

Zeitschrift: Berichte der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft = Bulletin de la Société Botanique Suisse
Herausgeber: Schweizerische Botanische Gesellschaft
Band: 57 (1947)

Artikel: Das Kugelpyranometer Bellani : ein einfaches Strahlungsmessgerät für biologische und ökologische Untersuchungen
Autor: Prohaska, Fritz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-40546>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.02.2025

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

Das Kugelpyranometer Bellani

ein einfaches Strahlungsmeßgerät für biologische und ökologische Untersuchungen.

Von *Fritz Prohaska*.

(Aus dem Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos,
Direktor: Dr. W. Mörikofer.)

Eingegangen am 11. Januar 1947.

Einleitung.

Für die Vielfalt der Fragen, die von der Biologie an die Strahlungsforschung gestellt werden, gibt es nur wenige speziell geeignete Meßgeräte. In einer Monographie über die Strahlungsinstrumente im allgemeinen (1) sowie in einer Übersicht über die Meßmethoden, die sich im speziellen für biologische und ökologische Untersuchungen eignen (2), wurde vor wenigen Jahren von W. M ö r i k o f e r auch das Kugelpyranometer Bellani unter dem bisher üblichen Namen *Destillationsthermometer Bellani* beschrieben. Seither ist aber dieses Instrument am Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos einer eingehenden Prüfung unterzogen worden, und eine Theorie des Kugelpyranometers wurde erstmalig von H. W i e r z e j e w s k i aufgestellt (3), dessen Rat und Mitarbeit auch bei den experimentellen Untersuchungen eine große Hilfe war. Aus Theorie und Praxis ergaben sich nicht nur einige neue Gesichtspunkte für eine Weiterentwicklung des Instrumentes, sondern es wurde auch dadurch, daß man ein vollkommeneres Bild seiner Wirkungsweise aufstellen konnte, das Vertrauen in seine Brauchbarkeit und Konstanz gefestigt (4). Im Folgenden wird nun dieses einfache Strahlungsmeßgerät eingehend beschrieben und seine Handhabung erklärt. Ohne im Detail auf Theorie und Störungseinflüsse einzugehen, wird das Prinzip seiner Wirkungsweise dargelegt und die Genauigkeit angegeben, mit der man mit dem Kugelpyranometer die Summenwerte der Strahlung messen kann, die von *allen* Seiten während einer bestimmten Zeit dem Instrument zugestrahlt werden. Zudem ist es gelungen, das Kugelpyranometer, das bisher nur in Frankreich und in Deutschland hergestellt wurde, in der Schweiz herstellen zu lassen, wodurch auch die praktische Möglichkeit seiner Anwendung gegeben ist.

Das Kugelpyranometer unterscheidet sich in folgenden Punkten von den meisten Strahlungsmeßgeräten.

1. Zur Bestimmung der Energie der auffallenden Strahlung wird nicht wie üblich die *Temperaturerhöhung einer geschwärzten Fläche*,

sondern die Umwandlung von flüssigem in dampfförmigen Alkohol, also eine *Änderung des Aggregatzustandes* benützt.

2. Die *Auffangfläche* ist kugelförmig, so daß die von *allen Seiten* auffallende Strahlung, also auch die Reflexstrahlung des Bodens, gemessen werden kann. Die meisten andern Strahlungsmeßgeräte messen entweder nur die direkte Sonnenstrahlung oder die unter den verschiedensten Winkeln auf die Horizontalfläche fallende Strahlung von Sonne und Himmel, einschließlich der Reflexstrahlung von den Wolken. Doch gehen diese Strahlen, je nach ihrem Einfallwinkel, mit verschiedenem Gewicht in die Messung ein, während die kugelförmige Auffangfläche den Vorteil hat, daß die aus allen Richtungen kommenden Strahlen unter gleichem Winkel auffallen und daher unter gleichen Verhältnissen absorbiert und gemessen werden.

3. Bei Benützung des Kugelpyranometers bekommt man nicht Momentan-, sondern *Summenwerte* der kalorischen Einstrahlung, so daß man den Strahlungsgenuß während einer gewissen Zeitspanne direkt bestimmen kann.

Aus diesen Gründen ist das Kugelpyranometer in seinem Anwendungsgebiet ganz spezifisch und wird dort von großem Nutzen sein, wo die Kenntnis der während einer *bestimmten Zeit* von *allen* Seiten auf einen Körper (z. B. eine Pflanze, einen Menschen usw.) auffallenden Strahlung notwendig ist. Es sei noch hervorgehoben, daß bei derartigen Untersuchungen gerade die Strahlungsreflexion, die vom Erdboden und den Körpern der Umgebung kommt, unbedingt berücksichtigt werden muß, da sie unter Umständen beträchtliche Werte annehmen kann. In Tabelle 1 sind einige Zahlen angegeben, die als Anhaltspunkte für das Reflexionsvermögen verschiedener in der Natur vorkommender Oberflächen gelten können. Die Zahlen, die ein Maß für die sogenannte Albedo sind, besagen, wieviel Prozent der auffallenden Strahlung reflektiert werden.

Tabelle 1.

Albedo verschiedener Oberflächen.

Wald	5—18 %	Sand	12—50 %
Wasser	5—75 %	Wiese	17—32 %
Heide	10 %	Schnee, alt	40—80 %
Ackerboden	12—16 %	Schnee, neu	80—90 %
menschliche Haut	30—40 %		

Die großen Unterschiede im Reflexionsvermögen der einzelnen Oberflächen, die auch dem Auge als Flächen von verschiedener Helligkeit bekannt sind, kommen in Tabelle 1 gut zum Ausdruck, zeigen aber auch, wie wichtig es ist, diese Reflexstrahlung bei Betrachtung des Einflusses der Strahlung auf biologische Vorgänge in der Natur in Rechnung zu stellen.

Zur Messung der von allen Seiten kommenden Einstrahlung kommt außer dem Kugelpyranometer Bellani nur noch das Schwarzkugelthermometer, in neuerer Ausführung auch als Doppelthermometer konstruiert (5), in Betracht, mit dem man aber nur sehr ungenau ausgeglichene *Momentanwerte* messen kann (1, 2).

Beschreibung, Aufstellung und Bedienung.

Die heute gebräuchliche Form des Kugelpyranometers Bellani ist in Abbildung 1 dargestellt. Es ist ein Instrument, das ganz aus Glas hergestellt ist und ohne jegliche Hilfsapparatur arbeitet. Als Strahlungsempfänger dient die innere Kugel, die je nach der gewünschten Empfindlichkeit, in den bisherigen Ausführungen, aus blauem oder farblosem Glas geblasen und mit Äthylalkohol gefüllt ist. Zum Schutz gegen Wärmeverluste ist sie noch mit einer farblosen Hüllkugel umgeben und der Zwischenraum zwischen den beiden Kugeln evakuiert. Der Alkohol wird durch die in der Empfänger­kugel absorbierte Strahlungswärme langsam verdampft und kann durch ein innerhalb der Kugel über den Flüssigkeitsspiegel emporragendes enges Rohr nach unten in das weitere Meßrohr überdestillieren, wo er kondensiert. Die Dimensionen der bisher üblichen Instrumente sind ungefähr folgende: Gesamtlänge 45 cm, Durchmesser der Hüllkugel 7 cm, Durchmesser der Empfänger­kugel 4,5 cm, Länge des Rohres 38 cm, Teilung des Rohres in 34 cm^3 bei einer Unterteilung in $0,2 \text{ cm}^3$.

Für die *Aufstellung* des Kugelpyranometers benötigt man ein Stativ, an dem es senkrecht und die Kugel nach oben befestigt wird. Dabei ist es notwendig, das Instrument auf der Sonnenseite des Stativs, auf der nördlichen Hemisphäre somit an der Südseite, anzubringen, damit nicht sein Schatten während der Exposition auf das Instrument fällt und dadurch die Meßwerte fälscht. Das Stativ muß einerseits fest mit der Unterlage verbunden sein, um die Gefahr des direkten Einfließens des Alkohols von der Empfänger­kugel in das kalibrierte Rohr infolge von Erschütterungen zu vermeiden; daher muß es möglichst stabil sein und darf an seinem freien Ende keine Schwingungen ausführen können. Andererseits soll es so gebaut sein, daß es möglichst wenig Strahlung der Umgebung abhält oder selbst reflektiert. Am Davoser Observatorium haben sich als Stative Eisen- oder Antikorodalstäbe gut bewährt, die mit dem untern Ende fest an eine stabile Unterlage angeschraubt sind, während das obere, freie Ende, an dem das Instrument befestigt ist, mit Drähten verspannt wurde (Abbildung 2).

Große Sorgfalt ist auf die Wahl des Orts der Aufstellung zu verwenden. In erster Linie wird er natürlich von der Fragestellung abhängen, denn auf das Instrument soll möglichst nur diejenige Strahlung

fallen, die auch dem Untersuchungsobjekt zugestrahlt wird, dessen Strahlungsgenuß man kennen will. Dabei ist unbedingt zu vermeiden, daß das Kugelpyranometer in der Nähe von Flächen aufgestellt wird, die unerwünschte Reflex- oder langwellige Wärmestrahlung auf das Instrument gelangen lassen (weiße Hausmauern, Betonböden, Blechdächer usw.). Außerdem ist es notwendig, daß sich das Kugelpyranometer in seiner *ganzen* Länge in einheitlicher Lufttemperatur befindet,

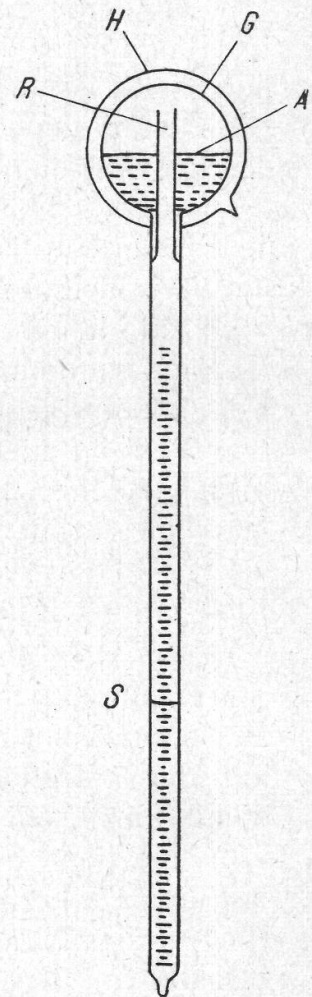
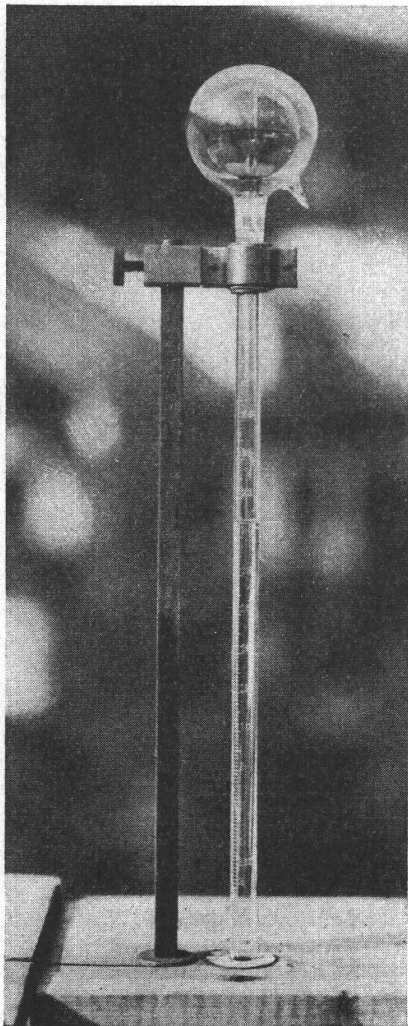


Abbildung 1.
Kugelpyranometer Bellani
($\frac{1}{6}$ natürlicher Größe).

- H = Hüllkugel
- A = Alkohol
- G = Empfängerkugel
- S = Meßrohr
- R = inneres Rohr.

aus Gründen, die wir später bei Erklärung seiner Wirkungsweise darlegen werden. Zu diesem Zweck ist es tunlichst an einem gut *ventilierten* Ort aufzustellen und nicht zu knapp über dem Erdboden oder gar in einer kleinen Mulde! Wegen der dort stagnierenden Luft entstehen nämlich in den untersten, dem Boden aufliegenden Luftschichten große vertikale Temperaturgradienten, die die Meßresultate stark fälschen können, weil das Rohr dann andern Abkühlungsverhältnissen unterliegt als die Hüllkugel, während Hüllkugel und Rohr gleiche äußere Bedingungen, d. h. vor allem gleiche Lufttemperatur, haben

müssen, da nur unter dieser Voraussetzung das Instrument einwandfrei arbeitet.

Will man die Strahlungsverhältnisse eines größeren Gebietes kennen, so muß für die Aufstellung ein Ort mit *möglichst freiem Horizont* gewählt und darauf gesehen werden, daß während der ganzen Expositionszeit oder Meßperiode keine Schatten von niederen Objekten wie Bäumen, Häusern usw. auf das Instrument fallen, da man sonst wieder nur den Strahlungsgenuß dieses ganz speziellen Aufstellungs-ortes bekommt, nicht dagegen allgemein gültige Werte. Da, wie erwähnt, das Kugelpyranometer ganz aus Glas und in sich abgeschlossen ist, kann es das ganze Jahr und bei jedem Wetter im Freien stehen, da Witterungseinflüsse nirgends am Instrument angreifen können.

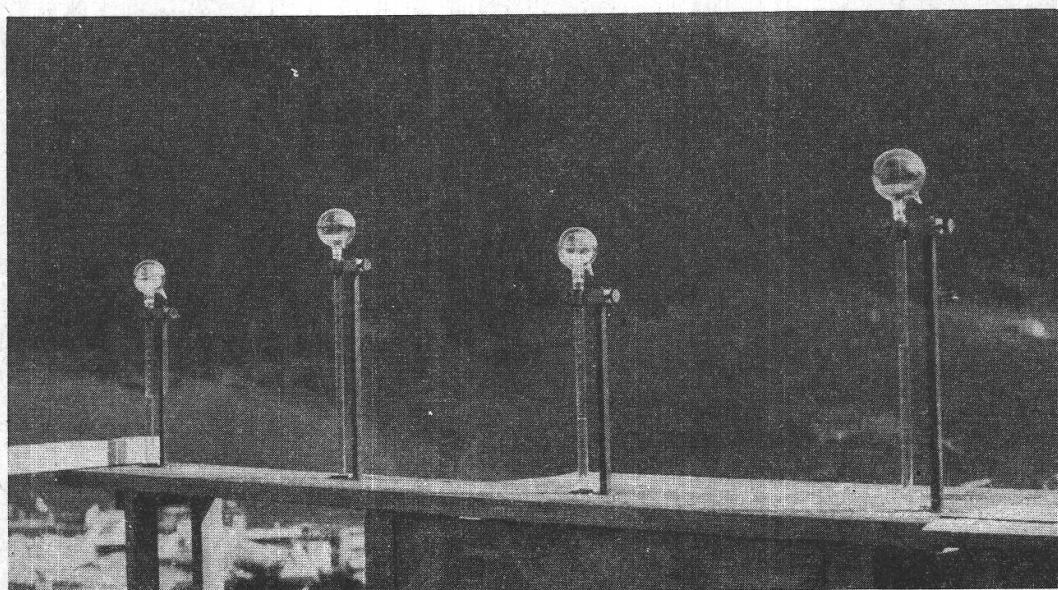


Abbildung 2.

Aufstellung der Kugelpyranometer auf dem Dach des Observatoriums in Davos.

Die *Bedienung* des Kugelpyranometers ist denkbar einfach. Nachdem das Instrument am Stativ befestigt ist, muß man nur so lange warten, bis der Alkohol, der durch die Erschütterungen bei der Aufstellung längs der Innenseite des Meßrohres hinunterfließt, sich unten gesammelt hat. Das dauert zirka zwei bis drei Minuten. Bei kurz dauernder Exposition (1 bis 2 Stunden) muß man vor der Anfangsablesung jedoch zirka 10 Minuten warten. Diese Zeit ist notwendig, damit sich eine stationäre Dampfströmung zwischen Kugel und Rohr einstellen kann. Es ist dies sozusagen eine « Anlaufzeit », die nur bei Messung von Strahlungssummen während eines kleinen Zeitintervalls zu berücksichtigen ist, da bei lang dauernder Exposition der Fehler, den man durch ihre Nichtberücksichtigung begeht, prozentual innerhalb der instrumentellen Ungenauigkeit liegt. Nach dieser Wartezeit liest man den

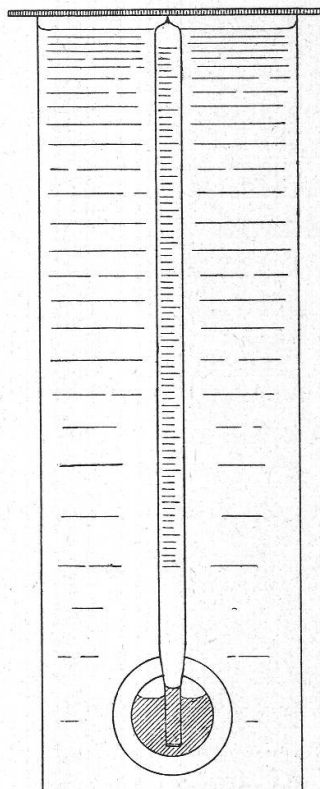
Alkoholstand im Rohr ab, der bei Beginn der Exposition zwischen 0 und 2 cm³ liegen soll. Die Ablesung geschieht auf $\frac{1}{10}$ cm³ genau, wobei zur Vermeidung von parallaktischen Fehlern die Augenhöhe so zu wählen ist, daß der kreisförmige Rand der konkaven Flüssigkeitsoberfläche als gerade Linie erscheint. Man liest dann die Höhe des mittleren, tiefsten Teiles der Flüssigkeitsoberfläche ab; es ist dies die Art, wie man im allgemeinen benetzende Flüssigkeiten in engen Rohren abliest. Sollten die Teilungsstriche wegen irgendwelcher Reflexstrahlung nicht gut sichtbar sein, so erleichtert man sich die Ablesung, wenn man ein Blatt weißen Papiere hinter das Rohr hält. — Nach der Endablesung, oder bei längeren Expositionsperioden nach einer Zwischenablesung, wenn die Alkoholsäule im Rohr schon so hoch steht, daß die Genauigkeit merklich abnimmt, wird das Instrument vom Stativ abgenommen und umgekehrt, damit der überdestillierte Alkohol aus dem Rohr wieder in die Kugel zurückfließen kann. Ist dies geschehen, so kann nach der oben erwähnten Wartezeit von zirka 2 Minuten eine neue Anfangsablesung vorgenommen werden. Bei Messung von Tagessummen der Einstrahlung macht man die Endablesung vorteilhaft erst nach Sonnenuntergang; die Strahlung ist dann so schwach, daß der Strahlungsverlust durch die Wartezeit bis zur nächsten Anfangsablesung nicht berücksichtigt werden muß. Bei starker Einstrahlung und blauer Innenkugel muß das Kugelpyranometer stets zweimal am Tage neu eingestellt werden, weil sonst der Meßbereich nicht ausreicht. Wenn die Sonne während der Zeit der Neueinstellung hinter Wolken steht, muß man den Verlust an Strahlung während dieser kurzen Wartezeit ebenso wie nach Sonnenuntergang nicht berücksichtigen. Dagegen muß bei Sonnenstrahlung der Anzahl cm³, die die Tagessumme repräsentieren, pro Minute Wartezeit je nach der Intensität der Strahlung zirka 0,05 bis 0,1 cm³ hinzugezählt werden. Ist die Kugel durch Bestrahlung stark erwärmt, gelingt es meist nicht, die gesamte Alkoholmenge durch einmaliges Umkehren in die Empfänger­kugel zurückzubringen. Das kommt daher, daß infolge der Überwärmung der Empfänger­kugel eine Dampfdruckdifferenz zwischen Kugel und Rohr besteht, die ein vollständiges Rückfließen des Alkohols verhindert. Um diese Differenz auszugleichen, muß der Temperaturunterschied zwischen Kugel und Rohr beseitigt werden. Dies wird entweder durch mehrmaliges Umschütten des Alkohols erreicht, oder durch Erwärmen des ganzen Rohres mit der bloßen Hand.

Kontrolle der zeitlichen Konstanz der Empfindlichkeit.

Da das Kugelpyranometer nach außen vollkommen abgeschlossen ist, kann es sich kaum durch äußere Einflüsse im Laufe der Zeit verändern. Die einzig mögliche Veränderung, die vor allem an Instru-

menten früherer Konstruktion vorkommt, besteht darin, daß sich dem Alkoholdampf mit der Zeit etwas Luft, die sich aus der Glaswandung des Rohres und der Innenkugel lösen kann, beimengt. Dadurch wird die Destillationsgeschwindigkeit und damit auch die Empfindlichkeit und Genauigkeit beeinträchtigt. Daher ist eine der wesentlichen Voraussetzungen für das verlässliche und einwandfreie Funktionieren des Kugelpyranometers Bellani, daß der Äthylalkohol in Empfänger­kugel und Rohr *keinerlei* Luftbeimengungen enthält. Man sollte daher ungefähr

Abbildung 3.
Das Kugelpyranometer im Wasserbad
bei der Prüfung auf Luftfreiheit.



einmal im Jahr eine Prüfung auf Luftfreiheit des Instrumentes vornehmen, um sich zu vergewissern, daß die Empfindlichkeit des Instrumentes sich nicht verändert hat und dieselbe wie bei seiner Eichung ist. Hierzu geht man folgendermaßen vor: Zuerst wird das Rohr einschließlich seines in die Empfänger­kugel hineinragenden Endes vollständig mit Alkohol gefüllt, damit sich die eventuell vorhandene Luft restlos in der Empfänger­kugel befindet. Durch geeignetes Schütteln oder starke Bestrahlung ist das leicht zu erreichen. Hierauf wird das Instrument vorsichtig umgedreht, damit der Alkohol aus dem Rohr in die Kugel fließt, ohne daß aber dabei Luft von der Kugel nach dem Rohr gelangen kann. In dieser Stellung, die Kugel nach unten, wird das ganze Instrument sodann in einen mit Wasser gefüllten Glaszylinder gebracht, in welchen auch das Rohr vollständig eintauchen soll (Abbildung 3). (Um

das Herausspringen des Instrumentes aus dem Wasserbad wegen des starken Auftriebes zu verhindern, muß auf den Zylinder ein Deckel gelegt werden.) Man läßt nun das Instrument, vor Strahlung geschützt, am besten in einem dunklen Zimmer, eine gewisse Zeit im Wasserbad stehen, bis alle seine Teile gleiche Temperatur angenommen haben, was in längstens einer Stunde erreicht ist. Dann vergleicht man, *ohne* das Instrument aus dem Wasserbad herauszunehmen, den Alkoholstand in Kugel und Rohr. Wenn sich eine Luftbeimengung im Alkoholdampf befindet, so übt diese einen zusätzlichen Druck auf die Flüssigkeitsoberfläche in der Kugel aus, so daß der Alkohol im Rohr emporsteigt. Wegen der Kapillarkräfte steht allerdings auch bei guter Luftfreiheit das Flüssigkeitsniveau im engen Rohr um einige Millimeter höher als in der Kugel. Sind dagegen Beimengungen von Luft in der Kugel, so drücken sie den Alkohol merkbar in das Rohr. Die Grenze, bis zu der noch ein gutes Arbeiten des Instrumentes möglich ist, d. h. die maximale Niveaudifferenz der Alkoholoberflächen im Rohr und in der Kugel soll nicht größer sein als zirka 17 mm, was einem Partialdruck der Luft im Alkoholdampf von ungefähr 1 mm Quecksilber entspricht. Luftbeimengungen, die einen größeren Druck auf die Oberfläche ausüben, machen das Instrument unbrauchbar. In diesem Fall muß es neu mit luftfreiem Alkohol gefüllt und geeicht werden.

Wirkungsweise des Kugelpyranometers Bellani.

Bevor wir nun dazu übergehen, die Umrechnung der abgelesenen cm^3 Alkohol in gcal/cm^2 , die Einheiten der Strahlungsenergie, zu besprechen, wollen wir die Beziehung betrachten, die zwischen der auffallenden Strahlung und der überdestillierten Alkoholmenge besteht, d. h. wir wollen die Wirkungsweise des Instrumentes erklären und dabei auch zeigen, inwieweit und von welchen Störungen seine Angaben beeinflusst werden. Unter Hinweis auf die an andern Orten veröffentlichten Arbeiten (3, 4) wollen wir auf die exakte, mathematische Entwicklung der Theorie verzichten und hier nur in Worten die physikalischen Vorgänge erläutern.

Am besten bekommen wir ein Bild von der Arbeitsweise des Kugelpyranometers, wenn wir in großen Zügen den Weg der Strahlung und die Vorgänge, die durch sie im Instrument hervorgerufen werden, verfolgen. Die Strahlung, die von allen Seiten auf das Instrument fällt, geht praktisch ungeschwächt durch die farblose Hüllkugel hindurch (da Glas im Bereich des Sonnenspektrums, von $0,3\text{--}3\ \mu$, ein sehr geringes Absorptionsvermögen hat) und trifft auf die Empfänger­kugel, wo sie zu einem großen Teil absorbiert wird. Schon hier müssen wir auf einen wichtigen Punkt hinweisen, in welchem sich das farblose vom blauen Kugelpyranometer unterscheidet. Bei ersterem erfolgt nämlich die Ab-

sorption der Strahlung hauptsächlich durch den in der Empfänger­kugel enthaltenen Alkohol. Da aber Alkohol, als farblose Flüssigkeit, nur sehr wenig im sichtbaren Teil des Sonnenspektrums absorbiert, dafür aber starke Absorptionsbanden im ultraroten Bereich ($> 1 \mu$) hat, mißt das farblose Instrument vor allem nur die *Wärmestrahlung* und hat für die sichtbare Strahlung nur eine sehr geringe Empfindlichkeit. Dagegen erfolgt die Absorption der Strahlung beim Instrument mit dunkelblauer Empfänger­kugel hauptsächlich in der gefärbten Glaswandung der Kugel. Dadurch spricht dieses Instrument auf den *gesamten* Bereich des Sonnenspektrums an. Die Instrumente mit gefärbter Empfänger­kugel haben außerdem gegenüber den Instrumenten mit farbloser Empfänger­kugel noch zwei Vorteile. 1. ist die die Strahlung absorbierende Fläche bei ersteren immer dieselbe und daher gut definiert, während die Größe der Absorption beim farblosen Instrument von der Menge des Alkohols in der Empfänger­kugel abhängt. Da diese aber im Lauf der Expositionszeit abnimmt, wird somit auch die absorbierende Fläche kleiner, woraus eine Abnahme der Empfindlichkeit folgt. 2. bietet sich die Möglichkeit, entweder durch die Wahl geeigneter Glassorten für die Empfänger­kugel das Instrument nur zur Messung bestimmter, speziell interessierender Spektralbereiche zu benützen oder aber durch Graufärbung derselben eine annähernd gleichmäßige Absorption für alle Wellenlängen des Sonnenspektrums zu bekommen. Diese Überlegungen zeigen, daß das Kugelpyranometer mit blauer Empfänger­kugel dem farblosen an Empfindlichkeit und Genauigkeit überlegen ist.

Die absorbierte Strahlungsenergie wird, wie schon einleitend erwähnt, zur Verdampfung des in der Empfänger­kugel vorhandenen Alkohols benützt. Nur ein kleiner Teil geht davon durch die Hüllkugel nach außen verloren. Damit nun der in der Empfänger­kugel gebildete Alkoholdampf nach dem Rohr strömt, muß sich zwischen beiden ein kleines Dampfdruckgefälle ausbilden, das nur so groß ist, daß der Strömungswiderstand des Alkoholdampfes auf dem Wege von der Kugel zum Rohr überwunden wird. Dieses Dampfdruckgefälle schließt in sich natürlich auch ein Temperaturgefälle von der Kugel nach dem Rohr ein. Da aber die Empfänger­kugel durch den evakuierten Zwischenraum zwischen ihr und der Hüllkugel weitgehend von den wechselnden Einflüssen von Temperatur und Wind geschützt ist, wird sie bei Bestrahlung immer etwas höhere Temperatur besitzen als das Rohr. Wie Versuche und Berechnungen ergeben haben, hat bei starker Sonnenstrahlung die Empfänger­kugel eine mittlere Übertemperatur von zirka 5 Grad. Der so mit erhöhter Temperatur aus der Kugel in das Rohr strömende Alkoholdampf kühlt sich an der Rohrwandung ab, kondensiert und sammelt sich wieder als flüssiger Alkohol im Rohr. *Die Menge des überdestillierten Alkohols ist somit in erster Näherung proportional*

der von allen Seiten auf die Empfänger­kugel fallenden Strahlungs­menge.

Aus dieser Überlegung ergibt sich die anfangs erwähnte Wichtigkeit der Forderung, daß Hüllkugel und Rohr sich in möglichst gleicher Lufttemperatur befinden. Wenn nämlich die Lufttemperatur in der Umgebung des Rohres und in der Umgebung der Hüllkugel verschieden ist, ändern sich auch ihre Abkühlungsverhältnisse. Das würde aber auch eine Veränderung des Temperaturgefälles von der Empfänger­kugel nach dem Rohr verursachen und damit die Menge des transportierten Alkohols beeinflussen, wodurch die Proportionalität zwischen der überdestillierten Alkoholmenge und der Strahlungsintensität gestört werden würde. Unter der Voraussetzung von gleicher Lufttemperatur in der Umgebung von Hüllkugel und Rohr ist die Größe des destillierten Alkoholvolumens bei gegebener Einstrahlung, also die Empfindlichkeit des Instrumentes, im wesentlichen nur von der Verdampfungswärme des Alkohols abhängig, die bekannt ist. Diese Verdampfungswärme hat allerdings eine Temperaturabhängigkeit, die aber leicht berücksichtigt werden kann, da man nur einen mit der Temperatur variablen Eichfaktor einzuführen braucht, worauf wir noch bei Besprechung des Eichfaktors zurückkommen werden. Einflüsse anderer Art wirken sich aber in viel stärkerem Maße auf die Empfindlichkeit des Instrumentes während der Messung aus. Mit abnehmendem Alkoholstand in der Empfänger­kugel erfährt nämlich der Wärmeübergang von der bestrahlten Kugelwandung zum Alkoholinhalt eine zunehmende Erschwerung. Außerdem wird dadurch, daß sich das Rohr während der Expositionszeit mit Alkohol füllt, der dem Alkoholdampf zur Verfügung stehende Kondensationsraum immer kleiner. Daher hat der Wärmestrom, der von der Empfänger­kugel über das Rohr nach außen fließt, einen gesetzmäßig wachsenden Widerstand zu überwinden, was eine allerdings ebenso gesetzmäßige Abnahme der Empfindlichkeit des Kugelpyranometers mit steigendem Alkoholstand im Meßrohr zur Folge hat. Diese Abnahme der Empfindlichkeit ist aber nicht linear, sondern wird mit zunehmendem Alkoholstand im Rohr immer größer. Bis zu einer gewissen Höhe des Alkoholstandes im Rohr ist die Empfindlichkeitsverminderung so klein, daß sie vernachlässigt werden kann; dann nimmt sie langsam und erst bei größerer Höhe des Alkoholstandes stärker zu.

Diese Empfindlichkeitsverminderung kann aber durch eine sogenannte *Kalibrierung* berücksichtigt werden, die an jedem Instrument einmal noch vor der Eichung vorzunehmen ist. Für die Durchführung einer Kalibrierung benötigt man zwei Instrumente. Beide Instrumente werden gleichzeitig exponiert, aber nur so lange, daß die überdestillierte Alkoholmenge jeweils nur klein ist (zirka 2 cm³). Dabei läßt man die Destillation des einen Instrumentes immer von einem nahe dem

Nullpunkt der Teilung liegenden Wert beginnen, also in dem Bereich praktisch konstanter Empfindlichkeit, während gleichzeitig die Menge der Destillation des anderen Instrumentes bei verschiedenen Höhen des Alkoholstandes im Meßrohr gemessen wird. Wenn man diese Messungen des öftern und für verschiedene Alkoholstände im zweiten Instrument durchführt und sie den überdestillierten Alkoholmengen im ersten gleichsetzt, das dieselbe Strahlung mißt, jedoch im Bereich der konstanten Empfindlichkeit des Instrumentes, so bekommt man den Verlauf der Abnahme der Empfindlichkeit mit steigendem Alkoholstand. Mit anderen Worten, das zweite Instrument wird mit Hilfe des ersten kalibriert.

Für die Praxis der Strahlungsmessung ergibt sich aus diesen Überlegungen, daß man nicht direkt die Differenzen der Anfangs- und Endablesung, also das in Wirklichkeit überdestillierte Alkoholvolumen zur Berechnung der Strahlungssummen verwenden darf, sondern daß zuerst mit Hilfe einer Kalibrierungstabelle, die jedem Instrument mitgegeben wird, *jede* Ablesung am Rohr mit einer Korrektur versehen werden muß, die die Höhe der Alkoholsäule angibt, die ein « ideales » Kugelpyranometer mit konstanter Empfindlichkeit über den ganzen Meßbereich zeigen würde. Erst dieses fiktive Alkoholvolumen, das aus den Differenzen der korrigierten Alkoholstände berechnet wird, ist das wahre Maß für die einfallende Strahlung.

Auf Grund der Durchführung solcher Kalibrierungen kann man auch Aufschluß über die Genauigkeit bekommen, mit der das Kugelpyranometer bei verschiedenen Höhen des Alkohols im Rohr Strahlungssummen mißt. Bei den am Davoser Observatorium geprüften Instrumenten hat sich ergeben, daß die Genauigkeit, mit der Strahlungssummen gemessen werden können, bis zu einer Höhe von ungefähr 20 cm³ zirka $\pm 5\%$ beträgt, aber mit weitersteigendem Alkoholstand geringer wird. Es erweist sich daher als vorteilhaft, die Instrumente nur bis zu einer Höhe von 20 bis 25 cm³ destillieren zu lassen und dann umzukehren, da bei höherem Alkoholstand die Meßwerte zu unsicher werden.

Haben wir nun auf diese Weise das korrigierte, der Strahlung proportionale Alkoholvolumen berechnet, so müssen wir es nur mehr mit dem *Eichfaktor* multiplizieren, um die Strahlungssummen in gcal/cm², den üblichen Einheiten der Strahlungssummen¹, zu bekommen. Der Eichfaktor wird ebenfalls experimentell, in der für die Pyranometer üblichen Weise, bestimmt. Mit dem zu eichenden Kugelpyranometer wird gleichzeitig ein zweites exponiert, dessen Empfänger­kugel durch

¹ Die neueren Arbeiten in englischer Sprache ziehen allerdings vor, die Strahlung in mWatt/cm² anzugeben. Die Umrechnung ist ganz einfach, indem nur die in gcal/cm² ausgedrückten Werte mit dem Faktor 69,7 multipliziert werden müssen, um mWattmin/cm² (Milliwattminuten pro cm²) zu bekommen.

einen Beschattungsschirm vor der direkten Sonnenstrahlung geschützt wird. Letzteres mißt daher nur die Himmelsstrahlung und die Reflexstrahlung von den Wolken und der Erdoberfläche. Durch Differenzbildung zwischen den mit den beiden Instrumenten gemessenen Strahlungssummen bekommt man die Strahlungssumme der Sonnenstrahlung allein während dieses Zeitraumes. Diese kann aber gleichgesetzt werden der mit einem Aktinographen gleichzeitig gemessenen Sonnenstrahlung. Das Verhältnis dieser beiden Zahlen ist der *Eichfaktor*. Er gibt an, wieviel gcal/cm^2 Strahlung notwendig sind, damit sich der Alkoholstand im Rohr um *einen korrigierten cm^3* erhöht. Je kleiner diese Zahl ist, desto empfindlicher, je größer, desto unempfindlicher ist das Instrument. Bei dieser Eichmethode macht man natürlich die Voraussetzung, daß das Kugelpyranometer für Himmels- und Reflexstrahlung genau so empfindlich ist wie für die Sonnenstrahlung. Prüfungen der verschiedensten Instrumente haben ergeben, daß Kugelpyranometer von ungefähr gleichen Dimensionen und gleicher Farbe der Empfängerkugel auch ähnliche Empfindlichkeiten besitzen und untereinander gut übereinstimmen. Ein auf solche Weise gewonnener Eichfaktor gilt dann für *alle* Kugelpyranometer, die an dieses eine geeichte Instrument durch Kalibrierung angeschlossen worden sind. Die Eichfaktoren, die mit einer Genauigkeit von zirka $\pm 2\%$ ermittelt wurden, ließen sich natürlich genauer bestimmen als die Werte für die Kalibrierungskurve, da bei Eichungen nur im empfindlichsten Bereich, d. h. bei niederen Alkoholständen im Rohr gemessen wird. Wie früher schon angedeutet, zeigen die Eichfaktoren eine Temperaturabhängigkeit, und zwar eine systematische Abnahme, also ein Ansteigen der Empfindlichkeit, mit steigender Temperatur. Für die im Laufe des Jahres vorkommenden Unterschiede der mittleren Lufttemperatur von -10° bis $+20^\circ$ beträgt diese Abnahme zirka 8% . Wegen der Größe der anderen Ungenauigkeiten dürfte es sich empfehlen, eine Abstufung des Eichfaktors nach Klassen von 10° zu 10° mittlerer Lufttemperatur vorzunehmen.

Unter Berücksichtigung aller Fehlerquellen des Instrumentes können wir sagen, daß bei einwandfreier Aufstellung mit dem Kugelpyranometer Bellani die Strahlungssummen mit einer Genauigkeit von $\pm 5\%$ gemessen werden können. Bei Nichtberücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Eichfaktors erhöhen sich diese Werte der Streuung in extremen Fällen noch um weitere 4 bis 5%.

Auswertungsbeispiel: Zum Schluß wollen wir noch zeigen, wie sich in der Praxis z. B. die Tagessumme der Einstrahlung berechnen läßt. Dem Instrument müssen als Zahlenwerte eine Tabelle des Eichfaktors und eine Kalibrierungstabelle mitgegeben sein.

Also : Kugelpyranometer Nr. X :

Tabelle des Eichfaktors

Tagesmittel der Lufttemperatur	- 14° bis - 5°	- 4° bis + 5°	+ 6° bis + 15°	+ 16° bis + 25°
Eichfaktor	19,2	18,6	18,1	17,6

Kalibrierungstabelle.

cm ³	0	1	2	3	4	5	6	7	8	.....	15	16
Korrektion +	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	.....	0,9	1,1

17	18	.....	22	23	24	25	26	.....
1,3	1,5	.....	2,5	2,9	3,4	3,9	4,2	.....

Davos	Zeit	Abgelesener Wert	Korr. Wert
11. Sept. 1946	18.30 (nach dem Umkehren)	0,1	0,1
12. Sept. 1946	7.15	1,6	1,6
	12.00 (vor dem Umkehren)	23,2	26,2
	12.03 (nach dem Umkehren)	0,25	0,25
	18.35 (Endablesung)	17,5	18,9

Tagesmittel der Lufttemperatur + 10° C.

Da am 11. September ab 18.30 die Strahlungsintensität kaum mehr meßbar ist, kann die Destillation von 1,5 cm³ zwischen 18.30 und 7.15 des 12. September nur von der morgendlichen Strahlung herrühren. Wir haben also eine Destillation

von 26,10 cm³ am Vormittag und
von 18,65 cm³ am Nachmittag

Zusammen ergibt das 44,75 cm³.

Da an diesem Tage eine intensive Sonnenstrahlung war, müssen wir noch die drei Minuten vom Mittag berücksichtigen, während welcher die Exposition unterbrochen war. Wie oben erwähnt, beträgt dieser Zuschlag rund 0,1 cm³/min, insgesamt somit 0,3 cm³. Daher erhöht sich die Tagessumme auf 45,05 cm³. Bei einem Tagesmittel der Lufttemperatur von + 10° haben wir einen Eichfaktor von 18,1.

Die Tagessumme der von allen Seiten einfallenden Strahlung war somit am 12. September 1946 in Davos

$$45,05 \cdot 18,1 = 815 \text{ gcal/cm}^2.$$

Resumé.

On décrit le pyranomètre sphérique de Bellani ainsi que son fonctionnement et la manière de l'utiliser. Cet instrument est utilisable surtout pour des recherches de la radiation en biologie, écologie et climatologie. Il permet de mesurer directement, avec une exactitude de $\pm 5\%$, des sommes journalières du rayonnement solaire, diffusé et réfléchi qui tombe de toutes les directions sur un point d'exposition libre.

Literatur.

1. Mörikofer, W.: Meteorologische Strahlungsmeßmethoden. Abderhaldens Handb. biolog. Arbeitsmeth., Abt. II, Teil 3, S. 4005, 1939.
 2. Mörikofer, W.: Meteorologische Strahlungsmeßmethoden für biologische und ökologische Untersuchungen. Jahresbericht 1939 Geobot. Forschungsinst. Rübel in Zürich, S. 13, 1940.
 3. Wierzejewski, H.: Das Kugelpyranometer Bellani. Arch. f. Meteor., Geophys. u. Klimat. (im Druck).
 4. Prohaska, F. et Wierzejewski, H.: Théorie et pratique du pyranomètre sphérique de Bellani. Annales de Géophysique, **3**, Paris 1947 (im Druck).
 5. Prohaska, F.: Erfahrungen mit einem Doppelthermometer zur Messung der kalorischen Einstrahlung. Biokl. Beibl. Met. Ztschr., **7**, S. 39, 1940.
-