

Tageslicht- und Solarstrahlungsdaten aus Meteosat-Satellitenbildern - Das europäische Projekt SATELLIGHT

Hans Georg Beyer*, Annette Hammer, Detlev Heinemann, Christian Reise**,
Annette Westerhellweg

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Fachbereich Physik, Abteilung Energie- und Halbleiterforschung

*Fachhochschule Magdeburg

**Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg

Die Verwendung von Satellitenbeobachtungen hat zu einer deutlichen Verbesserung in der Verfügbarkeit von räumlich und zeitlich hochaufgelösten Solarstrahlungsdaten für die Planung und Betriebsanalyse von Solarenergiesystemen geführt. Unterschiedliche Algorithmen vergleichbarer Qualität stehen für eine operationelle Auswertung der Satellitendaten bereit. Im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens SATELLIGHT werden erstmals aus Satellitenmessungen abgeleitete Solarstrahlungs- und Tageslichtdaten in einer für die Anwendung im Gebäudebereich aufbereiteten Form bereitgestellt.

1. Einleitung

Anwendungen der Solartechnik erfordern in allen Bereichen für einen effizienten Einsatz der Energiequelle Solarstrahlung detaillierte Information des lokalen Solarstrahlungsklimas. Im Bereich des solaren Bauens verlangt zum Beispiel die Optimierung des energetischen Verhaltens von Fenster- und Tageslichtsystemen statistische Verteilungen der richtungsabhängigen Einstrahlung und Beleuchtungsstärke. Die gemeinhin verfügbaren Datenquellen (z.B. European Radiation Atlas, European Daylighting Atlas) haben eine ungenügende räumliche Auflösung (Daylighting Atlas), keine Angaben zur tageszeitlichen Veränderung sowie keine Information über die Richtungsabhängigkeit des solaren Strahlungsangebots. Gerade letztere ist wesentlich für verlässliche Tageslichtberechnungen.

In dem europäischen Forschungsvorhaben SATELLIGHT werden METEOSAT Satellitendaten verwendet, um mit hoher räumlicher (< 10 km) und zeitlicher (30 min) Auflösung Solarstrahlungs- und Beleuchtungsstärkedaten für Europa bereitzustellen. Hierbei werden angepasste Verfahren zur Ableitung der Solarstrahlung aus Satellitendaten in Verbindung mit atmosphärischen Modellen, die eine richtungsabhängige Bestimmung der diffusen Solarstrahlungsanteile erlauben, verwendet. Ein Schwerpunkt liegt hierbei auf der Optimierung der Verfahren in Hinblick auf Tageslichtanwendungen. Die Entwicklungs- und Validierungsphase für die im Projekt verwendeten Modelle ist mittlerweile abgeschlossen.

Die Ergebnisse werden in Form eines Kartenwerks und als Internet-Datenbank verfügbar sein. Diese basieren auf mehrjährigen Datensätzen von METEOSAT-Aufnahmen. Enthalten sind europäische Karten für die entsprechenden Größen, standortspezifische Information (Häufigkeitsverteilungen, tages- und

jahreszeitlicher Gang) sowie Fallstudien vorgegebener Standardsituationen an gegebenen Standorten. Somit stehen allen im Bereich des solaren Bauens aktiven Einrichtungen aus Planung, Produktion und Forschung Daten zur Verfügung, um an die lokalen Beleuchtungsbedingungen optimal angepasste Lösungen zu finden.

2. Solarstrahlung aus Satellitenmessungen

2.1. Das Grundprinzip

Die Nutzung von Satellitenbeobachtungen zur Bestimmung der Globalstrahlung an der Erdoberfläche beruht auf einem vergleichsweise einfachen Prinzip: Das Radiometer an Bord des Satelliten mißt die vom System Erde-Atmosphäre zurückgestreute Solarstrahlung in einem begrenzten Raumwinkel (Radianz). Diese als planetare Albedo bezeichnete Größe verhält sich im solaren Spektralbereich proportional zur atmosphärischen Transmission, die wiederum überwiegend von Bewölkungsgrad und atmosphärischer Trübung abhängt. Da die Transmissionseigenschaft der Atmosphäre wesentlich den am Boden ankommenden Strahlungsfluß bestimmt, ergibt sich somit eine deutliche Komplementarität zwischen dem Satellitensignal und der zu bestimmenden Globalstrahlung am Boden.

Unterschiedliche in der Literatur vorgestellte Methoden variieren im wesentlichen in den Verfahren zur Bestimmung der Beziehung zwischen Transmission und Radianz am Ort des Satelliten. Dabei beruhen die *physikalischen* Methoden auf einer direkten Beschreibung der Strahlungswechselwirkung mit der Atmosphäre, während in den *empirischen* Methoden Regressionsbeziehungen zwischen Satelliten- und Bodenmessungen ausgenutzt werden.

2.2. Der Satellit

Wegen ihrer hohen zeitlicher Auflösung werden ausschließlich Daten geostationärer Satelliten verwendet. Der hier genutzte Meteosat liefert Aufnahmen in drei Spektralbereichen im Zeitabstand von 30 Minuten. Die Bilder im sichtbaren Spektralbereich (0.45-1.0 μm) stehen in einer räumlichen Auflösung von max. 2.5 x 2.5 km^2 zur Verfügung. Mit zunehmender Winkeldistanz vom Sub-Satellitenpunkt (0°E, 0°N) vergrößert sich dieser Wert auf z.B. 2.5 x 4 km^2 für das zentrale Deutschland. Die vom Radiometer gemessene Radianz wird in ein digitales Signal mit einer Auflösung von 8 Bit gewandelt. (EUMETSAT, 1996,1997).

Abbildung 1: Das Scan-Konzept des Meteosat Satelliten. Die Abtastung erfolgt zeilenweise (100 U/min) von Süd nach Nord in Schritten von 1.25×10^{-4} rad. Zwei Radiometer für den sichtbaren Spektralbereich ermöglichen somit eine maximale Auflösung von 2,5x2,5 km^2 .

2.3. Die Methode

Die verwendete Methode zur Bestimmung der Globalstrahlung aus den Satellitendaten basiert auf dem HELIOSAT-Verfahren (Cano et al., 1986), das in zahlreichen Punkten weiterentwickelt wurde (Beyer et al., 1996; Hammer et al., 1998).

Das Satellitensignal wird hierbei in eine den effektiven Bewölkungsgrad charakterisierende Größe ('cloud index') überführt. Dazu wird das Radiometersignal C zunächst um die Einflüsse des variierenden Sonnenstands und der atmosphärischen Rückstreuung korrigiert sowie ein konstanter Instrumentenoffset subtrahiert (Moulin et al., 1996; Hammer et al., 1998):

$$\rho = (C - C_o) / G_{\text{ext}}, \quad (1)$$

$$C_o = 5 + ((1 + \cos^2\psi) f(\theta) / \cos^{0.78}(\phi)) \quad (2)$$

mit $f(\theta) = -0.55 + 25.2 \cos \theta - 38.3 \cos^2 \theta + 17.7 \cos^3 \theta$. Die Winkel θ , ϕ und ψ beschreiben die Zenitwinkel von Sonne und Satellit sowie den Azimutwinkel zwischen Sonne und Satellit. Das Polynom dritten Grades $f(\theta)$ ist gewählt, um Rückstreuungseffekte bei tiefen Sonnenständen zu berücksichtigen.

Das auf diese Weise korrigierte Signal für ein Bildelement wird als aus wolkenfreien und bewölkten Teilbereichen zusammengesetzt angenommen:

$$\rho = n \rho_g + (1-n) \rho_c. \quad (3)$$

n ist der cloud index und ρ_g , ρ_c sind die korrigierten Radiometersignale für den wolkenfreien und den homogen bewölkten Fall. ρ_g repräsentiert die Bodenalbedo und wird tages- und jahreszeitabhängig bestimmt.

Somit läßt sich für den cloud index schreiben:

$$n = (\rho - \rho_g) / (\rho_c - \rho_g). \quad (4)$$

Als Maß für die atmosphärische Transmission wird der clear sky index k_t^* verwendet, der als Verhältnis der tatsächlichen horizontalen Globalstrahlung G zur Globalstrahlung unter wolkenfreien Bedingungen G_{cs} definiert ist:

$$k_t^* = G/G_{cs}. \quad (5)$$

Die hier verwendete Beziehung zwischen der atmosphärischen Transmission und dem Satellitensignal enthält keine aus Bodenmessungen zu bestimmende Parameter mehr:

$$k_t^* = 1.05 - n. \quad (6)$$

Diese Beziehung konnte für zahlreiche europäische Standorte bestätigt werden.

Die Globalstrahlung ergibt sich aus Gleichung (5) durch Verwendung eines Modells für die Clearsky- Strahlung G_{cs} . Die direkte Komponente wird durch

$$G_{cs,b} = G_0 \varepsilon \exp(-0.8662 T_L(2) \rho_R(m) m) \quad (7)$$

beschrieben (Page, 1996). G_0 ist die Solarkonstante, ε die Exzentrizitätskorrektur, T_L der Linke-Trübungsfaktor, $\rho_R(m)$ die optische Dicke einer aerosol- und wasserdampffreien klaren Atmosphäre und m die relative Luftmasse. T_L beschreibt die tatsächliche optische Dicke relativ zu $\rho_R(m)$:

$$T_L(m) = \rho(m) / \rho_R(m). \quad (8)$$

Beziehungen für m und $\rho_R(m)$ finden sich in (Kasten,1996).

Die diffuse Komponente der Clearsky-Strahlung wird durch folgende Parametrisierung beschrieben (Dumortier, 1994):

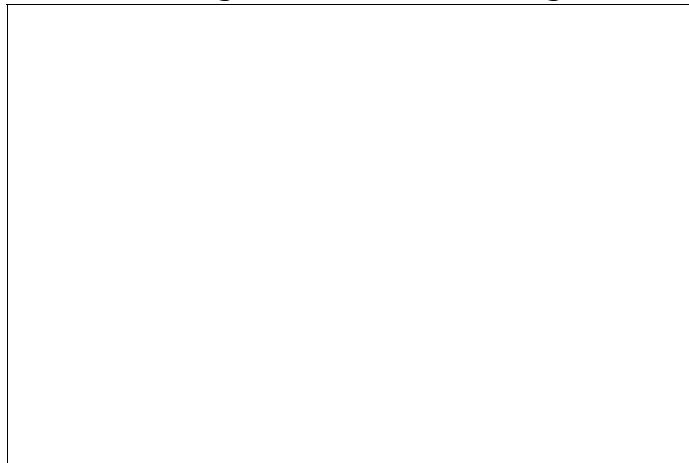
$$G_{cs,d} = G_0 \varepsilon (0.0065 + (0.0646 T_L(2) - 0.045) \cos \theta - (0.0327 T_L(2) - 0.014) \cos^2 \theta). \quad (9)$$

In Tageslichtanwendungen ist neben der Globalstrahlung insbesondere die Diffusstrahlung eine Größe mit hoher Bedeutung z.B. für die Ausleuchtung von Innenräumen. Das zu deren Bestimmung verwendete Modell (Skartveit und Olseth, 1987) beschreibt den Diffusanteil an der Globalstrahlung als Funktion der mit der extraterrestrischen Einstrahlung normierten Globalstrahlung (‘clearness index’) und des Sonnenzenitwinkels (Abb. 1).

Abbildung 1: Diffusanteil der horizontalen Globalstrahlung in Abhängigkeit vom clearness index. und der Sonnenhöhe (Skartveit und Olseth, 1987).

2.4. Die Güte

Die Genauigkeit der gegenwärtig verfügbaren Verfahren ist wesentlich durch die Unterschiede in den zeitlichen und räumlichen Skalen zwischen den Messungen vom Satelliten und am Boden beeinflusst. Weitere Ursachen für die Unsicherheit in der Bestimmung der Globalstrahlung sind die Einflüsse durch



Wolken, Aerosole und Bodenreflektion.

In Abhängigkeit von der betrachteten Zeitskala lassen sich folgende typische Fehler (r.m.s.e.) für die horizontale Globalstrahlung angeben (siehe auch Abb. 2):

stündlich	20 – 25 %
täglich	10 – 15 %
monatlich	5 – 10 %

Abbildung 2: Vergleich der aus Satellitendaten gewonnenen Tagessummen der Globalstrahlung mit Bodenmessungen für 9 Standorte in Deutschland im Mai/Juni 1993. Insgesamt wurden 1000 Satellitenszenen ausgewertet. Der r.m.s.e. beträgt 8.5 %.

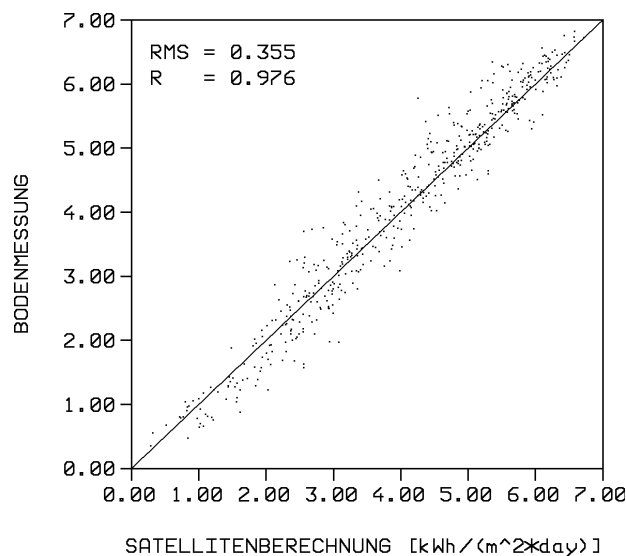


Abbildung 3: Vergleich von Satellitenmessungen und Bodendaten für Freiburg (April 1993 – März 1994). Obere Reihe: Globalstrahlung auf die horizontale Fläche. Untere Reihe: Diffusstrahlung auf die horizontale Fläche. Links: Vergleich von 30-Minuten-Mittelwerten. Mitte: Häufigkeitsverteilungen des Clearsky Index. Rechts: Häufigkeit des Überschreitens bestimmter Einstrahlungsschwellwerte.

3. Das Projekt SATELLIGHT

3.1. Die Ziele

Das europäische Forschungsvorhaben SATELLIGHT hat zum Ziel, Methoden zur Gewinnung von Einstrahlungs- und Tageslichtinformation aus Satellitendaten für die besonderen Bedürfnisse des Gebäudetechnik- und Architekturbereichs anzupassen und zu validieren. Die mit den beschriebenen Methoden gewonnenen Daten der solaren Einstrahlung und der Tageslichtverhältnisse sollen für West- und Zentraleuropa im Internet allen potentiellen Nutzern zur Verfügung gestellt werden. Der WWW-Server wird auf der Basis von mindestens dreijährigen Zeitreihen mit der zeitlichen Auflösung von 30 Minuten Horizontalwerte der Global- und Diffusstrahlung und Beleuchtungsstärke sowie Beleuchtungsstärken auf beliebig geneigte Flächen liefern. Weiter werden zahlreiche Möglichkeiten der statistischen Auswertung geboten werden sowie ortsspezifische Fallstudien zu Beleuchtungsverhältnissen in Gebäuden möglich sein.

3.2. Der WWW-Server

Sämtliche Informationen werden im Internet über einen WWW-Server (<http://satellight.entpe.fr>) verbreitet werden, der sich gegenwärtig in der Testphase befindet und zum Beginn 1999 öffentlich zugänglich sein wird. Zielgruppe dieser Datenbasis sind Hersteller von Fenster- und Tageslichtsystemen, die optimale Lösungen für unterschiedliche Klimaregionen suchen, sowie Design- und Planungsbüros, die das energetische und lichttechnische Verhalten ihrer Entwürfe untersuchen und demonstrieren wollen. Ebenfalls kann der Server zur Ausbildung im Architektur- und Gebäudetechnikbereich eingesetzt werden.

Die Benutzung des Servers erfolgt interaktiv über Eingaben in drei Hauptbereichen: (1) Über das „Maps“-Menu kann der Ort direkt (Name oder geographische Koordinaten) oder durch Klicken auf die Karte eingegeben werden. (2) Das „Site Outdoor“-Menu erlaubt die Darbietung ortsspezifischer Daten (Einstrahlung, Beleuchtungsstärke) sowie die Auswahl der gewünschten Information und eines Zeitbereichs. (3) Im „Site Indoor“-Menu können für den gewählten Ort Fallstudien des Verhaltens ausgewählter Gebäudetypen betrachtet werden. Alle Informationen werden vom Server online berechnet und dargestellt.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die HELIOSAT-Methode zur Gewinnung hochaufgelöster Solarstrahlungsdaten aus Satellitenmessungen wurde entsprechend den besonderen Anforderungen von Tageslicht-Anwendungen optimiert. Es konnte gezeigt werden, daß die statistischen Eigenschaften der Global- und der Diffusstrahlung gut wiedergegeben werden. Dies ist für zahlreiche Tageslichtanwendungen ein entscheidendes Kriterium.

Die Ergebnisse werden als Internet-Datenbasis für die europäische Region bereitgestellt. Damit stehen erstmals flächendeckend Planungsdaten für zahlreiche Solarenergie- und Tageslichtanwendungen mit hoher zeitlicher Auflösung zur Verfügung.

5. Literatur

Beyer, H.G., C. Costanzo und D. Heinemann: Modifications of the Heliosat Procedure for Irradiance Estimates from Satellite Data. *Solar Energy*, **56**, 207-212, 1996.

Beyer, H.G., A. Hammer, D. Heinemann und A. Westerhellweg: Estimation of Diffuse Solar Radiation from METEOSAT Data. Proc. 7th International Conference on Solar Energy at High Latitudes, Espoo-Otaniemi, Finnland, 1997.

Cano, D., J.M. Monget, M. Albuissou, H. Guillard, N. Regas und L. Wald: A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, **37**, 31-39, 1986.

Dumortier, D.: Modelling Global and Diffuse Horizontal Irradiances under Cloudless Skies with Different Turbidities. Daylight II. Final Report. JOU2-CT92-0144. 1994.

EUMETSAT: The Meteosat System. Technical Documentation EUM TD 05. 1996.

EUMETSAT: Meteosat High Resolution Image Dissemination. Technical Description EUM TD 02.1997.

- Fontoynont, M., Dumortier, D. et al.: Satelight: A WWW Server Which Provides High Quality Daylight and Solar Radiation Data for Western and Central Europe. Proc. 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Paris, 25-29 May 1998, 434-437, 1998.
- Hammer, A., D. Heinemann, A. Westerhellweg et al.: Derivation of Daylight and Solar Irradiance Data from Satellite Observations. Proc. 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Paris, 25-29 May 1998, 747-750, 1998.
- Kasten, F.: The Linke Turbidity Factor Based on Improved Values of the Integral Rayleigh Optical Thickness. *Solar Energy*, **56**, 239-244, 1996.
- Page, J.: Algorithms for the Satelight programme. Technical report. June 1996.
- Page, J.: Recommendations for monthly mean Linke turbidities for the Satelight programme. Technical report. June 1996.
- Skartveit, A. und J.A. Olseth: A Model for the Diffuse Fraction of Hourly Global Radiation. *Solar Energy*, **38**, 271-274, 1987.

Das SATELLIGHT-Projekt wird von der Europäischen Kommission gefördert (JOULE III, JOR3-CT95-0041). Weitere Mitglieder des SATELLIGHT-Teams sind: Marc Fontoynant, Dominique Dumortier, Jan Asle Olseth, Arvid Skartveit, Pierre Ineichen, John Page, Liam Roche, Christelle Rigollier und Lucien Wald.

Die Autoren danken dem Deutschen Wetterdienst für die Überlassung von Bodendaten der Globalstrahlung.

Titel:
Erstellt von:
gnuplot
Vorschau:
Diese EPS-Grafik wurde nicht gespeichert mit einer enthaltenen Vorschau.
Kommentar:
Diese EPS-Grafik wird an einen PostScript-Drucker gedruckt, aber nicht an andere Druckertypen.

Titel:
Erstellt von:
gnuplot
Vorschau:
Diese EPS-Grafik wurde nicht gespeichert mit einer enthaltenen Vorschau.
Kommentar:
Diese EPS-Grafik wird an einen PostScript-Drucker gedruckt, aber nicht an andere Druckertypen.

Titel:
Erstellt von:
gnuplot
Vorschau:
Diese EPS-Grafik wurde nicht gespeichert mit einer enthaltenen Vorschau.
Kommentar:
Diese EPS-Grafik wird an einen PostScript-Drucker gedruckt, aber nicht an andere Druckertypen.

Titel:
Erstellt von:
gnuplot
Vorschau:
Diese EPS-Grafik wurde nicht gespeichert mit einer enthaltenen Vorschau.
Kommentar:
Diese EPS-Grafik wird an einen PostScript-Drucker gedruckt, aber nicht an andere Druckertypen.

Titel:
Erstellt von:
gnuplot
Vorschau:
Diese EPS-Grafik wurde nicht gespeichert mit einer enthaltenen Vorschau.
Kommentar:
Diese EPS-Grafik wird an einen PostScript-Drucker gedruckt, aber nicht an andere Druckertypen.

Titel:
Erstellt von:
gnuplot
Vorschau:
Diese EPS-Grafik wurde nicht gespeichert mit einer enthaltenen Vorschau.
Kommentar:
Diese EPS-Grafik wird an einen PostScript-Drucker gedruckt, aber nicht an andere Druckertypen.