und geeigneteren Spektralbereich aus. Die in den ersten Jahren von einzelnen Forschern an Photoelementen gemachten schlechten Erfahrungen waren wohl hauptsächlich durch die Unkenntnis der Gefahren der Überbelichtung verursacht. Sorgt man durch geeignete Schwächung des auf die Vorder-

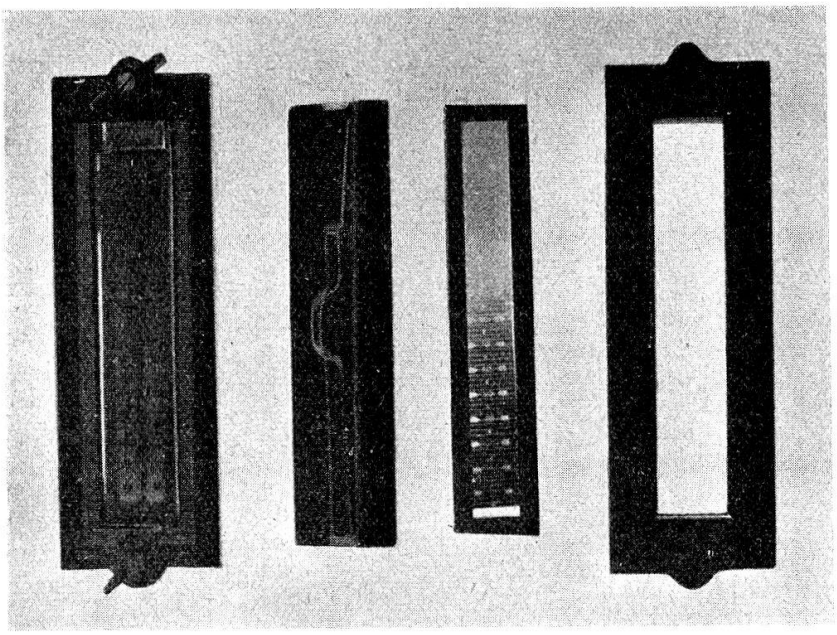
elektrode des Photoelementes auffallenden Lichtes dafür, daß dieses 1000 Lux nicht wesentlich übersteigt, so besteht alle Gewähr, daß Ermüdungserscheinungen nur in ganz unwesentlichem Maß auftreten können, und daß der erzeugte Photostrom der Beleuchtungsstärke proportional ist. Zur Schwächung des Lichtes müssen an der Vorderseite gerauhte Neutralfilter verwendet werden, am empfehlenswertesten ist das Platinopalglasfilter. Im übrigen scheint es, daß bei den heutigen Photoelementen Ermüdungserscheinungen und andere Störungen etwas geringer sind als bei den Sperrschichtzellen der ersten Jahre.

Bei Beobachtung der angeführten Vorsichtsmaßnahmen kann wohl damit gerechnet werden, daß bei einzelnen meteorologischen Strahlungsuntersuchungen die Ergebnisse von Selenphotoelementen innerhalb einer Fehlerbreite von einigen Prozenten als vergleichbar angesehen werden dürfen. Immerhin liegt eine kritische Überprüfung der Vergleichbarkeit unter den verschiedensten Strahlungsbedingungen und eine Kontrolle der Konstanz im Dauerbetrieb noch nicht vor; es dürfte sich deshalb empfehlen, bei größeren Untersuchungen mit einem Photoelement parallele Eichungen mit einem anderen Strahlungsmeßgerät und Stichproben mit einem nur selten benützten Photoelement anzustellen. Zur zunehmenden Verbreitung der Sperrschichtzellen werden auch ihre praktischen Vorzüge viel beitragen: sie sind sehr lichtempfindlich und doch robust und gut zu transportieren, wenig erschütterungsempfindlich, leicht zu handhaben und nicht sehr teuer; auch lassen sie sich für spezielle Untersuchungen leicht in besondere Montierungen einbauen.

Während die besprochenen Photoelemente nur Momentanwerte der Strahlung zu bestimmen gestatten, liefert das Graukeilphotometer (Abb. 16) Lichtsummen über längere Dauer (speziell Tagessummen). Bei diesem von Eder und Hecht[18]) angegebenen, von Dorno[19]) für strahlungsklimatologische Zwecke adaptierten Instrument fällt die Strahlung von Sonne und Himmel durch eine horizontale Milchglasscheibe und einen abgestuften und mit Skala versehenen Gelatinegraukeil auf lichtempfindliches Chlorsilberpapier. Die Schwärzung des Papiers hinter dem Keil reicht um so weiter, je stärker die Intensität und je länger die Dauer der Belichtung ist.

Das Photometerpapier wird bei schwachem Licht (in einer Dunkelkammer oder in beträchtlicher Entfernung einer künstlichen Licht-

quelle) in die Kassette eingelegt und unter gleichen Bedingungen wieder herausgenommen und weiterbehandelt; Vor- und Nachbelichtung sind unbedingt zu vermeiden. Das Papier wird direkt unter (bzw. in der umgekehrten Kassette auf) den Graukeil gelegt, wobei es zwecks Schärfe der Abbildung auf der Zelluloidskala aufliegt.



I *II* *III* *IV*

Abb. 16

Graukeilphotometer Eder-Hecht mit wasserdichter Metallkassette.
I geöffnete Kassette von hinten, mit Graukeil;
II Deckel der Rückseite;
III belichteter Photometerstreifen;
IV Kassette von oben.

Für klimatologische Messungen legt man das Graukeilphotometer gut horizontal; doch kann es für besondere Fragestellung in jeder beliebigen Lage exponiert werden. Um die Schattenwirkung des Kassettenrandes möglichst unschädlich zu machen, empfiehlt es sich, das Photometer in Ost-West-Richtung zu legen, damit ein eventueller Schattenwurf bei tiefen Sonnenständen auf die Enden der Skala fällt, die auf keinen Fall ausgewertet werden. Bei Schneefall kann das Instrument an der Vorderkante eines Gestells oder Tisches vertikal aufgestellt werden; was an diffuser Strahlung auf der Rückseite verloren geht, wird von der Reflexion des schneebedeckten Bodens

ersetzt, und mit gerichteter Sonnenstrahlung muß bei Schneefall normalerweise nicht gerechnet werden.

Da es vorkommen kann, daß bei starken Regenfällen Spritzwasser von unten her beim Kassettendeckel in die Kassette eindringt, empfiehlt es sich, die Kassette in beträchtlichem Abstand von eventuellen Spritzflächen über zwei Holzleisten zu legen. Das Eindringen von Wasser in die Kassette ist unbedingt zu vermeiden, da dadurch Keilmasse und Zelluloidskala geschädigt werden; auch geringe Feuchtigkeitsmengen verändern den Farbton des Photometerpapieres und nehmen ihm dadurch die Vergleichbarkeit.

Da die Dicke und damit die Schwärzung des Keiles linear mit dem Abstande von der Keilspitze und vom Nullpunkt der Skala anwächst, ist die Erstreckung der Schwärzung auf dem Photometerpapier oder auch der Abstand einer bestimmten Schwärzung vom Nullpunkt proportional dem Logarithmus der auffallenden Lichtmenge. Wird die aufgefallene Lichtmenge mit Q, die reziproke Papierempfindlichkeit (Bunsen-Relation) mit p, die Keilkonstante mit k und der am Graukeilstreifen abgelesene Skalenwert in Millimetern mit d bezeichnet, so ist in dekadischen Logarithmen

$$Q = p \cdot 10^{k \cdot d}$$

Dabei ist die Gültigkeit der photochemischen Reziprozitätsregel vorausgesetzt, wonach gleichen Lichtsummen, d. h. gleichen Produkten aus Lichtintensität und Belichtungszeit, dieselbe Schwärzung entspricht; diese Beziehung gilt jedoch streng nur für mittlere Schwärzungsgrade und nicht für die Schwärzungsschwelle. Ist I die momentane Lichtintensität und Q die während der Expositionszeit t auf das Photometer aufgefallene Lichtmenge, so ist nach der Reziprozitätsregel $Q = I \cdot t$; kann die Lichtintensität während der ganzen Expositionsdauer als konstant angesehen werden, so läßt sich aus den Angaben des Graukeilphotometers auch die mittlere Intensität

$$I = \frac{p \cdot 10^{k \cdot d}}{t}$$

berechnen.

Die Werte von Q, I und p sind zunächst nur relative Einheiten; sie beziehen sich auf die Empfindlichkeit Bunsenschen Normalpapieres

und der Faktor p gibt an, womit die rohen Relativwerte zur Umrechnung auf Bunsen-Einheiten zu multiplizieren sind. Nach Dorno [19]) wurde, speziell für klimatologische Vergleichsmessungen, am Observatorium Davos an jeder Papierlieferung eine Eichkonstante bestimmt, um die die abgelesenen Skalengrade zwecks Vergleichung mit einem früher benutzten, seither zum Standard erklärten Papiere zu erhöhen, bzw. zu erniedrigen sind; diese Davoser Korrektion ist somit als additive Größe an den abgelesenen Skalengraden anzubringen, die Bunsen-Relation p dagegen als Faktor an den unkorrigierten Lichtsummen.

Die Keilkonstante k ist definiert als prozentuale Dichtezunahme pro Zentimeter Keillänge; sie ist für den ganzen Keil konstant und stellt ein Maß für seine Lichtdurchlässigkeit dar. Im Handel durch die Firma Herlango in Wien, sind vornehmlich Keile mit drei verschiedenen Konstanten. In der Milchglaskassette werden für eintägige Lichtsummen Keile mit der Konstante 0,305, für solche von Stundendauer oder sehr geringer Intensität Keile mit der Konstante 0,188 und für mehrtägige Summen Keile mit der Konstante 0,401 verwendet. Momentanwerte der Lichtintensität können mit den durchlässigsten Keilen ohne Milchglas schon in Bruchteilen einer Minute erhalten werden.

Die untersten und die obersten Bereiche der Skala sind womöglich zu vermeiden, die unteren wegen schlechter Definition und unsicherer Ablesung, die oberen wegen sehr geringer Unterschiedsempfindlichkeit; auch können die beiden Enden der Skala unter Umständen Beschattungsfehlern durch den Kassettenrand unterliegen. Da die Vergleichbarkeit der verschiedenen Stellen durch Zahlen und Marken etwas beeinträchtigt ist, ist eine neue Zeichnung der Skala in Vorbereitung, auf der die Striche und Zahlen auf die Randpartien beschränkt sind und der mittlere Streifen nur die Schwärzung zeigt.

Für Vergleichsmessungen bedürfen auch die Photometer selbst einer Standardisierung, um speziell die Unterschiede in der Lichtdurchlässigkeit der Milchgläser zu eliminieren. Solche Photometereichungen werden am Observatorium Davos durchgeführt und Korrekturgrößen zur Umrechnung auf Davoser Standard bestimmt, der durch mehrere Graukeilphotometer mit der Keilkonstante 0,305 repräsentiert wird. Die Korrektur besteht für Photometer der gleichen Keilkonstante in einer additiven Konstante, die an den abge-

lesenen Skalengraden anzubringen ist; für Photometer anderer Keilkonstanten ist eine variable Korrekturgröße erforderlich.

Die abgelesenen Skalengrade sind unter sich nicht linear vergleichbar, da sie durch eine logarithmische Relation miteinander verknüpft sind. Sie müssen vielmehr nach der oben angegebenen Formel in relative Lichtsummen Q umgewandelt werden. Einfacher ist die Benutzung von Umrechnungstabellen wie sie beim Bezug von Graukeilphotometern mitgeliefert werden.

Im bisher geübten Verfahren werden die belichteten Streifen in einem Tonfixierbad fixiert, und hernach wird im diffusen Tageslicht abgelesen, bis zu welchem Skalenteil die letzte Schwärzungsspur geht; auf Grund der Keilkonstanten lassen sich daraus relative Lichtsummen in einem willkürlichen Maße berechnen. Um die Vergleichbarkeit der Resultate verschiedener Beobachtungen zu sichern, werden Photometer und Papier am Observatorium Davos einer Vergleichung mit einem Standard unterworfen.

Nach Dornos [19]) sorgfältiger Kritik muß bei dieser Methode mit einer Unsicherheit der Tagessummen von $\pm$ 20 % gerechnet werden. Eingehende Untersuchungen von Hecht und Mörikofer [20]) haben demgegenüber ergeben, daß zwar unter besonders günstigen Umständen diese Fehlergrenze eingehalten werden kann, daß jedoch bei nicht strikter Einhaltung aller Auswertungsvorschriften und speziell bei Bearbeitung der Photometerstreifen durch verschiedene Beobachter der mittlere Fehler mit Leichtigkeit auf $\pm$ 50 % anwachsen kann. Die Hauptfehlerquelle liegt dabei im Tonfixierbad; in diesem geht die Schwärzung der Streifen zurück, doch ist dieser Rückgang nicht konstant, sondern in hohem Maße abhängig von Zusammensetzung, Konzentration, Alter und Temperatur des Tonfixierbades wie auch vom Schwärzungsbereich selbst. Eine systematische Untersuchung der Ablesegenauigkeit durch die genannten zwei Autoren [21]) hat dagegen ergeben, daß den Ablesefehlern selbst keine so große Bedeutung zugeschrieben werden muß.

Aus den Untersuchungen von Hecht und Mörikofer [20]) ergibt sich die Möglichkeit einer ganz bedeutenden Verbesserung der Graukeilphotometermethode, so daß sie sich zu einem zuverlässigen Hilfsmittel der biologischen Strahlungsforschung entwickeln dürfte. Diese Verbesserung beruht in einer Abänderung der Auswertungsvorschrif-

ten, wofür die Grundlage bereits sichergestellt, die praktischen Einzelheiten zur Zeit jedoch noch nicht festgelegt sind. Bei diesem neuen Verfahren werden die Photometerstreifen nicht im Tonfixierbad behandelt, sondern unfixiert in einer von Prof. O. Krumpel (vgl. [1]) oder [20]) vorgeschlagenen normierten Ablesevorrichtung mit grüner Beleuchtung in der Dunkelkammer abgelesen.

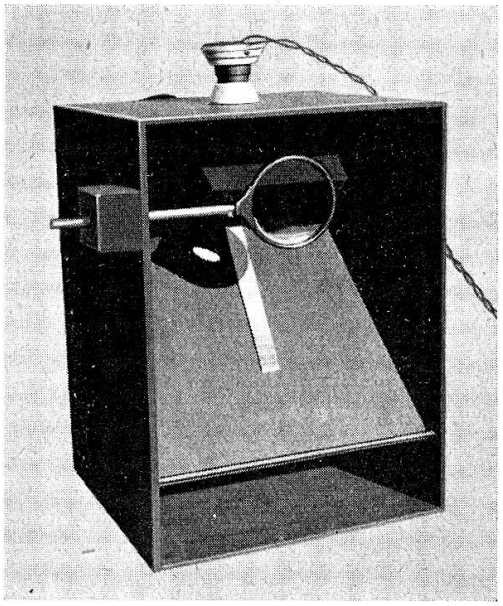


Abb. 17

Ablesevorrichtung für Graukeilphotometerstreifen nach O. Krumpel.

Diese Ablesevorrichtung besteht aus einem transportablen Sperrholzkasten (Abb. 17 und 18), den man sich am besten nach den Maßen der Abb. 18 vom Schreiner machen läßt. Er hat eine Breite und eine Tiefe von etwa 30 cm, eine Höhe von 40 cm und ist dunkel gestrichen. Der nach vorn offene Innenraum des Kastens ist durch zwei schräg stehende Brettchen *A* und *B* unterteilt. Oberhalb *B* ist in einem abgeschlossenen Raume eine gewöhnliche matte Glühlampe *G* von 40 Watt mit ihrer Fassung lichtdicht im Deckel des Kastens eingebaut. In der Mitte der Wand *B* befindet sich eine rechteckige Öffnung von zirka 9×12 cm², vor der ein Einschieberahmen *R* für das aufzunehmende Lichtfilter *F* von gleicher Größe angebracht ist.

Die Photometerstreifen werden zur Ablesung in vertikaler Richtung mit dem helleren Teile nach oben auf das Brettchen *A* gelegt. Die Verwendung der Leselupe *L* richtet sich nach dem subjektiven

Gutdünken des Ablesers; die objektive Genauigkeit wird durch diese kaum stark beeinflußt. Nach Krumpel verwendet man ein grünes Farbgelatinefilter, das die bräunliche Färbung der Photometerstreifen grau erscheinen läßt und gleichzeitig das Papier vor Nachbelichtung schützt. Solche Filter können bei der Firma Herlango in Wien bezogen werden. Zur Selbstherstellung löst man 1 g Patentblau und 2,2 g Tatrazin in 700 cm³ einer 7 %igen wässerigen Gelatinelösung; diese Lösung wird in einer Menge von 7 cm³ pro 1 dm² auf eine Glasplatte aufgegossen.

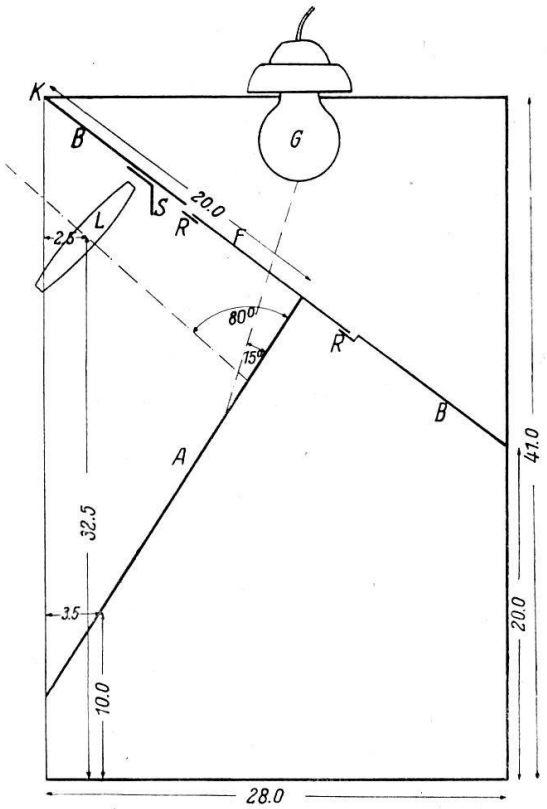


Abb. 18

Konstruktionszeichnung für die Ablesevorrichtung nach O. Krumpel. (1/6 natürlicher Größe, alle Maße in cm.)

Da beim Ablesen der Streifen in der Dunkelkammer die Augen verhältnismäßig rasch ermüden, sollte man womöglich nicht wesentlich mehr als 30 Streifen in einer zusammenhängenden Reihe ablesen; sonst werden die Resultate unsicher. Andrerseits ist es auch notwendig, nach Betreten der Dunkelkammer die Augen einige Minuten an das Dunkel und das grüne Licht adaptieren zu lassen.

Neben der Vermeidung der durch das Fixieren hervorgerufenen Fehler haben die Untersuchungen von Hecht und Mörikofer [20]) noch eine weitere Verbesserung der Graukeilphotometermethode zur Folge. Bisher wurde die letzte Schwelle der Schwärzung abgelesen; doch hat sich nun gezeigt, daß diese nicht nur visuell schwer und unsicher zu erfassen, sondern auch photochemisch keine eindeutige Funktion der Lichtsumme ist. Beim neuen Verfahren der Tonwertablesung wird dagegen bestimmt, bei welchem Skalengrad ein bestimmter, durch einen Normton repräsentierter Schwärzungstonwert liegt. Als relativen Normton für eine begrenzte Vergleichsserie kann man willkürlich einen geeigneten Tonwert (etwa 35 bis 40 Skalenteile unterhalb des Schwellenwertes) festlegen und auf einem oder mehreren Streifen markieren. Die Schaffung eines lichtunempfindlichen, jederzeit reproduzierbaren Normtones ist in Vorbereitung. Ablesungen an der Schwärzungsschwelle und bei einem bestimmten Tonwert sind unter sich natürlich nicht vergleichbar, da sie sich auf verschiedene Stellen beziehen.

Die Vorzüge der Tonwertablesung bestehen nun darin, daß die subjektive Ablesegenauigkeit bei der Vergleichung von Farbtönen bedeutend sicherer und genauer ist als bei der Ablesung von Schwellenwerten, daß aber auch gleichzeitig zwischen der Lichtsumme und dem erzeugten Tonwert eine enge funktionelle Beziehung besteht, so daß bei der Vergleichung von Schwärzungsgraden genauere Meßergebnisse resultieren als bei der Ablesung von Schwellenwerten. Schließlich wird auch der spektrale Empfindlichkeitsbereich des verwendeten Spezialpapieres, eines Chlorsilber-Zelloidin-Papieres, durch den Übergang von der Schwellenwert- zur Tonwertablesung in einer Weise verschoben, daß die Resultate viel allgemeinere Bedeutung beanspruchen können. Während nämlich für unbelichtetes Chlorsilberpapier, wie es der Schwellenwertablesung entspricht, gemäß Abb. 15 *S* der spektrale Empfindlichkeitsbereich nur von 360 bis 410 mμ reicht, sich also über ein Gebiet erstreckt, dem die biologische Forschung kein außergewöhnliches Interesse zuerkennt, dehnt sich die Empfindlichkeit für vorbelichtetes Chlorsilber, wie es der Tonwertablesung zu Grunde liegt, gemäß Abb. 15 *T* über das ganze sichtbare Spektrum aus und zeigt, ähnlich dem menschlichen Auge, besonders starke Wirkung im Gelb und Grün. Durch diesen Umstand wird das Graukeilphotometer, das bei der Schwellenwertmethode ausschließlich den

violetten und benachbarten ultravioletten Bereich mißt, bei der Tonwertablesung für das ganze sichtbare Gebiet empfindlich. Damit gewinnt man mit der Tonwertablesung ein zwar zunächst relatives, aber viel genaueres Vergleichsmaß für die Gesamtenergie der Sonnen- und Himmelsstrahlung. Aus allen angeführten Gründen sollte die bisher geübte Schwellenwertmethode in Zukunft unbedingt verlassen und ausschließlich die Tonwertablesung an unfixierten Streifen in der Krumpelschen Ablesevorrichtung benutzt werden. Auf Grund unserer Prüfungen scheint es, daß bei dieser verbesserten Graukeilphotometermethode die Unsicherheit der relativen Lichtsummen auf weniger als ± 10 % herabgedrückt ist. Wir sind noch einen Schritt weiter gegangen und haben durch Vergleich mit kalorimetrischen Methoden eine Eichung des Graukeilphotometers in Kalorien vorgenommen. Diese Erweiterung wird dadurch ermöglicht, daß für Tonwertablesungen der Empfindlichkeitsbereich über das ganze sichtbare Spektrum ausgedehnt wird. In der Tat bleiben auch die Fehler der mit dem Graukeilphotometer bestimmten Strahlungssummen in Kalorien kleiner als ± 10 %. Dieses günstige Ergebnis erklärt sich wohl daraus, daß die im Laufe des Tages bestimmt auftretenden Schwankungen der Relation zwischen relativen Lichtmengen und Kalorien durch die Integration über den ganzen Tag weitgehend ausgeglichen werden; auch für verschiedene Jahreszeiten und verschiedene Witterung konnte kein deutlicher Unterschied im Kalorienwert der Lichtsummen gefunden werden.

Im Vorangehenden wurde gezeigt, daß nach unseren Erfahrungen auch Instrumente, die im Grunde genommen nur mit selektivem Empfindlichkeitsbereich arbeiten, durch Vergleich mit kalorimetrischen Methoden in Kalorien geeicht werden können und dann Energiewerte in absolutem Maße zu liefern vermögen. Als Hilfsmittel bei biologischen Strahlungsuntersuchungen, wo ein mittlerer Fehler der Resultate von ± 10 % noch keineswegs störend wirkt, dürfte dieses Verfahren, das in der Literatur wohl noch nirgends beschrieben ist, vorzügliche Dienste leisten. Es muß hier jedoch betont werden, daß ein solches Vorgehen bei Untersuchungen, wo auf große Genauigkeit der Resultate Wert gelegt wird, nicht angewendet werden darf. Da sich die Empfindlichkeitsbereiche der selektiven und der kalorimetrischen Methoden nicht decken, kann wegen der im Tages-, Jahres- und Witterungsverlauf erfolgenden Variationen der spektralen Zu-

sammensetzung der Strahlung die Relation der Ergebnisse beider Methoden unmöglich konstant sein. Die Erfahrung lehrt lediglich, daß die Schwankungen dieser Relation sich in solchen Grenzen halten, daß die Fehler der nach einem solchen Verfahren bestimmten Kalorienwerte ± 10 % nicht übersteigen.

Neben den sehr viel zuverlässigeren heute zur Verfügung stehenden Lichtmeßmethoden kann der von Wiesner vor der Jahrhundertwende angegebene Handinsolator, der seinerzeit in Biologenkreisen weite Verbreitung gefunden hat, kein Interesse mehr beanspruchen. Infolge der Schwierigkeit der Selbstherstellung gleichmäßiger lichtempfindlicher Papiere und der Schätzung einer Farbgleichheit innerhalb Bruchteilen einer Sekunde bei gleichzeitiger Belichtung können große Fehler nicht vermieden werden, und Rübel und Dorno vertreten auf Grund eigener Versuche die Ansicht, daß die Ablesungen verschiedener Personen an verschiedenen Papieren und in verschiedenen Klimaten leicht bis zu 100 % differieren können.

6. Methoden zur Messung der Ultraviolettstrahlung von Sonne und Himmel.

Bei den intensiven spezifischen Wirkungen, die das kurzwellige Ultraviolett des Bereiches um 300 mμ ausübt, besteht bei biologischen Strahlungsuntersuchungen ein starkes Bedürfnis, die Intensität in diesem Spektralbereich gesondert zu messen. Es sind deshalb auch eine ganze Reihe Methoden zur Messung dieser Strahlung entwickelt worden; doch können nur wenige davon dem Mediziner und dem Biologen empfohlen werden. Eine grundsätzliche Schwierigkeit besteht in diesem Spektralgebiet schon darin, daß es an der äußersten Grenze des Sonnen- und Himmelsultravioletts liegt, wo die Variationen der Intensität und der Erstreckung im Tagesverlauf eine große Rolle spielen; dadurch erfährt der Schwerpunkt des spektralen Wirkungsbereiches Verschiebungen, die die Vergleichbarkeit der verschiedenen Messungen in Frage stellen können; besonders empfindlich kann die Unsicherheit werden, wenn sich der Empfindlichkeitsbereich des Instrumentes nicht mit dem Spektralbereich der zu untersuchenden biologischen Wirkung deckt.

Das physikalisch einwandfreieste Verfahren zur Ultraviolettmessung besteht in einer Intensitätsmessung an spektral zerlegter

Strahlung; diese setzt allerdings gute physikalische Spezialkenntnisse voraus und erfordert viel Zeit und große Hilfsmittel. Daneben dürfte die photoelektrische Kadmiumzelle, speziell in der Ausführung der Firma Günther & Tegetmeyer in Braunschweig, die sicherste Methode zur Messung des kurzwelligen Ultravioletts sein; ihre Handhabung erfordert jedoch manche physikalische Vorsichtsmaßnahmen, die Deutung ihrer Ergebnisse viel Kritik. Wenngleich heute die Möglichkeit einer willkürlichen Fixierung des Empfindlichkeitsbereiches und damit auch die Erleichterung einer Standardisierung gegeben erscheint, so wird die Kadmiumzelle als Meßinstrument in der Hand des Biologen oder des Mediziners nur ausnahmsweise in Frage kommen. Bei den Registrier- und Integrationsinstrumenten „Mekapion" und „Lumitron" sind die Schwierigkeiten der Handhabung durch eine Verstärkeranordnung mit selbsttätiger Registrierung bzw. Summierung weitgehend behoben; dafür ist die Unsicherheit der Deutung durch Undefiniertheit der Montierung noch vermehrt.

Ultraviolettes Licht übt auf manche organische Substanzen eine photochemische Wirkung aus, die sich teils in Verfärbung, teils in Ausbleichung der ursprünglichen Farbe zu erkennen gibt. Solche Prozesse sind vielfach zur Konstruktion photochemischer Photometer für Ultraviolett benutzt worden, leider meist ohne die notwendige Kritik. Diese Vorgänge werden neben der Strahlung vielfach noch von anderen Faktoren beeinflußt, deren wichtigster die Temperatur ist; so täuschen solche Methoden bei hoher Temperatur stets größere Ultraviolettintensitäten vor. Kritische Ausführungen über einige dieser photochemischen Methoden sind zu finden bei Mayerson [22]), Mörikofer [1]), und bei Hebekerl und Noethling [23]).

Von diesen photochemischen Verfahren zur Messung der Ultraviolettstrahlung von Sonne und Himmel hat einzig das UV-Dosimeter von Frankenburger und Weyde [24, 25, 26]) einen Entwicklungsstand erreicht, der seine Empfehlung rechtfertigt. Allerdings hat auch dieses Instrument im Anfangsstadium manche Mängel gezeigt (unrichtige Bestimmung der Temperaturabhängigkeit, ungeeignetes Material für die Teströhrchen usw.), die das Vertrauen in das Instrument erschüttert haben und mehrfache grundlegende Konstruktionsänderungen erforderlich machten. Das jetzige Modell des bioklimatischen und des medizinischen UV-Dosimeters von 1936 scheint jedoch nach den bisherigen Überprüfungen die Möglichkeit

zu geben, Momentanwerte der Ultraviolettstrahlung von Sonne und Himmel mit einer Genauigkeit von ± 10 bis 20 % zu messen. Angesichts der großen, 100 % gelegentlich übersteigenden Variationen der Ultraviolettstrahlung im Tages- und Jahresverlauf wird ein solcher Genauigkeitsgrad für biologische Strahlungsuntersuchungen und für bioklimatische Messungen wohl meist genügen.

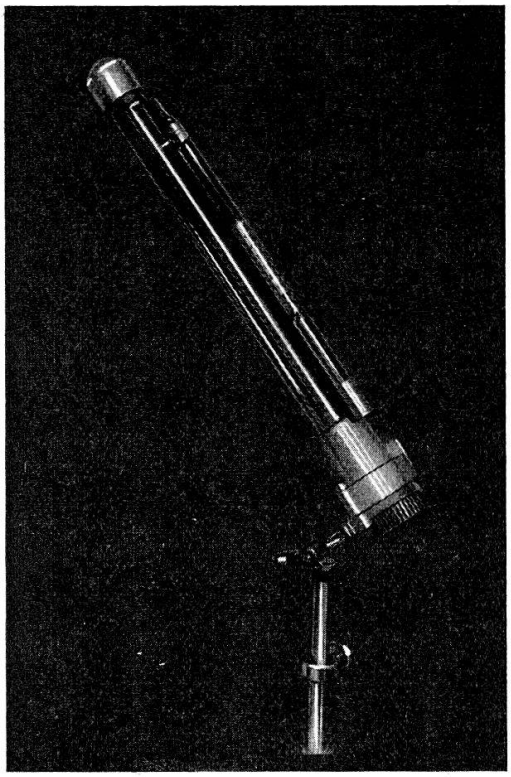


Abb. 19

Bioklimatisches UV-Dosimeter.

Beim jetzigen von der Firma F. und M. Lautenschläger in München vertriebenen Modell des UV-Dosimeters (Abb. 19) wird in einem Quarzröhrchen die Leukosulfitverbindung des Fuchsins als Testlösung exponiert; bei Ultraviolettbestrahlung tritt Rotfärbung dieser Lösung ein, deren Betrag man mit Hilfe verschieden dunkler Grünfilter kompensiert. Aus der Nummer des Kompensationsfilters und der Zeitdauer der Exposition läßt sich die Ultraviolettintensität in relativen Einheiten berechnen; dabei ist auch noch eine Korrektion für die Temperatur anzubringen, die an einem Thermometer in einem

zweiten Röhrchen des Instrumentes (Abb. 19) abgelesen werden kann. Die Rotfärbung bildet sich im Dunkeln wieder vollkommen zurück, so daß mit einer einmaligen Testlösung über 500 Messungen vorgenommen werden können; nachher tritt Gelbwerden der Lösung ein, was ein Ersetzen des Teströhrchens erforderlich macht.

Die Exposition des Teströhrchens hat während einer genau fixierten Dauer zu erfolgen. Dies kann je nach der Ultraviolettintensität 30 Sekunden, 60 Sekunden, 3 Minuten oder 5 Minuten betragen. Die kolorimetrische Ablesung hat möglichst genau 20 Sekunden nach Ende der Belichtung stattzufinden. Da im Dunkeln sofort ein Rückgang der Färbung einsetzt, das Auge sich jedoch andrerseits an das Dunkel des Gesichtsfeldes gewöhnen muß, ist genaue Einhaltung dieser 20 Sekunden notwendig. Die vollkommene Entfärbung der Testlösung beansprucht praktisch höchstens 20 Minuten. Die Ablesung erfolgt auf ganze und womöglich fünftel Skalenteile; um die Schätzung zu erleichtern, ist in der Mitte des Gesichtsfeldes ein mit Null bezeichnetes Vergleichsgrau angebracht. Die Farbbestimmung soll gegen diffuses Tageslicht erfolgen, da künstliche Lichtquellen falsche Rötungsgrade vortäuschen. Ferner sind die Augen vor der Ablesung vor jeder Blendung zu schützen, da man sonst viel zu hohe Werte abliest.

Zur Berechnung der Ultraviolettintensität in relativem Maß dienen spezielle Berechnungstabellen, die mit dem Instrument bezogen werden. In diesen kann man je nach der Expositionsdauer aus dem abgelesenen Rötungsgrad und unter Berücksichtigung der Temperatur der Testlösung die Ultraviolettintensität in relativen Einheiten ablesen.

Bei der Exposition ist darauf zu achten, daß die Orientierung des Instrumentes stets eindeutig und gleichmäßig erfolgt, damit die Resultate vergleichbar sind. Entsprechend dem klimatologischen Verwendungszweck des bioklimatischen UV-Dosimeters wird man im allgemeinen die von Sonne und Himmel einfallende ultraviolette Globalstrahlung zusammen messen; gelegentlich kann dazu auch noch die Reflexstrahlung kommen. In diesem Falle empfiehlt es sich, das Instrument horizontal zu lagern, daß es von der Strahlung der Sonne senkrecht getroffen wird, seine Längsrichtung somit senkrecht zum Sonnenazimut steht. Will man nur die Sonnen- und die Himmels-

strahlung messen, so legt man das Instrument am besten auf ein dunkles Tuch. Soll jedoch auch die Reflexstrahlung einbezogen werden, so kann man das UV-Dosimeter entweder mit ausgestrecktem Arm horizontal möglichst weit vom Körper weghalten oder in einem Stativ befestigen.

Der spektrale Empfindlichkeitsbereich des UV-Dosimeters ist der Erythemkurve der menschlichen Haut weitgehend angeglichen; zu Messungen des Ultravioletts künstlicher Strahlungsquellen muß allerdings ein Überfangrohr aus Uviolglas über das Instrument geschoben werden. Für vergleichende Ultraviolettmessungen mit UV-Dosimetern ist wegen der etwas ungleichen Empfindlichkeit eine vorherige Standardisierung der einzelnen Instrumente vorzunehmen. Während gegenüber den älteren Modellen des UV-Dosimeters und den damit gewonnenen Resultaten wegen der früheren instrumentellen Mängel (vgl. hierüber Mörikofer [1]) Vorsicht geboten ist, scheint das handliche und nicht kostspielige Instrument sich jetzt zu einem wertvollen Hilfsmittel der biologischen Strahlungsforschung entwickelt zu haben.

Zusammenfassung.

Es wird ein Überblick über einige, vor allem neuere Methoden zur Messung der Strahlung von Sonne und Himmel gegeben, die sich auf Grund ihrer Einfachheit und nicht zu großer Kosten als Hilfsmittel bei biologischen Strahlungsuntersuchungen eignen. Als Fehlergrenze, die bei solchen Untersuchungen noch zugelassen sein soll, wird $\pm$ 10 % angenommen. Es wird auf die Wichtigkeit von Instrumenten mit selbsttätiger Summation von Strahlungssummen für längere Bestrahlungsuntersuchungen hingewiesen, sowie auf die Notwendigkeit, neben der direkten Sonnenstrahlung auch der diffusen Himmelsstrahlung Rechnung zu tragen. Zur Bestimmung von Momentanwerten der Einstrahlung von Sonne und Himmel werden das Sperrschichtelement, das Doppelthermometer in gemeinsamer Glasumhüllung, thermoelektrische Pyranometer und Solarimeter, für Ultraviolettstrahlung das UV-Dosimeter empfohlen; zur Messung von Tagessummen der Strahlung eignen sich der Bimetallaktinograph, das Destillationsluzimeter, das Graukeilphotometer, sowie das Solarimeter in Kombination mit einem Milliamperestundenzähler.

Literatur.

1. W. Mörikofer: Meteorologische Strahlungsmeßmethoden. Abderhaldens Handb. biolog. Arbeitsmeth. Abt. II, Teil 3, S. 4005–4245 (1939).
2. L. Gorczynski: Meteorol. Zeitschr. **44,** 5 (1927); Ann. Off. Météorol. Nice **2** (1934); Meteorol. Magaz. **71,** 1 (1936).
3. L. Gorczynski: Month. Weath. Rev. **52,** 299 (1924); Rev. Opt. **3,** 473 (1924).
4. W. Mörikofer und Chr. Thams: Meteorol. Zeitschr. **53,** 22 (1936).
5. F. Albrecht: Tätigkeitsber. preuss. met. Inst. **1927,** 127.
6. W. Mörikofer: Sitzungsprot. Int. Komm. f. Landwirtsch. Meteorol. Salzburg **1937,** 90; Verh. Schweiz. Naturforsch. Ges. Chur **1938,** 133.
7. A. Henry: La Météorol. **1926,** 497.
8. M. Robitzsch: Gerl. Beitr. Geophys. **35,** 387 (1932).
9. W. Mörikofer und Chr. Thams: Meteorol. Zeitschr. **53,** 409 (1936).
10. W. Mörikofer und Chr. Thams: Meteorol. Zeitschr. **54,** 360 (1937).
11. F. Linke: Bioklimat. Beibl. Meteorol. Zeitschr. **1,** 171 (1934).
12. B. Lange: Die Photoelemente und ihre Anwendung. 2 Teile. Leipzig (1936).
13. A. Dresler: Das Licht, **3,** 41 (1933).
14. A. Seybold: Ber. Deutsche Botan. Ges. **52,** 493 (1934).
15. A. Zeller: Ber. Deutsche Botan. Ges. **52,** 581 (1934).
16. F. Sauberer: Meteorol. Zeitschr. **55,** 250 (1938).
17. F. Sauberer und O. Eckel: Internat. Rev. Hydrobiol. und Hydrogr. **37,** 257 (1938).
18. W. Hecht: Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien. Abt. IIa, **127,** 2283 (1918).
19. C. Dorno: Meteorol. Zeitschr. **42,** 81 (1925); **44,** 369 (1927).
20. W. Hecht und W. Mörikofer: Meteorol. Zeitschr. **56,** 142, 186 (1939).
21. W. Hecht und W. Mörikofer: Photogr. Korresp. **73,** Nr. 11–12 (1937).
22. H. S. Mayerson: Amer. Journ. Hyg. **22,** 106 (1935).
23. W. Hebekerl und W. Noethling: Radiologica **1,** 73 (1937).
24. E. Weyde: Strahlentherapie **38,** 378 (1930).
25. W. Frankenburger: II. Congrès Internat. Lumière Copenhague **1932,** 513.
26. W. Frankenburger und H. Hammerschmid: Gerl. Beitr. Geophys. **53,** 88 (1938).
27. F. Prohaska: Bioklimat. Beibl. Meteorol. Zeitschr. **7** (1940). (Im Druck).