



**Berichte des Deutschen Wetterdienstes**

**175**

**Globalbeleuchtungsstärke während der Dämmerung**

von  
Klaus Dehne  
Uwe Bergholter  
Fritz Kasten



Zitationsvorschlag:

Dehne, Klaus; Bergholter, Uwe; Kasten, Fritz: Globalbeleuchtungsstärke während der Dämmerung. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1988. (Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 175)

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](http://www.dwd.de)

Mail: [bibliothek@dwd.de](mailto:bibliothek@dwd.de)

# Inhalt

Zusammenfassung / Abstract .....	5
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>7</b>
<b>2 Instrumentierung .....</b>	<b>8</b>
2.1 Meßkonzept .....	8
2.2 Meßfühler .....	8
2.3 Erfassung der Globalbeleuchtungsstärke-Werte .....	9
<b>3 Meßphase .....</b>	<b>9</b>
<b>4 Bewölkungsdaten .....</b>	<b>10</b>
<b>5 Daten der Globalbeleuchtungsstärke .....</b>	<b>11</b>
<b>6 Auswertung .....</b>	<b>12</b>
6.1 Allgemeines .....	12
6.2 Phasenweise Auswertung .....	13
6.3 Punktweise Auswertung .....	16
6.4 Parametrisierungsformeln .....	17
<b>7 Ergebnisse .....</b>	<b>17</b>
7.1 Globalbeleuchtungsstärke bei völlig wolkenlosen Dämmerungen .....	17
7.2 Globalbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit vom Gesamtbedeckungsgrad .....	19
7.3 Globalbeleuchtungsstärke bei hoher Bewölkung .....	21
7.4 Globalbeleuchtungsstärke bei mittelhoher (und hoher) Bewölkung .....	22
7.5 Globalbeleuchtungsstärke bei Stratocumulus-Bewölkung .....	24
7.6 Globalbeleuchtungsstärke bei Stratus-Bewölkung .....	26
7.7 Globalbeleuchtungsstärke bei Cumulus-Bewölkung .....	28
7.8 Globalbeleuchtungsstärke bei Cumulonimbus-Bewölkung .....	29
<b>8 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse .....</b>	<b>29</b>
8.1 Mittelwerte der Globalbeleuchtungsstärke .....	29
8.2 Streuung der Globalbeleuchtungsstärke innerhalb der Datenkollektive .....	31
<b>9 Schlußbemerkungen .....</b>	<b>33</b>
9.1 Verbesserungsvorschläge für künftige Messungen der Globalbeleuchtungsstärke während der Dämmerung .....	33
9.2 Genauigkeitsbetrachtungen für bestimmte Anwendungsfälle .....	34
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>36</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>37</b>
<b>Abbildungen .....</b>	<b>41</b>



## Zusammenfassung

Um die Globalbeleuchtungsstärke  $G_v$  während der Dämmerung und insbesondere ihre Abhängigkeit von der Bewölkung zu untersuchen, wurde am Flughafen Hamburg-Fuhlsbüttel vom Oktober 1984 bis Juli 1986 eine Dauermeßreihe mit einer automatischen Apparatur durchgeführt. Die Bewölkungsdaten wurden dabei aus den Aufnahmen einer Fischaugen-Kamera gewonnen, die anhand der Beobachtungstagebücher der Flugwetterwarte geprüft und ergänzt wurden.

Insgesamt wurden etwa 1200 Dämmungsphasen aufgenommen. Ein Teil dieser Phasen konnte Bewölkungsgruppen, die durch eine vorherrschende Wolkengattung und ein mittleres Bedeckungsgradintervall gekennzeichnet sind, zugeordnet werden. Aus den Datenkollektiven jeder Gruppe wurden der mittlere Verlauf der  $G_v$  während der Dämmerung als Funktion der Sonnenhöhe sowie die zugehörigen Standardabweichungen bzw. Variationskoeffizienten bestimmt. Zum Vergleich wurden ferner die auf die Sonnenhöhe  $-2,5^\circ$  normierte und die auf den wolkenlosen Fall bezogene sogenannte relative  $G_v$  dargestellt.

Die  $G_v$  bei wolkenloser Dämmerung wurde als Funktion der Sonnenhöhe parametrisiert. Zur Parametrisierung der  $G_v$  bei bewölktem Dämmerungshimmel wurde für jede Bewölkungsgruppe ein konstanter Faktor ermittelt, mit dem die Parametrisierungsfunktion für den wolkenlosen Fall zu multiplizieren ist.

Der Vergleich der Mittelwerte im wolkenlosen Fall mit den Werten von BULLRICH (1) ergab Abweichungen von etwa 70%, mit denen von FRIES und LINDENBEIN (2) dagegen weniger als 15%. Auch die Abhängigkeit der relativen  $G_v$  vom Gesamtbedeckungsgrad ähnelt der von Fries und Lindenbein.

## Abstract

In view of studying the incoming global radiation  $G_v$  during twilight and in particular its dependency on cloudiness a continuous measuring series was performed with an automatic device at the Hamburg-Fuhlsbüttel airport from October 1984 to July 1986. The data of cloudiness were derived from photographs taken with a fish-eye camera, quality controlled and supplemented with the aid of journals of observations of the aeronautical meteorological office.

Approximately 1200 phases of twilight were taken in total. Part of these phases could be attributed to groups of clouds marked by a predominant type of clouds and a mean interval of cloudiness. From the data sets of each group the average course of  $G_v$  during twilight as a function of solar altitude as well as standard deviations and/or variation coefficients were determined. Furthermore for comparison purposes the  $G_v$  standardized at  $-2.5^\circ$  solar altitude and the relative  $G_v$ , related to cloudless sky were represented.

The  $G_v$  in cloudless twilight was parameterized as a function of the solar altitude. For the parameterization of  $G_v$  in clouded twilight a constant factor was determined for each group of clouds. With this factor the parameterization function shall be multiplied in cases of cloudless sky.

A comparison of the average values of cloudless sky with the values of BULLRICH (1) revealed a deviation of approximately 70%, with those of FRIES and LINDENBEIN (2), however, less than 15%. The dependency of the relative  $G_v$  on the total cloudiness is similar to the one of Fries and Lindenbein.



## 1. EINLEITUNG

Mit "Dämmerung" bezeichnet man den Übergang zwischen "lichem" Tag und "dunkler" Nacht, also die Phasen abklingender oder ansteigender Himmels-helligkeit, die vom Sonnenuntergang bzw. -aufgang auf der einen Seite und dem Eintreten definierter Sichtbedingungen auf der anderen Seite be-grenzt sind.

Die Beleuchtung, die die Bodenfläche durch die Himmelshelligkeit erfährt, wird üblicherweise als Globalbeleuchtungsstärke gemessen; sie ist das photometrische Pendant zur Globalbestrahlungsstärke und ergibt sich de-finitionsgemäß aus den vom gesamten Himmelsgewölbe auf eine horizontale Ebene einfallenden Lichtströmen. Wie bereits in älteren Untersuchungen (siehe z.B. [1]) erkannt wurde und in neueren Arbeiten am Meteorologischen Institut der Freien Universität Berlin (z.B. [2]) gründlicher analysiert worden ist, hängt die Globalbeleuchtungsstärke während der Dämmerungsphase in erster Linie von der Sonnenhöhe und erst in zweiter Linie von der Be-wölkung und der atmosphärischen Trübung ab. Eine Abschätzung von Beleuch-tungsstärken auf Grund von genauer Zeitmessung und von routinemäßigen synoptischen Wolkenbeobachtungen sollte deshalb im Rahmen noch vorzuge-bender Unsicherheitsgrenzen aussichtsreich sein.

Das wetterdienstliche Interesse an der Verfügbarkeit solcher Schätzwerte entspringt der relativ häufigen Anforderung von aktuellen Werten der Dämmerungshelligkeit im Rahmen von Gerichtsgutachten. Hierbei handelt es sich vorwiegend um Verkehrsunfälle, bei denen die ausreichende Kraftfahr-zeugbeleuchtung in Frage gestellt wird, oder allgemein um die Prüfung von Aussagen über die Erkennbarkeit von Personen oder Objekten. Das Haupt-interesse besteht danach an den Beleuchtungsstärkewerten während der ersten Dämmerungsphase, der sogenannten bürgerlichen Dämmerung, die defi-nitionsgemäß endet, wenn man Druckschrift im Freien nicht mehr einwand-frei lesen kann; letzteres entspricht Beleuchtungsstärken von etwa 2 Lux, die im wolkenlosen Fall bei einer Sonnenhöhe von etwa  $-6^{\circ}$  erreicht werden, und fällt augenphysiologisch näherungsweise in die Phase, in der das Farbsehen zurückgeht.

Ziel der Arbeit war zu prüfen, ob die Globalbeleuchtungsstärke aus synoptischen Wolkenbeobachtungen mit ausreichender Genauigkeit ab-geschätzt werden kann. Hierbei wurden folgende Teilziele verfolgt:

- a) Gewinnung von statistisch auswertbarem Datenmaterial durch lang-fristige systematische Messungen der Globalbeleuchtungsstärke und Bewölkungsbeobachtungen.

- b) Darstellung der Abhängigkeit der Dämmerungs-Globalbeleuchtungsstärke von der Sonnenhöhe sowie von Wolkengattung und Bedeckungsgrad. Wenn möglich, Aufstellung von Parametrisierungsformeln.
- c) Berechnung von Standardabweichungen und Variationskoeffizienten zur Kennzeichnung der möglichen Streubreite um die Mittelwertkurven herum.

## 2. INSTRUMENTIERUNG

### 2.1 Meßkonzept

Gemäß der o.g. Zielsetzung wurde der Meßdatengewinnung folgendes Konzept zugrundegelegt:

- a) Die Globalbeleuchtungsstärke während der Dämmerungsphasen wird automatisch an der Flugwetterwarte Fuhlsbüttel gemessen, die relativ nahe zum MetObs Hamburg liegt, einen Meßplatz mit geringer Horizontabschattung besitzt und halbstündliche Wettermeldungen absetzt.
- b) Die Bewölkungsverhältnisse werden zwischen den routinemäßigen Stationsbeobachtungen durch automatische Himmelsphotographien dokumentiert.
- c) Die Meßanlage wird an drei Wochentagen regelmäßig gewartet.

### 2.2 Meßfühler

Als Globalbeleuchtungsstärkemesser wurde ein Meßgerät für Außenmontage (Version B) der Fa. Lichtmeßtechnik, Berlin, eingesetzt. Es ist wetterfest und besitzt eine Abtauvorrichtung, um die Glashaube über der Empfangsfläche schnee- und reiffrei zu halten. Der Meßbereich liegt zwischen 500 lx und 0,02 lx; er läßt sich ferngesteuert auf 50 lx bis 0,002 lx umschalten. Der Meßfühler hat sich im Feldeinsatz bewährt; die Zweitkalibrierung nach 2 Jahren ergab Abweichungen von weniger als 1% vom Erstkalibrierfaktor.

Zur photographischen Bewölkungsdokumentation wurde eine Fischaugenkamera der Fa. Olympus, Japan (Kamera DM-10 Quartz-Data mit Objektiv ZUIKO Auto-Fisheye 2,8/8 mm und DM-Winder) eingesetzt. Sie wurde in einem beheizten Wetterschutzgehäuse mit Plexiglashaube untergebracht und liefert ferngesteuert Himmelsaufnahmen mit Uhrzeit- und Tagesangabe. Die Aufnahmen weisen nur in Horizontnähe eine gewisse Winkelverzerrung auf (Abb. 1).

Kamera und Beleuchtungsstärkemesser wurden 85 m östlich vom Landebahnbeobachterhaus auf einem gemeinsamen Geräteträger in etwa 1,6 m über der Bodenfläche montiert (Abb. 2). Diesem Meßplatz wurde vor allem aus wartungstechnischen Gründen vor anderen der Vorzug gegeben, wobei der etwas höhere Störpegel durch die Flutlicht-Beleuchtung des 700 m südöstlich gelegenen Flughafen-Vorfeldes in Kauf genommen wurde.

### 2.3 Erfassung der Globalbeleuchtungsstärke-Werte

Die Meßwerterfassungsanlage bestand aus einem 6 1/2-stelligen Digitalmultimeter Typ 5000 der Fa. PREMA, Mainz, das die Meßwerte über 1 s integrierend registriert und damit die relativ hohen elektrischen Störimpulse im Flughafenbereich ausmitteln kann, sowie aus einem Heimcomputer Typ CBM 8032 SK mit Kassettenlaufwerk C2N zur Steuerung der Datenabfrage, Speicherung der Digitalwerte und Auslösung der automatischen Kamera.

Die Beleuchtungsstärke-Werte wurden so abgefragt, daß alle 20 s ein Meßwert erfaßt wird, wenn die Beleuchtungsstärken 550 lx unterschreiten und die Sonnenhöhe  $> -12^{\circ}$  ist. Die Himmelsaufnahmen (Farbdiapositive) wurden in den ersten Monaten des Meßbetriebs immer dann ausgelöst, wenn die Globalbeleuchtungsstärke um den Faktor 3 angestiegen oder abgefallen war. Später wurden die meisten Aufnahmen im Bereich 500 lx bis 100 lx ausgelöst, um den Bereich, in dem die Autofahrer die Fahrbahnbeleuchtung einschalten, dichter zu überdecken; es wurden - falls die Sonnenhöhe unter  $5^{\circ}$  lag - Aufnahmen jeweils 20 s nach denjenigen Abfragen ausgelöst, die erstmalig Beleuchtungsstärken unterhalb (oder oberhalb bei Morgendämmerung) der Schwellenwerte 500, 333, 224, 150, 100, 10, 1 lx ergaben. Der Zeitunterschied zwischen zwei Aufnahmen mußte mindestens 120 s betragen.

### 3. MESSPHASE

Die Datenmeßreihe in Fuhlsbüttel begann am 19. Oktober 1984 und endete am 31. Juli 1986. Während dieser Zeit fielen die Messungen der Beleuchtungsstärke an etwa 50 Tagen wegen technischer Störungen aus, Himmelsphotographien fehlen von etwa 4 Monaten. Das Datenerfassungsprogramm wurde über den gesamten Zeitraum nicht wesentlich verändert, abgesehen von der bereits unter 2.2 erwähnten Umstellung der Beleuchtungsstärkeschwellen für die Kameraauslösung.

Die Dauermeßreihe wurde von 4 Arbeitsroutinen begleitet:

- a) Wartungsroutine an der Meßstation: Jeweils montags, mittwochs und freitags; dabei Film- und Datenkassettenwechsel.
- b) Aufbereitungsroutine der Kassettenband-Daten:  
Auslesen der Daten in Listen mit Markierung der Meßpunkte, bei denen die Kamera ausgelöst wurde; Dokumentation der Dämmerungsverläufe für jeden Tag durch Plotdiagramme (logarithmische Auftragung der Globalbeleuchtungsstärke über der Sonnenhöhe, siehe Beispiel in Abb. 3).
- c) Erfassungsroutine von Daten der Flugwetterwarte (Wolken, Sicht, Wind, Wetter während der Dämmerungszeit): Erfassen der METAR-Daten (ergänzt durch SPEZI-Daten und im Falle von CAVOK auch durch SYNOP-Daten) in synop-ähnlichem Code auf Datenträgern in GRZ.
- d) Auswertung der Farbdiasitive nach Bedeckungsgraden verschiedener Wolkengattungen mit Hilfe eines Projektionsstandes.

#### 4. BEWÖLKUNGSDATEN

Die Bezugsdaten der Bewölkung in der Dämmerungsphase (zusammen mit Angaben über das aktuelle Wetter sowie Wind und Sichtweite) wurden den METAR- und SPEZI-Meldungen der Flugwetterwarte Fuhlsbüttel entnommen. Da METAR-Wetter halbstündlich (HH + 20 min und HH + 50 min) abgesetzt und bei Wetteränderungen durch SPEZI-Meldungen ergänzt werden, liegen mindestens 2, meist jedoch mehr Beobachtungen zu jeder Dämmerungsphase vor. SYNOP-Meldungen, die ja zu vollen Stunden abgesetzt werden, sind nur dann herangezogen worden, wenn CAVOK ("ceiling and visibility ok": keine Wolken unterhalb 5000 ft und Sichtweite > 10 km) gegeben wurde.

Die METAR- und SPEZI-Meldungen liefern nicht den Gesamtbedeckungsgrad, sondern den Teilbedeckungsgrad der untersten Wolkenschicht sowie die Teilbedeckungsgrade der zweiten und dritten Wolkenschicht, wenn diese mehr als 3/8 bzw. 5/8 betragen.

Der Gesamtbedeckungsgrad ließ sich relativ einfach aus den Himmelsphotographien abschätzen; dagegen konnten bei einer größeren Anzahl

von Photographien die Wolkenhöhen und damit die Wolkengattungen nur in Anlehnung an die METAR-Daten festgelegt werden. Es wurden 10 Wolkengattungen (Ci, Cc, Cs, Ac, As, Ns, Sc, St, Cu und Cb) und bis zu 4 Wolkenschichten bei einer Beobachtung ausgewertet. Auf die ursprünglich geplante Bewölkungsauswertung nach Himmelssektoren wurde verzichtet, da das Datenmaterial für eine statistische Auswertung zu klein ist.

In einer Reihe von Photographien waren die Bewölkungsverhältnisse nicht ausreichend identifizierbar. Sie wurden deshalb nicht berücksichtigt. Dies betrifft überwiegend die lichtschwachen Aufnahmen bei Beleuchtungsstärken  $\leq 1$  lx.

Beispiele von Himmelsphotographien für verschiedene Bewölkungstypen zeigt Abb. 4. Abb. 5 demonstriert die mögliche Variabilität der Bewölkung während einer Dämmerungsphase; im Falle solcher schnellziehenden begrenzten Wolkenfelder muß bei der Auswertung eine größere Streubreite in Kauf genommen werden.

Abb. 6 liefert am Beispiel des 25.04.85 einen Magnetbandausdruck mit den archivierten Bewölkungs- und Wetterdaten.

## 5. DATEN DER GLOBALBELEUCHTUNGSSTÄRKE

Insgesamt wurden Globalbeleuchtungsstärkewerte von 1203 Dämmerungsphasen gewonnen, wobei die Anzahl der Einzelmessungen einer Phase je nach Jahreszeit und Bewölkung etwa zwischen 225 und 600 liegt.

Der Verlauf der Beleuchtungsstärkewerte zwischen 500 lx und 0,05 lx innerhalb einer Phase ist für Beispiele des wolkenlosen, wolkigen und bedeckten Himmels im halblogarithmischen Maßstab über der Sonnenhöhe  $\gamma$  in Abb. 7 dargestellt. Der Verlauf gliedert sich - bei starker Verein-

fachung - in 3 Teile: einen schwach konvex gekrümmten Teil für  $\gamma \geq -2,5^\circ$ , einen linear abfallenden Teil für  $-2,5^\circ > \gamma \geq -6^\circ$  (bis  $-7^\circ$ ) und einen konkav gekrümmten Teil für  $\gamma < -6^\circ$  (bis  $-7^\circ$ ), der annähernd plateauförmig für  $\gamma < -10^\circ$  ausläuft. Der Verlauf des letzten Teils ist hauptsächlich durch die Rückstreuung der Flughafen-vorfeld-Beleuchtung bedingt, die mit zunehmender atmosphärischer Trübung und abnehmender Wolkenhöhe ansteigt, gelegentlich auch durch die Mondbeleuchtung ( $< 0,7 \text{ lx}$  nach [1]). Durch Bewölkung bekommt der "glatte" Verlauf der wolkenlosen Dämmerungsbeleuchtungsstärke Strukturen mit relativen Maxima und Minima sowie - im Falle hoher Bedeckungsgrade bei dickeren Wolken - gleichzeitig eine geringere Steigung, so daß die 500 lx-Grenze bei Sonnenhöhen  $> 0^\circ$  erreicht wird. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wird die obere Beleuchtungsstärkegrenze für die Dämmerung mit 500 lx angenommen; es werden gelegentlich auch Meßwerte über Tage erfaßt, z.B. wenn dicke Cb-Bewölkung den Himmel verdunkelt.

## 6. AUSWERTUNG

### 6.1 Allgemeines

Ziel der Auswertung der Globalbeleuchtungsstärke-Meßwerte  $G_V$  ist die statistische Bestimmung von Mittelwerten  $\overline{G_V}$  mit den zugehörigen Standardabweichungen SD in Abhängigkeit von der astronomischen Sonnenhöhe  $\gamma$  und der Bewölkung (Bedeckungsgrad N, Wolkengattung C).

Die astronomische Sonnenhöhe  $\gamma$  ist der Höhenwinkel des Sonnenmittelpunktes über bzw. unter dem Horizont ohne Berücksichtigung der Refraktion der Sonnenstrahlen in der Atmosphäre, die bei Sonnenauf- und -untergang und normaler Schichtung der Atmosphäre rund  $0,5^\circ$  beträgt. Die Verwendung von  $\gamma$  (statt der beobachteten Sonnenhöhe) als Parameter hat den Vorteil, daß  $\gamma$  eindeutig aus geographischer Breite, Datum und Uhrzeit berechnet werden kann. Zur statistischen Auswertung wurden alle  $G_V$ -Werte Sonnenhöhen-Intervallen von  $(1/8)^\circ$  zugeordnet. Die Intervallmitten liegen bei  $\gamma = 0,0625^\circ \pm m \cdot 0,125^\circ$  (m: ganze Zahl); dadurch

liegen 8 Intervalle stets zwischen zwei aufeinanderfolgenden ganzzahligen Höhenwinkeln.

Die Bewölkungsparameter liegen unregelmäßiger und in einer wesentlich geringeren zeitlichen Dichte vor. Der Zeitpunkt der wetterdienstlichen Beobachtungen ist teils an die Uhrzeit (METAR), teils an den Wetterablauf (SPEZI) gebunden. Die photographische Bewölkungsdokumentation ist, wie in Abschn. 2.3 angegeben, an Lux-Schwellenwerte gekoppelt. Durch die möglichen Kombinationen von Wolkengattung und Bedeckungsgrad, wobei mehrere Schichten übereinanderliegen können, ergibt sich eine Vielzahl von Parametergruppen. Es wurden z. B. neben dem wolkenlosen Fall 48 unterschiedliche Parametergruppen mit 1-Schicht-Bewölkung, 473 mit 2-Schicht-, 391 mit 3-Schicht- und 18 mit 4-Schichtbewölkung archiviert. Eine Zusammenfassung von Bedeckungsgrad-Intervallen und Wolkengattungen ist angesichts des vorliegenden Meßmaterials notwendig, um statistisch zuverlässige Auswertungsergebnisse zu erhalten (siehe Abschn. 6.2 und 6.3).

Die Auswertung des Meßmaterials kann "phasenweise" oder "punktweise" erfolgen. Bei der phasenweisen Auswertung werden alle Bewölkungsangaben innerhalb einer Dämmerungsphase nach vorgegebenen Kriterien geprüft und bewölkungstypische Phasen-Gruppen gebildet, die dann getrennt statistisch ausgewertet werden. Bei der punktweisen Auswertung dagegen werden diejenigen  $G_v$ -Werte, für die aktuelle Bewölkungsangaben vorliegen, herausgezogen und dann in bewölkungstypische Gruppen eingeteilt.

## 6.2 Phasenweise Auswertung

### 6.2.1 Festlegung von bewölkungstypischen Dämmerungsphasen

Die folgenden Kriterien zur Festlegung von Gruppen von Dämmerungsphasen mit nahezu gleicher Bewölkung stellen einen Kompromiß dar zwischen feiner Trennung nach Bedeckungsgraden (bei gleichzeitiger Annahme hoher zeitlicher Konstanz der Bewölkung) einerseits und ausreichender statistischer Belegung der Gruppen andererseits:

- a) Mindestens 80% aller Bewölkungsangaben einer Dämmerungsphase gehören zu einer einzigen vorgegebenen Wolkengattung.
- b) Die mittleren quadratischen Abweichungen vom Mittelwert  $\bar{N}$  aller Bedeckungsgradmeldungen einer Dämmerungsphase überschreiten nicht die folgenden Grenzwerte  $g$ :

$$\begin{aligned}
 g &= 1 && \text{für } \bar{N} < 0,5, \\
 g &= 2 && \text{" } 0,5 \leq \bar{N} < 2,5, \\
 g &= 3 && \text{" } 2,5 \leq \bar{N} < 5,5, \\
 g &= 2 && \text{" } 5,5 \leq \bar{N} < 7,5, \\
 g &= 1 && \text{" } \bar{N} \geq 7,5, \\
 g &= 2 && \text{für weitere (höhere) Wolkenschichten.}
 \end{aligned}$$

Durch die Bedingung a) werden alle die Dämmerungsphasen von der Auswertung ausgeschlossen, in denen sich die Wolkengattung während längerer Zeitintervalle verändert; Bedingung b) grenzt die Variation des Bedeckungsgrades ein, wobei im mittleren Bereich die Grenzwerte höher liegen, um den Fall durchziehender kleinräumiger Wolkenfelder mitzuerfassen.

Zur Auswertung wurden Phasen mit gleicher Wolkengattung zu Klassen zusammengefaßt, deren mittlerer Bedeckungsgrad den Intervallen angehört, die im Kriterium b) genannt sind; diese Klassen  $\Delta N_i$  werden im folgenden durch 0; 12; 35; 67; 8 abgekürzt gekennzeichnet.

Die wolkenlosen Dämmerungsphasen sind von besonderer Bedeutung, da sie Referenzwerte liefern, auf die die Mittelwerte der bewölkten Phasen bezogen werden.

Um sich einen ersten Überblick zu verschaffen, sind die Phasen zunächst nach Gesamtbedeckungsgraden gruppiert und ausgewertet worden.

### 6.2.2 Absolutwerte der Globalbeleuchtungsstärke $G_V(\Delta N_i; C_k; \gamma)$

Für jede Gruppe von Dämmerungsphasen - repräsentiert durch das Bedeckungsgrad-Intervall  $\Delta N_i$  und die Wolkengattung  $C_k$  - werden in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe Mittelwerte der Globalbeleuchtungsstärke  $\overline{G_V}(\Delta N_i; C_k; \gamma)$  und die zugehörige Standardabweichung bestimmt und in Listen zusammengestellt.

In einem halblogarithmischen Diagramm werden die Dämmerungsverläufe aller Phasen der Gruppe punktmäßig in  $(1/8)^\circ$ -Schritten (siehe Abschn. 6.1) eingetragen, wobei - um das Überdrucken von Meßpunkten zu vermeiden - die rechteckigen Felder von  $(1/8)^\circ$  Abzissen-Breite und einer 6-prozentigen Lux-Änderung nur mit einem einzigen Kreuzpunkt beschrieben werden. In das sogenannte Punkte-"Band" wird die Mittelwert-Kurve eingezeichnet, die oberhalb und unterhalb durch die Kurven der Standardabweichung flankiert wird.

(Durch das Abschneiden aller Meßwerte  $> 500$  lx ergibt sich für den Sonnenhöhenbereich  $\gamma > -1^\circ$  im allgemeinen ein verfälschter, abgeflachter Verlauf der genannten Kurven!)

Um ein Maß für die relative Streubreite der Daten innerhalb der Gruppen zu gewinnen, werden die Variationskoeffizienten (= Standardabweichung/Mittelwert)  $V(\Delta N_i; C_k; \gamma)$  listenmäßig als Funktion der Sonnenhöhe bestimmt und graphisch dargestellt.

### 6.2.3 Relative und normierte Globalbeleuchtungsstärke

Zur Bestimmung des Einflusses der Bewölkung auf den Dämmerungsverlauf der Globalbeleuchtungsstärke der einzelnen Gruppen werden die jeweiligen Mittelwertkurven  $\overline{G_V}(\Delta N_i; C_k; \gamma)$  zur Mittelwertkurve des wolkenlosen Himmels  $\overline{G_V}(0; \gamma)$  ins Verhältnis gesetzt:

$$r(\Delta N_i; C_k; \gamma) = \overline{G_V}(\Delta N_i; C_k; \gamma) / \overline{G_V}(0; \gamma). \quad (1)$$

Die r-Werte werden tabelliert und graphisch in die zugehörigen Diagramme der Absolutverläufe eingetragen.

Ferner werden normierte Globalbeleuchtungsstärken berechnet, die auf den jeweiligen  $G_V$ -Wert bei der Sonnenhöhe  $\gamma = -2,5^\circ$  in derselben Dämmerungsphase bezogen sind:

$$n(\Delta N_i; C_k; \gamma) = G_V(\Delta N_i; C_k; \gamma) / G_V(\Delta N_i; C_k; -2,5^\circ). \quad (2)$$

Die Bezugssonnenhöhe wurde auf  $-2,5^\circ$  festgelegt, weil im allg. bei diesem  $\gamma$  der relativ glatte Verlauf der  $G_V$ -Kurven beginnt. Der Bezugswert wird aus Meßwerten zwischen  $\gamma = -2^\circ$  und  $-3^\circ$  durch Regressionsrechnung bestimmt. Die Kurven  $n(\Delta N_i; C_k; \gamma)$  werden für jede Gruppe  $(\Delta N_i; C_k)$  in einem halblogarithmischen Diagramm über der Sonnenhöhe  $\gamma$  aufgetragen. An der Spreizung der Kurvenverläufe oberhalb und unterhalb  $\gamma = -2,5^\circ$  läßt sich ablesen, wie die Steigungen der einzelnen Verläufe divergieren.

### 6.3 Punktweise Auswertung

#### 6.3.1 Festlegung des $G_V(N_i; C_k; \gamma)$ -Datenfeldes

Das von Dämmerungsphasen unabhängige Datenfeld, geordnet nach Sonnenhöhe und Bewölkungsparametern  $N_i$  und  $C_k$ , enthält a) alle Einzelwerte von  $G_V$ , für die eine zeitgleiche Bewölkungsangabe vorliegt, sowie b) weitere 6  $G_V$ -Werte, von denen jeweils 3 unmittelbar vor bzw. nach dem unter a) genannten Einzelwert liegen.

Es wird also angenommen, daß sich innerhalb einer Minute vor und nach der Bewölkungsbeobachtung die Bewölkung nicht geändert hat. Der Bedeckungsgrad  $N_i$  ist in  $(1/8)$ -Schritte unterteilt;  $C_k$  umfaßt die 10 in Abschn. 4. genannten Wolkengattungen.

#### 6.3.2 Dämmerungsverlauf der Globalbeleuchtungsstärke

Die absoluten  $G_V$ -Werte werden für jede Bewölkungsgruppe  $(N_i; C_k)$  zu einem Dämmerungsverlauf zusammengesetzt. Die Auswertung nach Mittelwerten und zugehörigen mittleren Standardabweichungen sowie deren Darstellung erfolgt wie in Abschn. 6.2.2.

## 6.4 Parametrisierungsformeln

Die Aufstellung von Parametrisierungsformeln  $\overline{G}_{v,p}$  zur näherungsweise mathematischen Darstellung der Abhängigkeit der Mittelwerte der Globalbeleuchtungsstärke  $\overline{G}_v(\Delta N_i; C_k; \gamma)$  von der Sonnenhöhe  $\gamma$  basiert auf der Formel  $\overline{G}_{v,p}(0; \gamma)$  für den wolkenlosen Fall, die - wie im Zwischenbericht 1985 angegeben - mit dem Ansatz

$$\log[\overline{G}_{v,p}(0; \gamma)/lx] = A + B \cdot \cos[15 \cdot (1^\circ - \gamma)]$$

parametrisiert wird. Für die bewölkten Fälle ergeben sich Parametrisierungsformeln durch Multiplikation von  $\overline{G}_{v,p}(0; \gamma)$  mit Formelausdrücken  $r_p(\Delta N_i; C_k; \gamma)$ :

$$\overline{G}_{v,p}(\Delta N_i; C_k; \gamma) = \overline{G}_{v,p}(0; \gamma) \cdot r_p(\Delta N_i; C_k; \gamma). \quad (3)$$

Die  $r_p(\Delta N_i; C_k; \gamma)$  stellen also Parametrisierungsformeln der relativen mittleren Globalbeleuchtungsstärke  $r(\Delta N_i; C_k; \gamma)$  (siehe Gl.(1)) dar.

## 7. ERGEBNISSE

### 7.1 Globalbeleuchtungsstärke bei völlig wolkenlosen Dämmerungen

Der Auswertung lagen 54 durchgängig wolkenlose Dämmerungsphasen zugrunde. Abb. 8 zeigt gemäß Abschn. 6.2.2 die halblogarithmische Darstellung aller Dämmerungsphasen mit der Mittelwertkurve  $\overline{G}_v(0; \gamma)$  und SD-Kurven. Es ergibt sich ein Kurvenschar-"Band", aus dem nur eine Kurve im Bereich um  $\gamma = 0^\circ$  deutlich ausscheidet; die Breite des Bandes wird auf unterschiedlichen Lufttrübungen während der Dämmerungsphasen zurückführt. Die Auffächerung der Kurven im Störbereich der Flughafenbeleuchtung (und des Mondlichts!) für  $\gamma < -10^\circ$  erstreckt sich über eine Ordinaten-Intervallbreite, die von gleicher Größenordnung wie im steilen Teil des Bandes ist. In der linienförmigen Punktanordnung zeigt sich die digitale Auflösung der Meßwerte (Meßbereichsgrenze: 0,03 lx). Die Mittelwertkurve ist auswertbar zwischen  $\gamma = -1^\circ$  und  $-8^\circ$ .

Den Gang des Variationskoeffizienten  $V(0;\gamma)$  zeigt Abb. 9. Er steigt von 0,15 bei  $\gamma = -1^\circ$  bis auf 0,30 bei  $-4^\circ$  an und erreicht dann ein relatives Minimum von 0,15 bei  $\gamma = -8,5^\circ$ . Die normierten Globalbeleuchtungsstärkewerte  $n(0;\gamma)$ , dargestellt in Abb. 10, liefern im Vergleich zu dem "Band" der Absolutwerte in Abb. 8 eine geringere Breite, wobei oberhalb  $\gamma = -2,5^\circ$  die Spreizung der Kurven stärker ist als unterhalb. Die Mehrzahl der in Abb. 8 dargestellten Kurven besitzt danach nahezu gleiche Steigungen und ist nur um unterschiedliche Beträge von  $\Delta\gamma$  gegen die Mittelwert-Kurve verschoben.

Die punktweise Auswertung der  $G_V$ -Werte liefert ein durchbrochenes Kurven-Band mit einer "unruhigen" Mittelwertkurve (siehe Abb. 11).

Die Parametrisierungsformeln der Mittelwertkurven nach Abb. 8 und Abb. 11 unterscheiden sich nur geringfügig:

Bei Auswertung nach Dämmerungsphasen:

$$\log[\overline{G_{V,p}}(0;\gamma)/lx] = 0,928 + 1,941 \cdot \cos[15(1^\circ - \gamma)]. \quad (4)$$

Bei Auswertung nach Meßpunkten:

$$\log[\overline{G_{V,p}}(0;\gamma)/lx] = 0,931 + 1,958 \cdot \cos[15(1^\circ - \gamma)]. \quad (5)$$

Die gute Approximation der Mittelwertkurve  $\overline{G_V}(0;\gamma)$  durch Formel (4) demonstriert das Diagramm in Abb. 12.

Einen Vergleich mit den Mittelwertkurven von K. Bullrich ([1], siehe auch Tab. 84 in Met. Taschenbuch Teil II (1970)) und Fries u. Lindenbein [2] zeigt Abb. 13. Die Bullrich-Kurve liegt rund 40 % niedriger (entsprechend einer Sonnenhöhen-Verschiebung der gesamten  $\overline{G_V}(0;\gamma)$ -Kurve um etwa  $0,5^\circ$ ); die Abweichungen von der F.u.L.-Kurve betragen im Sonnenhöhen-Bereich  $-3^\circ$  bis  $-5,5^\circ$  wenige Prozent, wachsen dann aber mit steigender Sonnenhöhe auf etwa -15 % bei  $\gamma = -1,5^\circ$  an.

## 7.2 Globalbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit vom Gesamtbedeckungsgrad

### 7.2.1 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $\bar{N} < 0,5$ (Klasse 0)

Die Globalbeleuchtungsstärkekurven von 51 Dämmerungsphasen der Klasse 0 ergeben eine Kurvenschar, deren Mittelwerte und Variationskoeffizienten (siehe Abb. 14) sich von den entsprechenden Werten der durchgängig wolkenlosen Phasen (siehe Abschn. 7.1) nur im Rahmen der Meßgenauigkeit unterscheiden.

### 7.2.2 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $0,5 \leq \bar{N} < 2,5$ (Klasse 12)

Der Auswertung lagen 72 Dämmerungsphasen zugrunde. Die Mittelwertkurve ist derjenigen vom wolkenlosen Fall zwischen  $\gamma = -1^\circ$  und  $-8^\circ$  sehr ähnlich, so daß der Faktor  $r_p(12;\gamma) = 1$  gesetzt werden kann (s. Gl.(3)):

$$\bar{G}_{v,p}(12;\gamma) = \bar{G}_{v,p}(0;\gamma). \quad (6)$$

Die Variationskoeffizienten (siehe Abb. 14) verlaufen abgeflachter und erreichen im Maximum nur etwa 0,25.

### 7.2.3 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $2,5 \leq \bar{N} < 5,5$ (Klasse 35)

Es lagen 70 Dämmerungsphasen der Auswertung zugrunde. Die Variationskoeffizienten (siehe Abb. 14) bewegen sich zwischen 0,2 bei  $\gamma = -1^\circ$  über ein sehr breites Maximum von 0,28 zurück auf 0,15 bei  $\gamma = -8,5^\circ$ .  $n(35;\gamma)$  in Abb. 15 zeigt eine Zunahme der Spreizung der Einzelkurven im Vergleich zum wolkenlosen Fall. Die relative Globalbeleuchtungsstärke  $r(35;\gamma)$  verläuft im Sonnenhöhen-Intervall  $-1^\circ$  bis  $-8^\circ$  zwischen 0,86 und 0,80. Die Parametrisierungsformel lautet deshalb mit ausreichender Genauigkeit:

$$\bar{G}_{v,p}(35;\gamma) = 0,83 \cdot \bar{G}_{v,p}(0;\gamma). \quad (7)$$

### 7.2.4 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $5,5 \leq \bar{N} < 7,5$ (Klasse 67)

Es lagen 70 Dämmerungsphasen der Auswertung zugrunde. Die Streuung der Absolutkurven  $G_v$  in Abb. 16 und auch der normierten Kurven  $n$  in Abb. 17 ist erheblich stärker als bei den geringeren Bedeckungsgraden,

besonders im Bereich  $\gamma > 0^\circ$ . Die Variationskoeffizienten (siehe Abb. 14) besitzen zwischen  $\gamma = -1^\circ$  und  $-6^\circ$  ein breites Plateau von 0,5; das Minimum bei  $\gamma = -8,5^\circ$  liegt bei 0,23.

Die Werte von  $r(67;\gamma)$  liegen deutlich unter denjenigen für die niedrigeren Bedeckungsgrade. Das Plateau der Kurve (siehe Abb. 16) zwischen  $\gamma = -1^\circ$  und  $-5^\circ$  findet man bei 0,40; die Werte steigen mit weiter abfallendem  $\gamma$  an und erreichen 0,77 bei  $\gamma = -8^\circ$ .

Als angenäherte Parametrisierungsformel im Bereich  $-1^\circ > \gamma > -7^\circ$  wird vorgeschlagen:

$$\overline{G}_{v,p}(67;\gamma) = 0,45 \cdot \overline{G}_{v,p}(0;\gamma). \quad (8)$$

#### 7.2.5 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $7,5 \leq \bar{N}$ (Klasse 8)

Die Auswertung basiert auf 64 Dämmerungsphasen. Die Fluktuation der Absolutkurven (siehe Abb. 18) ist vergleichbar mit der in Abb. 16, jedoch liegen die Absolutwerte etwa um den Faktor 2 niedriger. Der auswertbare Bereich beginnt deshalb bereits bei  $\gamma = +1^\circ$  und endet bei  $\gamma = -7^\circ$ . Die Variationskoeffizienten (siehe Abb. 14) laufen in diesem Sonnenhöhen-Intervall von 0,4 über das Maximum von 0,6 zum Minimum von 0,25.

Die Kurve von  $r(8;\gamma)$  besitzt eine wannenähnliche Gestalt und verläuft im oben genannten Sonnenhöhenbereich zwischen 0,19 und 0,46. Als angenäherte Parametrisierungsformel wird vorgeschlagen:

$$\overline{G}_{v,p}(8;\gamma) = 0,3 \cdot \overline{G}_{v,p}(0;\gamma). \quad (9)$$

Eine genauere Parametrisierung liefert die Formel:

$$\overline{G}_{v,p}(8;\gamma) = 0,19 \cdot [1 + 0,049 \cdot (\gamma + 3^\circ) + 0,509 \cdot (\gamma + 3^\circ)^2] \cdot \overline{G}_{v,p}(0;\gamma). \quad (10)$$

### 7.3 Globalbeleuchtungsstärke bei hoher Bewölkung

Hohe Bewölkung ohne tiefere Wolkenschichten wurde während der Meßperiode fast ausschließlich nur als Cirrus beobachtet. Cirrostratus und Cirro-Cumulus traten häufig in Kombination mit Alto-Bewölkung auf (siehe Abschn. 7.4).

#### 7.3.1 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $0,5 \leq \bar{N} < 2,5$ (Gruppe (12;Ci))

Es wurden 46 Dämmerungsphasen mit Ci-Bewölkung ausgewertet. Wie beim Gesamtbedeckungsgrad sind auch hier die  $G_V$ -Verläufe und damit die Mittelwert-Kurve denjenigen des wolkenlosen Falls sehr ähnlich (siehe Abb. 19). Die  $r(12;Ci;\gamma)$ -Kurve bestätigt dies im  $\gamma$ -Bereich  $-1^\circ$  bis  $-8^\circ$ . Als Parametrisierungsformel gilt folglich:

$$\overline{G}_{V,p}(12;Ci;\gamma) = \overline{G}_{V,p}(0;\gamma). \quad (11)$$

Die Variationskoeffizienten (siehe Abb. 20) gleichen im Plateauanstieg bei  $\gamma = -1^\circ$  und im Minimum bis  $\gamma = -9^\circ$  den "wolkenlosen" Werten; das Maximum bei  $\gamma = -4^\circ$  ist auf 0,24 abgeplattet.

#### 7.3.2 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $2,5 \leq \bar{N} < 5,5$ (Gruppe (35;Ci))

Die Auswertung von 34 Dämmerungsfällen liefert verglichen mit den Ergebnissen in Abschn. 7.3.1 eine leicht abgesenkte Mittelwertkurve (siehe Abb. 21) sowie eine Zunahme der Streuung der Meßwerte, die sich besonders auffällig bei den Variationskoeffizienten im  $\gamma$ -Bereich  $-2^\circ$  bis  $-5^\circ$  zeigt (siehe Abb. 20). Letztere liegen oberhalb 0,3 und erreichen Spitzenwerte von 0,45. Die Spreizung der normierten Kurven  $n(35;Ci;\gamma)$  (Abb. 22) hat nur in den  $\gamma$ -Randbereichen merklich zugenommen. Die  $G_V$ -Verläufe der punktwweisen Datenauswertung für 4/8 und 5/8 Ci (siehe Abb. 23) lassen die Streuung der Werte auch bei höherer Auflösung des Bedeckungsgrads erkennen.

Die Parametrisierungsformel für diesen Bewölkungsfall lautet, da  $r(35;C_i;\gamma)$  im  $\gamma$ -Bereich  $-1^\circ$  bis  $-8^\circ$  zwischen 0,88 und 0,92 liegt:

$$\overline{G}_{V,p}(35;C_i;\gamma) = 0,90 \cdot \overline{G}_{V,p}(0;\gamma). \quad (12)$$

### 7.3.3 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $5,5 \leq \bar{N} < 7,5$ (Gruppe (67;C<sub>i</sub>))

Es lagen nur 5 Dämmerungsfälle für dieses Intervall vor. Der  $\overline{G}_V$ -Verlauf in Abb. 24 besitzt also keine statistische Relevanz. Mit eingeschränkter Genauigkeit sollte die folgende Parametrisierungsformel gelten:

$$\overline{G}_{V,p}(67;C_i;\gamma) = 0,75 \cdot \overline{G}_{V,p}(0;\gamma). \quad (13)$$

Für den mittleren Bedeckungsgrad  $\geq 7,5$  lagen nur Werte von 1 Dämmerungsfall (mit C<sub>s</sub>-Bewölkung) vor, der hier nicht vorgestellt wird.

## 7.4 Globalbeleuchtungsstärke bei mittelhoher (und hoher) Bewölkung

Nur eine geringe Anzahl von Dämmerungsfällen mit mittelhoher Bewölkung wurden gefunden. Relativ häufig trat die Kombination von AcAs mit CiCsCc  $> 3/8$  auf.

### 7.4.1 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $0,5 \leq \bar{N} < 2,5$ (Gruppe (12;AcAs))

Ohne gleichzeitige hohe Bewölkung lagen nur 4 Dämmerungsfälle mit AcAs vor. Sie liefern  $r_p = 1$ ; eine statistische Auswertung von Streubreiten ist nicht möglich.

AcAs-Bewölkung mit CiCs-Bewölkung  $> 3$  wurde für 11 Dämmerungsfälle gefunden. Abb. 25 zeigt den Verlauf der  $\overline{G}_V$ -Kurven und von  $r$ ; letzterer variiert im  $\gamma$ -Bereich  $-1^\circ$  bis  $-7^\circ$  nur zwischen 0,79 und 0,83.

Als Parametrisierungsformel läßt sich deshalb ansetzen:

$$\overline{G}_{V,p}(12;AcAs + (CiCs > 3);\gamma) = 0,81 \cdot \overline{G}_{V,p}(0;\gamma). \quad (14)$$

Der Gang der Variationskoeffizienten (siehe Abb. 26) startet bei  $\gamma = -1^{\circ}$  mit einem Plateau bei 0,22; das Maximum bei  $-4^{\circ}$  ist nur schwach ausgeprägt; im Minimum bei  $-9^{\circ}$  sind die Werte auf 0,12 abgefallen.

#### 7.4.2 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $2,5 \leq \bar{N} < 5,5$ (Gruppe (35;AcAs))

Es lagen 4 Dämmerungsfälle mit reiner AcAs-Bewölkung vor. Die r-Werte verlaufen im  $\gamma$ -Bereich  $-1^{\circ}$  bis  $-7^{\circ}$  zwischen 0,83 und 0,74. Die zugehörige Parametrisierungsformel (ohne statistische Absicherung) lautet:

$$\overline{G}_{V,p}(35;AcAs;\gamma) = 0,78 \cdot \overline{G}_{V,p}(0;\gamma). \quad (15)$$

9 Fälle von AcAs mit gleichzeitiger CiCs-Bewölkung von  $N > 3$  ergeben die im oberen Teil stärker streuenden  $G_V$ -Verläufe in Abb. 27, r variiert jedoch im  $\gamma$ -Bereich  $-1^{\circ}$  bis  $-7^{\circ}$  nur zwischen 0,62 und 0,56. Als Parametrisierungsformel kann daher näherungsweise angesetzt werden:

$$\overline{G}_{V,p}(35;AcAs + (CiCs > 3);\gamma) = 0,59 \cdot \overline{G}_{V,p}(0;\gamma). \quad (16)$$

Der Gang der Variationskoeffizienten zeigt zwischen  $\gamma = -1^{\circ}$  und  $-7^{\circ}$  einen schwachen, fast linearen Abfall von 0,32 auf 0,26; im Minimum bei  $\gamma = -8^{\circ}$  wird 0,1 erreicht (siehe Abb. 26).

#### 7.4.3 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $5,5 \leq \bar{N} < 7,5$ (Gruppe (67;AcAs))

Die 6 Dämmerungsfälle mit ausschließlicher AcAs-Bewölkung liefern, wie Abb. 28 zeigt, stärker streuende  $G_V$ -Kurven. Dies schlägt sich auch in der Spreizung der normierten Kurven n in Abb. 29 nieder. Eine statistische Auswertung der Streuung ist nicht sinnvoll.

Die relative Globalbeleuchtungsstärke  $r$  variiert im  $\gamma$ -Bereich von  $-1^\circ$  bis  $-7^\circ$  zwischen 0,29 und 0,45. Die zugehörige Parametrisierungsformel (ohne statistische Absicherung) lautet dann:

$$\overline{G}_{v,p}(67;AcAs;\gamma) = 0,35 \cdot \overline{G}_{v,p}(0;\gamma). \quad (17)$$

Dämmerungsfälle mit AcAs-Bedeckungsgraden  $> 7,5$  wurden nicht beobachtet.

### 7.5 Globalbeleuchtungsstärke bei Stratocumulus-Bewölkung

Es werden hier nur die Dämmerungsphasen mit ausschließlicher Sc-Bewölkung behandelt, da die Anzahl der Mischbewölkungsfälle statistisch unergiebig ist.

#### 7.5.1 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $0,5 \leq \bar{N} < 2,5$ (Gruppe (12;Sc))

Die Auswertung von 21 Dämmerungsfällen ergibt eine  $G_v(\gamma)$ -Kurvenschar, die sich wenig vom wolkenlosen Fall unterscheidet. Dementsprechend ist  $r_p = 1$ , und die Parametrisierungsformel lautet:

$$\overline{G}_{v,p}(12;Sc;\gamma) = \overline{G}_{v,p}(0;\gamma). \quad (18)$$

Auch der Gang der Variationskoeffizienten ähnelt dem des wolkenlosen Falls, jedoch liegen die Werte etwas niedriger: Sie steigen von 0,15 bei  $\gamma = -1^\circ$  auf den Maximalwert 0,28 bei  $\gamma = -5^\circ$  und fallen auf das Minimum von 0,19 bei  $\gamma = -8^\circ$  ab (siehe Abb. 30).

#### 7.5.2 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $2,5 \leq \bar{N} < 5,5$ (Gruppe (35;Sc))

Von den 21 Dämmerungsfällen weicht, wie Abb. 31 für die Absolutwerte  $G_v$  und Abb. 32 für die normierten Werte  $n$  zeigt, nur eine Kurve auffällig von dem Kurvenbündel ab. Die Variationskoeffizienten steigen von 0,21 bei  $\gamma = -1^\circ$  auf 0,31 bei  $\gamma = -5^\circ$  an und fallen auf 0,15 bei  $\gamma = -8,5^\circ$  ab (siehe Abb. 30).

Die relative Globalbeleuchtungsstärke  $r$  variiert im  $\gamma$ -Bereich  $-1^\circ$  bis  $-7^\circ$  zwischen 0,80 und 0,73. Als Parametrisierungsformel kann verwendet werden:

$$\overline{G}_{v,p}(35;Sc;\gamma) = 0,76 \cdot \overline{G}_{v,p}(0;\gamma). \quad (19)$$

### 7.5.3 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $5,5 \leq \bar{N} < 7,5$ (Gruppe (67;Sc))

Die 38 Dämmerungsfälle enthalten eine Reihe von streuenden  $G_v$ -Kurven, die sich in Abb. 33 erwartungsgemäß auf der Bündelseite zu den größeren Sonnenhöhen zeigen. Die entsprechend "unruhige" Spreizung der normierten Kurven ist Abb. 34 zu entnehmen.

Der Verlauf des Variationskoeffizienten beginnt bei  $\gamma = -1^\circ$  mit einem hohen Plateau, dessen Werte zwischen 0,51 und 0,60 schwanken und ab  $\gamma = -4^\circ$  fast linear auf den Minimalwert 0,24 bei  $\gamma = -7^\circ$  abfallen (siehe Abb. 30).

Die Relativwerte variieren im  $\gamma$ -Bereich  $-1^\circ$  bis  $-7^\circ$  zwischen 0,44 und 0,59. Die Parametrisierungsformel lautet:

$$\overline{G}_{v,p}(67;Sc;\gamma) = 0,50 \cdot \overline{G}_{v,p}(0;\gamma). \quad (20)$$

### 7.5.4 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $N \geq 7,5$ (Gruppe (8;Sc))

Mit nur 16 Dämmerungsfällen ergibt sich in Abb. 35 bei den Absolutkurven ein wenig divergierendes Kurvenbündel. Der auswertbare  $\gamma$ -Bereich liegt zwischen  $0^\circ$  und  $-6^\circ$ . Die Relativwerte haben einen wannenförmigen Verlauf und variieren zwischen 0,7 und 0,29, wobei sich das Plateau auf einer Höhe von 0,3 von  $-1^\circ$  bis  $-5^\circ$  erstreckt. Die Parametrisierungsformel im Plateaubereich lautet also:

$$\overline{G}_{v,p}(Sc;\gamma) = 0,30 \cdot \overline{G}_{v,p}(0;\gamma). \quad (21)$$

Die Variationskoeffizienten steigen von 0,38 bei  $\gamma = 0^\circ$  auf 0,47 bei  $-2,7^\circ$  an und erreichen das Minimum von 0,26 bei  $-6^\circ$  (siehe Abb. 30).

## 7.6 Globalbeleuchtungsstärke bei Stratus-Bewölkung

Die Anzahl der Dämmerungsfälle stieg mit den Bedeckungsgrad-Klassen von 1 auf 37 an. Fälle von Mischbewölkung lagen nur mit Sc-Bewölkung ( $\bar{N} > 4$ ) vor.

### 7.6.1 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $0,5 \leq \bar{N} < 2,5$ (Gruppe (12;St))

Ein Dämmerungsfall ohne Mischbewölkung und vier Fälle mit gleichzeitiger Sc-Bewölkung ( $\bar{N} > 4$ ) wurden erfaßt.

Abb. 36 erlaubt, die Absolutwerte der stark streuenden Einzelkurven im Falle der Mischbewölkung zu verfolgen. Die Kurven der zugehörigen normierten Werte in Abb. 37 zeigen im Mittelteil eine nur geringe Spreizung wegen des parallelen Verlaufs der Absolutwertkurven. Der auswertbare  $\gamma$ -Bereich liegt zwischen  $+1^{\circ}$  und  $-6^{\circ}$ . Das Plateau der wannenförmigen Relativwert-Kurve liegt bei 0,3, wie im Fall des Sc-bedeckten Himmels (siehe Abschn. 7.5.4).

### 7.6.2 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $2,5 \leq \bar{N} < 5,5$ (Gruppe (35;St))

Auch für dieses Bedeckungsgradintervall ergaben sich mehr Dämmerungsfälle mit als ohne zusätzliche Sc-Bewölkung. Die 4 "reinen" Fälle zeigen als Absolutwertkurven in Abb. 38 - wie in Abb. 31 für Sc-Wolken - einen wenig gestreuten Verlauf. Die normierten Werte steigen dagegen zwischen  $\gamma = -1^{\circ}$  und  $-7^{\circ}$  näherungsweise monoton von 0,72 auf 0,83 an.

Das Kurvenbild der Absolutwerte für die 8 Dämmerungsphasen mit zusätzlicher Sc-Bewölkung in Abb. 39 weist stärkere Fluktuationen auf. Die wannenförmige Relativwert-Kurve verläuft im Bereich zwischen  $\gamma = -1^{\circ}$  und  $-6^{\circ}$  zwischen 0,30 und 0,40. In grober Näherung könnte

als Parametrisierungsformel (ohne statistische Absicherung) dienen:

$$\overline{G}_{v,p}(35;St + (Sc > 4);\gamma) = 0,32 \cdot \overline{G}_{v,p}(0;\gamma). \quad (22)$$

Die Variationskoeffizienten (siehe Abb. 40) streuen - wie allein schon wegen der geringen statistischen Belegung zu erwarten ist - sehr stark.

#### 7.6.3 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $5,5 \leq \bar{N} < 7,5$ (Gruppe (67;St))

Es wurden 17 Dämmerungsfälle ohne und nur einer mit Sc-Bewölkung erfaßt.

Die Absolutwertkurven  $G_v$  in Abb. 41 lassen einige Fälle mit besonders niedriger und dicker Bewölkung erkennen. Der auswertbare  $\gamma$ -Bereich liegt zwischen  $0^\circ$  und  $-6^\circ$ .

Die Relativkurve  $r$  besitzt zwischen  $\gamma = -1^\circ$  und  $-5^\circ$  ein Plateau-Wert von 0,50, der bei  $-6^\circ$  auf 0,62 angestiegen ist.

Zur näherungsweisen Parametrisierung kann folgende Formel dienen:

$$\overline{G}_{v,p}(67;St;\gamma) = 0,50 \cdot \overline{G}_{v,p}(0;\gamma). \quad (23)$$

Der Gang der Variationskoeffizienten steigt von 0,41 bei  $\gamma = 0^\circ$  auf 0,53 bei  $\gamma = -4^\circ$  an und erreicht sein Minimum von 0,35 bei etwa  $-6,5^\circ$  (siehe Abb. 40).

#### 7.6.4 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $\bar{N} \geq 7,5$ (Gruppe (8;St))

Die 37 Dämmerungsfälle ergeben ein breites Band von Absolutwertkurven (siehe Abb. 42), deren Mittelwerte zwischen  $\gamma = 0^\circ$  und  $-6^\circ$  auswertbar sind. Die normierten Kurven  $n$  in Abb. 43 zeigen eine relativ starke Spreizung, sogar auch im  $\gamma$ -Bereich  $-3^\circ$  bis  $-5^\circ$ . Der Plateau-Wert der Relativwert-Kurve liegt zwischen  $\gamma = -1^\circ$  und  $-5^\circ$  bei 0,28 und ist bei  $-6^\circ$  auf 0,37 angestiegen. Als Parametrisierungsformel wird näherungsweise angesetzt:

$$\overline{G}_{v,p}(8;St;\gamma) = 0,28 \cdot \overline{G}_{v,p}(0;\gamma). \quad (24)$$

Die relativ hohen Variationskoeffizienten besitzen einen nur noch schwach strukturierten Verlauf. Er steigt zwischen  $\gamma = 0^\circ$  und  $-3,5^\circ$  von 0,55 auf 0,62 an und fällt dann auf den Minimalwert von 0,50 bei  $-6,5^\circ$  zurück (siehe Abb. 40).

#### 7.7 Globalbeleuchtungsstärke bei Cumulus-Bewölkung

Es wurden nur wenige Dämmerungsphasen festgestellt, deren Cumulus-Bewölkungskonstellation den Kriterien in Abschn. 6.2.1 genügte. Dies gilt zunehmend mit ansteigendem Bedeckungsgrad. Die punktweise Auswertung lieferte im Fall der Cumulus-Bewölkung vergleichsweise mehr Meßpunkte.

##### 7.7.1 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $0,5 \leq \bar{N} < 2,5$ (Gruppe (12;Cu))

Abb. 44 zeigt den enggebündelten Verlauf der Absolutwertkurven von 5 Dämmerungsphasen. Die zugehörige Relativkurve verläuft oberhalb von 1 (im Mittel: 1,07).

Mit gleichzeitiger hoher und mittelhoher Bewölkung lagen weitere 5 Dämmerungsphasen vor. Das zugehörige Kurvenbündel in Abb. 45 ist etwas breiter; die Relativkurve steigt im  $\gamma$ -Bereich  $-1^\circ$  bis  $-7^\circ$  von 0,85 auf 0,95 an.

Die Ergebnisse der punktweisen Auswertung in Abb. 46 für  $N = 1$  bzw. 2 liefern augenscheinlich Meßpunkte mit stärkerer Streuung. Die starke Fluktuation der zugehörigen Relativ-Kurven unterstreicht, daß für eine statistische Auswertung das Datenmaterial zu gering ist.

##### 7.7.2 Mittlerer Bedeckungsgrad im Intervall $2,5 \leq \bar{N} < 5,5$ (Gruppe (35;Cu))

Die zwei erfaßten Dämmerungsfälle ergeben, wie in Abb. 47 eingetragen, eine Relativkurve, die zufälligerweise um den Wert 1,0 pendelt. Die punktweise ausgewerteten Meßwerte für  $N = 3$  ergeben eine Relativkurve, die - wie erwartet - um etwa 0,7 schwankt.

## 7.8 Globalbeleuchtungsstärke bei Cumulonimbus-Bewölkung

Dämmerungsphasen mit beständiger Cb- oder Ns-Bewölkung wurden nicht erfaßt. Auch die punktweise Auswertung liefert nur wenige, statistisch nicht auswertbare Fälle.

## 8. ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG DER ERGEBNISSE

Im folgenden werden nur die Ergebnisse der "phasenweisen" Auswertung (siehe Abschn. 6.2) berücksichtigt, da die "punktweise" gewonnenen Ergebnisse (siehe Abschn. 6.3) angesichts der relativ geringen Anzahl von Bewölkungsbeobachtungen - wie an einigen Beispielen gezeigt - zu lückenhaft sind. Ferner werden nur Ergebnisse betrachtet, die auf mindestens 15 Dämmerungsfällen beruhen.

### 8.1 Mittelwerte der Globalbeleuchtungsstärke

#### 8.1.1 Wolkenloser Fall

Auf der Basis von 54 Dämmerungsphasen wurde die Mittelwertkurve  $\overline{G}_V(0; \gamma)$  (siehe Abb. 13) bestimmt, die sich durch die Formel (4) parametrisieren läßt:

$$\log[\overline{G}_{V,p}(0; \gamma)/lx] = 0,93 + 1,94 \cdot \cos[15(1^\circ - \gamma)]. \quad (\text{Für } -1^\circ > \gamma > -8^\circ). \quad (4)$$

Dieses Ergebnis wird auch durch die 51 Dämmerungsphasen mit nicht durchgängig wolkenlosem Himmel ( $\overline{N} < 0,5$ ) gestützt. Um den Bereich der starken Meßwertverfälschung durch künstliche Lichtquellen abzugrenzen, ist als unterer Sonnenhöhen-Grenzwert die Sonnenhöhe angegeben, bei der der Abstand zwischen der Kurve und einer Tangente im Punkt für  $\gamma = -4,5^\circ$  gerade noch innerhalb der zugehörigen Standardabweichungen liegt.

Die Berliner Mittelwertkurve nach [2] zeigt größere Abweichungen (bis zu -15%) nur für  $\gamma > -3^\circ$ ; die Bullrich Kurve [1] liegt durchgängig

um etwa 40 % niedriger. Im ersten Fall könnten Unterschiede in den Meßgeräten, aber auch der Stadtdunst und das geringere Meßdatenkollektiv eine Rolle spielen; die Abweichungen liegen stets innerhalb der Standardabweichung.

### 8.1.2 Bewölkter Fall

Eine ausreichende statistische Belegung ist nur bei den Datenkollektiven für die Stratocumulus- und die Gesamtbewölkung sowie für einige Bedeckungsgrad-Klassen der Cirrus- und Stratus-Bewölkung gegeben.

Da die Quotienten aus den Mittelwerten  $\overline{G}_V(\Delta N_i; C_k; \gamma)$  und den entsprechenden wolkenlosen Werten  $\overline{G}_V(0; \gamma)$  im Bereich von  $\gamma = -1^\circ$  bis  $\gamma \approx -7^\circ$  ( $-6^\circ$ ) eine näherungsweise plateauförmige Kurve ergeben, kann man die Mittelwertkurven im bewölkten Fall durch konstante Faktoren  $r_p$  gemäß der Beziehung beschreiben:

$$\overline{G}_{V,p}(\Delta N_i; C_k; \gamma) = r_p \cdot \overline{G}_{V,p}(0; \gamma). \quad (3)$$

Dies bedeutet, daß die Mittelwertkurven der Globalbeleuchtungsstärke bei Bewölkung in der logarithmischen Darstellung zu der entsprechenden wolkenlosen Kurve nur parallel verschoben sind.

Die so gewonnenen  $r_p$ -Werte der mittleren relativen Globalbeleuchtungsstärke sind in der nachstehenden Tab. 1 für die einzelnen Bedeckungsgradklassen zusammengestellt. (In Klammern: Anzahl der zugrunde liegenden Dämmerungsphasen).

Tab. 1: Mittlere relative Globalbeleuchtungsstärken  $r_p$  (und Anzahl der ausgewerteten Dämmerungsphasen) für verschiedene Bedeckungsgradklassen und Wolkengattungen

$\Delta N_i$ $C_k$	$0,5 \leq N < 2,5$ (Klasse 12)	$2,5 \leq N < 5,5$ (Klasse 35)	$5,5 \leq N < 7,5$ (Klasse 67)	$N \geq 7,5$ (Klasse 8)
gesamt	1,0 (72)	0,83 (70)	0,45 (70)	0,30 (64)
Ci	1,0 (46)	0,90 (34)	-	-
Sc	1,0 (21)	0,76 (21)	0,50 (38)	0,30 (16)
St	-	-	0,50 (17)	0,28 (37)

In Abb. 48 sind die  $r_p$ -Werte von Tab. 1 über den Mitten der Bedeckungsgradintervalle aufgetragen. Bei den hohen und niedrigen Bedeckungsgraden sind die  $r_p$ -Werte nahezu identisch. Im mittleren Bereich liegen die  $r_p$ -Werte zwischen 0,76 (Sc) und 0,90 (Ci); aber selbst dieser Unterschied von etwa 16 % ist im Vergleich zur Größe der statistischen Schwankungen (siehe Abschn. 8.2.2) relativ gering. Entsprechende  $r_p$ -Werte, die aus den Berliner Tabellenwerten in [2] abgeleitet wurden, weichen nur wenig von den Hamburger  $r_p$ -Werten ab, wenn für  $N = 8$  der (c)-Wert in Abb. 48 als verbindlich angenommen wird, der in [2] durch eine 20 %-Korrektur bestimmt wurde.

Zusätzlich ist in Abb. 48 die mittlere relative Globalbestrahlungsstärke außerhalb der Dämmerung ( $\gamma > 5^\circ$ ) nach [3] eingetragen; sie liegt im mittleren N-Bereich rund 20 % über der relativen Globalbeleuchtungsstärke während der Dämmerung, die für niedrige Bewölkung und  $N \geq 4$  nahezu linear mit dem Bedeckungsgrad abfällt.

## 8.2 Streuung der Globalbeleuchtungsstärke innerhalb der Datenkollektive

### 8.2.1 Wolkenloser Fall

Die Randkurven der Schar von Einzelkurven (siehe Abb. 8) weichen um den Faktor  $\pm 2$  von der Mittelwertkurve ab. Die Einzelkurven unterscheiden sich im  $\gamma$ -Bereich  $-1^\circ$  bis  $-7^\circ$  hauptsächlich durch konstante Faktoren, so daß die normierten Kurven  $n(0;\gamma)$  relativ wenig divergieren; deren Randkurven unterscheiden sich um weniger als  $\pm 20$  % (siehe Abb. 10).

Die Variationskoeffizienten im  $\gamma$ -Bereich  $-1^\circ$  bis  $-8^\circ$  liegen zwischen 0,15 und 0,30, die relative Schwankungsbreite der Berliner Meßwerte in [2] ist von der gleichen Größenordnung. Zur Deutung des breiten Maximums bei etwa  $\gamma = -4^\circ$  könnte angenommen werden, daß die Dunstschichten in etwa 9 km Höhe, die dann von der Sonne gerade noch beschienen werden, besonders stark variieren, oder daß es bei dieser Sonnenhöhe eine besonders wirksame Abhängigkeit der Refraktion vom Atmosphärenzustand gibt.

### 8.2.2 Bewölkter Fall

Die Streuung des Verlaufs der Einzelkurven nimmt mit wachsendem Bedeckungsgrad zu. Dies sollte wesentlich auf die großen Schwankungen der Wolkendicken bei niedriger Bewölkung, die für hohe Bedeckungsgrade dominiert, zurückzuführen sein. Die Randkurven der Kurvenscharen weichen um Faktoren bis zu  $\pm 5$  von der Mittelwertkurve ab (siehe z.B. Abb. 33). Im ersten Dämmerungsabschnitt findet man bei wechselnder Bewölkung größerer Schichtdicke relative Maxima und Minima, die aus dem "Band" der Kurvenschar noch hinausragen. Die Einzelkurven streuen in ihrer Neigung relativ stark, wobei besonders bei höheren Bedeckungsgraden von dickeren Wolken die Kurven im Bereich  $\gamma > -2,5^\circ$  flacher oder steiler verlaufen je nachdem, ob die Strahlung der tiefstehenden Sonne durch Wolken abgeschattet oder reflektiert wird.

Die maximalen Variationskoeffizienten im Falle der verschiedenen Wolkengattungen und Bedeckungsgradklassen und die zugehörigen Sonnenhöhen  $\gamma_{\max}$  sind in Tab. 2 zusammengestellt. (Eingeklammerte Sonnenhöhen kennzeichnen ein breites Maximum). Für die beiden unteren Bedeckungsgradklassen sind die  $V_{\max}$  im allg. niedriger als im wolkenlosen Fall; die breiteren Maxima bedeuten aber, daß für  $\gamma > \gamma_{\max}$  höhere Variationskoeffizienten vorliegen, bedingt durch die mögliche Schwächung bzw. Verstärkung der Beleuchtungsstärke je nach Wolkenkonstellation. Für die beiden oberen Bedeckungsgradklassen ergeben sich deutlich höhere, teilweise doppelt so hohe  $V_{\max}$ -Werte wie im wolkenlosen Fall. Der übliche Abfall der Variationskoeffizienten auf ein relatives Minimum im  $\gamma$ -Bereich von  $-7^\circ$  bis  $-9^\circ$  deutet einen abnehmenden Einfluß der Bewölkungskonstellation auf die Globalbeleuchtungsstärke an, wenn die Sonnenhöhe unter  $-5^\circ$  sinkt. Im Falle des Stratus-bedeckten Himmels ist dieser Abfall nur schwach ausgebildet.

Tab. 2: Maximale Variationskoeffizienten  $V_{\max}$  der Globalbeleuchtungsstärke und zugehörige Sonnenhöhen  $\gamma_{\max}$  für verschiedene Wolkengruppen

$C_k \backslash \Delta N_i$	$0,5 \leq N < 2,5$ (Klasse 12)		$2,5 \leq N < 5,5$ (Klasse 35)		$5,5 \leq N < 7,5$ (Klasse 67)		$N \geq 7,5$ (Klasse 8)	
	$V_{\max}$	$\gamma_{\max}$	$V_{\max}$	$\gamma_{\max}$	$V_{\max}$	$\gamma_{\max}$	$V_{\max}$	$\gamma_{\max}$
gesamt	0,25	(-4° bis -5°)	0,28	(-4°)	0,52	Plateau	0,62	-4°
Ci	0,24	(-4°)	0,45	-3° bis -4°	-	-	-	-
Sc	0,28	-4° bis -5°	0,31	-4° bis -5°	0,60	(-2°)	0,47	-3°
St	-	-	-	-	0,54	-4° bis -5°	0,61	Plateau

## 9. SCHLUßBEMERKUNGEN

### 9.1 Verbesserungsvorschläge für künftige Messungen der Globalbeleuchtungsstärke während der Dämmerung

Nach der Bewertung der Ergebnisse in Kapitel 8 sind weitere Globalbeleuchtungsstärke-Messungen erwünscht, um in mehr Bewölkungsfällen eine statistisch gesicherte Auswertung zu erzielen. Zur Verfeinerung der Ergebnisse wird empfohlen:

- a) Unterteilung der wolkenlosen Dämmerungsfälle nach Sichtweiten- oder Trübungsangaben.
- b) Verlegung der oberen Meßwertgrenze auf etwa 1000 lx zur korrekten Bestimmung der Mittelwertkurve auch für Sonnenhöhen um 0°.
- c) Erhöhung der Anzahl der Wolkenbeobachtungen auf etwa 18 pro Dämmerungsphase (Photoauslösung zu vollen oder halben Graden der Sonnenhöhe), vor allem, um die Daten besser punktweise auswerten zu können.
- d) Gliederung der Wolkenbeobachtungen nach Himmelssektoren (z.B. sonnenzu- und-abgewandte Himmelshälften).

## 9.2 Genauigkeitsbetrachtungen für bestimmte Anwendungsfälle

- a) Verlangt der Anwendungsfall, daß für die aktuelle Bewölkungskonstellation ein typischer Globalbeleuchtungsstärkewert aus wetterdienstlichen Routinebeobachtungen abzuleiten ist, so wird nach einem statistischen Mittelwert gefragt, der nach der Gl. (3) zu bestimmen ist:

$$\overline{G_{v,p}}(\Delta N_i; C_k; \gamma) = r_p(\Delta N_i; C_k; \gamma) \cdot \overline{G_{v,p}}(0; \gamma). \quad (3)$$

Die Unsicherheit dieses Wertes resultiert dann

- aus der Abweichung der beobachteten  $(\Delta N_i; C_k)$ -Werte von den Bewölkungs-Parametern, für die  $\overline{G_{v,p}}$ -Formeln vorliegen,
- aus der möglicherweise noch unzureichenden statistischen Absicherung der  $\overline{G_{v,p}}$ -Formeln,
- aus möglichen Fehlabschätzungen der Bewölkung unter Dämmerungsbedingungen,
- aus apparativen Meßfehlern,
- aus dem Rückgriff zu einer zeitversetzten und/oder an einem anderen Ort vorgenommenen Wolkenbeobachtung ("Ersatz-Beobachtung"),
- aus einer ungenauen Zeitmessung.

Die ersten 3 Fehlerquellen liefern, wenn man die Variation der  $r_p$ -Faktoren in Abb. 48 betrachtet, eine Meßunsicherheit unter  $\pm 15 \%$ ; der Beitrag der apparativen Fehler liegt sicherlich unter  $+ 5 \%$ . Beim Rückgriff auf eine "Ersatz-Wolkenbeobachtung" sind bei stark wechselnder Bewölkung im Extremfall Unsicherheiten von  $\pm 150 \%$  möglich, da im Mittel die Globalbeleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel um den Faktor 3 kleiner ist als für den wolkenlosen Himmel.

Sehr wichtig ist auch die genaue Zeitangabe, denn für die Ausgangsgröße  $\overline{G_{v,p}}(0; \gamma)$  muß die Sonnenhöhe aus der Tageszeit berechnet werden. In der Dämmerungsphase entspricht z.B. in Hamburg während der Äquinoktien ein Zeitunterschied von 1 min etwa einer  $50 \%$ -Änderung der Globalbeleuchtungsstärke.

- b) Wenn nicht typische, sondern aktuelle Beleuchtungsstärkewerte zu bestimmen sind, die mit aktuellen Bewölkungsverhältnissen korrespondieren, sind zusätzlich zu den Punkten unter a) die Angaben über die Streubreite der Beleuchtungsstärke-Meßwerte in die Genauigkeitsbetrachtung einzubeziehen. Es hängt vom Anwendungsfall ab, ob die Variationskoeffizienten (entsprechend dem Vertrauensniveau 68 %) oder die "doppelten" Variationskoeffizienten (entsprechend dem Vertrauensniveau von 95 %) oder auch die relativen maximalen Streubreiten in Rechnung gestellt werden müssen. Beim Bezug auf das Vertrauensniveau 95 % bedeutet dies eine zusätzliche Schätzunsicherheit von mindestens  $\pm 30 \%$  und maximal  $\pm 120 \%$  (siehe  $V(\gamma)$ -Diagramme und Tab. 2). Im Falle der relativen maximalen Streubreite, die im allg. mit der Größe des Datenkollektivs wächst, sind im ungünstigsten Fall hoher Bedeckungsgrade dicker Wolken Unsicherheiten in der Größenordnung von  $\pm 500 \%$  zu erwarten.
- c) Die Beleuchtungsstärken, die senkrechte Flächen während der Dämmerung empfangen, sind abhängig von der Azimutrichtung der Flächennormale; im allgemeinen weist der sonnenseitige Himmelsbereich größere Leuchtdichten auf als der sonnenabgewandte. Eine Abschätzung dieser Werte aus der Globalbeleuchtungsstärke ist nur für einige Fälle des gleichmäßig bedeckten Himmels möglich.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [ 1 ] Bullrich, K.(1948): Die Leuchtdichte des Himmels und die Globalbeleuchtungsstärke während der Dämmerung und in der Nacht. Ber. Deutsch. Wetterd. US-Zone Nr. 4.
  
- [ 2 ] Fries, B.; Lindenbein, B.(1982): Zum quantitativen Zusammenhang zwischen Dämmerungshelligkeit und Bewölkung. Meteor. Rundschau 35, 165-170.
  
- [ 3 ] Kasten, F.(1983): Parametrisierung der Globalstrahlung durch Bedeckungsgrad und Trübungsfaktor. Ann. Meteor. (N.F.) Nr. 20, 49-50.

Abb. 1:	2 Testaufnahmen von Streifen mit Feldern gleicher Größe zur Kontrolle der Winkelverzerrung durch Fischaugenobjektiv der Olympus-Kamera	41
Abb. 2:	Geräteträger mit Beleuchtungsstärkemeßgerät (links) und Fischaugenkamera im Wetterschutzgehäuse (rechts). Im Hintergrund: Landebahnbeobachterhaus	41
Abb. 3:	Tagesplot der Datenkontrollroutine (Beispiel vom 31.03.86) mit logarithmischer Auftragung der Globalbeleuchtungsstärke während der Morgendämmerung (linke Kurve) und Abenddämmerung	42
Abb. 4:	Beispiel von Himmelsphotographien während der Dämmerung bei unterschiedlicher Bewölkung (a): wolkenlos (b): wolkig: Altocumulus mit Stratocumulus (c): wolkig: Cumulus mit Stratocumulus (d): bedeckt: Stratocumulus	43
Abb. 5:	Kurzzeitige Variabilität der Bewölkung während der Abenddämmerung vom 20.10.84. Folge von 6 Photographien (a) bis (f)	44
Abb. 6:	Ausdruck aus Archivband mit Bewölkungs- und Wetterdaten vom 25.04.85 für Hamburg-Fuhlsbüttel	45
Abb. 7:	Beispiele von Globalbeleuchtungsstärke-Kurven in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe für wolkenlosen (25.11.84), wolkigen (21.10.84) und bedeckten (19.10.84) Himmel	46
Abb. 8:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(0; \gamma)$ bei wolkenlosem Himmel	47
Abb. 9:	Variationskoeffizienten der Globalbeleuchtungsstärke bei wolkenlosem Himmel	47
Abb.10:	Normierte Globalbeleuchtungsstärke bei wolkenlosem Himmel $n(0; \gamma)$	48
Abb.11:	Wie Abb. 8, aber nach punktwaiser Auswertung des Datenmaterials	48
Abb.12:	Vergleich der Mittelwertkurve $\overline{G_V}(0; \gamma)$ aus Abb. 8 mit Rechenergebnissen der Parametrisierungsformel (4)	49

Abb. 13:	Vergleich von $\overline{G_V(0;\gamma)}$ mit entsprechenden Kurven für den wolkenlosen Fall nach K. Bullrich [1] und Fries & Lindenbein [2]	49
Abb. 14:	Variationskoeffizienten für 5 Gesamtbedeckungsgradklassen	50
Abb. 15:	Normierte Globalbeleuchtungsstärke $n(35;\gamma)$ für Gesamtbedeckungsgradklasse $\Delta N = 35$	50
Abb. 16:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(67;\gamma)$ mit Relativkurve $r(67;\gamma)$ für Gesamtbedeckungsgradklasse $\Delta N = 67$	51
Abb. 17:	Normierte Globalbeleuchtungsstärke $n(67;\gamma)$ für Gesamtbedeckungsgradklasse $\Delta N = 67$	51
Abb. 18:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(8;\gamma)$ für Gesamtbedeckungsgradklasse $\Delta N = 8$	52
Abb. 19:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(12;C_i;\gamma)$ für $C_i$ -Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 12$	53
Abb. 20:	Variationskoeffizienten für $C_i$ -Bewölkung	53
Abb. 21:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(35;C_i;\gamma)$ für $C_i$ -Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 35$	54
Abb. 22:	Normierte Globalbeleuchtungsstärke $n(35;C_i;\gamma)$ für $C_i$ -Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 35$	54
Abb. 23:	Wie Abb. 21, aber nach punktwiser Auswertung des Datenmaterials für $N = 4$ (a) und $N = 5$ (b)	55
Abb. 24:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(67;C_i;\gamma)$ für $C_i$ -Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 67$	56
Abb. 25:	Globalbeleuchtungsstärke für AcAs-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 12$ (mit $C_i C_s$ -Bedeckungsgrad $> 3$ )	56
Abb. 26:	Variationskoeffizienten für AcAs-Bewölkung	57
Abb. 27:	Globalbeleuchtungsstärke für AcAs-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 35$ (mit $C_i C_s$ -Bedeckungsgrad $> 3$ )	57

Abb. 28:	Globalbeleuchtungsstärke für $G_V(67;AcAs;\gamma)$ AcAs-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 67$	58
Abb. 29:	Normierte Globalbeleuchtungsstärke $n(67;AcAs;\gamma)$ für AcAs-Bedeckungsgrad- klasse $\Delta N = 67$	58
Abb. 30:	Variationskoeffizienten für Sc-Bewölkung	59
Abb. 31:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(35;Sc;\gamma)$ für Sc-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 35$	60
Abb. 32:	Normierte Globalbeleuchtungsstärke $n(35;Sc;\gamma)$ für Sc-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 35$	60
Abb. 33:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(67;Sc;\gamma)$ für Sc-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 67$	61
Abb. 34:	Normierte Globalbeleuchtungsstärke $n(67;Sc;\gamma)$ für Sc-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 67$	61
Abb. 35:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(8;Sc;\gamma)$ für Sc-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 8$	62
Abb. 36:	Globalbeleuchtungsstärke für St-Be- deckungsgradklasse $\Delta N = 12$ (mit Sc- Bedeckungsgrad $> 4$ )	63
Abb. 37:	Normierte Globalbeleuchtungsstärke für St-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 12$ (mit Sc-Bedeckungsgrad $> 4$ )	63
Abb. 38:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(35;St;\gamma)$ für St-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 35$	64
Abb. 39:	Wie Abb. 38, aber zusätzlich mit Sc-Bewölkung ( $\Delta N > 4$ )	64
Abb. 40:	Variationskoeffizienten für St-Bewölkung	65
Abb. 41:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(67;St;\gamma)$ für St-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 67$	65
Abb. 42:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(8;St;\gamma)$ für St-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 8$	66
Abb. 43:	Normierte Globalbeleuchtungsstärke $n(8;St;\gamma)$ für St-Bedeckungsgrad- klasse $\Delta N = 8$	66

Abb. 44:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(12;Cu;y)$ für Cu-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 12$	67
Abb. 45:	Wie Abb. 44, aber zusätzlich mit hoher und mittelhoher Bewölkung	67
Abb. 46:	Wie Abb. 44, aber nach punktwaiser Auswertung für $N = 1$ (a) und $N = 2$ (b)	68
Abb. 47:	Globalbeleuchtungsstärke $G_V(35;Cu;y)$ für Cu-Bedeckungsgradklasse $\Delta N = 35$	69
Abb. 48:	Abhängigkeit der parametrisierten relativen Globalbeleuchtungsstärke $r$ vom Bedeckungsgrad $N$ sowie ent- sprechende aus [2] abgeleitete Werte. Zum Vergleich: Mittlere relative Globalbestrahlungsstärke am Tage nach [3]	69

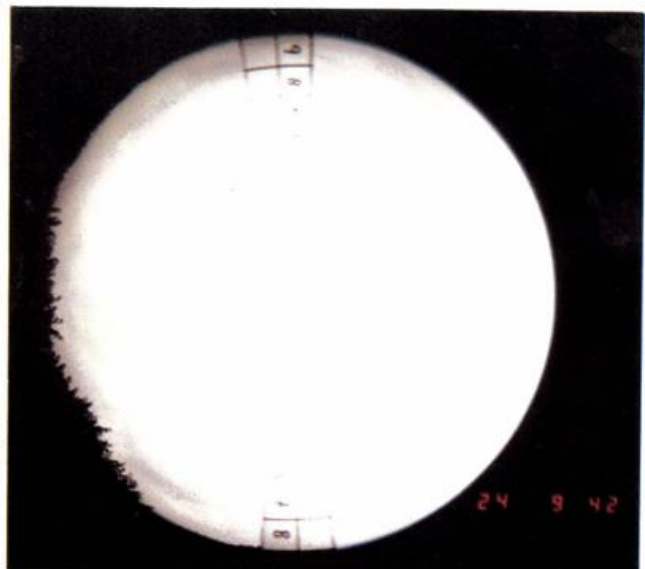
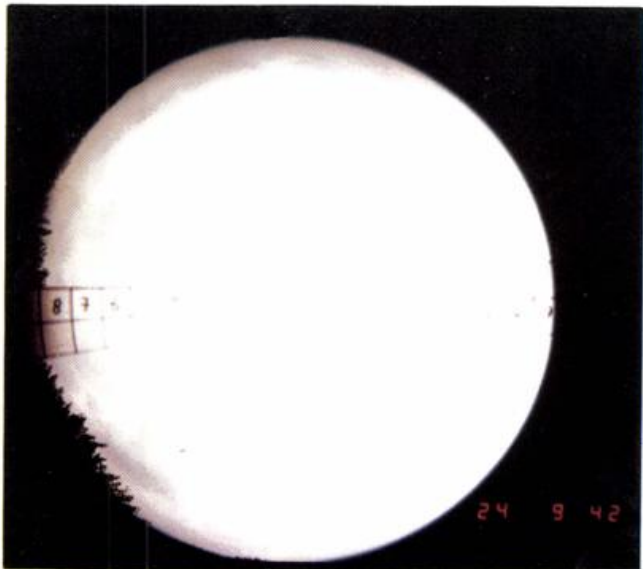


Abb. 1: 2 Testaufnahmen von Streifen mit Feldern gleicher Größe zur Kontrolle der Winkelverzerrung durch Fischaugenobjektiv der Olympus-Kamera

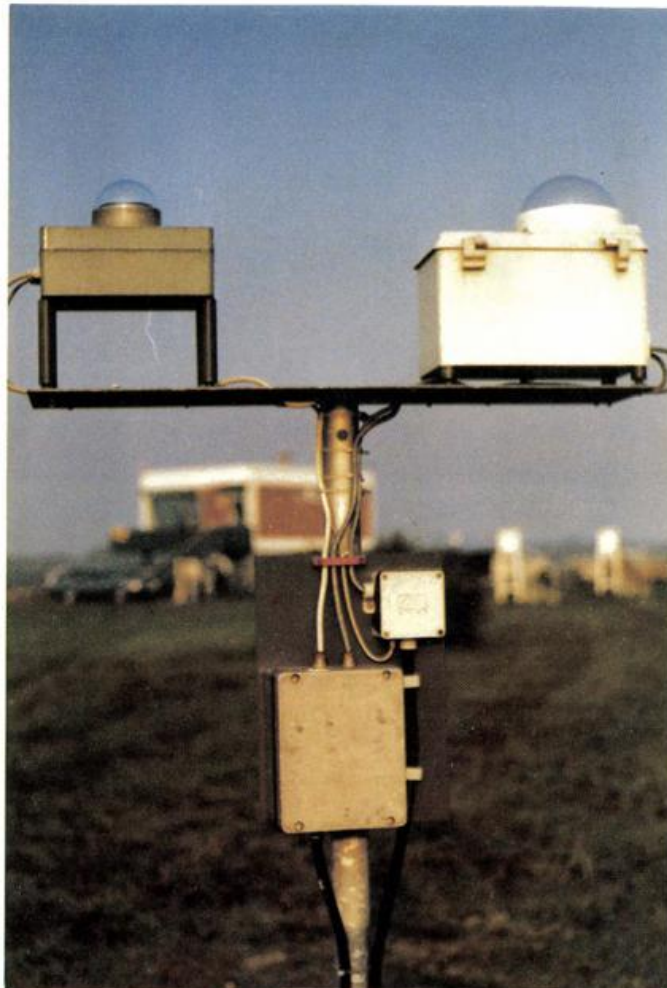


Abb. 2: Geräteträger mit Beleuchtungsstärkemeßgerät (links) und Fischaugenkamera im Wetterschutzgehäuse (rechts). Im Hintergrund: Landebahnbeobachterhaus

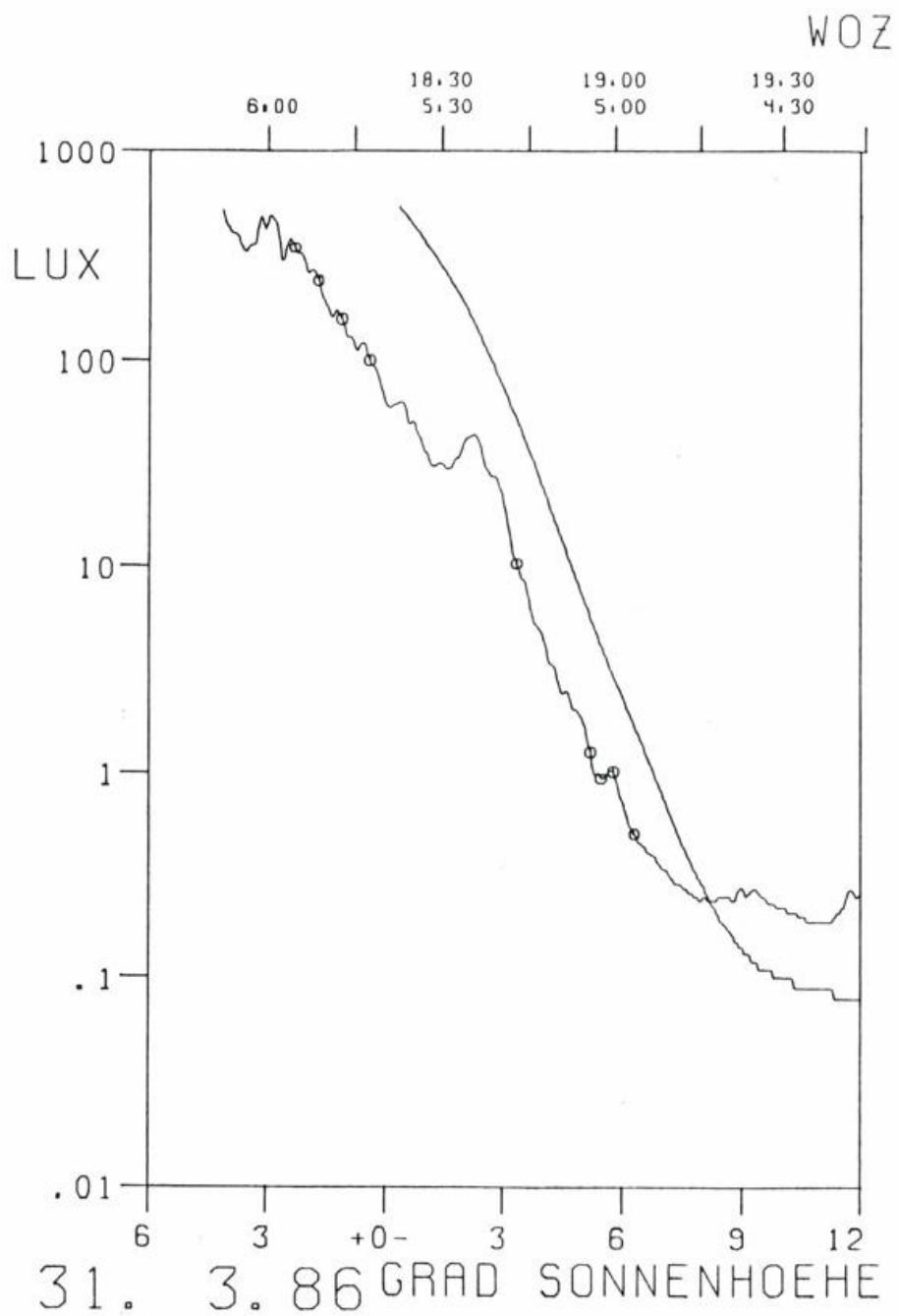
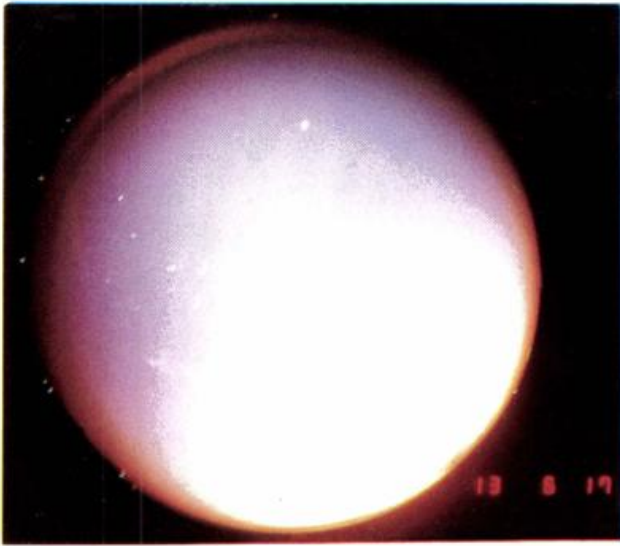
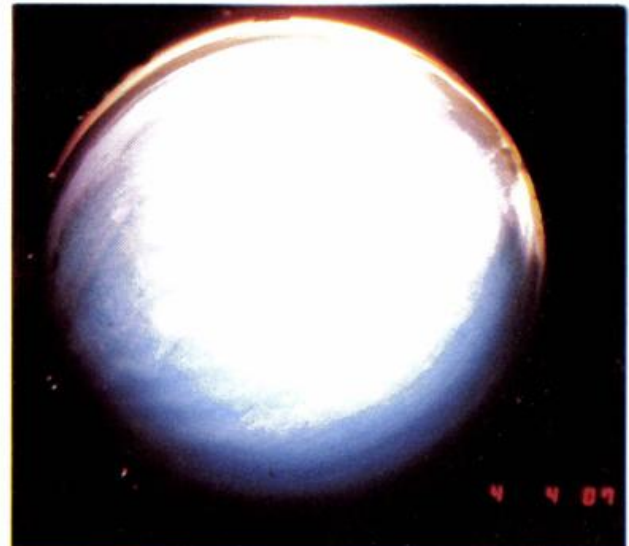


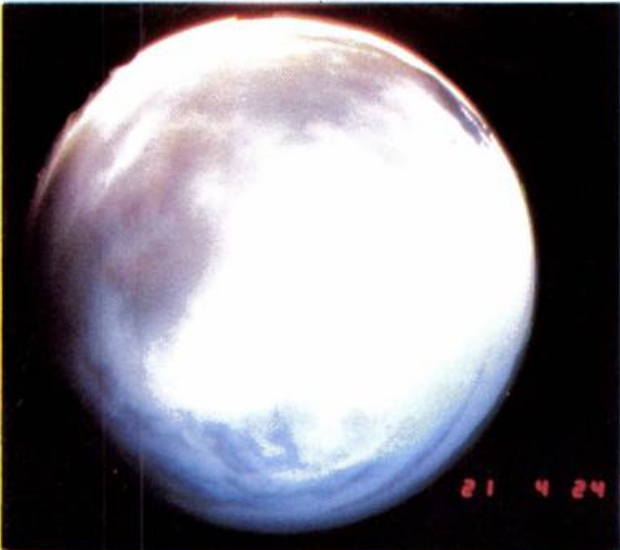
Abb. 3: Tagesplot der Datenkontrollroutine (Beispiel vom 31.03.86) mit logarithmischer Auftragung der Globalbeleuchtungsstärke während der Morgendämmerung (linke Kurve) und Abenddämmerung



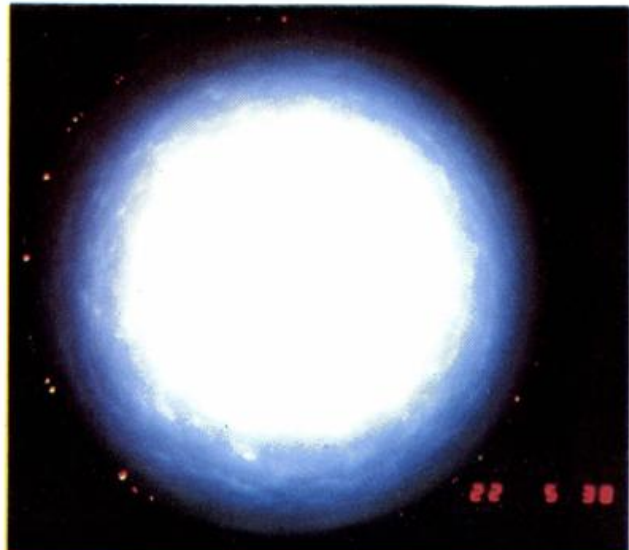
(a)



(b)



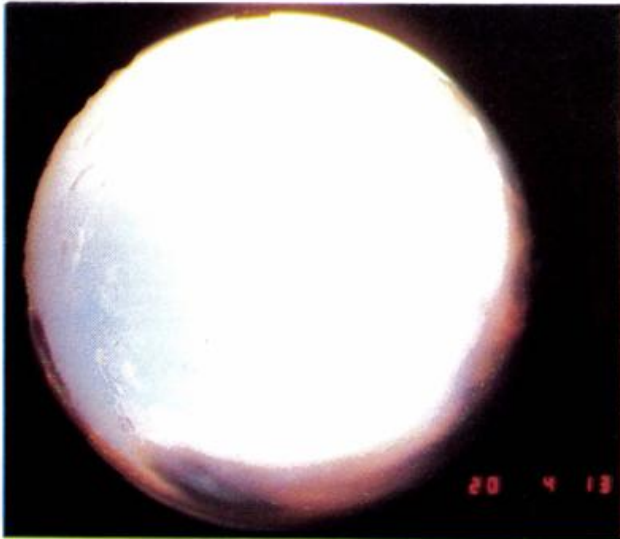
(c)



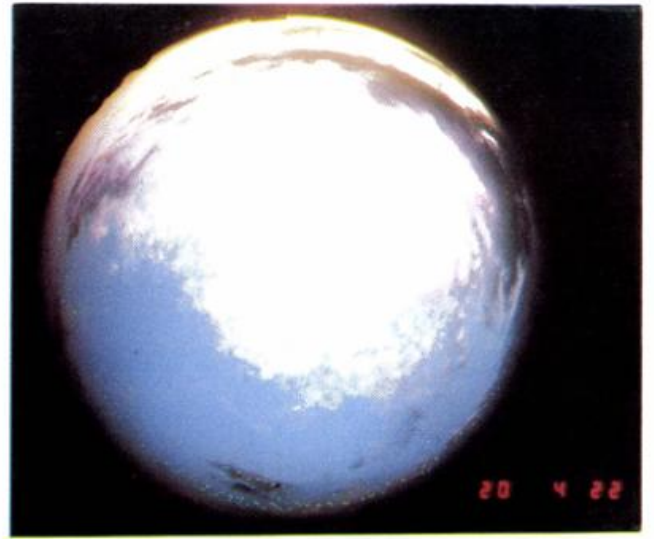
(d)

Abb. 4: Beispiele von Himmelsphotographien während der Dämmerung bei unterschiedlicher Bewölkung

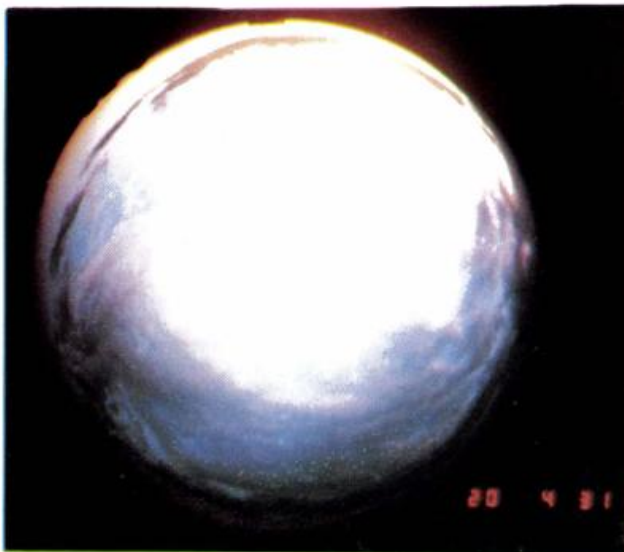
- (a): wolkenlos
- (b): wolzig: Altocumulus mit Stratocumulus
- (c): wolzig: Cumulus mit Stratocumulus
- (d): bedeckt: Stratocumulus



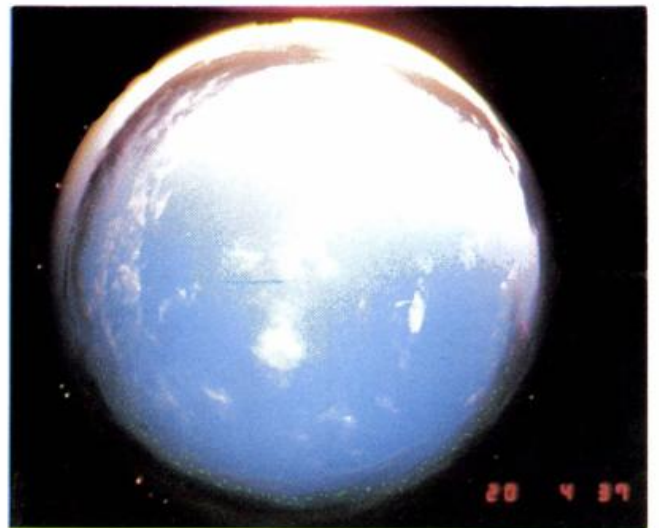
(a): 16.13 UTC



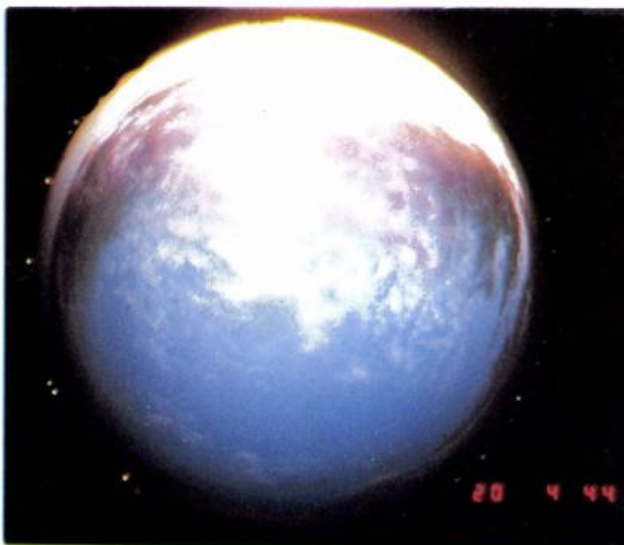
(b): 16.22 UTC



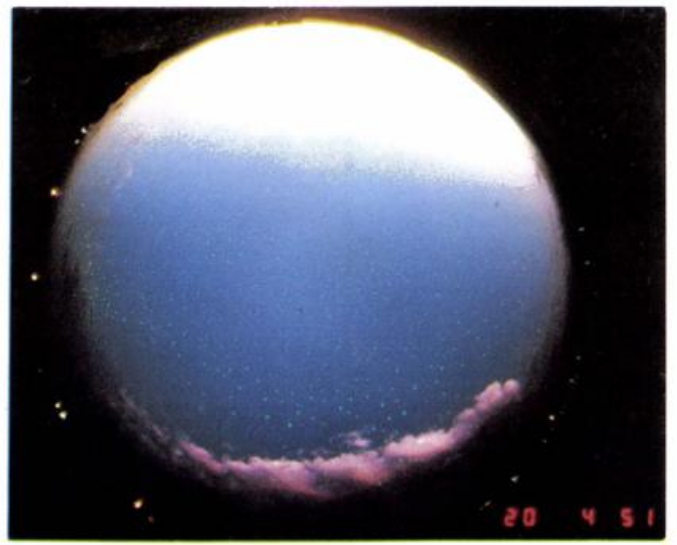
(c): 16.31 UTC



(d): 16.37 UTC



(e): 16.44 UTC



(f): 16.51 UTC

Abb. 5: Kurzzeitige Variabilität der Bewölkung während der Abenddämmerung am 20. 10. 84. Folgen von 6 Photographien (a) bis (f)

Datum	Zeit / WZT	/Sonnenhoehe / Grad	/Lux	/Helligkeit /	Zeit / UTC	METAR	NChh	NChh	NChh	NChh	NC	NC	NC	NC	Zeit / UTC	/Foto
25.04.85	03:31:58	-9.79	0.15	1.176	02:50	31 11 00 60 61 3616 8635										
25.04.85	04:10:158	-6.09	0.98	1.991	03:20	31 10 00 60 61 3616 5635 8650								12021 8 86		
25.04.85	04:02:14	-6.06	1.02	2.009										12941 8 36 86		
25.04.85	04:17:34	-4.08	10.04	3.002												
25.04.85	04:31:59	-2.17	66.32	3.822	03:50	30 09 00 60 61 4618 7650								14021 7 46 76		
25.04.85	04:35:34	-1.08	102.91	4.012												
25.04.85	04:38:54	-1.23	144.01	4.158	03:57	30 09 00 60 61 2613 5617 7650								14581 7 46 76		
25.04.85	04:44:54	-0.42	153.21	4.185										14701 8 46 76		
25.04.85	04:46:54	-0.14	246.22	4.391										14821 8 46 76		
25.04.85	04:48:54	0.13	185.30	4.268										14961 8 56 76		
25.04.85	04:51:14	0.46	224.60	4.351										15241 8 56 76		
25.04.85	04:55:54	1.10	220.80	4.344										15361 8 36 75		
25.04.85	04:57:54	1.38	333.34	4.523										15541 7 46 75		
25.04.85	05:00:54	1.80	521.09	4.717	04:19	31 14 27 60 62 5615 7630										
25.04.85	19:12:09	0.26	495.81	4.695										6606 7 46 76		
25.04.85	19:16:24	-0.32	323.09	4.509										56861 7 46 76		
25.04.85	19:21:44	-1.05	215.33	4.333										67181 7 28 46 66		
25.04.85	19:23:44	-1.32	145.07	4.162										67301 7 46 76		
25.04.85	19:25:44	-1.59	84.09	3.925										67421 7 46 76		
25.04.85	19:27:44	-1.86	110.44	4.043										67541 7 66 76		
25.04.85	19:31:04	-2.30	91.82	3.963										67741 7 46 56		
25.04.85	19:32:08	-2.44	73.26	3.865	18:50	28 10 00 60 26 3709 4615 6640										
25.04.85	19:42:44	-3.84	9.95	2.998										68441 7 76		
25.04.85	20:02:08	-6.33	1.59	2.201	19:20	26 10 00 60 26 3710 4615 6640										
25.04.85	20:25:04	-9.14	0.22	1.342	19:43	26 10 00 60 83 4710 6635										
25.04.85	20:32:09	-9.98	0.19	1.274	19:50	26 10 00 60 83 4710 5630										
25.04.85	20:43:04	-11.24	0.27	1.431	20:01	26 10 00 57 83 5710 6630										
26.04.85	03:32:08	-9.48	0.12	1.079	02:50	28 06 00 60 00 1825 3645										
26.04.85	04:02:08	-5.79	3.29	2.517	03:20	28 06 00 60 00 1825										
26.04.85	04:10:04	-4.77	10.27	3.012										12481 1 16		
26.04.85	04:26:24	-2.64	103.96	4.017										13461 3 26 23		
26.04.85	04:29:24	-2.24	151.62	4.181										13641 3 26 23		
26.04.85	04:32:09	-1.87	207.80	4.318	03:50	29 06 00 60 00 1825 3645										
26.04.85	04:33:04	-1.75	230.93	4.363										13861 3 36 16		
26.04.85	04:36:24	-1.30	338.19	4.529										14061 5 18 36 26		
26.04.85	04:44:44	-0.17	510.44	4.703										14561 6 56 56		
26.04.85	19:32:18	-2.19	160.32	4.001	18:50	28 05 00 55 00 1656 7075										
26.04.85	20:32:19	-9.71	0.17	1.230	19:50	25 04 00 55 00 7650										

Abb. 6: Ausdruck aus Archivband mit Bewölkungs- und Wetterdaten vom 25.04.85 für Hamburg-Fuhlsbüttel

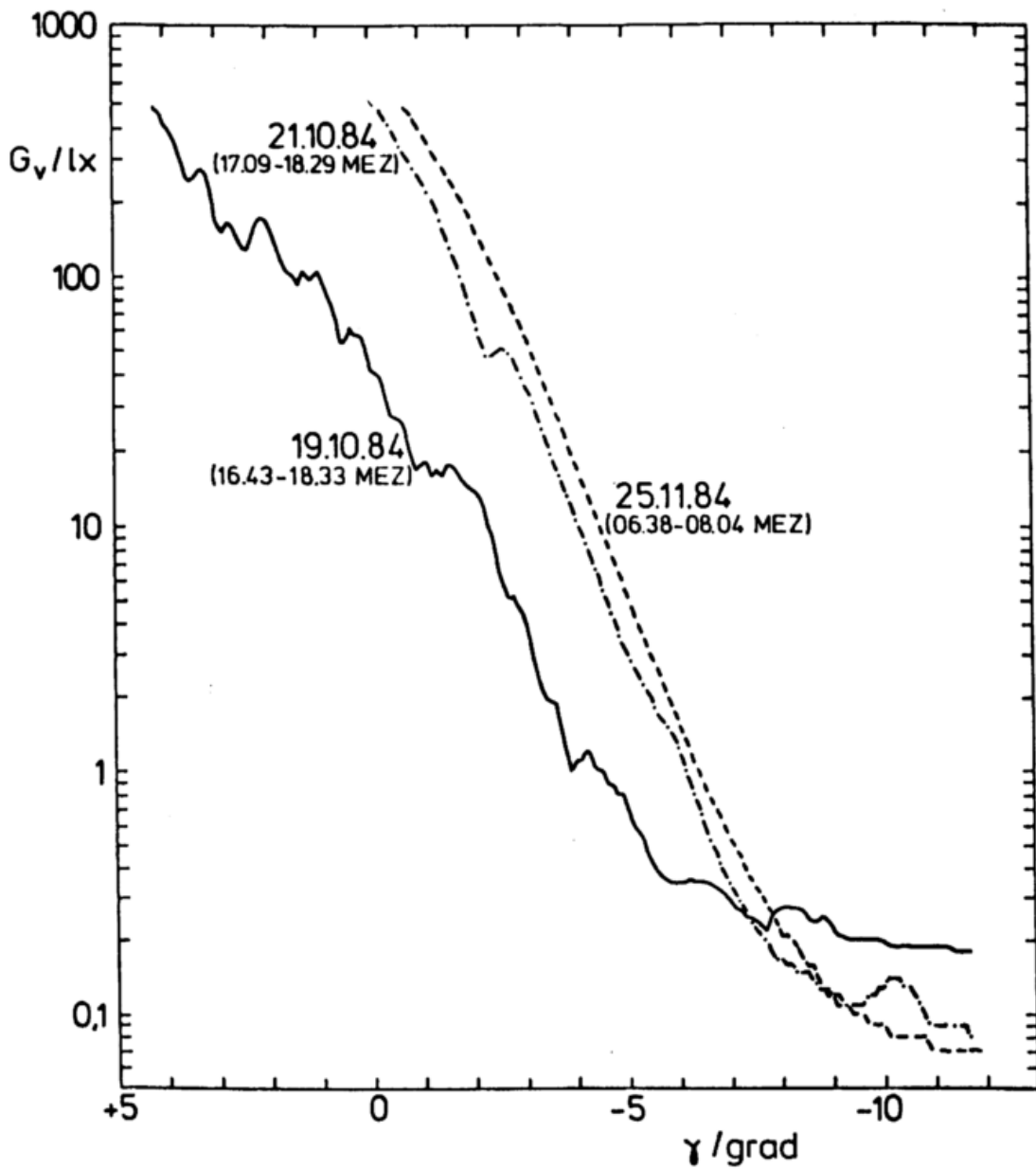


Abb. 7: Beispiele von Globalbeleuchtungsstärke-Kurven in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe für wolkenlosen (25.11.84), wolkigen (21.10.84) und bedeckten (19.10.84) Himmel

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen:

01.11.84v
30.12.84n
07.01.85v
18.01.85v
07.02.85v
12.02.85v
12.02.85n
13.02.85v
15.02.85v
18.02.85v
18.02.85n
21.04.85n
24.04.85v
27.05.85v
01.06.85v
01.06.85n
02.06.85v
05.07.85v
05.07.85n
06.07.85v
26.07.85v
30.09.85v
01.10.85v
21.10.85n
17.01.86v
04.02.86n
09.02.86v
12.02.86n
15.02.86v
23.02.86v
23.02.86n
26.02.86n
27.02.86v
02.03.86v
02.03.86n
03.03.86v
03.03.86n
04.03.86v
19.03.86n
20.03.86v
27.03.86v
31.03.86n
03.05.86n
20.05.86v
22.05.86n
10.06.86n
15.06.86v
15.06.86n
16.06.86v
16.06.86n
19.06.86n
23.06.86n
24.06.86n

wolkenlos

Globalbeleuchtungsstärke  
(in Lux)

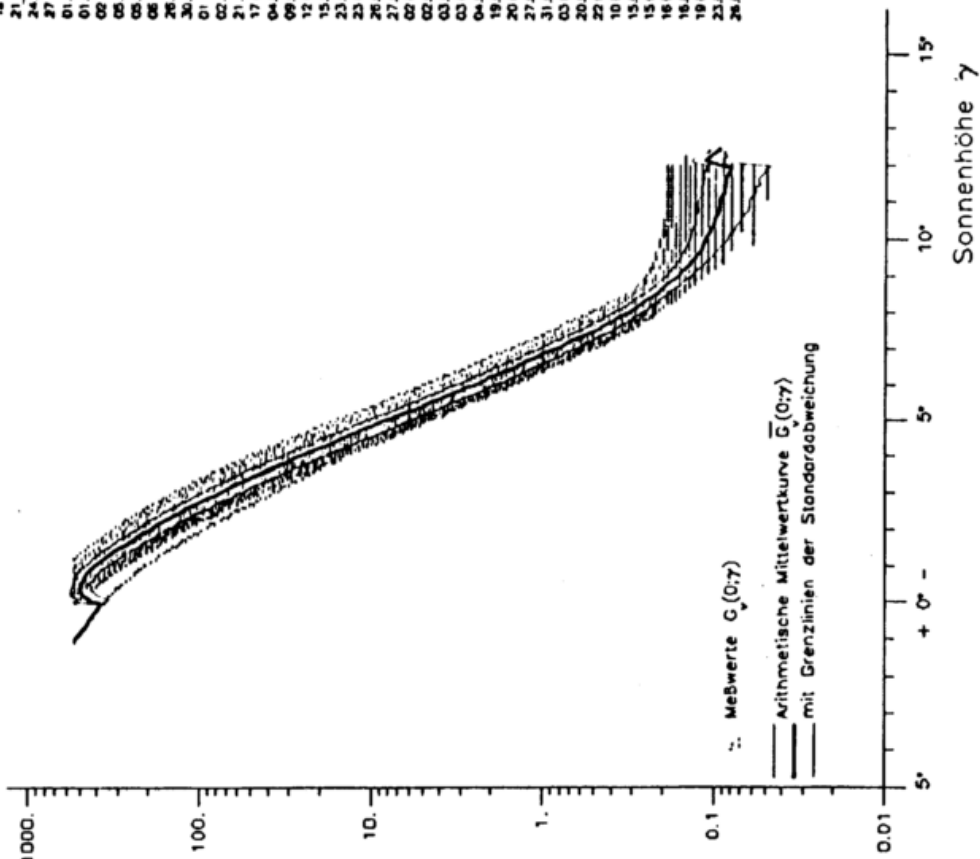


Abb. 8: Globalbeleuchtungsstärke  $G_v(0;\gamma)$  bei wolkenlosem Himmel

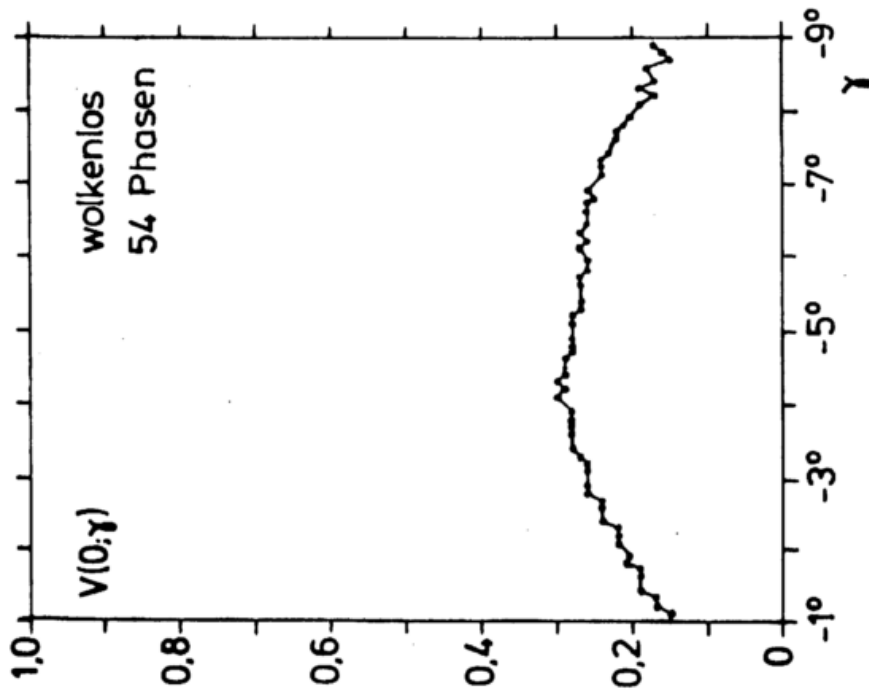


Abb. 9: Variationskoeffizienten der Globalbeleuchtungsstärke bei wolkenlosem Himmel

wolkenlos

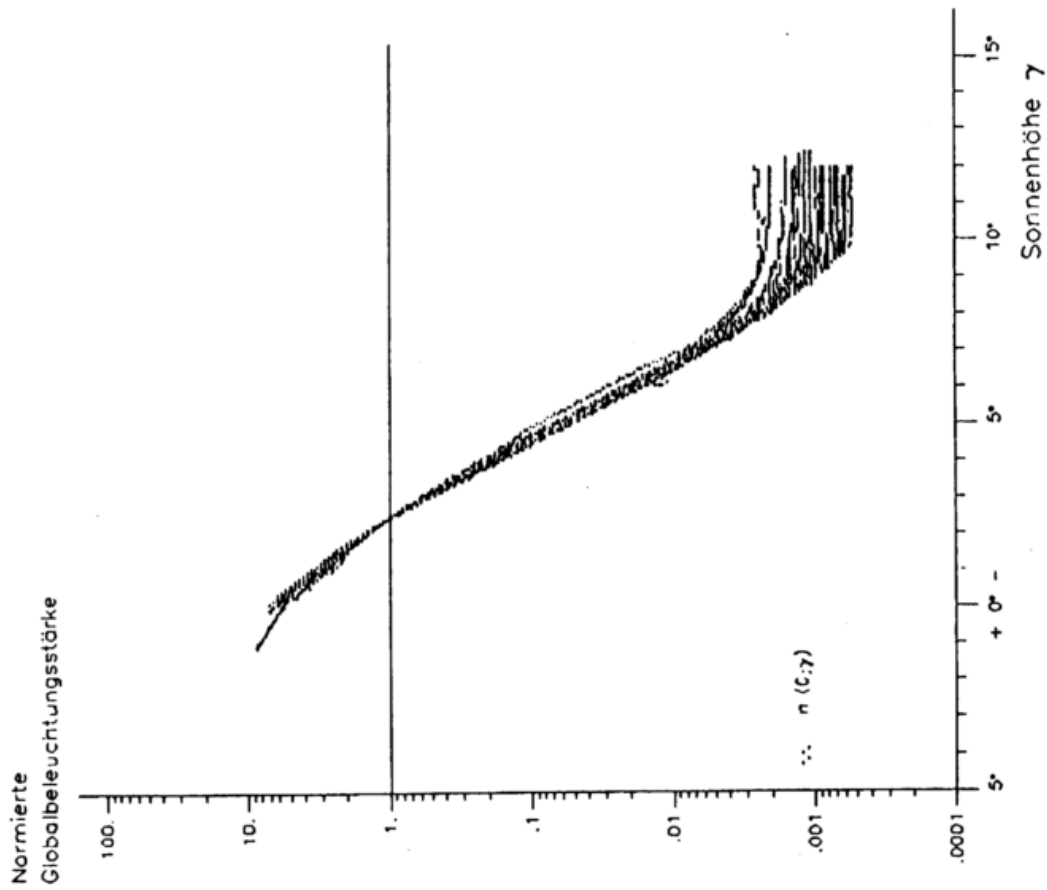


Abb. 10: Normierte Globalbeleuchtungsstärke bei wolkenlosem Himmel  $n(0;\gamma)$

wolkenlos

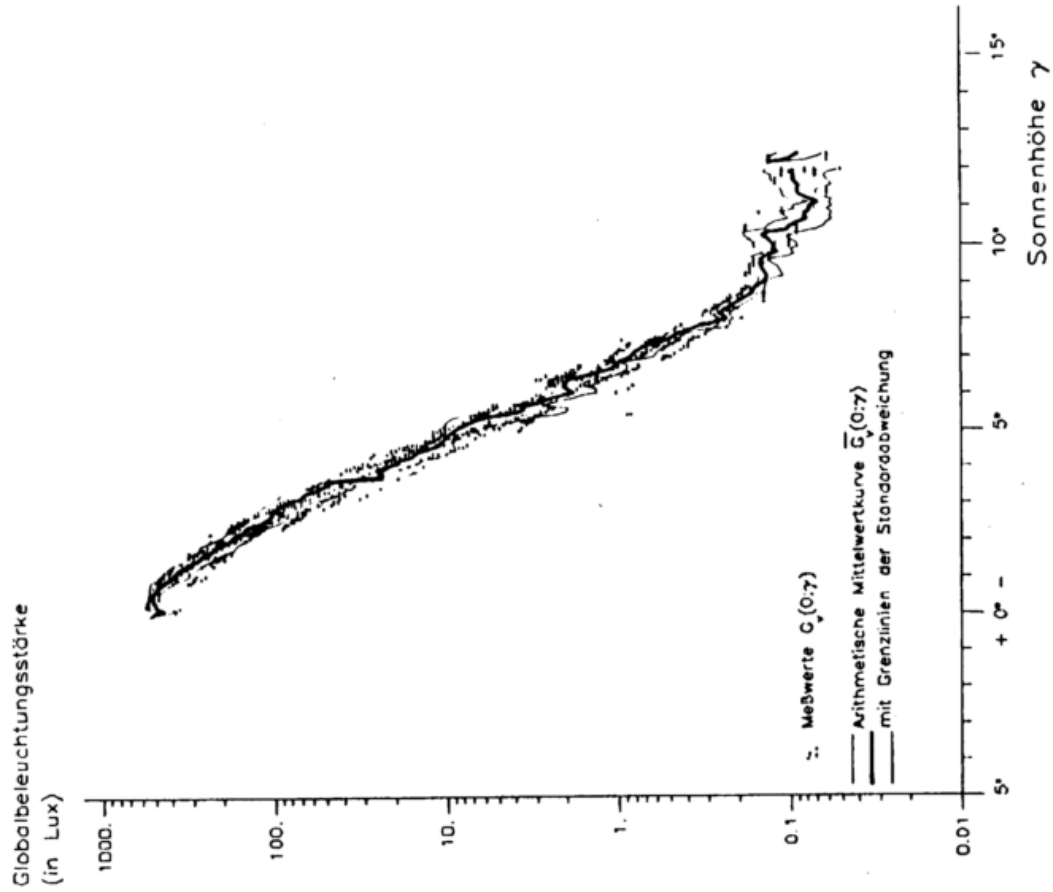


Abb. 11: Wie Abb. 8, aber nach punktweiser Auswertung des Datenmaterials

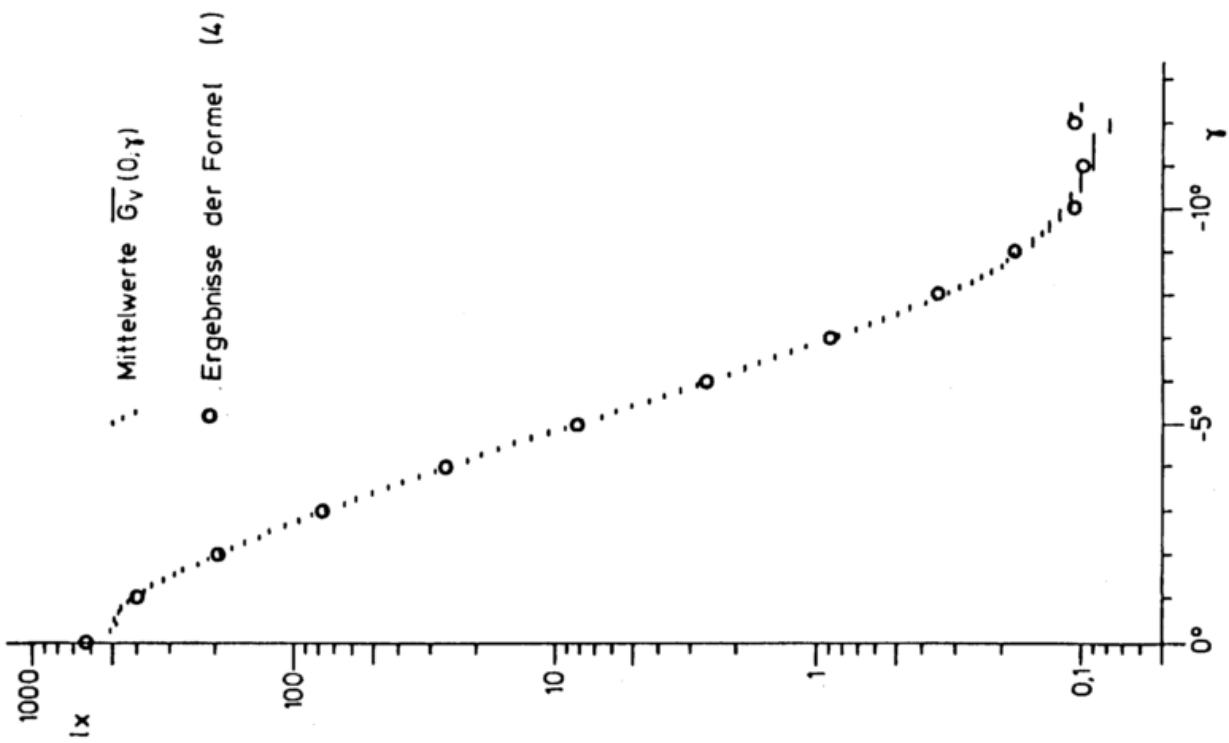


Abb. 12: Vergleich der Mittelwertkurve  $\overline{G}_V(0; \gamma)$  aus Abb. 8 mit Rechenergebnissen der Parametrisierungsformel (4)

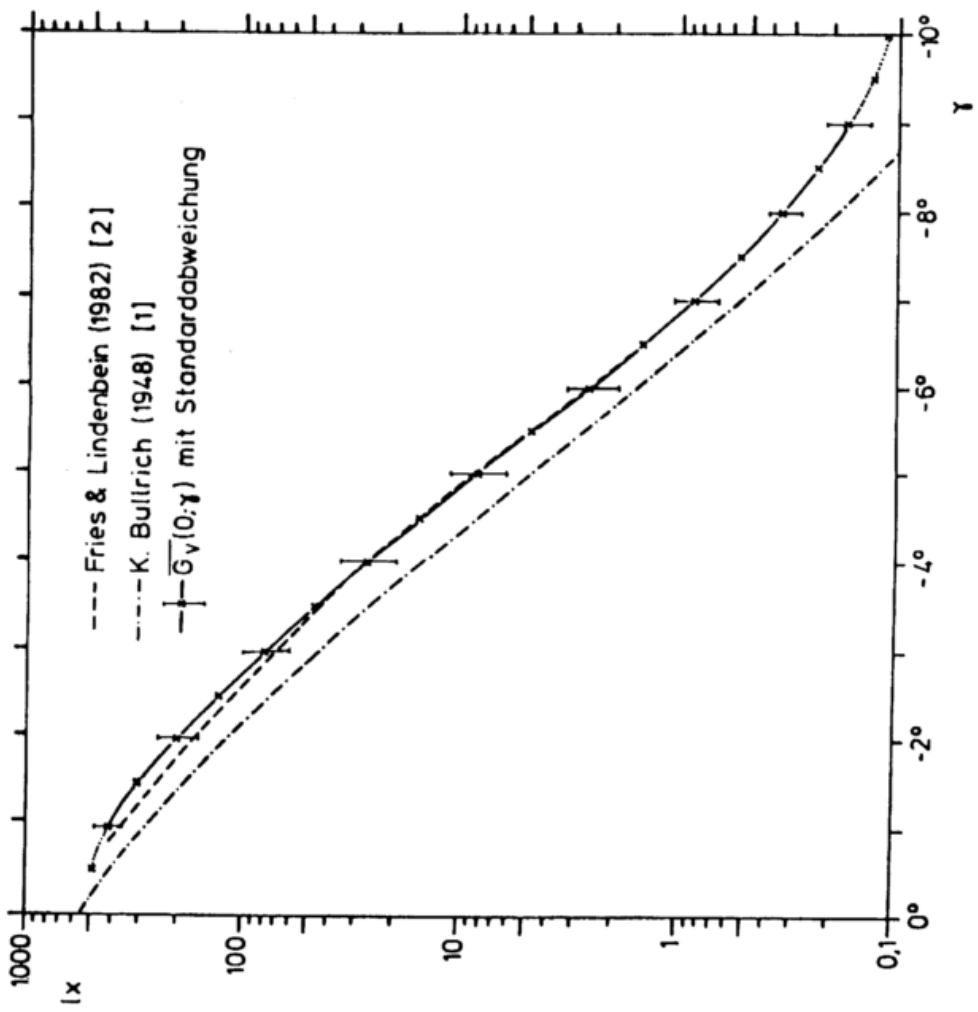


Abb. 13: Vergleich von  $\overline{G}_V(0; \gamma)$  mit entsprechenden Kurven für den wolkenlosen Fall nach K. Bullrich [1] und Fries & Lindenbein [2]

Gesamtbedeckung  
3/8 - 5/8

Normierte  
Globalbeleuchtungsstärke

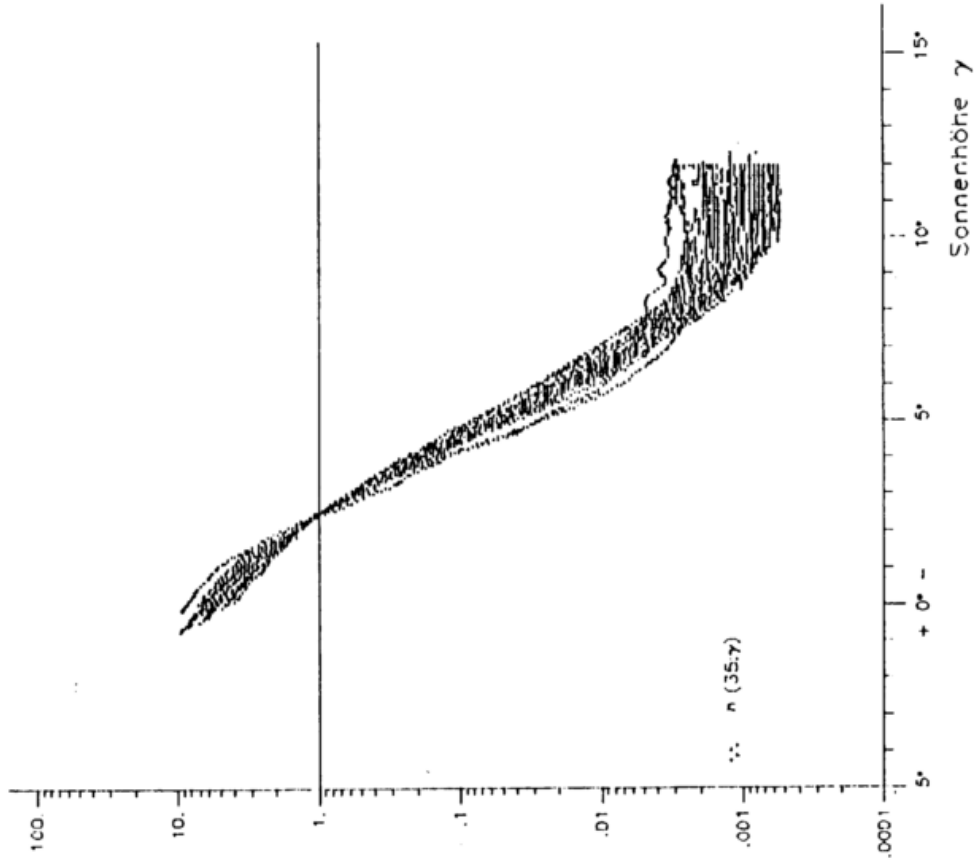


Abb. 15: Normierte Globalbeleuchtungsstärke  $n(35;\gamma)$   
Gesamtbedeckungsgradklasse  $\Delta N = 35$

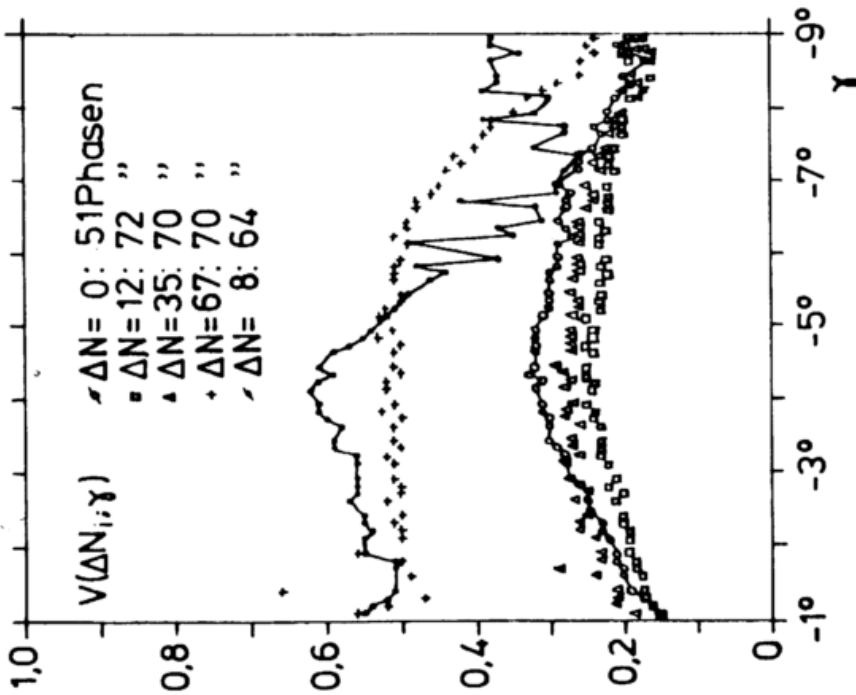


Abb. 14: Variationskoeffizienten für S  
Gesamtbedeckungsgradklassen

Liste der vorbereiteten Dämmerungszeiten:

- 19.10.84
- 26.11.84
- 03.12.84
- 14.12.84
- 17.12.84
- 25.12.84
- 26.12.84
- 22.02.85
- 28.03.85
- 05.04.85
- 12.04.85
- 14.04.85
- 25.04.85
- 27.04.85
- 03.05.85
- 07.05.85
- 09.05.85
- 11.05.85
- 24.05.85
- 17.06.85
- 20.06.85
- 27.06.85
- 04.07.85
- 11.07.85
- 12.07.85
- 15.07.85
- 14.07.85
- 17.07.85
- 19.07.85
- 19.07.85
- 20.07.85
- 20.08.85
- 24.08.85
- 05.08.85
- 11.09.85
- 20.08.85
- 10.10.85
- 22.10.85
- 25.10.85
- 28.10.85
- 31.10.85
- 01.11.85
- 05.11.85
- 14.11.85
- 05.12.85
- 27.12.85
- 01.01.86
- 05.02.86
- 07.02.86
- 17.02.86
- 19.02.86
- 20.02.86
- 04.03.86
- 10.04.86
- 16.04.86
- 18.04.86
- 24.04.86
- 25.04.86
- 05.05.86
- 14.05.86
- 18.05.86
- 04.07.86
- 05.07.86
- 09.07.86
- 20.07.86
- 24.07.86
- 28.07.86

Gesamtbedeckung  
6/8 - 7/8

Globalbeleuchtungsstärke  
(in Lux)

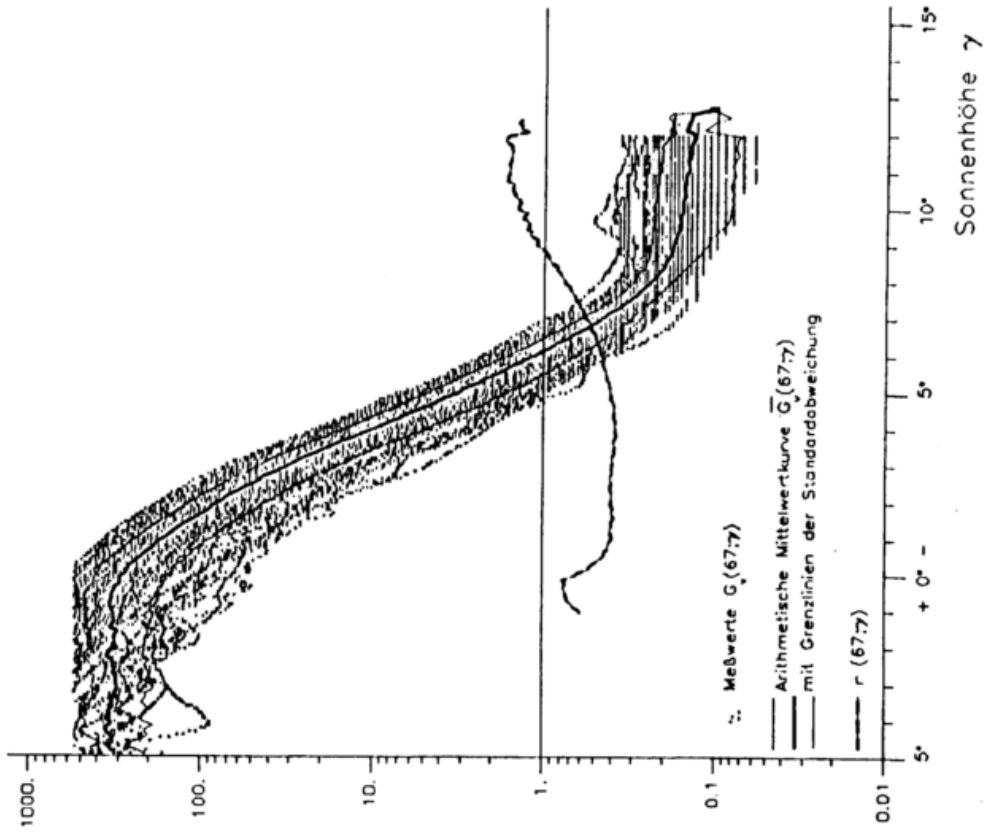


Abb. 16: Globalbeleuchtungsstärke  $G_v(67;\gamma)$  mit Relativkurve  $r(67;\gamma)$  für Gesamtbedeckungsgradklasse  $\Delta N = 67$

Gesamtbedeckung  
6/8 - 7/8

Normierte  
Globalbeleuchtungsstärke

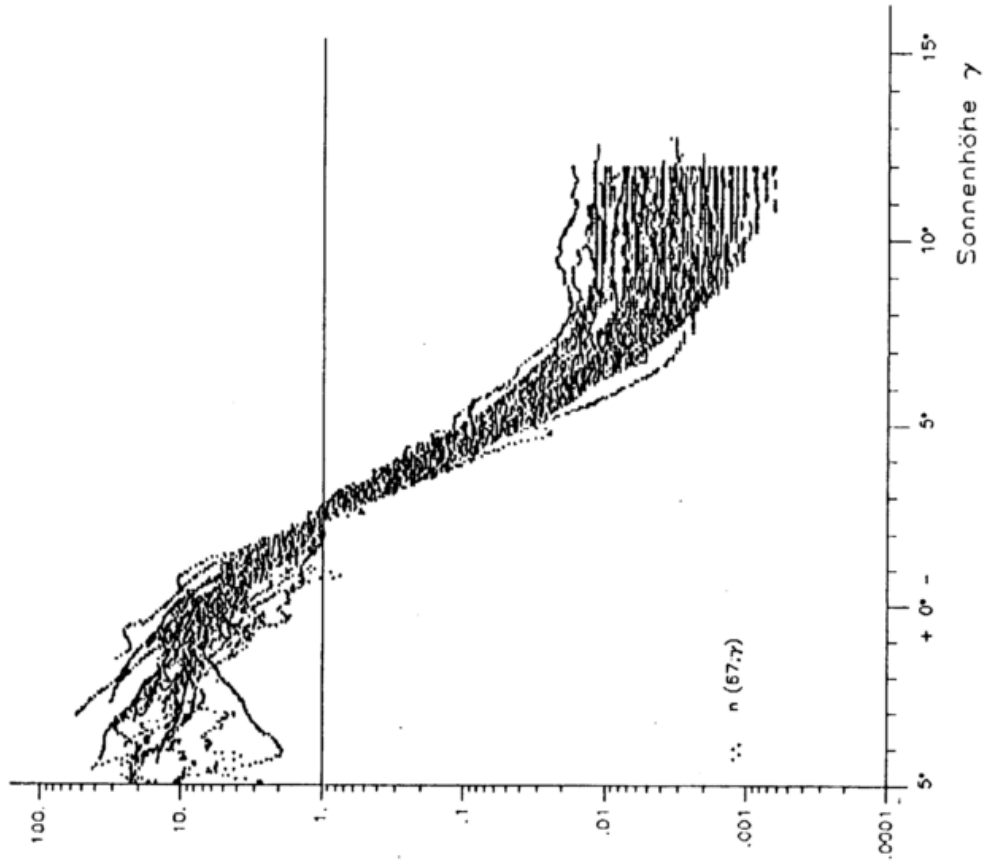


Abb. 17: Normierte Globalbeleuchtungsstärke  $n(67;\gamma)$  für Gesamtbedeckungsgradklasse  $\Delta N = 67$

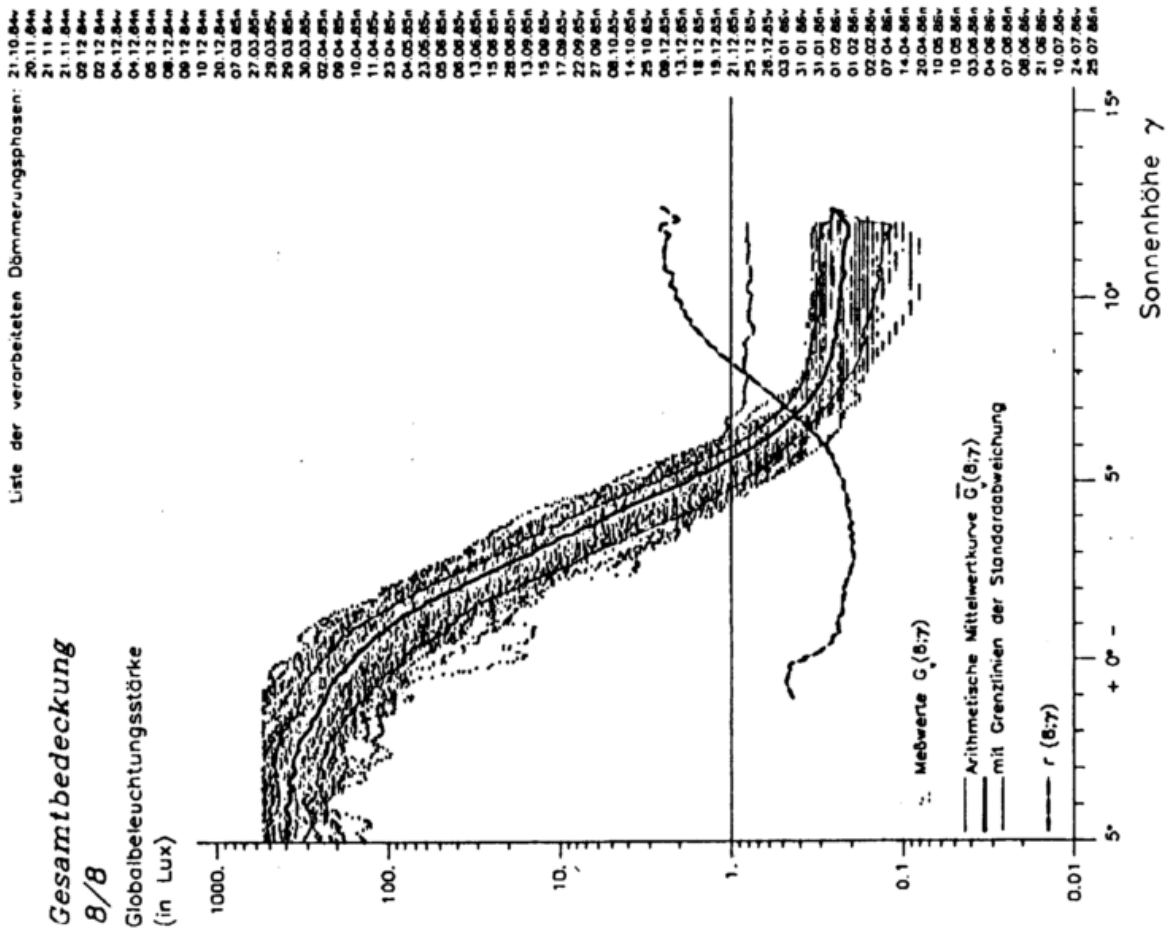


Abb. 1a: Globalbeleuchtungsstärke  $G_V(\beta; \gamma)$  für  
Gesamtbedeckungsgradklasse  $\Delta N = 8$

1/8 - 2/8 Ci

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen:

- 13 11 24h
- 30 11 24h
- 07 01 25h
- 13 02 25h
- 19 02 25h
- 19 04 25h
- 30 04 25h
- 08 05 25h
- 18 05 25h
- 17 06 25h
- 18 05 25h
- 19 05 25h
- 25 05 25h
- 30 05 25h
- 31 05 25h
- 02 06 25h
- 04 06 25h
- 03 07 25h
- 04 07 25h
- 08 08 25h
- 16 08 25h
- 28 08 25h
- 29 08 25h
- 13 09 25h
- 30 09 25h
- 23 10 25h
- 22 12 25h
- 03 02 26h
- 18 03 26h
- 14 04 26h
- 04 05 26h
- 19 05 26h
- 13 06 26h
- 14 06 26h
- 23 06 26h
- 24 06 26h
- 25 06 26h
- 26 06 26h
- 28 06 26h
- 29 06 26h
- 30 06 26h
- 01 07 26h
- 02 07 26h
- 03 07 26h

Globalbeleuchtungsstärke  
(in Lux)

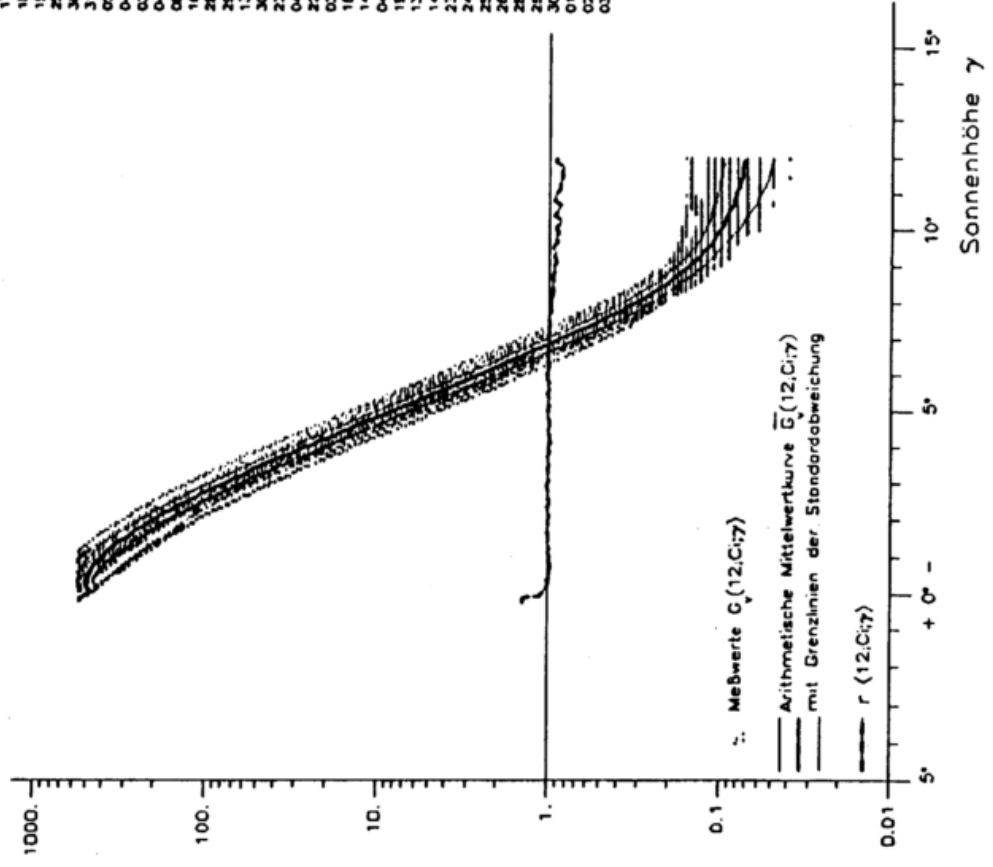


Abb. 19: Globalbeleuchtungsstärke  $G_V(12;Ci;\gamma)$  für Ci-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 12$

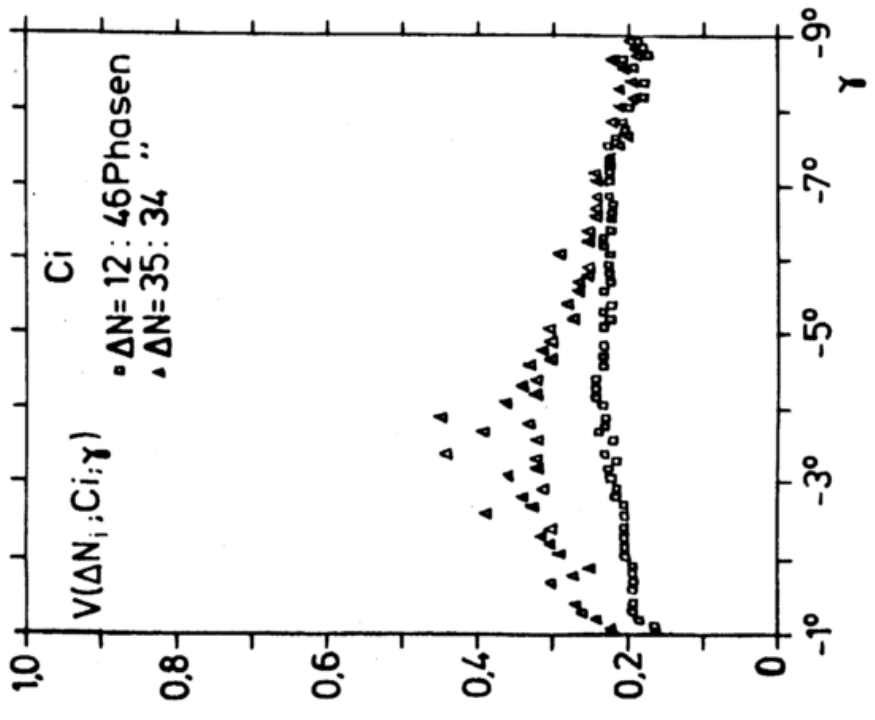


Abb. 20: Variationskoeffizienten für Ci-Bewölkung

3/8 - 5/8 Ci

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen:

12.11.84n
07.12.84n
16.01.85n
17.01.85n
21.03.85n
23.03.85n
29.03.85n
03.06.85n
03.06.85n
04.06.85n
17.07.85n
26.07.85n
07.08.85n
09.08.85n
26.08.85n
19.09.85n
29.09.85n
08.11.85n
26.12.85n
08.01.86n
05.02.86n
09.02.86n
15.02.86n
22.02.86n
13.04.86n
27.04.86n
20.05.86n
21.05.86n
03.06.86n
19.06.86n
27.06.86n
14.07.86n
15.07.86n

3/8 - 5/8 Ci

Globalbeleuchtungsstärke  
(in Lux)

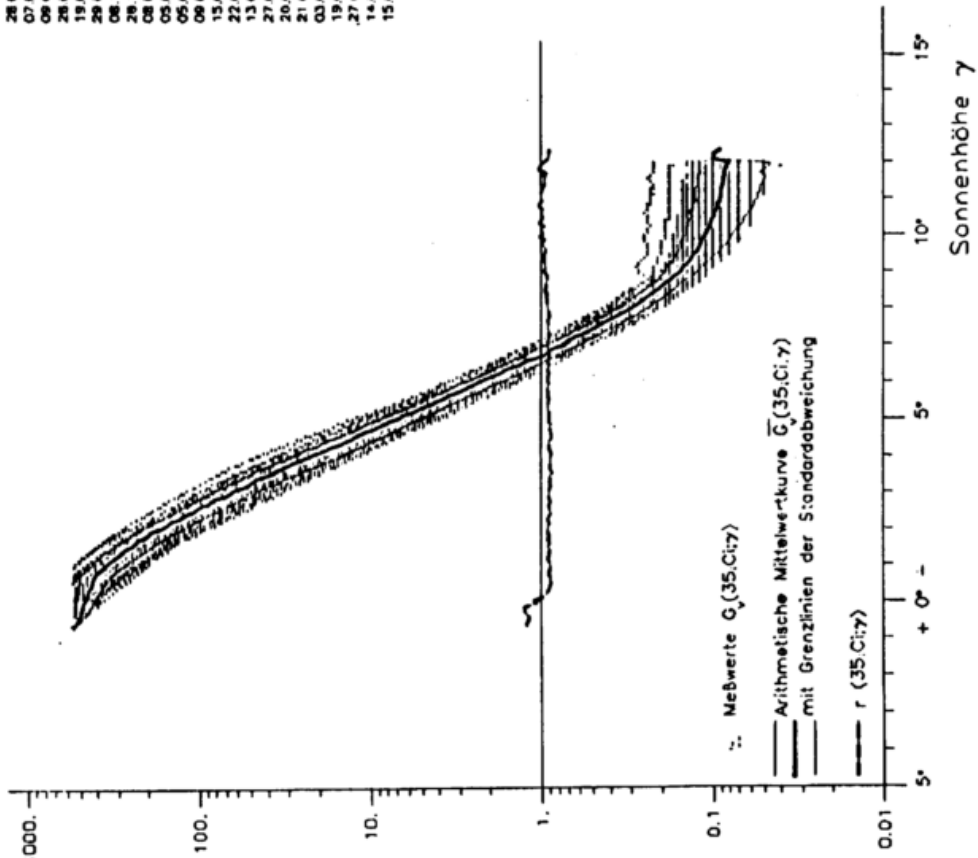


Abb. 21: Globalbeleuchtungsstärke  $G_v(35;Ci;\gamma)$  für Ci-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 35$

Normierte  
Globalbeleuchtungsstärke

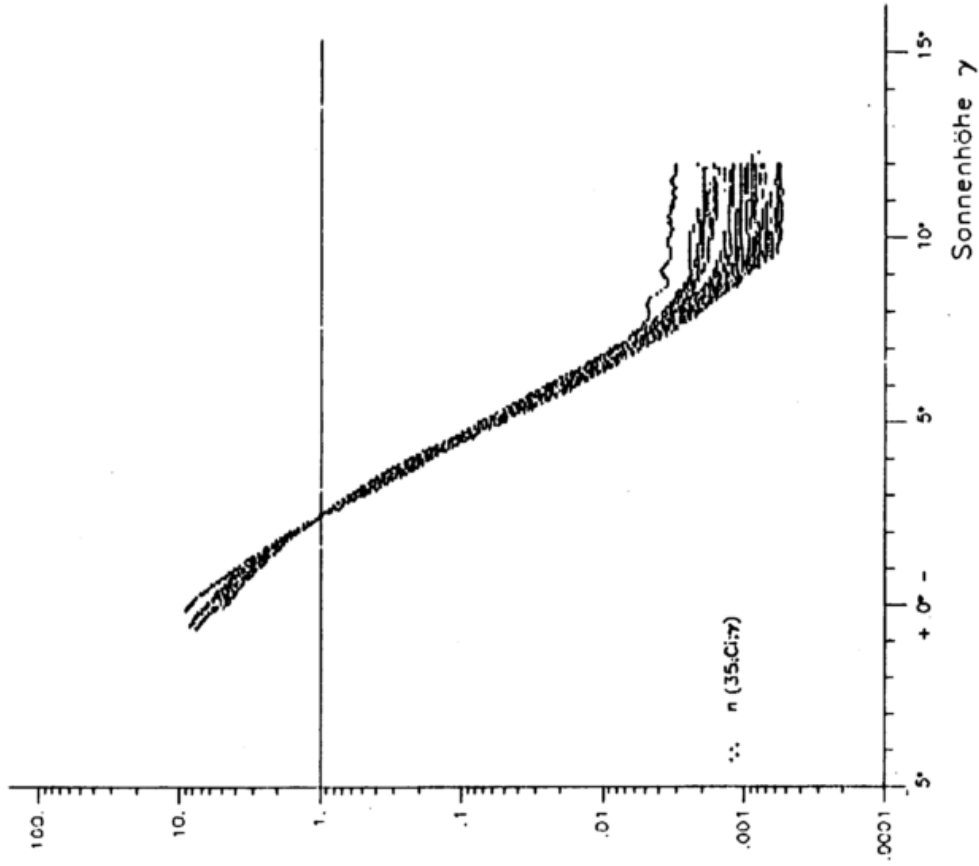
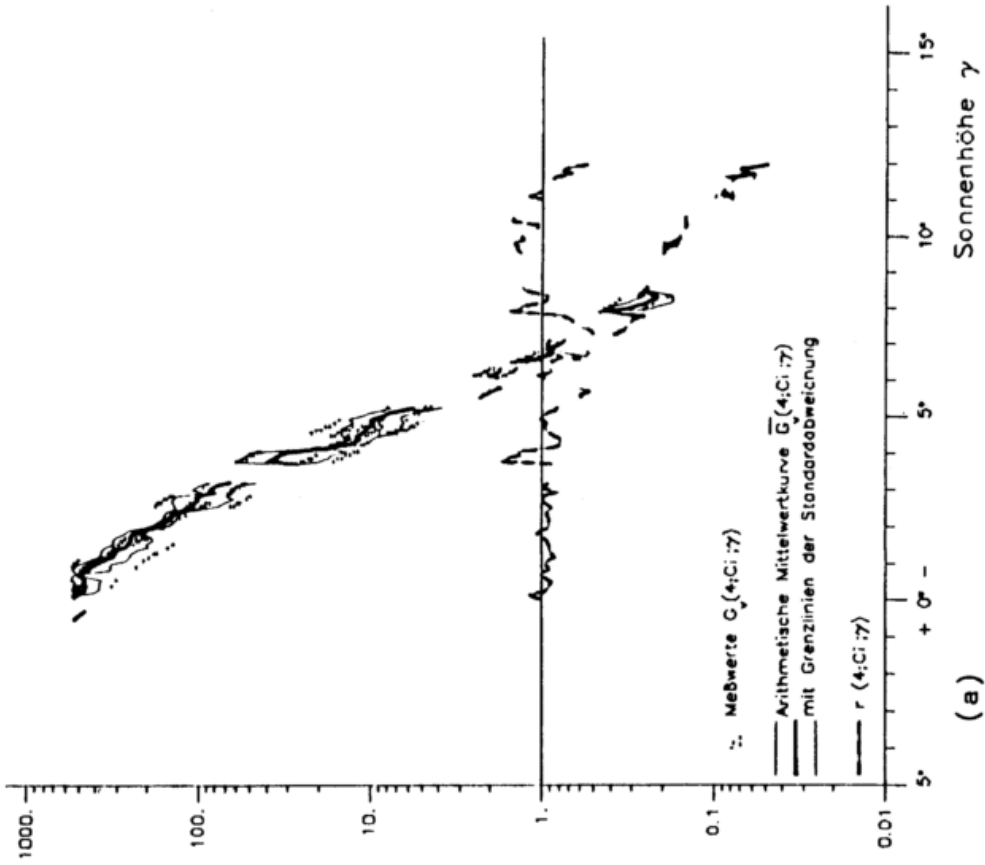


Abb. 22: Normierte Globalbeleuchtungsstärke  $n(35;Ci;\gamma)$  für Ci-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 35$

4/8 Ci

Globalbeleuchtungsstärke  
(in Lux)



5/8 Ci

Globalbeleuchtungsstärke  
(in Lux)

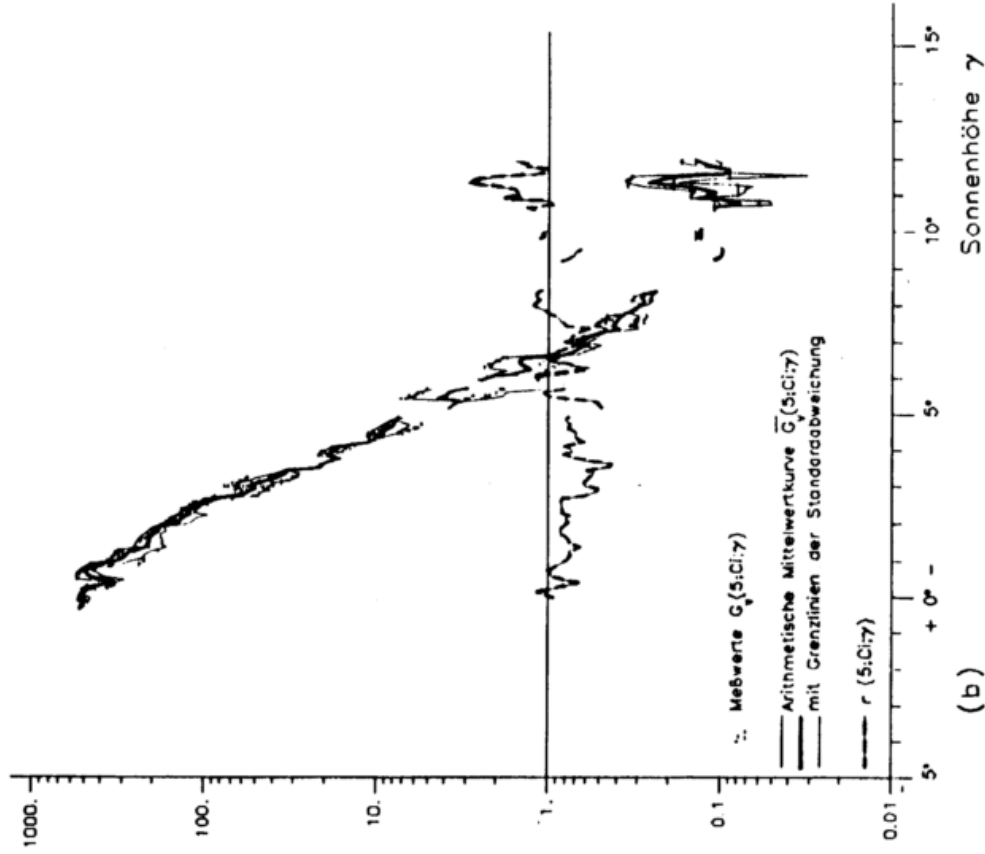


Abb. 23: wie Abb. 21, aber nach punktwiseiger Auswertung des Datenmaterials für  $N = 4$  (a) und  $N = 5$  (b)

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen:  
 04.07.85h  
 25.07.85h  
 01.01.86h  
 23.04.86h  
 25.04.86h

6/8 - 7/8 Ci

Globalbeleuchtungsstärke  
 (in Lux)

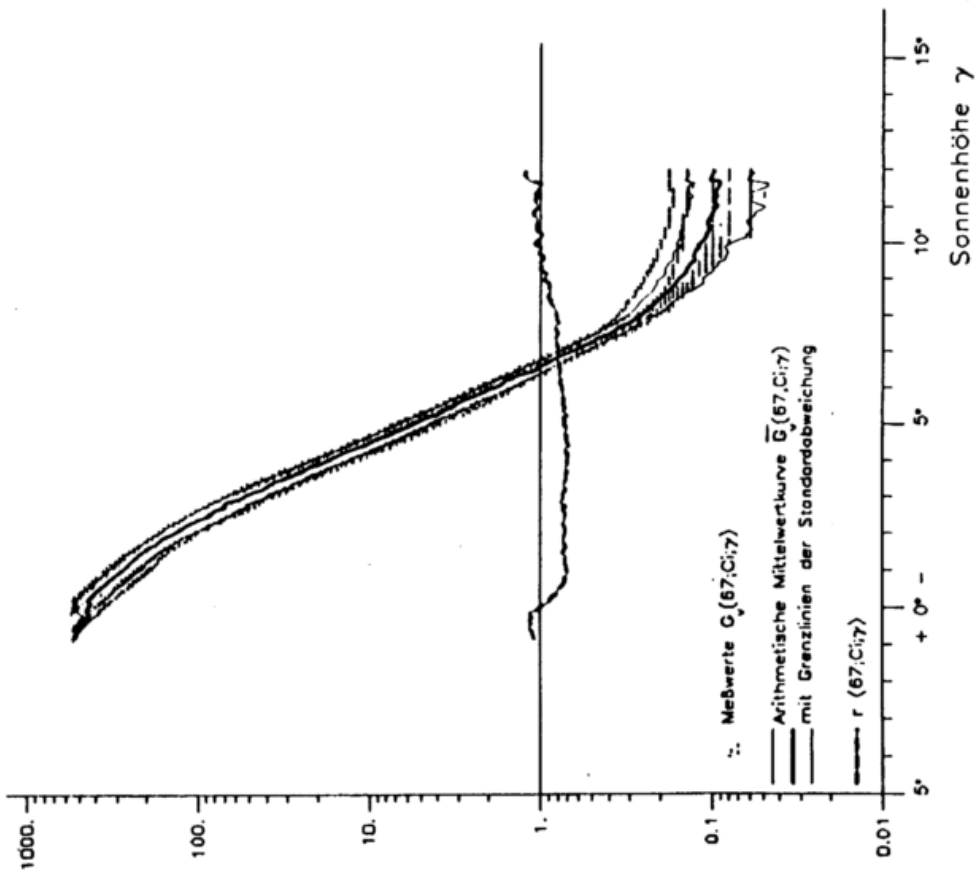


Abb. 24: Globalbeleuchtungsstärke  $G_v(67;Ci;\gamma)$  für Ci-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 67$

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen:  
 08.11.84h  
 04.04.85h  
 18.08.85h  
 06.10.85h  
 08.10.85h  
 27.12.85h  
 17.03.86h  
 28.04.86h  
 28.04.86h  
 02.06.86h  
 18.07.86h

>3/8 CiCsCc  
 1/8 - 2/8 AcAs  
 Globalbeleuchtungsstärke  
 (in Lux)

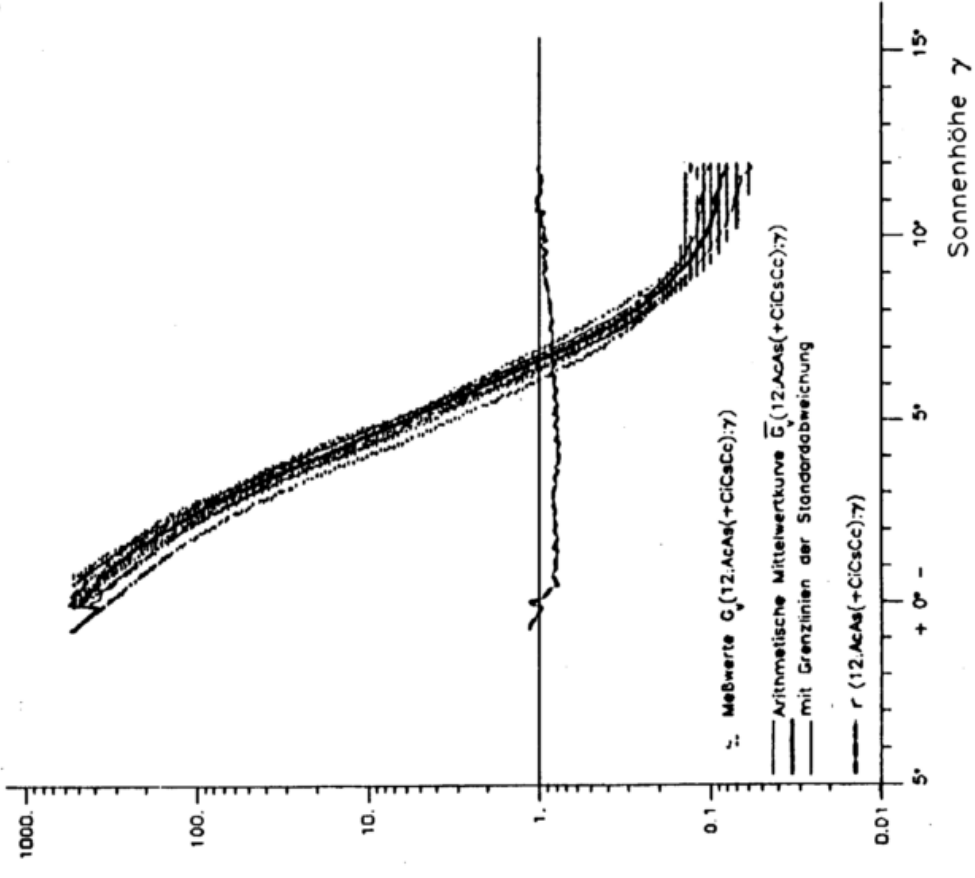


Abb. 25: Globalbeleuchtungsstärke für AcAs-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 12$  (mit CiCs-Bedeckungsgrad > 3)

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen: 17.01.85  
 05.04.85  
 19.04.85  
 13.05.85  
 15.05.85  
 31.08.85  
 03.10.85  
 31.12.85  
 17.05.86

>3/8 CiCsCc  
 3/8 - 5/8 AcAs  
 Globalbeleuchtungsstärke  
 (in Lux)

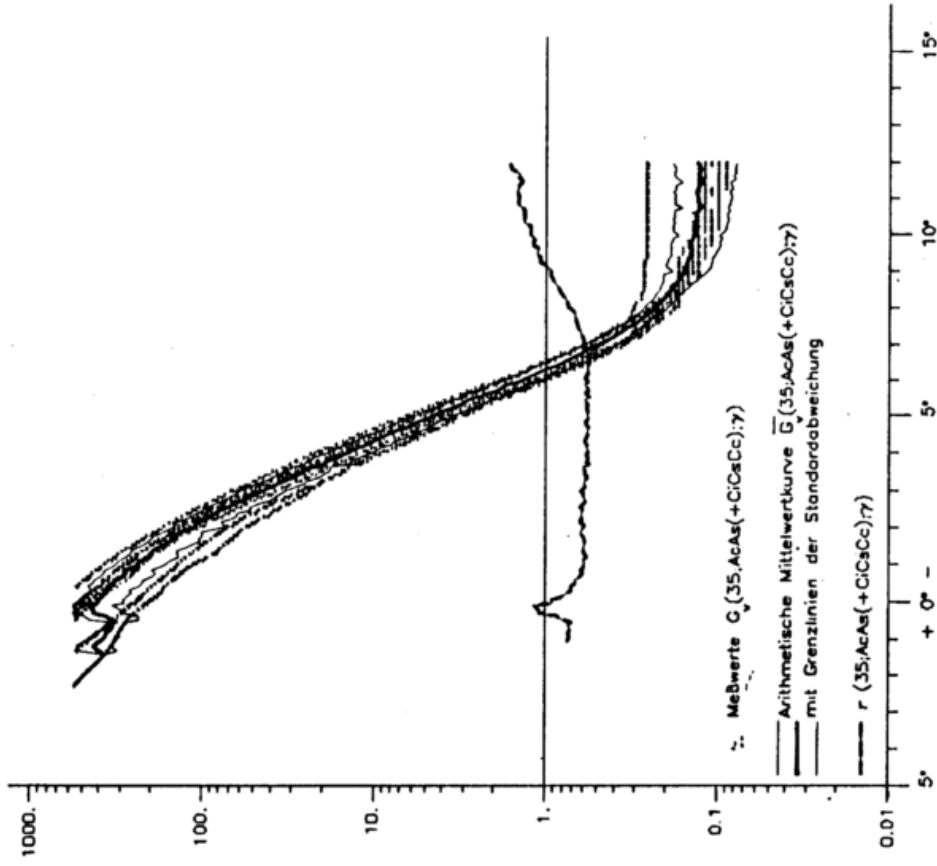


Abb. 27: Globalbeleuchtungsstärke für AcAs-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 35$  (mit CiCs-Bedeckungsgrad  $> 3$ )

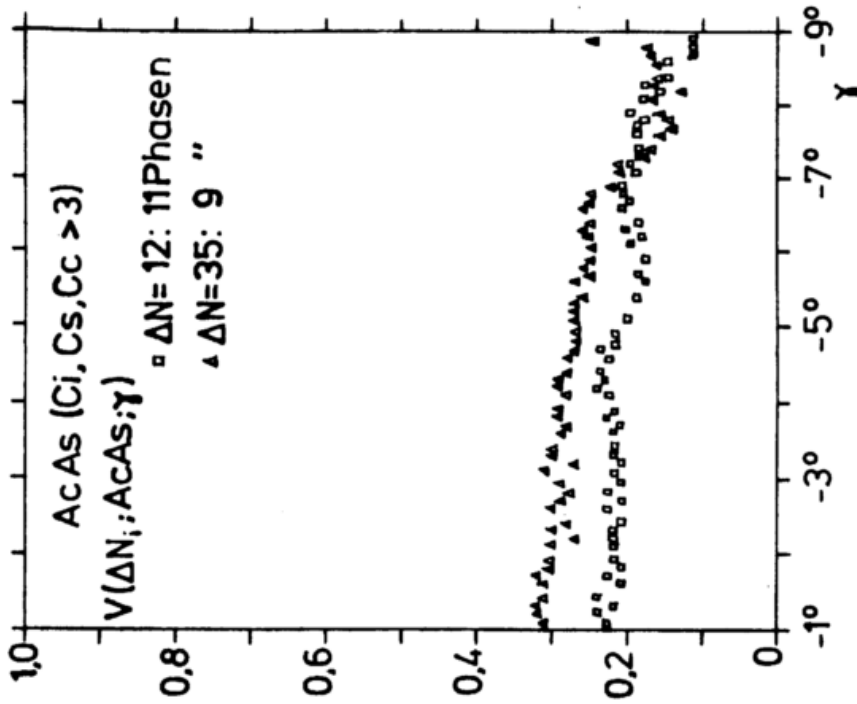


Abb. 26: Variationskoeffizienten für AcAs-Bewölkung

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen: 05.11.84  
 04.07.85.  
 20.03.85.  
 24.04.86.  
 14.05.86.  
 18.05.86.

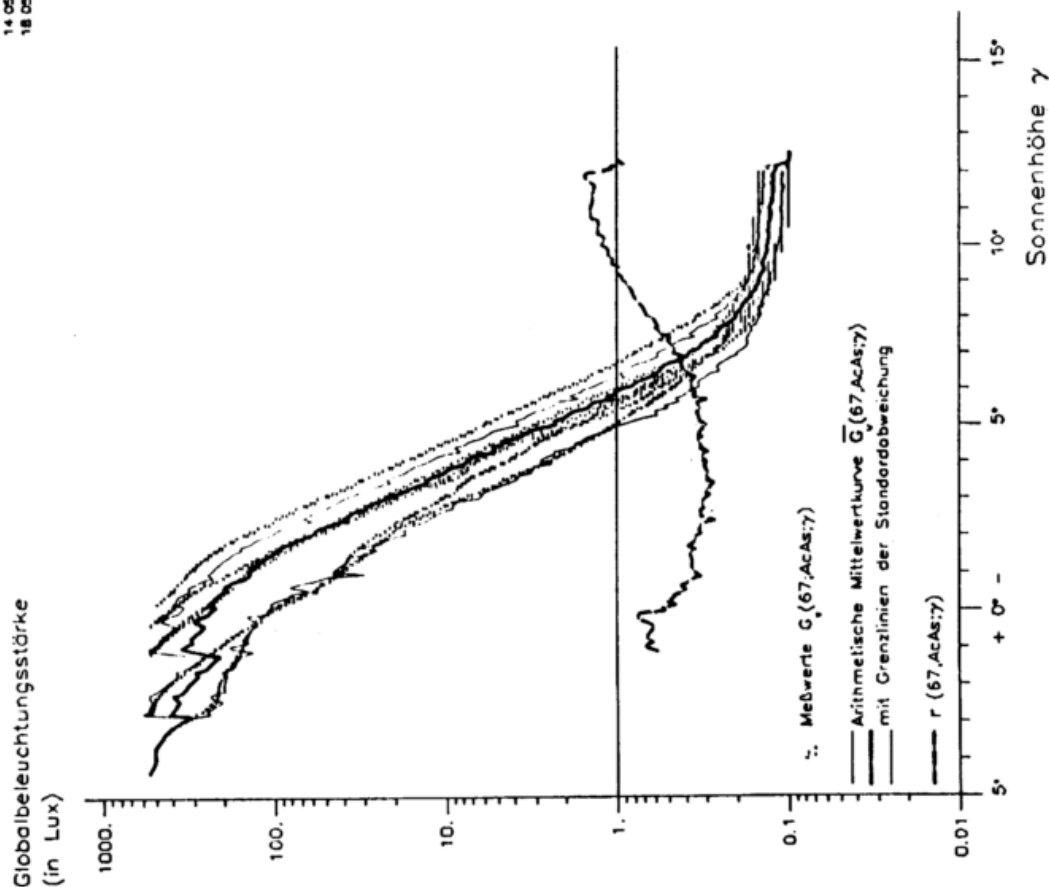


Abb. 28: Globalbeleuchtungsstärke für  $G_V(67;AcAs;\gamma)$   
 AcAs-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 67$

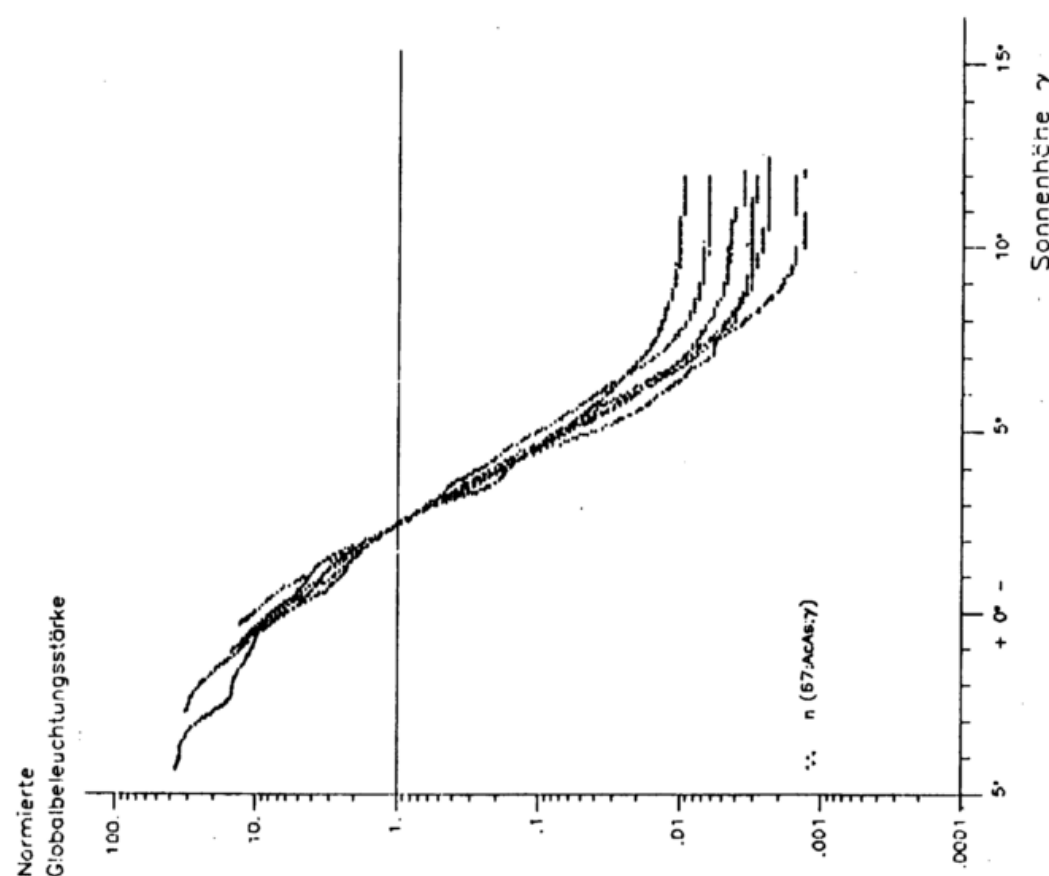


Abb. 29: Normierte Globalbeleuchtungsstärke  
 $n(67;AcAs;\gamma)$  für AcAs-Bedeckungsgrad-  
 klasse  $\Delta N = 67$

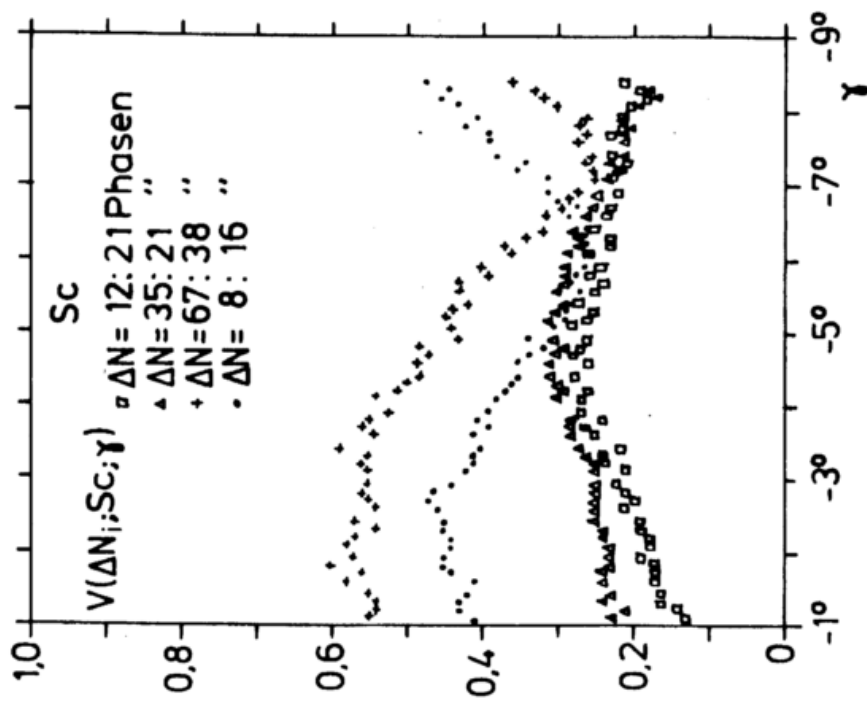


Abb. 30: Variationskoeffizienten für  
Sc-Bewölkung

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen:

12.01.85a
23.01.85a
24.01.85a
22.02.85a
22.05.85a
25.05.85a
07.07.85a
09.07.85a
08.08.85a
06.09.85a
13.10.85a
19.10.85a
11.04.86a
12.04.86a
22.04.86a
06.05.86a
03.07.86a
13.07.86a
14.07.86a
20.07.86a
23.07.86a

3/8 - 5/8 Sc

Globalbeleuchtungsstärke  
(in Lux)

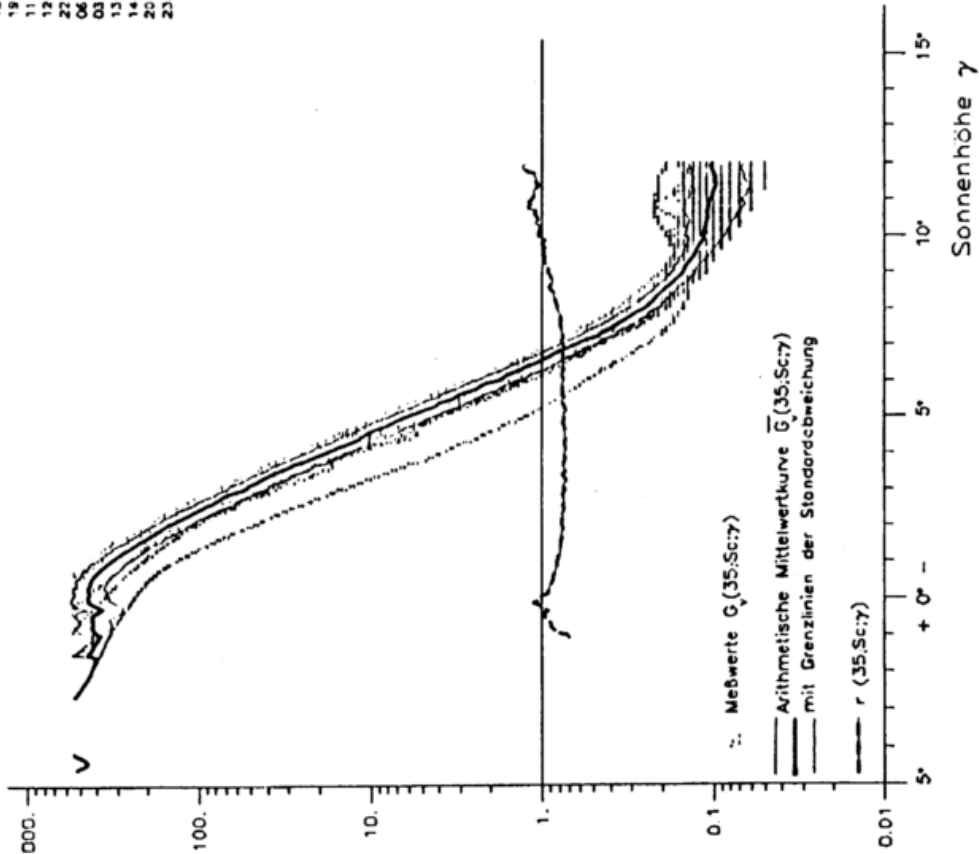


Abb. 31: Globalbeleuchtungsstärke  $G_V(35;Sc;\gamma)$

für Sc-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 35$

3/8 - 5/8 Sc

Normierte  
Globalbeleuchtungsstärke

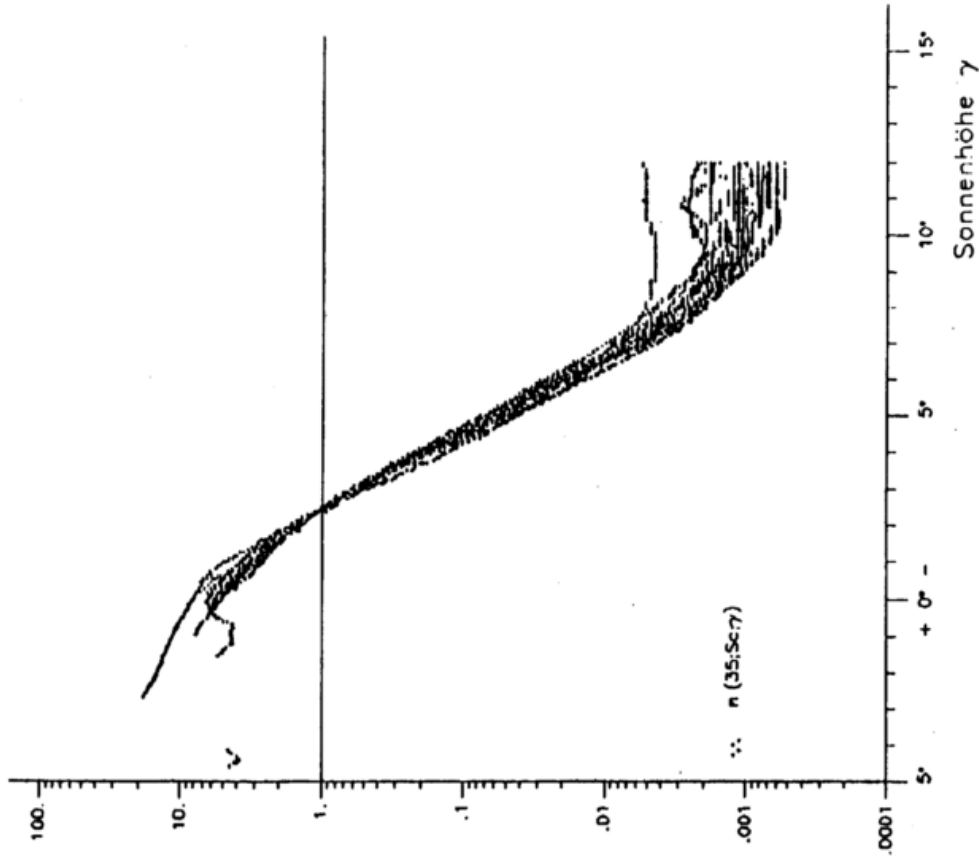


Abb. 32: Normierte Globalbeleuchtungsstärke

$n(35;Sc;\gamma)$  für Sc-Bedeckungsgradklasse

$\Delta N = 35$

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen:

19 10 84<sup>n</sup>  
 22 10 84<sup>n</sup>  
 19 11 84<sup>n</sup>  
 03 12 84<sup>n</sup>  
 12 12 84<sup>n</sup>  
 15 12 84<sup>n</sup>  
 17 12 84<sup>n</sup>  
 02 02 85<sup>n</sup>  
 11 02 85<sup>n</sup>  
 17 02 85<sup>n</sup>  
 23 02 85<sup>n</sup>  
 24 03 85<sup>n</sup>  
 26 03 85<sup>n</sup>  
 03 05 85<sup>n</sup>  
 11 05 85<sup>n</sup>  
 24 05 85<sup>n</sup>  
 03 07 85<sup>n</sup>  
 13 07 85<sup>n</sup>  
 24 07 85<sup>n</sup>  
 01 09 85<sup>n</sup>  
 09 09 85<sup>n</sup>  
 11 09 85<sup>n</sup>  
 16 09 85<sup>n</sup>  
 23 09 85<sup>n</sup>  
 20 10 85<sup>n</sup>  
 21 10 85<sup>n</sup>  
 22 10 85<sup>n</sup>  
 31 10 85<sup>n</sup>  
 21 12 85<sup>n</sup>  
 23 12 85<sup>n</sup>  
 02 01 86<sup>n</sup>  
 06 03 86<sup>n</sup>  
 13 03 86<sup>n</sup>  
 24 02 86<sup>n</sup>  
 09 04 86<sup>n</sup>  
 04 05 86<sup>n</sup>  
 04 07 86<sup>n</sup>  
 15 07 86<sup>n</sup>

6/8 - 7/8 Sc

Globalbeleuchtungsstärke  
(in Lux)

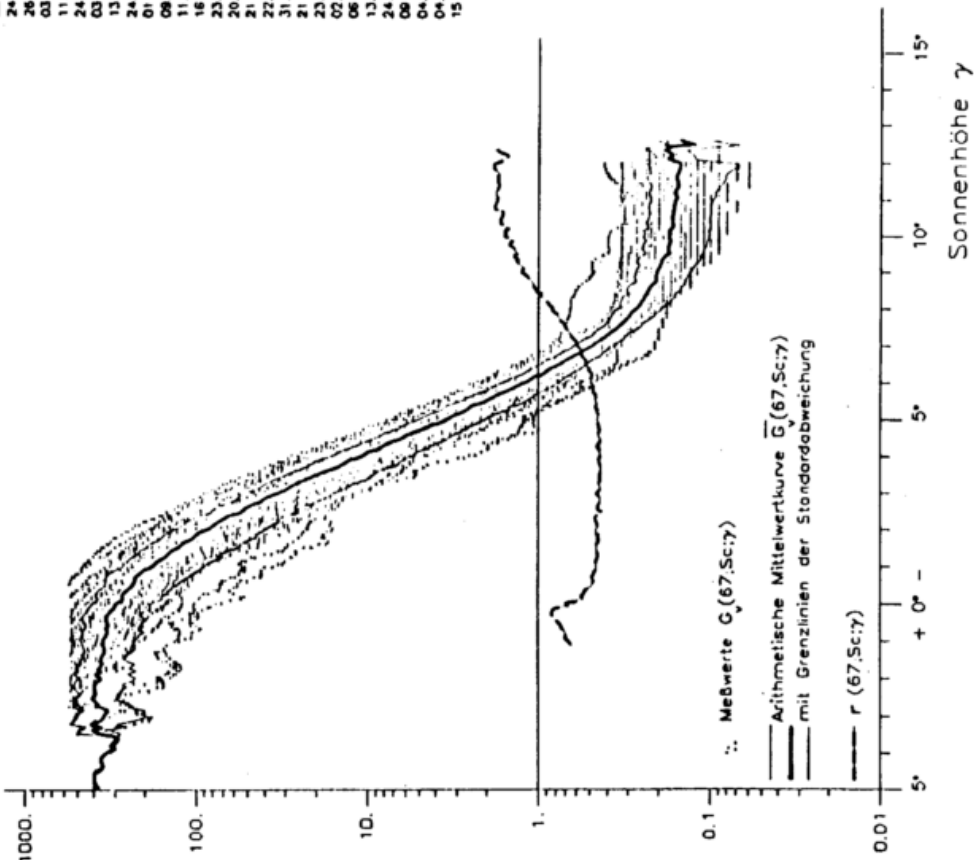


Abb. 33: Globalbeleuchtungsstärke  $G_V(67;Sc;\gamma)$  für Sc-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 67$

6/8 - 7/8 Sc

Normierte  
Globalbeleuchtungsstärke

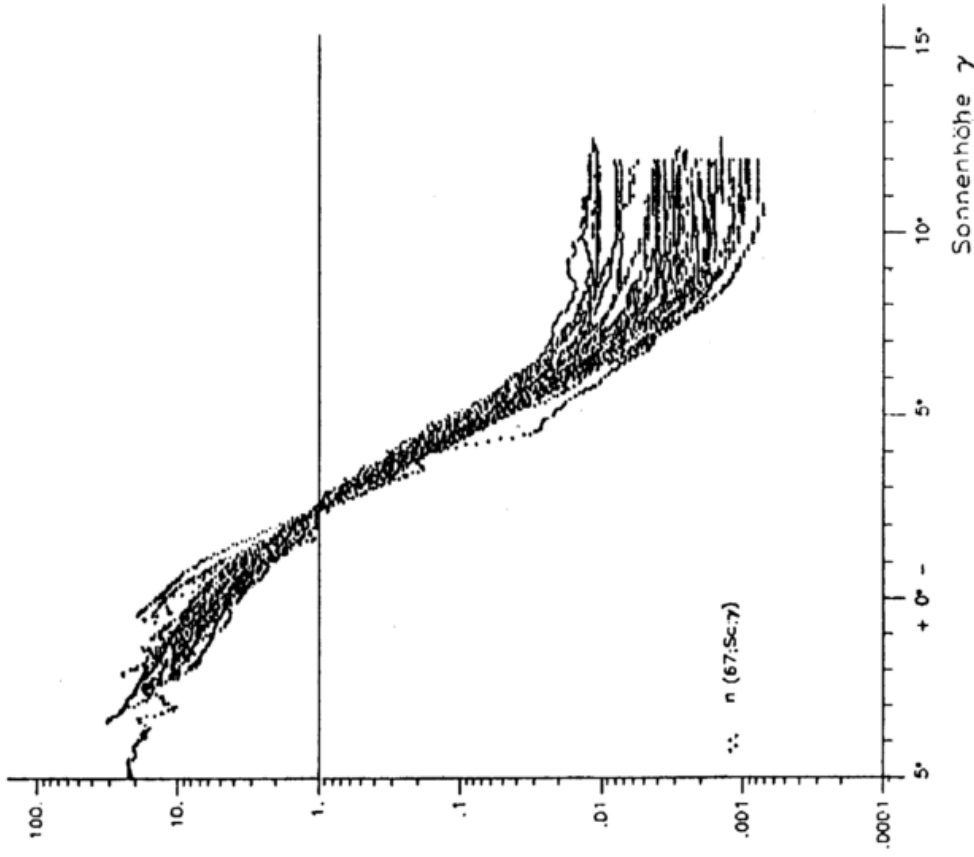


Abb. 34: Normierte Globalbeleuchtungsstärke  $n(67;Sc;\gamma)$  für Sc-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 67$

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen:

- 28.12.94
- 20.01.95
- 27.01.95
- 08.03.95
- 18.03.95
- 21.08.95
- 23.07.95
- 10.09.95
- 31.10.95
- 16.02.96
- 19.02.96
- 11.02.96
- 12.02.96
- 13.02.96
- 16.02.96

> 7/8 Sc

Globalbeleuchtungsstärke  
(in Lux)

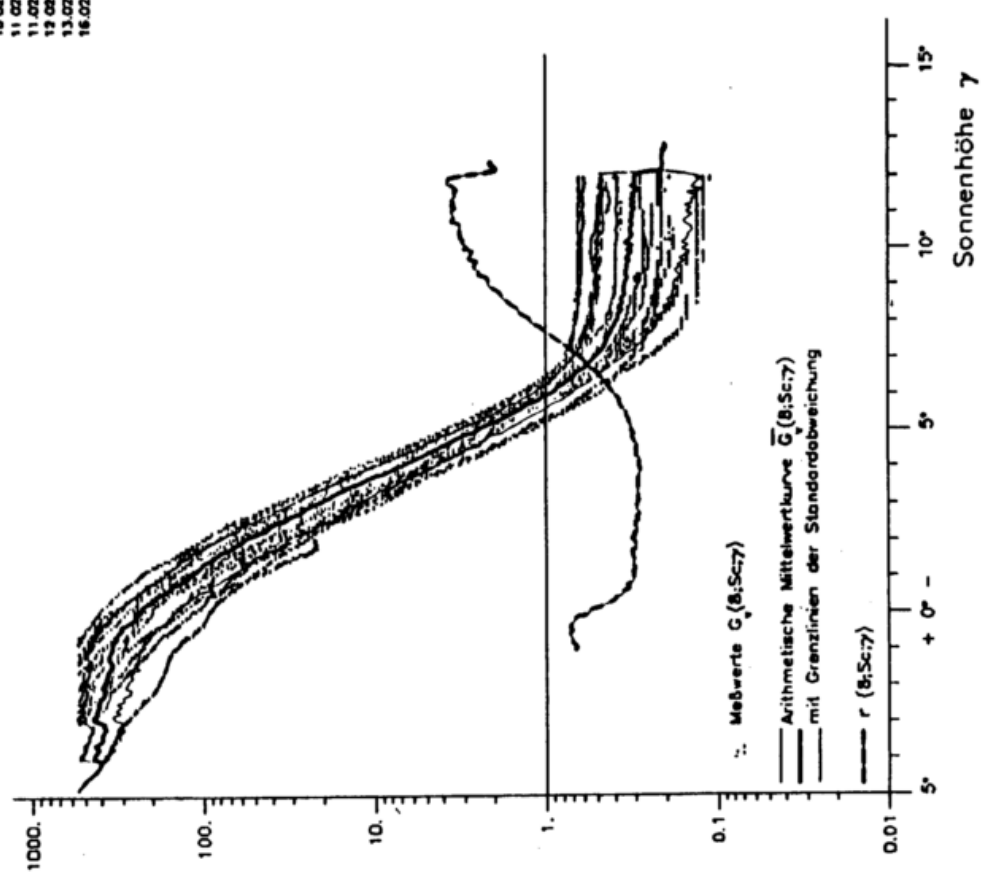


Abb. 35: Globalbeleuchtungsstärke  $G_V(\theta; Sc; \gamma)$  für Sc-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 8$

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen: 14.04.85  
 22.09.85  
 18.11.85  
 14.03.86

>4/8 Sc  
 1/8 - 2/8 St  
 Globalbeleuchtungsstärke  
 (in Lux)

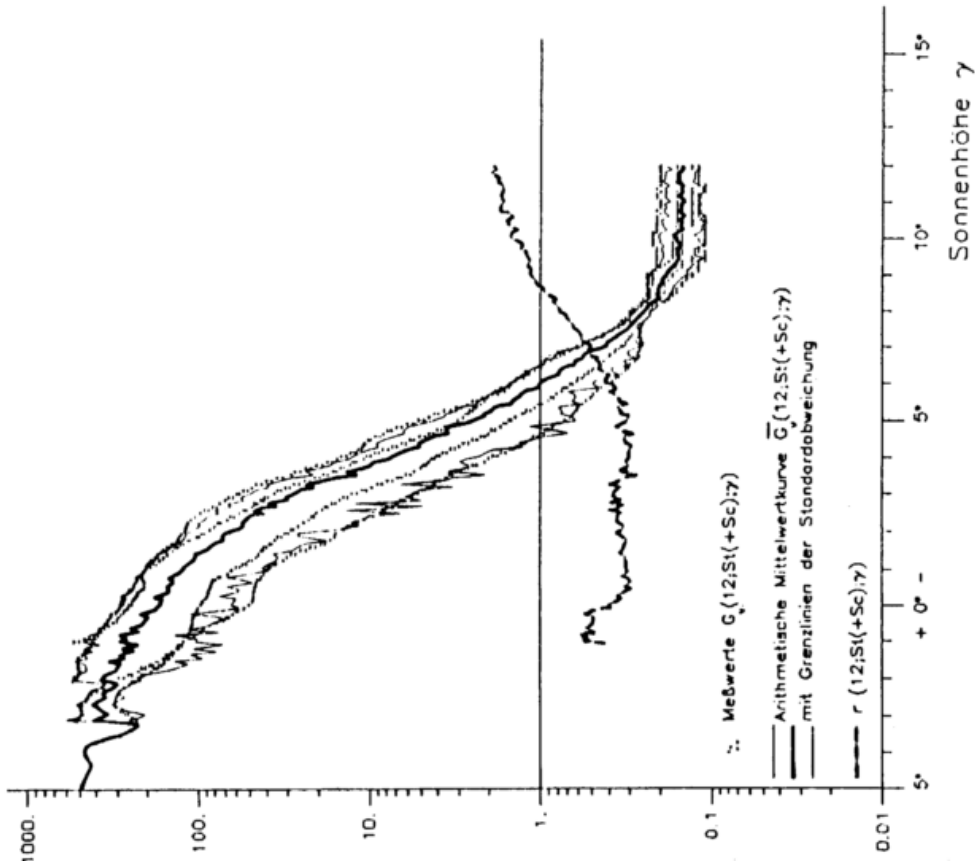


Abb. 36: Globalbeleuchtungsstärke für St-Bedeckungs-  
 gradklasse  $\Delta N = 12$  (mit Sc-Bedeckungsgrad  
 > 4)

>4/8 Sc  
 1/8 - 2/8 St  
 Normierte  
 Globalbeleuchtungsstärke

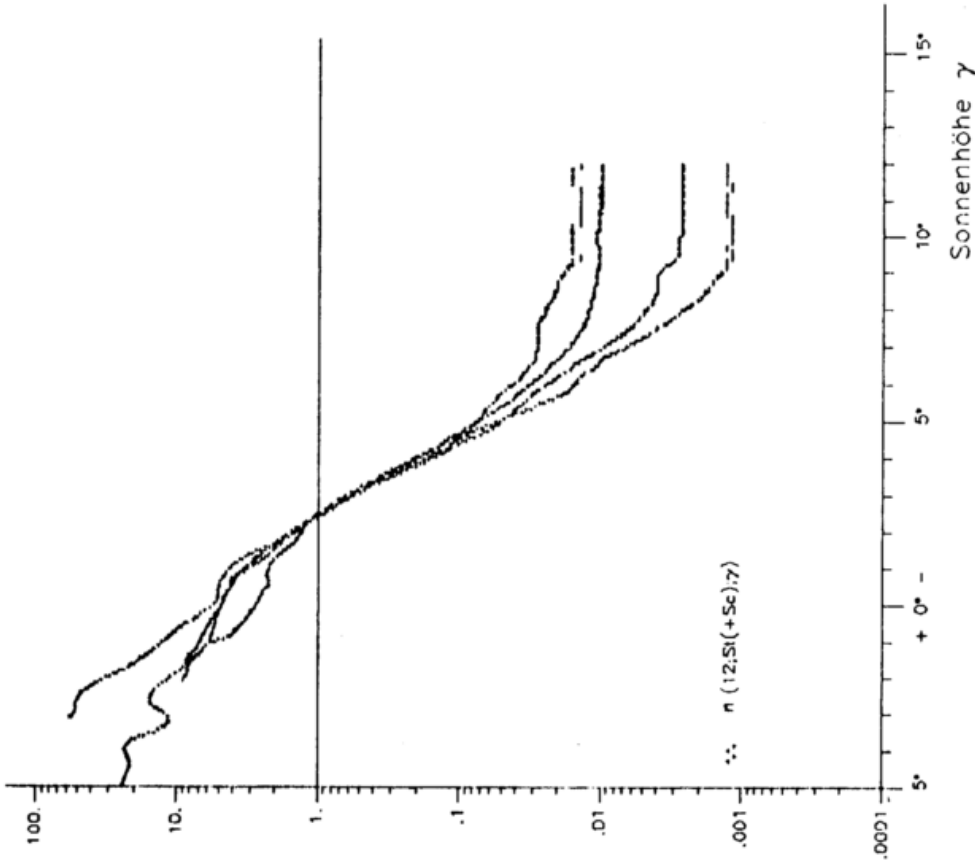


Abb. 37: Normierte Globalbeleuchtungsstärke für  
 St-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 12$  (mit  
 Sc-Bedeckungsgrad > 4)

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen: 31.10.84  
 11.08.85  
 19.08.85  
 11.01.86

3/8 - 5/8 St

Globalbeleuchtungsstärke  
 (in Lux)

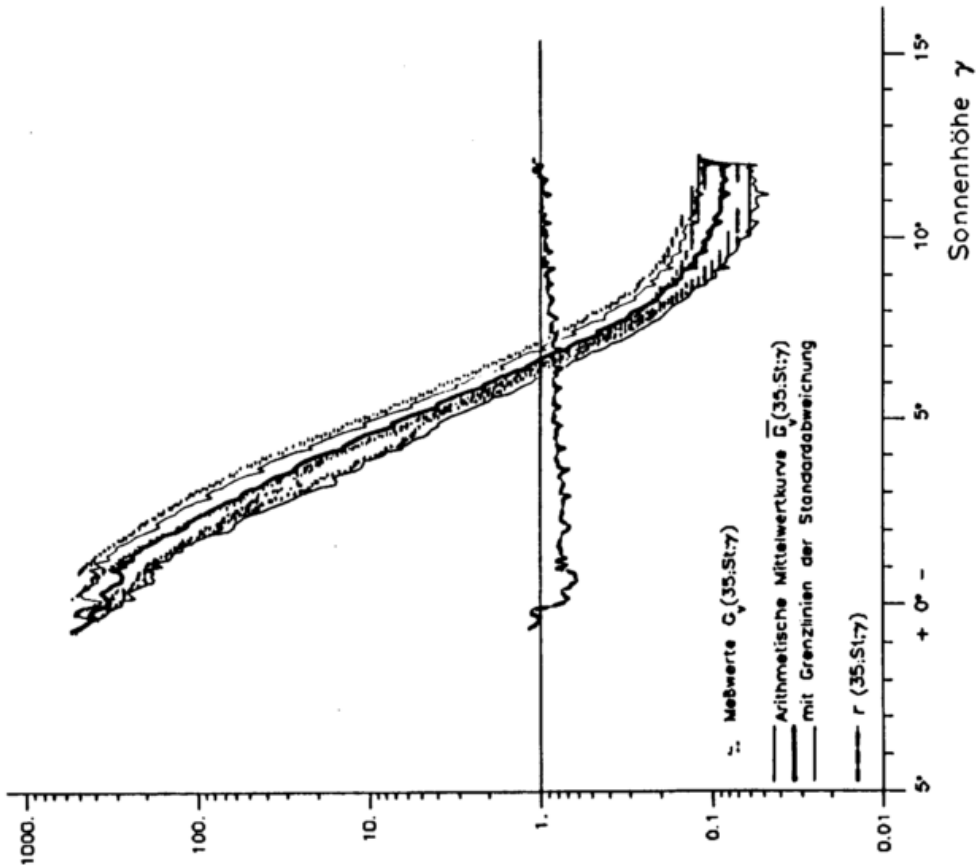


Abb 38: Globalbeleuchtungsstärke  $G_v(35;St;\gamma)$   
 für St-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 35$

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen: 03.12.84  
 31.12.84  
 22.02.85  
 08.03.85  
 28.08.85  
 30.07.85  
 19.01.86  
 04.06.86

>4/8 Sc  
 3/8 - 5/8 St

Globalbeleuchtungsstärke  
 (in Lux)

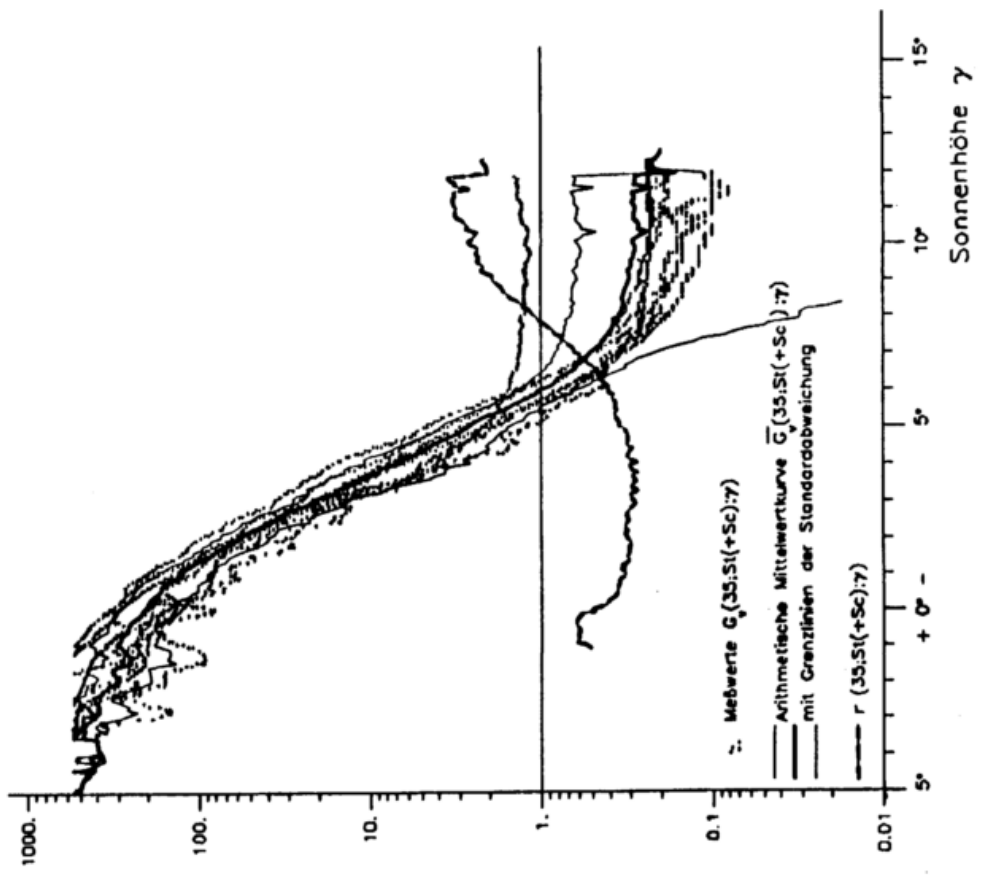


Abb. 39: Wie Abb. 38, aber zusätzlich mit Sc-Bewölkung  
 ( $\Delta N > 4$ )

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen:

02.11.84
15.12.84
01.01.85
28.01.85
29.01.85
16.02.85
09.05.85
03.10.85
14.10.85
23.10.85
27.10.85
23.12.85
30.12.85
04.01.86
09.03.86
11.03.86
04.07.86

6/8 - 7/8 St

Globalbeleuchtungsstärke  
(in Lux)

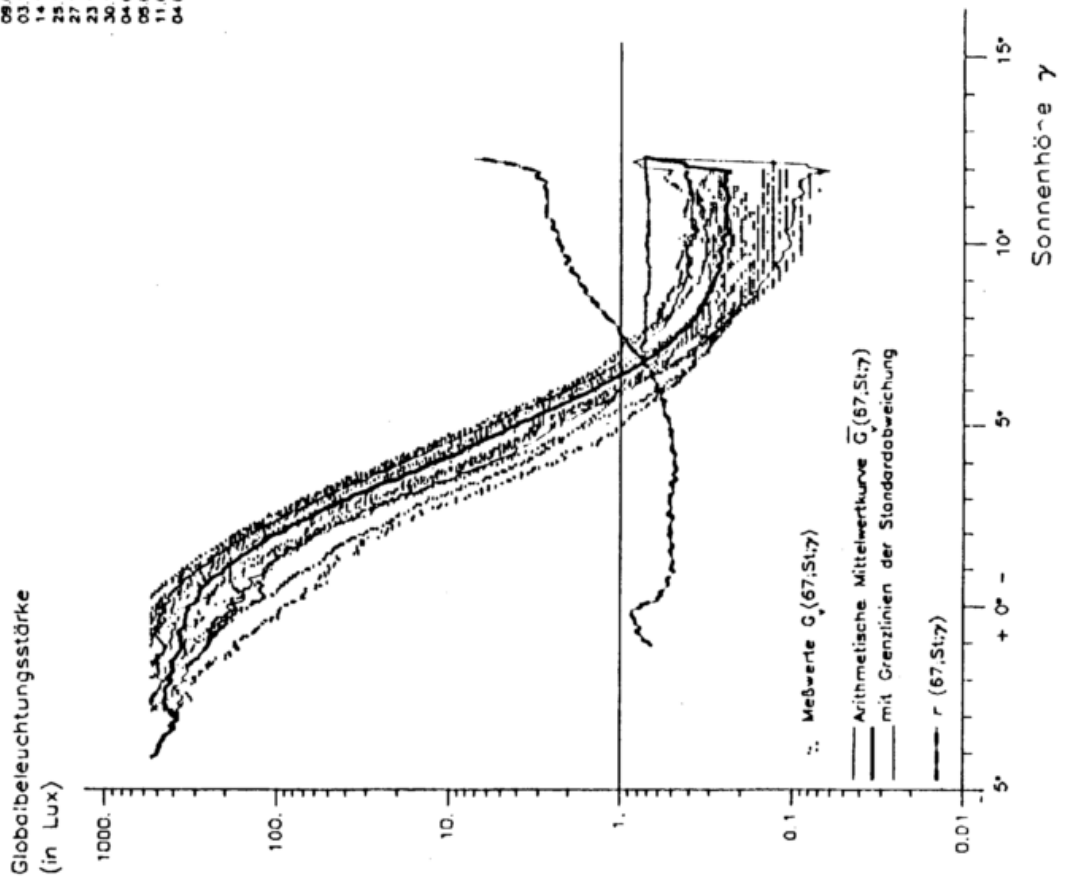


Abb. 41: Globalbeleuchtungsstärke  $G_v(67;St;\gamma)$   
für St-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 67$

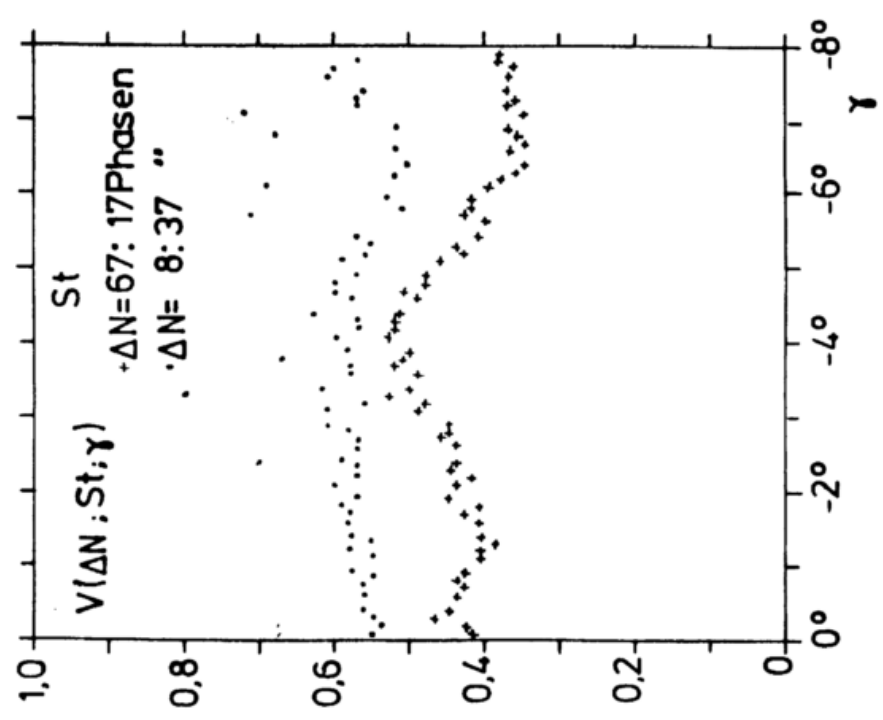


Abb. 40: Variationskoeffizienten für  
St-Bewölkung

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen:

29.10.84
09.11.84
09.11.84
20.11.84
04.12.84
05.12.84
05.12.84
06.12.84
08.12.84
29.12.84
01.01.85
08.01.85
19.01.85
19.01.85
20.01.85
21.02.85
25.02.85
26.02.85
01.03.85
11.03.85
07.04.85
10.04.85
13.11.85
15.11.85
30.12.85
31.01.86
31.01.86
01.02.86
01.02.86
02.02.86
02.02.86
11.03.86
14.03.86
04.04.86
08.04.86
27.04.86
20.06.86
25.06.86

> 7/8 St

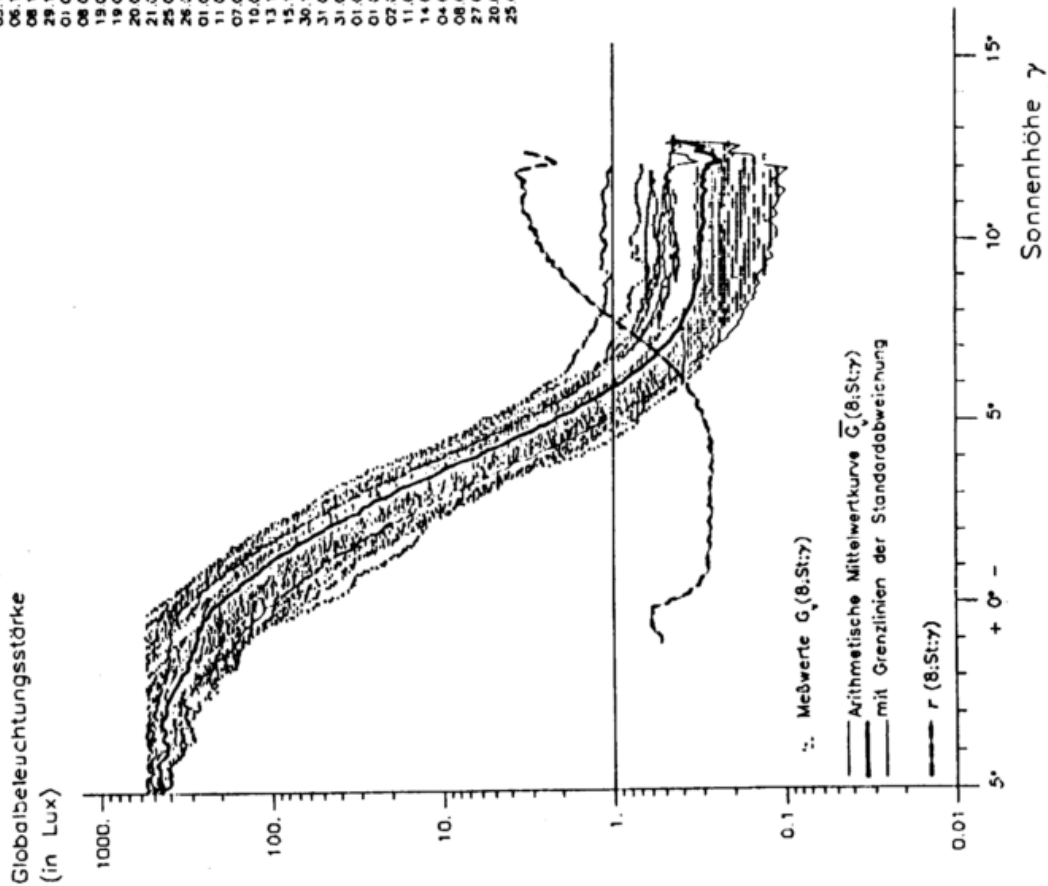


Abb. 42: Globalbeleuchtungsstärke  $G_v(\beta;St;\gamma)$  für St-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 8$

> 7/8 St

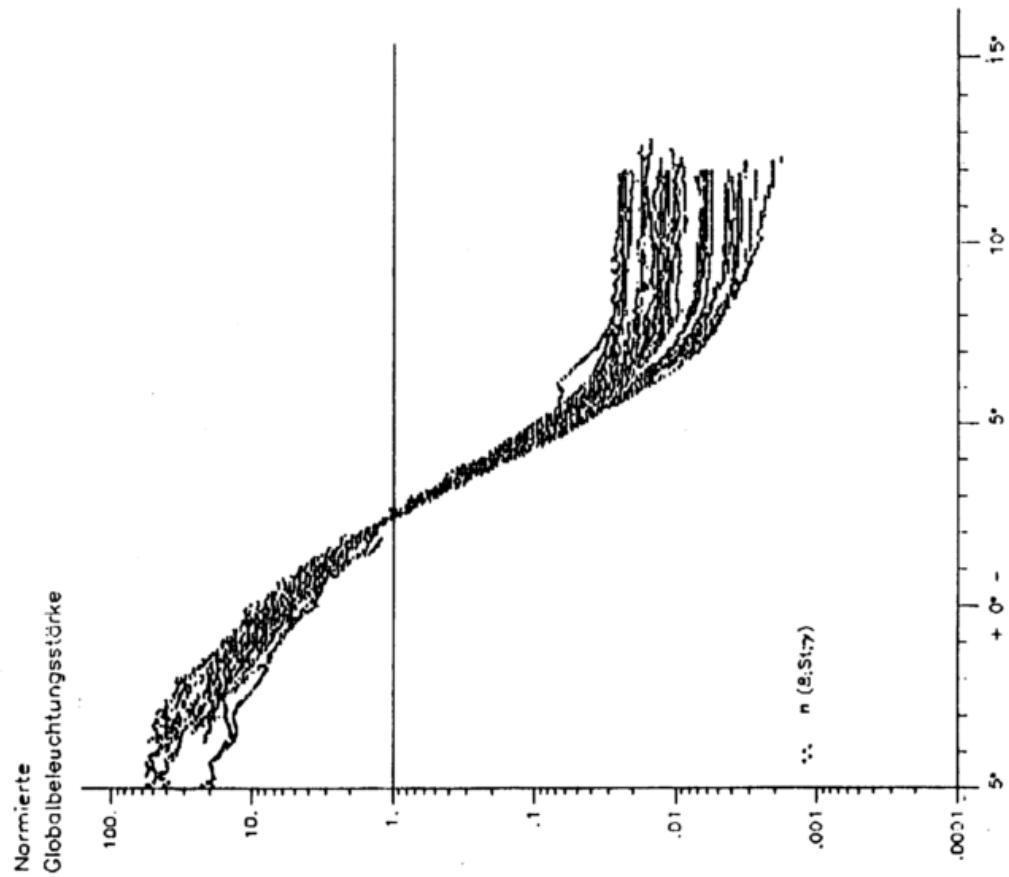


Abb. 43: Normierte Globalbeleuchtungsstärke  $n(\beta;St;\gamma)$  für St-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 8$

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen: 20.10.85\*  
 05.01.85\*  
 16.03.85\*  
 07.07.85\*  
 29.10.85\*

1/8 - 2/8 Cu

Globalbeleuchtungsstärke  
 (in Lux)

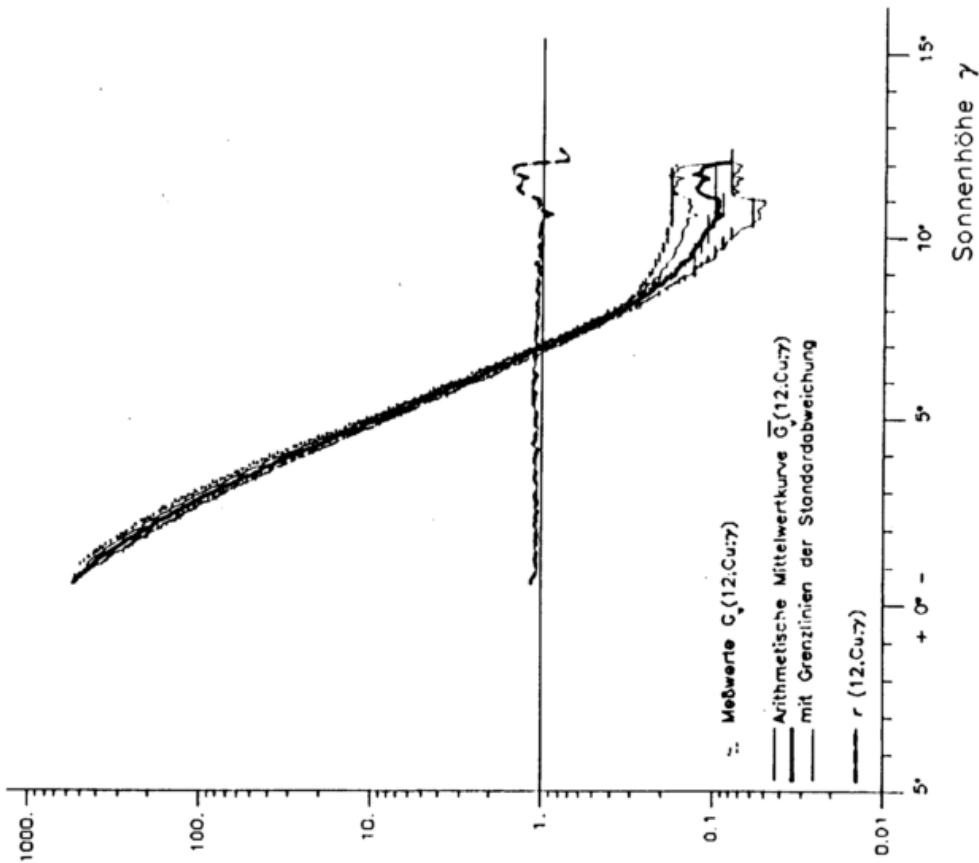


Abb. 44: Globalbeleuchtungsstärke  $G_v(12;Cu;\gamma)$   
 für Cu-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 12$

Liste der verarbeiteten Dämmerungsphasen: 06.07.85\*  
 12.06.85\*  
 06.08.85\*  
 13.09.85\*  
 04.08.85\*

AcAsCiCsCc  
 1/8 - 2/8 Cu  
 Globalbeleuchtungsstärke  
 (in Lux)

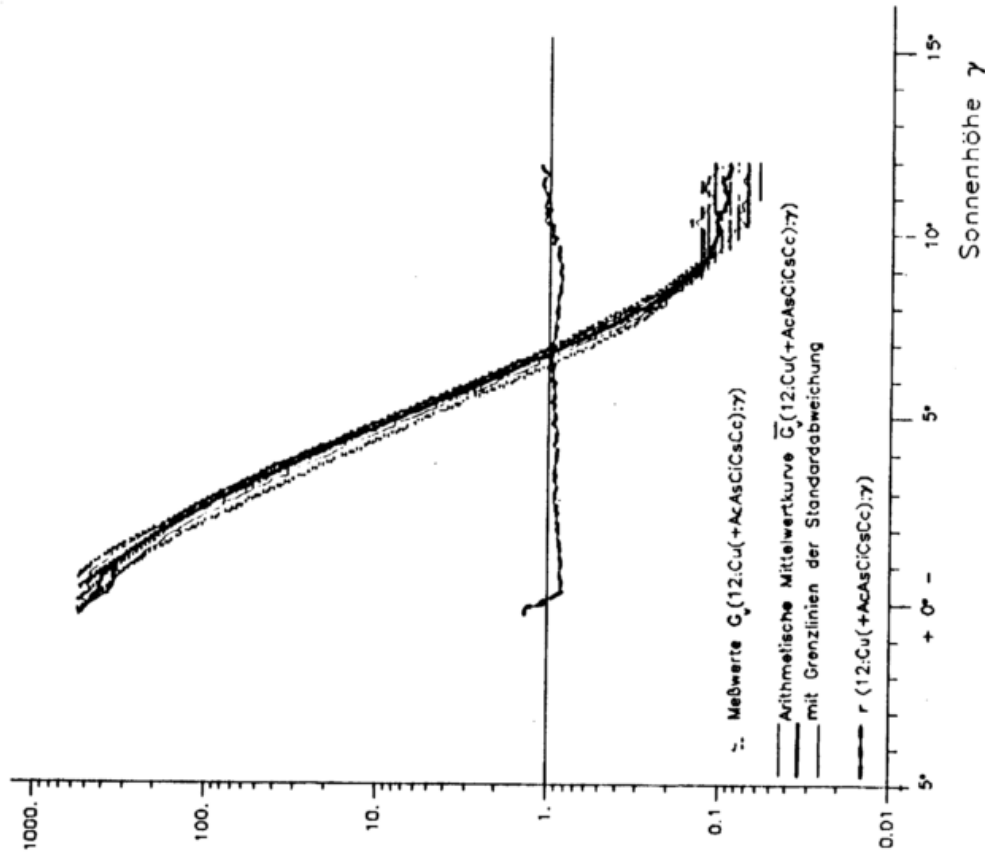
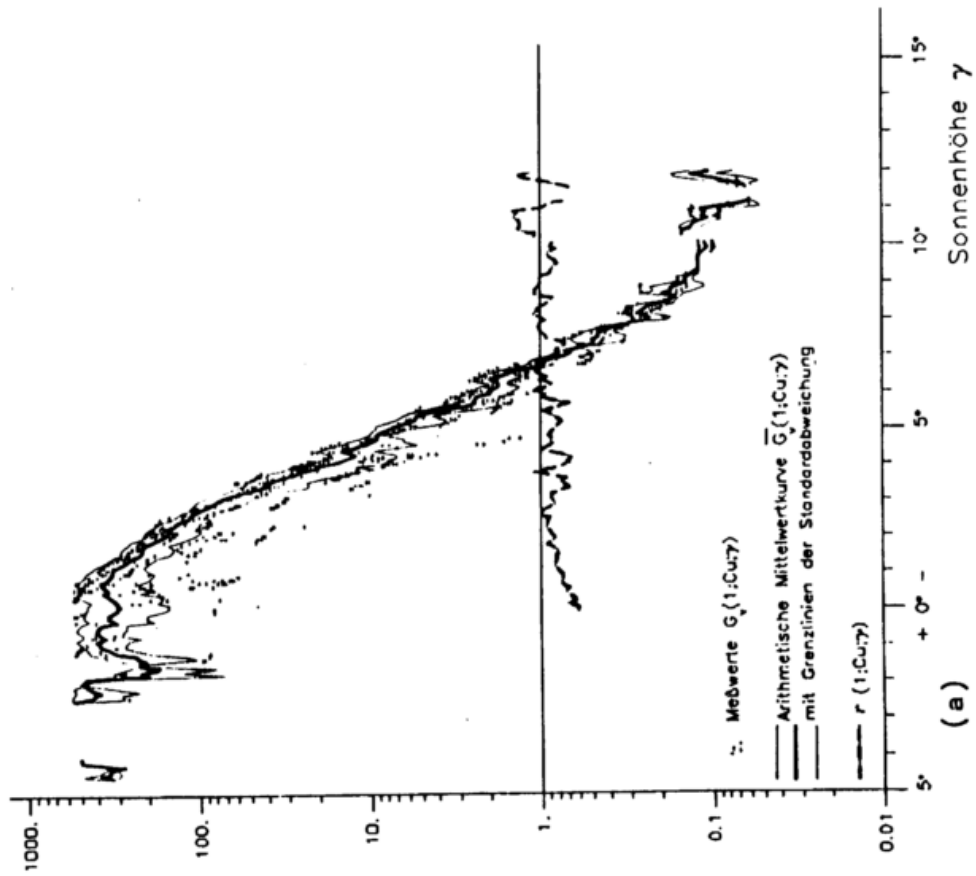
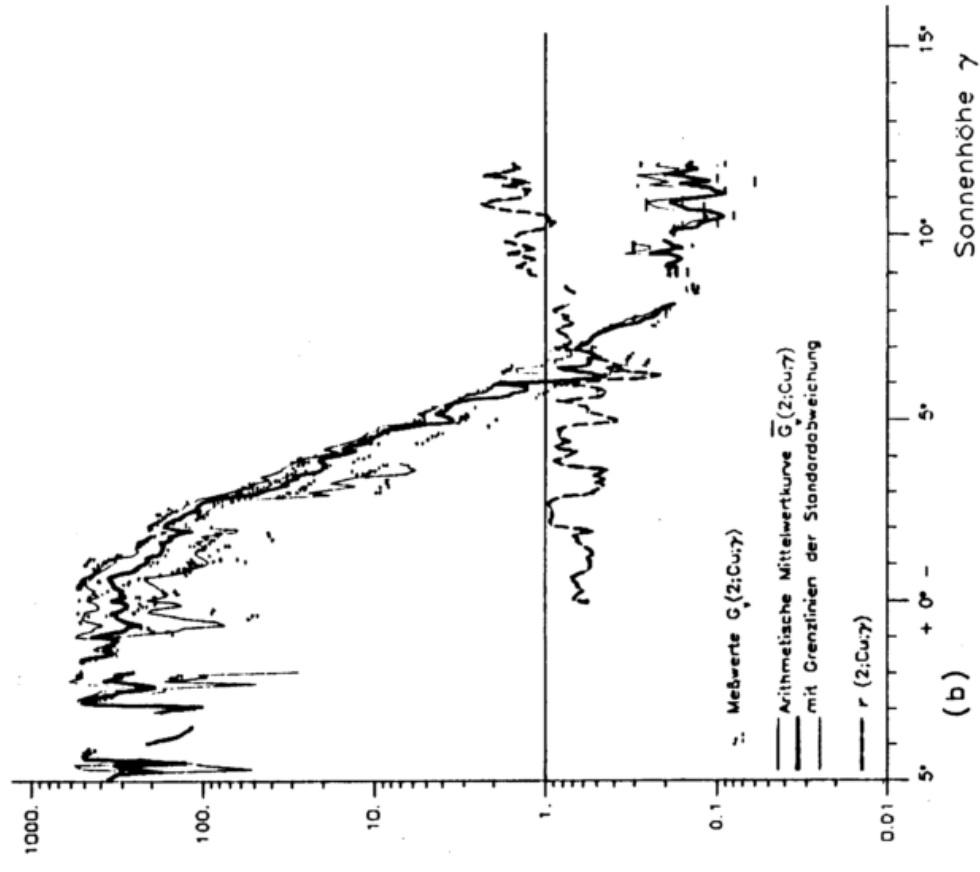


Abb. 45: Wie Abb. 44, aber zusätzlich mit hoher  
 und mittelhoher Bewölkung

1/8 Cu

Globalbeleuchtungsstärke  
(in Lux)

2/8 Cu

Globalbeleuchtungsstärke  
(in Lux)Abb. 46: wie Abb. 44, aber nach punktwiseiger Auswertung für  $N = 1$  (a) und  $N = 2$  (b)

3/8 - 5/8 Cu

Globalbeleuchtungsstärke  
(in Lux)

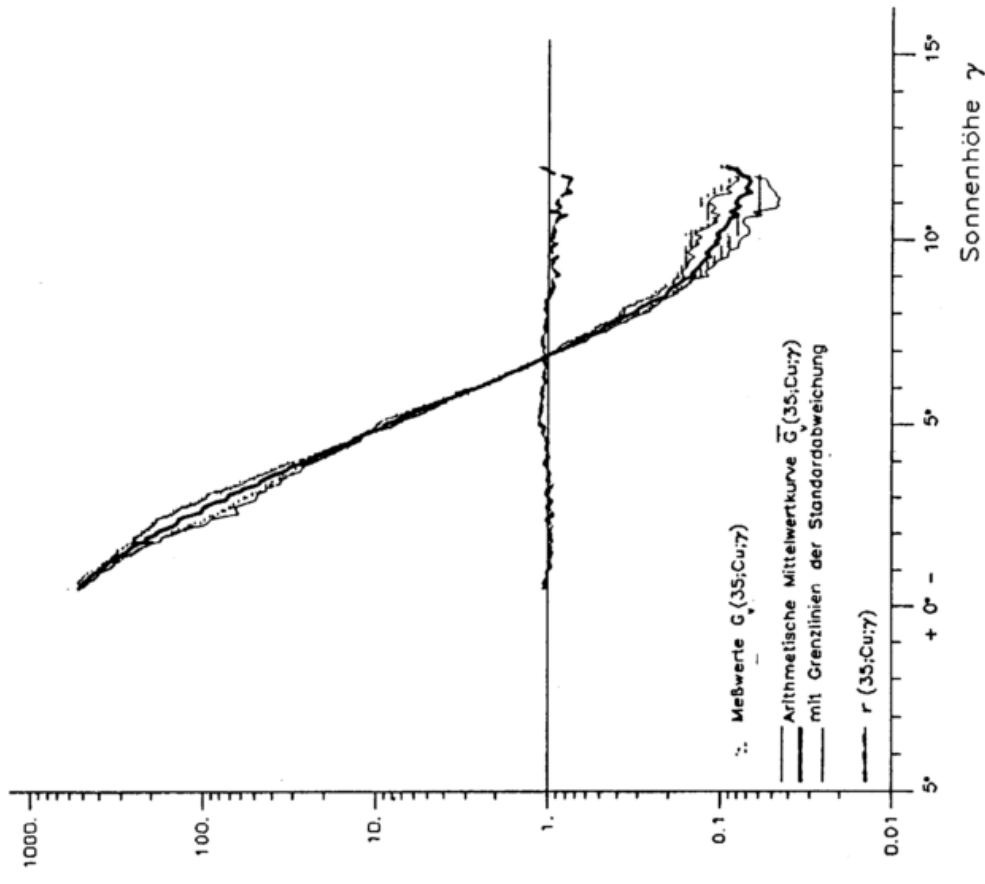


Abb. 47: Globalbeleuchtungsstärke  $G_v(35;Cu;7)$   
für Cu-Bedeckungsgradklasse  $\Delta N = 35$

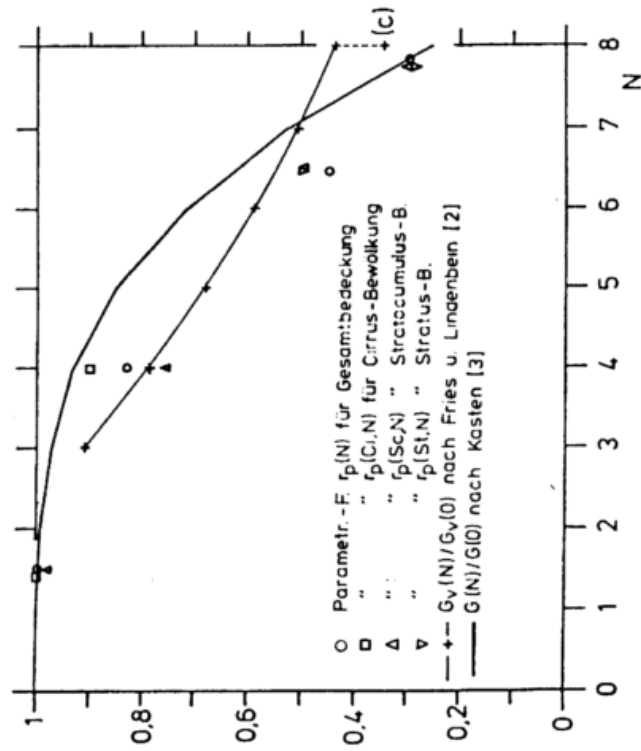


Abb. 48: Abhängig der parametrisierten relativen Globalbeleuchtungsstärke  $r_p$  vom Bedeckungsgrad  $N$  sowie entsprechende aus [2] abgeleitete Werte. Zum Vergleich: Mittlere relative Globalbeleuchtungsstärke am Tage nach [3]

