



Berichte des Deutschen Wetterdienstes

181

**Ermittlung der Sonnenscheindauer aus pyranometrisch
gemessenen Bestrahlungsstärken der Global- und
Himmelsstrahlung**

von
Dietrich Sonntag
Klaus Behrens



Zitationsvorschlag:

Sonntag, Dietrich; Behrens, Klaus: Ermittlung der Sonnenscheindauer aus pyranometrisch gemessenen Bestrahlungsstärken der Global- und Himmelsstrahlung. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1992.
(Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 181)

ISSN der Onlineausgabe: 2194-5969

ISSN der Druckausgabe: 0072-4130

Nutzungsbedingungen



Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz

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

Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Herausgeber und Verlag: :

Deutscher Wetterdienst
Frankfurter Straße 135
D- 63067 Offenbach am Main

Internet: www.dwd.de
Mail: bibliothek@dwd.de

Inhalt	Seite
1 Definition der meteorologischen Größe „Sonnenscheindauer“	5
2 Verwendung von Sonnenscheindauerdaten	6
3 Meßgeräte für die meteorologische Größe „Sonnenscheindauer“	9
3.1 Standardgerät	9
3.2 Sonnenscheindauergeber	9
3.3 Internationaler Vergleich von elektronischen Sonnenscheindauergebern	11
3.4 Sonnenscheindauerwerte aus Messungen mit kalorimetrisch arbeitenden Strahlungsmeßgeräten	11
4 Vergleich der kalorimetrischen Methoden zur Bestimmung der Sonnenscheindauer	12
4.1 Vergleiche in Potsdam, bezogen auf die pyrheliometrisch bestimmten $t_{s,St}$ -Werte nach der Methode 1	12
4.1.1 Meß- und Auswertemethodik	12
4.1.2 Ergebnisse	12
4.1.2.1 Vergleich der verwendeten Methoden	12
4.1.2.2 Überprüfung der Konstanten in der Schwellenwertfunktion	19
4.2 Vergleiche in Potsdam, Heiligendamm und Fichtelberg, bezogen auf die pyranometrisch bestimmten $t_{s,p}$ -Werte nach der Methode 2	19
4.2.1 Meß- und Auswertemethodik	19
4.2.2 Ergebnisse	21
4.3 Vergleiche in Potsdam von CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheindauerwerten, bezogen auf die mit der AFMS-2 pyranometrisch bestimmten $t_{s,20/10}$ -Werte nach der Methode 4	22
4.3.1 Meß- und Auswertemethodik	22
4.3.2 Ergebnisse	22
4.4 Berechnung der Tages-, Monats- und Jahressummen der Sonnenscheindauer aus der täglichen, monatlichen oder jährlichen Bestrahlung durch die Globalstrahlung nach der Methode 5 für Heiligendamm	23
5 Schlußfolgerungen	25
6 Zusammenfassung/Summary	26
7 WMO-Vergleich von automatisch arbeitenden Sonnenscheindauermeßgeräten	27
8 Literatur	27
9 Anhang (Tabellen)	30

Zusammenfassung:

Ausgehend von der Definition des meteorologischen Parameters „Sonnenscheindauer“ werden Meßgeräte und Meßmethoden zur Bestimmung der Sonnenscheindauer beschrieben. Auf der Grundlage eines umfangreichen Testprogramms werden die verschiedenen Methoden miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Genauigkeit bewertet.

Abstract:

Starting with the definition of the meteorological parameter "Sunshine Duration" instruments and methods of observation for the determination of the sunshine duration are described. On the basis of a comprehensive test program, different methods are compared and assessed with regard to their accuracy.

1 Definition der meteorologischen Größe „Sonnenscheindauer“

Definitionen des Begriffs „Sonnenscheindauer“ findet man in der älteren meteorologischen Literatur wenig. Sie sind auch nicht einheitlich, was Schwierigkeiten bei der Definition vermuten läßt. Erst im letzten Jahrzehnt sind verstärkt Versuche unternommen worden, zu einer einheitlichen Definition zu gelangen. Im folgenden wird zunächst die Problematik der Definition des Begriffs „Sonnenscheindauer“ aufgezeigt.

WAGNER (1927) wählte als Sonnenscheindauer ein bestimmtes Verhältnis der Intensität der direkten Sonnenstrahlung zu derjenigen der diffusen Himmelsstrahlung. Eine Definition allgemeiner Art hat BIDER (1958) gegeben: „Meist versteht man unter Sonnenscheindauer diejenige Dauer, während welcher die Intensität der Sonnenstrahlung einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, wobei bei den meisten Apparaturen noch ein kleiner, wohl nicht wesentlich ins Gewicht fallender Teil der diffusen Himmelsstrahlung in Sonnennähe hinzukommt.“ – Hierbei ist über die Größe des Schwellenwertes nichts ausgesagt worden, d.h., diese Festlegung wurde offengelassen.

Vor einigen Jahren wurde ein neuer Versuch einer Definition des Begriffs Sonnenscheindauer von der WMO¹ (1983) im „Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation“ vorgenommen. Es wird gesagt, daß der Begriff „Sonnenschein“ mit der Beleuchtungsstärke (Helligkeit) der Sonnenscheibe und des im Hintergrund befindlichen diffusen Himmelslichtes verbunden ist. Der Begriff soll mehr Beziehung zur Optik haben als zur Wärmestrahlung, obgleich beide Aspekte untrennbar verbunden sind. Um eine Definition des „Sonnenscheins“ für meteorologische Zwecke zu geben, die eine Messung zuläßt, wird der physikalische Effekt des Sonnenscheins an eine meßbare physikalische Größe gebunden. Das wird erreicht, wenn das Auftreten des Sonnenscheins als Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung an der Kontrastschwelle zwischen dem Schatten eines optisch schwarzen Objektes, welches sich im Strahlengang über einer horizontalen diffusen weißen Fläche befindet, und dieser Fläche selbst definiert wird.

Mit dieser Definition sollten die Schwierigkeiten überwunden werden, die meßtechnisch mit dem bisher meist verwendeten Sonnenscheinautographen nach CAMPBELL-STOKES auftreten, der von der WMO zur Messung der Sonnenscheindauer empfohlen worden war. Entsprechend den Empfehlungen der WMO (1962, s. auch 1971) wurde 1962 festgelegt, daß der Sonnenscheinautograph nach CAMPBELL-STOKES als „Interim Reference Sunshine Recorder“, abgekürzt IRSR, angesehen werden soll, da die verschiedenen Typen von Sonnenscheindauer-Meßgeräten in den Monatssummen Differenzen bis zu 20 % zeigten.

Wird ein anderes Gerät als der IRSR verwendet, soll angegeben werden: „Diese veröffentlichten Werte wurden auf das IRSR-

Standard reduziert“ oder „um die angegebenen Werte auf das IRSR-Standard zu reduzieren, müssen sie um x Prozent vergrößert (verkleinert) werden“. Somit sollen sich die systematischen Differenzen der einzelnen Gerätetypen auf $\pm 5\%$ reduzieren lassen.

Die Ansprechschwelle des CAMPBELL-STOKES schwankt nach diesen Angaben zwischen 70 und 280 W/m² in Abhängigkeit vom Papier des Streifens, vom Feuchtegehalt des Papiers und von der atmosphärischen Trübung. M. DIEM (1977) fand einen Wert von 150 W/m². Die WMO (1977) hat auf der CIMO²-VII-Tagung eine Schwelle von 200 W/m² $\pm 10\%$ für verbindlich erklärt.

Es ist bekannt, daß bei der Auswertung der CAMPBELL-STOKES-Streifen Fehler gemacht werden können. Auswertevorschriften wurden z.B. von PELZL (1953) und LEVERT (1961) gegeben. Am ausführlichsten hat BIDER (1958) die Fehler des CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheinautographen untersucht und zusammengestellt. Er berichtete eingehend über den Einfluß der unterschiedlichen Schwellenintensität und des sogenannten „Überbrennens“. Ferner stellte er Vergleiche mit dem Gerät von MAURER (1914) an. Das IRSR-Standard ist kein Idealgerät, was schon durch die Bezeichnung „Interim“ verdeutlicht wird. Die Sonnenscheindauer wird auf Zehntelstunden-Genauigkeit ausgewertet, wobei schon durch verschiedene Auswerter im Sommer Fehler in der Tagessumme von 0,5 bis 1 Stunde und im Winter von 0,2 bis 0,3 Stunden auftreten können. Das sind im Sommer 4 bis 8 % und im Winter 2 %. Die gemessene Sonnenscheindauer eines Tages wird prozentual auf die astronomisch mögliche bezogen. Da bei der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer keinerlei Schwelle angenommen wird, kann sie durch Messung mit Sonnenscheinautographen auch nie erreicht werden. Das bedeutet, daß bei den Prozentangaben eine neue Fehlerquelle hinzukommt, da 100 % nie erreicht werden.

In Vorbereitung der CIMO-VIII-Tagung sind in England und Frankreich neue Messungen an der Ansprechschwelle des CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheinautographen durchgeführt worden (siehe WMO (1981 a) und (1981 b)).

In England wurde die Untersuchung von PAINTER (1981) von Mai 1979 bis Februar 1980 vorgenommen. Die Ergebnisse sind teils in aussagekräftigen Abbildungen dargestellt, denen einige Daten entnommen wurden. PAINTER führte einen Vergleich durch zwischen einem in England hergestellten CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheinautographen mit ebenfalls in England hergestellten Streifen und einem parallaktisch montierten, der Sonne automatisch nachgeführten Pyrheliometer. Jede Minute wurde ein Wert gemessen. Die Schwellenwerte des Ein- bzw.

¹ World Meteorological Organization

² Commission for Instruments and Methods of Observation

Aussetzens der Brennspur wurden zwischen 20 und 240 W/m² in Schritten von 20 W/m² ausgewertet. Die Mittelwerte sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Sehr geringe Schwellenwerte treten bei durch Bewölkung verursachter, wechselnder Strahlung auf. Am 14. Mai und 25. Dezember 1979 wurden bei Strahlungswetter ohne Bewölkung 150 und 210 W/m², dagegen am 17. Januar 1980, 25. Juni 1979 und 14. August 1979 bei wechselnder Strahlung 50, 10 und weniger als 5 W/m² und am dunstigen 19. Februar 1980 205 W/m² festgestellt. Bei minimalem Überbrennen wurde im Sommer ein Schwellenwert von ungefähr 130 W/m² und im Winter von ungefähr 200 W/m² gefunden. An Tagen mit wechselnder Strahlung war die mit dem Pyrheliometer gemessene Sonnenscheindauer relativ unabhängig vom Schwellenwert und mit zunehmender Zahl der Schwellenwertdurchgänge proportional niedriger als der konstante Wert von 0,9 Stunden beim CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheinautographen (Tabelle 2).

Durch den Überbrenneffekt, der im Sommer stärker als im Winter ist, ergibt sich eine jahreszeitliche Abhängigkeit des Schwellenwertes. Vom November bis Februar beträgt er 120 W/m², vom September bis Oktober 62 W/m² und vom Mai bis August 32 W/m². In 41 Fällen wurde die Schwelle frühmorgens zu 193 W/m² und in 44 Fällen abends zu 154 W/m² gefunden. Wenn es nachts geregnet hatte, wurden sogar 285 W/m² ermittelt. Die geringste Sonnenhöhe, bei der ein Ansprechen stattfand, wurde mit 2,3° angegeben. An 3 Tagen fand PAINTER Schwellenwerte über 400 W/m². Mit in Frankreich hergestellten Streifen wurden bei einem früheren Vergleich über einen Zeitraum von zwei Jahren 6 % weniger Sonnenscheindauer ermittelt.

Auf Grund dieser Untersuchungen zog die WMO (1981 a) folgende Schlüsse:

1. Der Universalsonnenscheinautograph gibt oft falsche Werte der Sonnenscheindauer, die je nach den örtlichen Gegebenheiten und den Übergangsbedingungen variieren.
2. Ein Registriergerät, das die Bestrahlungsstärke mißt, kann und sollte nicht gewaltsam so angepaßt werden, daß es die gleichen Werte wie der Universalsonnenscheinautograph gibt.
3. Der Universalsonnenscheinautograph sollte künftig nur verwendet werden, wenn man der Meinung ist, daß seine Anwendung von Nutzen ist.
4. Da der Schwellenwert bei hellem Sonnenschein nicht kritisch ist, kann ein Wert von 200 W/m² benutzt werden.
5. Die Anwender sollten in Erwägung ziehen, ob auch Netze von Geräten, welche auf der Bestrahlungsstärkemessung basieren, einen meteorologischen Zweck hinsichtlich der Sonnenscheindauermessung erfüllen. (Solche Geräte geben unterschiedliche Sonnenscheindauerwerte zum CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheinautographen).

Die Beurteilung des Universalsonnenscheinautographen durch die WMO (1981 a) lautet dahingehend, daß er lediglich eine Kennziffer der Sonnenscheindauer (index for sunshine duration) gibt und als Referenzgerät durch ein anderes Gerät abgelöst werden sollte. Als neues Referenzgerät wird ein Standard-Pyrheliometer mit einem Schwellenwert vorgeschlagen. Die in Frankreich durchgeführten Messungen zum Schwellenwert sind in WMO (1981 b) erwähnt. Die mit einem IRSR-CAMPBELL-STOKES und einem Pyrheliometer über ein Jahr lang gemessenen Werte wurden hinsichtlich der Schwellenwerte 200 und 120 W/m² ausgewertet. Die mitgeteilten Ergebnisse sind:

1. Tägliche Sonnenscheindauerwerte, die mit dem Pyrheliometer gemessen wurden, liefern gegenüber den Werten des IRSR-

CAMPBELL-STOKES in bezug auf den Mittelwert und die Streuung bessere Ergebnisse mit einem Schwellenwert von 120 statt von 200 W/m².

2. Das Verhältnis der monatlichen Sonnenscheindauerwerte, gemessen mit dem Pyrheliometer mit einem Schwellenwert von 120 W/m², zu denen des IRSR-CAMPBELL-STOKES liegt für die einzelnen Monate zwischen 0,974 und 1,032 mit einem Jahresmittelwert von 0,993.

3. Das Verhältnis der monatlichen Sonnenscheindauerwerte, gemessen mit dem Pyrheliometer mit einem Schwellenwert von 200 W/m², zu denen des IRSR-CAMPBELL-STOKES liegt für die einzelnen Monate zwischen 0,879 und 0,977 mit einem Jahresmittelwert von 0,928.

4. Ein etwas unter 120 W/m² liegender Schwellenwert wäre statistisch gesehen besser. Diese Aussage steht in Übereinstimmung mit einer Untersuchung von SCHÜEPP (1964), die 105 W/m² ergab.

Da auf keinen Fall der Schwellenwert von 200 W/m² bestätigt werden konnte, wird in WMO (1981 b) ein Schwellenwert von 105 W/m² zur Diskussion gestellt. In Kenntnis der soeben ausführlich geschilderten neuen Ergebnisse hinsichtlich des Schwellenwertes und der Schwierigkeiten, die beim IRSR-CAMPBELL-STOKES auftreten, hat nun die WMO (1982) auf der CIMO-VIII-Tagung beschlossen, ein Standard-Pyrheliometer mit einem Schwellenwert von 120 W/m² als neues Referenzgerät für die Messung der Sonnenscheindauer zu empfehlen. Diese Empfehlung ist meßtechnisch und physikalisch klar und sehr zu begrüßen. Sie wirft aber die Frage auf, wie nun die Sonnenscheindauer in der Praxis im Netz der meteorologischen Stationen gemessen werden soll, denn ein parallaxtisch montiertes, automatisch der Sonne nachgeführtes Pyrheliometer ist ein relativ teures Instrument, bei dem noch besondere Schutzmaßnahmen im Falle von Niederschlägen in flüssiger und fester Form getroffen werden müßten. Das Geräteinnere müßte mindestens hermetisch durch ein Filter abgeschlossen werden. Außerdem muß die Deklinationseinstellung öfter vorgenommen werden.

2 Verwendung von Sonnenscheindauerdaten

Im folgenden soll versucht werden, die Frage zu beantworten, wozu die Größe „Sonnenscheindauer“ benötigt wird. BIDER (1958) spricht von einem wichtigen klimatischen Element für den Strahlungshaushalt, während VASHISTHA, ROYCHOUDHURY und DATAR (1979) von einem wichtigen meteorologischen Parameter sprechen, der ein inverses Maß für den Bedeckungsgrad des Himmels mit Wolken ist. Außerdem sei die Sonnenscheindauer ein wichtiger Parameter für die Pflanzenphysiologie, z. B. bei Untersuchungen der Photosynthesen. Ferner würde die Sonnenscheindauer bei der Abschätzung der Evaporation und der Evapotranspiration benötigt. Eine große Anzahl Arbeiten beschäftigt sich damit, aus der Größe „Sonnenscheindauer“ die Bestrahlungsstärke der Globalstrahlung herzuleiten. Einige wenige Ansätze seien als Beispiel – nach einer Zusammenstellung bei ROBINSON (1966) – angeführt. Da noch kein international empfohlenes Symbol für die Sonnenscheindauer (in Stunden) bekannt ist, wird hier „t_s“ vorgeschlagen. Der Index s ist das Symbol für die direkte Sonnenstrahlung. Es ist dabei noch anzugeben, ob es sich um eine Stunden-, Tages-, Monats- oder Jahressumme handelt.

Es bedeuten ferner $t_{s,max}$ die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer, H_g die Bestrahlung durch die Globalstrahlung und $H_{g,wolo}$ die Bestrahlung durch die Globalstrahlung bei wolkenlosem Himmel über einen bestimmten Zeitraum, \bar{a} den mittleren Anteil der Bestrahlung durch die Globalstrahlung an einem vollkommen bewölkten Tag zu demjenigen bei einem wolkenlosen Tag.

ANGSTRÖM (1924) fand für tägliche Werte

$$H_g = H_{g,wolo} \left[\bar{a} + (1 - \bar{a}) \frac{t_s}{t_{s,max}} \right] \quad (1)$$

Für monatliche Durchschnittswerte für Nordamerika gaben FRITZ und MacDONALD (1949)

$$H_g = H_{g,wolo} \left(0,35 + 0,61 \frac{t_s}{t_{s,max}} \right) \quad (2)$$

an. v. SCHÖNERMARK, WUCHOLD und FREYDANK (1973) fanden die ANGSTRÖM-Formel für das Gebiet der ehemaligen DDR brauchbar und bestimmten die Konstanten $\bar{a} = a'$ und $(1 - \bar{a}) = b'$ durch Regression. Für $H_{g,wolo}$ setzten sie eine RAYLEIGH-Atmosphäre ein. Es zeigte sich, daß aus b' nicht ohne weiteres a' als Ergänzung zu 1 berechnet werden kann. Sowohl für monatliche als auch tägliche Werte kann danach die Formel

$$H_g = H_{g,wolo} \left(0,21 + 0,61 \frac{t_s}{t_{s,max}} \right) \quad (3)$$

verwendet werden. LAEVASTU (1960) sowie FOKEN und FOKEN (1979) verwendeten als Funktion für $H_{g,wolo}$ eine Konstante multipliziert mit dem Produkt der maximalen Sonnenhöhe und der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer am betreffenden Tage. Diese Funktion ist eine sehr grobe Annäherung an Normalwerte $H_{g,wolo}$. Als Normalwerte werden meist die von COLLMANN (1953/54) für Hamburg veröffentlichten Werte für eine RAYLEIGH-Atmosphäre angesehen. Eine Annäherung an diese Normalwerte erhält man mit der folgenden täglichen Bestrahlung in $J\ cm^{-2}$

$$H_{g,wolo} \approx 3,6 h_{\odot,max} t_{s,max} K(N) \quad (4)$$

mit

$$K(N) = 1,255 - 0,15 \sin(0,9863 N - 80,6) - 0,04 \sin(1,9726 N - 241) \quad (5)$$

N ist in Gleichung (5) die Tageszahl im Jahr, wobei $N = 1$ für den 1. Januar und $N = 365$ für den 31. Dezember im Normaljahr und $N = 366$ für den 31. Dezember im Schaltjahr ist. Die Tageszahl N als ganze Zahl gilt für 0 Uhr. Die Tageszeit kann als Bruch von N in Tagen berücksichtigt werden. Z. B. ist 12 h dann $N + 0,5$. Man kann N nach dem Nautical Almanac Office (1986) berechnen nach

$$N = INT(275K/9) - (INT((9+K)/12))(1 + INT((J+2-4INT(J/4))/3)) + I - 30 + UTC/24. \quad (6)$$

Die koordinierte Weltzeit (Coordinated Universal Time) UTC kann erhalten werden mit

$$UTC = MEZ - 1\ h = MESZ - 2\ h \quad (7)$$

mit MEZ = mitteleuropäische Zeit bezogen auf die geographische Länge 15° Ost bzw. MESZ = mitteleuropäische Sommer-

zeit. In (6) muß eigentlich UT statt UTC stehen, doch kann der kleine Unterschied vernachlässigt werden. Die UTC wird mittels Zeitzeichen von den Rundfunksendern verbreitet.

In (6) bedeutet J die vierstellige Jahreszahl (z. B. 1987), K die Monatszahl ($1 \leq K \leq 12$) und I die Tageszahl im Monat ($1 \leq I \leq 31$). Der Ausdruck INT gibt an, daß nur der Teil der Zahl vor dem Komma benutzt werden darf. Beispiel: $INT(-6,8) = -6$. Die Formel (6) ist gültig für alle Jahre außer Jahrhundertjahre, die nicht durch 400 teilbar sind. Die Formel ist also gültig für das Jahr 2000, aber nicht für 1900 oder 2100. Man kann N auch nach Tabelle 3 berechnen. In der Tabelle sind die Werte für 0^h für den jeweils 0. Tag des Monats angegeben. Der 0. Tag ist identisch mit dem letzten Tag des Vormonats. Zum Tabellenwert für den betreffenden Monat kann dann leicht I , die Tageszahl im Monat und der Tagesbruch der Tageszeit addiert werden. Z. B.: 15. Juni 12 Uhr gibt im Normaljahr $N = 151 + 15 + 0,5 = 166,5$. Es ist in (4) $h_{\odot,max}$ die maximale Sonnenhöhe des Tages in dezimalen Grad und $t_{s,max}$ die an diesem Tage astronomisch mögliche Sonnenscheindauer in dezimalen Stunden. $h_{\odot,max}$ und $t_{s,max}$ sind Funktionen der geographischen Breite φ und der Deklination der Sonne δ_{\odot} . Somit wird auch $H_{g,wolo}$ eine Funktion von φ und δ_{\odot} . Außerdem ist wegen der Korrektionsfunktion $K(N)$ der Wert von $H_{g,wolo}$ noch zeitabhängig. δ_{\odot} ist ebenfalls eine zeitabhängige Funktion.

Der Wert von δ_{\odot} kann für die nächsten Jahre näherungsweise auf $\pm 12'$ berechnet werden, d. h. unter Vernachlässigung des vierjährigen Schaltjahrzyklus, der Präzession, der Nutation, der Planeten- und der Mondströmung, der genauen geographischen Länge, der Refraktion und der sekularen Änderungen. Es ist dann δ_{\odot} zu berechnen aus

$$\sin \delta_{\odot} = \sin 23^\circ,44 \sin \lambda_{\odot}. \quad (8)$$

Die geozentrische scheinbare ekliptikale Länge der Sonne, bezogen auf das mittlere Äquinoktium, erhält man in dezimalen Grad auf $\pm 30'$ nach

$$\lambda_{\odot} = 279^\circ,3 + 0,9856 N + 1^\circ,92 \sin(356^\circ,6 + 0,9856 N). \quad (9)$$

Gleichung (9) ergibt sich aus

$$\lambda_{\odot} = L_{\odot} + \frac{180}{\pi} 2 e \sin M_{\odot} \quad (10)$$

mit der numerischen Exzentrizität der Erdbahn $e = 0,01672$, der geozentrischen scheinbaren mittleren Länge, bezogen auf das mittlere Äquinoktium des Datums, angegeben in dezimalen Grad

$$L_{\odot} = 279^\circ,3 + 0,9856 N \quad (11)$$

und der mittleren Anomalie der Sonne, angegeben in dezimalen Grad

$$M_{\odot} = 356^\circ,6 + 0,9856 N = L_{\odot} + 77^\circ,3. \quad (12)$$

$$\pi = 3,14159 \dots$$

Es kann somit auch die Formel

$$\lambda_{\odot} = L_{\odot} + 1^\circ,92 \sin(L_{\odot} + 77^\circ,3) \quad (13)$$

verwendet werden. Man erhält mit δ_{\odot} dann auf $\pm 12'$

$$h_{\odot,max} = 90 - \varphi + \delta_{\odot} \quad (14)$$

und auf ± 2 min in dezimalen Stunden

$$t_{s,max} = \frac{1}{7,5} \arccos \left[\frac{\sin(-50'/60)}{\cos \varphi \cos \delta_{\odot}} - \tan \varphi \tan \delta_{\odot} \right] \quad (15)$$

Man kann $t_{s,max}$ auch mit Hilfe des Sonnenauf- und -untergangs berechnen. In Stunden Zonenzeit für die geographische Länge der Zonenzeit λ_Z , die geographische Länge λ und die Zeitgleichung Z nach (26) ist der

Sonnenaufgang:

$$t_A = 12^h - Z - t_{\odot,0} - \frac{\lambda - \lambda_Z}{15} \quad (16)$$

und der Sonnenuntergang:

$$t_U = 12^h - Z - t_{\odot,0} - \frac{\lambda - \lambda_Z}{15} \quad (17)$$

Für $\lambda_Z = 15^\circ$ bekommt man die MEZ, für $\lambda_Z = 30^\circ$ die MESZ.

$$t_{\odot,0} = \frac{1}{15} \arccos \left[\frac{\sin(-50'/60)}{\cos \varphi \cos \delta_{\odot}} - \tan \varphi \tan \delta_{\odot} \right] \quad (18)$$

$$t_{s,max} = t_U - t_A \quad (19)$$

Das Glied mit $\sin(-50'/60)$ berücksichtigt die Refraktion beim Sonnenauf- und -untergang und bezieht sich auf den Oberrand der Sonne. Bei Weglassen dieses Gliedes ist bei $\varphi = 52^\circ,5$ $t_{s,max}$ um 11 min fehlerhaft und die Auf- und Untergangszeiten jeweils um 5,5 min. Mit den angegebenen Formeln erhält man t_A und t_U auf ± 2 min.

Es werden im folgenden noch einige Näherungsformeln angefügt, da z. B. später noch $\sin h_{\odot}$ mit h_{\odot} der Sonnenhöhe benötigt wird.

$$\sin h_{\odot} = \sin \varphi \sin \delta_{\odot} + \cos \varphi \cos \delta_{\odot} \cos t_{\odot} \quad (20)$$

t_{\odot} ist in (20) der Stundenwinkel der wahren Sonne

$$t_{\odot}^h = mZ + Z \pm 12^h, \quad (21)$$

wobei

$$0 \leq t_{\odot}^h \leq 24. \quad (22)$$

In (20) wird t_{\odot} in Grad benötigt. Es ist

$$t_{\odot}^{\circ} = 15 t_{\odot}^h \quad (23)$$

mit

$$0 \leq t_{\odot}^{\circ} \leq 360^{\circ} \quad (24)$$

In (21) bedeutet mZ = mittlere Sonnenzeit und Z = Zeitgleichung. Die mZ erhält man aus der Zonenzeit ZZ bei der geographischen Länge λ_Z aus

$$mZ = ZZ + \frac{\lambda - \lambda_Z}{15} \quad (25)$$

Für $ZZ = MEZ$ ist $\lambda_Z = 15^\circ$. λ wird von Greenwich aus positiv nach Ost und negativ nach West gerechnet. Die Zeitgleichung erhält man in dezimalen Stunden auf ± 25 s aus

$$Z = 0^h, 1644 \sin 2 [L_{\odot} + 1^{\circ},92 \sin (L_{\odot} + 77^{\circ},3)] - 0^h, 1277 \sin (L_{\odot} + 77^{\circ},3). \quad (26)$$

Gleichung (26) ergibt sich aus

$$Z = 0^h,1644 \sin 2 \lambda - 0^h,1277 \sin M_{\odot}. \quad (27)$$

Das Azimut der Sonne erhält man auf $\pm 12'$ in dezimalen Grad aus

$$\tan a_{\odot} = \frac{-\sin t_{\odot}}{\cos \varphi \tan \delta_{\odot} - \sin \varphi \cos t_{\odot}} \quad (28)$$

$a_{\odot} = 0^\circ$ im Norden, 90° im Osten, 180° im Süden und 270° im Westen. Für eine maschinelle Berechnung ist es vorteilhaft, das negative Vorzeichen im Zähler stehenzulassen. Die geozentrische scheinbare Rektaszension ergibt sich auf $\pm 30'$ oder ± 2 min in dezimalen Grad aus

$$\tan \alpha_{\odot} = \frac{\cos 23^{\circ},444 \sin \lambda_{\odot}}{\cos \lambda_{\odot}} \quad (29)$$

Da $0 \leq \alpha_{\odot} \leq 360^\circ$, ist es für maschinelle Berechnung günstig, keine Division durchzuführen, sondern den Tangens mit Zähler- und Nennerwert zu berechnen.

Um den Abstand Erde-Sonne, der im Jahresverlauf wechselt, berechnen zu können, genügt es, den mittleren Abstand Erde-Sonne gleich 1 zu setzen. Der Abstand ist dann, bezogen auf den mittleren Abstand,

$$R = 1 - e \cos M_{\odot} \quad (30)$$

oder

$$R = 1 - 0,01672 \cos (L_{\odot} + 77^{\circ},3). \quad (31)$$

Die obengenannten astronomischen Formeln wurden für eine schnelle Näherungsrechnung mitgeteilt. Für eine genauere Berechnung der astronomischen Größen bedarf es eines größeren Rechenaufwandes. Formeln verschiedenen Genauigkeitsgrades zur Berechnung der Sonnenkoordinaten hat SONNTAG (1989) zusammengestellt. Dort wird auch eine Fehlerabschätzung für die Näherungsverfahren gegeben, und die einzelnen astronomischen Größen werden genauer erläutert.

Welch große Bedeutung der Umrechnung der Sonnenscheindauerwerte in Globalstrahlungswerte oder in Werte der Strahlungsbilanz beigemessen wird, geht daraus hervor, daß in den letzten 40 Jahren eine ganze Reihe von Arbeiten erschienen ist, in denen entweder neue Zahlenwerte für die Konstanten der Gleichung (1) bestimmt oder etwas modifizierte Formeln für die Umrechnungen aufgestellt wurden. In zeitlicher Folge geordnet sollen einige Literaturstellen genannt werden:

BERG (1949), HINZPETER (1953), MATZKE (1953), BLACK, BONYTHON und PRESCOTT (1954), JACKSON (1961), SZÁSZ (1968), REDDY (1971 a) und (1972 b), ČEKOJU, ELEKES und GLODJANU (1973), MORVAY (1973), SACKLING und HAY (1977), da MOTA, BEIRSDORF und ACOSTA (1977), BOHNE und KLINGENBERG (1977), RIETVELD (1978) und MALEK (1979). FOKEN und FOKEN (1979) geben die beiden Konstanten in (1) für jeden Monat an.

In verschiedenen Bereichen der Meteorologie wird Wert auf die Angabe der „Sonnenscheindauer“ gelegt. An einer Anzahl von Automatisch Fernmeldenden Meteorologischen Stationen (AFMS-2) im meteorologischen Meßnetz werden Messungen der Bestrahlungsstärke der Globalstrahlung und der Himmelsstrahlung durchgeführt und die entsprechenden stündlichen und täglichen Bestrahlungen errechnet. Daher soll hier gezeigt werden,

daß es auch umgekehrt möglich ist, die stündliche und tägliche Sonnenscheindauer direkt aus Bestrahlungsstärken der Globalstrahlung und der Himmelstrahlung unter Vorgabe einer Schwelle oder nur aus der täglichen Bestrahlung durch die Globalstrahlung zu ermitteln.

Während dieses Verfahren nur ein Näherungsverfahren ist, kann aber auch aus Pyranometermessungen die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung auf die Normale zur Strahlenrichtung mit Hilfe des Sinus der Sonnenhöhe berechnet und mit der von der WMO (1982) festgelegten Schwelle von 120 W/m^2 verglichen werden. Das gibt die Möglichkeit, mit Hilfe von Pyranometern, die robust für den Dauergebrauch gedacht sind, die Sonnenscheindauerwerte nach der neuesten WMO-Definition zu erhalten. Die kostenaufwendigen, automatisch der Sonne nachgeführten Pyrheliometer können somit durch Pyranometer ersetzt werden. Über die Verwendbarkeit der Sonnenscheindauerwerte in der Praxis kann in der vorliegenden Arbeit kein endgültiges Urteil gefällt werden. Die Sonnenscheindauer kann aber als Rechengröße aus den gemessenen Strahlungsdaten erhalten werden. Die stündlichen, täglichen oder monatlichen Bestrahlungen durch die Globalstrahlung können daher für die Praxis in ihrer Bedeutung als primär und die Sonnenscheindauerwerte als sekundär angesehen werden. Es wird in diesem Zusammenhang darauf aufmerksam gemacht, daß, sofern gemessene Intensitätswerte der Strahlung vorliegen, die Sonnenscheindauerwerte nicht benötigt werden, um über Strahlungsformeln die Intensitäten zu berechnen.

3 Meßgeräte für die meteorologische Größe „Sonnenscheindauer“

3.1 Standardgerät

Als Standardgerät dient gegenwärtig ein parallaxtisch montiertes Pyrheliometer, das der Sonne automatisch mittels eines Synchronmotors nachgeführt wird. Wenn die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung, gemessen auf eine Fläche normal zur Strahlenrichtung

$$S \geq 120 \text{ W/m}^2 \quad (32)$$

beträgt, ist „Sonnenschein“ vorhanden. Die Werte werden zu Stunden-, Tages-, Monats- und Jahressummen integriert.

DEHNE (1985) schätzte die Meßunsicherheit dieser Methode ab. Zunächst unterschied er drei Haupttypen von Schwellendurchgängen:

Typ 1:

Schwellendurchgänge bei Sonnenauf- und -untergang. Die Änderung der Bestrahlungsstärke ist pro Minute geringer als 10 W/m^2 und nimmt mit der atmosphärischen Trübung ab.

Typ 2:

Schwellendurchgänge bei Passage von dicken Wolken. Der Änderungsbetrag der Bestrahlungsstärke ist in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Randstruktur der „optisch dicken Wolken“ sehr hoch. Schwankungen von 1000 W/m^2 kommen in wenigen Sekunden sehr häufig vor. Bei Abdeckung der Strahlung durch die Wolken kommen Bestrahlungsstärken kleiner als 50 W/m^2 vor.

Typ 3:

Schwellendurchgänge bei Passage von dünnen Wolken. Bei Altostratus oder Cirren kann die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung Werte haben, die um den Schwellenwert liegen. Der Änderungsbetrag hängt von den Schwankungen der Wolkendicke ab.

Wenn Sonnenscheindauerwerte von Pyrheliometern und anderen Geräten verglichen werden, können die größten Fehler beim Schwellendurchgang des Typs 3 auftreten, wenn die Schwellenwerte anderer Geräte nicht mit den Schwellenwerten des Pyrheliometers übereinstimmen. Messungen mit einem „Normal Incidence Pyrheliometer“ der Firma Eppley mit einem ganzen Öffnungswinkel von 5° ergaben bei Abweichungen des Schwellenwertes von 120 W/m^2 um $\pm 20\%$ eine Abweichung von $t_s/t_{s,\max}$ um $\pm 5\%$ und bei einer Abweichung um $\pm 30\%$ eine solche von $\pm 8\%$. Wenn der ganze Öffnungswinkel nicht 5° , sondern 10° beträgt, hat man eine Änderung der Bestrahlungsstärke um 28 W/m^2 , was etwa einer Abweichung von 20% bei 120 W/m^2 entspricht. Da die Meßunsicherheit beim Pyrheliometer kleiner $\pm 5\%$ ist, sind Sonnenscheindauerwerte fehlerhaft um $\pm 1\%$. Bei einem ganzen Öffnungswinkel von 10° erhält man dann Fehler von $t_s/t_{s,\max}$ von $\pm 4\%$. Im Falle des Schwellendurchgangs des Typs 2 ergibt sich dann z.B. ein Fehler von $\pm 8\%$.

3.2 Sonnenscheindauergeber

Ältere sogenannte Sonnenscheinschreiber nach JORDAN und MARVIN haben sicher nur noch historischen Wert. Bei dem Gerät nach JORDAN wird eine Brennspur auf Photopapier erzeugt, und bei dem Gerät von MARVIN spricht ein Schalter auf die Erwärmung an.

Weit verbreitet ist der Sonnenscheinautograph nach CAMPBELL und STOKES. Das Gerät wurde 1853 von CAMPBELL eingeführt und 1879 von STOKES verbessert. Im Brennpunkt einer Vollglaskugel werden die Sonnenstrahlen gesammelt, und es wird eine Spur in Registrierpapierstreifen gebrannt. Die Glaskugel sitzt auf einem Metallsockel und ist von einer konzentrischen, den geometrischen Ort des Brennpunktes der Kugel darstellenden Metallschale einseitig umgeben. In die Schale wird der Registrierstreifen eingelegt, auf dem sich die Bahn des Brennpunktes entsprechend dem scheinbaren Lauf der Sonne je nach ihrem Erscheinen oder Verschwinden deutlich einzeichnet. Die Vollglaskugel besteht aus schlierenfreiem, farblosem, lichtbeständigem Glas und hat einen Durchmesser von 10 cm , einen Brechungsindex von $1,52 \pm 0,02$ und eine Brennweite von 75 mm für Natrium-D-Licht. Der Registrierstreifen wird in Nuten des Kugelschalenstückes eingeschoben. Wegen der sich ändernden Deklination der Sonne sind drei verschiedene Formen vorgesehen, nämlich kurze nach unten gekrümmte, lange nach oben gekrümmte und gerade Streifen. Die Auswertung geschieht nach festgelegten Regeln (genauer über die erwähnten Geräte siehe ALBRECHT (1935), ROBINSON (1966) und SONNTAG (1981)). Wie kritisch die Festlegung der Daten für die Vollglaskugel und für die Registrierstreifen beim Sonnenscheinautographen nach CAMPBELL-STOKES ist, geht aus den Arbeiten von MAURER (1909) und (1911 a und b), STRUB (1910), MARTEN (1911), BRÜCKMANN (1913) sowie ALBRECHT (1925) und (1934) hervor.

Sonnenscheindauerwerte des CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheinautographen werden in der vorliegenden Arbeit mit $t_{s,cs}$ bezeichnet.

Im letzten Jahrzehnt sind – meist für den Einsatz an automatischen Wetterstationen – eine Reihe von Sonnenscheindauergebern geschaffen worden, die mit photoelektrischen Sensoren ausgerüstet sind. Es sind vier verschiedene Typen bekannt geworden.

Beim 1. Typ wird mit einer bestrahlten und einer unbestrahlten Fläche gearbeitet. Der 2. Typ hat eine umlaufende Schattenblende. Der 3. Typ hat einen umlaufenden Lichtleiter und der 4. Typ einen umlaufenden Spiegel.

1. Typ: Bestrahlte und unbestrahlte Fläche

In den USA wird der Sonnenscheinschalter nach FOSTER und FOSKETT (1953) benutzt (siehe dazu auch WMO (1983)). Es werden zwei Selenphotoelemente benutzt, von denen eines mittels eines Schattenringes, der viermal im Laufe eines Jahres verstellt werden muß, abgeschattet wird.

In der UdSSR wird ein Sonnenscheindauergeber vom Typ M-96-7 nach KVASINA (1969) eingesetzt (siehe auch SONNTAG (1981)). Dabei werden zwei senkrecht übereinander angeordnete, parallel geschaltete Solarzellen gegen zwei gleiche, um 180° versetzt angebrachte, gegeneinandergeschaltete. Unter einer Glasglocke werden insgesamt drei solche Anordnungen benutzt. So sind alle 60° zwei senkrecht übereinander angeordnete parallel geschaltete Solarzellen aufgestellt. Mit Hilfe eines Spiegels ist die Schwellenempfindlichkeit justierbar. Dieser Wert ist auf 190 W/m^2 eingestellt. Durch die Gegeneinanderschaltung wird das diffuse Himmelslicht eliminiert.

KIRKPATRICK (1973) verwendete in Großbritannien zwei Geber, von denen jeder unter einer Perspexhaube einen geschwärzten Thermistor enthielt. Ein Geber wurde mit einem Schattenring abgeschattet. Der Schattenring braucht im Jahr nur sechsmal verstellt zu werden. Eine Schwelle von 100 W/m^2 gab annähernd Übereinstimmung mit dem CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheinautographen. Ein Sonnenscheindauergeber nach THÖRNBLAD (1975) und LAU (1981) ist in Schweden entwickelt worden. Ein parallaktisch montierter Zylinder enthält 18 Silizium-Photodioden, die über den gesamten Kreisumfang verteilt sind. Jede Photodiode sitzt in einem geschwärzten Sektor mit dem horizontalen vollen Öffnungswinkel von 20° und dem vertikalen von 52° . Damit wird in guter Annäherung die direkte Sonnenstrahlung direkt erfaßt. Messungen ergaben, daß eine Erhöhung der Anzahl der Photodioden keinen Gewinn bringt. Nachteilig wirkte sich die nichtangepaßte Spektralverteilung zwischen Photodiodencharakteristik und Sonnenstrahlung aus. Ferner mußten die Photodioden einzeln abgeglichen werden. Bei 200 untersuchten Photodioden streute die Empfindlichkeit um $\pm 18\%$. Ein Schwellenwert von 200 W/m^2 konnte nur mit $\pm 25\%$ aufrechterhalten werden, d.h., der verwendete Schwellenwert lag zwischen 150 und 250 W/m^2 . Diese Werte wurden aus Eichungen ermittelt. Vergleichsmessungen mit einem Pyrheliometer zur Kontrolle des Schwellenwertes stehen noch aus und sollen noch durchgeführt werden. Auf Grund des hohen Abgleich- und Eichaufwandes sind solche Sonnenscheindauergeber sicher in der Herstellung sehr kostenaufwendig. Außerdem ist es im Netzbetrieb nicht günstig, wenn allzu oft nachgeeicht werden muß. Diesen Nachteil kann man bei allen Strahlungsempfängern auf Halbleiterbasis vorfinden. COOK (1975) beschrieb ein Modell, bei dem sechs Photozellen senkrecht in einem Kreisbogen stehen. Sie bekommen teils direkte Sonnenstrahlung, teils diffuse Himmelsstrahlung. Gegenüber dem CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheinautographen gab es tägliche Abweichungen bis zu 40% und monatliche bis zu 5% . In Indien werden nach VASHISTHA, ROYCHOUDHURY und

DATAR (1979) zwei Photozellen benutzt, von denen eine beschattet ist.

Die WMO (1979) beschreibt den französischen Sonnenscheindauergeber der Firma Enertec, Schlumberger, Typ ES 4000. Acht Siliziumphotozellen, jede in einem wetterfesten Gehäuse, sitzen auf der Außenseite eines achteckigen Zylinders. Je zwei gegenüberliegende sind gegeneinandergeschaltet. So ist bei Sonnenschein eine Photozelle der Globalstrahlung und die andere der Himmelsstrahlung ausgesetzt; die diffuse Himmelsstrahlung wird somit eliminiert. Der Zylinder kann auf die geographische Breite justiert werden. Weiterhin wird von der WMO (1979) ein japanischer Sonnenscheindauergeber erwähnt. Dabei befinden sich drei Solarzellen in einem Glasgehäuse auf einem Prisma. Eine Solarzelle ist nach SE und eine nach SW orientiert. Die dritte Solarzelle ist so montiert, daß sie nur diffuses Himmelslicht erhält. Als Schwellenwert wird 210 W/m^2 verwendet. Durch Differenzschaltung erhält man wieder die Dauer des direkten Lichteinfalls von der Sonne.

2. Typ: Umlaufende Schattenblende

Die WMO (1979) beschrieb zwei Sonnenscheindauergeber: Beim Sonnenscheinschreiber Helior KS-2a wird ein Photowiderstand 250mal pro Minute durch ein halbkreisförmiges Metallstück abgedeckt. Ein zweiter Photowiderstand wird nicht abgeschattet und dient zur Kompensation. Wenn ein justierbarer Schwellenwert überschritten wird, wird ein Wechselstrom gemessen. Über den Photowiderständen sind Glaskalotten montiert. Bei Sonnenschein erhält man 100 Impulse pro Minute.

Der Automatische Heliograph der Schweizer Firmen Alcyon Equipment und Haenni „Solar III“ und „Solar II2“ wird parallaktisch montiert. Sechs Solarzellen sind um eine Rotationsachse angeordnet. Ein rotierender Schirm schattet die direkte Sonnenstrahlung periodisch – 24mal pro Sekunde – ab. Als Schwellenwert wird 150 W/m^2 verwendet. Dieser Gerätetyp wurde auch von MAGNUSSON (1980) und von MAJOR (1985) und (1986) getestet.

3. Typ: Umlaufender Lichtleiter

LINDNER (1984) berichtete über den Sonnenscheindauergeber SONI 6.008, der mit einer Schwelle von 120 W/m^2 arbeitet und in Hamburg produziert wird. Ein Lichtleiter mit einem Spaltdiaphragma rotiert und leitet die Strahlung zu einer konzentrisch angebrachten Silizium-PIN-Photodiode. In der Ebene zwischen Lichtleiter und Photozelle ist ein rotierender Abschatter angebracht, der alle zwei Umdrehungen das Licht vor der Photodiode abschattet. Mit dem rotierenden Spalt wird die ganze Himmelskugel abgetastet. Die Orientierung bei der Aufstellung spielt keine Rolle. Durch die Nullpunktbestimmung durch Abschattung der Strahlung wird das Gerät unabhängig von der Größe der diffusen Himmelsstrahlung. Dies erlaubt ein Arbeiten mit einer definierten Schwelle als bei anderen Geräten. Ein ähnliches Gerät wird in Frankreich benutzt, wie GREGOIRE (1985) berichtete. Es wird aber parallaktisch montiert. Eine wechselnde Deklinationseinstellung braucht nicht vorgenommen zu werden.

In 90 % der Fälle soll der Fehler der Tagessumme kleiner als $\pm 4\%$ bzw. $\pm 0,2$ Stunden sein.

4. Typ: Umlaufender Spiegel

Die EKO Instruments Trading Co., Japan stellt den Sonnenscheindauermesser Model MS-91 her. Das Prinzip wird beschrieben von IKEDA, AOSHIMA und MIYAKE (1986).

Das Gerät hat eine parallaktische Aufstellung. Im Inneren eines Glasrohres rotiert an einem Ende ein Spiegel um die Längsachse. Am oberen Ende befindet sich ein pyroelektrischer Sensor. Vor dem Sensor befindet sich ein Rohr mit Diaphragmen. Das Gerät liefert Impulse, wenn 120 W/m² überschritten werden. Die Deklination braucht nicht verändert zu werden. Der Spiegel bringt Strahlung zum Sensor, wenn er gerade auf die direkte Sonnenstrahlung ausgerichtet ist.

3.3 Internationaler Vergleich von elektronischen Sonnenscheindauergebern

MAJOR (1985) und (1986) führte in Budapest einen Vergleich der Sonnenscheindauergeber HAENNI SOLAR 112 (Schweiz), SONI 6.008 (BRD) und PRECIS MECANIQUE (Frankreich) mit einem Normal Incident Pyrheliometer Eppley durch. Die Schwelle beim Pyrheliometer war 120 W/m². Das französische Gerät hat einen großen Öffnungswinkel und mißt viel diffuse Himmelsstrahlung mit. Es zeigte keine sehr guten Ergebnisse. Allgemein maßen die elektronischen Sonnenscheindauergeber bei Sonnenhöhen unterhalb von 10° zu wenig Sonnenschein. Gleichzeitig wurde auch ein CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheinautograph verglichen. Die Tabelle 4 zeigt das Ergebnis, bei dem die Werte des Sonnenscheinautographen 100 % gesetzt wurden, für einige Monate des Jahres 1984.

3.4 Sonnenscheindauerwerte aus Messungen mit kalorimetrisch arbeitenden Strahlungsmeßgeräten

Nachteilig wirkt sich bei den elektronischen Sonnenscheindauergebern aus, daß sich die Empfindlichkeit der photoelektrischen Bauelemente ändern kann und daß sie dem Sonnenlicht nicht gut spektral angepaßt sind. Bessere Werte der Sonnenscheindauer erhält man mit kalorimetrischen Empfängern. Kalorimetrische Strahlungsempfänger haben für den in Frage kommenden Spektralbereich eine gleichmäßige Empfindlichkeit.

Wie schon erwähnt wurde, dient ein Pyrheliometer, das automatisch der Sonne nachgeführt wird, als Standardgerät. Wenn die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung S größer als der Schwellenwert 120 W/m² ist, herrscht „Sonnenschein“. Diese Verfahrensweise wird hier Methode 1 genannt, und die damit ermittelten Sonnenscheindauerwerte werden mit $t_{s,at}$ bezeichnet. Nicht immer steht ein parallaktisch montiertes Pyrheliometer mit Nachführeinrichtung zur Verfügung.

Aus Pyranometerwerten können nach verschiedenen Methoden Sonnenscheindauerwerte erhalten werden. Die Größe S kann dann auch mit einem Pyranometer erhalten werden, das die Bestrahlungsstärke der Globalstrahlung E_g mißt, und mit einem Pyranometer mit Schattenring, das die Bestrahlungsstärke der Himmelsstrahlung E_d mißt. Aus der Differenz der beiden genannten Bestrahlungsstärken erhält man die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung auf eine horizontale Fläche

$$E_s = E_g - E_d \quad (33)$$

S erhält man dann aus

$$S = E_s / \sin h_o \quad (34)$$

Damit der Nenner in Gleichung (34) nicht gegen Null geht, sollte die Sonnenhöhe $h_o \geq 5^\circ$ sein. Der Wert von $\sin h_o$ kann nach Gleichung (20) berechnet werden. Wenn S wieder größer als 120 W/m² ist, besteht „Sonnenschein“. Die auf diese Weise ermittel-

ten Sonnenscheindauerwerte werden als Methode 2 mit $t_{s,p}$ bezeichnet.

Die Berechnung der Sonnenhöhe erfordert aber etwas Rechenarbeit. Nicht immer steht an meteorologischen Stationen ein Kleinrechner zur Verfügung, der mit einer automatischen Station gekoppelt ist. Bei Anwendung einer Näherungsmethode kann ein großer Teil der Rechenarbeiten eingespart werden. Man kann dabei gleich das Signal E_s der Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung auf die horizontale Fläche mit einem Schwellenwert $E_{s,Schwelle}$ vergleichen. Der optimale Wert $E_{s,Schwelle}$ wurde in der vorliegenden Arbeit ermittelt.

Es werden zwei Schwellenwertfunktionen untersucht. Bei Methode 3 (optimale Methode) wird eine Schwelle $(10 + E_d/5)$ und bei der Methode 4 eine solche von $(20 + E_d/10)$ verwendet. Die Sonnenscheindauerwerte werden dann mit $t_{s,10/5}$ und $t_{s,20/10}$ bezeichnet.

Voraussetzung zur Anwendung der Methoden 2 bis 4 ist der Einsatz von einem Pyranometer zur Messung der Bestrahlungsstärke der Globalstrahlung und einem Pyranometer mit Schattenring zur Messung der Bestrahlungsstärke der Himmelsstrahlung. Die vorgesehenen und bei der AFMS-1 und -2 im Einsatz befindlichen Pyranometer werden hier nicht näher erläutert, da sie von SONNTAG (1975) ausführlich in einer Abhandlung des Meteorologischen Dienstes der DDR – sowohl in bezug auf die Theorie als auch im Hinblick auf den praktischen Einsatz – beschrieben worden sind.

Für beide Methoden muß an der gemessenen Bestrahlungsstärke der Himmelsstrahlung die von SCHÖNE und SONNTAG (1976) angegebene Schattenringkorrektur angebracht werden, da der Schattenring einen Teil des Himmels abschattet. Diese Korrekturfaktoren ändern sich im Verlaufe des Jahres. Es genügt aber – wie aus Tabelle 5 hervorgeht – eine monatliche Änderung des Korrekturfaktors. Berechnen läßt sich der Schattenringkorrekturfaktor nach einer Näherungsformel

$$f_{Ed} = 1,085 + 0,05 \sin(N - 80) \frac{350}{365} \quad (35)$$

wenn N die Anzahl der Tage im Jahr ist, wobei der 1. Januar als erster Tag gerechnet wird (siehe Tabelle 3). Die Schattenringkorrektur kann entweder rechnerisch angebracht werden oder durch einen verstellbaren Shunt, der monatlich von der Hand verstellt werden müßte, berücksichtigt werden.

Im Kapitel 2 wurde gezeigt, daß in der Praxis die Weiterverarbeitung der Sonnenscheindauerwerte meistens so geschieht, daß sie über eine Regressionsgleichung mit einem Bezugswert $H_{g,wolo}$ in tägliche oder monatliche Bestrahlung der Globalstrahlung H_g umgerechnet werden. Hier soll nun die Umkehrung dargelegt werden, indem tägliche oder monatliche Bestrahlungen der Globalstrahlung in Sonnenscheindauerwerte umgerechnet werden. Zu dieser Näherungsmethode, die mit Methode 5 bezeichnet werden soll, wird nur ein Pyranometer ohne Schattenring benötigt. Die damit ermittelten Sonnenscheindauerwerte werden mit $t_{s,Hg}$ bezeichnet. Schließlich wird als Methode 6 die Verwendung der Werte des Sonnenscheinautographen CAMPBELL-STOKES angesehen, die mit $t_{s,CS}$ gekennzeichnet werden. In Tabelle 6 sind die genannten Methoden noch einmal übersichtlich zusammengestellt worden.

Im Kapitel 3 wurden sechs verschiedene Methoden aufgestellt, die die kalorimetrische Wirkung der Strahlung zur Bestimmung der Sonnenscheindauer ausnutzen. Im folgenden wird nun ein Vergleich der Meßwerte durchgeführt, die mittels der einzelnen

Methoden gewonnen wurden. An folgenden Stationen wurden Meßwerte erhalten:

Potsdam-Schlaatz $\varphi = 52^{\circ}33' \text{ N}$, $\lambda = 13^{\circ}06' \text{ E}$, $H = 33 \text{ m}$, $h = 1 \text{ m}$

Potsdam-Säkularstation $\varphi = 52^{\circ}23' \text{ N}$, $\lambda = 13^{\circ}04' \text{ E}$, $H = 81 \text{ m}$, $h = 33 \text{ m}$

Heiligendamm $\varphi = 54^{\circ}09' \text{ N}$, $\lambda = 11^{\circ}51' \text{ E}$, $H = 6 \text{ m}$, $h = 16 \text{ m}$

Fichtelberg $\varphi = 50^{\circ}26' \text{ N}$, $\lambda = 12^{\circ}57' \text{ E}$, $H = 1213 \text{ m}$, $h = 19 \text{ m}$

Dabei ist φ = geographische Breite, λ = geographische Länge, H = Höhe der Station über dem Meeresniveau, h = Höhe der Geräte über der Stationshöhe H .

4 Vergleich der kalorimetrischen Methode zur Bestimmung der Sonnenscheindauer

4.1 Vergleiche in Potsdam bezogen auf die pyrheliometrisch bestimmten $t_{s,St}$ -Werte nach der Methode 1

4.1.1 Meß- und Auswertemethodik

Zur Ermittlung der Meßwerte der Sonnenscheindauer $t_{s,St}$, $t_{s,P}$ und $t_{s,20/10}$ nach den Methoden 1, 2 und 4 wurden die Strahlungsregistrierungen der Station Potsdam-Schlaatz benutzt, die speziell dafür vom März 1983 bis zum März 1984 ausgewertet wurden. Die Meßwerte $t_{s,CS}$ der Methode 6 stammen von der meteorologischen Station Potsdam-Säkularstation. Sie befindet sich in etwa 2,5 km Entfernung südwestlich vom Schlaatz.

An der Station Potsdam-Schlaatz wurden die Global- und Himmelsstrahlung mit Pyranometern nach SONNTAG gemessen. Ein Pyrheliometer nach MOLL-GORCZYNSKI diente zur Messung der direkten Sonnenstrahlung. Die im Zweiminutenrhythmus mit einer Datenerfassungsanlage erhaltenen Meßwerte wurden auf Lochstreifen gestanzt. In einer Stunde standen somit je 30 Werte zur Verfügung. Diese Einzelwerte wurden mit einem speziellen Auswerteprogramm nach Subtraktion des Nullpunktes mit dem entsprechenden Eichfaktor multipliziert und damit in Bestrahlungsstärken umgewandelt. Den Methoden 1, 2 und 4 entsprechend wurden diese Werte bzw. die daraus abgeleiteten mit den

angegebenen Schwellenwerten verglichen. Der Quotient aus der Anzahl der Schwellenwertüberschreitungen pro Stunde und der Zahl der vorhandenen Meßwerte (in der Regel 30) stellt die Sonnenscheindauer dar. Aus diesen Stundensummen wurden durch Summation die Tagessummen gebildet. Weiterhin wurden die täglichen Verhältnisse zu $t_{s,St}$ (Methode 1) ermittelt.

Um spezielle Auswertungen zur Überprüfung bzw. Neubestimmung der Konstanten in der Schwellenwertfunktion durchführen zu können, wurden zusätzlich die Einzelwerte aufgelistet, bei denen die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung auf die Normalfläche Werte zwischen 105 W/m^2 und 135 W/m^2 aufwies, also um $\pm 12,5\%$ um den von der CIMO empfohlenen Schwellenwert schwankte. Dieser Bereich wurde aus praktischen Gesichtspunkten gewählt, um ein größeres Datenkollektiv für die in diesem Abschnitt zu behandelnde weitere statistische Auswertung zu erhalten.

4.1.2 Ergebnisse

4.1.2.1 Vergleich der verwendeten Methoden

Die Einschätzung und der Vergleich der angewendeten Methoden sollen für die einzelnen Monate angeführt werden. Aus diesem Grunde wurden mittlere monatliche Tagessummen der Sonnenscheindauer errechnet. Da der Tagesgang der Sonnenstrahlung, u.a. hervorgerufen durch unterschiedliche Bewölkungsverhältnisse, erfahrungsgemäß nicht ohne Einfluß auf die Ergebnisse bleibt, wurden die vorhandenen Tage noch nach den Tageswerten der relativen Sonnenscheindauer $t_{s,rel}$ klassifiziert ($t_{s,rel} = t_s/t_{s,max}$). Da in verschiedenen Monaten einige Tage nicht verfügbar waren bzw. durch die vorgenommene Klasseneinteilung nur eine bestimmte Anzahl von Tageswerten dafür in Frage kam, wurde in den Abbildungen die Zahl der verwendeten Tage mit angegeben. Die Monatssummen der Sonnenscheindauer sind für Potsdam für die Methoden 1, 2, 4 und 6 in der Tabelle 7 angegeben.

Zur besseren zeitlichen Vergleichbarkeit und Interpretation der Resultate wurden die Werte $t_{s,P}$, $t_{s,20/10}$ und $t_{s,CS}$ (Methoden 2, 4 und 6) durch Bildung von Quotienten auf die entsprechenden Summen $t_{s,St}$ (Methode 1) bezogen. Diese Ergebnisse sind in der Abb. 1 dargestellt.

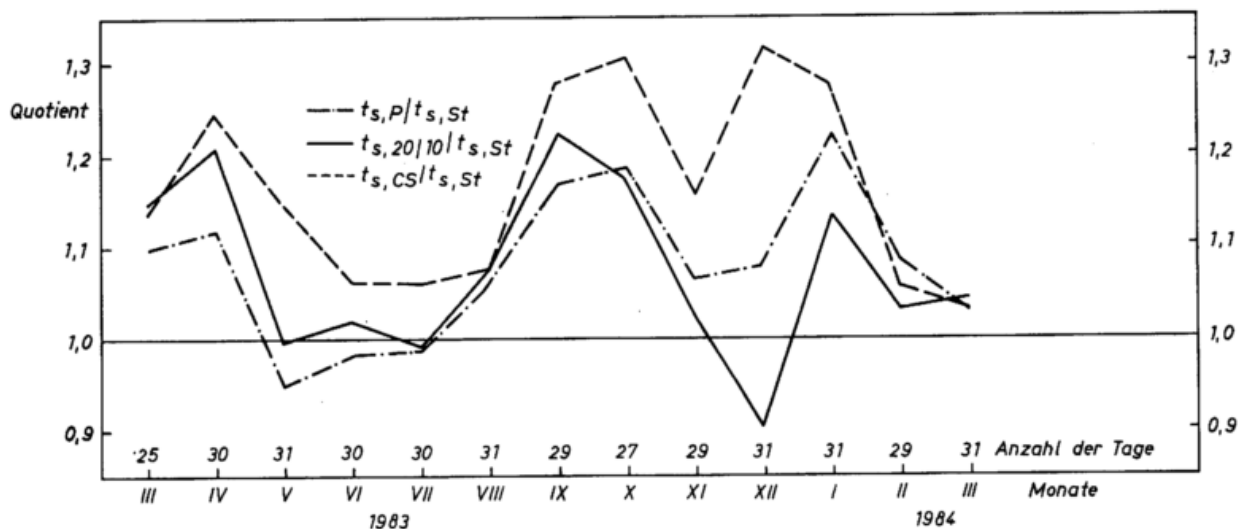


Abb. 1: Quotienten der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer der Methoden 2, 4 bzw. 6 und der Methode 1 ($t_{s,St}$), Potsdam 1983/84

Es ist ersichtlich, daß die mit dem Sonnenscheinautographen nach CAMPBELL-STOKES bestimmten Werte im untersuchten Zeitraum durchweg Quotienten größer als 1,0 ergaben. Sie lagen zwischen 1,039 und 1,314. Bis auf den März 1984 lieferte diese Methode auch immer die größten mittleren Tagessummen.

Die $t_{s,p}$ -Werte der Methode 2 sind in den Monaten Mai bis Juli kleiner als die $t_{s,st}$ -Werte der Bezugsmethode. Bei den $t_{s,20/10}$ -Werten (Methode 4) liegt nur die Dezembersumme unter der mittels des Pyrheliometers ermittelten Summe. Vergleicht man in der Abb. 1 den Verlauf der Kurven $t_{s,p}/t_{s,st}$ und $t_{s,20/10}/t_{s,st}$, so wird ersichtlich, daß $t_{s,20/10}/t_{s,st}$ nur zwischen Oktober 1983 und Februar 1984 kleinere Werte als $t_{s,p}/t_{s,st}$ liefert.

Die Quotienten zeigen grob einen gleichartigen Jahresgang mit Maxima im April, September/Oktober sowie im Januar. Minima werden zwischen Mai und August sowie November bzw. Dezember erreicht. Zwischen den Methoden bestehen systematische Unterschiede. Sie sind auch zwischen den auf dem gleichen Meßprinzip basierenden Werten $t_{s,p}/t_{s,st}$ und $t_{s,20/10}/t_{s,st}$ zu sehen.

Die geringsten prozentualen Abweichungen von der Bezugsmethode sind bei allen drei Methoden in der Zeit vom Juni bis August sowie im Februar und März 1984 gleichzeitig vorhanden. Die Differenzen der mittleren monatlichen Tagessummen zur Bezugsmethode $t_{s,st}$ sind in Abb. 2 zusammengestellt.

Diese Differenzen liegen im Bereich von +0,9 Stunden bei ($t_{s,CS} - t_{s,st}$) im April und September bis -0,2 Stunden ($t_{s,p} - t_{s,st}$) im Mai. Ein Vergleich der Jahreswerte (Tabelle 8 und 9) zeigt, daß die relativ großen Differenzen in den einzelnen Monaten durch die Mittelung ausgeglichen wurden, denn die Quotienten ergeben Werte von 1,035 bei $t_{s,p}/t_{s,st}$ und 1,047 bei $t_{s,20/10}/t_{s,st}$. Der Sonnenscheinautograph nach CAMPBELL-STOKES registrierte mehr Sonnenschein als das Pyrheliometer, was im Verhältniswert von 1,115 beim Quotienten $t_{s,CS}/t_{s,st}$ zum Ausdruck kommt. Zur weiteren Charakterisierung der Methoden wurden speziell noch die Ta-

ge mit einer relativen Sonnenscheindauer $> 60\%$ und $< 40\%$ in derselben Art und Weise untersucht. Die Tage der ersten Kategorie sind durch einen relativ ungestörten Tagesgang der Sonnenstrahlung gekennzeichnet, d. h., die Schwellenwerte zur Bestimmung der Sonnenscheindauer werden täglich mit einer nur geringen Häufigkeit über- bzw. unterschritten. Die zweite Gruppe beinhaltet die Tage, an denen die Schwellenwerte gar nicht erreicht werden oder häufig über- bzw. unterschritten werden.

Wie aus den Abbildungen 3 und 5 hervorgeht, ist die Anzahl der Fälle in der ersten Kategorie gering im Vergleich mit der zweiten. Das ist charakteristisch für unser Klima. Für Kategorie 1 ergibt sich das in Abb. 3 dargestellte Bild.

Die Quotienten haben einen schwachen Jahresgang, der jedoch nur von den Quotienten $t_{s,p}/t_{s,st}$ und $t_{s,20/10}/t_{s,st}$ in gleicher Weise repräsentiert wird. Diese haben im Mai ein Minimum. Die Quotienten $t_{s,CS}/t_{s,st}$ schwanken unregelmäßig und weichen im November mit +17% stark ab. Die anderen Werte liegen innerhalb von $\pm 7\%$, wobei sich die Mehrzahl sogar zwischen $\pm 5\%$ befindet. Bei der Betrachtung fällt auf, daß die Kurven $t_{s,p}/t_{s,st}$ und $t_{s,20/10}/t_{s,st}$ von März bis Oktober sehr dicht nebeneinander verlaufen, wobei im Gegensatz zur Auswertung, die alle Tage berücksichtigt (Abb. 1), die Quotienten $t_{s,20/10}/t_{s,st}$ in diesem Fall in der Zeit vom Juni bis September die kleineren Werte lieferten. Die Differenzen zu $t_{s,st}$ überstreichen auch bei diesen ausgewählten Daten den Bereich von $\pm 0,9$ Stunden (Abb. 4).

Im Dezember 1983 und Januar 1984 war die relative Sonnenscheindauer an allen Tagen $< 60\%$, so daß für diese Auswertung keine Daten zur Verfügung standen. Die Auswertung der Tage mit einer relativen Sonnenscheindauer $< 40\%$ ergibt folgendes Bild (Abb. 5).

Es tritt der gleiche Jahresgang hervor, wie er schon von der Auswertung, die alle Tage berücksichtigt, bekannt ist, da diese Tage außer in den Monaten Juni bis August etwa 2/3 des Gesamtum-

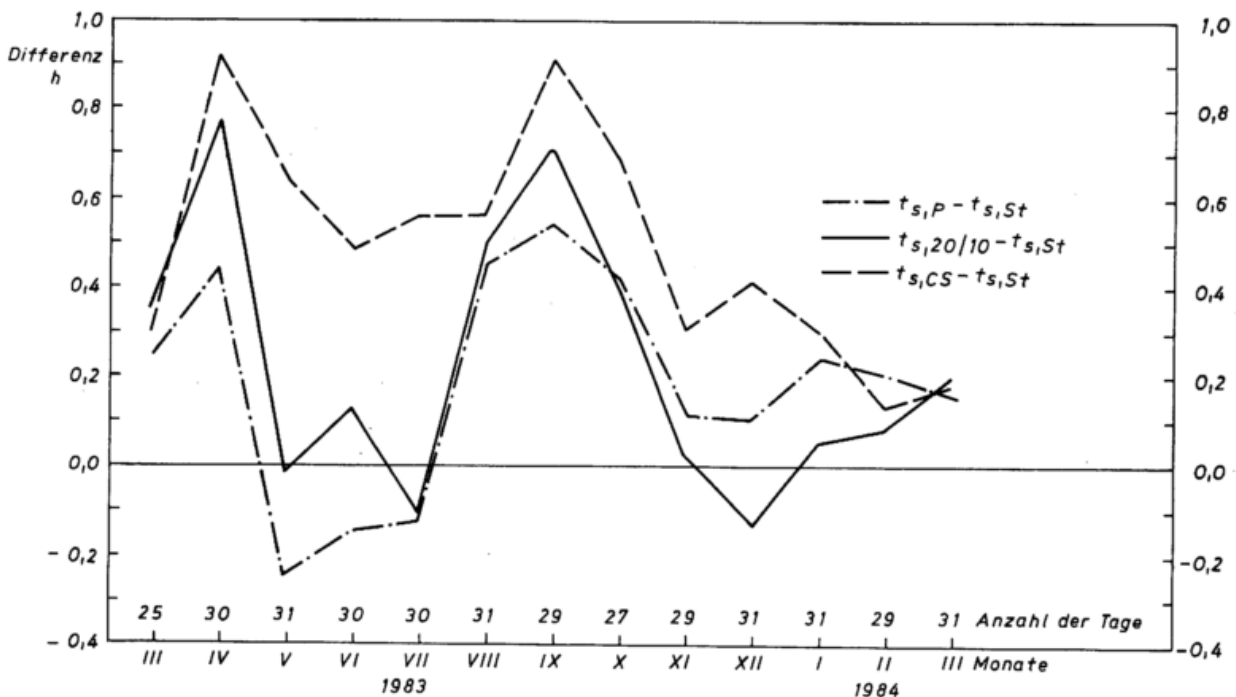


Abb. 2: Differenzen der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer (in Stunden) der Methoden 2, 4 bzw. 6 und Methode 1 ($t_{s,st}$), Potsdam 1983/84

fangs der Daten in den einzelnen Monaten ausmachen. Die Kurven liegen in dieser Kategorie (bei gleichem Maßstab!) weiter auseinander. Dies unterstreicht einerseits die systematischen Unterschiede zwischen den Methoden bei geringer Strahlung und/oder wechselnder Bewölkung und verdeutlicht andererseits die dämpfende Wirkung der Daten der ersten Kategorie. Die größere Amplitude der Quotientenwerte dieser Gruppe resultiert zum Teil aus den kleinen absoluten Werten, die in die Berechnung eingehen. Die Differenzen der mittleren monatlichen Tagessummen zur Bezugsmethode (Abb. 6) liegen nämlich im Bereich von +1,0 Stunden (Methode 6, August, September) bis -0,2 Stunden (Methode

2, Juli) und sind damit in der gleichen Größenordnung wie die der ersten Gruppe.

Die Ursachen für den Kurvenverlauf sind komplexer Art und anhand des zur Verfügung stehenden Materials nicht zu klären. Trotzdem soll versucht werden, einige mögliche Gründe für den Jahresgang und für das Verhalten der Geräte zueinander anzugeben. Da, wie bereits oben festgestellt wurde, die Quotienten einen gleichartigen Jahresgang aufweisen, liegt die Annahme nahe, daß das Bezugsgerät, das Pyrheliometer nach MOLL-GORCZYNSKI, nicht in Ordnung war.

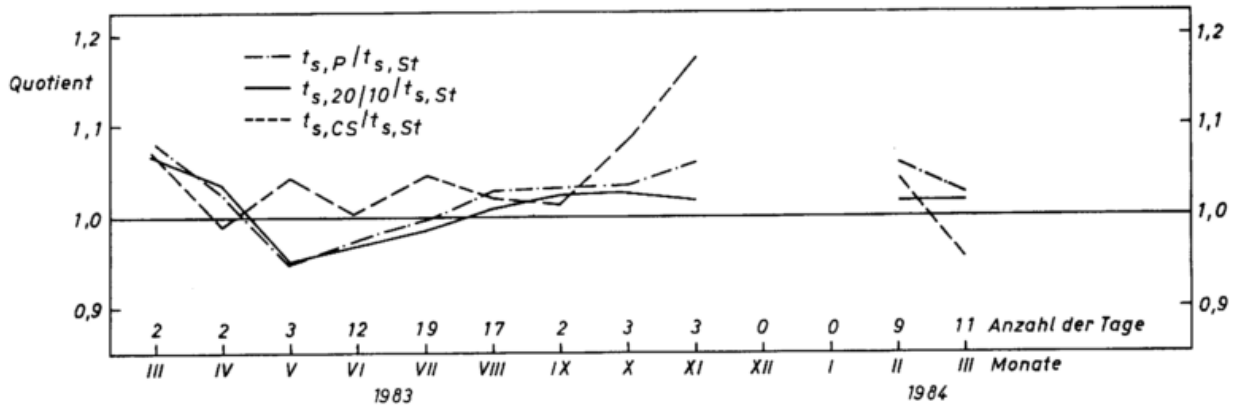


Abb. 3: Quotienten der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer an Tagen mit einer relativen Sonnenscheindauer > 60 % der Methoden 2, 4 bzw. 6 und der Methode 1 ($t_{s,St}$), Potsdam 1983/84

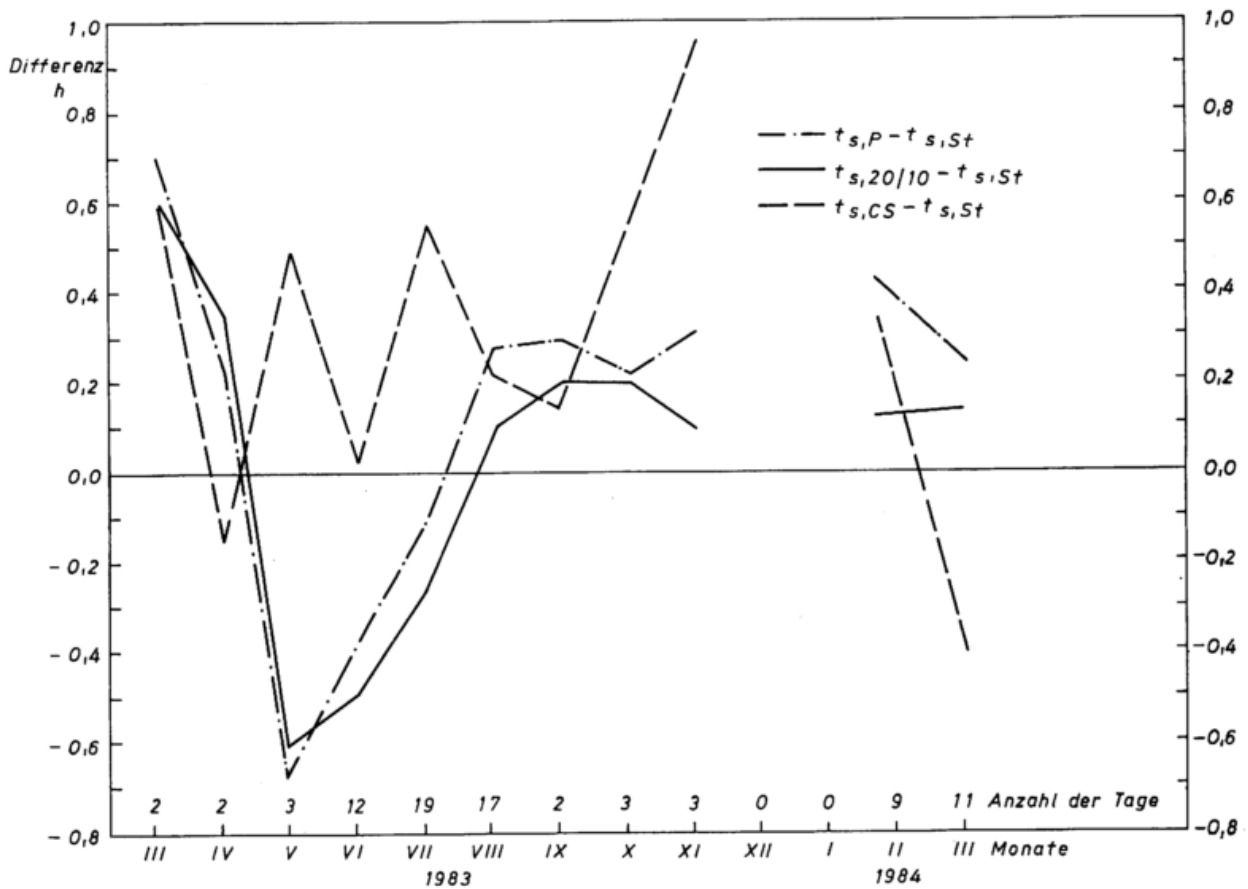


Abb. 4: Differenzen der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer (in Stunden) an Tagen mit einer relativen Sonnenscheindauer > 60 % der Methoden 2, 4 bzw. 6 und Methode 1 ($t_{s,St}$), Potsdam 1983/84

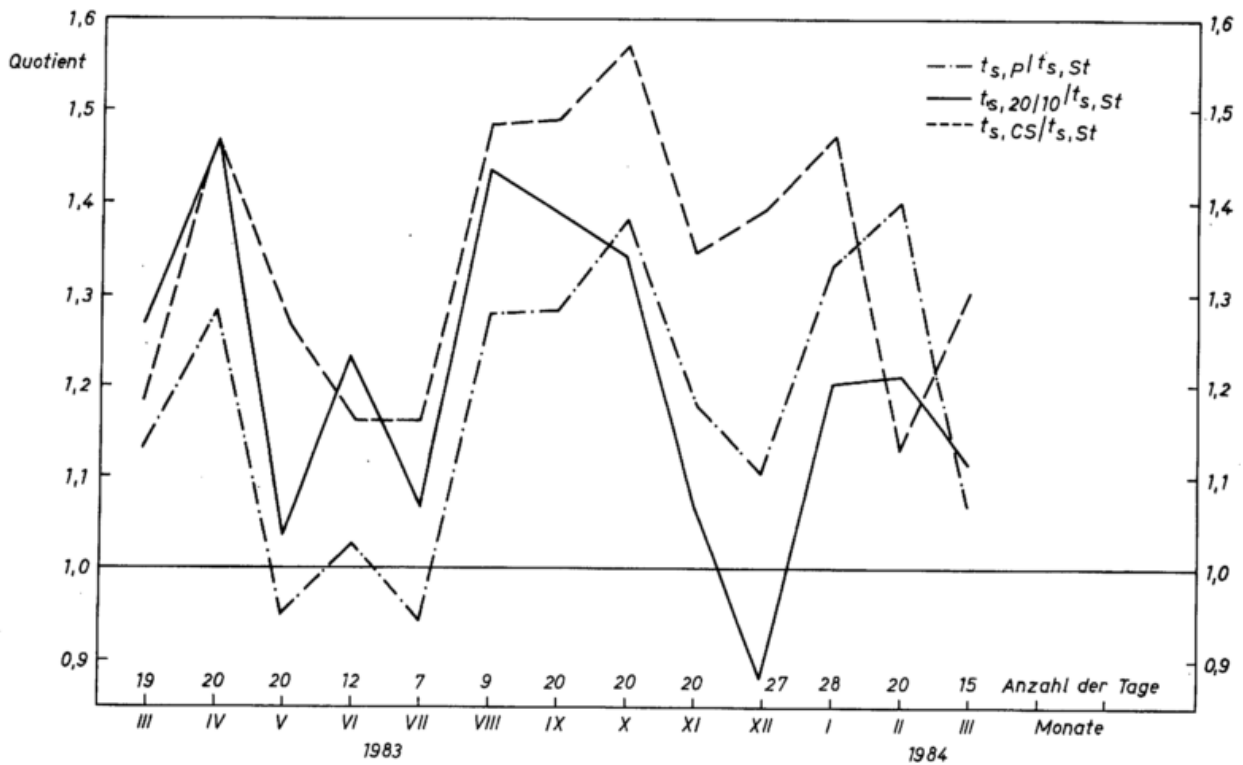


Abb. 5: Quotienten der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer an Tagen mit einer relativen Sonnenscheindauer $< 40\%$ der Methoden 2, 4 bzw. 6 und der Methode 1 ($t_{s,St}$), Potsdam 1983/84

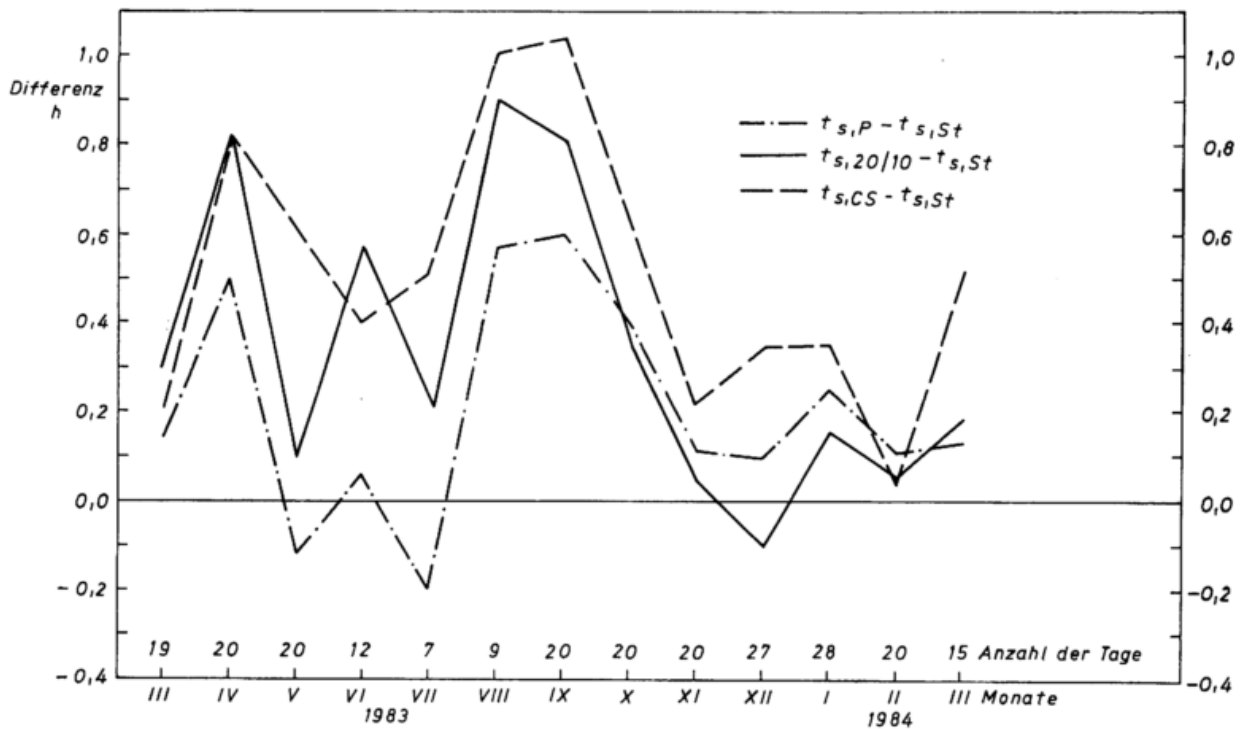


Abb. 6: Differenzen der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer (in Stunden) an Tagen mit einer relativen Sonnenscheindauer $\leq 40\%$ der Methoden 2, 4 bzw. 6 und Methode 1 ($t_{s,St}$), Potsdam 1983/84

Der Eichfaktor dieses wie auch aller anderen Instrumente wurde regelmäßig überprüft. Es zeigte sich, daß vorgenommene Änderungen an den Eichfaktoren der Geräte sich zum Teil sehr schwach oder gar nicht in den Kurven dokumentieren, ja in einigen Fällen sogar ein umgekehrtes Verhalten angezeigt wird. Dies verdeutlicht, daß die durchgeführten Änderungen der Eichfaktoren nicht die alleinige Ursache für den Jahresgang sein können, denn sie werden schließlich im Ergebnis von regelmäßigen Überprüfungen der Geräte vorgenommen. Die Ergebnisse der Methode 2 ($t_{s,p}$) müßten theoretisch mit den Resultaten der Bezugsmethode ($t_{s,st}$) übereinstimmen. Von praktischer Seite ist dies jedoch nicht zu erwarten, da jedes Pyranometer mit einem Meßfehler von etwa 3 bis 5 % behaftet ist, der sich teilweise infolge der Differenzmessung addiert.

Der für die senkrecht zu den Sonnenstrahlen ausgerichtete Fläche festgelegte Schwellenwert von 120 W/m^2 erfordert eine sehr präzise Messung, da – bedingt durch die horizontal ausgerichteten Empfängerflächen der Pyranometer – die aufzulösenden Differenzen für geringe Sonnenhöhen sehr klein sind. Diese genaue Messung kann bei der Differenzmethode nur durch sehr sorgfältige Arbeit erreicht werden.

Aus Tabelle 10 sind für verschiedene Sonnenhöhen die 120 W/m^2 entsprechenden Werte der Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung für die Horizontalfläche zu ersehen. Diese Werte – in Verbindung mit den Ausführungen über die Meßfehler betrachtet – zeigen, daß bei kleinen Unterschieden zwischen den Bestrahlungsstärken der Global- und Himmelsstrahlung nur eine geringe Meßgenauigkeit erreichbar ist. Die damit verbundenen Probleme treten vor allem in den Morgen- und Abendstunden, im Winter, aber auch bei großen Sonnenhöhen auf, wenn stark wechselnde Bewölkung oder hohe bzw. dünne mittelhohe Wolken (Ci fib, Cs, As tr, Ac tr) vorkommen. In diesen Fällen zeigen sich die Grenzen der Differenzmethode. Bereits kleinere Abweichungen führen zum Nichterreichen des Schwellenwertes und damit zu Fehlern in der Sonnenscheindauer.

Die günstigsten Ergebnisse, die durchaus zufriedenstellend sind, wurden deshalb an Tagen mit einer relativen Sonnenscheindauer

> 60 % erreicht. Erhalten wird dieses Ergebnis durch den relativ ungestörten Tagesgang der Strahlung in dieser Gruppe, was nur zu einer geringen Anzahl von Schwellenwertüberschreitungen führt. Die Über- bzw. Unterschreitung des Schwellenwertes einige Minuten früher oder später ist in diesem Fall für die Tagessumme bedeutungslos.

Wechselnde Bewölkung verbunden mit Bestrahlungsstärken in der Größe des Schwellenwertes und/oder das häufige Über- bzw. Unterschreiten dieses Wertes führen verstärkt zu Fehlern bei den auf der Differenzmessung basierenden Methoden, d.h. den Methoden 2 bis 4. Aber auch die Messung der Sonnenscheindauer mit dem CAMPBELL-STOKES-Gerät führt in diesem Fall zu Fehlern, wie es in Abb. 5 deutlich wird. Bei den in dieser Gruppe vorliegenden Bedingungen wirken sich kleine Fehler bei der Messung der Bestrahlungsstärke sehr in der Sonnenscheindauer aus, wenn es nämlich dadurch nicht zum Erreichen des entsprechenden Schwellenwertes kommt. Die Methoden 2 bis 4 unterscheiden sich, wie bereits oben ausgeführt, durch die Wahl der Schwellenwerte. Im Gegensatz zur Methode 2 wird der Schwellenwert bei den Methoden 3 und 4 über ein Modell auf Grund des stochastischen Zusammenhanges zwischen der Bestrahlungsstärke der Himmelsstrahlung und dem Sinus der Sonnenhöhe dargestellt. Dies wirkt sich auch auf das Ergebnis aus, denn, wie aus den Abb. 1 und 2 bzw. 5 und 6 ersichtlich ist, sind die Quotienten und Differenzen der Werte $t_{s,20/10}$ der Methode 4 größer als die $t_{s,p}$ -Werte der Methode 2 im Vergleich mit den Werten $t_{s,st}$ der Bezugsmethode. Die Ursache für dieses Resultat wird bei Betrachtung der Abb. 7 deutlich.

Die Schwellenwerte der $t_{s,20/10}$ -Werte führen zu einer zu flach verlaufenden Gerade und damit zu einer leichten Überbestimmung der Sonnenscheindauer.

Betrachtet man einige Abschnitte des Jahresganges in den Abb. 1 bis 6 im Detail, so wird die unterschiedliche Wiedergabe der Sonnenscheindauer durch die einzelnen Methoden sichtbar. Vom September bis zum Oktober z.B. steigen die Quotienten $t_{s,p}/t_{s,st}$ und $t_{s,CS}/t_{s,st}$ stark an, während die Quotienten $t_{s,20/10}/t_{s,st}$ ein starkes Absinken erkennen lassen (Abb. 5). Gerade in diese Zeit fällt

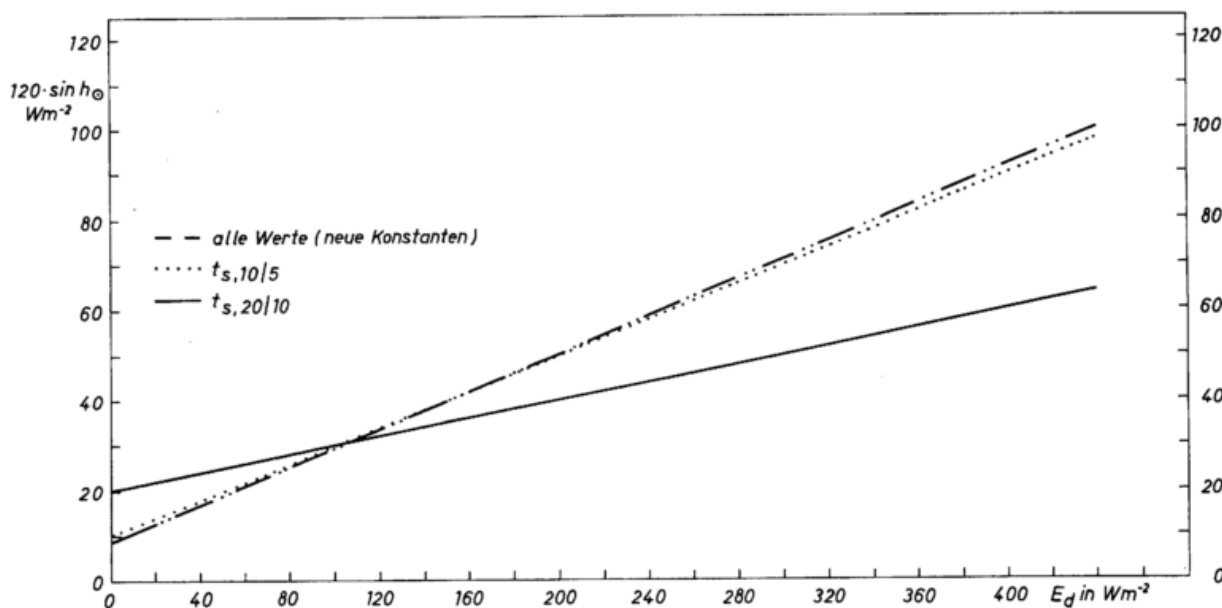


Abb. 7: Regressionsgeraden zur Berechnung von Schwellenwertfunktionen für die Bestimmung der Sonnenscheindauer aus Meßwerten von Potsdam 1983/84

eine verstärkte Verschiebung zu geringeren Bestrahlungsstärken, die aus der abnehmenden Sonnenhöhe auf Grund des Jahresanges resultieren. Aus Abb. 7 geht hervor, daß der Schwellenwert für die $t_{s,20/10}$ -Werte im Vergleich mit den anderen Verfahren etwas zu hoch ist, was sich in einer geringeren Sonnenscheindauer ausdrückt.

Eine Auswertung der Sonnenscheindauer bei einer mittleren stündlichen Bestrahlungsstärke der Himmelsstrahlung $E_d = 100 \text{ W/m}^2$ im Oktober zeigte, daß die $t_{s,20/10}$ -Werte in 25 Fällen insgesamt eine um 5,0 Stunden geringere Sonnenscheindauer gegenüber den $t_{s,p}$ -Werten ergaben. Dies wirkt sich bei den kurzen Ta-

gen im Winterhalbjahr und den damit verbundenen geringeren Einstrahlungen besonders stark aus. Dieser Effekt ist auch die Ursache für die kleineren Quotienten $t_{s,20/10}/t_{s,St}$ von Oktober bis Februar im Vergleich zu den Quotienten $t_{s,p}/t_{s,St}$ im Jahresverlauf. Die Untersuchung der mittleren monatlichen Stundensumme der Sonnenscheindauer unterstützt dieses Ergebnis.

Wie aus den Abbildungen 8 bis 11 ersichtlich ist, sind in den frühen Morgen- und späten Abendstunden, also bei geringen Bestrahlungsstärken, die Quotienten $t_{s,20/10}/t_{s,St}$ kleiner als die Quotienten $t_{s,p}/t_{s,St}$.

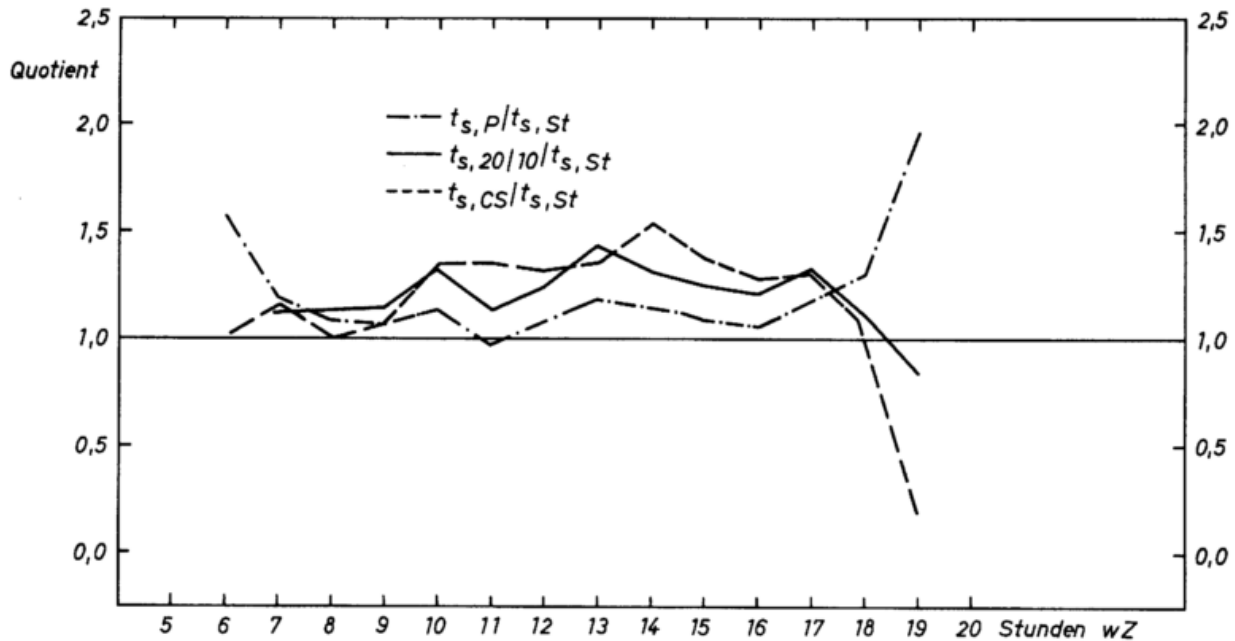


Abb. 8: Quotienten der mittleren monatlichen Stundensummen der Sonnenscheindauer der Methoden 2, 4 bzw. 6 und der Methode 1 ($t_{s,St}$), Potsdam, April 1983

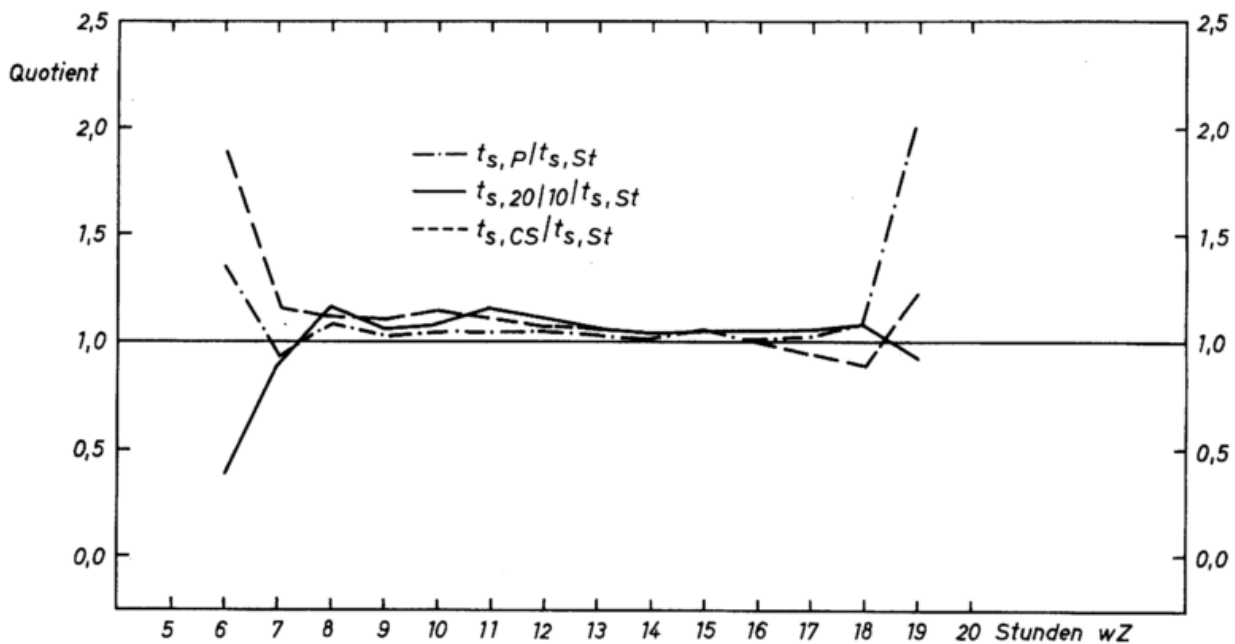


Abb. 9: Quotienten der mittleren monatlichen Stundensummen der Sonnenscheindauer der Methoden 2, 4 bzw. 6 und der Methode 1 ($t_{s,St}$), Potsdam, August 1983

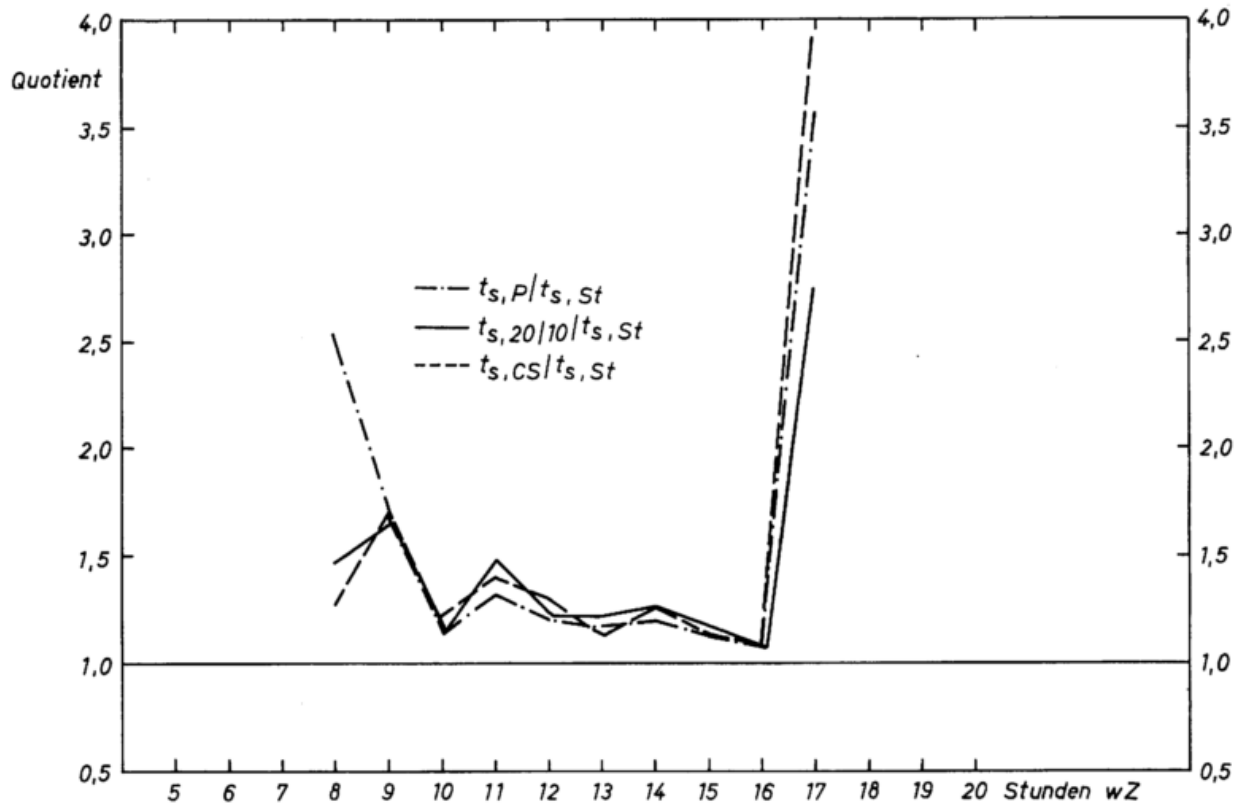


Abb. 10: Quotienten der mittleren monatlichen Stundensummen der Sonnenscheindauer der Methoden 2, 4 bzw. 6 und der Methode 1 ($t_{s,St}$), Potsdam, Oktober 1983

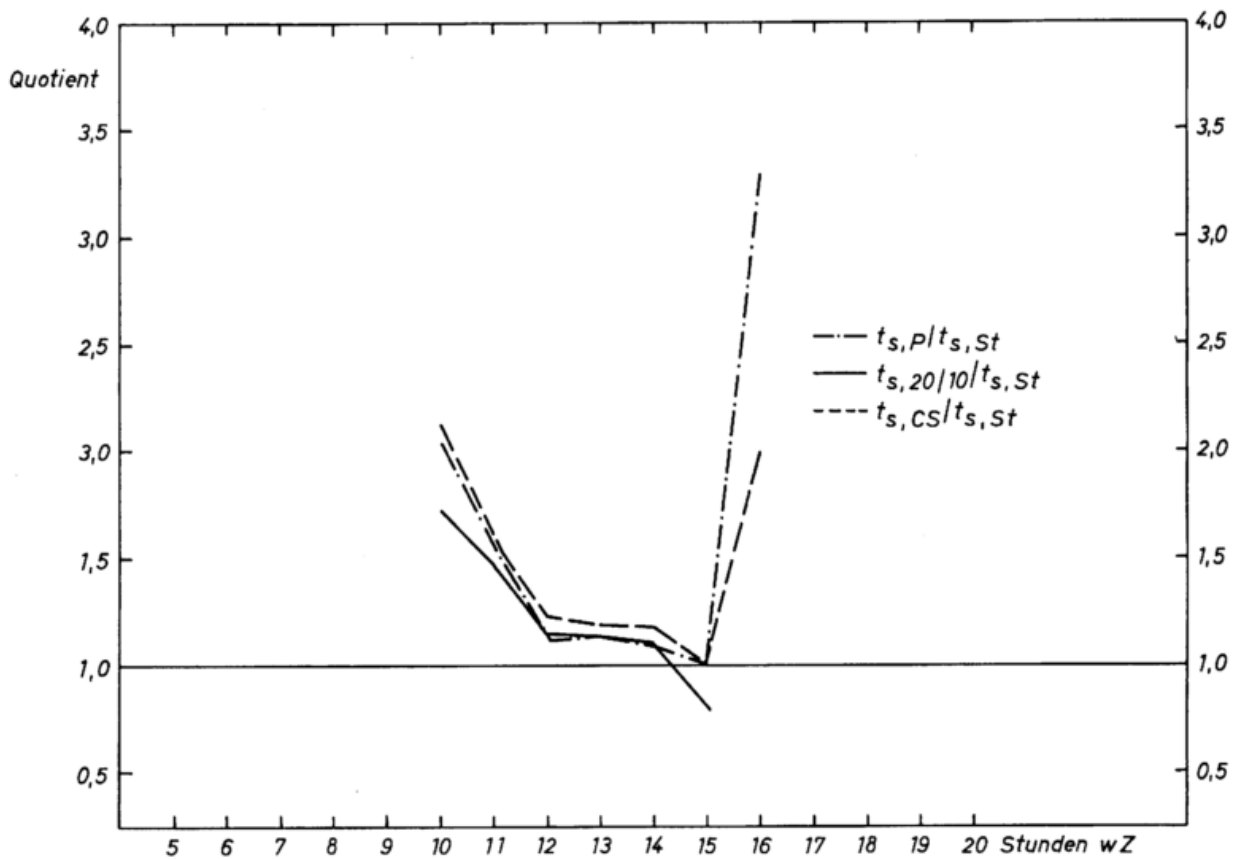


Abb. 11: Quotienten der mittleren monatlichen Stundensummen der Sonnenscheindauer der Methoden 2, 4 bzw. 6 und der Methode 1 ($t_{s,St}$), Potsdam, Januar 1984

Hieraus lassen sich die Abweichungen bei der Näherungsmethode für $t_{s,20/10}$ erkennen. Für die Praxis ist es einfacher, eine Näherungsmethode einzusetzen, da eine Menge an Rechenarbeit eingespart werden kann, die man sonst zur Ermittlung der $t_{s,p}$ -Werte benötigt.

Die ständigen positiven Abweichungen der Quotienten $t_{s,CS}/t_{s,St}$ haben ebenfalls verschiedene Ursachen, die jedoch hauptsächlich in eine Richtung wirken. Die Faktoren, die negative Abweichungen bewirken, werden überkompensiert, so daß schließlich eine positive Abweichung resultiert, die u.a. durch folgende Effekte verursacht wird. Der bekannte Überbrenneffekt führt zu höheren Werten im Vergleich zu elektrisch messenden Instrumenten. Dies wird durch die Aussage von PAINTER (1981), dargestellt in Tabelle 2, unterstrichen.

Ein Absinken der direkten Sonnenstrahlung auf 0 W/m^2 von 1 bis 2 Minuten Dauer bewirkte am CAMPBELL-STOKES-Gerät keine Unterbrechung der Brennspur. Bei 3 bis 4 Minuten Dauer bildeten sich unverkohlte Zacken an den Rändern (COLLMANN 1984), wodurch der Wert der Sonnenscheindauer vergrößert wird.

Die mit den unterschiedlichen Methoden berechneten mittleren monatlichen Tagessummen wurden noch dem Zeichentest (TAUBENHEIM 1969) unterworfen. Dabei zeigte sich, daß die beste Übereinstimmung zwischen den Werten $t_{s,p}$ und $t_{s,20/10}$ der Methoden 2 und 4 besteht. Dieses Resultat braucht nicht weiter zu verwundern, beruhen doch die Ergebnisse beider Methoden auf dem Differenzverfahren. Zwischen den anderen Methoden besteht nur im Fall der relativen Sonnenscheindauer $> 60\%$ Übereinstimmung, d.h., sie stammen aus einer Grundgesamtheit.

4.1.2.2 Überprüfung der Konstanten in der Schwellenwertfunktion

Die Grundlage für die Methoden 3 und 4 ist die angenommene Beziehung

$$E_{s,\text{Schwelle}} = c + d E_d \quad (36)$$

$E_{s,\text{Schwelle}}$ ist eine lineare Funktion, die von der Bestrahlungsstärke der Himmelsstrahlung E_d abhängt.

Die Forderung für den Schwellenwert

$$(E_g - E_d)/\sin h_\odot \geq 120 \text{ W/m}^2 \quad (37)$$

kann man auch in der Form

$$(E_g - E_d) \geq 120 \sin h_\odot \quad (38)$$

schreiben, weil in der Beziehung (37) $0 \leq \sin h_\odot \leq 1$ sein kann.

Gewöhnlich begrenzt man h_\odot auf über 5° . Da die Methoden 3 und 4 den Methoden 1 und 2 gleich sein sollen, muß auch der variable Schwellenwert

$$E_{s,\text{Schwelle}} = 120 \sin h_\odot \quad (39)$$

sein. Daraus folgt unter Berücksichtigung von (36) der lineare Ansatz

$$E_{s,\text{Schwelle}} = 120 \sin h_\odot = c + d E_d \quad (40)$$

Diese Gleichung kann auf Grund der großen Variabilität der Himmelsstrahlung im Tagesverlauf keine Funktion, sondern nur eine stochastische Beziehung darstellen.

Aus den vorhandenen Datenkollektiven wurden für jeden Monat und für alle Werte nach der Methode der kleinsten Quadrate die Regressionskoeffizienten und die Konstanten der Regressionsgleichung berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle II zusammengestellt. Ein paarweiser Vergleich der Regressionsgeraden erfolgte nach einem bei STORM (1972) angegebenen Verfahren. Es zeigte sich, daß die Geraden nicht aller Monate aus einer Grundgesamtheit stammen und auch nicht mit der aus allen Werten berechneten Jahresgeraden vereinbar sind.

Theoretisch bedeutet dieses Ergebnis, daß es zweckmäßig wäre, für jeden Monat andere Regressionsparameter zu benutzen. Es ist jedoch fraglich, ob dadurch die Resultate im Vergleich mit der auf der Berücksichtigung aller Werte basierenden Beziehung wesentlich verbessert werden können, da das Verfahren nur eine Näherungslösung darstellt.

Für weitere Rechnungen scheint es günstig zu sein, die für die Jahresgerade ermittelten Koeffizienten $c = 8,5 \text{ W/m}^2$ und $d = 0,21$ zu verwenden, die aber – ohne einen großen Fehler zu begehen – abgerundet werden können auf $c = 10 \text{ W/m}^2$ und $d = 1/5$. Letztere Werte wurden bei der Methode 3 für die $t_{s,10/5}$ -Werte verwendet. Diese Methode wurde mit Strahlungsdaten der meteorologischen Stationen Heiligendamm und Fichtelberg getestet, wie anschließend gezeigt wird.

4.2 Vergleiche in Potsdam, Heiligendamm und Fichtelberg, bezogen auf die pyranometrisch bestimmten $t_{s,p}$ -Werte nach der Methode 2

4.2.1 Meß- und Auswertemethodik

Da für die meteorologischen Stationen Heiligendamm und Fichtelberg kein der Sonne nachführbares Pyrheliometer zur Verfügung stand, wurde das in Kapitel 4.1 für Potsdam 1983/84 beschriebene Datenmaterial der Pyranometermeßwerte und der Sonnenscheinautographenwerte benutzt, um die $t_{s,20/10}$ -Werte und $t_{s,CS}$ -Werte auf die $t_{s,p}$ -Werte zu beziehen, denn die Meßwerte aus Heiligendamm und vom Fichtelberg können nur auf $t_{s,p}$ -Werte (Methode 2) bezogen werden. Man bekommt dadurch auch eine Vergleichsmöglichkeit für die Potsdamer Werte.

Außerdem konnten für Potsdam weitere Messungen 1985/86 mit Hilfe der AFMS-2 und eines Sonnenscheinautographen nach CAMPBELL-STOKES durchgeführt werden. Mit der AFMS-2 erhält man von zwei Pyranometern nach SONNTAG (eines ohne und eines mit Schattenring) die 10-min-Summen der Sonnenscheindauer $t_{s,20/10}$ (Methode 4), die zu Stunden- und Tagessummen aufaddiert wurden. Ferner werden von der AFMS-2 die zehnminütigen Bestrahlungen der Global- und Himmelsstrahlung ausgedrückt, wobei die Himmelsstrahlung die Schattenringkorrektur enthält. Die Bestrahlungsstärke der Global- und Himmelsstrahlung wird von der AFMS-2 im Minutenrhythmus erfaßt. Aus den zehnminütigen Bestrahlungen der Global- und Himmelsstrahlung wurden mittlere Bestrahlungsstärken gebildet, und für Juni und Juli 1985 sowie für Januar 1986 wurden die Sonnenscheindauerwerte $t_{s,p}$, $t_{s,10/5}$ und $t_{s,20/10}$ berechnet. Jeder 10-min-Wert wurde bei „Sonnenschein“ mit $1/6$ bewertet, um die entsprechende Stundensumme zu erhalten. Dazu stehen die von der AFMS-2 im Minutenrhythmus errechneten $t_{s,20/10}$ -Werte zum Vergleich zur Verfügung. Die Auswertung der Daten gestattet somit den Vergleich von 10-min-Mitteln und 1-min-Werten.

An den meteorologischen Stationen Heiligendamm und Fichtelberg wird mit zwei Pyranometern nach SONNTAG die Bestrahlungsstärke der Global- und Himmelsstrahlung mittels Motorkompensatoren analog registriert. Außerdem stehen von diesen Stationen die Stundensummen der Sonnenscheinautographen CAMPBELL-STOKES zur Verfügung.

Für Heiligendamm wurden für 1978 die Werte aus den Registrierstreifen jeweils für ein 10-min-Intervall mit 0,5 oder 1 bewertet. 0 bedeutet, daß der Schwellenwert nicht überschritten wurde, 0,5 zeigt an, daß der Schwellenwert 5 min lang überschritten wurde, und 1, daß er 10 min lang überschritten wurde. Die Summe für die sechs 10-min-Intervalle wurde mit 0,167 multipliziert, so daß

sich für vollen Sonnenschein für eine Stunde die Stundensumme 1,0 ergab, wie es auch bei den Sonnenscheinautographen-Auswertungen üblich ist. Für die Berechnung der Schwellenwerte wurden somit Mittel der Bestrahlungsstärken über 5 min gebildet. An die Werte der Himmelsstrahlung ist die Schattenringkorrektur angebracht. Es wurden $t_{s,P}$ - und $t_{s,20/10}$ -Werte berechnet.

Für Heiligendamm und Fichtelberg wurden für 1983/84 für die Berechnung der Sonnenscheindauerwerte mittlere Bestrahlungsstärken der Global- und Himmelsstrahlung aus zehnmündigen Bestrahlungen der Global- und Himmelsstrahlung gebildet. Jedes 10-min-Intervall wurde bei „Sonnenschein“ mit 1/6 bewertet, so daß z. B. für eine Stunde Sonnenschein der Wert 1,0 erhalten wurde. Die $t_{s,P}$, $t_{s,10/5}$ und $t_{s,20/10}$ -Werte wurden berechnet.

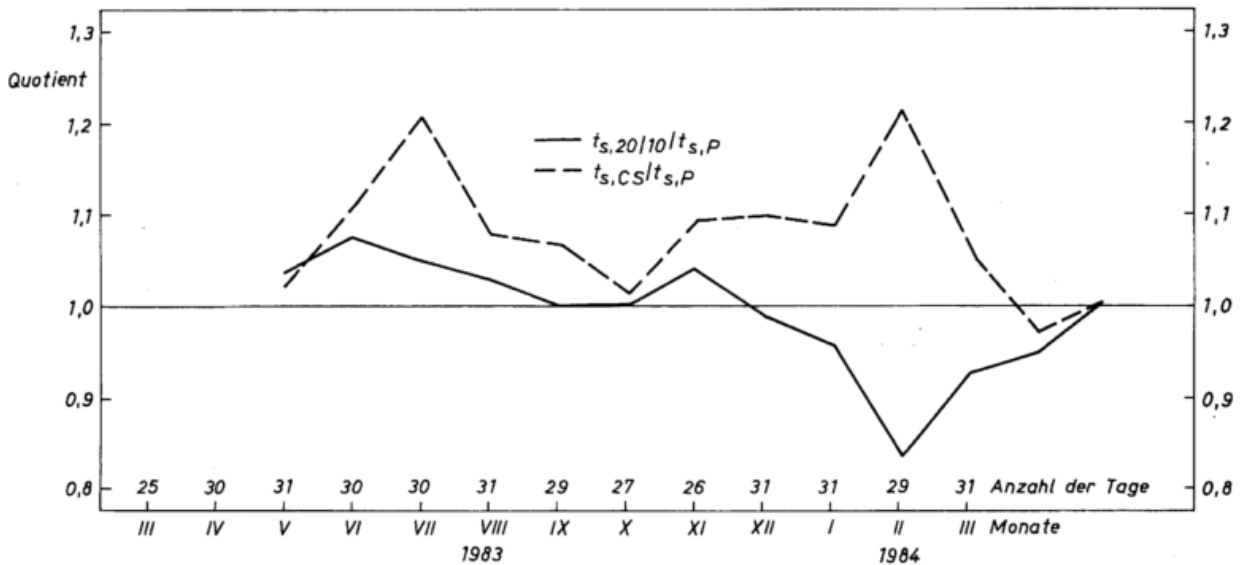


Abb. 12: Quotienten der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer der Methoden 4 bzw. 6 und der Methode 2 ($t_{s,P}$), Potsdam 1983/84

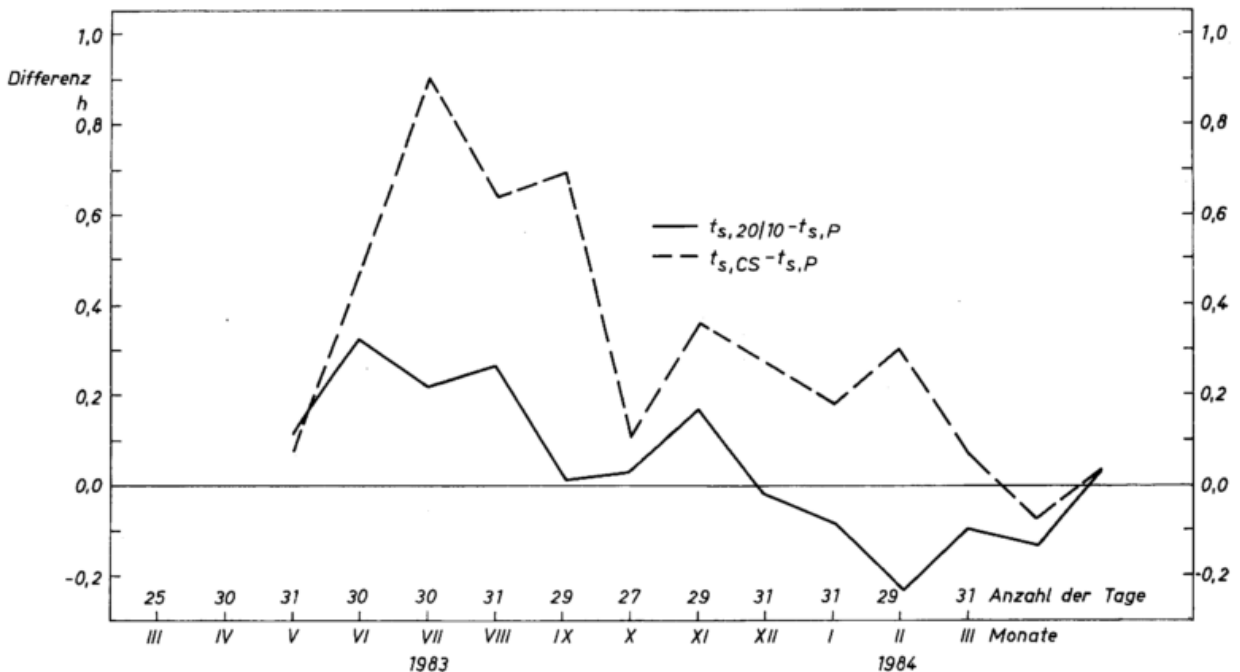


Abb. 13: Differenzen der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer (in Stunden) der Methoden 4 bzw. 6 und Methode 2 ($t_{s,P}$), Potsdam 1983/84

4.2.2 Ergebnisse

Für Potsdam 1983/84 wurden die Meßwerte verwendet, die in Tabelle 7 für die einzelnen Monate angegeben sind.

In Abb. 12 sind die Quotienten und in Abb. 13 die Differenzen der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer der Methoden 4 bzw. 6 und der Methode 2 ($t_{s,p}$) dargestellt. Gegenüber Abb. 1 und 2, bei denen die Kurven auf $t_{s,sl}$ bezogen worden waren, ergibt sich eine kleinere Amplitude. Die $t_{s,CS}$ -Werte sind fast immer größer als die $t_{s,p}$ -Werte. Im Mittel ist $t_{s,20/10}/t_{s,p} = 0,995$ und $t_{s,CS}/t_{s,p} = 1,081$.

Für Potsdam liegen auch die Ergebnisse der AFMS-2-Messungen für Juni und Juli 1985 sowie Januar 1986 vor, die in Tabelle 12 eingetragen wurden.

Aus der Tabelle 12 geht hervor, daß die $t_{s,20/10}$ -Werte – aus 10-min-Mitteln berechnet – im Juni 1985 um 26,4 %, im Juli 1985 um 16,9 % und im Januar 1986 um 42,9 % größer sind als die $t_{s,20/10}$ -Werte, berechnet aus 1-min-Werten. Das Mittelungsintervall spielt also eine bedeutende Rolle. Günstig ist, wenn man Einzelwerte, die nicht über ein Zeitintervall gemittelt sind, zur Berechnung verwendet.

Die Tabelle 13 zeigt die Monatssummen der Sonnenscheindauer, die auf $t_{s,p}$ -Werte bezogen wurden. Für den Vergleich stand ein Sonnenscheinautograph mit gelblicher Kugel und einer mit Klarglaskugel zur Verfügung. Der Unterschied in den Werten zwischen diesen beiden Geräten ist jedoch nicht groß.

Deutlich ist aus den Tabellen 12 und 13 zu ersehen, daß die Sonnenscheinautographenwerte beträchtlich höher liegen als die aus Einzelwerten von Pyranometermessungen berechneten Sonnenscheindauerwerte. Bei Werten aus 10-min-Mitteln können die Sonnenscheinautographenwerte sogar unter den pyranometrisch ermittelten liegen. Dies ist bei Betrachtung der nächsten Abbildungen zu berücksichtigen.

Für Heiligendamm sind die Monatssummen der Sonnenscheindauer $t_{s,p}$, $t_{s,20/10}$ und $t_{s,CS}$ für 1978 aus Tabelle 14 zu ersehen. Mit Hilfe dieser Werte wurden wieder die Quotienten und Differenzen

der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer der Methoden 4 bzw. 6 und Methode 2 ($t_{s,p}$) in den Abb. 14 und 15 dargestellt. Die beiden Abbildungen 14 und 15 lassen erkennen, daß die $t_{s,CS}$ -Werte nur für die Monate November bis Januar etwas höher liegen, sonst aber geringer sind als die $t_{s,20/10}$ -Werte. Im Jahresmittel ist $t_{s,20/10}/t_{s,p} = 1,004$ und $t_{s,CS}/t_{s,p} = 0,980$. Vorläufige Ergebnisse nach dieser Methode wurden von KLEMM und SONNTAG (1981) veröffentlicht.

Die Monatssummen der Sonnenscheindauerwerte für Heiligendamm für 1983/84 sind in Tabelle 15 angegeben. Die pyranometrisch ermittelten Werte stammen dabei aus 10-min-Mitteln. Die Darstellung der Quotienten und Differenzen der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer der Methoden 3, 4 bzw. 6 und Methode 2 ($t_{s,p}$) ist in den Abbildungen 16 und 17 erfolgt.

Im Mittel ist $t_{s,10/5}/t_{s,p} = 0,978$, $t_{s,20/10}/t_{s,p} = 0,992$ und $t_{s,CS}/t_{s,p} = 0,920$. Die geringen $t_{s,CS}$ -Werte sind wieder auf den Mittelungseffekt bei $t_{s,p}$ zurückzuführen. Streng vergleichbar sind aber die $t_{s,10/5}/t_{s,p}$ -Werte und die $t_{s,20/10}/t_{s,p}$ -Werte sowie die Differenzen $t_{s,10/5} - t_{s,p}$ und $t_{s,20/10} - t_{s,p}$. Die Amplitude der $t_{s,10/5}$ -Werte ist jeweils geringer als die der $t_{s,20/10}$ -Werte. Größere Amplitudenschwankungen treten bei den $t_{s,CS}$ -Werten auf.

Die Monatssummen der Sonnenscheindauerwerte für den Fichtelberg für 1983/84 sind in Tabelle 15 angegeben. Die pyranometrisch ermittelten Werte stammen dabei aus 10-min-Mitteln.

Die Darstellung der Quotienten und Differenzen der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer der Methoden 3, 4 bzw. 6 und Methode 2 ($t_{s,p}$) ist in den Abbildungen 18 und 19 erfolgt.

Im Mittel ist $t_{s,10/5}/t_{s,p} = 1,041$, $t_{s,20/10}/t_{s,p} = 1,062$ und $t_{s,CS}/t_{s,p} = 0,987$. Die geringen $t_{s,CS}$ -Werte sind auch hier wieder auf den Mittelungseffekt bei $t_{s,p}$ zurückzuführen. Wieder sind aber streng vergleichbar die $t_{s,10/5}/t_{s,p}$ -Werte und die $t_{s,20/10}/t_{s,p}$ -Werte sowie die Differenzen $t_{s,10/5} - t_{s,p}$ und $t_{s,20/10} - t_{s,p}$. Auch hier liegen die $t_{s,10/5}$ -Werte etwas besser als die $t_{s,20/10}$ -Werte.

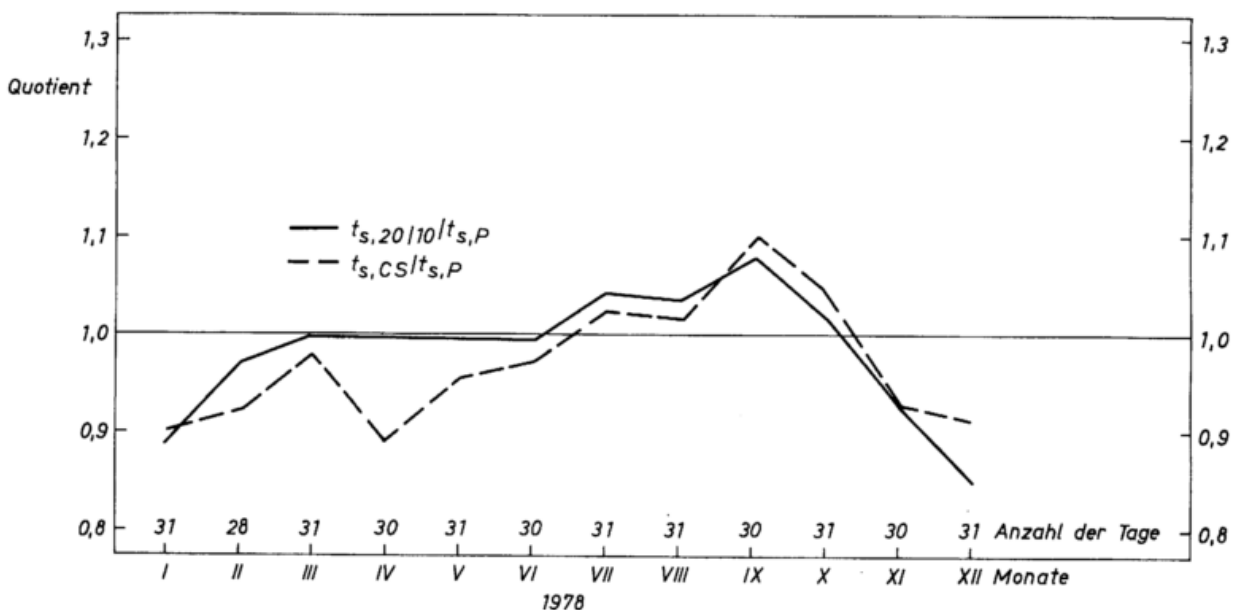


Abb. 14: Quotienten der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer der Methoden 4 bzw. 6 und der Methode 2 ($t_{s,p}$). Heiligendamm 1978

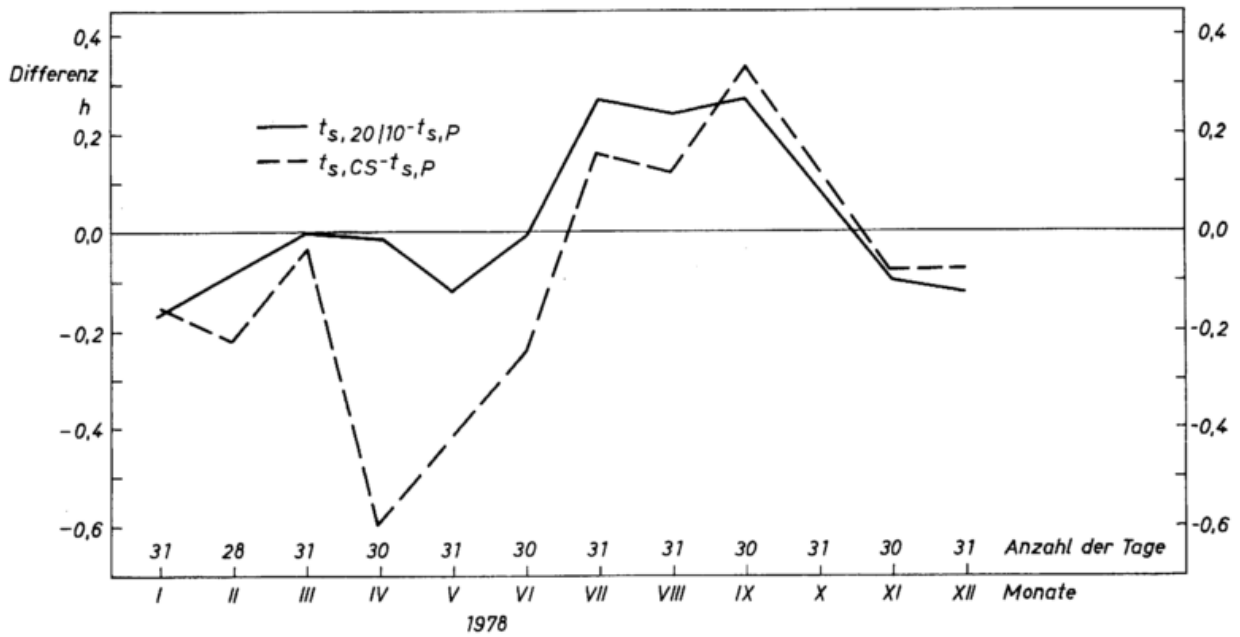


Abb. 15: Differenzen der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer (in Stunden) der Methoden 4 bzw. 6 und Methode 2 ($t_{s,P}$), Heiligendamm 1978

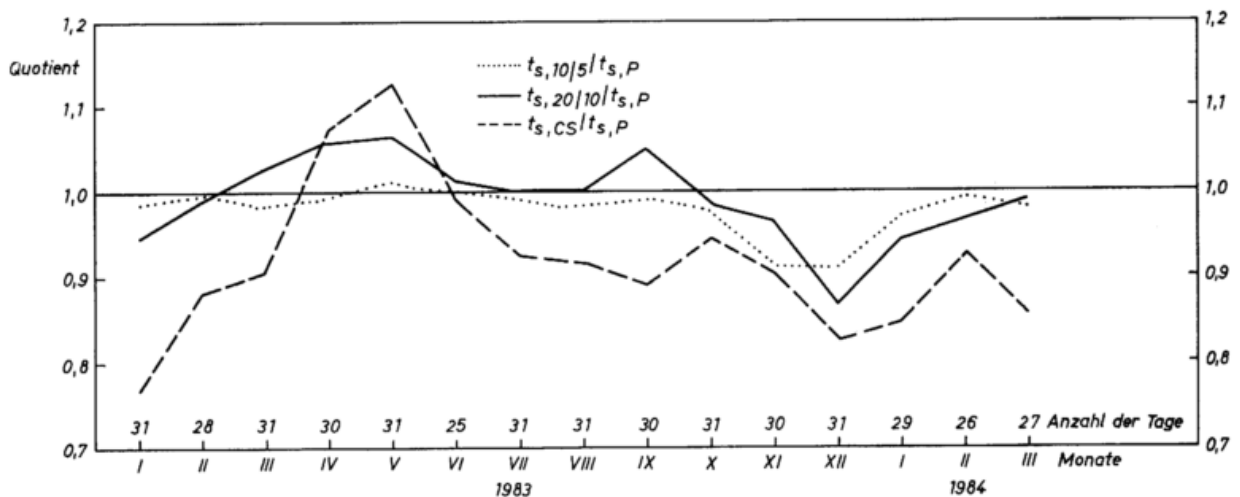


Abb. 16: Quotienten der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer der Methoden 3, 4 bzw. 6 und der Methode 2 ($t_{s,P}$), Heiligendamm 1983/84

4.3 Vergleiche in Potsdam von CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheindauerwerten, bezogen auf die mit der AFMS-2 pyranometrisch bestimmten $t_{s,20/10}$ -Werte nach der Methode 4

4.3.1 Meß- und Auswertemethodik

Aus Einzelwerten der Bestrahlungsstärken der Globalstrahlung und der mit der Schattenringkorrektur versehenen Himmelsstrahlung, in jeder Minute gemessen mit Pyranometern nach SONNTAG, wird an der AFMS-2 die Sonnenscheindauer nach Methode 4 mit $t_{s,20/10}$ ermittelt. Die gebildeten Monatssummen dienen zum Vergleich mit den Monatssummen des Sonnen-

scheinautographen nach CAMPBELL-STOKES. Meßort war Potsdam-Säkularstation.

4.3.2 Ergebnisse

Die Monatssummen der Sonnenscheindauer $t_{s,20/10}$, die aus Einzelmessungen im 1-min-Rhythmus mittels der AFMS-2 gewonnen wurden, und die Monatssummen der Sonnenscheindauer vom Sonnenscheinautographen $t_{s,CS}$ sind in Tabelle 17 gemeinsam mit den Quotienten $t_{s,CS}/t_{s,20/10}$ für die Zeit vom Juni 1985 bis August 1986 eingetragen. Auch bei diesem Vergleich zeigt sich, daß die $t_{s,CS}$ -Werte im Mittel höher liegen als die pyranometrisch bestimmten Sonnenscheindauerwerte, im angegebenen Zeitraum im Mittel um 19 %.

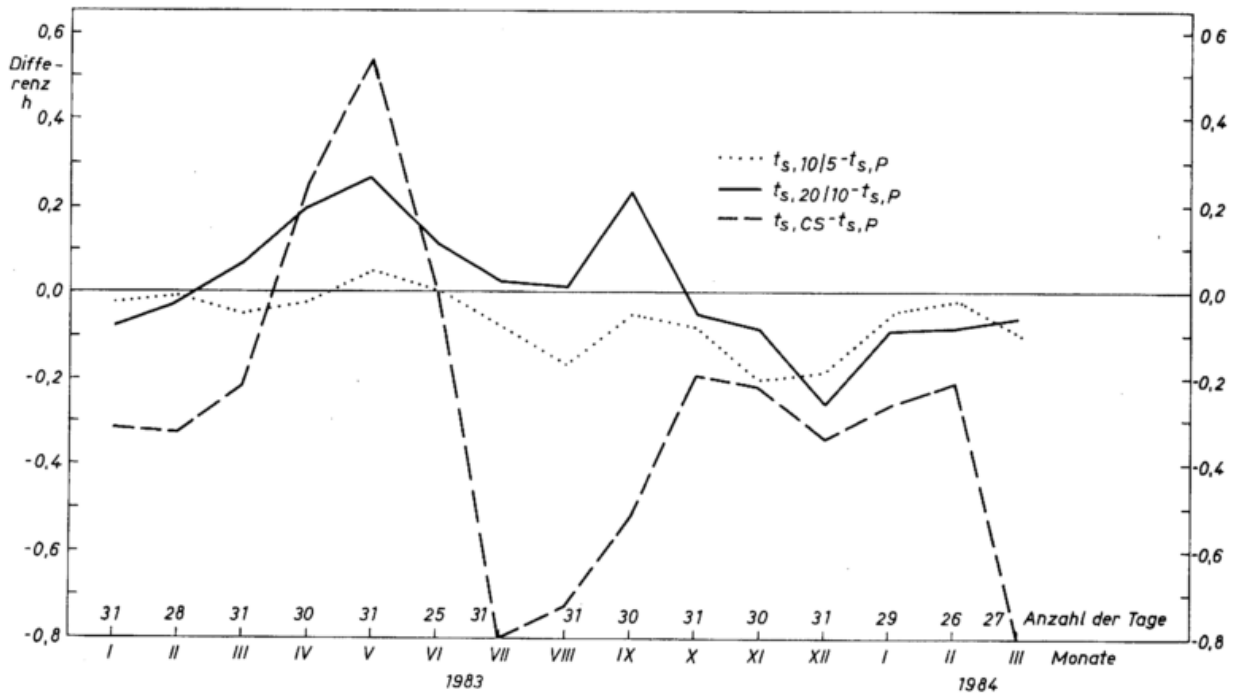


Abb. 17: Differenzen der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer (in Stunden) der Methoden 3, 4 bzw. 6 und Methode 2 ($t_{s,P}$), Heiligendamm 1983/84

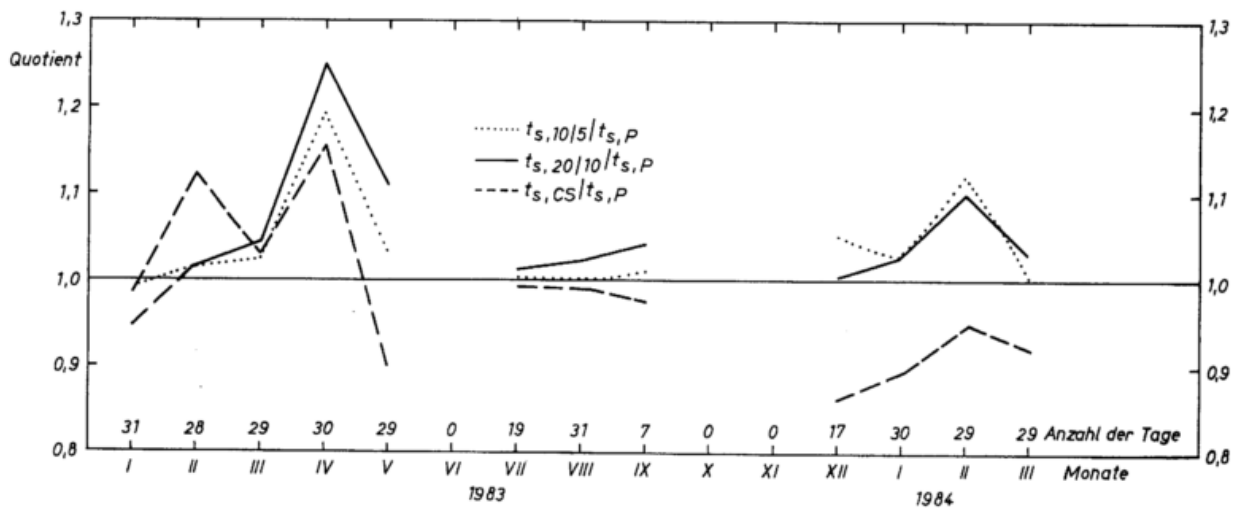


Abb. 18: Quotienten der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer der Methoden 3, 4 bzw. 6 und der Methode 2 ($t_{s,P}$), Fichtelberg 1983/84

4.4 Berechnung der Tages-, Monats- und Jahressummen der Sonnenscheindauer aus der täglichen, monatlichen oder jährlichen Bestrahlung durch die Globalstrahlung nach der Methode 5 für Heiligendamm

Man kann nun weiter vereinfachen, indem die Sonnenscheindauerwerte aus den Angaben nur eines Pyranometers ohne Schattenscheitler berechnet werden. Im zweiten Kapitel wurde ausführlich gezeigt, daß die mit Sonnenscheinautographen gemessenen Werte meist mit Hilfe einer linearen (Gleichung 1 bis 3) oder komplizierteren Regressionsgleichung in tägliche, monatliche oder jährliche Bestrahlungen durch die Globalstrahlung H_g umgerechnet

werden. Hier wird nun genau das Umgekehrte getan. Allerdings schließt diese Methode aus, Stundensummen der Sonnenscheindauer zu erhalten, da in diesem Zeitintervall die Streuungen zu groß werden. Man muß sich darüber im klaren sein, daß hier eine statistische Methode angewandt wird und daß die Eingangswerte der Bestrahlungen durch die Bestrahlung H_g ohne Auftrennung in die Komponenten der Bestrahlungen durch die direkte Sonnenstrahlung auf die horizontale Fläche H_d und die Himmelsstrahlung H_d in die Funktion eingesetzt werden. Es ist damit auch zu erwarten, daß die Streuungen und Abweichungen schon bei den Tagessummen der Sonnenscheindauer größer werden. Deshalb muß hier eine ausführliche statistische Untersuchung durchgeführt werden.

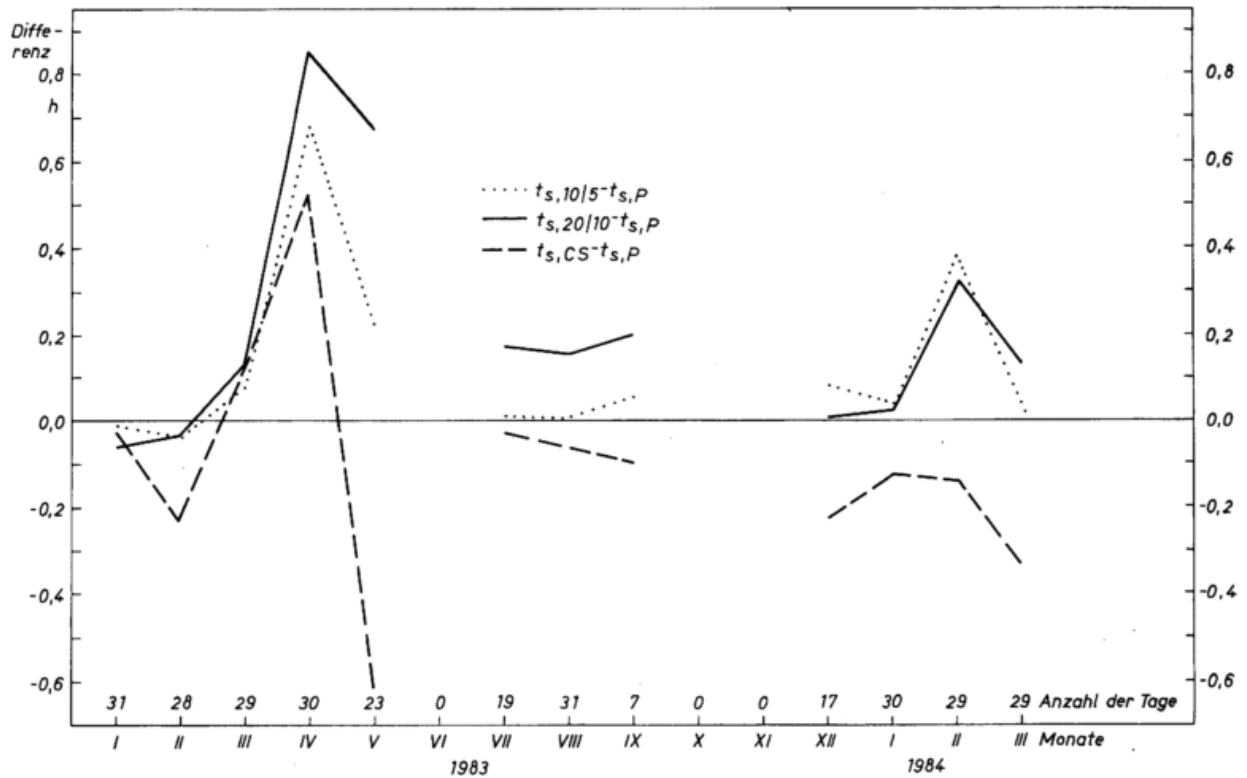


Abb. 19: Differenzen der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer (in Stunden) der Methoden 3, 4 bzw. 6 und Methode 2 ($t_{s,p}$), Fichtelberg 1983/84

An Datenmaterial der Meteorologischen Station Heiligendamm für das Jahr 1978 wurde verwendet:

- tägliche und monatliche Bestrahlungen durch die Globalstrahlung, gemessen mit einem Pyranometer nach SONNTAG, berechnet am Meteorologischen Hauptobservatorium,
- Tages- und Monatssummen der Sonnenscheindauer, gemessen mit dem Sonnenscheinautographen nach CAMPBELL-STOKES, ausgewertet und berechnet an der Meteorologischen Station Heiligendamm ($t_{s,CS}$ -Werte),
- Tages- und Monatssummen der Sonnenscheindauer, gemessen mit zwei Pyranometern nach SONNTAG, eines ohne Schattenring und eines mit Schattenring, ausgewertet und berechnet nach Methode 2 (Referenzwerte $t_{s,p}$),
- Tages- und Monatssummen der Sonnenscheindauer, gemessen wie bei c), ausgewertet und berechnet nach Methode 4 ($t_{s,20/10}$ -Werte).

Es soll noch erwähnt werden, daß von all diesen Größen auch Stundensummen vorliegen, die sich aber aus den angegebenen Gründen bei dieser Methode nicht verwenden lassen.

Als erster Schritt wurden Regressionskoeffizienten berechnet nach der Gleichung

$$\frac{H_g}{H_{g,wolo}} = \left(a' + b' \frac{t_{s,CS}}{t_{s,max}} \right) \pm S_{rel.} \quad (41)$$

Damit man die in Gleichung (3) angegebenen Koeffizienten vom Forschungsinstitut für Hydrometeorologie nach v. SCHÖNERMARK, WUCHOLD und FREYDANK (1973) $a' = 0,21$ und $b' = 0,61$ von den neuen unterscheiden kann, werden sie in den Tabellen mit (FIH) gekennzeichnet.

Die $t_{s,max}$ -Werte lassen sich nach Gleichung (15) berechnen und $H_{g,wolo}$ -Werte nach Gleichung (4). $t_{s,max}$ und $H_{g,wolo}$ sind Funktionen der geographischen Breite und der Deklination der Sonne. Die astronomischen Größen können mit den im zweiten Kapitel angegebenen Gleichungen berechnet werden. SONNTAG verwendete die von COLLMANN (1953/54) in einer Tabelle angegebenen täglichen Werte $H_{g,wolo}$ und stellte die Formel (4) dafür auf.

Für die spätere Verwendung ist die Gleichung

$$t_{s,Hg} = t_{s,max} \left(a + b \frac{H_g}{H_{g,wolo}} \right) \quad (42)$$

vorgesehen. In Tabelle 18 sind daher die a- und b-Werte in Klammern angegeben worden. Es ist

$$a = -\frac{a'}{b'} \text{ und } b = \frac{1}{b'}. \quad (43)$$

Statistisch gesehen ist dies nur eine Näherung. In Gleichung (42) muß noch die Bedingung eingeführt werden:

$$\text{falls } (t_s < 0), \text{ folgt } t_s = 0. \quad (44)$$

Die Korrelation der $t_{s,p}$ -Werte und H_g -Werte wurde mit der Gleichung

$$\frac{t_{s,p}}{t_{s,max}} = \left(a + b \frac{H_g}{H_{g,wolo}} \right) \pm S_{rel.} \quad (45)$$

durchgeführt.

Sowohl die Koeffizienten für Gleichung (41) als auch die für Gleichung (45) wurden für die einzelnen Jahreszeiten, Halbjahre und Jahre bestimmt. Die in den nachfolgenden Tabellen benutzten Abkürzungen F/S/H/W, FS/HW und J werden in den Tabellen 18 und 19 näher erklärt. Der Schrägstrich bedeutet hier, daß die F-Werte für das Frühjahr, die S-Werte für den Sommer, die H-Werte für den Herbst und die W-Werte für den Winter benutzt werden. Er deutet Koeffizientenwechsel an. Die relative Standardabweichung wird mit s_{rel} und der Korrelationskoeffizient mit r bezeichnet. Die statistische Sicherheit beträgt $P = 68,3\%$.

Alle Betrachtungen werden sowohl mit $t_{s,CS}$ - als auch mit $t_{s,P}$ -Werten durchgeführt, da bisher in der Literatur meist die $t_{s,CS}$ -Werte verwendet wurden.

Mit den jeweiligen Konstantenpaaren a und b, wie sie in den Tabellen 18 und 19 angegeben sind, wurde nun für jeden Tag des Jahres 1978 die Tagessumme der Sonnenscheindauer $t_{s,Hg}$ berechnet. Das gleiche wurde für die Monatssummen der Sonnenscheindauer durchgeführt. Für die Tagessummen der Sonnenscheindauer wurden auch die folgenden Prozentzahlen berechnet:

$$\frac{t_{s,Hg} - t_{s,CS}}{t_{s,CS,Monat}} 100, \frac{t_{s,Hg} - t_{s,CS}}{t_{s,max}} 100 \quad (46)$$

$$\frac{t_{s,Hg} - t_{s,P}}{t_{s,P,Monat}} 100, \frac{t_{s,Hg} - t_{s,P}}{t_{s,max}} 100 \quad (47)$$

wobei $t_{s,max}$ die astronomisch möglichen Sonnenscheindauerwerte am Tag und $t_{s,CS,Monat}$ und $t_{s,P,Monat}$ die Monatssummen der Sonnenscheindauer sind.

Um zu sehen, inwieweit nun die berechneten $t_{s,Hg}$ -Tagessummen von den $t_{s,CS}$ - und $t_{s,P}$ - sowie den $t_{s,20/10}$ -Tagessummen abweichen, und um die Streuung festzustellen, wurde eine erneute Regressionsrechnung durchgeführt:

$$y = (a_1 + b_1 x) \pm s \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } y &= t_{s,CS} \text{ und } x = t_{s,Hg} \\ y &= t_{s,P} \text{ und } x = t_{s,Hg} \\ y &= t_{s,20/10} \text{ und } x = t_{s,Hg} \end{aligned}$$

Die Standardabweichung wird mit s bezeichnet.

Die Ergebnisse der Rechnung sind in den Tabellen 20 bis 28 enthalten. Man ersieht daraus, daß die Streuung doppelt so groß ist wie bei der Methode 4 und daß der Konstantenwechsel F/S/H/W oder FS/HW keinen Vorteil bringt. Am günstigsten sind die Konstanten, die für das ganze Jahr gelten (Tabellen 24 bis 26). Auch die Konstanten J(FIH), die nicht speziell für Heiligendamm berechnet worden waren, zeigen die gleichen Streuungen. Wenn man etwa 7 bis 8 % für eine statistische Sicherheit von $P = 68,3\%$ hat, so ergibt sich für $P = 95\%$ etwa $\pm 15\%$ für die Tagessummenberechnung. Die mit den verschiedenen Konstantenpaaren berechneten Summen der Sonnenscheindauer sind in den Tabellen 29 und 30 enthalten.

Die Quotienten dieser Summen und der Summe $t_{s,CS}$ sind in Tabelle 31 und mit der Summe $t_{s,P}$ in Tabelle 32 enthalten. Zum Vergleich sind auch die Quotienten der Summen aus der Schwellenwertmethode 4 $t_{s,20/10}$ und den $t_{s,CS}$ -Werten bzw. $t_{s,P}$ -Werten dargestellt. Die $t_{s,20/10}$ -Werte waren aus 5-min-Mitteln berechnet.

Die Differenzen (in Stunden) zu den $t_{s,CS}$ -Werten sind in Tabelle 33 und die zu den $t_{s,P}$ -Werten in Tabelle 34 eingetragen. In der Ta-

belle 35 sind die Differenzen der $t_{s,Hg}$ -Werte von den $t_{s,CS}$ -Werten und in Tabelle 36 von den $t_{s,P}$ -Werten in % von $t_{s,max}$ dargestellt.

In den Tabellen 37 und 38 sind die extremen Abweichungen der $t_{s,Hg}$ -Tagessummen in % der Monatssummen enthalten. In Tabelle 39 ist die Anzahl der Tage, die eine Tagessummenabweichung von mehr als 10 %, bezogen auf $t_{s,max}$ haben, eingetragen. Die Abweichungen der $t_{s,Hg}$ -Werte wurden zu den $t_{s,CS}$ - und $t_{s,P}$ -Werten gebildet. Beim Konstantenpaar J ergaben sich 81 und 100 Tage im Jahr. Mit Methode 4 wurde ebenfalls die Anzahl der Tage über 10 % der Tagessummenabweichungen der $t_{s,20/10}$ -Werte gebildet, und es ergaben sich mit den $t_{s,CS}$ -Werten 17 Tage und mit den $t_{s,P}$ -Werten nur 4 Tage im Jahr.

Die Anzahl der Abweichungen der Tagessummen bei der Methode 5 ist also wesentlich größer als bei Methode 4. Die Tabellen 40 und 41 zeigen die aufgetretenen Extremwerte der Tagessummenabweichung $t_{s,Hg}$ in %, bezogen auf tägliche $t_{s,max}$ für die Konstanten der Tabelle 18 und 19 ermittelt mit $t_{s,CS}$ und $t_{s,P}$. Bei den Konstanten der $t_{s,CS}$ -Werte können Abweichungen bis zu 35 % und bei denen der $t_{s,P}$ -Werte bis zu 30 % auftreten. Man sieht auch hieraus, daß die Abweichungen nach der Methode 5 als Folge der bei der Globalstrahlung nicht einzeln betrachteten Komponente „Himmelsstrahlung“ erheblich größer werden können als bei Beachtung dieser Komponente (Methode 4).

5 Schlußfolgerungen

Die CIMO der WMO (1982) empfahl, als neues Referenzgerät zur Messung der Sonnenscheindauer ein Pyrheliometer einzusetzen, das parallaktisch montiert automatisch der Sonne nachgeführt werden soll. Werte, die über einem Schwellenwert von 120 W/m^2 liegen, zeigen „Sonnenschein“ an (Methode 1; $t_{s,S}$). Über die Berechnung der einzelnen Methoden gibt Tabelle 6 Auskunft. An automatisch arbeitenden meteorologischen Stationen ist der Einsatz eines solchen Pyrheliometers schwierig, da täglich eine Einstellung und mehrere Kontrollen erforderlich sind. Solchen Werten am nächsten kommen die $t_{s,P}$ -Werte der Methode 2. Sie können aus den Werten zweier Pyranometer erhalten werden, wovon eines einen Schattenring haben muß. Dieser braucht nur alle paar Tage nachgestellt zu werden. Erforderlich ist jedoch die Berechnung von $\sin h_{\odot}$ mit Hilfe von astronomischen Formeln. Da diese Berechnung relativ aufwendig ist, ist es günstiger, eine Schwellenwertfunktion

$$\left(10 + \frac{E_d}{5}\right)$$

einzuführen, die auf die $t_{s,10/5}$ -Werte der Methode 3 führt. Der Schwellenwert ist mit der Differenz der Bestrahlungsstärken der Globalstrahlung und Himmelsstrahlung ($E_g - E_d$) zu vergleichen. Davon wenig abweichende Werte liefert auch die Schwellenwertfunktion

$$\left(20 + \frac{E_d}{10}\right)$$

welche die $t_{s,20/10}$ -Werte der Methode 4 liefert. Mit Hilfe dieser Methoden können Stunden-, Tages-, Monatswerte usw. erhalten werden. Als Summationsintervall oder Abfrageintervall für die zu verarbeitenden Strahlungswerte sollten zwei Minuten nicht überschritten werden.

Sehr aufwendig in bezug auf die Berechnung und relativ ungenau sind die Werte $t_{s,Hg}$ nach Methode 5, bei der nur ein Pyranometer zur Messung der Bestrahlung der Globalstrahlung H_g benötigt wird. Sinnvoll wird die Methode 5 erst bei der Berechnung von Monatssummen der Sonnenscheindauer. Der Jahresgang der Konstanten a und b in Gleichung (42) kann dabei vernachlässigt werden. Es kann für Tagessummen $a = -0,24$ und $b = 1,36$ und für Monatssummen $a = -0,16$ und $b = 1,18$ verwendet werden.

Die Werte des Sonnenscheinautographen nach CAMPBELL-STOKES $t_{s,CS}$ (Methode 6) liegen meist höher als die, die mit dem Pyrheliometer oder den Pyranometern erhalten wurden, wenn das Summationsintervall oder Abfrageintervall nicht größer als zwei Minuten war.

6 Zusammenfassung

Ausgehend von der Definition des meteorologischen Parameters „Sonnenscheindauer“ wird die Anwendung von Sonnenscheindauerdaten in der Praxis erörtert. Die Meßmethoden und Meßgeräte werden beschrieben, wobei sowohl die kalorimetrisch als auch die lichttechnisch arbeitenden Geräte behandelt werden. Weiterhin werden sechs kalorimetrische Meßmethoden erörtert, mit denen an den Meteorologischen Stationen Potsdam, Heiligendamm und Fichtelberg Testprogramme durchgeführt wurden.

Bei der ersten Methode wird ein der Sonne nachgeführtes Pyrheliometer verwendet. „Sonnenschein“ herrscht, wenn die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung 120 W/m^2 überschreitet. Diese Methode, die von der World Meteorological Organization als Standardmethode angegeben wurde, konnte nur an der Meteorologischen Station Potsdam angewandt werden.

Bei der 2. Methode wird aus pyranometrisch gemessenen Bestrahlungsstärken der Global- und Himmelsstrahlung die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung auf die horizontale Fläche ermittelt und durch den Sinus der Sonnenhöhe dividiert. Dieser Wert wird mit der Schwelle von 120 W/m^2 verglichen. Da die Berechnung des Sinus der Sonnenhöhe relativ aufwendig ist, werden zwei Näherungsverfahren als Methode 3 und 4 angegeben. Hierbei wird die bei Methode 2 beschriebene pyranometrisch ermittelte Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung auf die horizontale Fläche verwendet und bei Methode 3 mit der Schwellenwertfunktion

$$\left(10 + \frac{E_d}{5}\right)$$

W/m^2 und bei Methode 4 mit

$$\left(20 + \frac{E_d}{10}\right)$$

W/m^2 verglichen, wobei E_d die Bestrahlungsstärke der Himmelsstrahlung ist. Für die Methoden 2 bis 4 werden zwei Pyranometer – eines ohne und eines mit Schattenring – benötigt. Bei Methode 5 kommt man mit nur einem Pyranometer aus. Es wird dabei die Sonnenscheindauer aus der täglichen oder monatlichen Bestrahlung durch die Globalstrahlung über eine Regressionsgleichung ermittelt. Auch bei dieser Methode sind eine Reihe astronomischer Größen zu berechnen. Näherungsgleichungen für die Berechnung dieser Größen werden angegeben.

Schließlich wird als 6. Methode der Sonnenscheinautograph nach CAMPBELL-STOKES behandelt. Im allgemeinen nimmt die Meßunsicherheit in der Reihenfolge der angegebenen Methoden zu.

Die Meßergebnisse, die von den genannten Meteorologischen Stationen gewonnen wurden, werden mitgeteilt, und es werden Schlußfolgerungen zur Beurteilung der einzelnen Methoden gezogen.

Summary

On the basis of the definition of the meteorological parameter "sunshine duration", the application in practice of sunshine duration values is discussed. Measuring methods and instruments are described taking into consideration both calorimetric and photometric instruments. Furthermore, six calorimetric measuring methods are described that were used in the framework of test programs carried out at the meteorological stations Potsdam, Heiligendamm and Fichtelberg.

The 1st method provides the utilization of a sun-tracked pyrheliometer. There is sunshine as soon as the direct solar irradiance exceeds 120 W/m^2 . This method, which was given by the World Meteorological Organization as standard method, could only be applied at the meteorological station Potsdam.

In case of the 2nd method, the direct solar irradiance on a horizontal surface resulting from global and sky irradiance measured with pyranometers is determined and divided by the sine of the altitude of the sun. The value obtained is compared with the threshold of 120 W/m^2 . As the calculation of the sine of the altitude of the Sun is rather difficult, two approximation procedures are given as methods 3 and 4 utilizing the direct solar irradiance on a horizontal surface determined by pyranometric measurements as described under method 2. In case of method 3 the direct solar irradiance is compared with the threshold function

$$\left(10 + \frac{E_d}{5}\right)$$

W/m^2 , and in case of method 4 it is compared with the threshold function

$$\left(20 + \frac{E_d}{10}\right)$$

W/m^2 , with E_d being the sky irradiance. For methods 2 to 4 two pyranometers are needed (one without shadow ring and one with shadow ring). For method 5 one pyranometer is needed only. This method yields the sunshine duration resulting from daily and monthly radiant exposures by global radiation with the aid of a regression equation. In case of this method astronomical values have to be calculated as well. Approximation equations for calculating the values are given.

Finally, as 6th method, the CAMPBELL-STOKES sunshine recorder is discussed.

Generally, the uncertainty of measurement grows in the order of the methods discussed.

The measuring results of the above meteorological stations are given and conclusions are drawn concerning the assessment of the different methods.

7 WMO-Vergleich von automatisch arbeitenden Sonnenscheindauermeßgeräten

Nach Abschluß des Manuskriptes fand 1988/89 in Hamburg ein WMO-Vergleich von automatisch arbeitenden Sonnenscheindauermeßgeräten statt. Die vorläufigen Ergebnisse sind veröffentlicht von DEHNE in "Preliminary Results of the WMO Automatic Sunshine Duration Measurement Comparison 1988/89 in Hamburg", WMO-Instruments and Observing Methods Report No. 35, p. 27-32. WMO/TD-No. 303, Geneva 1989. Die endgültigen Ergebnisse erscheinen in WMO-Instruments and Observing Methods Report No. 42.

Bei diesem Vergleich stellten 9 Länder 11 optoelektrische Sonnenscheindauermeßgeräte, 4 Pyranometerkombinationen (mit und ohne Schattenring bzw. Schattenscheibe) und 2 CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheinautographen zur Verfügung. Bei der folgenden Aufzählung steht das Herstellerland in Klammern:

2 Heliographen mit Faseroptik von CIMEL (Frankreich), 1 MS-91 von EKO (Japan), 3 SONIE 6.008 von SIGGELKOW (BRD), 3 SOLAR III B von HAENNI (Schweiz), 1 DB-559 von Slowakisches Hydrologisches Institut (CSSR), 1 NG-A1 von EAS (Kanada) sowie 2 Pyranometer (mit und ohne Schattenring) PRM 2 von ZWG (DDR) [zugeliefert von DDR], 4 Pyranometer (mit und ohne Schattenring) CM II von KIPP und ZONEN (Niederlande) [zugeliefert von BRD und Niederlande] (NL), 2 Pyranometer (mit und ohne Schattenscheibe) CM II von KIPP und ZONEN (Niederlande) [zugeliefert von BRD].

Bei den DDR-Pyranometern wurde der Schwellenwert

$$(E_g - E_d) \geq \left(20 + \frac{E_d}{10}\right)$$

und bei allen anderen Pyranometern der Schwellenwert $(E_g - E_d) \geq 120 \sin h_0$ benutzt.

Als Referenzgeräte dienten 2 Eppley Normal Incidence Pyrheliometer (USA), von denen je 5 Messungen gemittelt wurden.

Die Vergleichsmessungen wurden durchgeführt im Zeitraum August 1988 bis März 1989.

Hier sollen nur Ergebnisse der Pyranometermessungen dargestellt werden. Aus Abb. 20 geht hervor, daß nur die DDR-Werte um die Mittellinie der Abweichungen schwanken, während alle anderen um einige Prozent höher liegen.

In Tabelle 42 werden die prozentualen Abweichungen für 3 Gruppen der relativen Sonnenscheindauer und für das Mittel angegeben. Ferner ist die Standardabweichung s in Stunden für die absolute Abweichung und der mittlere Schwellenwert in W/m^2 enthalten.

8 Literatur

- ALBRECHT, F., Die Untersuchung der Kugeln von Sonnenscheinautographen. Meteorol. Z. **42** (1925), 443-446.
- ALBRECHT, F., Die kalorimetrischen Strahlungsuntersuchungen und die meteorologischen Beobachtungen in Lappland im Juni und Juli 1927. In: R. Süring, W. Kühl und F. Albrecht, Ergebnisse der Sonnenfinsternisexpedition des Meteorologischen Observatoriums Potsdam. Abhandlung des Preußischen Meteorologischen Instituts **10** (1934) Nr. 4, 18.
- ALBRECHT, F., Die Sonnenscheinautographen. Handbuch der meteorologischen Instrumente und ihrer Auswertung (E. Kleinschmidt) Berlin 1935, 185-197.
- ALCYON EQUIPMENT, Katalog - Measurement of sunradiation and duration. Lausanne.
- ÅNGSTRÖM, A., Solar and Terrestrial Radiation. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. **50** (1924) 121-126.
- BERG, H., Ergebnisse von Messungen der Globalstrahlung in Bochum. Z. Meteorol. **3** (1949), 153-161.

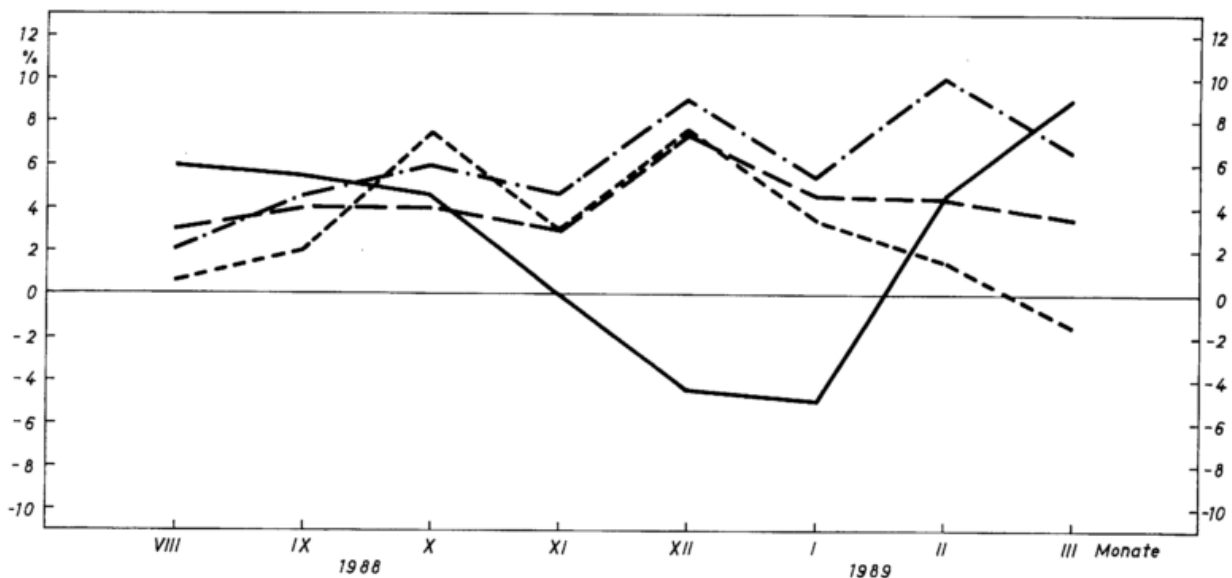


Abb. 20: Prozentuale Abweichungen der Sonnenscheindauerbestimmung mit Pyranometern ----- BRD (Schattenscheibe), ————— DDR (Schattenring), NL (Schattenring) und - - - - - BRD (Schattenring)

- BIDER, M., Über die Genauigkeit der Registrierungen des Sonnenscheinautographen CAMPBELL-STOKES. Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol., Wien Ser. **B 9** (1958), 199–230.
- BLACK, J. N., BONYTHON, C. W. and PRESCOTT, J. A., Solar radiation and the duration of sunshine. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. **80** (1954), 231–235.
- BOHNE, K. und KLINGENBERG, F., Zur Berechnung der Globalstrahlung nach SZÁSZ. Z. Meteorol. **27** (1977) 162–168.
- BRÜCKMANN, W., Zur Frage der Glaskugel-Sonnenscheinautographen. Tätigkeitsbericht des Königlich-Preußischen Instituts im Jahre 1913. Anhang S. (102)–(107).
- ČEKOJU, I., ELEKES I., GLODJANU F., Korreljacia medzi summarnoj radiaciej i prodolžitel'nost'ju solnečnogo siljanija. Meteorol. Hydrol., Bucuresti (1973) 1, 85–92.
- COLLMANN, W., Idealwerte der Globalstrahlung, Ann. Meteorol. **6** (1953/54), 117–122.
- COLLMANN, W., Vergleich von Sonnenscheinautographen nach CAMPBELL-STOKES mit Aktinometer nach LINKE-FEUSSNER. Meteorol. Rdsch. **37** (1984), 126–127.
- COOK, J. M., Micropower Sunshine Sensor for AWS. Proceedings of a WMO Technical Conference on Automated Meteorological Systems (TECAMS) Washington D. C., 14–19 February 1975, WMO-No. 420, 179–183.
- DEHNE, K., Dependence on threshold solar irradiance of measured sunshine duration. Instruments and Observing Methods, Report No. 22, TECIMO-III, Ottawa, Canada, 8–12 July 1985. WMO/TD-No. 50, Geneva 1985, 263–271.
- DIEM, M., Vergleich von Sonnenscheinautographen nach CAMPBELL-STOKES mit dem Globalstrahlungsmesser nach Dirmhirn. Meteorol. Rdsch. **30** (1977), 166–171.
- EKO Instruments Trading, Katalog „Meteorological Instruments“, Tokyo.
- ENERTEC-SCHLUMBERGER, automatic heliograph ES 400. Velizy-Villacoublay Cedex, Frankreich
- FOKEN, W. und FOKEN, TH., Zur Berechnung der Globalstrahlung aus Messungen der Sonnenscheindauer für das Küstengebiet Zingst-Darß. Wiss. Z. der W.-Pieck-Univ. Rostock **28** (1979), 493–497.
- FOSTER, N. B. and FOSKETT, L. W., A Photoelectric Sunshine Recorder. Bull. Am. Meteorol. Soc. **34** (1953), 212–215.
- FRITZ, S. and MacDONALD, T. H., Heating and Ventilating **46** (1949), 61–64.
- GREGOIRE, P., Héliographe à fibre optique. Instruments and Observing Methods, Report No. 22, TECIMO-III, Ottawa, Canada, 8–12 July 1985, WMO/TD-No. 50, Geneva 1985, 57–59.
- HINZPETER, H., Studie zum Strahlungsklima von Potsdam. Veröff. des Meteorol. u. Hydrol. Dienstes der DDR Nr. 10. Akademie Verlag Berlin 1953, 72 S.
- IKEDA, H., AOSHIMA, T. and MIYAKE, Y., Development of a New Sunshine-Duration-Meter. J. Meteorol. Soc. Japan **64** (1986), 987–993.
- JACKSON, C. I., Estimates of Total Radiation and Albedo in Sub-Arctic-Canada, Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. Ser. **B 10** (1961), 193–199.
- KIRKPATRICK, A., A Sunshine Sensor for Automatic Weather Stations. Scientific Discussions CIMO VI, Helsinki 1973, 22–27.
- KLEMM, S. and SONNTAG, D., A solution for Determining Sunshine Duration. WMO-TECIMO-II, Instruments and Observing Methods. Report No. 9, Geneva 1981, 49–52.
- KVAŠINA, Z. K., Poluprovodnikovye datčiki naličnja i prodolžitel'nosti solnečnogo sijanija avtomatičeskich meteostancij. Trudy NIIGMP. vyopusk **21** (1969), 20–29.
- LAEVASTU, E., Factors affecting the temperature of the surface layer of the sea. Scien. Fennica, Commentations Phys.-Math. Bd. **XXV** (1960), 136 Seiten.
- LAU, P., A Sunshine Monitor for Automatic Registration of Sunshine Duration. Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. Ser. **B 29** (1981), 89–97.
- LEVERT, C., Über die Auswertung der Registrierungen des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes. Arch. Meteorol. Geoph. Bioklimatol. Ser. **B II** (1961), 135–137.
- LINDNER, P., A New Sunshine Duration Sensor. WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECIMO), Noordwijkerhout, Netherland, 24–27 Sept. 1984. Instruments and Observing Methods, Rep. No. 15, 1984, 179–183, WMO No. 246, Geneva.
- MAGNUSSON, S., Sensors used or planned to be used at Automatic Weather Stations in Sweden. Instruments and Observing Methods, Report No. 1, 1980, 5–9, Geneva.
- MAJOR, G., Comparison of pyranometers and electronic sunshine recorders of RA VI in Budapest, CIMO-IX/Doc. 21 (31. V. 1985), 1–3.
- MAJOR, G., Radiation and Sunshine Duration Measurements. Comparison of Pyranometer and Electric Sunshine Duration Recorders of RA VI, Budapest, July – December 1984. Instruments and Observing Methods, Report No. 16, WMO/TD-No. 146, Geneva 1986.
- MALEK, E., Determination of the constants for the global radiation equation at Badjgah, Iran, Agric. Meteorol. Amsterdam **20** (1979) 3, 233–235.
- MARTEN, W., Zur Frage der Sonnenscheinautographen und der Zuverlässigkeit ihrer Angaben. Bericht über die Tätigkeit des Königl. Preußischen Meteorologischen Instituts im Jahre 1911. Veröff. des Königl. Preuß. Meteorol. Inst. Nr. 244, 168–179.
- MATZKE, H., Beiträge zur Kenntnis der Globalstrahlung in Greifswald. Abhandlungen des MHD der DDR Bd. **II** (1953) Nr. 16, 62 S.
- MAURER, J., Über die Mängel unserer Glaskugel- und Sonnenscheinautographen. Meteorol. Z. **26** (1909), 461–463.
- MAURER, J., Neue Versuche zur Registrierung der Sonnenscheindauer. Meteorol. Z. **28** (1911), 518–520.
- MAURER, J., Aus 25jährigen Aufzeichnungen der Sonnenscheindauer in der Schweiz. Meteorol. Z. **28** (1911), 193–200.
- MAURER, J., Der Sonnenscheinchronograph, Meteorol. Z. **31** (1914), 193–196.
- MORVAY, A., Számítási módszer a globálsugárzás – összegek maghátározására. Időjárás, Budapest **77** (1973) 5, 311–314.

- MOTA, F. S. da, BEIRSDORF, M. I. C., ACOSTA, M. J. C., Estimates of solar radiation in Brazil, *Agric. Meteorol.* Amsterdam **18** (1977) 4, 241–254.
- NAUTICAL ALMANAC OFFICE, *Almanac for Computers 1986*, Nautical Almanac Office, United States Naval Observatory, Washington D. C.
- PAINTER, H. E., The performance of a Campbell-Stokes sunshine recorder compared with a simultaneous record of the normal incidence irradiance. *The Meteorol. Magazine* **110** (1981), 102–109.
- PELZL, E., Anleitung für die Beobachter an den Wetterbeobachtungsstellen des Meteorol. und Hydrol. Dienstes der DDR, Veröff. des MHD der DDR Nr. 7, Akademie Verlag, Berlin 1953, 220–230.
- REDDY, S. J., An empirical method of the estimation of total solar radiation. *Solar Energy* **13** (1971) 2, 289–290.
- REDDY, S. J., An empirical method for the estimation of net radiation intensity. *Solar Energy* **13** (1971) 2, 291–292.
- RIETVELD, M. R., A new method for estimating the regression in the formula relating solar radiation to sunshine. *Agric. Meteorol.*, Amsterdam **19** (1978) 3, 243–252.
- ROBINSON, N., *Solar Radiation*, Amsterdam, London, New York 1966, 276–281.
- SCHÖNE, W. und SONNTAG, D., Die Schattenringkorrektion beim Pyranometer mit galvanisch erzeugter Thermosäule, *Z. Meteorol.* **26** (1976), 48–52.
- SCHÖNERMARK, E. v., WUCHOLD, H. und FREYDANK, E., Methodische Untersuchungen zur Berechnung Globalstrahlung für das Gebiet der DDR. *Z. Meteorol.* **23** (1973), 255–267.
- SCHÜEPP, W., Leopoldville – BINZA No. 45, 1964.
- SONNTAG, D., Pyranographen bzw. Effektivpyranographen mit galvanisch erzeugter Thermosäule und ihre Erprobung in Berlin, Potsdam, Stockholm, Leningrad und Bergen. *Abh. Meteorol. Dienstes der DDR* **XV** (1975) Nr. 115, 81 S.
- SONNTAG, D., Eichungen von Strahlungsmeßgeräten und Messung der Sonnenscheindauer. *Lehrbrief Meteorologische Meßtechnik. Messung der Strahlung (Teil 4)*. Ingenieurschule für Geodäsie und Kartographie Dresden 1981, 16–21.
- SONNTAG, D., Formeln verschiedenen Genauigkeitsgrades zur Berechnung der Sonnenkoordinaten. *Abh. Meteorol. Dienstes DDR* Nr. 143, Akademie Verlag Berlin 1989, 107 S.
- STORM, R., *Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle*, Leipzig 1972.
- STRUB, W., Über Mängel des Campbell-Stokesschen Sonnenscheinautographen. *Meteorol. Z.* **27** (1910), 175–178.
- SUCKLING, P. W. and HAY, J. E., A cloud layer-sunshine model for estimating direct, diffuse and total solar radiation. *Atmosphere*, Toronto, **15** (1977), 4, 194–207.
- SZÁSZ, G., Bestimmung der Globalstrahlung durch Berechnung. *Különlenyomat a Debreceni Agrartudományi Főiskola Tudományos Közleményeiből* **XIV** (1968), 239–259.
- TAUBENHEIM, J., Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. Leipzig 1969, S. 171.
- THÖRNBLAD, H., A Sunshine Monitor with Electrical Output and without Moving Parts. *J. phys. E: Scientific Instruments* **8** (1975), 481–486.
- VASHISTHA, R. D., RYCHOUDHURY, D. K. and DATAR, S. V., An instrument system for digital display of duration of bright sunshine. *Mausam* **30** (1979) 1, 59–64.
- WAGNER, A., Beziehungen zwischen Sonnenschein und Bewölkung in Wien. *Meteorol. Z.* **44** (1927), 161–167.
- WMO, CIMO-III, Final Report, Geneva 1962, Recommendation 6, Interim reference sunshine recorder. WMO No. 116, RP 48.
- WMO, Guide to Meteorological Instruments and Observing Practices. Fourth edition, Geneva 1971, WMO-No. 8, Chapter 9.10.
- WMO, CIMO-VII, Final Report, Geneva 1977, Recommendation 8, Sunshine threshold. WMO-No. 490.
- WMO, Draft for Chapter IX "Measurement of Radiation and Sunshine", Guide to International Instruments and Observing Practices, WMO No. 8, 24.7. 1979.
- WMO, The definition of sunshine occurrence in terms of a threshold of solar irradiance. WMO-CIMO-VIII/Doc. 13 (29. VI. 1981) (1981 a).
- WMO, "Sunshine" threshold, WMO-CIMO-VIII/Doc. 36 (2. IX. 1981) (1981 b).
- WMO, CIMO-VIII, Abridged Final Report, Geneva 1982, Rec. 10, WMO No. 590. Sunshine duration recorders.
- WMO, Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Fifth edition, Geneva 1983, WMO-No. 8, Chapter 21.1.
- YANAGISAWA, S., Automatic Meteorological Observing Station. WMO-TECIMO-II. Instruments and Observing Methods. Report No. 9, Geneva 1981, p. 103–109.

Tab. 1: Mittelwerte der Ansprechschwelle des CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheinautographen für verschiedene Monate nach PAINTER (1981)

Monat	I	II	III	IV	V	VI
Schwellenwert in W/m ²	107	142	-	-	22	52

Monat	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Schwellenwert in W/m ²	49	16	58	66	106	133

Tab. 2: Reduzierung der Sonnenscheindauer beim Pyrheliometer in Abhängigkeit von der Anzahl der Schwellendurchgänge pro Stunde, während der CAMPBELL-STOKES-Sonnenscheinautograph konstant 0,9 Stunden ergab, nach PAINTER (1981)

Anzahl der Schwellendurchgänge	Sonnenscheindauer mittels Pyrheliometer (in h)
1	0,95
2 - 5	0,85
6 - 10	0,75
11 - 15	0,6
> 15	0,5

Tab. 3: N für Normal- und Schaltjahre für 0^h

Datum	Normaljahr	Schaltjahr
0. Januar	0	0
0. Februar	31	31
0. März	59	60
0. April	90	91
0. Mai	120	121
0. Juni	151	152
0. Juli	181	182
0. August	212	213
0. September	243	244
0. Oktober	273	274
0. November	304	305
0. Dezember	334	335

Tab. 4: Relative Monatssummen (in %) beim Internationalen Vergleich von elektronischen Sonnenscheindauergebern in Budapest 1984

Monat	HAENNI SOLAR 112	SONI 6.008	PRECISION MECANIQUE	CAMPBELL- STOKES
Juli	83,1	95,5	-	100,0
August	84,7	93,0	-	100,0
September	87,6	94,5	-	100,0
Oktober	93,5	101,4	-	100,0
November	97,0	109,8	118,8	100,0
Dezember	120,6	137,7	141,6	100,0
Mittel	94,4	105,3	-	100,0

Tab. 5: Schattenringkorrektionsfaktoren f_{Ed} für eine geographische Breite $\varphi = 52,4$, einen Schattenringradius von 200 mm und eine Schattenringbreite von 40 mm

Monat	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni
f_{Ed}	1,03	1,06	1,09	1,12	1,12	1,13

Monat	Juli	August	Septem- ber	Oktober	Novem- ber	Dezem- ber
f_{Ed}	1,12	1,12	1,11	1,07	1,04	1,03

Tab. 6: Zusammenstellung der verwendeten Methoden zur Ermittlung der Sonnenscheindauer t_s

Methode	Formelzeichen	Berechnungsformel	Meßgerät
1	$t_{s,St}$		der Sonne nachgeführtes Pyrheliometer
2	$t_{s,P}$		2 Pyranometer, eines davon mit Schattenring
3	$t_{s,10/5}$		2 Pyranometer, eines davon mit Schattenring
4	$t_{s,20/10}$		2 Pyranometer, eines davon mit Schattenring
5	$t_{s,Hg}$		1 Pyranometer
6	$t_{s,CS}$	Brennspurauswertung	Sonnenscheinauto-graph nach CAMPBELL-STOKES

Tab. 7: Summen der Sonnenscheindauer (in Stunden) für die Methoden 1, 2, 4 und 6, Potsdam

Monat	Tage	$t_{s,st}$ h	$t_{s,p}$ h	$t_{s,20/10}$ h	$t_{s,cs}$ h
III 1983	25	61,6	67,6	70,4	69,3
IV	30	112,9	126,0	136,0	140,2
V	31	139,1	131,6	138,6	159,5
VI	30	239,8	235,4	243,5	254,4
VII	30	300,4	296,7	297,3	317,4
VIII	31	243,3	257,3	258,5	260,6
IX	26	84,2	98,4	102,8	107,9
X	27	61,5	72,9	72,2	80,1
XI	29	55,8	59,2	56,8	64,5
XII	31	40,5	43,7	35,6	53,2
I 1984	31	34,1	41,5	38,6	43,6
II	29	71,4	77,4	73,7	75,3
III	31	155,3	160,1	161,5	161,3
Summe	381	1599,1	1667,8	1686,5	1787,3
Diffe- renz zu $t_{s,st}$		0,0	68,7	87,4	188,2
Diffe- renz zu $t_{s,p}$		- 68,7	0,0	18,7	119,5

Tab. 8: Jahresmittel der Quotienten der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer der Methoden 2, 4 bzw. 6 und Methode 1

	$t_{s,p}/t_{s,st}$	$t_{s,20/10}/t_{s,st}$	$t_{s,cs}/t_{s,st}$
alle Tage	1,035	1,047	1,115
$t_{s,rel} > 60 \%$	1,008	0,995	1,023
$t_{s,rel} < 40 \%$	1,129	1,218	1,323

Tab. 9: Jahresmittel der Differenzen der mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenscheindauer zwischen den Methoden 2, 4 bzw. 6 und Methode 1 (in Stunden)

	$t_{s,p} - t_{s,st}$	$t_{s,20/10} - t_{s,st}$	$t_{s,cs} - t_{s,st}$
alle Tage	0,15	0,20	0,49
$t_{s,rel} > 60 \%$	0,08	- 0,06	0,25
$t_{s,rel} < 40 \%$	0,20	0,34	0,36

Tab. 10: Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung auf eine Horizontalfläche ($E_g - E_d$) bei einer Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung von 120 W/m^2 auf die Normalfläche bei verschiedenen Sonnenhöhen h_\odot .

h_\odot (in Grad)	1	5	10	15	20	25	30
$E_g - E_d$ (in W/m^2)	2,1	10,5	20,8	31,1	41,0	50,7	60,0

h_\odot (in Grad)	35	40	45	50	55	60	65
$E_g - E_d$ (in W/m^2)	68,8	77,1	84,9	91,9	98,3	103,9	108,8

Tab. 11: Zusammenstellung der Resultate der Regressionsanalyse für die Bestimmung der Koeffizienten der Schwellenwertfunktion

Mo- nat	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
N	16	15	18	24	19	27	18
r	0,9757	0,9821	0,8980	0,9830	0,9815	0,9488	0,9526
c	-2,76	12,01	13,90	8,95	4,41	6,80	16,86
d	0,26	0,20	0,19	0,20	0,24	0,23	0,17
F _r	277,61	353,41	66,65	630,61	446,75	225,55	156,87
t _r	16,66	18,80	8,16	25,11	21,14	15,02	12,52

Mo- nat	X	XI	XII	I	II	III	alle Werte
N	8	21	22	15	4	32	239
r	0,9762	0,6015	0,6516	0,7687	0,9938	0,9081	0,9627
c	12,10	18,04	11,44	2,68	6,27	15,02	8,54
d	0,16	0,12	0,16	0,26	0,21	0,18	0,21
F _r	121,57	10,77	14,76	18,78	159,79	141,08	3000,32
t _r	11,03	3,28	3,84	4,33	12,64	11,88	54,78

Alle Regressionsangaben bzw. der Korrelationskoeffizient und der Regressionskoeffizient sind mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % gesichert.

- N: Anzahl der Werte
- r: Korrelationskoeffizient
- c: Regressionskonstante in W/m²
- d: Regressionskoeffizient
- F_r: Ergebnis des F-Testes des Korrelationskoeffizienten
- t_r: Ergebnis des t-Testes für den Regressionskoeffizienten

Tab. 12: Summen der Sonnenscheindauer (in Stunden) aus AFMS-2-Messungen und Werten des Sonnenscheinautographen, Potsdam

Monat Anzahl der Tage	Juni 85 28	Juli 85 28	Januar 86 22
$t_{s,p}$ aus 10-min-Mittel berechnet	126,8	228,1	20,5
$t_{s,10/5}$ aus 10-min-Mittel berechnet	128,1	231,2	20,1
$t_{s,10/10}$ aus 10-min-Mittel berechnet	137,0	243,2	22,3
$t_{s,10/10}$ aus 1-min-Werten (AFMS-2-Ausdruck)	108,4	208,1	15,6
$t_{s,cs}$ (gelbliche Kugel)	127,2	223,2	19,7
$t_{s,cs}$ (Klarglaskugel)	125,6	230,8	19,8

Tab. 13: Quotienten der Summe der Sonnenscheindauer aus AFMS-2-Messungen bzw. Sonnenscheinautographenmessungen und $t_{s,p}$ -Werten aus 10-min-Mitteln, Potsdam

Monat	Juni 85	Juli 85	Jan. 86
Anzahl der Tage	28	28	22
$t_{s,10/5}/t_{s,p}$ (beide aus 10-min-Mitteln)	1,010	1,014	0,980
$t_{s,20/10}/t_{s,p}$ (beide aus 10-min-Mitteln)	1,080	1,066	1,088
$t_{s,20/10}t_{s,p}$ (1-min-Werte/10-min-Mittel)	0,855	0,912	0,761
$t_{s,cs}$ (gelbl. Kugel)/ $t_{s,p}$ (10-min-Mittel)	1,003	0,978	0,961
$t_{s,cs}$ (Klarglaskugel)/ $t_{s,p}$ (10-min-Mittel)	0,991	1,012	0,966

Tab. 14: Monatssumme der Sonnenscheindauer (in Stunden) nach Methoden 2, 4 und 6, Heiligendamm 1978

Monat	Tage	$t_{s,p}$ h	$t_{s,20/10}$ h	$t_{s,cs}$ h
I	31	47,5	42,2	43,0
II	28	78,6	76,4	72,4
III	31	82,9	82,9	81,9
IV	30	162,0	161,6	144,2
V	31	306,7	303,0	294,0
VI	30	254,2	252,8	147,2
VII	31	180,0	188,4	184,9
VIII	31	211,4	218,8	215,1
IX	30	101,4	109,6	111,4
X	31	92,0	94,1	95,9
XI	30	40,4	37,4	37,6
XII	31	27,7	23,6	25,3
Jahr	365	1584,8	1590,8	1552,9
Differenz zu $t_{s,p}$		0,0	6,0	-31,9

Tab. 15: Summen der Sonnenscheindauer (in Stunden) nach Methoden 2, 3, 4 und 6, Heiligendamm 1983/84

Monat	Tage	$t_{s,2}$ h	$t_{s,10/5}$ h	$t_{s,10/10}$ h	$t_{s,cs}$ h
I 1983	31	42,0	41,3	39,6	32,0
II	28	81,6	81,3	80,8	72,1
III	31	75,8	74,3	77,9	68,8
IV	30	101,1	100,3	107,1	108,5
V	31	126,7	128,4	135,1	143,2
VI	25	230,9	231,1	233,7	230,4
VII	31	338,2	335,6	339,2	313,5
VIII	31	270,4	265,1	271,1	247,7
IX	30	143,2	141,7	150,5	127,5
X	31	110,4	107,9	109,0	104,4
XI	30	70,1	64,0	67,8	63,5
XII	31	60,9	55,4	52,9	50,5
I 1984	29	50,9	49,4	48,3	43,2
II	26	75,6	75,1	73,2	70,2
III	27	146,9	145,5	147,9	125,6
I - XII 1983	360	1651,3	1626,4	1664,7	1562,1
Diffe- renz zu $t_{s,2}$		0,0	-24,9	13,4	-89,2
I 1983 - III 1984	442	1924,7	1896,4	1934,1	1801,1
Diffe- renz zu $t_{s,2}$		0,0	-28,3	9,4	-123,6

Tab. 16: Summen der Sonnenscheindauer (in Stunden) nach Methoden 2, 3, 4 und 6, Fichtelberg 1983/84

Monat	Tage	$t_{1,p}$ h	$t_{1,10/5}$ h	$t_{1,10/10}$ h	$t_{1,cs}$ h
I 1983	31	31,4	31,3	29,6	30,7
II	28	49,8	50,9	50,7	56,1
III	29	90,3	92,7	94,1	93,4
IV	30	101,9	122,2	127,5	117,6
V	23	141,9	146,9	157,2	127,5
VI	0	-	-	-	-
VII	19	167,2	167,6	169,7	166,6
VIII	31	200,9	201,3	206,0	199,1
IX	7	33,0	33,5	34,5	32,3
X	0	-	-	-	-
XI	0	-	-	-	-
XII	17	28,0	29,5	28,2	24,3
I 1984	30	33,7	34,8	34,7	30,2
II	29	87,6	98,9	96,8	83,6
III	29	133,3	134,3	137,5	123,3
I - XII 1983	215	844,4	875,9	897,5	847,6
Diffe- renz zu $t_{1,p}$		0,0	31,5	53,1	3,2
I 1983 - III 1984	303	1099,0	1143,9	1166,5	1084,7
Diffe- renz zu $t_{1,p}$		0,0	44,9	67,5	-14,3

Tab. 17: Summen der Sonnenscheindauer (in Stunden) von der AFMS-2 nach Methode 4 und vom Sonnenscheinauto-
graphen sowie das Verhältnis $t_{s,CS}/t_{s,20/10}$, Potsdam 1985/86

Monat	Tage	$t_{s,20/10}$ h	$t_{s,CS}$ h	$t_{s,CS}/t_{s,20/10}$
VI 1985	28	108,4	125,6	1,159
VII	28	208,1	230,8	1,109
VIII	21	130,7	156,1	1,194
IX	23	100,1	112,2	1,121
X	30	82,1	96,1	1,171
XI	30	21,8	37,4	1,716
XII	29	25,0	27,6	1,104
I 1986	22	15,6	19,8	1,269
II	23	48,3	61,5	1,273
III	17	42,4	43,4	1,024
IV	28	97,6	111,6	1,143
V	31	228,5	255,0	1,116
VI	30	232,2	266,3	1,147
VII	28	167,5	191,3	1,142
VIII	31	179,2	206,1	1,150
VI 1985 - VIII 1986	399	1687,5	1940,8	-
Monatsmit- tel	26,6	112,5	129,4	1,189

Tab. 18: Ergebnisse der Regressionsrechnung nach Gleichung (41) mit den H_g - und $t_{s,CS}$ -Werten (Klammerwerte nach Gleichung (43)), Heiligendamm 1978

1. Aus Tagessummen

	a'	a	b'	b	s_{rel} %	r
Früh- jahr F (März - Mai)	0,237	(-0,367)	0,646	(1,548)	6,13	0,9602
Sommer S (Juni - Aug.)	0,264	(-0,466)	0,567	(1,764)	4,82	0,9589
Herbst H (Sept.- Nov.)	0,178	(-0,276)	0,645	(1,550)	6,19	0,9441
Winter W (Dez.- Febr.)	0,158	(-0,248)	0,638	(1,567)	8,49	0,8965
Früh- jahr und sommer FS (März - Aug.)	0,248	(-0,486)	0,611	(1,637)	5,62	0,9579
Herbst und Winter HW (Sept.- Febr.)	0,167	(-0,258)	0,646	(1,548)	7,46	0,9208
Jahr J (Jan.- Dez.)	0,195	(-0,294)	0,664	(1,506)	7,37	0,9402
Jahr J (FIH) (Jan.- Dez.)	0,21	(-0,344)	0,61	(1,639)	-	-

2. Aus Monatssummen Mo

	a'	a	b'	b	s _{rel} %	r
Jahr J (Jan. - Dez.)	0,138	(-0,165)	0,836	(1,196)	2,57	0,9805
Jahr J (FIH) (Jan. - Dez.)	0,21	(-0,344)	0,61	(1,639)	-	-

Tab. 19: Ergebnisse der Regressionsrechnung nach Gleichung (45) mit den H_g- und t_{s,p}-Werten, Heiligendamm 1978

1. Aus Tagessummen

	a	b	s _{rel}	r
Frühjahr F (März - Mai)	-0,321	1,479	8,77	0,9665
Sommer S (Juni - Aug.)	-0,437	1,704	7,70	0,9667
Herbst H (Sept.- Nov.)	-0,208	1,279	9,35	0,9337
Winter H (Dez.- Febr.)	-0,173	1,301	11,61	0,9124
Frühjahr und Som- mer FS (März-Aug.)	-0,363	1,562	8,48	0,9644
Herbst und Winter HW (Sept.-Febr.)	-0,186	1,273	10,69	0,9193
Jahr J (Jan.- Dez.)	-0,238	1,361	10,36	0,9442
Jahr J (FIH) (Jan.-Dez.)	-0,344	1,639	-	-

2. Aus Monatssummen Mo

	a	b	s_{rel} %	r
Jahr J (Jan. - Dez.)	-0,163	1,182	3,49	0,9752
Jahr J (FIH) (Jan.-Dez.)	-0,344	1,639	-	-

Tab. 20: Ergebnisse der Regressionsrechnung mit (F/S/H/W)-Konstanten und den Tagessummen $x = t_{s,Hg}$ und $y = t_{s,CS}$, Heiligendamm 1978

Monat	a_1	b_1	s	s_{rel}	r
I	-0,0329	0,9848	0,648	8,20	0,9540
II	0,2065	0,8184	0,970	9,90	0,9475
III	0,2425	0,8823	0,890	7,55	0,9568
IV	0,1383	0,9202	1,292	9,23	0,9582
V	0,0941	1,0062	1,103	6,89	0,9704
VI	0,7343	0,8816	1,318	7,71	0,9680
VII	-0,0693	0,9897	1,284	7,74	0,9536
VIII	0,5837	0,9508	1,243	8,34	0,9543
IX	-0,0747	0,9300	0,782	6,11	0,9771
X	-0,2039	1,0222	0,688	6,50	0,9773
XI	0,1177	1,0021	0,531	6,18	0,9499
XII	0,0426	1,1365	0,525	7,10	0,9409
III-V	0,0790	0,9753	1,129	8,06	0,9736
VI-VIII	0,4812	0,9253	1,286	7,75	0,9596
IX-XI	0,0128	0,9514	0,689	6,50	0,9752
XII-II	0,1250	0,8794	0,761	9,63	0,9468
III-VIII	0,2489	0,9525	1,210	7,25	0,9676
IX-II	0,0690	0,9249	0,729	9,59	0,9658
I-XII	0,1004	0,9592	1,007	7,62	0,9742

Tab. 21: Ergebnisse der Regressionsrechnung mit (F/S/H/W)-Konstanten und den Tagessummen $x = t_{s,Hg}$ und $y = t_{s,p}$, Heiligendamm 1978

Monat	a_1	b_1	s_h	s_{rel} %	r
I	-0,4542	1,1775	0,830	10,80	0,9323
II	-0,7988	1,1539	0,984	10,27	0,9493
III	-0,1926	0,9384	0,831	7,17	0,9630
IV	-0,2930	1,0475	1,266	9,15	0,9657
V	-0,7237	1,1026	1,070	6,79	0,9732
VI	0,0665	0,9777	0,960	5,69	0,9848
VII	-0,9352	1,0857	1,198	7,29	0,9619
VIII	-0,1217	1,0525	1,184	8,05	0,9615
IX	-0,4183	1,0289	0,863	6,87	0,9656
X	-0,7305	1,1910	1,070	10,29	0,9427
XI	-0,2238	1,1325	0,526	6,32	0,9561
XII	-0,2219	1,1375	0,621	8,72	0,9247
III-V	-0,4211	1,0613	1,077	7,79	0,9779
VI-VIII	-0,2698	1,0237	1,145	6,97	0,9709
IX-XI	-0,3561	1,0708	0,874	8,41	0,9546
XII-II	-0,3913	1,1106	0,829	10,79	0,9423
III-VIII	-0,3532	1,0421	1,110	6,71	0,9748
IX-II	-0,3676	1,0844	0,849	11,30	0,9506
I-XII	-0,3193	1,0438	0,990	8,12	0,9762

Tab. 22: Ergebnisse der Regressionsrechnung mit (FS/HW)-Konstanten und den Tagessummen $x = t_{s,Hg}$ und $y = t_{s,CS}$, Heiligendamm 1978

Monat	a_h	b_h	s_h	s_{rel} %	r
I	-0,0578	1,0226	0,656	8,31	0,9527
II	0,0865	0,8813	0,959	9,79	0,9487
III	0,3124	0,8496	0,892	7,56	0,9566
IV	0,1945	0,8881	1,285	9,18	0,9587
V	0,2043	0,9653	1,100	6,88	0,9706
VI	0,6249	0,9229	1,301	7,61	0,9689
VII	-0,2082	1,0355	1,280	7,71	0,9539
VIII	0,4746	0,9945	1,239	8,31	0,9546
IX	-0,0379	0,8946	0,763	5,96	0,9782
X	-0,1380	0,9792	0,658	6,21	0,9793
XI	0,1507	0,9758	0,525	6,11	0,9511
XII	0,0226	1,1658	0,554	7,49	0,9340
III-V	0,1550	0,9388	1,125	8,03	0,9738
VI-VIII	0,3622	0,9685	1,279	7,71	0,9601
IX-XI	0,0576	0,9147	0,671	6,33	0,9765
XII-II	0,0706	0,9310	0,756	9,57	0,9475
III-VIII	0,2498	0,9563	1,216	7,28	0,9672
IX-II	0,0684	0,9186	0,711	9,36	0,9674
I-XII	0,0938	0,9618	1,007	7,59	0,9741

Tab. 23: Ergebnisse der Regressionsrechnung mit (FS/HW)-Konstanten und den Tagessummen $x = t_{s,Hg}$ und $y = t_{s,P}$, Heiligendamm 1978

Monat	a_1	b_1	s_h	s_{rel} %	r
I	-0,4056	1,2437	0,798	10,39	0,9376
II	-0,6575	1,1889	0,964	10,06	0,9514
III	-0,0375	0,9029	0,817	7,04	0,9642
IV	-0,1066	1,0082	1,257	9,09	0,9662
V	-0,4127	1,0517	1,054	6,69	0,9740
VI	-0,4741	1,0549	0,994	5,89	0,9837
VII	-1,4503	1,1584	1,253	7,63	0,9582
VIII	-0,4743	1,1136	1,198	8,15	0,9606
IX	-0,5587	1,0138	0,889	7,08	0,9634
X	-0,9178	1,1802	1,085	10,43	0,9410
XI	-0,3011	1,1034	0,554	6,66	0,9511
XII	-0,1728	1,2064	0,595	8,34	0,9312
III-V	-0,2264	1,0208	1,066	7,71	0,9784
VI-VIII	-0,7403	1,0951	1,181	7,19	0,9690
IX-XI	-0,4733	1,0511	0,900	8,65	0,9518
XII-II	-0,3211	1,1615	0,803	10,45	0,9460
III-VIII	-0,4259	1,0521	1,131	6,84	0,9738
IX-II	-0,3498	1,0718	0,878	11,69	0,9471
I-XII	-0,3471	1,0480	1,013	8,12	0,9751

Tab. 24: Ergebnisse der Regressionsrechnung mit J-Konstanten und den Tagessummen $x = t_{s,Hg}$ und $y = t_{s,CS}$, Heiligendamm 1978

Monat	a_1	b_1	s_h	s_{rel} %	r
I	-0,0326	1,1767	0,642	8,12	0,9549
II	0,1792	0,9866	0,970	9,90	0,9475
III	0,1251	0,8222	0,885	7,50	0,9573
IV	-0,0394	0,8628	1,284	9,17	0,9587
V	-0,1895	0,9496	1,110	6,94	0,9700
VI	0,2354	0,9048	1,321	7,73	0,9679
VII	-0,6247	1,0122	1,309	7,89	0,9518
VIII	0,1928	0,9646	1,250	8,39	0,9537
IX	0,0118	1,0151	0,748	5,84	0,9791
X	-0,0548	1,1053	0,646	6,09	0,9801
XI	0,2062	1,1219	0,549	6,39	0,9463
XII	0,0395	0,9866	0,529	7,15	0,9400
III-V	-0,0902	0,9123	1,127	8,05	0,9737
VI-VIII	0,0046	0,9456	1,302	8,84	0,9586
IX-XI	0,1205	1,0365	0,669	6,31	0,9767
XII-II	0,1144	1,0559	0,757	9,58	0,9474
III-VIII	-0,0445	0,9306	1,224	7,33	0,9668
IX-II	0,1202	1,0419	0,710	9,35	0,9675
I-XII	0,1633	0,9261	1,038	7,59	0,9725

Tab. 25: Ergebnisse der Regressionsrechnung mit J-Konstanten und den Tagessummen $x = t_{s,Hg}$ und $y = t_{s,P}$, Heiligendamm 1978

Monat	a_1	b_1	s_h	s_{rel} %	r
I	-0,3013	1,2465	0,741	9,65	0,9464
II	-0,3653	1,1374	0,947	9,88	0,9532
III	-0,6147	0,9729	0,893	7,70	0,9571
IV	-0,9323	1,1086	1,310	9,47	0,9632
V	-1,8315	1,2004	1,073	6,81	0,9730
VI	-2,0563	1,2096	0,992	5,88	0,9837
VII	-2,8627	1,2939	1,350	8,22	0,9513
VIII	-1,7300	1,2546	1,226	8,33	0,9587
IX	-0,3468	0,9890	0,844	6,72	0,9671
X	-0,6117	1,1363	1,037	9,97	0,9463
XI	-0,1669	1,0995	0,496	5,96	0,9610
XII	-0,1399	1,2564	0,547	7,68	0,9421
III-V	-1,0293	1,1163	1,122	8,11	0,9760
VI-VIII	-2,1204	1,2361	1,241	7,56	0,9658
IX-XI	-0,2804	1,0290	0,848	8,15	0,9573
XII-II	-0,1996	1,1512	0,762	9,92	0,9515
III-VIII	-1,4373	1,1609	1,208	7,30	0,9700
XI-II	-0,2023	1,0574	0,830	11,05	0,9528
I-XII	-0,5435	1,0740	1,109	8,02	0,9701

Tab. 26: Ergebnisse der Regressionsrechnung mit J-Konstanten und den Tagessummen $x = t_{5,Hg}$ und $y = t_{5,20/10}$.
Heiligendamm 1978

Monat	a_1	b_1	s_h	s_{rel} %	r
I	-0,0491	1,1690	0,537	6,80	0,9673
II	0,3525	0,9733	1,024	10,45	0,9405
III	0,1541	0,8232	0,680	5,76	0,9742
IV	0,2377	0,9167	1,172	8,37	0,9690
V	0,3792	0,9221	0,905	5,66	0,9786
VI	0,1068	0,9403	0,940	5,50	0,9846
VII	-0,3485	0,9871	1,334	8,04	0,9477
VIII	0,1033	0,9947	1,016	6,82	0,9705
IX	0,0970	0,9757	0,575	4,50	0,9864
X	-0,0370	1,0787	0,641	6,05	0,9794
XI	0,2175	1,1026	0,432	5,03	0,9646
XII	0,0325	1,2693	0,502	6,78	0,9388
III-V	0,1048	0,9285	0,964	6,89	0,9812
VI-VIII	0,0000	0,9649	1,116	6,72	0,9702
IX-XI	0,1561	1,0055	0,582	5,49	0,9811
XII-II	0,1330	1,0541	0,732	9,27	0,9503
III-VIII	0,0672	0,9461	1,044	6,25	0,9763
IX-II	0,1508	1,0195	0,660	8,69	0,9705
I-XII	0,1855	0,9446	0,890	6,64	0,9803

Tab. 27: Ergebnisse der Regressionsrechnung mit J(FIH)-Konstanten und den Tagessummen $x = t_{s,Hg}$ und $y = t_{s,CS}$, Heiligendamm 1978

Monat	a_1	b_1	s_h	s_{rel} %	r
I	-0,1364	1,1061	0,696	8,82	0,9466
II	-0,1213	0,9921	0,969	9,88	0,9476
III	-0,1864	0,8248	0,890	7,54	0,9568
IV	-0,4714	0,8772	1,304	9,31	0,9574
V	-0,9637	0,9865	1,136	7,10	0,9686
VI	-0,6503	0,9464	1,336	7,81	0,9672
VII	-1,3955	1,0366	1,353	8,15	0,9484
VIII	-0,4248	0,9895	1,260	8,46	0,9529
IX	-0,1262	0,9753	0,812	6,34	0,9752
X	-0,2911	1,0784	0,737	6,96	0,9740
XI	0,0565	1,0498	0,529	6,16	0,9503
XII	-0,0456	1,2253	0,554	7,48	0,9340
III-V	-0,5250	0,9241	1,147	8,19	0,9728
VI-VIII	-0,7389	0,9762	1,332	8,02	0,9567
IX-XI	-0,0502	0,9995	0,717	6,76	0,9732
XII-II	-0,0402	1,0243	0,763	9,66	0,9464
III-VIII	-0,6040	0,9486	1,245	7,46	0,9656
IX-II	-0,0389	1,0055	0,737	9,70	0,9650
I-XII	-0,1151	0,9176	1,074	7,84	0,9705

Tab. 28: Ergebnisse der Regressionsrechnung mit J(FIH)-Konstanten und den Tagessummen $x = t_{s,Hg}$ und $y = t_{s,P}$, Heiligendamm 1978

Monat	a_1	b_1	s_h	s_{rel} %	r
I	-0,1405	1,1176	0,668	8,70	0,9566
II	-0,0342	0,9810	0,940	9,81	0,9538
III	-0,2488	0,8359	0,837	7,22	0,9624
IV	-0,3856	0,9436	1,274	9,21	0,9653
V	-0,9161	0,9958	1,055	6,70	0,9739
VI	-1,1750	1,0172	0,970	5,75	0,9844
VII	-1,9396	1,0861	1,318	8,02	0,9537
VIII	-0,8867	1,0439	1,226	8,33	0,9587
IX	-0,1035	0,8741	0,794	6,32	0,9709
X	-0,3526	0,9979	0,967	9,30	0,9534
XI	-0,0185	1,0112	0,435	5,22	0,9702
XII	-0,0780	1,1857	0,480	6,74	0,9557
III-V	-0,5119	0,9521	1,081	7,82	0,9778
VI-VIII	-1,2819	1,0395	1,206	7,34	0,9677
IX-XI	-0,0775	0,9151	0,790	7,59	0,9631
XII-II	-0,0359	1,0270	0,724	9,42	0,9564
III-VIII	-0,8060	0,9869	1,159	7,00	0,9724
IX-II	-0,0286	0,9440	0,779	10,38	0,9586
I-XII	-0,2442	0,9407	1,024	7,61	0,9746

Tab. 29: Monatssummen der Tagessummen t_{s,H_g} , berechnet aus H_g mit Regressionskonstanten, die mit Hilfe von $t_{s,CS}$ gefunden wurden, zum Vergleich $t_{s,20/10}$, Heiligendamm 1978

Mo- nat	F/S- /H/W h	FS/HW h	J h	J(FIH) h	Mo h	$t_{s,20/10}$ h	$t_{s,CS}$ h
I	44,7	43,8	37,4	42,7	38,9	42,2	43,0
II	81,4	79,4	68,3	76,4	73,9	76,4	72,4
III	84,3	85,0	94,9	106,3	104,9	82,9	81,9
IV	152,2	155,8	168,5	180,5	164,1	161,6	144,2
V	289,3	298,0	315,8	328,3	281,8	303,0	294,0
VI	255,4	247,5	265,4	281,8	249,2	252,8	247,2
VII	189,0	184,8	201,8	220,1	206,0	188,4	184,9
VIII	207,2	201,5	216,8	230,7	206,8	218,8	215,1
IX	122,2	125,8	109,4	118,1	111,4	109,6	111,4
X	100,0	102,3	88,3	97,3	94,5	94,1	95,9
XI	34,0	33,9	28,0	34,2	36,6	37,4	37,6
XII	21,1	21,1	17,8	21,8	14,5	23,6	25,3
III- V	525,8	538,8	579,2	615,1	550,8	547,5	520,1
VI- VIII	651,6	633,8	684,0	732,6	662,0	660,0	647,2
IX- XI	276,2	262,0	225,7	249,6	242,4	241,2	244,9
XII- II	147,2	144,3	123,5	140,9	127,3	142,2	140,7
III- VIII	1177,4	1172,6	1263,2	1347,7	1212,8	1207,5	1167,3
IX- II	403,4	406,3	349,2	390,5	369,7	383,4	385,6
I- XII	1580,8	1578,9	1612,4	1738,2	1582,5	1590,9	1552,9

Mo = Monatssumme direkt mit Regressionskonstanten aus Monatssummen der $t_{s,CS}$ -Werte

Tab. 30: Monatssummen der Tagessummen $t_{s,Hg}$ berechnet aus H_g mit Regressionskonstanten, die mit Hilfe von $t_{s,p}$ gefunden wurden, zum Vergleich $t_{s,20/10}$, Heiligendamm 1978

Mo- nat	F/S- /H/W h	FS/HW h	J h	J(FIH) h	Mo h	$t_{s,20/10}$ h	$t_{s,p}$ h
I	52,3	48,3	45,6	46,4	41,9	42,2	47,5
II	87,5	81,6	78,1	81,1	76,9	76,4	78,6
III	94,7	93,1	104,8	108,4	106,1	82,9	82,9
IV	163,1	163,9	171,4	184,0	166,7	161,6	162,0
V	298,5	303,8	302,8	336,5	284,1	303,0	306,7
VI	258,0	254,5	261,2	284,6	248,7	252,8	254,2
VII	192,5	194,2	207,7	121,1	203,4	188,4	180,0
VIII	204,4	203,0	211,1	228,8	204,0	218,8	211,4
IX	110,7	116,5	113,0	119,5	108,4	109,6	101,4
X	96,3	102,1	97,7	103,2	95,9	94,1	92,0
XI	41,6	44,8	41,3	40,5	39,3	37,4	40,4
XII	30,4	27,4	25,5	25,4	17,7	23,6	27,7
III- V	556,3	560,8	579,0	628,9	556,9	547,5	551,6
VI- VIII	654,9	651,7	680,1	734,5	656,1	660,0	665,6
IX- XI	248,6	263,4	252,0	263,2	243,6	241,2	233,8
XII- II	170,2	157,3	149,2	152,9	136,5	142,2	153,8
III- VIII	1211,2	1212,5	1259,1	1363,4	1213,0	1207,5	1197,2
IX- II	418,8	420,7	401,2	416,1	380,1	383,4	387,6
I- XII	1630,0	1633,2	1660,3	1779,5	1593,1	1590,9	1584,8

Mo = Monatssumme direkt mit Regressionskonstanten aus Monatssummen der $t_{s,p}$ -Werte

Tab. 31: Quotienten der Summen $t_{s,Hg}$ nach Tabelle 29, mit verschiedenen Konstantenpaaren nach Tabelle 18 berechnet, und der Summe $t_{s,CS}$, zum Vergleich $t_{s,20/10}/t_{s,CS}$, Heiligendamm 1978

Monat	$\frac{F/S/H/W}{t_{s,CS}}$	$\frac{FS/HW}{t_{s,CS}}$	$\frac{J}{t_{s,CS}}$	$\frac{J(FIH)}{t_{s,CS}}$	$\frac{Mo}{t_{s,CS}}$	$\frac{t_{s,20/10}}{t_{s,CS}}$
I	1,040	1,019	0,870	0,993	0,905	0,981
II	1,124	1,097	0,943	1,055	1,021	1,055
III	1,029	1,038	1,159	1,298	1,281	1,012
IV	1,056	1,080	1,168	1,252	1,138	1,121
V	0,984	1,014	1,074	1,117	0,958	1,030
VI	1,033	1,001	1,074	1,140	1,008	1,022
VII	1,022	1,000	1,091	1,190	1,114	1,019
VIII	0,963	0,937	1,008	1,072	0,961	1,017
IX	1,097	1,129	0,982	1,060	1,000	0,984
X	1,043	1,067	0,921	1,015	0,985	0,981
XI	0,904	0,902	0,745	0,910	0,971	0,995
XII	0,834	0,834	0,704	0,862	0,573	0,933
III-V	1,011	1,036	1,114	1,183	1,059	1,053
VI-VIII	1,007	0,979	1,057	1,132	1,023	1,020
IX-XI	1,128	1,070	0,922	1,019	0,990	0,985
XII-II	1,046	1,026	0,878	1,001	0,905	1,010
III-VIII	1,009	1,004	1,082	1,154	1,039	1,034
IX-II	1,046	1,054	0,906	1,013	0,959	0,994
I-XII	1,018	1,017	1,038	1,119	1,019	1,024

Mo = Monatssumme direkt mit Regressionskonstanten aus Monatssummen der $t_{s,CS}$ -Werte

Tab. 32: Quotienten der Summen $t_{s,Hg}$ nach Tabelle 30, mit verschiedenen Konstantenpaaren nach Tabelle 19 berechnet, und der Summe $t_{s,P}$, zum Vergleich $t_{s,2010}/t_{s,P}$, Heiligendamm 1978

Monat	$\frac{F/S/H/W}{t_{s,P}}$	$\frac{FS/HW}{t_{s,P}}$	$\frac{J}{t_{s,P}}$	$\frac{J(FIH)}{t_{s,P}}$	$\frac{Mo}{t_{s,P}}$	$\frac{t_{s,2010}/t_{s,P}}{t_{s,P}}$
I	1,101	1,017	0,960	0,977	0,882	0,889
II	1,113	1,038	0,994	1,032	0,978	0,971
III	1,142	1,123	1,264	1,308	1,280	1,000
IV	1,006	1,011	1,058	1,136	1,029	0,997
V	0,973	0,990	0,987	1,097	0,926	0,988
VI	1,015	1,001	1,027	1,119	0,978	0,994
VII	1,069	1,079	1,154	1,228	1,130	1,047
VIII	0,967	0,960	0,999	1,083	0,965	1,036
IX	1,092	1,150	1,115	1,179	1,069	1,082
X	1,046	1,109	1,061	1,121	1,042	1,022
XI	1,030	1,109	1,022	1,002	0,973	0,926
XII	1,098	0,989	0,921	0,917	0,639	0,852
III-V	1,008	1,017	1,050	1,140	1,010	0,992
VII-VIII	1,014	1,009	1,053	1,138	1,016	1,023
IX-XI	1,063	1,127	1,078	1,126	1,042	1,031
XII-II	1,107	1,023	0,970	0,994	0,888	0,924
III-VIII	1,012	1,013	1,052	1,139	1,013	1,008
IX-II	1,080	1,085	1,035	1,074	0,980	0,989
I-XII	1,028	1,030	1,048	1,123	1,005	1,004

Mo = Monatssumme direkt mit Regressionskonstanten aus Monatssummen der $t_{s,P}$ -Werte

Tab. 33: Differenzen der $t_{s,Hg}$ -Summen nach Tabelle 29 und der $t_{s,CS}$ -Werte (in Stunden), Heiligendamm 1978

Monat	F/S/H/W h	FS/HW h	J h	J(FIH) h	Mo h	$t_{s,20/10}$ h
I	1,7	0,8	-5,8	-0,3	-4,1	-0,8
II	9,0	7,0	-4,1	4,0	1,5	4,0
III	2,4	3,1	13,0	24,4	23,0	1,0
IV	8,0	11,6	24,3	36,3	19,9	17,4
V	-4,7	4,0	21,8	34,3	-12,2	9,0
VI	8,2	0,3	18,2	34,6	2,0	5,6
VII	4,1	-0,1	16,9	35,2	21,1	3,5
VIII	-7,9	-13,6	1,7	15,6	-8,3	3,8
IX	10,8	14,4	-2,0	6,7	0,0	-1,8
X	4,1	6,4	-7,6	1,4	-1,4	-1,8
XI	-3,6	-3,7	-9,6	-3,4	-1,1	-0,2
XII	-4,2	-4,2	-7,5	-3,5	-10,8	-1,7
III-V	5,7	18,7	59,1	95,0	30,7	27,4
VI-VIII	4,4	-13,4	36,8	85,4	14,8	12,9
IX-XI	31,3	17,1	-19,2	4,7	-2,5	-3,8
XII-II	6,5	3,6	-17,2	0,2	-13,4	1,5
III-VIII	10,1	5,3	95,9	180,4	45,5	40,3
IX-II	17,8	20,7	-36,4	4,9	-15,9	-2,3
I-XII	27,9	26,0	59,5	185,3	29,6	38,0

Tab. 34: Differenzen der $t_{s,Hg}$ -Summen nach Tabelle 30 und der $t_{s,p}$ -Werte (in Stunden), Heiligendamm 1978

Monat	F/S/H/W h	FS/HW h	J h	J (FIH) h	Mo h	$t_{s,20/10}$ h
I	4,8	0,8	-1,9	-1,1	-5,6	-5,3
II	8,9	3,0	-0,5	2,5	-1,7	-2,2
III	11,8	10,2	21,9	25,5	23,2	0,0
IV	1,0	1,8	9,4	22,0	4,6	0,4
V	-8,2	-2,9	-3,9	29,8	-22,6	-3,8
VI	3,8	0,2	7,0	30,4	-5,6	-1,5
VII	12,5	14,2	27,7	41,1	23,4	8,4
VIII	-7,0	-8,4	-0,2	17,4	-7,4	7,5
IX	9,4	15,2	11,6	18,2	7,0	8,3
X	4,2	10,0	5,6	11,2	3,8	2,0
XI	1,2	4,4	0,9	0,1	-1,1	-3,0
XII	2,7	-0,3	-2,2	-2,3	-10,0	-4,1
III-V	4,6	9,1	27,4	77,3	5,2	-4,2
VI-VIII	9,3	6,0	34,5	88,9	10,4	14,4
IX-XI	14,8	29,6	18,1	29,5	9,7	7,3
XII-II	16,4	3,6	-4,6	-0,9	-17,3	-11,6
III-VIII	13,9	15,1	61,9	166,2	15,6	10,2
IX-II	31,2	33,1	13,5	28,6	-7,6	-4,3
I-XII	45,1	48,2	75,4	194,8	8,0	5,9

Tab. 35: Differenzen der $t_{s,Hg}$ -Summen und der $t_{s,CS}$ -Werte nach Tabelle 33 in % von $t_{s,max}$, Heiligendamm 1978

Monat	F/S/H/W %	FS/HW %	J %	J (FIH) %	Mo %	$t_{s,20/10}$ %
I	0,7	0,3	-2,4	-0,1	-1,7	-0,3
II	3,4	2,6	-1,5	1,5	0,6	1,5
III	0,7	0,9	3,6	6,8	6,4	0,3
IV	1,9	2,8	5,8	8,7	4,8	4,2
V	-1,0	0,8	4,4	7,0	-2,5	1,8
VI	1,6	0,1	3,6	6,8	0,4	1,1
VII	0,8	0,0	3,3	6,9	4,1	0,7
VIII	-1,7	-3,0	0,4	3,4	-1,8	0,8
IX	2,9	3,8	-0,5	-1,8	0,0	-0,5
X	-1,3	2,0	-2,4	0,4	-0,4	-0,6
XI	-1,4	-1,5	-3,8	-1,4	-0,4	-0,1
XII	-1,8	-1,8	-3,3	-1,5	-4,8	-0,8
III-V	0,4	1,5	4,7	7,5	2,4	2,2
VI-VIII	0,3	-0,9	2,5	5,8	1,0	0,9
IX-XI	3,3	1,8	-2,0	0,5	-0,3	-0,4
XII-II	0,9	0,5	-2,3	0,3	-1,8	0,2
III-VIII	0,4	0,2	3,5	6,6	1,7	1,5
IX-II	1,1	1,2	-2,2	0,3	-1,0	-0,1
I-XII	0,6	0,6	1,4	4,2	0,7	0,9

Tab. 36: Differenzen der $t_{s,Hg}$ -Summen und der $t_{s,P}$ -Werte nach Tabelle 34 in % von $t_{s,max}$, Heiligendamm 1978

Monat	F/S/H/W %	FS/HW %	J %	J(FIH) %	Mo %	$t_{s,20/10}$ %
I	2,0	0,3	-0,8	-0,5	-2,3	-2,2
II	3,3	1,1	-1,9	0,9	-0,6	-0,8
III	3,3	2,8	6,0	7,0	6,4	0,0
IV	0,2	0,4	2,2	5,3	1,1	-0,1
V	-1,7	-0,6	-0,8	6,1	-4,6	-0,8
VI	0,7	0,0	1,4	6,0	-1,1	-0,3
VII	2,5	2,8	5,5	8,1	4,6	1,7
VIII	-1,5	-1,8	0,0	3,8	-1,6	1,6
IX	2,5	4,0	3,1	4,8	1,9	2,2
X	1,3	3,1	1,8	3,5	1,2	0,6
XI	0,5	1,8	0,4	0,0	-0,4	-1,2
XII	1,2	-1,3	-1,0	-1,0	-4,5	-1,8
III-V/	0,4	0,7	2,2	6,1	0,4	-0,3
VI-VIII	0,6	0,4	2,4	6,1	0,7	1,0
IX-XI	1,6	3,1	1,9	3,1	1,0	0,8
XII-II	2,2	0,5	-0,6	-1,2	-2,4	-1,6
III-VIII	0,5	0,6	2,3	6,1	0,6	0,4
IX-II	1,9	2,0	0,8	1,7	-0,4	-0,3
I-XII	1,0	1,1	1,7	4,4	0,2	0,1

Tab. 37: Extreme Abweichungen der $t_{s,Hg}$ -Tagessummen von den $t_{s,CS}$ -Werten in % der Monatssumme, Heiligendamm 1978

Monat	F/S/H/W		FS/HW		J		J(FIH)	
	%	%	%	%	%	%	%	%
I	+3,8	-4,1	+3,7	-4,3	+2,6	-5,3	+3,4	-4,5
II	+4,7	-4,0	+4,4	-3,7	+3,6	-4,0	+4,0	-3,2
III	+2,7	-2,3	+2,9	-2,4	+3,4	-2,0	+3,8	-1,2
IV	+2,6	-1,5	+2,9	-1,6	+3,2	-1,3	+3,4	-0,7
V	+1,0	-0,7	+1,1	-0,6	+1,3	-0,4	+1,5	-0,4
VI	+1,6	-0,6	+0,9	-1,0	+1,2	-0,7	+1,4	-0,5
VII	+1,6	-1,5	+1,5	-1,5	+1,8	-1,2	+2,2	-0,8
VIII	+1,3	-1,5	+1,2	-1,5	+1,4	-1,0	+1,6	-1,0
IX	+2,7	-0,8	+2,8	-0,4	+2,1	-1,5	+2,6	-1,2
X	+1,4	-1,0	+1,3	-1,0	+1,1	-1,5	+1,4	-1,0
XI	+2,8	-3,8	+3,1	-3,4	+1,6	-4,9	+2,5	-3,2
XII	+5,3	-5,1	+5,6	-5,0	+4,5	-6,4	+5,9	-5,1
I-XII	+5,3	-5,1	+5,6	-5,0	+4,5	-6,4	+5,9	-5,1

Tab. 38: Extreme Abweichungen der t_{s,H_0} -Tagessummen von den $t_{s,p}$ -Werten in % der Monatssumme, Heiligendamm 1978

Monat	F/S/H/W		FS/HW		J		J(FIH)	
	%	%	%	%	%	%	%	%
I	+3,8	-4,1	+3,4	-4,6	+3,0	-4,7	+2,7	-4,4
II	+3,0	-2,8	+2,7	-3,2	+2,5	-3,1	+2,7	-2,8
III	+3,1	-1,6	+3,0	-1,8	+3,6	-1,0	+3,1	-1,1
IV	+2,3	-1,4	+2,3	-1,3	+2,6	-1,5	+2,7	-0,9
V	+0,6	-0,8	+0,7	-0,7	+0,8	-0,8	+1,0	-0,3
VI	+0,9	-0,5	+0,8	-0,7	+1,0	-0,8	+1,2	-0,2
VII	+1,3	-1,6	+1,5	-1,7	+1,8	-1,7	+1,9	-1,1
VIII	+1,0	-1,2	+1,1	-1,1	+1,4	-1,1	+1,5	-0,7
IX	+1,3	-2,2	+2,7	-1,9	+2,5	-1,9	+2,4	-0,9
X	+1,9	-2,3	+2,3	-2,1	+2,0	-2,1	+2,0	-1,4
XI	+2,5	-1,6	+2,9	-3,5	+2,4	-3,6	+2,9	-2,5
XII	+4,6	-5,9	+4,0	-6,7	+3,3	-6,7	+3,4	-5,3
I-XII	+4,6	-5,9	+4,0	-6,7	+3,6	-6,7	+3,4	-5,3

Tab. 39: Anzahl der Tage mit Tagessummenabweichungen bezogen auf tägliche

$$t_{s,max} > 10 \% \frac{t_{s,Hg} - t_{s,CS}}{t_{s,max}} 100$$

und

$$\frac{t_{s,Hg} - t_{s,P}}{t_{s,max}} 100$$

berechnet mit verschiedenen Konstantenpaaren der Tabellen 18 und 19, Heiligendamm 1978

Monat	F/S/H/W		FS/HW		J		J(FIH)	
	$t_{s,CS}$	$t_{s,P}$	$t_{s,CS}$	$t_{s,P}$	$t_{s,CS}$	$t_{s,P}$	$t_{s,CS}$	$t_{s,P}$
I	5	12	7	10	7	8	9	9
II	7	11	5	10	6	8	6	7
III	6	7	6	7	8	10	8	10
IV	7	8	7	7	11	7	12	9
V	2	5	4	4	7	6	10	7
VI	8	2	7	4	9	7	11	6
VII	4	6	7	8	7	15	9	15
VIII	7	8	6	10	5	12	7	10
IX	3	3	5	6	3	5	3	8
X	5	14	4	14	4	13	4	13
XI	4	3	3	6	6	3	4	3
XII	8	9	8	7	8	6	7	6
I-XII	66	88	69	93	81	100	90	103

Tab. 40: Extremwerte der Tagessummenabweichungen bezogen auf tägliche

$$t_{s,max} \frac{t_{s,Hg} - t_{s,CS}}{t_{s,max}} 100 \quad (\text{in } \%)$$

($t_{s,Hg}$ -Werte nach Regressionskonstanten der Tabelle 18, die mit Hilfe der $t_{s,CS}$ -Werte gewonnen wurden), Heiligendamm 1978

Monat	F/S/H/W		FS/HW		J		J(FIH)	
	%	%	%	%	%	%	%	%
I	+20,7	-22,3	+20,1	-23,4	+14,1	-28,8	+18,5	-24,5
II	+34,7	-29,5	+32,5	-27,3	+26,6	-29,5	+29,5	-23,6
III	+18,7	-16,0	+20,1	-16,6	+23,6	-13,9	+26,4	- 8,3
IV	+26,8	-15,5	+29,9	-16,5	+33,0	-10,4	+35,0	- 7,2
V	+18,4	-12,9	+20,2	-11,0	+23,9	- 7,3	+27,6	- 7,3
VI	+23,1	-13,0	+20,2	-14,4	+24,6	-10,1	+27,5	- 7,2
VII	+17,8	-16,7	+16,7	-16,7	+20,0	-13,4	+24,5	- 8,9
VIII	+18,8	-21,6	+17,3	-21,6	+20,2	-18,8	+23,1	-14,4
IX	+23,5	- 7,0	+24,4	- 3,5	+18,3	-13,0	+22,6	-10,4
X	+14,5	- 9,0	+16,3	- 9,0	+ 9,0	-13,6	+12,7	- 9,0
XI	+12,2	-16,6	+13,6	-14,9	+ 7,0	-21,4	+10,9	-18,4
XII	+18,1	-17,4	+19,1	-17,1	+15,4	-21,9	+20,2	-17,4
I-XII	+34,7	-29,5	+32,5	-27,3	+33,0	-29,5	+35,0	-24,5

Tab. 41: Extremwerte der Tagessummenabweichungen bezogen auf tägliche

$$t_{s,max} \frac{t_{s,Hg} - t_{s,P}}{t_{s,max}} 100 \text{ (in \%)}$$

($t_{s,Hg}$ -Werte nach Regressionskonstanten der Tabelle 19, die mit Hilfe der $t_{s,P}$ -Werte gewonnen wurden), Heiligendamm 1978

Monat	F/S/H/W		FS/HW		J		J(FIH)	
	%	%	%	%	%	%	%	%
I	+22,5	-25,4	+20,3	-28,0	+17,8	-29,1	+16,2	-26,8
II	+25,7	-21,6	+23,2	-24,8	+21,7	-24,2	+23,1	-21,1
III	+23,9	-10,6	+23,1	-11,9	+27,5	-6,4	+28,1	-7,3
IV	+26,4	-16,5	+25,6	-14,6	+29,9	-16,8	+30,6	-9,8
V	+12,5	-15,4	+13,2	-13,6	+15,8	-15,7	+19,7	-6,1
VI	+13,3	-8,0	+12,2	-10,1	+15,4	-12,7	+18,7	-2,4
VII	+14,9	-18,2	+16,2	-19,7	+20,0	-19,9	+21,4	-13,0
VIII	+14,1	-16,5	+15,7	-14,9	+20,0	-16,6	+20,7	-9,2
IX	+20,1	-16,6	+22,1	-14,8	+20,0	-14,3	+19,2	-6,8
X	+18,8	-20,1	+20,8	-18,3	+18,6	-17,9	+19,4	-12,5
XI	+12,5	-19,6	+14,5	-17,7	+11,7	-17,9	+12,8	-12,5
XII	+17,9	-23,2	+15,8	-26,1	+13,0	-26,2	+12,9	-20,7
I-XII	+26,4	-25,4	+25,6	-28,0	+29,9	-29,1	+30,6	-26,8

Tab. 42: Ergebnisse der Sonnenscheindauermessungen mit Pyranometern

- a) prozentuale Abweichung für 3 Gruppen der relativen Sonnenscheindauer $t_{s,rel}$ und für das Mittel,
 b) Standardabweichung s in Stunden für die absolute Abweichung,
 c) mittlerer Schwellenwert in W/m^2

	Schattenring			Schattenscheibe
	NL	DDR	BRD	BRD
a) prozentuale Abweichung in %				
$t_{s,rel} \leq 0,3$	10,5	13,5	7,5	6,5
$0,3 < t_{s,rel} \leq 0,7$	4,5	4	3,5	2
$t_{s,rel} > 0,7$	2	- 4	2	1,5
Mittel	4,5	4	3,5	2
b) absolute Abweichung s in Stunden	0,16	0,31	0,13	0,11
c) mittlerer Schwellenwert in W/m^2	100	119	105	117