

Michael Weber*

Die Berechnung des Sonnenstandes und der Dämmerungshelligkeit

Zusammenfassung

Behauptet ein Unfallbeteiligter, daß er durch die Sonne derart geblendet wurde, daß dies mitverantwortlich für ein mögliches Fehlverhalten war, so steht der Sachverständige vor dem Problem, den Sonnenstand zum Unfallzeitpunkt ermitteln zu müssen. Ein aus physikalischer Sicht eng verwandtes Problem stellt die Ermittlung der Dämmerungshelligkeit dar, die ebenfalls zu den relevanten Begleitumständen eines Unfalls zählen kann. Zur Beantwortung beider Fragestellungen wird in diesem Aufsatz eine geschlossene mathematische Lösung vorgestellt, die gut auf einem Rechner programmiert werden kann und die Verwendung von Diagrammen und Tabellen überflüssig werden läßt.

Summary

If one of the opponents involved in a traffic accident claims that the dazzling sun had a major influence on his possible failure, the consulted expert has to evaluate the position of the sun at the time of the accident. From a physical point of view the evaluation of the intensity of light during dusk or dawn is a related problem. The intensity of light also belongs to the relevant circumstances of a traffic accident. This paper presents a mathematical solution for both of the two mentioned problems, which can be programmed easily.

1 Einführung

Bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen treten häufig Problemstellungen auf, die mit dem Sonnenstand an der Unfallstelle zusammenhängen. Dabei handelt es sich einmal um die zu untersuchende Blendung eines Verkehrsteilnehmers und zum anderen um die retrospektive Bestimmung der Dämmerungshelligkeit zur Unfallzeit am Unfallort.

Bisher werden diese Werte aus Tabellen und Diagrammen meist ohne exakte Berücksichtigung des genauen Ortes und der jahreszeitlichen Unterschiede bestimmt. Auch lagen bisher keine umfassenden Untersuchungen über den Einfluß der Bewölkung auf den Helligkeitsverlauf in der Dämmerungsphase vor. Die Bestimmung des Sonnenstandes erfolgt in aller Regel auf grafischem Wege. Diese Methode ist zeitaufwendig und fehlerträchtig.

In diesem Aufsatz wird zunächst die geschlossene mathematische Lösung für die Sonnenstandsbestimmung in horizontaler und vertikaler Richtung abgeleitet. Nach der Ermittlung des Höhenwinkels der Sonne zum Unfallzeitpunkt ist dann die Bestimmung der Dämmerungshelligkeit unabhängig von der Jahreszeit möglich. Der Bewölkungseinfluß wurde in einer aufwendigen Meßreihe vom Deutschen Wetterdienst als zweiter wichtiger Parameter untersucht. Diese Meßergebnisse werden im zweiten Teil des Aufsatzes für die forensische Praxis aufbereitet. Hierzu werden zunächst Bewölkungsgruppen zusammengefaßt, die einen ähnlichen Dämmerungsverlauf aufweisen. Dies führt bei nur geringen Genauigkeitseinbußen zu einer wesentlichen Vereinfachung der Helligkeitsbestimmungen. Für die sich dabei ergebenden drei Fälle werden mathematische Formeln erarbeitet, die entsprechend der forensischen Anforderungen die Grenzkurven, also für den Betroffenen den denkbar günstigsten und denkbar ungünstigsten Dämmerungsverlauf darstellen.

Mit den in diesem Aufsatz vorgestellten Berechnungsformeln ist die Erstellung eines Rechenprogramms möglich, das sekundenschnell die Beschaffung aller relevanten Daten ermöglicht.

*Dipl.-Ing. Michael Weber, Sachverständiger im Ing.-Büro Schimmelpfennig + Becke, Münsterstraße 101, 4400 Münster-Wolbeck

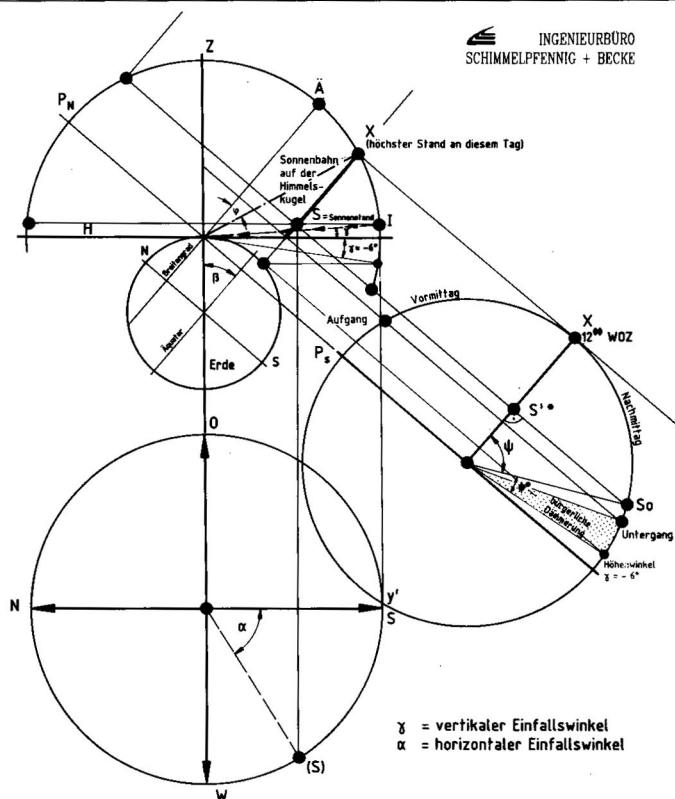


Bild 1 Grafische Rekonstruktion des Sonnenstandes
Fig. 1 Graphical determination of the sun-position

2 Mathematische Herleitung

2.1 Grafische Sonnenstandsbestimmung

In [1] sind die astronomischen Grundgrößen und die Vorgehensweise bei der grafischen Lösung ausführlich vorgestellt. Auf eine Wiederholung wird deshalb verzichtet. Das in diesem Aufsatz angegebene Berechnungsbeispiel ist allerdings fehlerbehaftet. Bei richtiger Rechnung ergibt sich ein Höhenwinkel von 9° statt 5° und ein Azimut von 59° statt 66°.

Die auf das Horizontsystem des Beobachters bezogene grafische Lösung ist in Bild 1 anschaulich und nachvollziehbar dargestellt. Die damit ermittelten Koordinaten beziehen sich auf das Sonnenzentrum und gelten streng genommen für den Erdmittelpunkt. Auf eine Umrechnung auf die Erdoberfläche kann aber verzichtet werden, da die Differenz nur im Winkelsekundenbereich liegt.

2.2 Aufbereitung der Eingangsgrößen

In die Berechnung fließt der Breiten- und Längengrad des Beobachtungsortes und der Beobachtungszeitpunkt in Form von Datum und Uhrzeit ein. Aus dem Beobachtungszeitpunkt lassen sich Deklination δ und die Zeitdifferenz Δt zwischen gesetzlicher Zeit und wahrer Ortszeit bestimmen.

Setzt man eine Genauigkeit im Winkelminutenbereich voraus, kann die Deklination als Funktion der Anzahl der Tage ab Jahresbeginn ΣT parametrisiert werden.¹

$$\sin \delta = 0,9397 \cdot \sin [0,9856 \cdot \Sigma T - 80,09] + 1,92 \cdot \sin (0,9856 \cdot \Sigma T - 2,72) \quad (1)$$

Bei der Programmierung auf einem PC empfiehlt sich anstelle von Gl. (1) die Verwendung eines genaueren Rechenverfahrens, das astronomischen Fachbüchern entnommen werden kann.

Bekanntlich entspricht die gesetzliche Zeit, in unseren Breiten MEZ oder MESZ, nur selten der wahren Ortszeit, bei der die Sonne kulminiert, also exakt im Meridian des Beobachtungsortes steht. Zum einen muß eine Zeitumrechnung für die Winkeldifferenz zwischen Beobachtungsort und Bezugsmeridian² der gesetzlichen Zeit erfolgen, zum anderen ist der Zeitausgleich zwischen wahrer Sonnenzeit und mittlerer Sonnenzeit³ nach der Näherungsformel

$$Z = 0,51 \cdot \cos \chi - 3,197 \cdot \cos (2 \cdot \chi) - 0,106 \cdot \cos (3 \cdot \chi) - 0,15 \cdot \cos (4 \cdot \chi) - 7,317001 \cdot \sin \chi - 9,471001 \cdot \sin (2 \cdot \chi) - 0,391 \cdot \sin (3 \cdot \chi) - 0,242 \cdot \sin (4 \cdot \chi) + 8,000001 \cdot 10^{-3}$$

mit (2)

$$\chi = 2 \cdot \pi \cdot \Sigma T \quad (3)$$

zu berücksichtigen. Bei Gl. (2) handelt es sich um die ersten Glieder einer Fourierreihenentwicklung der im Jahresrhythmus periodischen Funktion $Z(\Sigma T)$. Die Gln. (1) und (2) sind in Bild 2 grafisch über der Tagesanzahl aufgetragen. Dann errechnet sich die wahre Ortszeit WOZ zu

$$WOZ = GZ - \Delta t \quad (4)$$

$$\Delta t = (\lambda_0 - \lambda) \cdot 4 \frac{\text{min}}{\circ} - Z$$

Jetzt kann der für die geometrische Betrachtung wichtige Stundenwinkel ψ sofort angegeben werden. Da pro Stunde 15° Erddrehung zurückgelegt werden, gilt

$$\psi = \frac{WOZ - 12 h}{15 \frac{\circ}{h}} \quad (5)$$

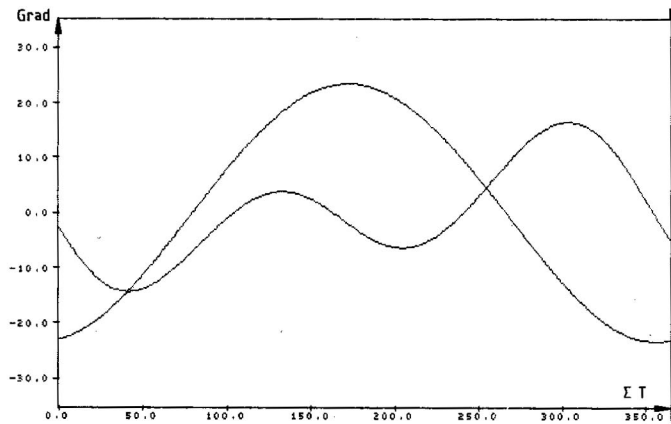


Bild 2 Verlauf des Zeitausgleichs und der Deklination innerhalb eines Jahres
Fig. 2 Time compensation and declination during the year

2.3 Entwicklung der Winkelbeziehungen

In Bild 3 sind der »Einheitskreis«, die Horizontebene H , der Breitengrad des Beobachtungsortes und die Deklination der Sonne für einen Wintertag eingetragen. Der Kreis um den Punkt (1) stellt die Sonnenbahn für den untersuchten Tag und Ort dar. Sein Radius beträgt $\cos \delta$. Nach Bestimmung der Hilfsstrecke

$$c = \tan \beta \cdot \sin \delta \quad (6)$$

folgt unmittelbar der Stundenwinkel für Sonnenaufgang und -untergang.

$$\cos \tau = \tan \beta \cdot \tan \delta \quad (7)$$

Ist $|\tan \beta \cdot \tan \delta| > 1$, was nur jenseits der Polarkreise möglich ist, stellt sich bei entsprechender Deklination kein Sonnenaufgang bzw. -untergang mehr ein, es gilt

für $\tan \beta \cdot \tan \delta < -1$ erfolgt kein Sonnenaufgang
für $\tan \beta \cdot \tan \delta > +1$ erfolgt kein Sonnenuntergang.

Die weiteren Formeln bleiben aber von dieser Einschränkung unberührt. In Bild 4 ist an den Kreis der Sonnenbahn mit Kulmination (X) der Stundenwinkel ψ des Untersuchungszeitpunktes angetragen. Mit den Hilfsgrößen in Bild 4 lassen sich die gesuchten Beziehungen für den Höhenwinkel γ unschwer entwickeln.

$$\cos \psi = \frac{c + e}{\cos \delta} \quad (8)$$

folgt die Hilfsstrecke

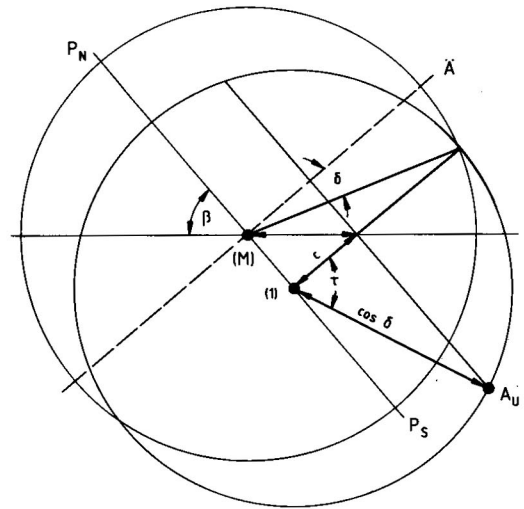


Bild 3 Winkelbeziehung zwischen geografischer Breite, Sonnendeklination und Stundenwinkel des Sonnenuntergangs

Fig. 3 Trigonometric relation between latitude, solar declination and angle of sunset

$$e = \cos \psi \cdot \cos \delta - \tan \beta \cdot \sin \delta. \quad (9)$$

Da die geografische Breite β an (S) wieder auftaucht, ergibt sich der Höhenwinkel γ zu

$$\cos \beta = \frac{\sin \gamma}{e} \quad (10)$$

$$\sin \gamma = \cos \beta \cdot \cos \psi \cdot \cos \delta + \sin \beta \cdot \sin \delta$$

Wird die Ebene durch die Punkte (2) und (Y) in Bild 4 in die Zeichenebene geklappt, kann auch der Azimut der Sonne berechnet werden. Die geometrischen Beziehungen mit den Hilfsgrößen f, d liefern für den Winkel α zwischen Horizontebene und Sonnenzentrum

$$\cos \alpha = \frac{f + d}{\cos \gamma} \quad (11)$$

$$f = \tan \beta \cdot \sin \gamma \rightarrow d = \frac{\sin \delta}{\cos \beta} \quad (12)$$

$$\cos \alpha = \tan \beta \cdot \tan \gamma + \frac{\sin \delta}{\cos \beta \cdot \cos \gamma} \quad (13)$$

Mit Hilfe der Gln. (1 - 13) können die Sonnenposition und die heliozentrischen Sonnenaufgangs- und Sonnenuntergangszeitpunkte für beliebige Orte der Erde ohne Verwendung von Diagrammen und Tabellen mit einer Genauigkeit im Bereich von Winkelminuten bestimmt werden.

3 Dämmerungshelligkeit

3.1 Bestehende Problematik

Der wichtigste Einflußparameter auf den Dämmerungsverlauf ist der Höhenwinkel der Sonne unterhalb der Horizontebene des Beobachtungsortes. In [2, 3] sind Diagramme zum Dämmerungsverlauf vorgestellt, die auf einer Untersuchung basieren, die 1938 durchgeführt wurde. Diese Untersuchung weist den prinzipiellen Nachteil auf, daß der Helligkeitsverlauf über der Zeit statt der Sonnenhöhe angegeben ist und es sich außerdem um Mittelwerte handelt. In [3] wurden die Ephemeriden der Sonnenhöhe aus [2] grafisch aufgetragen. Die kürzesten Phasen der Dämmerung ergeben sich für die Frühlings- und Herbstpunkte (Äquatordurchgang) der Sonne und die längsten für die Wendepunkte der Sonne.

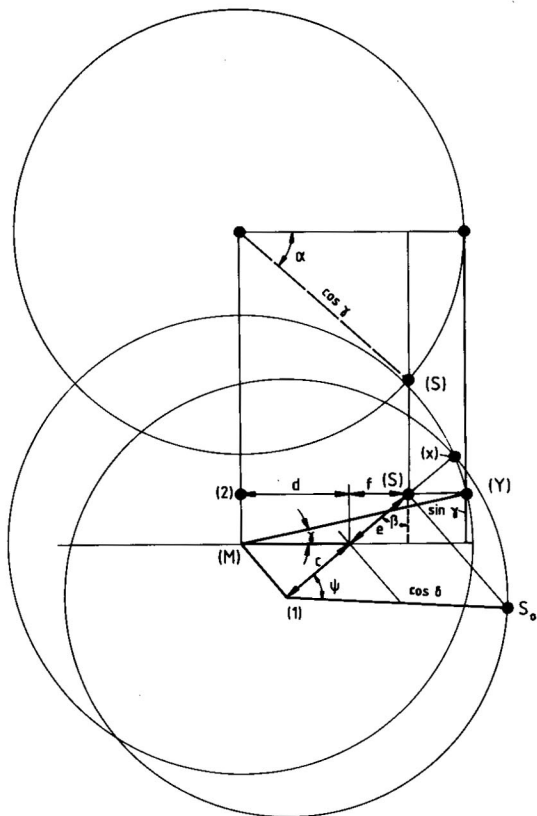


Bild 4 Konstruktion des Azimuts der Sonne
Fig. 4 Construction of solar azimuth

3.2 Messungen der Globalbeleuchtungsstärke

In jüngster Zeit wurden vom DWD insgesamt zwölfhundert Messungen der Globalbeleuchtungsstärke gemessen, [4]. Definitionsgemäß handelt es sich dabei um die Summe der vom gesamten Himmelsgewölbe auf eine horizontale Ebene einfallenden Lichtströme. Die Beleuchtungsstärke wurde kontinuierlich an einem Ort⁴ mit geringer Horizontabschattung erfaßt und gleichzeitig in geringen Abständen das Himmelsgewölbe fotografiert. Da Meßzeit und Ort bekannt sind, kann die auf das Heliozentrum bezogene Sonnenhöhe berechnet und damit die Globalbeleuchtungsstärke über der Sonnenhöhe aufgetragen werden.

Als Beispiel für die vom DWD durchgeführten Messungen ist als Bild 5 ein Tagesplott einer Messung aufgetragen, Bild 6 zeigt die Überlagerung sämtlicher Einzelmessungen für eine bestimmte Bewölkungsart und -dichte. Zusätzlich eingezeichnet wurden die Kurven, die sich aus der Mittelung der Einzelmessungen und den zugehörigen Standardabweichungen ergeben.

In [4] werden um die zwanzig Bewölkungsgattungen unterschieden. Es zeigen sich mit zunehmender Bewölkung größere Toleranzbänder der Beleuchtungsstärken, was im wesentlichen darauf zurückzuführen ist, daß die Angabe der Bedeckung und der Wolkengattung nicht ausreichend ist, um die tatsächlichen Verhältnisse zu beschreiben. Es fehlt z.B. die Dichte und Dicke der vorliegenden Bewölkung.

Interessanterweise liegt die Beleuchtungsstärke bei bestimmten Wolkenarten sogar noch etwas höher als im wolkenlosen Fall, was auf die Lichtreflexionen der Wolkenunterseite und auf die Aerosol-Streuung zurückgeführt werden kann. Aus den Messungen läßt sich auch der Einfluß der Mondbeleuchtung ablesen, da im wesentlichen hierdurch bedingt die Schwankungen der Beleuchtungsstärke bei Höhenwinkeln unterhalb von -10° zu erklären sind. Die zusätzliche Aufhellung des Mondes liegt in jedem Fall unterhalb von 0,7 lux. In der Praxis stehen für die retrospektive Bestimmung nur in den seltensten Fällen exakte Bewölkungsdaten zur Verfügung. Eine genaue Bestimmung ist auch über den DWD selten möglich, da er nur wenige Beobachtungsstationen unterhält. Damit ist es für die forensische Betrachtung sinnvoll, die zwanzig verschiedenen Be-

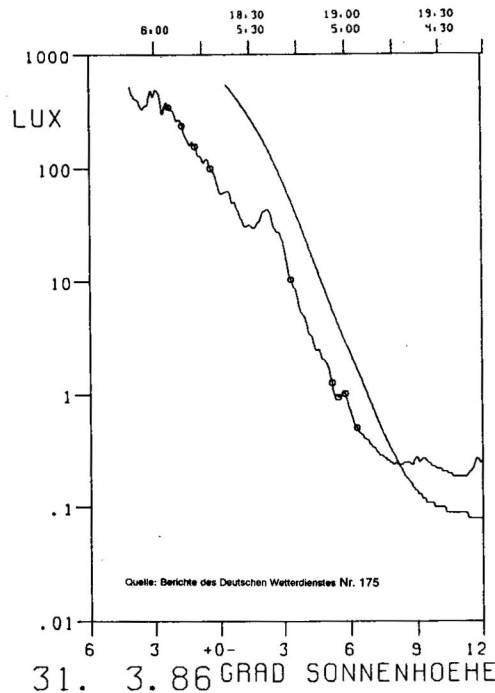


Bild 5 Einzelmessung der Globalbeleuchtungsstärke während Morgen- und Abenddämmerung vom 31.3.86
Fig. 5 Single measurement of the global intensity of light during dawn and dusk on 3/31/86

wölkungsgattungen zu reduzieren. Mit einer nur geringen Einbuße der Aussagefähigkeit kann eine Reduzierung auf nur drei Fälle gemäß Bild 7 durchgeführt werden. Oft gelingt es bereits aus Informationen in der Verkehrsunfallanzeige oder aus in der Morgendämmerung nach einem Unfall gefertigten Fotografien auf eine dieser drei Wolkengattungen zurückzuschließen. So ist z.B. ein gering bewölkter Himmel auszuschließen, wenn in der Verkehrsunfallanzeige »Regen« vermerkt ist.

3.3 Parametrisierung der Globalbeleuchtungsstärke

In [4] wurde zur mathematischen Darstellung der Abhängigkeit der mittleren Globalbeleuchtungsstärke von der Sonnenhöhe γ der Ansatz

$$\log [\bar{G}_g] = A + B \cdot \cos [C (D - \gamma)] \quad (14)$$

vorgeschlagen. Um die Parameter A, B, C, D dieses funktionalen Ansatzes den Meßergebnissen optimal anzupassen, wäre eine nichtlineare Regression erforderlich. Die Angabe der glatten Werte $C = 15$ und $D = 1$ in [4] läßt vermuten, daß lediglich die Parameter A und B angepaßt wurden, was mittels einer linearen Regression möglich ist.

Wesentlich einfacher und komplikationsloser läßt sich mit gleicher Genauigkeit der Helligkeitsverlauf über ein Polynom dritter Ordnung beschreiben, dessen Koeffizienten durch eine lineare Regression z.B. nach der Methode der kleinsten Quadrate [5] bestimmt werden können. Für die Regressionsformel

$$\lg (G_g(n, \gamma)) = a_3(n) \cdot \gamma^3 + a_2(n) \gamma^2 + a_1(n) \gamma + a_0(n) \quad (15)$$

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

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

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

Quelle: Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 175

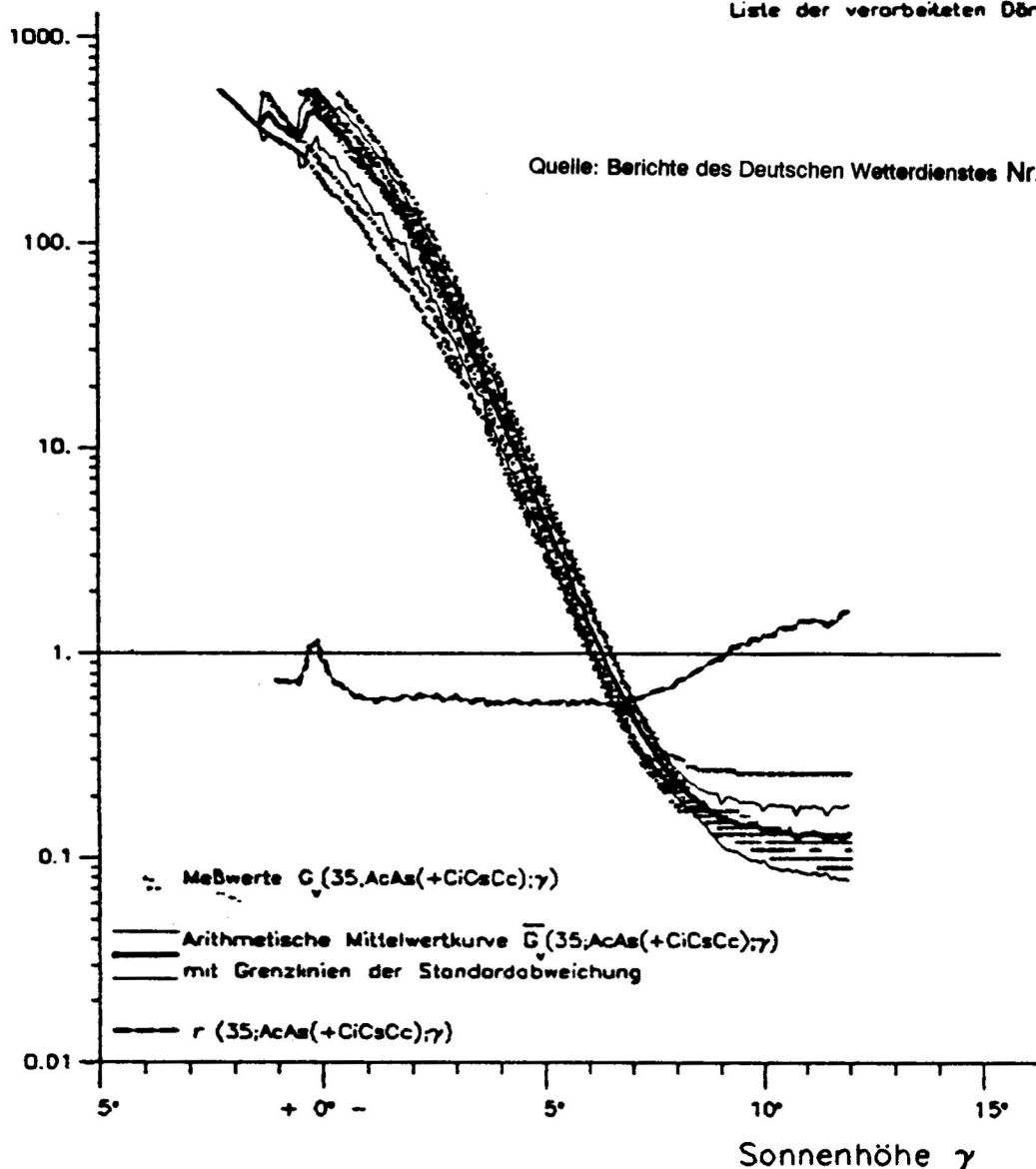


Bild 6 Überlagerung aller Messungen d. Globalbeleuchtungsstärke für eine bestimmte Bewölkungsart u. -dichte.

Fig. 6 Overlapping of all measurements of the global intensity of light for a given amount of cloud of special types

Aufteilung der Bewölkungstypen

Fall 1 wolkenlos und gering bewölkt

Haupttypen der Wolkenformen in dieser Gruppe:

- Cirrus 1/8 bis 7/8
- Cumulus 1/8 bis 5/8
- Mischbewölkung (AcAsCiCsCc) 1/8 bis 2/8

Fall 2 mittelstark bewölkt

Alle übrigen Wolkengruppen und Mischbewölkung, die einen Bedeckungsgrad von 3/8 bis 5/8 aufweisen.

Fall 3 stark bewölkt

Alle Wolkentypen außer Cirrus mit 6/8 bis 8/8 Bedeckung (Stratus, Stratocumulus, Altostratus, Nimbostratus)

Bild 7 Definition der Bewölkungsart 1, 2, 3

Fig. 7 Definition of the three densities of cloud 1, 2, 3

Fall n		gering n=1	mittel n=2	stark n=3
a(n)	min.	4,2154 10^{-3}	4,4716 10^{-3}	3,1877 10^{-3}
	max.	5,8551 10^{-3}	6,2316 10^{-3}	7,1329 10^{-3}
b(n)	min.	-6,1336 10^{-2}	-4,3473 10^{-2}	-2,2314 10^{-2}
	max.	-9,6976 10^{-2}	-9,6853 10^{-2}	-9,4400 10^{-2}
c(n)	min.	-1,7832 10^{-1}	-2,7142 10^{-1}	-3,5547 10^{-1}
	max.	2,5603 10^{-2}	6,4258 10^{-3}	-8,8887 10^{-2}
d(n)	min.	2,5186	1,8399	1,6910
	max.	2,7320	2,7555	2,8130

Bild 8 Tabelle der Koeffizienten $a_i(n)$

Fig. 8 Tabel of the coefficients $a_i(n)$

ergeben sich dann die in Bild 8 aufgeführten Parameterwerte für die jeweils obere und untere Grenzkurve der drei unterschiedenen Fälle. Die grafische Umsetzung dieser Werte führt auf Bild 9. Mit den angegebenen Formeln können nach Eingabe des Wolkentyps sofort die Globalbeleuchtungsstärken für beliebige Zeitpunkte und Orte statistisch abgesichert ermittelt werden. Liegen keine Informationen über den Bewölkungstyp vor, sind die äußeren Grenzkurven zu verwenden.

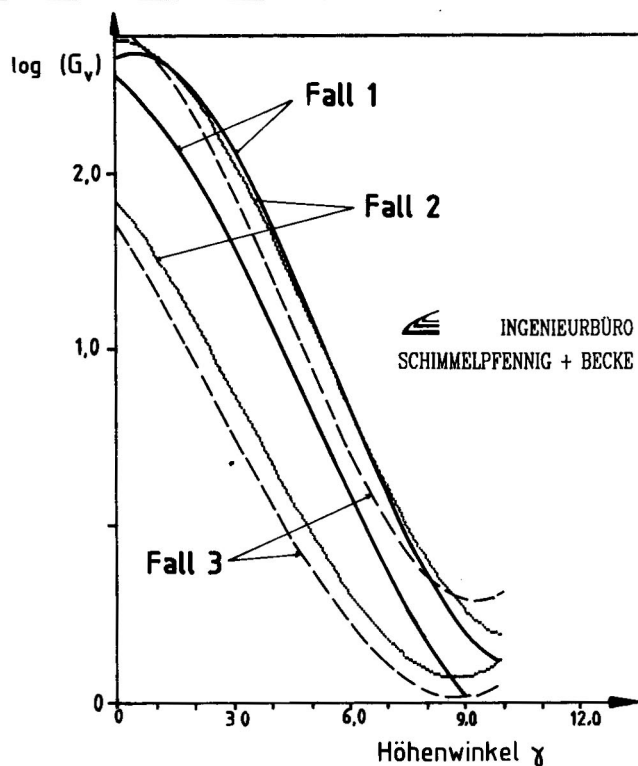


Bild 9 Grenzkurven der Dämmerungshelligkeit für die drei definierten Bewölkungsdichten

Fig. 9 Boundaries of intensity of light during dusk and dawn for the three defined densities of clouds

3.4 Einfluß des Mondlichtes

Sowohl am Ende der Dämmerungsphase als auch bei Dunkelheit ist die zusätzliche Aufhellung durch das Mondlicht zu diskutieren. Obwohl die Beleuchtungsstärke mit höchstens 0,7 lux sehr gering ist, kann bei Höhenwinkel des Mondes von über 30° und kontrastreichen Objekten eine deutlich frühere Erkennbarkeit vorgelegen haben, wenn der Unfall sich bis zu 3 Tage vor oder nach dem Vollmond ereignete und der Himmel klar war. Bei geringeren Höhenwinkel kann bei »günstiger« Einfallsrichtung eine Silhouettendarstellung des Objektes vor dem Horizont erfolgen. Die Berechnungsformel der Mondkoordinaten ist verhältnismäßig aufwendig. Auf ihre Darstellung wird in diesem Aufsatz verzichtet.

3.5 Praktische Anwendung und Ausblick

Die Praxis zeigt, daß eine ausgeprägte Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke von der Uhrzeit nur für einen Zeitraum von etwa einer Viertelstunde vorliegt. Deshalb kann oft schon ohne aufwendige Recherchen über die tatsächliche Bewölkung bereits die Frage der Wahrnehmbarkeit beantwortet werden. Als grober Anhaltswert für eine starke Sichtbeeinträchtigung in der Dämmerung kann ein Grenzwert von 10 lux angegeben werden. Weiterführende prinzipielle Aussagen hierzu lassen sich aber erst nach Leuchtdichtemessungen in der Dämmerungsphase in Abhängigkeit von Witterung, Objektkleidung und Hintergrund treffen. Diese Messungen werden z.Zt. in unserem Büro durchgeführt und demnächst veröffentlicht. Da nunmehr genügend statistisch abgesichertes Datenmaterial vorliegt, bietet es sich an, die Einflußparameter bei Dämmerungsunfällen bei der Unfallaufnahme durch Polizei oder Sachverständige festhalten zu lassen. Üblicherweise wird in der Verkehrsunfallanzeige die Meldezeit des Unfalls angegeben. Durch sofortiges Nachfragen läßt sich meist die Zeitdifferenz zwischen Unfall und Meldung noch ermitteln und festhalten. Auch ohne meteorologische Fachkenntnisse lassen sich ferner nähere Angaben zur Bewölkung in die Verkehrsunfallanzeige aufnehmen.

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

- α = Einfallswinkel der Sonnenstrahlen bezogen auf die Südrichtung (pos. nach West, neg. nach Ost)
- β = geogr. Breite des Beobachtungsortes
- γ = Höhenwinkel der Sonne
- δ = Deklination
- λ_0 = Bezugsmeridian für die gesetzliche Zeit
- λ = geogr. Länge des Beobachtungsortes
- τ = Stundenwinkel für Sonnenaufgang und -untergang
- ψ = Stundenwinkel der Sonnenposition zum untersuchten Zeitpunkt
- $G_v(n, \gamma)$ = Globalbeleuchtungsstärke in lux abhängig vom Höhenwinkel γ und der Wolkenart n
- ΣT = Zahl der Tage seit Jahresbeginn
- MEZ = mitteleuropäische Zeit
- MESZ = mitteleuropäische Sommerzeit
- GZ = gesetzliche Zeit
- Z = Zeitausgleich zwischen wahrer und mittlerer Sonnenzeit
- Δt = Zeitdifferenz zwischen gesetzlicher Zeit und wahrer Ortszeit

- 1) Am Schluß des Aufsatzes befindet sich ein Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen.
- 2) Der Bezugsmeridian für die europäische Zeit ist 15° östliche Länge und für die mitteleuropäische Sommerzeit 30° östliche Länge.
- 3) Infolge der elliptischen Erdbahn um die Sonne und der Neigung der Ekliptik ist die wahre Sonnenzeit nicht gleichförmig d.h. die Sonne bewegt sich im Winter etwas schneller und im Sommer etwas langsamer.
- 4) Die Messungen wurden auf einem Flughafengelände fern der Bebauung durchgeführt.

Literaturnachweis

- [1] Samps, J., Prof.Mag.: Unfallursache: Blendung durch Sonnenlicht?, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 1987, S. 239-242
- [2] Maas, A., Dr.: Problem der Dämmerungshelligkeit, Herausgeber: Maas, A. Dr., 1972
- [3] Uckelmann, H. Dr. Ing.: Ein Beitrag zum Problem der Dämmerungshelligkeit, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 1982, S. 47-50
- [4] Dehne, K.; Bergbolter, U.; Kasten, F.: Globalbeleuchtungsstärke während der Dämmerung, Bericht Nr. 175 im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1988
- [5] Cheney u. Kinsaid, 1985, S. 362-387