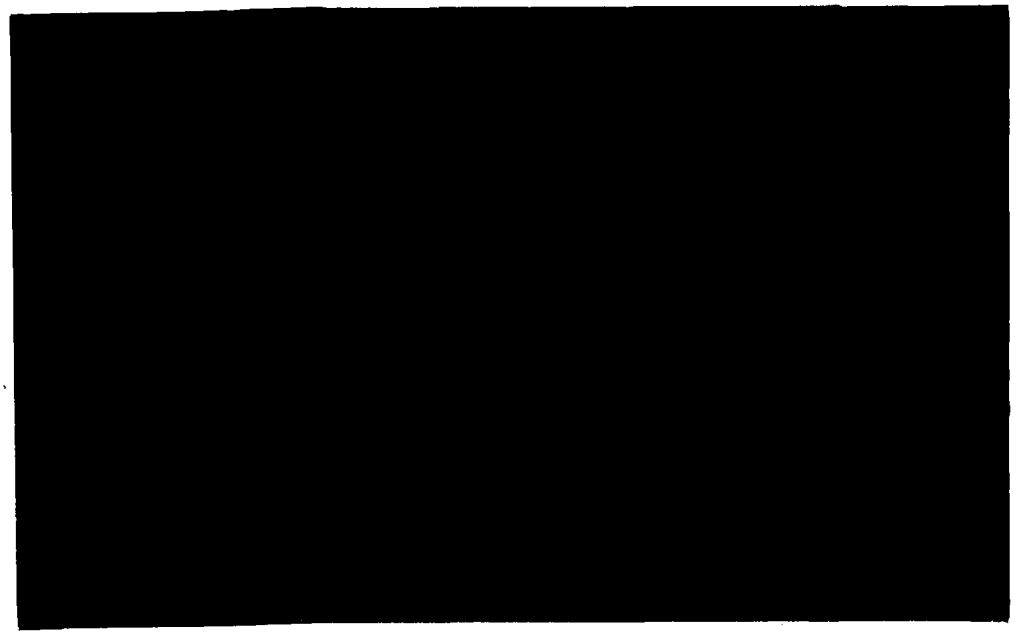


Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt
Rapports de travail de l'Institut Suisse de Météorologie
Rapporti di lavoro dell'Istituto Svizzero di Meteorologia
Working Reports of the Swiss Meteorological Institute

Zürich

No. 84

DIE SCHWELLENINTENSITAET DES SONNENSCHEINAUTOGRAPHEN CAMPELL-STOKES AN WOLKENLOSEN TAGEN

von

Thomas Baumgartner, Zürich

Januar 1979

Instrumente 551.508.23

Zusammenfassung

Zur Bestimmung der Ansprechschwelle des Sonnenscheinautographen Campell-Stokes wurden die 10-jährigen (1963-1972) Registrierunterlagen der Station Zürich-Kloten verwendet. Die direkte Sonnenstrahlung wurde dabei aus gleichzeitigen Messwerten der Globalstrahlung und der diffusen Himmelsstrahlung ermittelt. Beide Grössen sind mit horizontal aufgestellten Pyranometern gemessen worden.

Ueber alle Jahreszeiten verteilt wurden aus diesem Material 139 wolkenlose Sonnenaufgänge bzw. Sonnenuntergänge ausgewählt und die Schwellenintensität in ihrer Häufigkeitsverteilung untersucht. Es wurde zwischen vier Brennspurtypen unterschieden, ihre Häufigkeit errechnet und der Zusammenhang zwischen Brennspurtyp und Schwellenintensität festgehalten.

Die Vergleichbarkeit mit dem automatischen Sonnenscheinmessgerät und das Problem homogener Datenreihen werden diskutiert. - Der Einfluss des Horizontverlaufes auf die Sonnenscheinmessung wird abgeschätzt, und eine Maximalüberhöhung des Horizontes wird bestimmt, die in 95% der Fälle noch keinen Einfluss auf die Messergebnisse hat.

Résumé

Pour déterminer le seuil de réponse de l'héliographe Campell-Stokes, une série de mesures portant sur 10 années (1963-1972), faites à l'aéroport de Zurich, a été utilisée. Le rayonnement solaire direct a pu être déduit d'enregistrements simultanés du rayonnement global et du rayonnement diffus mesurés par deux pyranomètres à surface réceptrice horizontale.

De l'ensemble de ce matériel ont été sélectionnés 139 cas de levers ou de couchers du soleil par temps clair, répartis sur l'ensemble de l'année. Les seuils de réponse correspondants et leur répartition statistique ont été calculés. Selon la nature des traces, les enregistrements du Campell-Stokes ont été répartis en quatre classes dont la fréquence a été calculée, et la relation entre chaque type de trace et les seuils correspondants a été déterminée.

La possibilité de comparaison avec l'héliographe des stations automatiques et le problème des series de mesure homogènes sont discutés. L'influence de la

configuration de l'horizon sur les mesures d'insolation est estimée, et une hauteur maximale de l'horizon, qui n'a aucune influence sur la mesure dans 95% des cas, est définie.

Riassunto:

Per la determinazione del limite di reazione dell'eliografo Campell-Stokes, furono utilizzate le registrazioni della stazione Zurigo-Kloten del decennio 1963-1972. La radiazione solare diretta fu calcolata dai valori misurati contemporaneamente della radiazione globale e della radiazione diffusa. Queste due grandezze sono state registrate con piranometri disposti orizzontalmente.

Da tutto questo materiale furono scelti 139 levate e rispettivamente tramonti del sole con cielo senza nubi. Fu studiata la frequenza della distribuzione dell'intensità limite. Furono distinti 4 tipi di bruciature della striscia, calcolata la loro frequenza e determinata la relazione tra il tipo di bruciatura e l'intensità limite.

Vengono discussi la paragonabilità con la registrazione della stazione automatica e il problema della omogeneità delle serie di dati. E'stimato l'influsso dell' andamento dell'orizzonte sulle misure della durata dell'insolazione e determinata una soprealevazione massima dell'orizzonte, che è senza influsso sui risultati delle misure nel 95% dei casi.

Summary

The 10 year (1963-1972) sunshine duration measurements at Zurich-Kloten were used to determine the sensibility of the Campell-Stokes sunshine recorder. Direct solar radiation was calculated from simultaneous readings of global and diffuse radiation, as measured by horizontally positioned pyranometers.

139 cloudless sunrise or sunset conditions, representing all seasons, were used to investigate the distribution of threshold intensities. Four types of trace were distinguished, their frequencies calculated, and the relationship between trace type and threshold intensity shown.

The comparability with automatic sunshine recorders and the problem of homogeneous data sequences are discussed. The effect of the horizon on sunshine measurements is estimated, and maximum values of elevation of the horizon which produce no effect on measurements in 95% of all cases are calculated.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1. Einleitung

2. Daten und Auswertungsmethoden

2.1 Auswahl der Messstation
2.2 Verwendete Messgeräte
2.3 Auswertung der Messdaten

3. Bestimmung der Schwellenintensität

3.1 Einflussgrössen auf die Schwellenintensität
3.2 Tages- und jahreszeitliche Unterschiede

3.2.1 Unterschiede zwischen Morgen und Abend
3.2.2 Jahresgang der Schwellenintensität

3.3 Unterschiedliche Brennspurtypen

3.3.1 Zusammenhang zwischen Brennspurtyp und Schwellenintensität
3.3.2 Häufigkeit der verschiedenen Brennspurtypen

3.4 Fehlerbetrachtung

3.4.1 Fehlerabschätzung
3.4.2 Schiefe Häufigkeitsverteilung der Schwellenintensität

3.5 Effektive mittlere Ansprechschwelle des Campbell-Stokes

4. Einfluss des Horizontverlaufs

4.1 Einfluss auf die Campbell-Stokes-Autographen
4.2 Einfluss auf die automatischen Sonnenscheindauermessgeräte

5. Schlussbemerkungen

Literaturverzeichnis

Vorwort

Meteorologische Strahlungsgrössen wurden in der Schweiz nur an wenigen Standorten während längerer Zeit gemessen. Das vorhandene Datenmaterial reicht nicht aus, um die verfügbare Solarenergie gesamtschweizerisch zu erheben. Anderseits sind Messreihen der Sonnenscheindauer für eine grössere Anzahl Stationen zugänglich und bilden eine wertvolle Datenbasis für dieses Vorhaben. Es ist deshalb angezeigt, zunächst diese Ersatzgrösse selbst zu untersuchen. Die Frage der Ansprechschwelle des Messinstruments ist dabei von grundsätzlicher Bedeutung.

Die vorliegende Arbeit ist Bestandteil eines Programms, das im Rahmen der Sonnenenergie-Forschungsprojekte der Internationalen Energieagentur von der Sektion Technische Meteorologie der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt betreut wird. Die finanziellen Mittel wurden in dankenswerter Weise vom Eidgenössischen Amt für Energiewirtschaft und vom Nationalen Energieforschungsfonds zur Verfügung gestellt.

Zürich, 16. Oktober 1978 Dr. P. Valko

1. E I N L E I T U N G

Ueber die Schwellenintensität des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes wurden in der Literatur (s. Bider [1] , u.a.) schon viele Angaben gemacht. Diese Mittelwerte weisen jedoch so grosse Unterschiede auf, dass es notwendig war, die vorliegende Untersuchung durchzuführen.

Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten, die Schwellenintensität zu bestimmen:

a) Effektive Schwellenintensität (Ansprechschwelle)

Hier wird die Schwellenintensität des Campbell-Stokes Autographen bei wolkenlosem Himmel ermittelt, d.h. die direkte Intensität der Sonnenstrahlung bei der ersten, bzw. letzten sichtbaren Brennspur (≙ effektive Ansprechschwelle).

b) Mittlere Schwellenintensität

Mit der Einführung des automatischen Messnetzes der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt (MZA) (Joss [8]) ist es notwendig, eine mittlere Schwellenintensität des Campbell-Stokes zu kennen, bei der das automatische Sonnenscheindauermessgerät[1] (direkte Strahlungsmessung) ansprechen soll. Da hauptsächlich der Klimatologe an einer homogenen Sonnenscheindauerreihe interessiert ist, muss dieser Schwellenwert bei Gerätewechsel bekannt sein.
Es treten hier apparative Effekte des Campbell-Stokes in Erscheinung, die die Festlegung einer mittleren Schwellenintensitätskonstante erschweren. Auch die effektive Ansprechschwelle ist keine Konstante, sondern abhängig von:
- Gerätetypus, Durchlässigkeit der Glaskugel, Art und Farbe des verwendeten Papiers, sowie in Verbindung mit der Jahreszeit wirksamen weiteren Effekten.
- Standort, d.h. Horizontverlauf

Diese Einflüsse, sowie das Ueberbrennen bei stark wechselhafter Bewölkung, bewirken, dass entweder eine zu lange oder eine zu kurze Sonnenscheindauer registriert wird. Es kann nun eine mittlere Schwellenintensität des Campbell-Stokes für einen Standort bestimmt werden, doch treten bei den einzelnen Tages- und Monatssummen der Sonnenscheindauer unterschiedliche Abweichungen zu dem bei diesem Schwellenwert ansprechenden automatischen Sonnenscheindauermessgerät auf.

Aus zeitlichen Gründen beschränkt sich diese Untersuchung auf die Bestimmung der effektiven Ansprechschwelle bei wolkenlosem Himmel zur Zeit des Auf- und Unterganges der Sonne.
Auf die "mittlere Schwellenintensität" wird bei der Interpretation der Resultate eingegangen; Details bleiben jedoch einer eventuellen späteren Untersuchung vorbehalten.

[1] Nachfolgend werden die im automatischen Stationsnetz der MZA eingebauten Messgeräte (Haenni, SOLAR 111 B) nur noch als automatische Sonnenscheindauermessgeräte bezeichnet.

2. DATEN UND AUSWERTUNGSMETHODEN

2.1 AUSWAHL DER MESSSTATION

Von den ca. 60 Stationen der Schweiz mit längeren Campbell-Stokes (CSt) Sonnenscheindauermessreihen haben lediglich drei Stationen während einer längeren Periode gleichzeitige Registrierungen der direkten Intensität, bzw. der Global- und Diffusstrahlung der Sonne.
Dies sind folgende Stationen: Zürich-Kloten, Locarno-Monti, Davos-Platz. Aus Gründen des zum Teil stark eingeengten Horizontes können Locarno und Davos für diese Auswertung nicht verwendet werden. Die direkte Strahlungsintensität der Sonne ist nach Ueberschreiten des Horizontes bereits grösser als die effektive Ansprechschwelle des Campbell-Stokes.

In Zürich-Kloten (Flughafen) ist der Verlauf des Horizontes sehr günstig ($<2^0$) und somit praktisch ohne Einfluss auf die Sonnenscheindauermessung. Die Messgeräte (CSt, Strahlung) sind bei dieser Station mit einem Abstand von vier Kilometern aufgestellt. Da sich diese Untersuchung auf wolkenlose Auf- und Untergänge beschränkt, hat dieser Umstand keinen Einfluss auf die Auswertung (vgl. Fehlerbetrachtung).

2.2 VERWENDETE MESSGERAETE

Sonnenscheindauer: Typ: Campbell-Stokes mit heller Glaskugel, ø 96 mm
Fabrikat: Fuess
Papierstreifen: blau, helle Zeiteinteilung

Abbildung vgl. Valko [4] und Robinson [6] S.222

Strahlung: Zur Untersuchung konnte nicht unmittelbar auf Messungen der direkten Sonnenstrahlung, sondern auf gleichzeitige Messungen der Global- und Diffusstrahlung[1] zurückgegriffen werden.

Messgeräte: Thermoelektrische Pyranometer Moll Gorzynski
Fabrikat: Kipp & Zonen
Zeitkonstante: 30 s, Temperaturkoeffizient: - 0.2 %/°C
Messschreiber: Speedomax, Vorschub 3,5 cm/h, Schreibbreite 20 cm

Nähere Angaben in Schmid [2] und Valko [4].

[1] Die Messung der Diffusstrahlung (Himmelsstrahlung) wurde durch Abschatten des Pyranometers von der Sonne mit einem Ring (Breite b = 5 cm, Radius r = 37,2 cm, b/r = 0,134) vorgenommen.

2.3 AUSWERTUNG DER MESSDATEN

Alle ca. 3650 Tagesstreifen (Strahlungsmessung) der 10 Messjahre wurden gesichtet und die Fälle mit wolkenfreiem Auf- und Untergang der Sonne herausgesucht (vgl. Abb.5 in [2]).
Von den ca. 400 verwertbaren, d.h. wolkenfreien Auf- und Untergängen wurden aus zeitlichen Gründen (Auswertung) 139 über alle Monate verteilte Werte ausgewählt (74 Auf- und 65 Untergänge).

Sonnenscheindauer: Für diese Tage wurde auf dem Sonnenscheindauer-Messstreifen der genaue Zeitpunkt der ersten, bzw. letzten sichtbaren Brennspur ermittelt. Es wurde entsprechend der Definition in Tabelle 1 die Brennspur einer der vier Typen zugeordnet. Diese Einteilung in vier Klassen wurde mangels vergleichbarer Untersuchungen vom Autor selbst vorgenommen.

Tabelle 1 Definition der Brennspurtypen des Campbell-Stokes

Typ	Charakteristik der Brennspur
1	Lange helle Brennspur, langsam in dunkle Spur übergehend
2	Kurze helle Brennspur, sofort in dunkle Spur übergehend
3	Keine helle Brennspur, lange dunkle Spur langsam in durchgebranntes Papier übergehend
4	Keine helle Brennspur, kurze dunkle Spur sofort in durchgebranntes Papier übergehend

Strahlung: Für den ermittelten Zeitpunkt der sichtbaren Brennspur wurden den Strahlungsregistrierungen die Globalstrahlung (G_H) und die Diffusstrahlung (D_H) entnommen. Die zugehörige Intensität der direkten Sonnenstrahlung ($\hat{=}$ Schwellenintensität, Index S) bei senkrechtem Einfall kann mit dem gültigen Wert des Sonnenhöhenwinkels h berechnet werden:

$$I_s = \frac{(G_H - D_H)}{\sin h} \qquad (1)$$

Schattenringkorrektur: Die Diffusstrahlung wurde mit einem Pyranometer mit Abschattungsring gemessen. Es entsteht so ein systematischer Fehler, da der durch den Abschattungsring abgedeckte Himmel bei der Messung nicht berücksichtigt wird (vgl. [2], [4]). Es ist jedoch schwierig, den Einfluss auf die Einzelmessung zu bestimmen, da eine Abhängigkeit von der Trübung, Sonnenhöhe und

Jahreszeit besteht.[1]
Ich korrigiere deshalb nicht die Einzelwerte, sondern erst am Schluss der Untersuchung die Mittelwerte der effektiven Schwellenintensität I_{sm}. Der Einfluss und die Grösse der Korrektur wird in Abschnitt 3.4.1 besprochen.

3. BESTIMMUNG DER SCHWELLENINTENSITAET

3.1 EINFLUSSGROESSEN AUF DIE SCHWELLENINTENSITAET

a) Apparative Einflüsse

Die Schwellenintensität ist abhängig vom Apparatetyp und wird in erster Linie beeinflusst von der:
- spektralen Durchlässigkeit (Farbe) der Glaskugel
- Fokusierung, Reflexionsvermögen der Glaskugel
- Art und Beschaffenheit des Papiers.

Weitere Einflussgrössen sind Fehler in der Bedienung und Wartung der Autographen, so z.B. falsches Zuschneiden der Aequinoktialstreifen, ungenaues Ausrichten der Papierstreifen, usw.

Der wichtigste Parameter ist die Durchlässigkeit der Glaskugel, die je nach Glasart verschieden ist und sich im Laufe der Betriebsjahre ändern kann.

b) Meteorologische und standortspezifische Einflüsse

Es sind hauptsächlich die meteorologischen Einflüsse, die eine Bestimmung einer Schwellenintensitätskonstanten erschweren:
Auf den momentanen Zustand des Papiers wirken sich an wolkenlosen Tagen, hauptsächlich bei Sonnenaufgängen, folgende Parameter aus:
- Feuchtigkeit und Temperatur der Luft
- vorangegangene Niederschläge wie z.B. Regen, Tau, evtl. Schnee

Die Glaskugel kann durch Tau oder Reif bedeckt sein, so dass bei schlechter Wartung kein Sonnenschein registriert wird.
Dies sind Effekte, die durch die Apparatekonstruktion bedingt sind und sich je nach Klimaregion und Jahreszeit unterschiedlich auf die mittlere Schwellenintensität auswirken.

Als standortspezifischer Einfluss ist der Verlauf des Horizontes von Bedeutung und wird in Abschnitt 4 abgeschätzt.

[1] Mit den Messgeräten des Strahlungsmesswagens der MZA wird die Verteilung der diffusen Strahlung über die Halbkugel punktweise (5^{o} Oeffnungswinkel) gemessen. Aus diesen Unterlagen wird die Schattenringkorrektur für verschiedene atmosphärische Bedingungen ermittelt werden können.

3.2 TAGES- UND JAHRESZEITLICHE UNTERSCHIEDE

3.2.1 Unterschied zwischen Morgen und Abend

Die Schwellenintensität weist einen systematischen Unterschied zwischen Sonnenauf- und untergang auf. Die Werte sind am Morgen im Mittel um ca. 13% grösser als am Abend (vgl. Tabellen 2 und später 4). Dieser systematische Unterschied ist schon von mehreren Autoren festgestellt worden, z.B. Bider [1]. Die Gründe für die Differenz sind bei den meteorologischen Einflüssen zu suchen, die in Abschnitt 3.1 erläutert wurden.

Der systematische Unterschied wird auch in der Darstellung der Summenhäufigkeit deutlich (Abbildung 1).
Das Ueberschneiden der Summenhäufigkeitslinien bei kleinen Intensitäten dürfte durch zu wenig Messpunkte bedingt sein.

3.2.2 Jahresgang der Schwellenintensität

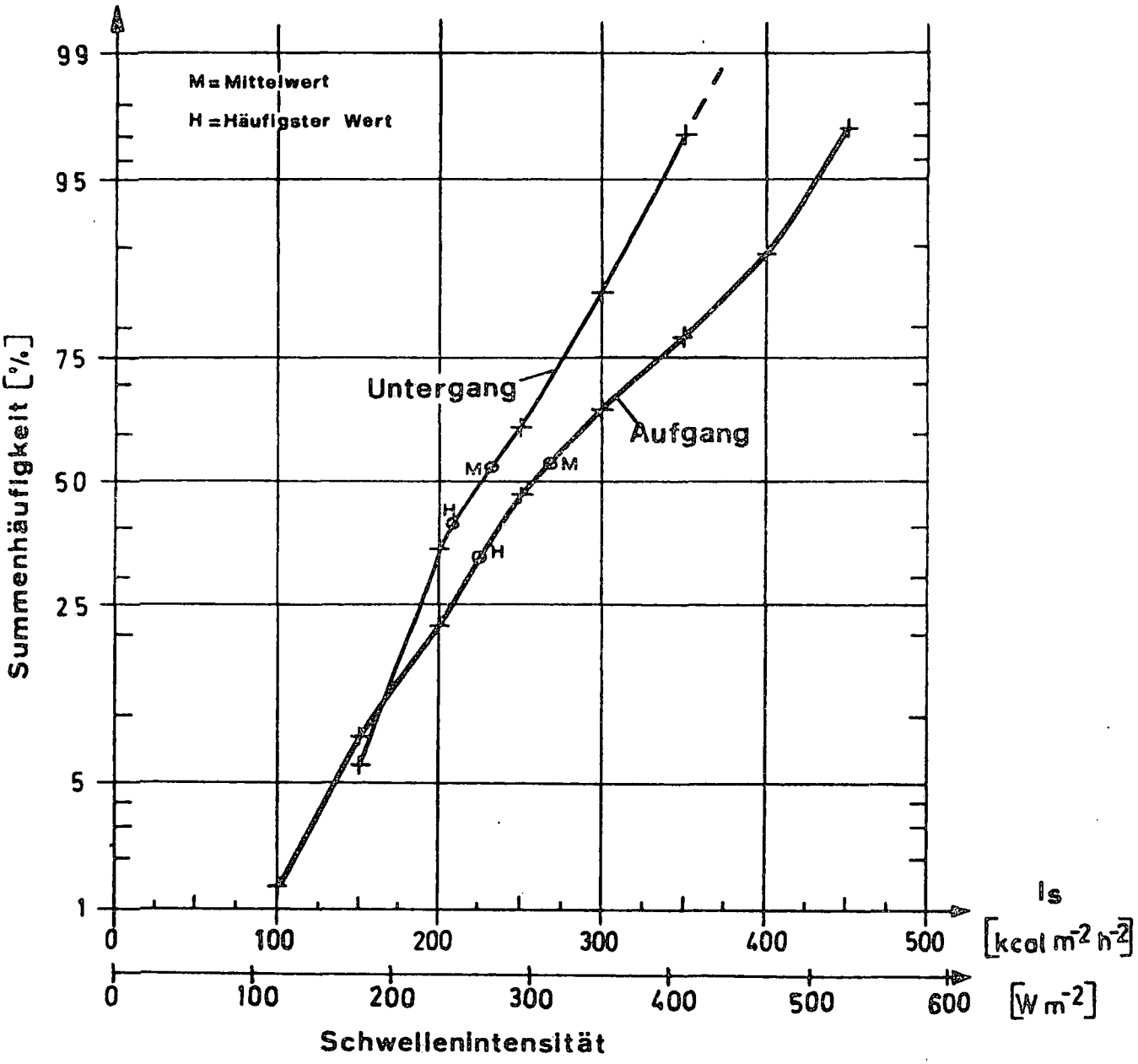
Anhand des vorliegenden Datenmaterials kann ein ähnlicher jahreszeitlicher Gang der Schwellenintensität ermittelt werden, wie ihn Bider [1] mit einem gleichen Datenumfang für Basel gefunden hat.
Wie die Werte in Tabelle 4 zeigen, sind im Mittel in der Uebergangszeit die grössten Schwellenintensitäten zu erwarten. Wohl ist die mittlere Ansprechschwelle auch eine jahreszeitliche Funktion, doch ist die Streuung der Einzelwerte so gross, dass mit guter Näherung ein Jahresmittelwert verwendet werden kann.

Tabelle 2 Schwellenintensität I_s[1] des Campbell-Stokes in $[W/m^2]$

	Aufgang					Untergang				
	Brennspurtyp				Alle Werte	Brennspurtyp				Alle Werte
	1	2	3	4		1	2	3	4	
Mittelwert $\frac{\Sigma I_s}{n}$	223	290	307	462	312	231	228	292	351	271
Max.-Wert $I_{s_{max}}$	334	442	466	562	562	320	398	419	518	518
Min.-Wert $I_{s_{min}}$	76	138	174	356	76	165	158	209	202	158

[1] ohne Schattenringkorrektur gemäss Formel (3)

Abb. 1 Summenhäufigkeit der Schwellenintensität I_s[1] des Campbell-Stokes in Zürich-Kloten



[1] ohne Schattenringkorrektur gemäss Formel (3)

3.3 UNTERSCHIEDLICHE BRENNSPURTYPEN

Gemäss der Definition der Brennspurtypen in Tabelle 1 soll nun deren Zusammenhang mit der Schwellenintensität sowie die Häufigkeit ihres Auftretens untersucht werden.

3.3.1 Zusammenhang zwischen Brennspurtyp und Schwellenintensität

Es besteht ein offensichtlicher Zusammenhang zwischen der Brennspurart und der Schwellenintensität. Um ein Loch (Typ 4) in den Papierstreifen zu brennen ist eine grössere Intensität nötig, als um eine kaum sichtbare, helle Brennspur (Typ 1) zu hinterlassen. Dieser Unterschied wird deutlich anhand von Tabelle 2, wo die Mittel- und Extremwerte der verschiedenen Typen zu finden sind. Mit Ausnahme von Typ 1 zeigt sich auch hier der systematische Unterschied zwischen Sonnenauf- und untergang. So ist z.B. die Schwellenintensität am Morgen beim Typ 4 doppelt, am Abend nur anderthalb mal so gross wie beim Typ 1.
Beim Typ 1 besteht kein Unterschied zwischen Sonnenauf- und untergang, da bei dieser Brennspurart die meteorologischen Einflüsse für beide Zeitpunkte gleich sind. Dies ist jedoch nicht der Fall beim Typ 2. Zwischen den Brennspurarten 1 und 2 sollte es eigentlich keinen Unterschied geben, da beide helle Brennspuren aufweisen. Die Werte am Abend verhalten sich auch dementsprechend, wie aus Tabelle 2 ersichtlich ist. Bedingt durch den unterschiedlichen Papierzustand (vgl. Abschnitt 3.1) tritt der Brennspurtyp 2 am Morgen bei grösseren Intensitäten auf.

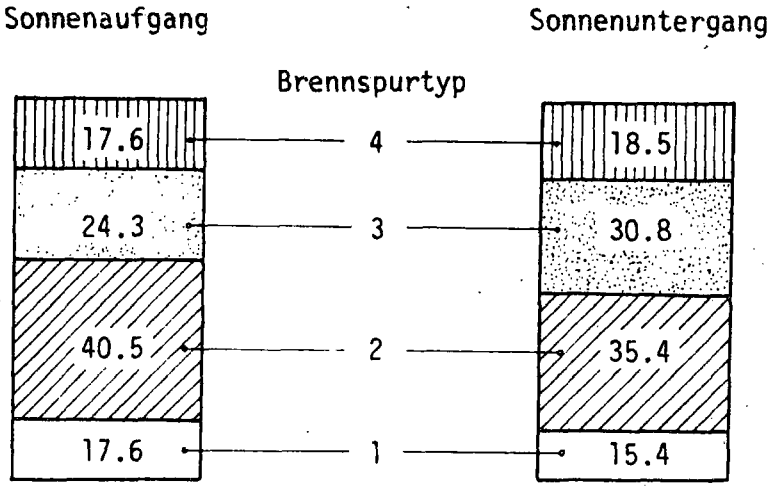
Es wäre sehr aufschlussreich, die Gründe für das Auftreten der verschiedenen Brennspurtypen genauer zu untersuchen, insbesondere das Fehlen der hellen Brennspuren bei Typ 3 und 4.
Die Ursachen für das Fehlen der hellen Brennspuren in ca. 50% aller wolkenlosen Sonnenauf- und untergängen sind möglicherweise folgende:
- Tau und Reif auf Glaskugel und eventuell vorangehende Niederschläge
- Papierqualität (evtl. spektrale Abhängigkeit)
- Wolken in Sonnennähe

Tau und Reif sowie die Papierqualität sind apparative Effekte und werden bei der Auswertung mitberücksichtigt.
Trotz der sorgfältigen Auswahl des Datenmaterials sind Datenfehler wie z.B. Wolken in Sonnennähe (bedingt durch den Abstand zwischen den Standorten der Messgeräte) nicht auszuschliessen (vgl. Abschnitt 3.4 Fehlerbetrachtung).

3.3.2 Häufigkeit der verschiedenen Brennspurtypen

Die Häufigkeit des Auftretens der vier Brennspurtypen kann aus Abbildung 2 entnommen werden. Am häufigsten treten die kurzen, hellen Brennspuren des Typs 2 als erste, bzw. letzte sichtbare Markierung des Papiers bei wolkenlosem Himmel auf.

Abb. 2 Relative Häufigkeit der Brennspurtypen [%]



Die relative Häufigkeit der Brennspurtypen in den verschiedenen Intensitätsklassen[1] kann aus Tabelle 3 sowie Abbildung 3 und 4 entnommen werden. Auch in diesen Darstellungen zeigt sich deutlich der direkte Zusammenhang zwischen Brennspurtyp und Schwellenintensität. So tritt bei Sonnenaufgang der Typ 1 nur bei Intensitäten kleiner als 300 kcal m^{-2} h^{-1} und der Typ 4 bei solchen grösser als 300 kcal m^{-2} h^{-1} auf.

Tabelle 3 Relative Häufigkeit der Schwellenintensität I_s[1] bei verschiedenen Brennspurtypen in [%]

(1 kcal = 4.186 kJ)

Intensitätsbereich[2] kcal m^{-2} h^{-1}	Sonnenaufgang Brennspurtyp 1	2	3	4	Alle Werte	Sonnenuntergang Brennspurtyp 1	2	3	4	Alle Werte
$50 \leq I_s < 100$	1.4				1.4					
100 150	4.1	2.7			6.7	1.5	4.6			6.2
150 200	2.7	6.7	4.1		13.5	6.2	15.4	6.2	1.5	29.2
200 250	6.7	13.5	5.4		25.7	6.2	9.2	9.2	1.5	26.2
250 300	2.7	8.1	8.1		18.9	1.5	4.6	12.3	4.6	23.1
300 350		6.7	2.7	2.7	12.2		1.5	1.5	9.2	12.3
350 400		2.7	2.7	5.4	10.8			1.5		1.5
400 450			1.4	6.7	8.1				1.5	1.5
$450 \leq I_s < 500$				2.7	2.7					
Total	17.6	40.5	24.3	17.6	100.0	15.4	35.4	30.8	18.5	100.0

[1] ohne Schattenringkorrektur gemäss Formel (3)

[2] Bei den ersten Auswertungen wurden die alten Masseinheiten noch beibehalten.

Relative Häufigkeit der Schwellenintensität I_s[1] für verschiedene Brennspurtypen (Histogramm)

Abb. 3 für Sonnenaufgang

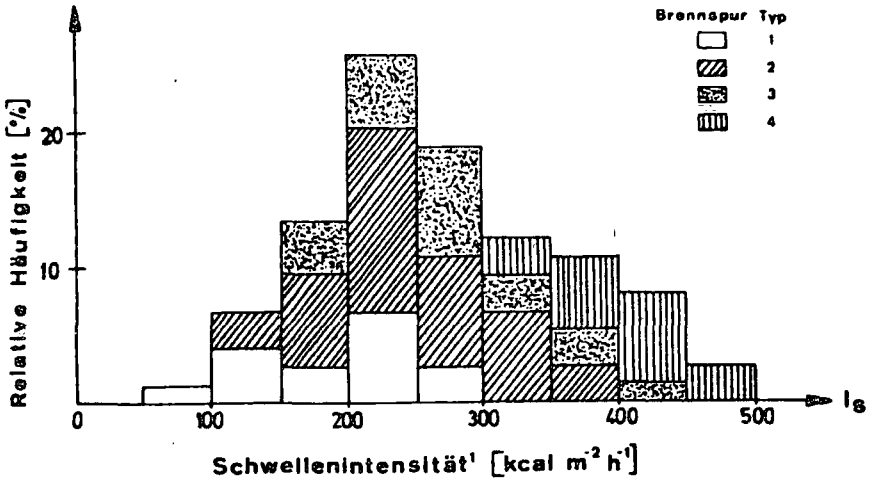
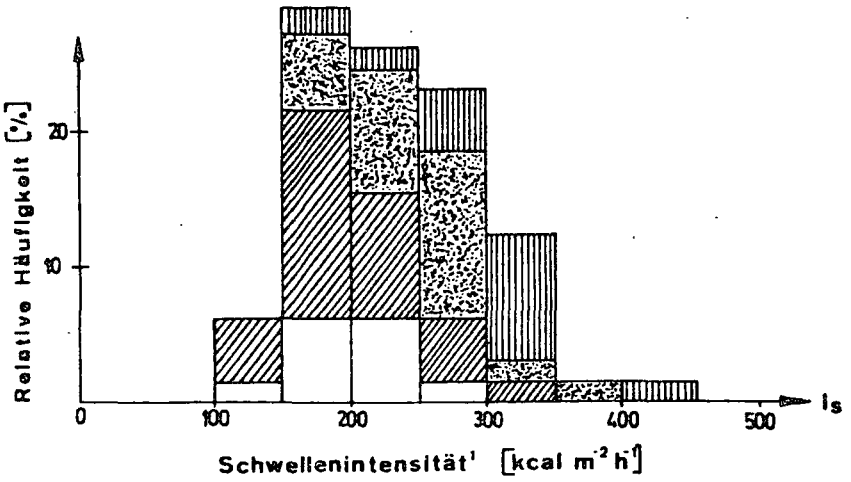


Abb. 4 für Sonnenuntergang



3.4 FEHLERBETRACHTUNG

Es soll nun abgeklärt werden, ob systematische Fehlerquellen bei der Auswertung vorhanden sind und wie diese korrigiert oder vermieden werden können.

[1] ohne Schattenringkorrektur gemäss Formel (3)

3.4.1 Fehlerabschätzung

a) Zufälliger Fehler

$$I_s = \frac{G_H - D_H}{\sinh} \qquad (1)$$

wobei $(G_H - D_H)$ und sinh eine Funktion des Zeitpunktes t sind

Brennspur: Die Bestimmung des Zeitpunktes t der ersten Brennspur ist mit einem Fehler von ± 3 Minuten behaftet. Dies wirkt sich auf die Grösse von sinh aus. Als Mittel über die vorkommenden Sonnenhöhen gilt:

$$\frac{\Delta \sinh}{\sinh} \sim \pm 10\ \%$$

Strahlungsmessungen: Die ungenaue Zeitpunktbestimmung auf dem Pyranometer-Messstreifen ergibt eine Streuung von ± 4 Minuten.

$$\frac{\Delta (G_H - D_H)}{G_H - D_H} \sim \pm 15\ \%$$

Messfehler der Pyranometer[1]:

$$\frac{\Delta (G_H - D_H)}{G_H - D_H} \sim \pm 5\ \%$$

Relativer Fehler der direkten Strahlung:

$$\frac{\Delta (G_H - D_H)}{G_H - D_H} \sim \pm 20\ \%$$

Mittlerer relativer Fehler des Einzelwertes der Schwellenintensität I_s[1]

$$\frac{\Delta I_s}{I_s} = \sqrt{\sum \left(\frac{\Delta (G_H - D_H)}{G_H - D_H} \right)^2} \simeq 22\ \%$$

[1] ohne systematische Abweichung bedingt durch den Schattenring

b) Systematische Fehler der Auswertung

Nichtbeachten der hellen Brennspuren
Bei der Zeitpunktbestimmung werden die hellen, kaum sichtbaren Brennspuren zum Teil übersehen, d.h. die Schwellenintensität wird durch die ungenaue Zeitbestimmung zu gross geschätzt. Dieser Fehler kann mit einer sorgfältigen Auswertung zum grössten Teil vermieden werden.

Nichtberücksichtigung der Schattenringkorrektur
Die Diffusstrahlung D_H wird in Zürich-Kloten mit einem Abschattungsring gemessen. Der Ring deckt einen Teil des Himmels ab, wodurch die gemessene Diffusstrahlung (Himmelsstrahlung) zu klein wird.
Schmid [2] hat für Zürich-Kloten Untersuchungen über die Grösse des Ringkorrekturfaktors f_{zs} durchgeführt.
Der Ringkorrekturfaktor f_{zs} ist abhängig von Trübung, Sonnenhöhe und Jahreszeit. Da anhand des bestehenden Datenmaterials nicht jeder Einzelwert mit genügender Genauigkeit korrigiert werden kann, wird in der vorliegenden Arbeit ein mittlerer jährlicher Korrekturfaktor angenommen und nur die effektiven mittleren Schwellenintensitätswerte von Tabelle 4 korrigiert. Die Annahme eines Mittelwertes für den Ringkorrekturfaktor ist zulässig, da sich die Untersuchung auf Aussagen über das Jahr im gesamten beschränkt.

Annahme des mittleren Ringkorrekturfaktors (nach Schmid [2]):

$$f_{zs} = \frac{1}{1+\frac{\Delta D_H}{D_H}} = 1.095$$

Für die Bestimmung der Schwellenintensität ist nun der Einfluss dieses Korrekturfaktors auf die direkte Strahlung I_s von Bedeutung. An wolkenlosen Tagen und für Sonnenhöhen, die in der vorliegenden Untersuchung vorkommen, lässt sich näherungsweise annehmen:
$G_H \geq 2\ D_H$ [1]

Nun kann der systematische Fehler der direkten Strahlung abgeschätzt werden (Vorzeichen von D_H und I_s sind sinngemäss eingesetzt):

$$\frac{\Delta I_s}{I_s} = \frac{\Delta (G_H - D_H)}{G_H - D_H} \sim - \frac{\Delta D_H}{2D_H - D_H} \sim - \frac{\Delta D_H}{D_H}$$

Der systematische Fehler der direkten Strahlung entspricht näherungsweise dem der Diffusstrahlung.

Es kann nun die korrigierte mittlere Ansprechschwelle berechnet werden:

$$I_{sm} = (1 - \frac{\Delta D_H}{D_H}) \cdot \frac{\Sigma I_s}{n} = (1 - \frac{1}{f_{zs}} + 1) \cdot \frac{\Sigma I_s}{n}$$

[1] Zahlenmässige Nachprüfung bei den häufigsten Trübungswerten ergibt Faktoren zwischen 1.5 und 2 D_H. Dies ist jedoch für die später gemachte Schlussfolgerung ohne Bedeutung.

$$I_{sm} = \frac{1}{f_{zs}} \cdot \frac{\Sigma I_s}{n} \qquad (2)$$

mit eingesetztem Ringkorrekturfaktor

$$\boxed{I_{sm} = 0.913 \cdot \frac{\Sigma I_s}{n}} \qquad (3)$$

ΔD_H = Durch Ring abgedeckte Diffusstrahlung

D_H = eff. Diffusstrahlung

f_{zs} = Ringkorrekturfaktor 1.095

I_s = direkte Strahlung des Einzelwertes

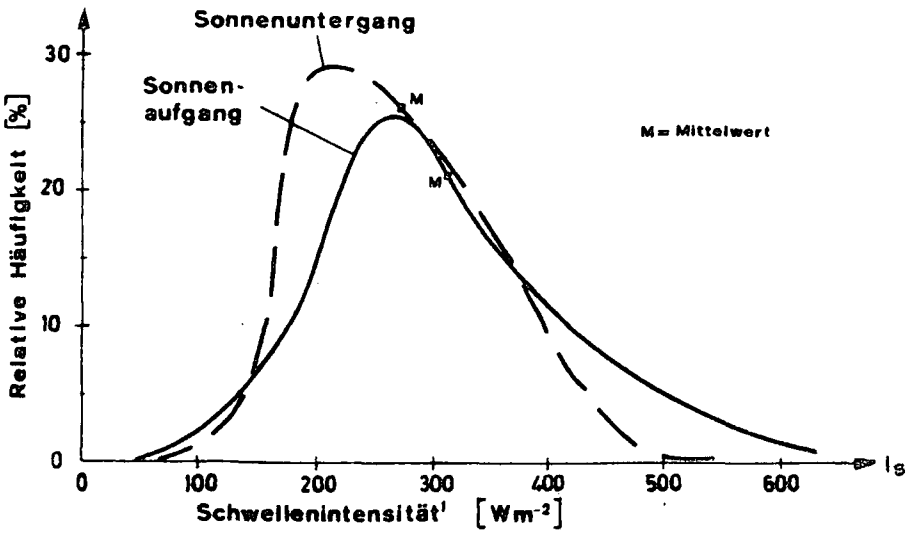
n = Anzahl Messwerte

I_{sm} = mittlere effektive Schwellenintensität

3.4.2 Schiefe Häufigkeitsverteilung der Schwellenintensität

Die Häufigkeit der Schwellenintensität des Campbell-Stokes ist, wie Abbildung 5 zeigt, nicht normal (Gauss), sondern schief verteilt.

Abb. 5 Häufigkeitsverteilung der Schwellenintensität I_s



Anhand der Fehlerbetrachtungen sowie der Gründe für das Auftreten der verschiedenen Brennspurtypen lässt sich die Verschiebung zu grösseren Intensitäten durch folgende Einflüsse erklären:

a) Systematische Fehler

Der einzige systematische Fehler, der sich auf die Verteilung auswirkt, ist das Uebersehen der hellen Brennspuren. Dies kann mit einer sorgfältigen Auswertung vermieden werden.

b) Datenfehler

Auch Datenfehler wie z.B. Wolken in Sonnennähe sind möglich, aber sehr klein, da die Auswahl anhand der Strahlungsmessung erfolgte.

c) Apparative Fehler des Campbell-Stokes

Es gibt mehrere apparative Effekte, die sich auf die Häufigkeitsverteilung auswirken:
- Papierqualität mit schlechter Empfindlichkeit auf kleine Intensitäten sowie eine spektrale Ansprechabhängigkeit
- Abnehmende Durchlässigkeit der Glaskugel.

Somit treten die Brennspurtypen 3 und 4 häufiger auf.

d) Meteorologische Einflüsse

Tau und Reif auf der Glaskugel sowie vorangehende Niederschläge bewirken eine Verschiebung zu grösseren Intensitäten.
So tritt z.B. der Brennspurtyp 4 am häufigsten in der Uebergangszeit auf.

Die schiefe Häufigkeitsverteilung der Schwellenintensität ist hauptsächlich durch apparative und meteorologische Einflüsse bedingt. Durch sorgfältige Auswahl der Daten sind die systematischen Fehler und die Datenfehler sehr klein und demzufolge ohne Einfluss.
Bei anderem Standort und Autographen können die Schwellenintensitätswerte "normalverteilt" sein. Dies wäre auch hier der Fall, wenn die Brennspurtypen 4 (und zum Teil Typ 3) nicht vorkommen würden.

3.5 EFFEKTIVE MITTLERE ANSPRECHSCHWELLE DES CAMPBELL-STOKES

Mit der systematischen Korrektur gemäss Formel (3) kann die mittlere effektive Ansprechschwelle des Campbell-Stokes für wolkenlose Sonnenauf- und untergänge aus Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4 Mittlere effektive Ansprechschwelle I_{sm} des Campbell-Stokes in $[W/m^2]$

	Jahreszeit [1]			Jahr
	Winter	Uebergang	Sommer	
Sonnenaufgang	294	316	266	285
Sonnenuntergang	214	281	227	248

[1] Jahreszeiteinteilung erfolgt durch die drei verschiedenen Streifenarten des CSt.

Als Vergleich der in Tabelle 4 angegebenen Schwellenintensitätswerte kann die Untersuchung von Bider [1] verwendet werden. Die Resultate von Bider sind systematisch um ca. 55 W/m^2 kleiner als die hier angegebenen Schwellenintensitätswerte. Dieser systematische Unterschied kann bedingt sein durch:
- Unterschiedliche Autographentypen (Bider: Negretti-Zambra)
- Unterschiedliche Papierstreifen
- Unterschiedliche Standorte (Bider: Basel)
- zu kleine Ringkorrektur für Zürich-Kloten (Formel (3))

Die Gründe für den systematischen Unterschied sind wohl bei den unterschiedlichen Autographen und Papierstreifen zu suchen.
Der Einfluss der unterschiedlichen Standorte ist für wolkenlose Sonnenauf- und untergänge klein, insbesondere weil beide Stationen den gleich günstigen Horizontverlauf aufweisen (vgl. Schuepp [5]).

Folgerung: Die Schwellenintensitätswerte dieser Untersuchung gelten genaugenommen nur für den Campbell-Stokes-Sonnenscheinautographen Typ Fuess und die Messstreifen, die in der Schweiz verwendet werden.

4. EINFLUSS DES HORIZONTVERLAUFES

Um den Einfluss des Horizontverlaufes auf die Messung der Sonnenscheindauer abschätzen zu können, muss für verschiedene Summenhäufigkeiten der Schwellenintensität des Campbell-Stokes (Abb. 1) der Zusammenhang mit der dazugehörigen Sonnenhöhe h und Azimut A gefunden werden.
Valko [3] hat für das schweizerische Mittelland den Tages- und Jahresgang der direkten Strahlung in ihrer Häufigkeitsverteilung rechnerisch ermittelt. Für die vorliegende Untersuchung genügt es, lediglich aus [3], Abbildung 14, die Mittelwerte zu berücksichtigen.
Für verschiedene Summenhäufigkeiten der Schwellenintensität I_{sm}[1] (Σ 5%, Σ 50%, Σ 95%) kann dieser Abbildung die Tageszeit der Sonnenauf- und untergänge (Monatsmitte) entnommen werden.
Zu diesem Zeitpunkt kann nun die Sonnenhöhe h und das Azimut A für jeden Summenhäufigkeitswert bestimmt werden.
Für den möglichen Azimutbereich zeigt Abbildung 6 das Ergebnis für die Sonnenaufgänge, Abbildung 7 das für die Sonnenuntergänge. In diese Abbildungen kann nun auch der Horizontverlauf des Gerätestandortes (Zürich-Kloten) eingezeichnet werden.

[1] Aus Abbildung 1 wurden die Schwellenintensitätswerte entnommen und mit Formel (3) korrigiert.

4.1 EINFLUSS AUF DIE CAMPBELL-STOKES AUTOGRAPHEN

Anhand der Abbildungen 6 und 7 kann nun im Mittel der Einfluss des Horizontverlaufs im möglichen Azimutbereich der Sonnenauf- und untergänge abgeschätzt werden.

Horizontüberhöhung $\leq$ 5% - Summenhäufigkeit I_{sm}

In 5% aller wolkenlosen Sonnenauf- bzw. Sonnenuntergängen ist die Schwellenintensität des Autographen kleiner 145 W/m^2, d.h. in praktisch allen Fällen (95%) tritt die erste bzw. letzte Brennspur bei einer grösseren Sonnenhöhe auf. Sämtliche Horizontüberhöhungen, die unterhalb dieser Kurve liegen, sind praktisch bedeutungslos für die Sonnenscheindauermessung. Es erscheint zweckmässiger, alle Sonnenscheinregistrierungen für Ortschaften mit einer Horizontüberhöhung unterhalb der Σ-5% Kurve auf diese Horizonthöhe zu beziehen.

Sonnenhöhe und Azimut bei verschiedenen Summenhäufigkeiten der mittleren Ansprechschwelle I_{sm} des Campbell-Stokes

Abb. 6 Für wolkenlose Sonnenaufgänge

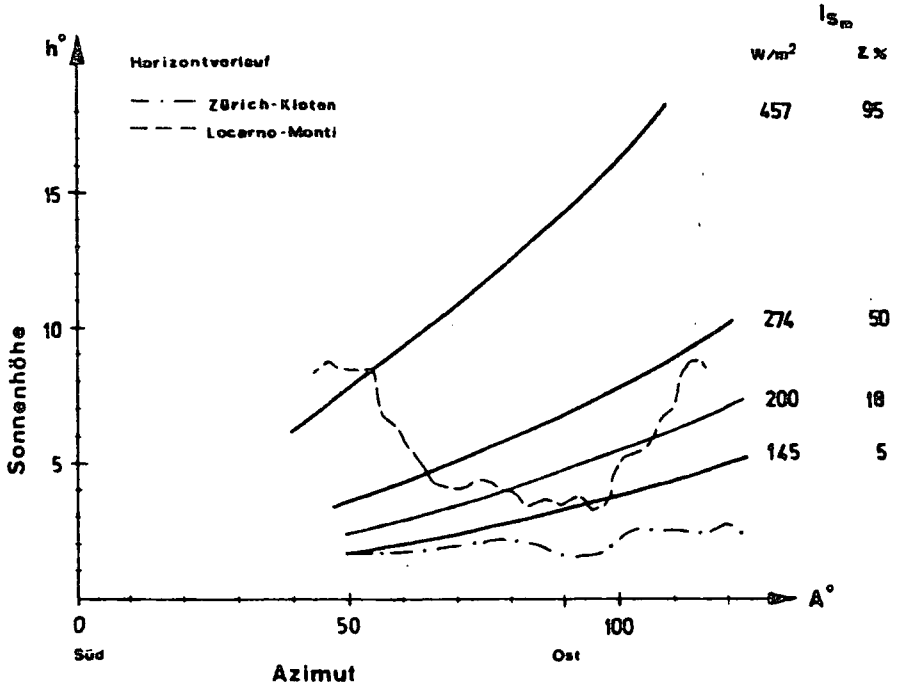
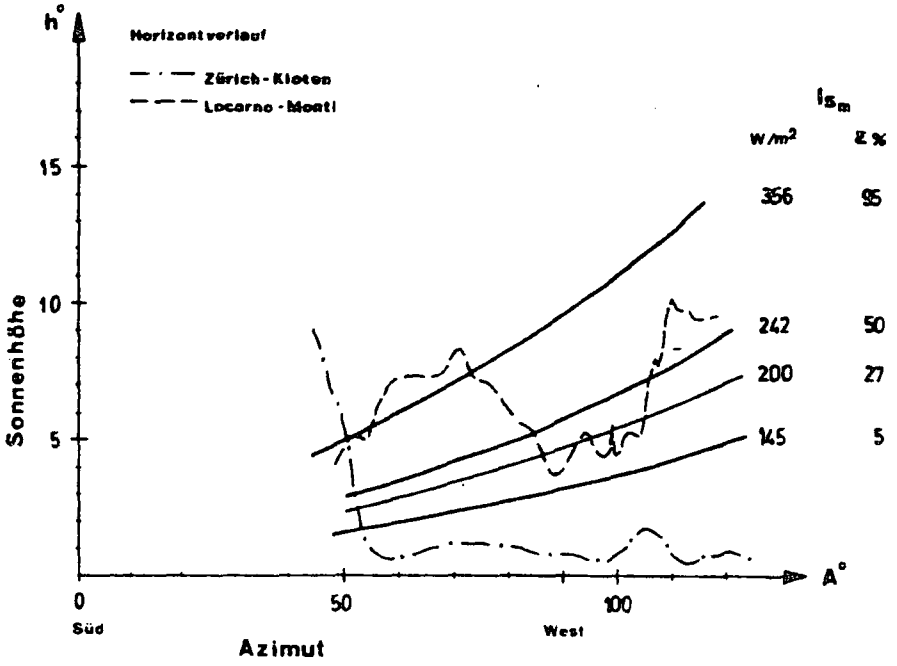


Abb. 7 Für wolkenlose Sonnenuntergänge



Horizontüberhöhung $\geq$95% - Summenhäufigkeit I_{sm}
In 95% aller wolkenlosen Aufgänge ist die Schwellenintensität des Autographen kleiner als 457 W/m^2 bzw. für Sonnenuntergänge kleiner als 357 W/m^2.
In praktisch allen Fällen tritt die erste bzw. letzte Brennspur bei niedriger Sonnenhöhe auf.
Liegt nun die Horizontüberhöhung einer Ortschaft wie Locarno-Monti oberhalb dieser Summenhäufigkeit, so bestimmt nur die Horizontüberhöhung in diesem Azimutbereich die Sonnenscheindauer.

Horizontüberhöhung $\geq$5% und $\leq$95% Summenhäufigkeit I_{sm}
In diesem Bereich kann anhand des effektiven Horizontverlaufs und der Summenhäufigkeit der Schwellenintensität abgeschätzt werden, wie oft der Horizont und wie oft die effektive Ansprechschwelle des Campbell-Stokes massgebend für die erste bzw. letzte Brennspur sind.

Beispiel: In Locarno-Monti beim Sonnenuntergang (Abb. 7) für ein Azimut von 86° gilt: Im Mittel ist bei wolkenlosem Himmel in 27% der Horizontverlauf und in 73% die effektive Ansprechschwelle des Campbell-Stokes für die letzte Brennspur massgebend.

Ist der Horizontverlauf für eine Ortschaft bekannt, so kann anhand der Abb. 6 und 7 der Einfluss auf die gemessene Sonnenscheindauer bei wolkenlosem Himmel abgeschätzt werden.
Für Zürich-Kloten liegen die Horizontüberhöhungen, mit Ausnahme von Dezember bis Mitte Januar bei Sonnenuntergängen, immer unterhalb der 5%-Summenhäufigkeit, d.h. mit der obigen Einschränkung hat im ganzen Azimut-

bereich nur die effektive Ansprechschwelle des Campbell-Stokes einen Einfluss auf die maximale Sonnenscheindauer.
In Locarno-Monti hingegen liegt der Horizontverlauf immer oberhalb der ≧5%-Linie, d.h. für die maximal mögliche Sonnenscheindauer ist praktisch nur der Horizontverlauf massgebend.

4.2 EINFLUSS AUF DIE AUTOMATISCHEN SONNENSCHEINDAUER-MESSGERAETE

Anhand Abb. 6 und 7 kann nun wie beim Campbell-Stokes abgeschätzt werden, wie gross der Einfluss des Horizonts ist. Die Schwellenintensität ist jedoch beim automatischen Messgerät eine Konstante und hier in der Schweiz auf 200 W/m^2 eingestellt. Dies vereinfacht nun im Vergleich zum Campbell-Stokes die Interpretation:

- Liegt der Horizontverlauf oberhalb der Schwellenintensitätskurve von 200 W/m^2 (Abb. 6 und 7), so ist er und nicht die Einstellschwelle massgebend für die Sonnenscheindauerregistrierung.
- Liegt er unterhalb der 200 W/m^2-Linie, so ist die Schwellenintensität für den Beginn bzw. das Ende der Registrierung verantwortlich.

Für Zürich-Kloten ist eindeutig der Horizontverlauf unterhalb der Schwellenintensitätskurve von 200 W/m^2, d.h. er hat keinen Einfluss auf die Sonnenscheindauermessung. In Locarno-Monti hingegen liegt er mit Ausnahme der Uebergangszeit ($85 < A < 105$) oberhalb der Ansprechschwelle, d.h. der Horizontverlauf bestimmt hauptsächlich die Registrierdauer bei wolkenlosen Auf- und untergängen.

Würde man nun die Schwellenintensität von 200 W/m^2 auf 145 W/m^2 reduzieren, so hätte dies für die beiden Ortschaften unterschiedliche Auswirkungen:

- In Zürich-Kloten würde bei sämtlichen wolkenlosen Tagen entsprechend der Veränderung des Schwellenwertes mehr Sonne registriert.
- In Locarno-Monti hätte dies nur eine Veränderung in der Uebergangszeit zur Folge, da im Mittel hier nur die Einstellschwelle und nicht der Horizont den Registrierbeginn bestimmt.

Eine homogene Reihe der Sonnenscheindauer bei Gerätewechsel kann nicht einfach durch Veränderung der Schwellenintensität des automatischen Messgerätes erreicht werden, da neben den meteorologischen Einflüssen auch der Horizont die Sonnenscheindauermessung beider Apparate beeinflusst.

5. SCHLUSSBEMERKUNGEN

a) Allgemeines

Diese Untersuchung zeigt deutlich, dass die effektive Schwellenintensität des Campbell-Stokes bei gegebenem Autographen und Standort keine Konstante ist. Infolge apparativer und meteorologischer Effekte sind die Werte schief verteilt. Eine Näherung durch einen Mittelwert über das ganze Jahr ist wohl möglich, jedoch für den Einzelwert mit einem relativ grossen Fehler behaftet.

Die in diesem Bericht ermittelten Werte sind deshalb exakt nur für diesen Apparatetyp und Standort gültig. Sie sind jedoch sicher auch auf die anderen in der Schweiz aufgestellten Campbell-Stokes übertragbar.

b) Vergleich mit dem automatischen Sonnenscheindauer-Messgerät

Die automatischen Sonnenscheindauermessgeräte sind gemäss WMO-Empfehlung in der Schweiz auf 200 W/m^2 eingestellt, d.h. falls die direkte Strahlung diese Intensitätsschwelle überschreitet, wird Sonne angezeigt (vgl. [7] und [8]).

Wie schon in der Einleitung erwähnt, ist ein direkter Schluss von der effektiven Ansprechschwelle des Campbell-Stokes auf die Einstellung der automatischen Geräte nicht möglich. Der Mittelwert des Campbell-Stokes von 268 W/m^2 aus Tabelle 4 (Jahresmittel zwischen Auf- und Untergängen) liegt, wie es zu erwarten war, über dem von der WMO empfohlenen Wert.

Der apparative Effekt des Ueberbrennens bei wechselhafter Bewölkung hat einen wesentlichen Einfluss auf die gemessene Sonnenscheindauer (CSt) und damit auf die Festlegung der mittleren Schwellenintensität.

Auch der Horizontverlauf hat eine Auswirkung auf die Festlegung der mittleren Schwellenintensität. Bei eingeengtem Horizont verkleinert sich der Einfluss der effektiven Ansprechschwelle am Morgen und Abend, da die Intensität der Sonne bei Ueberschreiten des Horizontes schon grösser als die Ansprechschwelle des Autographen ist (vgl. Abb. 6 und 7). Die Grösse der verschiedenen Einflüsse kann nur anhand längerer Vergleichsmessungen ermittelt werden. Eine homogene Fortsetzung der Sonnenscheindauerreihen mit dem Wechsel von Campbell-Stokes auf automatische Geräte wird kaum zu erreichen sein, da die Geräte grundsätzlich zu verschieden sind.

c) Berechnung von Strahlungsdaten

Für die Berechnung von mittleren monatlichen Summen der Global- und Diffusstrahlung auf eine Horizontalfläche aus Messungen der Sonnenscheindauer (CSt) ist es notwendig, die maximal mögliche Sonnenscheindauer für den entsprechenden Standort zu kennen.

Die maximal mögliche Sonnenscheindauer kann auf verschiedene Weise definiert werden:

- astronomisch mögliche Dauer für den Breitengrad
- Horizontausmessung (Tagebogen)
- maximal gemessene Dauer für jeden Tag des Jahres (Hüllkurve) (Bedingung: lange Messreihe)
- mit statistisch definierter Ansprechschwelle des Campbell-Stokes (vgl. Abschnitt 4.1)

Je nach Bezugszeit der Sonnenscheindauer-Auswertung und der Berechnungsmethode (Stundenwert, Tagessumme ...) hat die maximal mögliche Sonnenscheindauer einen unterschiedlichen Einfluss auf die berechnete Monatssumme der Strahlungsintensität.

Bezugszeit	Einfluss auf die berechnete Strahlungssumme
Stundenwerte	klein; nur auf Randstunden beschränkt
Tagessumme, Monatssumme	gross; nur bei Stationen mit gutem Horizontverlauf ausgeprägt

Für die Schweiz mit den zum Teil stark eingeengten Horizontverläufen ist es nicht sinnvoll, bei allen Stationen die gleiche Bezugsbasis, d.h. die astronomisch mögliche Dauer, zu wählen. Je nach Dauer der Messreihe und Art des Horizontverlaufes am Standort wird folgende maximale Sonnenscheindauer verwendet:

Horizont-verlauf / Messreihe	gut ($h < 3^o$)	stark eingeengt
lang	max. gemessene Dauer	max. gemessene Dauer
kurz	stat. definierte Ansprechschwelle des CSt	Horizontausmessung + max. gemessene Dauer

Die maximal mögliche Sonnenscheindauer mit statistisch definierter Ansprechschwelle des Campbell-Stokes (Σ 5%-Schwellenwert, d.h. $I_s \leq 145$ W/m^2) lässt sich berechnen, falls die Häufigkeitsverteilung der Trübung für eine Region bekannt ist.

Für das schweizerische Mittelland gilt folgende max. monatliche Sonnenscheindauer (in Std.) des Capmbell-Stokes bei mittleren Trübungsverhältnissen:

Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
258	271	345	379	432	439	442	394	353	316	265	246	4140

Literaturverzeichnis

1 Bider, M., 1958: Ueber die Genauigkeit der Registrierung des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes. Arch.Met.Geoph.Biokl. B, 9, 199-230.

2 Schmid, W., 1976: Aufbereitung und Qualitätskontrolle langjähriger Messunterlagen der Globalstrahlung und Himmelsstrahlung. Arbeitsberichte der Schweiz. Meteor. Zentralanstalt, Nr. 59.

3 Valko, P.,: Das kurzwellige Strahlungsfeld der Atmosphäre. Schweiz. Blätter für Heizung und Lüftung. 37: 24-32, 56-60, 115-119 (1970), 38: 121-126 (1971).

4 Valko, P., 1975: Bericht zuhanden des Amtes für Energiewirtschaft über die Auswertung meteorologischer Information zur Verwertung der Sonnenenergie im Rahmen des METEOPLAN-Projekts.

5 Schüepp, M., 1962: Sonnenscheindauer. Klimatologie der Schweiz 3/1.

6 Robinson, N., 1966: Solar Radiation. Elsevier Publ. Comp.

7 Joss, J.: Mündliche und schriftliche Mitteilungen.

8 Joss, J.: Strahlungsmessgrössen der automatischen ANETZ-Stationen. Vortrag für die Tagung der Schweiz. Gesellschaft für Geophysik vom 8.10.1977. Bern.