

Spektrale Solarstrahlung aus Satellitendaten zur Bewertung des Leistungsverhaltens von Dünnschicht- Solarzellen

Tanja Behrendt, Annette Hammer, Elke Lorenz, Detlev Heinemann
Universität Oldenburg, Institut für Physik, Carl-von Ossietzky-Strasse 9-11, 26129
Oldenburg

Tel.: 0441-798 3929 , Fax: 0441-798 3326

E-Mail: t.behrendt@uni-oldenburg.de

Internet: <http://www.energiemeteorologie.de/>

Einleitung

Für die Planung und Überwachung von Photovoltaik-Anlagen sind Informationen über die solare Einstrahlung von großer Bedeutung. Da Bodenmessungen selten in unmittelbarer Nähe zur Verfügung stehen, ist die Bestimmung der Einstrahlung für einen beliebigen Standort aus Satellitendaten eine geeignete Methode, diese notwendige Information zu erhalten. Einige der neuen Dünnschicht-Materialien können, im Gegensatz zu Solarzellen aus kristallinem Silizium, nur einen kleineren spektralen Bereich zur Energiewandlung nutzen. Welcher Bereich nutzbar ist, wird vor allem durch das verwendete Material bestimmt. Dadurch ist der Betriebswirkungsgrad dieser Module von der spektralen Verteilung der Einstrahlung abhängig. Die Bestimmung des Ertrages auf Basis der Breitband-Globalstrahlung ist somit nicht ausreichend genau.

Das an der Universität Oldenburg entwickelte SOLIS-Verfahren [Müller et al., 2004] ermöglicht es, die solare Einstrahlung zu berechnen und liefert zusätzlich die spektrale Information. Zur Bestimmung des Bewölkungsgrades wird die Heliosat-Methode [Hammer, 2000] verwendet. Mit Hilfe von Strahlungstransportrechnungen kann die Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel spektral aufgelöst berechnet werden, wenn Informationen über die strahlungsrelevanten Bestandteile der Atmosphäre bekannt sind.

In diesem Beitrag wird zunächst das verwendete Verfahren beschrieben. Anschließend wird die spektrale Verteilung der berechneten Einstrahlung in Abhängigkeit von der atmosphärischen Zusammensetzung allgemein ausgewertet und der Einfluss auf verschiedene Dünnschicht-Materialien untersucht.

Das SOLIS-Verfahren

Das Heliosat-Verfahren [Hammer, 2000] in Kombination mit dem Modell SOLIS-ClearSky [Müller et al., 2004] ermöglicht es, stündliche Zeitreihen spektral aufgelöster Global-, Diffus- und Direktstrahlung auf Basis von Satellitendaten zu berechnen.

Das Heliosat-Verfahren wird zur Bestimmung der Globalstrahlung aus METEOSAT-Daten genutzt. Die geostationären Meteosat-Satelliten decken im Wesentlichen Europa und Afrika mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 1 km x 1 km ab. Die zum Satelliten zurückgestreute Solarstrahlung ist im sichtbaren Bereich weitgehend proportional zum Bewölkungsgrad. Dieser wird durch den Cloud-Index n charakterisiert, wodurch sich der Clearsky-Index k^* ableiten lässt, der die Transmission der solaren Strahlung durch die Atmosphäre beschreibt. So lässt sich die Globalstrahlung G mit dem Clearsky-Index und G_{clearsky} , der Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel, mit

$$G = k^* G_{\text{ClearSky}}$$

berechnen. Zur Berücksichtigung der wellenlängenabhängigen Transmission der Wolken wird der Clearsky-Index spektral angepasst. Durch die Berechnung der spektral aufgelösten Einstrahlung $G_{\text{clearsky}}(\lambda)$ bei wolkenlosem Himmel mit dem Modell SOLIS-ClearSky in Kombination mit dem spektral korrigierten Clearsky-Index lässt sich die Globalstrahlung am Boden $G(\lambda)$ ebenfalls spektral aufgelöst bestimmen:

$$G(\lambda) = k^*(\lambda) \cdot G_{\text{clearSky}}(\lambda)$$

Die Einstrahlung G_{clearSky} bei wolkenlosem Himmel hängt von der atmosphärischen Zusammensetzung und den optischen Eigenschaften der atmosphärischen Bestandteile ab. Das Programm SOLIS-ClearSky berechnet die Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel, also ohne Berücksichtigung der vorherrschenden Bewölkung, mit Hilfe des Strahlungstransportmodells libRadtran [Mayer and Kylling, 2005]. Dabei Wasserdampf-, Ozongehalt und Aerosolparameter je nach vorhandener Information in die Berechnung einbezogen. Die spektrale Auflösung der berechneten Einstrahlung wird durch die in libRadtran gewählte „correlated-k“ Methode bestimmt. Im Bereich zwischen 250 nm und 4600 nm sind 32 so genannte Kato-Bänder unterschiedlicher Breite festgelegt, in denen der Absorptionskoeffizient verschiedener Gase annähernd konstant ist.

Die Zusammensetzung der Atmosphäre wird zum größten Teil als konstant angenommen. Wichtige variable Parameter sind Wasserdampf und Aerosole, wobei

Aerosole den größten Einfluss auf die Breitband-Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel haben. Der Wasserdampfgehalt und die Aerosol-optische Dicke werden aus Klimatologien mit Monatsmittelwerten bestimmt. Da sich die Extinktionseigenschaften der Aerosole nicht nur gemäß ihres Gehalts in der Atmosphäre verändern, sondern auch in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung und ihrer Größenverteilung, sind außer der Aerosol-optischen Dicke auch Informationen über die Einfachstreueralbedo und den Angströmparameter notwendig.

Spektrale Einstrahlung in Abhängigkeit von der atmosphärischen Zusammensetzung

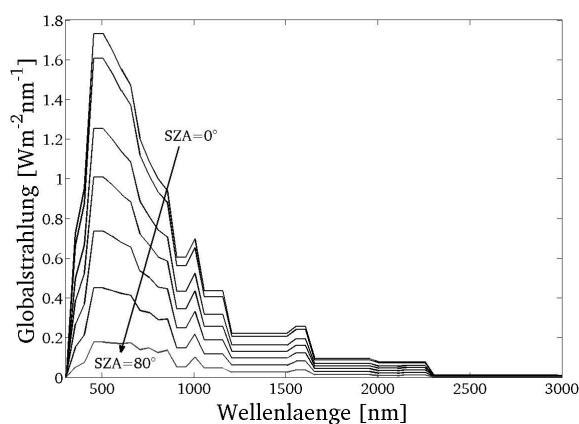


Abbildung 1: Spektrale Globalstrahlung bei verschiedenen Sonnenzenithwinkeln (wolkenloser Himmel, AOT = 0.2, Wasserdampf: 15 mm, Ozon: 245 DU)

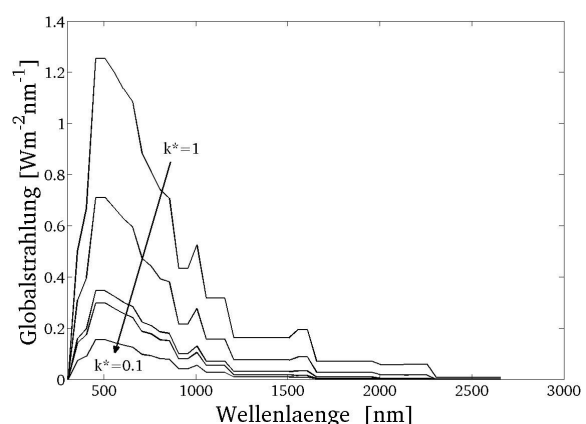


Abbildung 2: Spektrale Globalstrahlung in Abhängigkeit vom Clearsky-Index (SWA = 40°, AOT = 0.2, Wasserdampf: 15 mm, Ozon: 245 DU)

Die spektrale Globalstrahlung bei verschiedenen Sonnenzenithwinkeln (SWA) ist in Abbildung 1 dargestellt. Mit sinkendem Sonnenstand wird die Einstrahlung vor allem im sichtbaren Spektralbereich reduziert. Bei starker Bewölkung ist dagegen auch ein großer Einfluss auf den Infrarot-Bereich (IR) zu erkennen (Abb. 2). Für einige diskrete Atmosphärenzustände mit variierendem Aerosol- und Wasserdampfgehalt, sowie bei verschiedenem Sonnenstand und Bewölkungsgrad, wurden Strahlungstransportrechnungen durchgeführt. Abbildung 3 zeigt die spektrale Verteilung der Globalstrahlung bei einem Sonnenzenithwinkel von 40° ohne Streuung und Absorption an Aerosolen und Wasserdampf, bei einer Aerosol-optischen Dicke (AOT) von 0.2 und einem Wasserdampfgehalt von 15 mm, sowie bei einer AOT von 2 und 70 mm Wasserdampf. Im sichtbaren Bereich beeinflusst vor allem der Aerosolgehalt das Spektrum während Wasserdampf im IR-Bereich absorbiert.

Um die Verschiebung der spektralen Verteilung der Einstrahlung zu charakterisieren eignet sich die Betrachtung der mittleren Energie der Photonen (average photon energy (APE)) [Betts 2004]. Verschiebt sich das Spektrum zu größeren Wellenlängen (Rotverschiebung), sinkt die mittlere Photonenenergie. Steigt der Anteil der kürzeren Wellenlängen (Blauverschiebung) steigt auch die mittlere Photonenenergie. Abbildung 4 zeigt den Einfluss der Atmosphäre anhand der mittleren Photonenenergie, aufgetragen über der Breitband-Globalstrahlung. Während jeweils ein atmosphärischer Parameter variiert wurde, wurden die weiteren Parameter konstant gehalten (Sonnenstand 40° , $k^*=1$, AOT=0.2, Wasserdampf 15 mm). Bei sinkendem Sonnenstand oder steigendem Aerosolgehalt wird die Globalstrahlung vor allem im sichtbaren Spektralbereich reduziert, dadurch verringert sich auch die mittlere Photonenenergie. Wolken und Wasserdampf absorbieren stark im IR-Bereich. Daher steigt bei zunehmender Bewölkung oder zunehmenden Wasserdampfgehalt die APE.

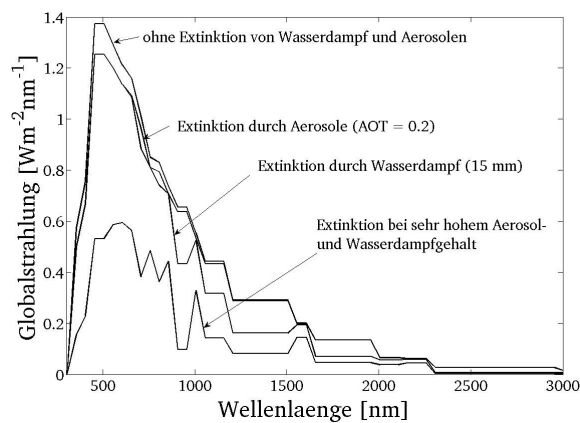


Abbildung 3: Extinktion der Globalstrahlung durch Aerosole und Wasserdampf (SZA = 40° , wolkenloser Himmel)

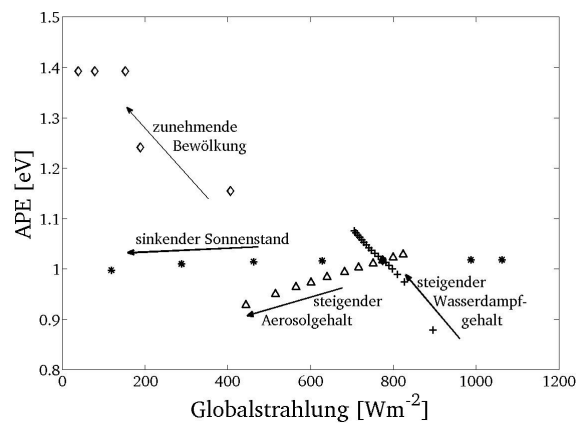


Abbildung 4: Mittlere Photonenenergie bei unterschiedlichem Sonnenstand, Bewölkungsgrad und unterschiedlicher atmosphärischer Zusammensetzung

Einfluss der spektralen Verteilung auf die Energieerzeugung von Dünnschicht-Solarzellen

Verschiedene Materialien der Dünnschicht-Photovoltaik können nur einen kleinen Spektralbereich zur Energieerzeugung nutzen. Der für das entsprechende Material nutzbare Bereich (useful fraction (UF)) des Spektrums lässt sich durch

$$UF = \frac{\int_a^b G(\lambda) d\lambda}{\int_c^d G(\lambda) d\lambda}$$

berechnen, wobei $\int_c^d G(\lambda) d\lambda$ den gesamten Spektralbereich von 300 bis 3000 nm

abdeckt. Die Grenzen der spektralen Empfindlichkeit a und b variieren je nach verwendetem Material. So absorbiert z.B. amorphes Silizium (a-Si) im Bereich zwischen 350 und 800 nm, Cadmium-Tellurid (CdTe) zwischen 350 und 900nm. Abbildungen 5 und 6 zeigen den nutzbaren Anteil der Einstrahlung für a-Si und CdTe über der Globalstrahlung für verschiedene atmosphärische Parameter. Verringert sich die Einstrahlung (z.B. durch Aerosole oder den Sonnenstand) in dem Bereich der spektralen Empfindlichkeit, verringert sich auch die UF. Die Absorption der Wolken und des Wasserdampf bei höheren Wellenlängen, die von beiden Materialien nicht genutzt werden können, führt zu einem höheren Anteil an nutzbarer Einstrahlung. Da beide Materialien im kurzwelligeren Bereich absorbieren, zeigt sich, dass bei größerer APE auch der Anteil nutzbarer Einstrahlung steigt.

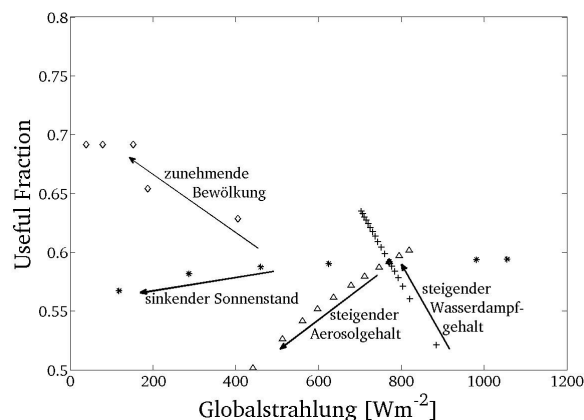


Abbildung 5: Für a-Si nutzbarer Anteil der Einstrahlung in Abhängigkeit von Sonnenstand, Bewölkungsgrad und atmosphärischer Zusammensetzung

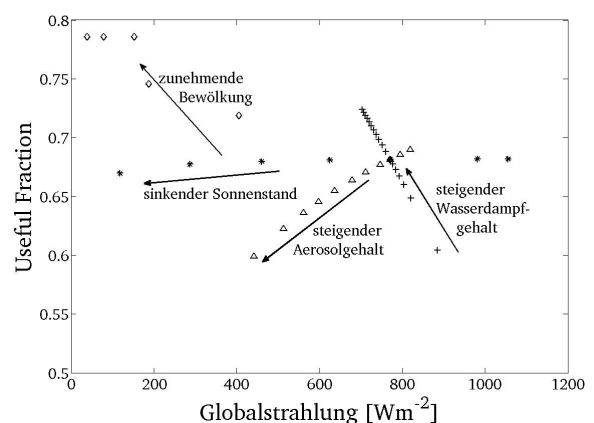


Abbildung 6: Für CdTe nutzbarer Anteil der Einstrahlung in Abhängigkeit von Sonnenstand, Bewölkungsgrad und atmosphärischer Zusammensetzung

Ausblick

Mit dem SOLIS-Verfahren ist es möglich die Veränderung der für verschiedene Dünnschicht-Materialien nutzbaren Einstrahlung durch unterschiedliche meteorologische Bedingungen zu modellieren. Das verwendete Verfahren soll anhand von Bodenmessungen der spektralen Einstrahlung validiert werden. Hierzu werden Messungen mit hoher Qualität benötigt. Spektralmessungen sind allerdings sehr aufwendig und die Qualität der Daten nicht immer leicht zu bestimmen. Zusätzlich zu existierenden Bodenmessungen soll ein eigener Messplatz zur Messung der spektralen Einstrahlung errichtet werden. Synchron zu den Einstrahlungsmessungen soll auch der Ertrag verschiedener Dünnschicht-Materialien gemessen werden.

Danksagung

Die Arbeit wird unterstützt durch das Stipendienprogramm der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

Literatur

- T. Betts. Investigation of Photovoltaic Device Operation under Varying Spectral Conditions. *Dissertation, Loughborough University, 2004.*
- A. Hammer. Anwendungsspezifische Solarstrahlungsinformationen aus Meteosat-Daten. *Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2000.*
- B. Mayer and A. Kylling. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.: 1855–1877, 2005.*
- R.W. Müller, K.F. Dagestad, P. Ineichen, M. Schroedter-Homscheidt, S. Cros, D. Dumortier, R. Kuhlemann, J.A. Olseth, G. Pernavieja, C. Reise, L. Wald, and D. Heinemann. Rethinking satellite based solar irradiance modelling - the SOLIS clear-sky module. *Remote Sensing of Environment:160–174, 2004.*