

551.521.1:551.521.3

(Osservatorio Ticinese della Centrale Meteorologica Svizzera, Locarno-Monti)

Die Himmelsstrahlung in ihrer Beziehung zu verschiedenen Parametern

Von

P. Valko

Mit 13 Textabbildungen

(Eingegangen am 27. August 1965)

Zusammenfassung. Gestützt auf ein fünf Jahre umfassendes Datenmaterial wird der Zusammenhang zwischen den Momentanwerten der diffusen Himmelsstrahlung, den gleichzeitigen Werten des Höhenwinkels der Sonne, der atmosphärischen Trübung sowie der Art und Menge der Bewölkung für Locarno-Monti (Alpensüdfuß) untersucht. Durch eine monatsweise Trennung der Daten kann der jahreszeitabhängige Effekt von Bodenalbedo und direkter Hangreflexion zahlenmäßig erfaßt werden. Mit Hilfe der sogenannten Koaxialmethode für die graphische Ermittlung stochastischer Beziehungen wird das Resultat unmittelbar für den praktischen Gebrauch in Form eines zusammengesetzten Diagrammes erhalten und durch eine analytische Näherungsformel ausgedrückt. Die auf diese Weise empirisch bestimmten Himmelsstrahlungsintensitäten werden durch Vergleich mit einer größeren Anzahl direkt gemessener Werte auf ihre Zuverlässigkeit hin geprüft, wobei das Prüfmaterial selbst nicht in die Untersuchungsstatistik einbezogen ist. Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen zeigen deutlich, wie sich der Zusammenhang stets bessert, wenn zunächst nur ein, dann sukzessive auch weitere Parameter in die Mehrfachkorrelation einbezogen werden. Die Ergebnisse für den wolkenfreien Himmel werden mit solchen anderer Autoren verglichen.

Summary. The data collected during a five year period at Locarno-Monti, on the southern side of the Alps, permitted an investigation of the relationship between the intensity of the diffuse sky radiation and the solar elevation angle, the turbidity, and the cloudiness. By grouping the data by months it was possible to show quantitatively the season-dependence on surface albedo and direct reflection from the slopes. The so-called coaxial method for the graphical determination of stochastic interrelations leads to a display of the results in a multicurve-graph for practical use. The relationship is approached analytically. The reliability of empirically obtained sky radiation data was

checked against a series of measured values, not involved in the statistics. Analysis of the deviation frequency shows further that the more parameters are taken into account in the multiple correlation procedure, the better the relationship holds. For cloudless sky the results are compared with those gained by other authors.

Résumé. Les résultats de mesure recueillis pendant une période de cinq ans à Locarno-Monti, au sud des Alpes, permettent d'étudier les relations entre les valeurs instantanées du rayonnement diffus du ciel d'une part, et les valeurs simultanées de l'angle de hauteur du soleil, du trouble atmosphérique et de la nébulosité d'autre part. Grâce à un groupement mensuel des données, l'effet variable selon la saison de l'albédo du sol et de la réflexion directe par les pentes peut être mis quantitativement en évidence. En recourant à la méthode dite coaxiale, qui permet de trouver graphiquement des relations stochastiques, il est possible de présenter les résultats sous la forme d'un abaque utilisable directement à des fins pratiques. Une formule approchée est également donnée. Les valeurs du rayonnement du ciel obtenues par ce moyen empirique sont ensuite comparées à une série de valeurs mesurées, non comprises dans la statistique. L'analyse de la fréquence des écarts montre clairement que les relations stochastiques trouvées sont d'autant meilleures que le nombre de paramètres inclus dans les corrélations multiples est plus grand. Dans le cas d'un ciel serein, les résultats sont comparés avec ceux d'autres auteurs.

I. Einleitung

Der Anteil der Sonnenstrahlung, der in einer natürlichen Atmosphäre zerstreut wird und als diffuse Himmelsstrahlung an einem Beobachtungspunkt auf die Erdoberfläche auftrifft, wird von einer Anzahl Faktoren bestimmt. Der Ausdruck

$$D = f(R, T, A, W, S) \quad (1)$$

soll andeuten, daß die Strahlungsintensität (D) des Gesamthimmels bei gegebenem Sonnenstand (S) von der Rayleigh-Streuung (R) an reinen Luftmolekülen, der Trübung (T), genauer der Extinktion an Dunstteilchen, der Albedo (A) des Erdbodens sowie von der Extinktion an Wolken (W) abhängig ist. Verglichen mit diesen Faktoren spielt die Absorption durch Gase, speziell jene durch den Wasserdampf, eine nur untergeordnete Rolle.

Es handelt sich dabei um recht verwickelte physikalische Vorgänge, die rechnerisch nicht einfach oder nur näherungsweise darzustellen sind. Berechnungen auf theoretischem Wege bedürfen daher nebst beträchtlichem Zeit- und Arbeitsaufwand einer komplizierten Mathematik und haben lediglich für mehr oder weniger wirklichkeitsgetreue Atmosphärenmodelle Gültigkeit. Meßergebnisse zeigen oft erhebliche Abweichungen von der berechneten Himmelsstrahlung; auch können solche Vergleiche nur für den Fall des wolkenfreien Himmels vorgenommen werden; eine Theorie, die auch den Einfluß der Bewölkung einschließen würde, gibt es noch nicht.

Neuere Berechnungen von D. DEIRMENDJIAN und Z. SEKERA [6] für den Rayleigh-Himmel unter Berücksichtigung der Mehrfachstreuung beruhen auf der exakten Theorie von CHANDRASEKHAR [4] und sind nur für

einige Albedowerte und Sonnenhöhen tabelliert. Für eine getrübbte Atmosphäre hat H. HINZPETER [9] die Himmelsstrahlung unter vereinfachenden Annahmen für einige Stufen des Trübungskoeffizienten von A. ÅNGSTRÖM [1] hergeleitet und mit eigenen Messungen von Potsdam verglichen. W. SCHÜEPP [14] benützt stark vereinfachende Arbeitsformeln und konnte seine Ergebnisse mit Messungen von Léopoldville in einem ausgedehnten Bereich des Schüeppschen Trübungskoeffizienten [15] prüfen.

Bei der Behandlung von Fragen, die von der Meteorologie und auch von Seiten der Praxis, z. B. von der Landwirtschaft oder dem Bauwesen, gestellt werden, ist man jedoch auf Messungen angewiesen. Den Einfluß der Trübung unter Verwendung des Trübungs faktors von F. LINKE [11] untersuchte G. REITZ [13] für Frankfurt und das Taunus-Observatorium, H. FRIEDRICH [8] für Wahnsdorf, wobei seine Ergebnisse zum Teil auf der Differenz zwischen der Globalstrahlung und der auf die Horizontale umgerechneten direkten Sonnenstrahlung fußen. Die Sichtweite als Trübungsmaß wurde von I. DIRMHORN [7] verwendet. Neulich erhielt W. COLLMANN [5] für Hamburg auf Grund von Messungen der Globalstrahlung und der direkten Sonnenstrahlung die Beziehung zum Linkeschen Trübungs faktor im Bereich 1 bis 5 und für Sonnenhöhen bis etwa 60° .

Studien über den Einfluß der Wolken auf die Himmelsstrahlung wurden ebenfalls mehrfach unternommen. So liegen u. a. in der bereits erwähnten Arbeit von I. DIRMHORN [7] Meßergebnisse für die Ostalpen für verschiedene Meereshöhen, von P. BENER [2, 3] für Davos und für die Alpensüdseite von J. C. THAMS [17] vor. In diesen Arbeiten sowie in der sonstigen, hier nicht angeführten Literatur, wurde die Beziehung sowohl zur Wolkenmenge als auch zur Wolkenart diskutiert, wobei als Grundgröße der Untersuchung teils der Momentanwert, meistens jedoch die Tagessumme der Himmelsstrahlung diente. In Anbetracht der verschiedenen Mängel der üblichen Wolkenbeobachtungen wurde, um besser definierte Ausgangsdaten zu erhalten, an Stelle der Bewölkung oft die Sonnenscheindauer als Komplementärgröße verwendet.

Die beträchtliche Streuung, mit welcher die Beziehung Himmelsstrahlung—Bewölkung empirisch festgelegt werden kann, erweckt das Bedürfnis, den Bewölkungseinfluß unter *gleichzeitiger* Berücksichtigung der Trübungsabhängigkeit abzuleiten. Zur Zeit der Untersuchungen von THAMS [17] lag für die Station Locarno-Monti noch kein geeignetes Material an Trübungsdaten vor, seither konnten jedoch durch Anwendung der Schüeppschen Methode [15, 19] die Trübungsverhältnisse für die Alpensüdseite eingehend geklärt werden [20, 21]. Daher erscheint es jetzt angebracht, an eine mehr erschöpfende Bestimmung der Gesamtbeziehung (1) auf rein empirischer Grundlage zu denken. Eine befriedigende Lösung der Aufgabe hat den praktischen Wert, aus Aktinometermessungen allein sowohl die Globalstrahlung als auch den Himmelsstrahlungsanteil angeben zu können¹.

¹ Über das Hauptergebnis der vorliegenden Arbeit wurde am III. Internationalen Kongreß für Biometeorologie in Pau (Frankreich) im September 1963 berichtet [18].

II. Das Material an Messungen und Beobachtungen

Die Himmelsstrahlung wurde mit einem Solarimeter nach Moll-Gorczyński gemessen und registriert. Zur Abschirmung der direkten Sonnenstrahlung diente ein Abschattungsring von 4 cm Breite, der in 45 cm radialer Entfernung von der Thermosäule in der Normalebene zur Erdachse und je nach Sonnendeklination verstellbar montiert wurde. Die Strahlung des abgeschirmten Himmelsstreifens wurde durch eine Korrektur berücksichtigt. Der Himmelsstrahlungs-Momentanwert, jeweils zur Zeit einer Aktinometermessung, wurde dann den Registrierkurven entnommen und in $\text{meal/cm}^2 \text{ min}$ ausgedrückt.

Die Lufttrübung wurde aus Meßwerten der Intensität der direkten Sonnenstrahlung abgeleitet. Als Instrument diente ein thermoelektrisches Aktinometer von institutseigener Konstruktion, ähnlich dem Panzeraktinometer von Linke-Feußner, ausgerüstet mit den üblichen Schottischen Glasfiltern OG1 und RG8. Die kalorische Auswertung stützt sich auf ein umfangreiches Eichmaterial, das mit dem Ångströmschen Kompensationspyrheliometer Nr. 68 gewonnen wurde. Der Trübungsberechnung liegt die Formel von Bouguer-Lambert zugrunde, in welcher dann die Extinktion des Dunstes d_λ für monochromatische Strahlung der Wellenlänge λ gemäß dem Schüeppschen Ansatz [15] in der Form

$$d_\lambda = 2,303 \cdot B (2 \lambda)^{-\alpha} \quad (2)$$

berücksichtigt wurde. Hierbei bedeutet B den Schüeppschen Trübungskoeffizienten, der in der vorliegenden Arbeit als Ausgangsgröße Verwendung findet; der Exponent α trägt der Wellenlängenabhängigkeit der Dunstextinktion Rechnung.

Art und Menge (in Zehnteln Bedeckungsgrad angegeben) der Wolken wurden zur Zeit jeder Aktinometermessung nach der in der Synoptik üblichen Weise visuell bestimmt. Wegen der Unzulänglichkeit dieser Bewölkungsangaben im Hinblick auf die Fragestellung, war es notwendig, sich lediglich auf zwei Wolkenarten, nämlich auf Cirren einerseits und auf jene des tiefen und mittleren Niveaus andererseits, zu beschränken. Da Dichte und Mächtigkeit der Wolken sowie ihre Verteilung am Himmelsgewölbe keine Berücksichtigung fanden und zudem in den Angaben individuell bedingte Unterschiede einzelner Beobachtungspersonen mitenthalten sind, ist die Herleitung der Bewölkungsabhängigkeit der Himmelsstrahlung von vornherein mit einer gewissen Unsicherheit belastet.

Als weiterer Parameter hätten Meßwerte über die Bodenalbedo in die Bearbeitung einbezogen werden sollen; da jedoch die Angaben des Albedometers für die weitere Umgebung kaum als genügend repräsentativ angenommen werden können, konnte die Albedo nach ihrem absoluten Betrag nicht berücksichtigt werden. Dagegen war es durch eine monatsweise Trennung der Daten möglich, ihre jahreszeitenbedingte Änderung, resp. die dadurch verursachten Schwankungen der Himmelsstrahlung zahlenmäßig zu ermitteln. Wegen der natürlichen Überhöhung des Horizontes für den Aufstellungsort der Meßgeräte (s. Abb. 1) wird neben der

Himmelsstrahlung auch die direkt von den Berghängen reflektierte Strahlung jeweils mitgemessen. Auch die Hangreflexion unterliegt einer jahreszeitlichen Schwankung; daher läßt sich durch die monatweise Aufspaltung nur auf die Gesamtwirkung von Reflexion und Albedo schließen.

Nach der Formel (1) sind noch Sonnenhöhe und Rayleigh-Streuung zu berücksichtigen. Die Sonnenhöhe wurde zu jeder Aktinometermessung bestimmt; die Rayleigh-Streuung dagegen bedeutet für die Untersuchungen keinen zusätzlichen Parameter, da sie nur vom Luftdruck abhängt und

für eine gegebene Meßstation praktisch konstant ist. Geringe

Luftdruckschwankungen, durch den Witterungsablauf bedingt, verwischen die Beziehung der Himmelsstrahlung zu den anderen Größen nur unbedeutend. Dem mittleren Luftdruckjahresgang wird übrigens durch die monatweise Trennung von selbst Rechnung getragen.

Grundlage der vorliegenden Untersuchung bilden die Beobachtungsergebnisse der Jahre 1958—1962. Insgesamt standen 1800 Gruppen zeitlich zusammengehörender Werte der Sonnenhöhe, Trübung, Bewölkungsmenge und Himmelsstrahlungsintensität für die statistische Verarbeitung

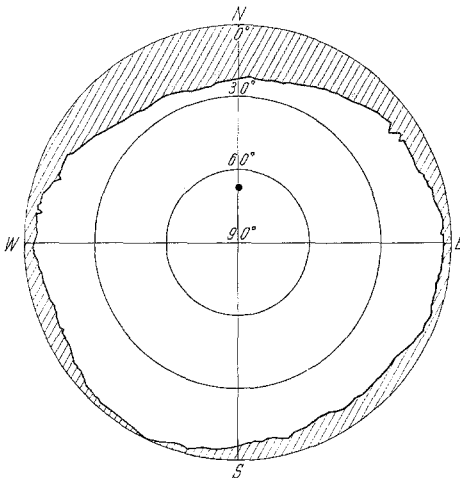


Abb. 1. Natürlicher Horizontverlauf für den Aufstellungsort der Instrumente im Osservatorio Ticinese in Locarno-Monti

zur Verfügung. Dieses Zahlenmaterial verteilt sich im Mittel etwa wie 1 zu 4 auf wolkenfreien Himmelszustand bzw. auf bewölkten Himmel verschiedenen Bedeckungsgrades.

III. Methodik der graphischen Korrelationsbestimmung

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, daß nach einer empirischen Lösung der Gesamtbeziehung (1) in der Form

$$D = D(h, B, J, N, \bar{N}) \quad (3)$$

gesucht wird. Dabei bedeuten:

D gemessene Himmelsstrahlungsintensität in $[\text{mcal}/\text{cm}^2 \text{ min}]$,

B Trübungskoeffizient nach Schüepp,

J Jahreszeit (Monat des Jahres),

N Menge der Wolken des unteren und mittleren Niveaus in Zehnteln Bedeckungsgrad,

\bar{N} Menge der Cirren in Zehnteln Bedeckungsgrad.

Die Aufgabe besteht in der Ermittlung einer Mehrfachkorrelation. Die Korrelationsrechnung ist auch im Falle einfacher Korrelation langwierig und zeitraubend, im Falle der Mehrfachkorrelation wächst der Arbeitsaufwand mit wachsender Anzahl der eingeführten Veränderlichen rasch an und ist bald kaum mehr zu bewältigen. Weiterhin wird vorausgesetzt, daß mindestens eine der Veränderlichen linear mit den übrigen verknüpft ist, was in Wirklichkeit oft nicht zutrifft. Schon der beträchtliche Umfang des Zahlenmaterials verbietet in unserem Fall eine Korrelationsrechnung. Es war daher wünschenswert, die Gl. (3) auf graphischem Wege zu lösen.

Bei der Auffindung stochastischer Zusammenhänge mittels graphischer Methoden wurden z. B. auf dem Gebiet der Hydrologie bereits gute Erfahrungen gemacht. Beispiele von R. K. LINSLEY, M. A. KOHLER und J. L. H. PAULHUS [12] und von SZESZTAY [16] zeigen, wie erfolgreich die sogenannte *Koaxialmethode* auf Korrelationen zwischen vier und mehr Veränderlichen angewandt werden kann. Die Korrelationsrechnung hat zweifellos den Vorteil, daß das Resultat formelmäßig angegeben werden kann und die Strammheit der Beziehung durch eine Zahl charakterisiert wird. Dafür haben jedoch die graphischen Methoden folgende Vorteile:

1. Zwischen keinen der Variablen wird eine lineare Beziehung vorausgesetzt;
2. Zeitraubende Rechnung wird durch rasches graphisches Auftragen der Punkte ersetzt;
3. Der Verlauf der Kurven gibt einen unmittelbaren Hinweis für die mathematische Formulierung der untersuchten Beziehung.
4. Fehlerhafte oder verdächtige Werte sind sofort erkennbar und können ausgeschieden werden.

Die Koaxialmethode [12, 16] sucht nach der Gesamtbeziehung zwischen einer bedingten Veränderlichen Y und den bedingenden Veränderlichen X_1, X_2, \dots, X_n schrittweise. Als erster Schritt wird die Beziehung

$$Y' = f'(X_1, X_2) \quad (4)$$

festgelegt, indem im Koordinatensystem (Y, X_1) die Werte von X_2 aufgetragen und die isometrischen Linien durch die streuenden Punkte gelegt werden. In der Folge wird in einem zweiten Feld Y gegen Y' aufgetragen, wobei den Punkten jeweils ein Wert von X_3 zugeordnet wird und dann die Kurven $X_3 = \text{konst.}$ ausgezogen werden. Somit erhält man die Beziehung

$$Y'' = f'(X_1, X_2, X_3) \quad (5 \text{ a})$$

oder

$$Y'' = f'(Y', X_3). \quad (5)$$

Durch sukzessives Einbeziehen aller weiteren Veränderlichen wird die Prozedur so lange wiederholt, bis auch das letzte Feld

$$Y^{(n-1)} = f'(Y^{(n-2)}, X_n) \quad (6)$$

gezeichnet werden kann. Dabei bezeichnen Y die tatsächlich gemessenen

oder beobachteten Werte, Y' , Y'' , . . . $Y^{(n-1)}$ die den Teildarstellungen sukzessiv entnommenen Näherungswerte der Veränderlichen. Die einzelnen Felder werden so angeordnet, daß die Y -Achse für das erste Feld als Y' -Achse für das zweite Feld, dann die Y Achse für das zweite als Y'' -Achse für das dritte Feld usw. dienen kann. Abb. 2 soll diese Prozedur veranschaulichen.

Die Art des Problems entscheidet jeweils, in welcher Reihenfolge die Veränderlichen in die Gesamtdarstellung

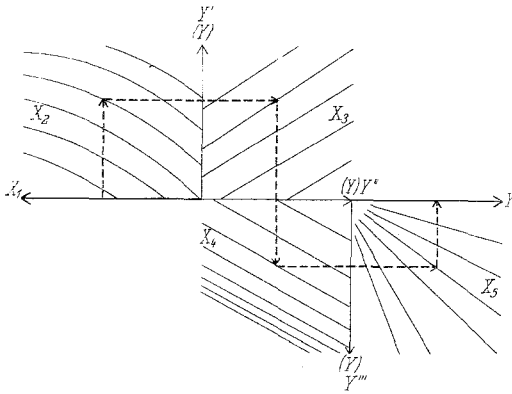


Abb. 2. Prinzipialskizze zur Koaxialmethode. Die gestrichelte Pfeillinie zeigt die Reihenfolge der Konstruktion

Es empfiehlt sich, mit den drei wichtigsten, am engsten verbundenen Variablen zu beginnen. Zum Schluß läßt sich dann durch unmittelbaren Vergleich zwischen gemessenen Y - und graphisch ermittelten $Y^{(n-1)}$ -Werten prüfen, bis zu welchem Grad der Gesamtbedingungskomplex erfaßt wurde. Dadurch ist es auch möglich zu beurteilen, welche Veränderlichen und mit welchem Gewicht diese die Gesamtbeziehung gestalten bzw. welche zum Ergebnis nicht mehr beitragen. Wird durch

die Berücksichtigung einer Veränderlichen X_K keine Verbesserung erzielt, so streuen die Punkte X_K im Feld $(K - 1)$ um die Gerade

$$\operatorname{tg} \frac{Y}{Y^{(K-1)}} = 1. \tag{7}$$

IV. Das Himmelsstrahlungsdiagramm und seine Ermittlung

4.1. Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 3 wurde als erster Schritt die gemessene Himmelsstrahlung gegen die Sonnenhöhe mit dem Trübungskoeffizienten als Parameter aufgetragen. Abb. 3 zeigt das Ergebnis; sie bezieht sich auf wolkenfreien Himmel. Das Streufeld enthält nicht das gesamte Material der (D, h, B) -Wertegruppen, da sonst die Ziffern bis zur Unkenntlichkeit zusammengedrängt würden; die Festlegung der Kurven für $B = \text{konst.}$ im Original-Arbeitsdiagramm stützt sich jedoch auf die ganze Statistik. Ähnliches gilt auch für die anderen Felder. Für größere Trübungen ist das Feld weniger dicht mit Punkten belegt, sind somit die Kurven mit weniger Sicherheit gezeichnet. Bei tiefem Sonnenstand nimmt die Himmelsstrahlung bei konstanter Trübung stärker mit der Sonnenhöhe zu als bei hohem Sonnenstand; für größere Trübungswerte

ist diese Zunahme ausgeprägter als für klare Luft. Für jeweils konstante Sonnenhöhe steigt die Himmelsstrahlung mit der Trübung für klare Luft mehr an als für trübe. Dies folgt daraus, daß die Himmelsstrahlung mit der Trübung nicht über alle Grenzen hin anwachsen kann.

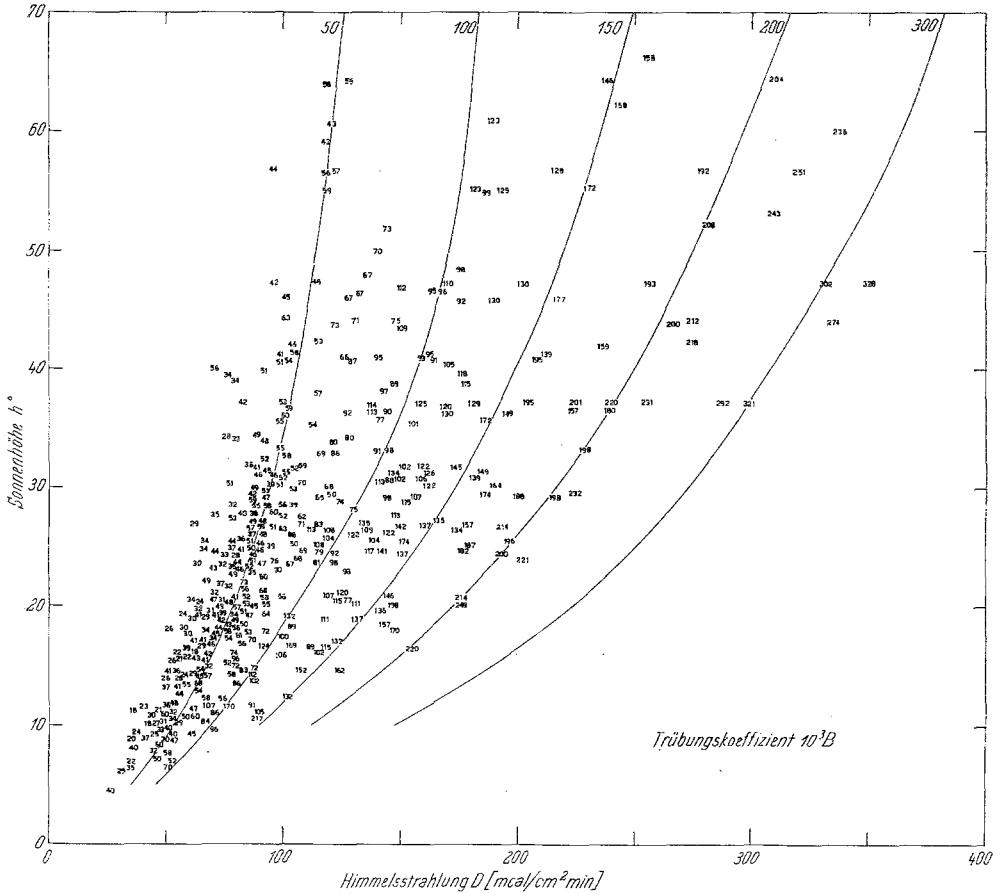


Abb. 3. Das Streufeld (D , h , B). Eintragungen nach $10^3 B$

4.2. Die Beziehung $D' = f'(B, h)$ läßt sich durch Berücksichtigung der Jahreszeit verbessern. Gl. (4) folgend zeigt Abb. 4 das Teilfeld $D' = f'(D', J)$, das nach der Prinzipskizze (Abb. 2) ermittelt wurde. Hinter der Jahreszeitabhängigkeit verbirgt sich, wie bereits erwähnt, der größtenteils phänologisch bedingte Wechsel im Rückstrahlvermögen des Bodens und der bewaldeten bzw. verschneiten Berghänge. Sind Trübung und Sonnenstand konstant, dann mißt das Himmelsstrahlungsgerät eine (im Mittel um etwa 22%) höhere Intensität im Winter als im Sommer. Im

Arbeitsdiagramm konnte in größerem Maßstab und mit verschiedenen Farben gearbeitet werden, Einzelheiten springen daher dort mehr ins Auge. Doch ist auch hier erkennbar, daß die Novemberwerte die größte Streuung aufweisen, was sicher auf das kurzfristige Verschneitsein und

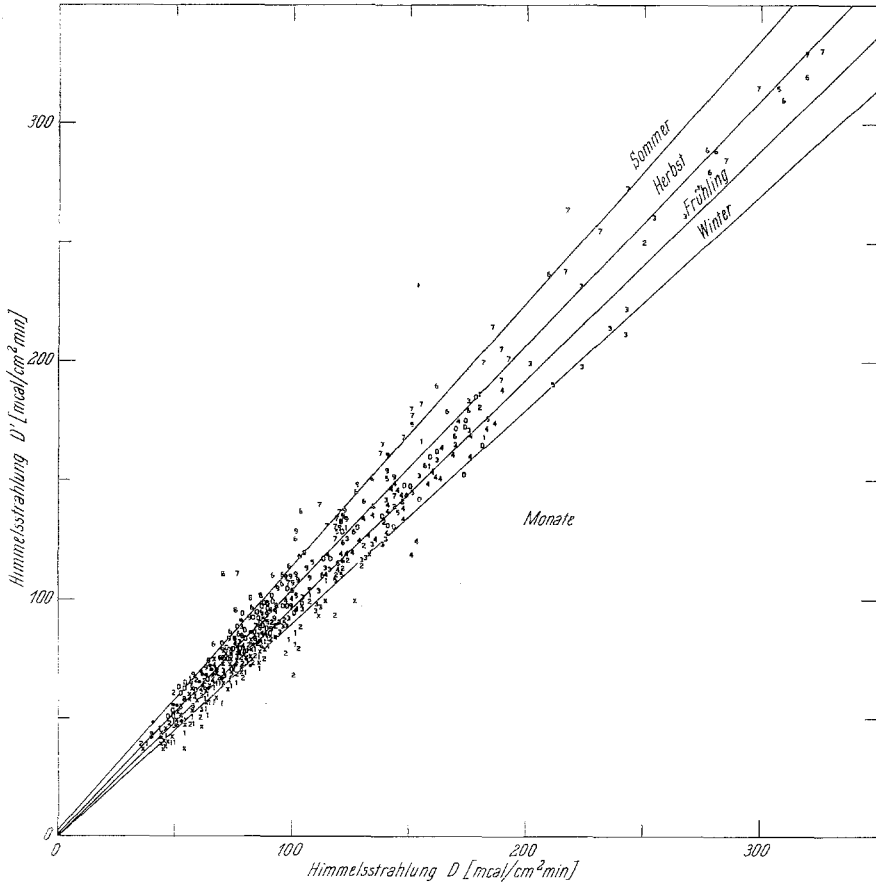


Abb. 4. Das Streufeld (D , D' , J): (1) Januar, (2) Februar, . . . (o) Oktober, (●) November, (x) Dezember

Wiederschmelzen an Berghängen zurückgeführt werden kann. Sodann fällt auf, wie einige Winter- und Sommerwerte von ihren Ausgleichsgeraden weg gegen die Mittelpartie streuen. Es handelt sich fast ausnahmslos um Fälle mit sehr starker Trübung. Demnach sollte die Divergenz der Geradenschar für die Jahreszeiten oberhalb einer durch Trübungsgrad und Sonnenhöhe (Stärke und Richtung der Bestrahlung in bezug auf die Dunsthaube) bestimmten Schwelle in Konvergenz übergehen. Jahreszeitbedingte Unterschiede in der Albedo bzw. Hangreflexion werden im Falle allumhüllender

Dunstumgebung, bei Sichtweiten kleiner als etwa 6 km, stark ausgeglichen. Somit wäre die Geradenschar lediglich als Annäherung an die Wirklichkeit zu betrachten, der eher eine Darstellung wie sie Abb. 5 skizzenhaft zeigt, entsprechen würde.

Durch die bisherigen Teildarstellungen wurde die partielle Korrelation $D'' = f'(B, h, J)_{N = \bar{N} = konst. = 0}$ gefunden.

4.3. Wird nun dem graphischen Schema folgend auch die Bewölkung als weiterer Parameter herangezogen, so ergibt sich für die Beziehung $D''' = f'(D'', N)$ das Streufeld in Abb. 6. Sie gilt nur für Wolken des unteren (Cu, Sc, St) und mittleren (Ac, As) Niveaus und wurde bis zu einem Bedeckungsgrad ermittelt, für welchen Aktinometermessungen noch durchgeführt werden können; Fälle mit gemischter Bewölkung wurden fortgelassen. Der Bedeckungsgrad wurde unmittelbar durch die entsprechende Ziffer markiert, Wolken Spuren wurden mit (x) eingetragen. Eintragungen mit anderen Zeichen jeweils innerhalb eines Kreisringes gehören nicht zum Streubild und werden weiter unten erörtert.

Naturgemäß ist die Streuung groß; sie ist jedoch allein auf die Art der synoptischen Wolkenbeobachtungen zurückzuführen, da dem jeweiligen Trübungsgrad und der Jahreszeit bereits Rechnung getragen wurde. Oberhalb der Geraden $D''' = D''$ sollten prinzipiell keine Punkte fallen; doch ist diese Bedingung wegen der Streuung nicht erfüllt. Durch das Streufeld können Gerade als Ausgleichslinien gelegt werden. Der mit zunehmendem Bewölkungsgrad anwachsende Abstand zwischen diesen Geraden bedeutet, daß, entsprechend den Erfahrungen (z. B. [17]), keine lineare Beziehung zwischen Bewölkungsgrad und Himmelsstrahlung besteht. Eine stärkere Zunahme der Himmelsstrahlung ist erst über etwa 4/10 Bedeckungsgrad erkennbar. Aktinometermessungen durch Wolkenlücken wurden nur gelegentlich durchgeführt, daher sind die Linien für starke Bewölkung etwas fragwürdig. Zusätzlich wurden einige Fälle für vollkommen bedeckten Himmel bei verschiedenen Bewölkungsarten eingetragen. Als Eingangswert im ersten Feld wurde für diese Fälle jeweils der der Jahreszeit entsprechende mittlere Trübungsgrad [20, 21] verwendet. Merklich höhere Strahlungswerte als bei wolkenfreiem Himmel treten meist im Falle einer Ac- oder As-Wolkendecke auf, für Cb, Ns und Sc dagegen liegen die Werte sehr tief.

Da nur Fälle mit jeweils homogener Bewölkung untersucht wurden, wurde das Teilfeld für Cirren getrennt ermittelt. Gemäß Abschnitt 3 wurde somit einmal die Beziehung $D''' = f'(D'', N)$, einmal $\bar{D}''' = f'(D'', \bar{N})$ gefunden. Das hier nicht gezeigte Streufeld enthält weniger Fälle als jenes

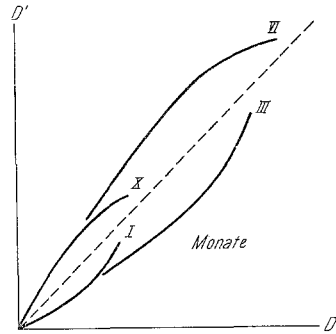


Abb. 5. Modell zu Abb. 4.
Korrigiert für sehr starke
Trübung

der Abb. 6 und konnte nur bis $4/10$ Bewölkung ermittelt werden. Kennzeichnend ist der merklich geringere Effekt auf die diffuse Strahlung und

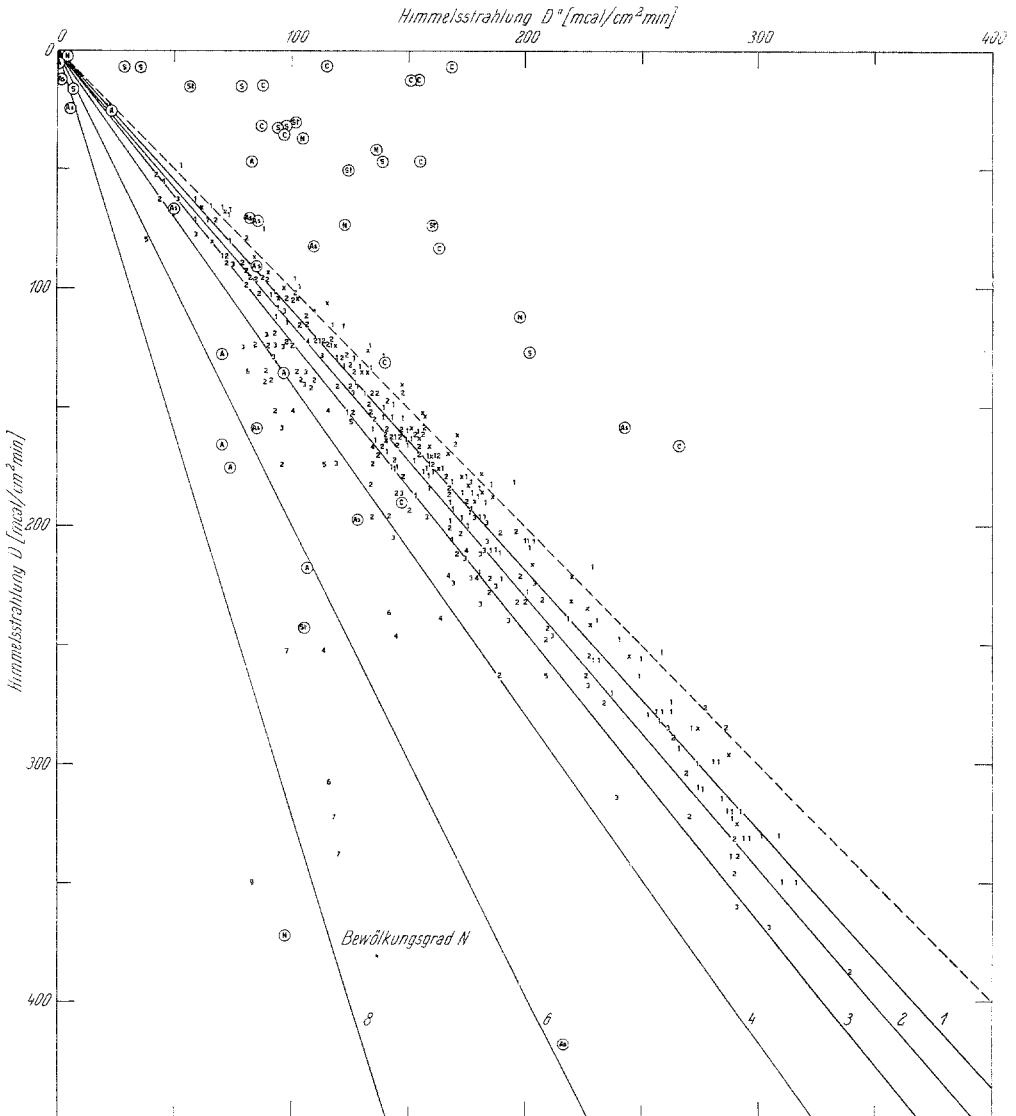


Abb. 6. Das Strenfeld (D , D' , N). Bewölkungsgrad in Zehnteln. Die Zeichen im Kreisring beziehen sich auf bedeckten Himmel; (N): Ns , (C): Cb , (St): St , (As): As , (A): Ac

die etwas größere Streuung der Punkte als im Falle der tieferen Wolken. Der Zusammenhang wurde hier ebenfalls durch eine Geradenschar ange-

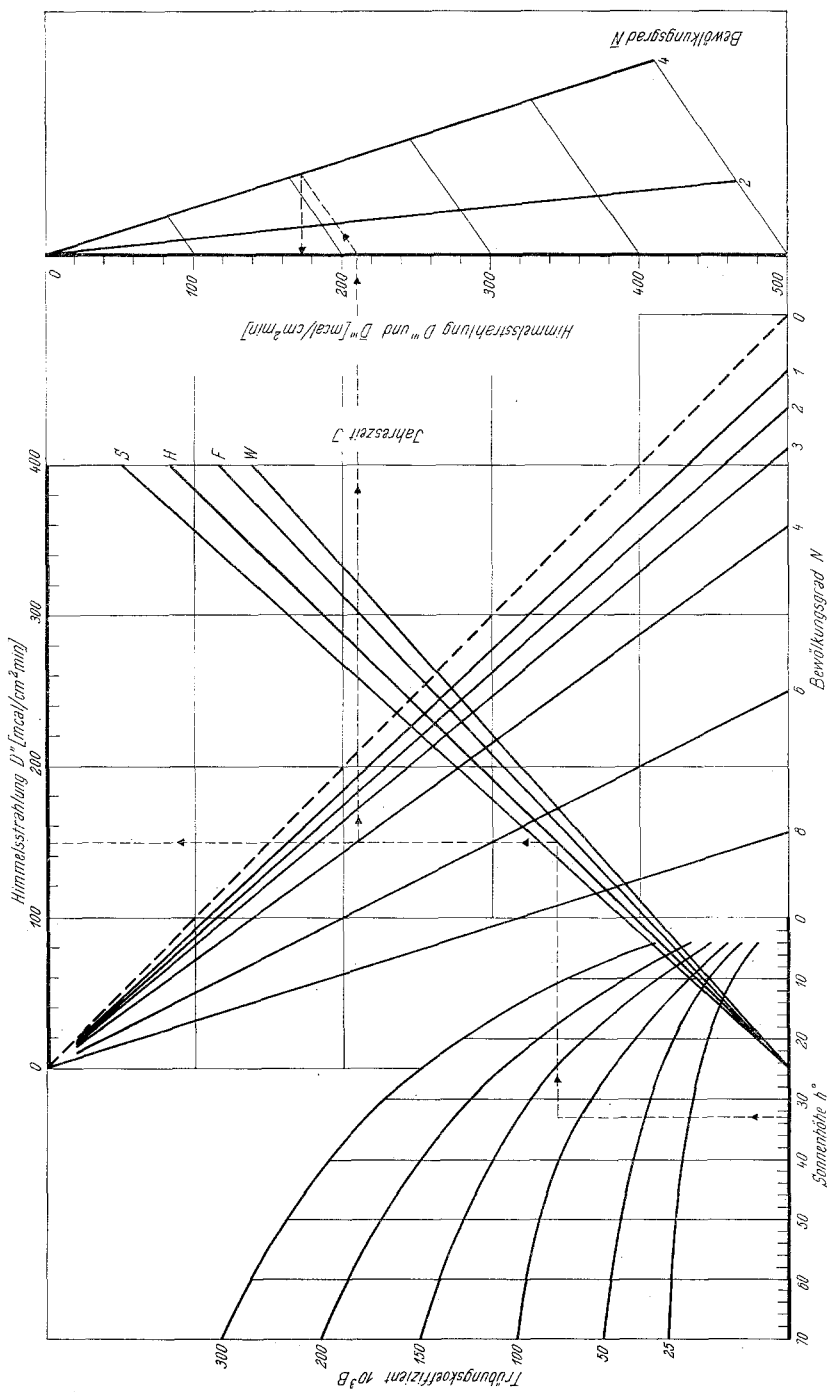


Abb. 7. Koaxialdiagramm für die Gesamtbeziehung (3)

nähert; es gilt $\bar{D}'''/D'' = 0,93$ für $2/10$ bzw. $0,82$ für $4/10$ Bedeckungsgrad.

4.4. Nach einfacher graphischer Umformung zeigt Abb. 7 das Endergebnis des gesamten Verfahrens.

Für den Fall $h = 33^\circ$, $B = 0,120$ zum Beispiel resultiert im Herbst eine Himmelsstrahlung D'' von $210 \text{ mcal/cm}^2 \text{ min}$ bei $N = 4/10$, jedoch nur ein \bar{D}''' von $173 \text{ mcal/cm}^2 \text{ min}$ wenn Cirren der gleichen Menge vorhanden sind.

Obwohl das Diagramm unmittelbar nur für Locarno-Monti gilt, läßt sich sicher für jeden anderen Beobachtungsort eine ähnliche Darstellung finden. Dies bedeutet, daß eine empirische Formel zur Berechnung der Himmelsstrahlung nur in ihren numerischen Konstanten geändert werden müßte, um für eine beliebige Station angewandt werden zu können.

Analytisch kann die gefundene Beziehung durch einfache Potenzfunktionen angenähert werden. Für das Trübungsfeld ergibt sich

$$D' = 10^{1,36 (10^3 B)^{0,11}} \cdot (\sin h)^{0,43 (10^3 B)^{0,058}} \quad (8)$$

also ein Ausdruck von der Gestalt $y = ax^b$, wobei die Parameter a und b wiederum Potenzfunktionen in B sind. Mit dieser Formel läßt sich die Himmelsstrahlung für $10^3 B \geq 20$ (kleinere Werte treten nur selten auf) mit guter Genauigkeit berechnen. Für $B = 0$ ergibt Gl. (8) unabhängig von der Sonnenhöhe $D' = 1$ [$\text{mcal/cm}^2 \text{ min}$], was keinesfalls als die Strahlung des Rayleigh-Himmels interpretiert werden kann. Um auch diesem Grenzfall gerecht zu werden, wird D' in zwei Glieder $D' = D'_R + D'_B$ aufgespalten, wobei D'_R die reine Rayleigh-Himmelsstrahlung bedeutet. Diese wird durch Extrapolation von D' auf $B = 0$ (s. Abschnitt 8) erhalten und durch die Formel

$$D'_R = 57 (\sin h)^{0,35} \quad (9)$$

angenähert. Die Kurvenschar für das Restglied D'_B , das die Streuung an Dunst allein darstellt, wird dann nach Abzug des Rayleigh-Gliedes:

$$D'_B = 3,73 (\sin h)^{0,66} \cdot (10^3 B - 12)^{0,81}. \quad (10)$$

Die Jahreszeitkorrektur

$$K_J (= D''/D') \quad (11)$$

läßt sich unmittelbar der Abb. 4 entnehmen:

Sommer: 0,89	Frühling: 1,04
Herbst: 0,96	Winter: 1,11.

Der Einfluß der Wolken des tiefen und mittleren Niveaus konnte in der Form

$$K_N = 0,11 \cdot 10^{0,17 N} + 0,89 (= D'''/D''), \quad (12)$$

jener der Cirren in der Form

$$K_N = 1 + 0,035 \bar{N} (= \bar{D}'''/D'') \quad (13)$$

ausgedrückt werden.

Mit den Formeln (9) bis (13) ergibt sich für die Gesamtbeziehung die Gleichung

$$D'''' = K_J [57 (\sin h)^{0,35} + 3,7 (\sin h)^{0,66} \cdot (10^3 B - 12)^{0,81}] [0,11 \cdot 10^{0,17 N} + 0,035 \bar{N} + 0,89] \tag{14}$$

oder mit den angeführten Bezeichnungen

$$D'''' = K_J (D'_R + D'_B) (K_N + K_{\bar{N}} - 1) \tag{14 a}$$

Für den Fall $N = \bar{N} = B = 0$ sollte Gl. (14) nur noch das Rayleigh-Glied enthalten, Gl. (10) somit $D'_B \equiv 0$ ergeben; es bleibt jedoch noch der Betrag von $3,7 (\sin h)^{0,66} \cdot (-12)^{0,81}$ übrig. Wie dies bei empirischen Formeln, die auf Grund eines endlichen, sich nur innerhalb bestimmter Grenzwerte bewegenden Zahlenmaterials aufgestellt werden, oft der Fall ist, erfüllt hier Gl. (10) die Randbedingung $D'_B \equiv 0$ für $B = 0$ nicht. Der Restbetrag beläuft sich (für $h = 90^\circ$) auf maximal $-3,3$. Da unsere Extrapolation auf $B = 0$ ohnehin sehr unsicher ist (s. Abschnitt 8), soll dieser Schönheitsfehler nicht weiter diskutiert werden.

Das Wolkenfeld (Abb. 6) wurde nur bis $N = 8/10$ bzw. im Falle von Cirren bis $\bar{N} = 4/10$ Bedeckungsgrad ermittelt. Für gemischte Bewölkung $N \neq 0, \bar{N} \neq 0$ konnte nur bis $N + \bar{N} \leq 4/10$ nachgeprüft werden, daß die nach Gl. (14) berechnete mit der effektiv gemessenen Himmelsstrahlung innerhalb der Streuung übereinstimmt. Dementsprechend gilt Gl. (12) für $N \leq 8/10$, Gl. (13) für $\bar{N} \leq 4/10$, weiterhin Gl. (14) für $N \leq 8/10$ falls $\bar{N} = 0$, für $\bar{N} \leq 4/10$ falls $N = 0$ und schließlich für $N + \bar{N} \leq 4/10$ falls $N \neq 0, \bar{N} \neq 0$. Die Randbedingung $(K_N + K_{\bar{N}} - 1) \equiv 1$ für $N = \bar{N} = 0$ ist erfüllt.

V. Statistische Prüfung der Gesamtbeziehung

Die Daten der ersten sechs Monate des Jahres 1963 wurden in die Untersuchungsstatistik nicht einbezogen, sondern zur Prüfung der gefundenen Beziehung reserviert. Dieses Prüfmaterial umfaßt 61 Fälle für klaren und 58 Fälle für bewölkten Himmel (ohne gemischte Bewölkung) bis $5/10$ Bedeckungsgrad. Dabei betrug der kleinste Wert des Trübungs-koeffizienten 0,020, der größte 0,311. Es wurde jeweils die Differenz zwischen tatsächlich gemessener und graphisch ermittelter Himmelsstrahlungsintensität gebildet und in Prozenten des gemessenen Wertes ausgedrückt. Alle relativen Abweichungen

$$\frac{|D - D'(h, B)|}{D} \text{ I., } \frac{|D - D''(h, B, J)|}{D} \text{ II., } \quad \text{für klaren und}$$

$$\frac{|D - D'(h, N)|}{D} \text{ III., } \frac{|D - D''(h, B, N)|}{D} \text{ IV., } \frac{|D - D'''(h, B, J, N)|}{D} \text{ V.}$$

für bewölkten Himmel wurden berechnet und jeweils nach ihrer Häufigkeit zerlegt. Hierbei wurden Fälle für beide Wolkengruppen zusammen ge-

testet. Das Resultat geht aus den Abb. 8 und 9 hervor. Es ist deutlich erkennbar, wie sich der Zusammenhang stets bessert, wenn sukzessive mehr und mehr Parameter berücksichtigt werden. Aus den Fehlerkurven kann unmittelbar die Wahrscheinlichkeit entnommen werden, mit welcher sich die Himmelsstrahlung innerhalb gegebener Fehlergrenzen bestimmen

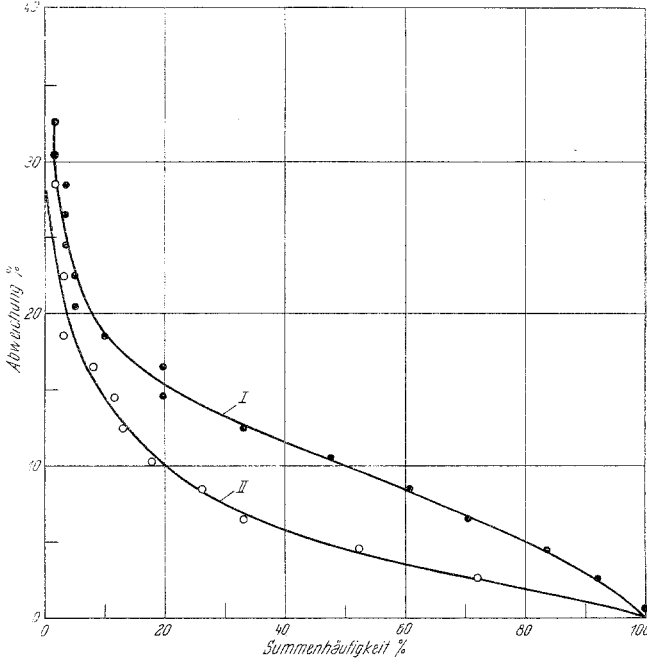


Abb. 8. Summenhäufigkeit der relativen Abweichungen für wolkenfreien Himmel: I ohne, II mit Jahreszeitkorrektur

läßt. Für bewölkten Himmel z. B. begeht man in 20% der Fälle einen Fehler von mindestens 54%, falls die Strahlung nur auf Grund der Sonnenhöhe geschätzt wird. Diese Schwelle läßt sich jedoch auf $\pm 22\%$

Tabelle 1. Ergebnis der statistischen Prüfung für die Fehlerkurven in Abb. 8 und 9

Verteilung von	I	II	III	IV	V
Sicherheitsschwelle ($> P$)	0,99	0,98	0,90	0,90	0,99

heruntersetzen, wenn auch die Trübung, und schließlich auf $\pm 15\%$, wenn auch die Jahreszeit berücksichtigt wird. Für klaren Himmel dagegen ist der Fehler gemäß Kurve II in 80% der Fälle kleiner als $\pm 10\%$ und in 50% der Fälle kleiner als $\pm 5\%$.

Mit Hilfe des χ^2 -Tests soll geprüft werden, einerseits bis zu welchem Grade die einzelnen Häufigkeitsverteilungen in sich gesichert sind, andererseits, ob dieselben signifikant voneinander verschieden sind. Tabelle 1 gibt die Zufallsgrenze an, bis zu welcher die Fehlerkurven I bis V gesichert sind.

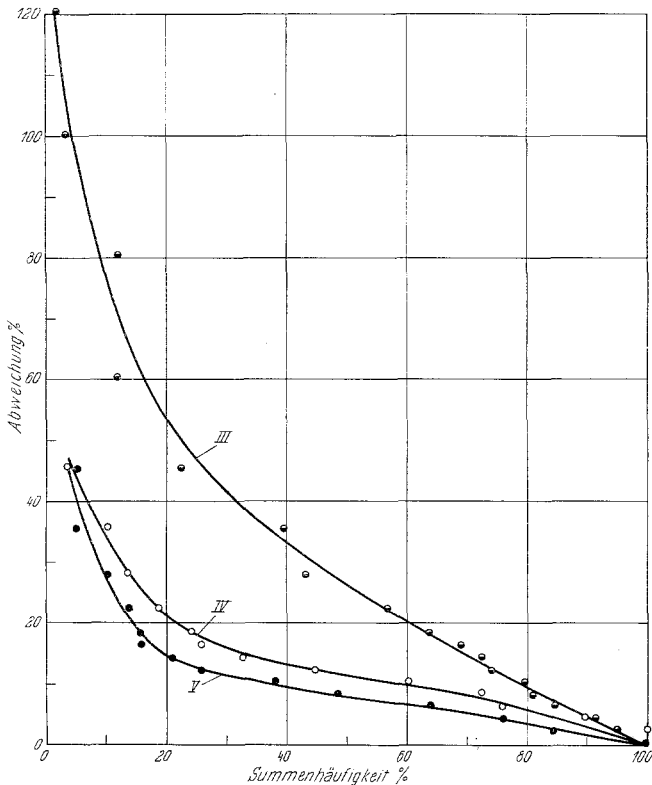


Abb. 9. Summenhäufigkeit der relativen Abweichungen für bewölkten Himmel: III ohne Berücksichtigung der Trübung und der Jahreszeit, IV mit Trübung, V unter Berücksichtigung von Trübung und Jahreszeit

Den Zahlen läßt sich entnehmen, daß ein Urteil über die Güte der gefundenen Beziehungen nur unwesentlich anders ausfallen würde, wenn die Fehlerkurven in Abb. 8 und 9 „besser“ durch die streuenden Punkte gelegt wären bzw. wenn ein Prüfmaterial größeren Umfanges vorliegen würde. Um zu entscheiden, ob durch die Hinzunahme weiterer Parameter eine Verbesserung des Zusammenhanges tatsächlich erreicht wurde oder nicht, darf daher der χ^2 -Test auf die Kurven selbst angewandt werden. Nach der Signifikanz für den Unterschied zwischen jeweils zwei Fehlerverteilungen kann wie folgt gefragt werden:

1. Ist für eine vorgegebene Anzahl der Fälle der Unterschied zwischen den zugehörigen relativen Abweichungen statistisch gesichert?

2. Ist für eine vorgegebene relative Abweichung der Unterschied zwischen den zugehörigen Anzahlen statistisch gesichert?

Tabelle 2 gibt Antwort auf diese beiden Fragen.

Tabelle 2 zeigt, daß für wolkenfreien Himmel durch Berücksichtigung der Jahreszeit neben der Trübung der Zusammenhang bestimmt gebessert

Tabelle 2. *Ergebnis der statistischen Prüfung für den Unterschied zwischen den Fehlerkurven in Abb. 8 und 9*

Unterschied zwischen den Verteilungen	Test gemäß Frage	Sicherheitsschwelle ($> P$)
I—II	1	0,95
	2	0,99
III—IV	1	0,99
	2	0,99
IV—V	1	0,70
	2	0,90

wird; ebenfalls ist es unbestreitbar, daß die Bewölkungsabhängigkeit der Himmelsstrahlung durch Einbeziehen der Trübung sich wesentlich genauer ermitteln läßt. Einzig für den Jahreszeiteinfluß auf die Strahlung des bewölkten Himmels hat das Prüfverfahren keinen sicheren Beweis erbracht¹.

VI. Tagesverlauf der Himmelsstrahlung in Einzelfällen

Im Trübungsfeld der Abb. 7 entspricht jeder Punkt einem Momentanzustand des diffusen Strahlungsfeldes in getrüübter, wolkenfreier Luft und bei gegebener Sonnenhöhe. Daher lassen sich die Verhältnisse z. B. auch in ihrer tageszeitlichen Wandlung anschaulich darstellen. Abb. 10 zeigt vier Fälle, alle vom Jahre 1958, meist mit ausgeprägter Änderung des Dunstgehaltes im Laufe des Tages. Neben den eingetragenen Punkten wurde neben der Tagesstunde jeweils auch der direkt gemessene Trübungskoeffizient $10^3 B$ markiert. Dies soll einen Eindruck vermitteln, wie individuelle Trübungswerte in das statistisch abgeleitete Feld hineinpassen. Obwohl die Streuung um die B -Kurven (hier ohne Berücksichtigung der Jahreszeitenkorrektur) durchaus zulässig ist, vermittelt eine nähere Betrachtung doch die Einsicht, daß im Trübungskoeffizienten keine erschöpfende Maßzahl für die Streustrahlung vorliegt. Das Größenspektrum der Dunstpartikel, das eine Wellenlängenabhängigkeit der Extinktion verursacht und gemäß Formel (2) durch den Exponenten α erfaßt wird,

¹ Bei den Vergleichen wurde Kurve I in Abb. 8 bzw. Kurve III in Abb. 9 als Bezugskurve gewählt, was im Sinne des χ^2 -Tests eine strengere Bedingung für das Prüfergebnis bedeutet.

konnte nämlich nicht berücksichtigt werden. Wie ein Versuch auch unmittelbar zeigte, sind die mit der Schüeppschen Methode gewonnenen α -Werte zu unsicher, als daß durch diese eine zusätzliche Verbesserung der Gesamtbeziehung erzielt werden könnte.

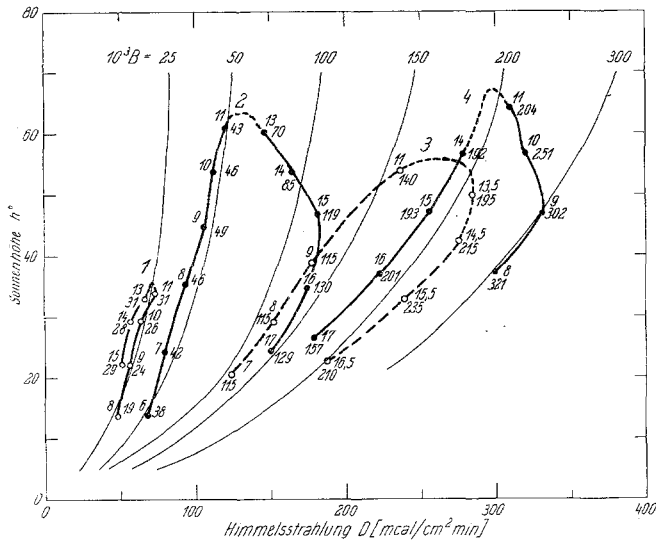


Abb. 10. Tagesverlauf der Himmelsstrahlung an Tagen mit wolkenfreiem Himmel aber verschiedener Trübung. (1): 15. Oktober 1958, (2): 19. Mai 1958, (3): 22. April 1958, (4): 18. Juni 1958. Fein gestrichelte Kurvenabschnitte: Mittagswert interpoliert

VII. Das Gewichtsverhältnis zwischen Trübung und Bewölkung bei der Erzeugung diffuser Strahlung

Der Abb. 7 läßt sich entnehmen, bis zu welchem Grade die Trübung die Strahlung des wolkenfreien Himmels vervielfachen kann, wenn die Werte auf jenen für dunstfreie Luft (Rayleigh-Atmosphäre) bezogen werden. Trägt man die Himmelsstrahlung für verschiedene Sonnenhöhen gegen den Trübungskoeffizienten auf, dann können die gesuchten Bezugswerte für jeweils konstante Sonnenhöhe durch Extrapolation auf $B = 0$ (s. auch Abschnitt 8) ermittelt werden. Ähnlicherweise gibt Abb. 7 auch darüber Auskunft, in welchem Maße die Bewölkung die Streustrahlung vermehrt, wenn als Bezugswert die Strahlung des unbewölkten Himmels genommen wird. Bei diesem zweiten Vergleich genügt es, die Strahlung bei beliebig festgewählter Trübung und Sonnenhöhe zu betrachten, da für den Wolken-einfluß lediglich die Neigung der Geraden im dritten Feld der Abb. 7 bestimmend ist. Das Ergebnis geht aus Abb. 11 hervor.

Die Ordinatenachse gibt mit 100% den jeweiligen Bezugswert der relativen Himmelsstrahlung an. Die ausgezogenen Kurven sind an der B -Skala, die gestrichelt gezeichnete ist, an der N -Skala der Abszissenachse

gemessen. Letztere Kurve gilt nur für Wolken des tiefen und mittleren Niveaus; Fälle mit Cirren wurden nicht untersucht.

Demnach steigt die Himmelsstrahlung mit der Trübung bei 10° Sonnenhöhe bis auf fast das Fünffache, bei 60° Sonnenhöhe auf fast das Siebenfache des jeweiligen Wertes bei dunstfreier Luft an. Dagegen erhöht die Bewölkung die Streustrahlung auf kaum mehr als das Vierfache des Wertes bei wolkenfreiem Himmel. Die Wolkenkurve ist für höhere Be-

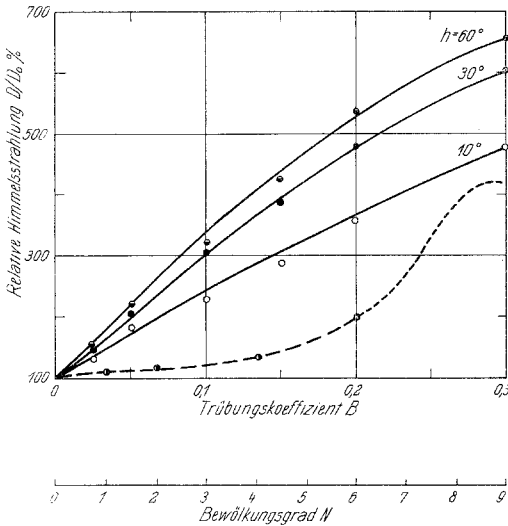


Abb. 11. Relativer Anstieg der Streustrahlung mit der Trübung für verschiedene Sonnenhöhenstufen und mit der Bewölkung. Die kontinuierlich gezeichneten Kurven sind an der B -, die gestrichelte Kurve ist an der N -Skala gemessen

Datenmaterials geprüft werden, ob zwischen Trübung und Bewölkung eine Kopplung tatsächlich besteht oder nicht.

In Tabelle 3 ist der Untersuchungsstoff in vier Klassen nach der Trübung und fünf Gruppen nach dem Bewölkungsgrad eingeteilt.

Die obere Zahl in einem Feld bezeichnet die absolute Anzahl der Fälle. Demnach war z. B. wolkenloser Himmel von der geringen Trübung $10^3 B \leq 50$ in 172 von insgesamt 932 Fällen anzutreffen. Für höhere Bedeckungsgrade und stärkere Trübungen wurde die Tabelle wegen der geringen Anzahl der Fälle nicht mehr erweitert. Die Untersuchung umfaßt wiederum nur Fälle mit tiefer und mittlerer Bewölkung; Fälle mit Cirren oder solche, wo beide Wolkengruppen gemeinsam auftraten, wurden hier fortgelassen. Durch Anwendung des χ^2 -Tests ergibt sich das Resultat, daß die beiden Größen miteinander verbunden sind, und zwar über die Zufallsgrenze von 0,99 hinaus. Dieser Befund ist aus der oberen Zahlen-

bedeckungsgrade ungenügend belegt, doch erhielt auch THAMS [17] für Locarno-Monti etwa 400% maximale relative Himmelsstrahlung bei einer ähnlichen Untersuchung. Der Frage nach der Strahlungsvervielfachung durch Wolken wurde auch in der Arbeit von BENER [3] nachgegangen und es ergaben sich dort für die gleiche Wolkenart Werte von bis über 550%. BENER spricht hier die Vermutung aus, daß bei so hohen Werten eine eventuelle positive Korrelation zwischen Trübung und Bewölkungsgrad eine Rolle spielen könnte.

Unsere Ergebnisse zeigen *gesondert*, bis zu welchem Grade die Trübung einerseits und die Bewölkung andererseits zur Änderung der Himmelsstrahlung beitragen.

Es soll noch auf Grund des

reihe nicht unmittelbar ersichtlich, da wolkenloser Himmel an und für sich viel häufiger vorkommt als solcher von einem bestimmten Bewölkungsgrad bzw. da demzufolge bei unbewölktem Himmel öfter, als bei vorgegebener Bewölkungsstufe gemessen wurde. Befreit man jedoch das Material von diesem Effekt, indem man für jede Bewölkungsgruppe dieselbe Anzahl Beobachtungen annimmt und nachher die so gefundenen Zahlen innerhalb jeweils einer Trübungsklasse in Prozenten ihrer Summe aus-

Tabelle 3. *Häufigkeitsverteilung für den Zusammenhang zwischen Trübung und Bewölkung*

<i>N</i>	$10^3 B$	0—50	51—100	101—150	151—200	Σ
0		172 30,5	137 19,9	48 10,6	22 11,5	379
Spuren		90 20,1	119 22,0	63 17,7	27 17,9	299
1/10		34 15,7	59 22,5	39 22,7	13 17,7	145
2/10		21 16,3	37 23,7	20 19,7	8 18,7	86
3/10		6 17,4	5 11,9	8 29,3	4 34,4	23
Σ		323	357	178	74	932
%		100,0	100,0	100,0	100,0	

drückt, so wird der wahre Sachverhalt deutlich sichtbar. Die unteren, halbfett gedruckten Zahlen geben demnach die relativen Häufigkeiten an, mit welchen sich die einzelnen Bewölkungsstufen jeweils innerhalb einer Trübungsklasse verteilen.

Aussagen über den möglichen Bewölkungseinfluß auf die Himmelsstrahlung, falls die Trübung nicht berücksichtigt wird, sind daher mit Vorbehalt zu deuten.

VIII. Vergleich mit Ergebnissen anderer Autoren

Abschließend sollen für wolkenlosen Himmel unsere Ergebnisse mit jenen anderer Autoren verglichen werden. Es sei darauf hingewiesen, daß für die Station Locarno-Monti die umliegenden Berge die Strahlung von rund 18% horizontnaher Himmelsfläche (volle Halbkugel = 100%) vom Meßinstrument abschirmen (s. Abb. 1). Die Reflexion an den Berghängen ersetzt den Strahlungsverlust nur zu einem kleinen Teil, ausgenommen im Falle einer Neuschneedecke, die in bezug auf den freien Himmel einen Strahlungsüberschuß verursacht.

Die in der Literatur auffindbaren Angaben, wie sich die Strahlung unter verschiedenen Bedingungen auf die einzelnen Himmelszonen verteilt, vermitteln zu wenig Anhaltspunkte, als daß auf solcher Grundlage für die Strahlung des abgeschirmten Himmelsanteils annehmbare Korrekturen abgeleitet werden könnten. Auf eine Umrechnung auf freien Horizont mußte daher verzichtet werden.

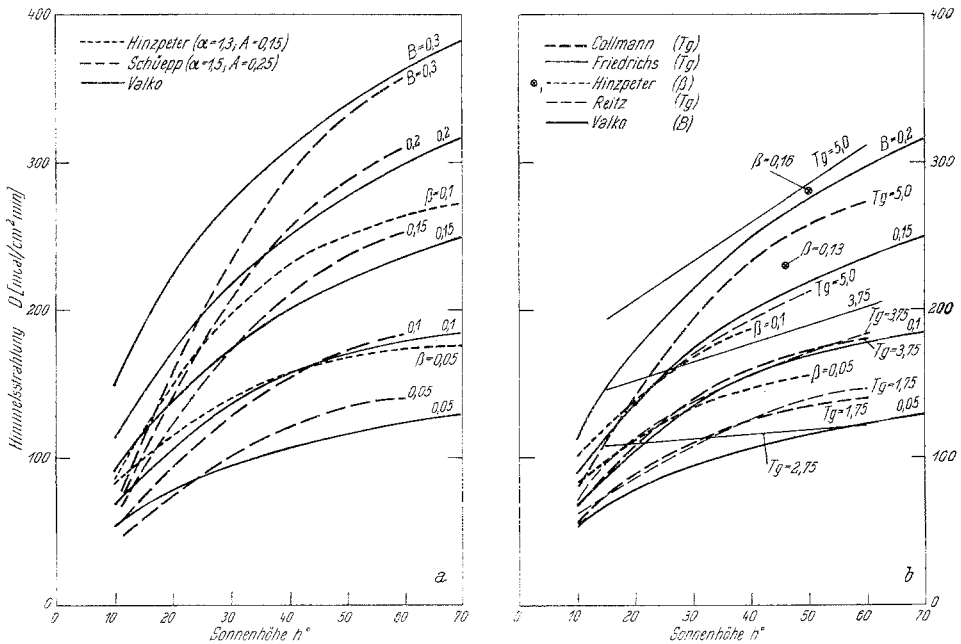


Abb. 12. Die Strahlung des wolkenfreien Himmels in Abhängigkeit von Trübung und Sonnenhöhe nach verschiedenen Autoren. Vergleich mit a) theoretischen und b) empirischen Ergebnissen

Von geringerer Bedeutung ist der Umstand, daß die Angaben verschiedener Autoren oft nicht auf gleiche Solarkonstante und Pyrheliometerskala bezogen sind. Dadurch resultieren Abweichungen von wenigen Prozenten. In der Tat ergeben sich jedoch mehrfach größere Unterschiede als jene, die von einer Verschiedenheit der Rechenunterlagen herrühren können. Zudem sind sowohl unsere als auch fremde Meßergebnisse mit einer gewissen Streuung belastet. Aus diesen Gründen wurde von einer Umrechnung auf gemeinsame Unterlagen abgesehen.

In Abb. 12 ist die Himmelsstrahlung nach der Sonnenhöhe für verschiedene Trübungen aufgetragen, wobei zu jeder Kurve der Wert in Einheiten des vom entsprechenden Autor verwendeten Trübungsmaßes eingetragen wurde. Zur Umrechnung des Ångströmschen Trübungs-koeffizienten β dient die Beziehung $B = 1,07 \beta$; die Verbindung des Trü-

bungsfaktors Tg für Gesamtstrahlung nach Linke zum Schüeppschen Koeffizienten geht aus Tabelle 4 hervor.

Die obere Zeile der Tabelle beruht auf einer Darstellung von HINZPETER [10] für den Zusammenhang $\beta = f(Tg)$; sie wurde aus dieser durch Multiplikation mit 1,07 gewonnen. Die unteren Zahlen ergaben sich aus eigener Bearbeitung eines Aktinometermaterials von Locarno-Monti von etwa 1,5 Jahren, wobei nach beiden Trübungsgrößen ausgewertet und der jeweilige Wasserdampfgehalt (aus Rotfiltermessungen nach der Schüeppschen Methode ermittelt) mitberücksichtigt wurde.

In der linken Hälfte der Abb. 12 ist der Vergleich zu theoretischen Ergebnissen von SCHÜEPP [14] und HINZPETER [9], in der rechten Hälfte zu empirischen von HINZPETER [9], COLLMANN [5], REITZ [13] und FRIED-

Tabelle 4. Empirische Beziehung zwischen Trübungskoeffizient B und Trübungsfaktor Tg

Tg	1	2	3	4	5	6	7
HINZPETER	0	5	57	109	160	213	—
$10^3 B$							
VALKO	0	18	63	107	170	230	280

RICHS [8] dargestellt. Um nicht in Tabellen und Kurvendarstellungen der angeführten Arbeiten interpolieren zu müssen, wurde auf Kurven von jeweils gleichem B -Wert verzichtet. Die theoretischen Kurven weichen beträchtlich voneinander ab; unsere verlaufen etwa in der Mitte zwischen den hohen Werten von HINZPETER und den tiefen von SCHÜEPP.

Im allgemeinen stimmen die empirischen Ergebnisse besser überein. Am meisten weichen die Werte von FRIEDRICHS von den übrigen ab, sowohl ihrem Betrag nach, als auch was die Kurvenform betrifft. Für mittlere Trübungen nähern sich unsere Kurven am besten jenen von COLLMANN an. Für klare Luft ergeben unsere Messungen die kleinste Himmelsstrahlung; dies dürfte, wenigstens zum Teil, auf die verminderte Hangreflexion infolge geringer Streustrahlung zurückzuführen sein. In diesem Zusammenhang sei nochmals darauf hingewiesen, was zu Abb. 5 auf S. 345 für den Fall allumhüllender Dunstumgebung gesagt wurde. Im Gegensatz dazu bieten die Hangflächen bei großer Luftklarheit den schärfsten Helligkeitskontrast zum Himmel. Dadurch läßt sich auch erklären, warum unsere Extrapolation auf $B=0$ (Abb. 13) so niedrige Strahlungswerte für den Rayleigh-Himmel ergibt.

Abb. 13 zeigt die Verhältnisse für den Rayleigh-Himmel nach verschiedenen Autoren. Die theoretischen Werte von DEIRMENDJIAN und SEKERA sowie von SCHÜEPP sind nur für wenige Sonnenhöhen berechnet worden, daher wurde durch die Punkte keine Kurve gelegt. Die Kurve von REITZ ergibt sich durch Mittelung seiner extrapolierten Werte für Frankfurt und das Taunus-Observatorium. FRIEDRICHS erhielt seine Werte unter Verwendung des Trübungsfaktors für Kurzstrahlung. Unverständlich ist die hier gefundene Abhängigkeit von der Sonnenhöhe. Zum Teil wegen der erwähnten Horizonteinschränkung kann unsere Kurve bis

um den Faktor 2 zu tief liegen¹. Sehr wahrscheinlich liegen deswegen die Trübungskurven in Abb. 11 zu hoch. Jedoch ergibt sich dort auch unter Annahme doppelt so großer Bezugswerte, daß die relative Strahlungsvermehrung infolge Trübung einerseits und infolge Bewölkung andererseits von der gleichen Größenordnung ist. Auf empirischer Grundlage

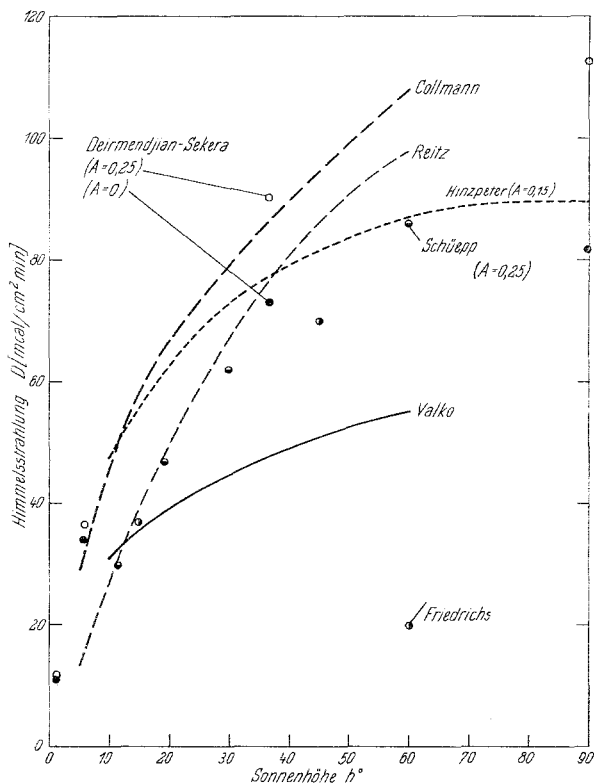


Abb. 13. Die Strahlung des Rayleigh-Himmels in Funktion der Sonnenhöhe nach verschiedenen Autoren

kann die Strahlung des Rayleigh-Himmels, wie die unterschiedlichen Ergebnisse zeigen, nur ungenau ermittelt werden.

Für die Anregung und Förderung der Untersuchung ist der Verfasser dem Leiter des Osservatorio Ticinese, Herrn J. C. THAM, zu Dankbarkeit verpflichtet. Die vorliegende Arbeit wurde teilweise mit Mitteln des „Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung“ durchgeführt.

¹ Nach SCHÜEFF [14] könnten in diesem Zusammenhang noch der Tagesgang der Nullpunktsdepression bei der Registrierung der Himmelsstrahlung sowie die UV-Absorption der Glashalbkugeln eine Rolle spielen. Diese beiden Effekte sollen noch abgeklärt werden.

Literatur

1. ÅNGSTRÖM, A.: On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air, I. Geograf. Ann. **11**, 156 (1929).
2. BENER, P.: Der Einfluß der Bewölkung auf die Himmelsstrahlung. Verh. Schweiz. Naturf. Ges. Zürich 1946, S. 88.
3. BENER, P.: Der Einfluß der Bewölkung auf die Himmelsstrahlung. Arch. Met. Geoph. Biokl. B **12**, 442 (1963).
4. CHANDRASEKHAR, S.: Radiative Transfer. Oxford, 1950.
5. COLLMANN, W.: Messungen zur Beziehung zwischen Himmelsstrahlung und Trübung. Met. Rundsch. **17**, 135 (1964).
6. DEIRMENDJIAN, D., and Z. SEKERA: Global Radiation Resulting from Multiple Scattering in a Rayleigh Atmosphere. Tellus **6**, 382 (1954).
7. DIRMHIRN, J.: Untersuchungen der Himmelsstrahlung in den Ostalpen mit besonderer Berücksichtigung ihrer Höhenabhängigkeit. Arch. Met. Geoph. Biokl. B **2**, 301 (1951).
8. FRIEDRICHS, H.: Die Himmelsstrahlung als Funktion des Trübungsfaktors T und des Kurzstrahlungsfaktors T_K für einzelne Sonnenhöhenstufen. Met. Rundsch. **6**, 145 (1953).
9. HINZPETER, H.: Einfache Messungen und Rechnungen zur Globalstrahlung und zur diffusen Himmelsstrahlung I, II und III. Z. Met. **9**, 308 (1955), **10**, 100 (1956) und **11**, 1 (1957).
10. HINZPETER, H.: Über Trübungsbestimmungen in Potsdam in den Jahren 1946 und 1947. Z. Met. **4**, 1 (1950).
11. LINKE, F.: Transmissionskoeffizient und Trübungsfaktor. Beitr. Phys. fr. Atm. **10**, 91 (1922).
12. LINSLEY, R. K., M. A. KOHLER, and J. L. H. PAULHUS: Applied Hydrology. New York, 1949.
13. REITZ, G.: Pyranometrische Untersuchungen. Gerl. Beitr. Geophys. **55**, 253 (1939).
14. SCHÜEPP, W.: Direct and Scattered Radiation Reaching the Earth. Chapta 4 in N. ROBINSON: Solar Radiation, p 111, Elsevier Publishing Company, Amsterdam-London-New York, 1966.
15. SCHÜEPP, W.: Die Bestimmung der Komponenten der atmosphärischen Trübung aus Aktinometermessungen. Arch. Met. Geoph. Biokl. B **1**, 257 (1949).
16. SZESZTAY, K.: A grafikus korrelációvizsgálat néhány módszere. (Einige Methoden der graphischen Korrelationsbestimmung.) Hidrológiai Közlöny, Budapest, **34**, 116 (1954).
17. THAMS, J. C.: Der Einfluß von Bewölkungsmenge und -art auf die Größe der diffusen Himmelsstrahlung. Geofis. pura appl. **48**, 181 (1961).
18. VALKO, P.: The Diffuse Sky Radiation as a Function of Meteorological and Environmental Factors. Proceedings, 3rd Int. Biomet. Congr. Pau, 1963. Oxford (im Druck).
19. VALKO, P.: Vereinfachtes Auswerteverfahren für die Schüeppsche Methode zur Bestimmung der atmosphärischen Trübung. Arch. Met. Geoph. Biokl. B **11**, 75 (1961).
20. VALKO, P.: Untersuchung über die vertikale Trübungsschichtung der Atmosphäre. Arch. Met. Geoph. Biokl. B **11**, 143 (1961).
21. VALKO, P.: Über das Verhalten des atmosphärischen Dunstes am Alpen-südfuß. Arch. Met. Geoph. Biokl. B **12**, 458 (1963).

Adresse des Verfassers: Dr. P. VALKO, Osservatorio Ticinese, 6605 Locarno-Monti, Schweiz.