

Räumliche Interpolation der Globalstrahlung auf Basis eines GIS-Strahlungsmodells

Andreas SCHAUMBERGER¹, Herbert FORMAYER² und Norbert BARTELME³

¹LFZ Raumberg-Gumpenstein · andreas.schaumberger@raumberg-gumpenstein.at

²Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien

³Institut für Geoinformation, Technische Universität Graz

Dieser Beitrag wurde durch das Programmkomitee als „reviewed paper“ angenommen.

Zusammenfassung

Die Globalstrahlung als Summe von direkter und diffuser kurzwelliger Sonneneinstrahlung bestimmt den Energiehaushalt unserer Erde. Für viele biophysikalische und biologische Prozesse sowie für energiewirtschaftliche Überlegungen spielt die Höhe des Energieeintrages eine wichtige Rolle. Diese variiert innerhalb eines kontinuierlichen Strahlungsfeldes in Abhängigkeit von atmosphärischen Bedingungen, der Topografie und der Oberflächenbeschaffenheit. Einfache geostatistische Interpolationsverfahren reichen nicht aus, um die Heterogenität dieser Faktoren, insbesondere jene der geometrischen Ausrichtung bestrahlter Oberflächen (Topografie), in ausreichendem Maß berücksichtigen zu können. Verschiedene GI-Systeme bieten Werkzeuge für die Berechnung der Strahlung an. Die Komplexität derartiger Modelle ist dabei erheblich reduziert; meist wird lediglich ein Digitales Höhenmodell (DHM) in beliebiger Auflösung vorausgesetzt. Die vorliegende Arbeit zeigt am Beispiel des ArcGIS-Tools *Solar Radiation* einen Ansatz, bei dem geometrisch definierte Strahlungsintensitäten mit beobachteten Wetterdaten kombiniert werden. Das Ergebnis sind tägliche, kontinuierliche Rasteroberflächen der Globalstrahlung, welche auf möglichst einfache Weise die atmosphärische Situation mit den topografischen Gegebenheiten eines Untersuchungsgebietes verschneiden. Eine besondere Rolle dabei spielt das sich ständig ändernde Verhältnis von direkter und diffuser Strahlung. Während an einem bewölkten Tag der Strahlungsgenuss von süd- und nordexponierten Hängen annähernd gleich ist, ändert sich dies an einem wolkenlosen Tag mit überwiegend direkter Sonnenstrahlung dramatisch, vor allem in Monaten mit niedrigem Sonnenstand. Eine auf Österreich abgestimmte Kalibrierung des ArcGIS-Tools *Solar Radiation* trägt diesem Umstand Rechnung.

1 Einleitung und Problemstellung

Eine flächendeckende und zeitlich möglichst hoch aufgelöste Information über die Intensität der auf die Erdoberfläche auftreffenden kurzwelligen Strahlung ist die Voraussetzung für räumliche Modelle, welche diesen Parameter zwingend benötigen. Dazu gehören beispielsweise Schneebedeckungsmodelle, Verdunstungsmodelle, räumliche Berechnungen für Trockenheit und Dürre, Bodentemperaturmodelle, Energiebilanzmodelle u. v. a. Im Rahmen dieser Arbeit wird dafür ein möglichst genauer und räumlich hoch aufgelöster Geo-

datensatz bereitgestellt, der die wichtigsten Einflussfaktoren wie Trübungsstatus der Atmosphäre, Exposition und Hangneigung sowie Tages- und Jahreszeit berücksichtigt (GEIGER 1950, 219 f.). Eingesetzt werden dazu Messungen der Globalstrahlung sowie ein Strahlungsmodell, wie es in manchen GI-Systemen zur Verfügung gestellt wird (vgl. DUBAYAH & RICH 1995). Beispiele für derartige Modelle sind *r.sun* in GRASS (HOPIERKA & SURI 2002) oder der *Solar Analyst* (FU & RICH 2000). Letzteres wurde ab der Version 9.2 unter der Bezeichnung *Solar Radiation* als fester Bestandteil in die Werkzeugbox der ArcGIS-Extension *Spatial Analyst* aufgenommen. Dieses ArcGIS-Tool wird im hier vorgestellten Implementierungsansatz verwendet und auf österreichische Bedingungen angepasst.

Bei der Verwendung auf topografischer Information basierender Strahlungsmodelle empfiehlt unter anderem RUIZ-ARIAS et al. (2009) dringend eine Anpassung der Modellparameter auf Beobachtungsdaten. Grundsätzlich gibt es dazu zwei Ansätze: Beobachtungsdaten dienen der Parametrisierung des Modells (wie im Fall des ArcGIS-Tools *Solar Radiation*) oder die Modellergebnisse werden mithilfe von Beobachtungsdaten korrigiert (z. B. bei *r.sun*). Eine entsprechende Kalibrierung muss für eine klar definierte Standardsituation vorgenommen werden. Diese ist einerseits durch eine ebene Fläche und andererseits durch eine möglichst ungetrübte Atmosphäre (Clear-Sky) gegeben. Die Verwendung von zeitlich konstanten Parametern zur Beschreibung der Atmosphäre unter Clear-Sky-Bedingungen, wie sie von FU & RICH (2000, 36 f.) als erste Näherung vorgeschlagen werden, führt nach BASLER (2005, 29 f.) zu unbrauchbaren Ergebnissen. Eine auf das Untersuchungsgebiet und den Jahreslauf abgestimmte Kalibrierung ist deshalb unerlässlich und wird in der vorliegenden Arbeit am Beispiel Österreichs vorgestellt.

Neben der Berechnung der potenziellen Globalstrahlung auf Basis geometrischer Zusammenhänge von Sonnenstand (Deklination, Höhenwinkel und Stundenwinkel der Sonne) und bestrahlter Oberfläche unter Verwendung eines DHM mittels GIS-Strahlungsmodell ist auch eine räumliche Interpolation der an Wetterstationen gemessenen Globalstrahlung Teil dieser Implementierung. Damit wird die tatsächlich auf die Erdoberfläche auftreffende Strahlungsmenge in Abhängigkeit der atmosphärischen Bedingungen berücksichtigt. Mit einer Kombination beider Methoden ergibt sich eine Strahlungsoberfläche, welche sowohl Bewölkung als auch Topografie berücksichtigt. Gerade für Gebiete wie dem Alpenraum, welche eine hohe Reliefenergie aufweisen, muss eine einfache räumliche Strahlungsinterpolation mit der Integration topografischer Effekte über ein geeignetes GIS-Modell erweitert werden (TOVAR-PESCADOR et al. 2006).

2 Material und Methoden

2.1 Software und Datengrundlage

Sämtliche Algorithmen für die Erstellung kontinuierlicher Rasteroberflächen der Globalstrahlung wurden in C# unter Verwendung der ArcGIS-Klassenbibliothek ArcObjects programmiert. Im Zuge der Verwendung von ArcGIS ergibt sich auch die Wahl des dort verfügbaren Werkzeuges zur Berechnung der Strahlung. Außerdem weist dieses Modell eine hohe Akzeptanz auf, da in vielen wissenschaftlichen Arbeiten darauf Bezug genommen und diskutiert wird (FU & RICH 2002; HARTMANN 2007, 20 ff.; HUANG & FU 2009; HUANG et al. 2009; HUGHES 2000; MARTÍNEZ-DURBÁN et al. 2009; THOMPSON 2003).

Neben einem DHM in 250 Metern Auflösung werden Strahlungsmessungen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) aus ganz Österreich verwendet. Für die Kalibrierung des ArcGIS-Tools stehen insgesamt etwa 4,5 Millionen Beobachtungen im Zeitraum 1961 bis 2010 an insgesamt 782 Wetterstationen zur Verfügung. Neben der täglich gemessenen Globalstrahlung an den in ganz Österreich verteilten 782 Stationen, stammt der Großteil der zur Kalibrierung verwendeten Daten aus stündlichen Messungen von globaler und diffuser Strahlung an der Station „Hohe Warte“.

2.2 Kalibrierung des ArcGIS-Tools *Solar Radiation*

Auf eine Beschreibung des Werkzeuges *Solar Radiation* selbst wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet und auf die Arbeiten der Entwickler (FU & RICH 1999, 2000) sowie auf die Softwaredokumentation von ArcGIS (ab Version 9.2) verwiesen. Im Fokus der vorliegenden Kalibrierung steht lediglich die Einstellung von *Diffuse Proportion* und *Transmittivity* (atmosphärische Durchlässigkeit). Mit entsprechender Variation dieser beiden Parameter können sowohl verschiedene Bewölkungsgrade als auch eine wolkenfreie Situation simuliert werden (FU & RICH 1999, HUANG et al. 2008).

Die Kalibrierung erfolgt auf Monatsbasis und für Clear-Sky-Bedingungen. Aus diesem Grund werden aus einem Datenbestand von etwa 860.000 Beobachtungen, verteilt auf insgesamt 238 Wetterstationen nur jene ausgewählt, die auf wolkenlose Bedingungen schließen lassen. Dies wird dadurch gewährleistet, dass lediglich ausreißerbereinigte (3-Sigma-Test) und nach Monaten gruppierte Globalstrahlungsmaxima berücksichtigt werden. Eine weitere wichtige Voraussetzung für die Kalibrierung ist die Kenntnis über das Verhältnis von direkter und diffuser Strahlung. Die direkte Strahlung verändert sich nämlich mit wechselnder Exposition sehr stark, während die diffuse Himmelsstrahlung davon kaum betroffen ist. Je höher der Bewölkungsgrad, desto mehr gleichen sich die Unterschiede zwischen den beiden Strahlungskomponenten aus (GEIGER 1950, 220). Als Datenbasis steht dafür eine langjährige Beobachtungsreihe von Globalstrahlung und diffuser Strahlung der ZAMG an der Station „Hohe Warte“ in Wien zur Verfügung. Die Auswahl monatlicher Strahlungsmaxima gewährleistet auch hier die Selektion von wolkenfreien Tagen.

Den beobachteten Daten werden Berechnungsergebnisse des ArcGIS-Tools gegenübergestellt, wobei die Berechnung der Globalstrahlung an allen Messstationen mit 117 Kombinationen der Parameter *Diffuse Proportion* im Intervall von [0,2; 0,25 .. 0,6] und *Transmittivity* im Intervall von [0,3; 0,35 .. 0,9] pro Monat durchgeführt wird. Für die Kalibrierung eines einheitlichen Parametersatzes für ganz Österreich wird anschließend aus den Ergebnissen der monatliche Mittelwert über alle Stationen gebildet.

Die Grundlagen für den Fitting-Prozess bilden einerseits ein Mittelwertvergleich zwischen Simulations- und Beobachtungsdaten an allen Stationen und andererseits eine Berechnung des mittleren quadratischen Fehlers (*RMSE*). In einem ersten Schritt werden für jeden Monat jene Parameterkombinationen gesucht, welche sowohl die geringste Mittelwertdifferenz als auch den kleinsten *RMSE* aufweisen. Im nächsten Schritt wird dieses Ergebnis auf die Messdaten der Station „Hohe Warte“ angewendet. Hier wird nun versucht, ein optimales Fitting der Verhältniswerte von direkter und diffuser Strahlung bei gleichzeitig möglichst geringer Abweichung vom Optimum der für alle anderen Stationen gerechneten Mittelwertdifferenz und des *RMSE* zu erreichen. Das Ziel dieses Prozesses ist eine optimale Approximation der maximalen Globalstrahlung an allen Messstationen unter der Voraussetzung eines korrekten Verhältnisses zwischen direkter und diffuser Strahlung. Die in Tabel-

le 1 angeführten *RMSE* und Mittelwertabweichungen entsprechen demnach nicht dem absoluten Minimum, sondern dem unter der Voraussetzung des korrekten Verhältnisses von direkter und diffuser Strahlung optimalen Minimum.

Da eine Kalibrierung und anschließende Validierung auf Monatsbasis erfolgt, werden die simulierten Daten nur für jeweils einen repräsentativen Tag pro Monat berechnet. Die Auswahl dieser Tage wurde nach KLEIN (1977), deren Verifizierung von SCHAUMBERGER (2005, 48) vorgenommen. Die optimalen Parameter für Clear-Sky-Bedingungen in den einzelnen Monaten, abgestimmt auf Österreich, sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Ergebnisse der Kalibrierung der Parameter *Diffuse Proportion* und *Transmittivity* für Monatsmaxima der Globalstrahlung in Österreich

| Beschreibung | JAN | FEBMÄR | APR | MAI | JUN | JUL | AUG | SEP | OKT | NOV | DEZ | |
|------------------------------------|-------|--------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| Diffuse Proportion | 0,25 | 0,25 | 0,20 | 0,30 | 0,30 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,20 | 0,20 | 0,25 | 0,25 |
| Transmittivity | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,75 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,75 | 0,80 | 0,85 | 0,85 | 0,85 |
| RMSE | 1,11 | 1,04 | 1,53 | 1,21 | 1,44 | 1,31 | 1,28 | 1,44 | 1,17 | 1,27 | 1,15 | 1,37 |
| $\Delta(\bar{x})$ Modell-Messungen | -0,17 | -0,24 | -0,35 | -0,48 | 0,08 | 0,08 | -0,05 | 0,83 | -0,67 | -0,31 | -0,07 | 0,78 |

2.3 Berechnung eines Globalstrahlungsfaktors

Um den Effekt der Topografie zu isolieren, wird mithilfe des ArcGIS-Tools *Solar Radiation* ein entsprechender Faktor gebildet. Die Voraussetzung dafür ist die oben dargestellte Kalibrierung, da das Verhältnis von direkter und diffuser Strahlung für eine korrekte Berechnung bekannt sein muss. Während nämlich die diffuse Strahlung weitgehend isotrop ist und deshalb auf die geneigte Geländeoberfläche in gleicher Weise, wie auf die horizontale Fläche wirkt, sind die Effekte bei der direkten, anisotropen Strahlung vor allem in Monaten mit niedrigem Sonnenstand sehr stark von Exposition und Neigung des Geländes abhängig.

Mit dem ArcGIS-Tool kann die Berücksichtigung der Geländeoberfläche durch die Einstellung FROM_DEM aktiviert oder mit FLAT_SURFACE deaktiviert werden. Im Fall der Deaktivierung wird zwar wie bei Aktivierung ein DHM für die Repräsentation der Seehöhe verwendet, im Gegensatz dazu jedoch Exposition und Hangneigung auf 0 gestellt. Die Berechnung der Globalstrahlung unter Berücksichtigung der vorgenommenen Kalibrierung erfolgt für das gesamte Untersuchungsgebiet einmal mit der Einstellung FROM_DEM (Ergebnisraster \mathbf{R}_T) sowie für FLAT_SURFACE (Ergebnisraster \mathbf{R}_H) für die einzelnen Monatstage nach KLEIN (1977). Die Variablen in dieser Arbeit werden in Matrixnotation (fett gedruckte Großbuchstaben) dargestellt, wenn der jeweilige Parameter eine Rasteroberfläche repräsentiert, andernfalls (Normalschreibweise) handelt es sich um dimensionslose Bezeichnungen des jeweiligen Parameters. Das Verhältnis der beiden auf diese Weise berechneten Rasteroberflächen in der Form

$$\mathbf{R}_f = \frac{\mathbf{R}_T}{\mathbf{R}_H} \quad (1)$$

ergibt den Faktor \mathbf{R}_f , der die topografiebedingte Variabilität der Globalstrahlung unter Berücksichtigung des Verhältnisses von direkter und diffuser Strahlung bei Clear-Sky-Bedingungen beschreibt (vgl. KUDISH et al. 1982).

2.4 Geostatistische Interpolation der Globalstrahlung

Die an den Wetterstationen der ZAMG gemessene tägliche Globalstrahlung wird mittels *Ordinary Kriging* unter Verwendung eines sphäroidischen Semivariogrammodells interpoliert (vgl. REHMAN & GHORI 2000). Damit werden die räumlichen Unterschiede atmosphärischer Trübungsgrade näherungsweise in kontinuierlichen Oberflächen dargestellt. Problematisch in diesem Zusammenhang ist die Tatsache, dass viele Wetterstationen die Strahlung nicht messen, dadurch das Netz an Interpolationsstützstellen nicht sehr eng ist und somit die Genauigkeit der erstellten Rasteroberflächen beeinträchtigt wird. Hier kann eine Annäherung mithilfe der Sonnenscheindauer, ein wesentlich häufiger anzutreffender Parameter, eine deutliche Verbesserung der Stützstellendichte bewirken. Mit der Sonnenscheindauer kann unter Verwendung der Ångström-PreScott-Gleichung (ÅNGSTRÖM 1924, PRESCOTT 1940) die Globalstrahlung geschätzt werden (SCHAUMBERGER 2011, 125 f.).

2.5 Kombination von Globalstrahlungsfaktor und Interpolation

Indem die interpolierte Globalstrahlung mit einem Faktor verändert wird, der die Effekte der Topografie abbildet, entsteht eine Oberfläche, welche sowohl die aktuelle atmosphärische Situation als auch die durch das Gelände bedingte Variabilität der Strahlung berücksichtigt. Alle vom Wert 1 (für ebene Flächen) verschiedenen Faktorwerte verändern die interpolierte aktuelle Globalstrahlung \mathbf{R}_S gemäß der von einer horizontalen Ausrichtung abweichenden Topografie und dem darauf einwirkenden Verhältnis von direkter und diffuser Strahlung. Da der Faktor auf Clear-Sky-Bedingungen kalibriert wurde, würden die geländebedingten Strahlungseffekte so integriert, als wäre überall wolkenloser Himmel, d. h. südexponierte Hänge weisen einen hohen Strahlungsgenuss auf, abgeschattete Hänge werden kaum beschienen. Natürlich entspricht dies meistens nicht der Realität und deshalb muss eine entsprechende Anpassung des Globalstrahlungsfaktors \mathbf{R}_f vorgenommen werden.

Zunächst ist dafür die Frage zu beantworten, welches Verhältnis zwischen aktueller Globalstrahlung (als Interpolationsoberfläche \mathbf{R}_S) und maximal möglicher (Clear-Sky) Strahlung besteht. Dieser relative Unterschied wird dazu verwendet, den auf Clear-Sky-Bedingungen angepassten Globalstrahlungsfaktor \mathbf{R}_f gemäß der aktuell gemessenen und interpolierten Strahlung zu modifizieren. Als Voraussetzung dafür wird mit der Gleichung

$$\mathbf{F}_R = \frac{\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_{\min}}{\mathbf{R}_{\max} - \mathbf{R}_{\min}} \tag{2}$$

ein Fraktionswert \mathbf{F}_R gebildet, der \mathbf{R}_S in Beziehung zu den interpolierten Oberflächen von langjährigem Globalstrahlungmaximum (\mathbf{R}_{\max}) und -minimum (\mathbf{R}_{\min}) setzt. Am Beispiel des Standortes Gumpenstein, also anhand der Werte in einer einzelnen Rasterzelle, werden in Abbildung 1 die für die Gleichung (2) vorausgesetzten Daten im Jahresgang dargestellt.

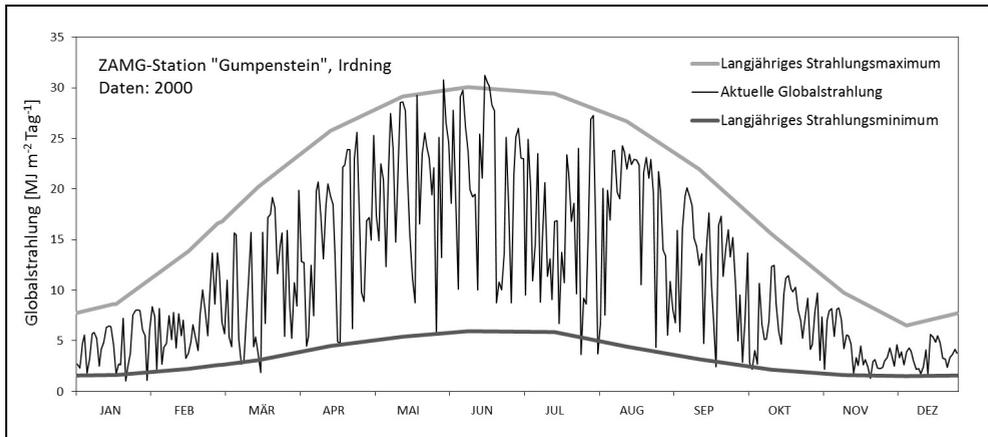


Abb. 1: Globalstrahlungsmessungen im Jahr 2000 sowie langjährige Monatsmittelwerte der minimalen und maximalen Globalstrahlung an der Station Gumpenstein

Bei wolkenlosem Wetter bleibt der Globalstrahlungsfaktor R_f unverändert – das Verhältnis von direkter und diffuser Strahlung entspricht der ursprünglichen Kalibrierung. Nimmt die Strahlungsintensität ab, besteht also eine atmosphärische Trübung (Bewölkung), erhöht sich der Anteil der diffusen Strahlung. Diese wirkt auf das Gelände isotrop, und der für Clear-Sky kalibrierte Faktor muss abgeändert werden. Da sich unter diesen Umständen der Anteil der direkten Strahlung vermindert, werden die südexponierten Geländeteile weniger stark bestrahlt und durch die gleichzeitig erhöhte diffuse Strahlung erhält der abgeschattete Bereich mehr Strahlung. Der ursprüngliche Clear-Sky-Globalstrahlungsfaktor R_f muss bei einer gemäß F_R geringeren Einstrahlung angepasst werden. Die Gleichung der Form

$$\mathbf{R}_F = \begin{cases} ((\mathbf{R}_f - 1) \mathbf{F}_R) + 1 & R_f \geq 1 \\ 1 - ((1 - \mathbf{R}_f) \mathbf{F}_R) & R_f < 1 \end{cases} \quad (3)$$

führt die Globalstrahlungsfaktoren \mathbf{R}_f entsprechend dem Fraktionswert \mathbf{F}_R gegen 1; dies resultiert in einem angepassten Faktor \mathbf{R}_F . Mit $R_f > 1$ wird die interpolierte aktuelle Strahlung \mathbf{R}_S aufgrund einer südexponierten Lage erhöht, aber nur soweit, wie es dem Einfluss von F_R entspricht. Eine maximale Erhöhung ist unter Clear-Sky-Bedingungen gegeben, wo F_R mit 1 in die Gleichung eingeht – der Faktor bleibt also unverändert ($R_f = R_F$) und entspricht dem Effekt der ursprünglichen Kalibrierung. In ähnlicher Weise wird mit $R_f < 1$ verfahren. Diese Werte beschreiben abgeschattete Geländebereiche, die unter Clear-Sky-Bedingungen geringer als eine ebene Fläche bestrahlt werden – R_f verringert somit dort die interpolierte Globalstrahlung \mathbf{R}_S . Je höher der atmosphärische Trübungsgrad bzw. je geringer der Fraktionswert \mathbf{F}_R ist, desto weniger unterscheidet sich der Strahlungsgenuss im abgeschatteten Gelände gegenüber jenem einer ebenen Fläche aufgrund des verstärkten Einflusses der isotropen, diffusen Strahlung. Der Globalstrahlungsfaktor R_f wird entsprechend F_R erhöht, also an 1 herangeführt und es ergibt sich daraus der angepasste Faktor \mathbf{R}_F .

Sämtliche Berechnungen in dieser Arbeit, wie sie in den Gleichungen (1) bis (3) dargestellt sind, werden mithilfe von Raster-Algebra-Operationen umgesetzt. Dazu gehört auch die Berechnung des Endergebnisses. Dabei wird die interpolierte aktuelle Globalstrahlung \mathbf{R}_S mit dem angepassten Globalstrahlungsfaktor \mathbf{R}_F multipliziert; dies ergibt eine Oberfläche,

welche topografische Effekte integriert, die den atmosphärischen Bedingungen und dem sich daraus ergebenden Verhältnis von direkter und diffuser Strahlung Rechnung tragen.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Berechnungen des ArcGIS-Tools *Solar Radiation* erfolgen für repräsentative Monats-tage, wie sie von KLEIN (1977) mit der Begründung eines optimalen Zusammenhangs zwischen extraterrestrischer Strahlung und Monatsmitteln der Globalstrahlung definiert wurden. Während die Kalibrierung des Tools ebenfalls auf Monatsbasis erfolgt, ergibt sich bei der Berechnung des angepassten Faktors R_F (Gleichung (3)) auf Tagesbasis die Notwendigkeit einer linearen Interpolation von R_f (Gleichung (1)) für die einzelnen Tage zwischen den von KLEIN (1977) empfohlenen Monatstagen.

Wie im Abschnitt 2.2 dargestellt, spielt das Verhältnis von direkter und diffuser Strahlung bei der Anwendung eines GIS-Strahlungsmodells eine wichtige Rolle. In Abbildung 2 wird das Ergebnis der Kalibrierung der beiden Parameter *Diffuse Proportion* und *Transmittivity* mit Messwerten der Station „Hohe Warte“ anhand der Anpassung von Beobachtung und Simulation für die beiden Strahlungsarten und für die sich daraus ergebende Summe der Globalstrahlung dargestellt. Die dafür verwendeten Einstellungen der ArcGIS-Parameter sind in Tabelle 1 angeführt. Zwischen ihnen herrscht eine inverse Beziehung, welche für die Wirkung von atmosphärischen Einflüssen auf das Strahlungsmodell genutzt wird. Beispielsweise ist in der Wertereihe von Tabelle 1 auch erkennbar, dass sich der höhere Wasserdampfgehalt im Sommer auf den Trübungsgrad der Atmosphäre unter wolkenlosen Bedingungen entsprechend auswirkt (SAUBERER & DIRMHORN 1958, 16 f.).

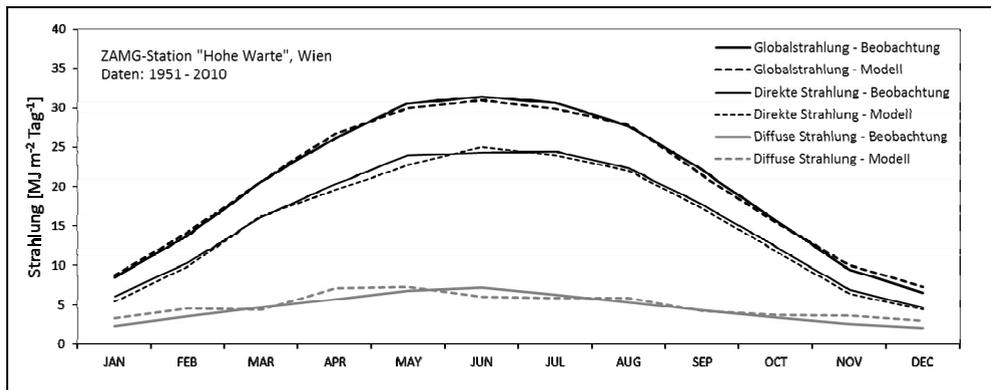


Abb. 2: Kalibrierung des ArcGIS-Tools *Solar Radiation* für „Clear-Sky“-Bedingungen auf Basis langjähriger Beobachtungsdaten der Station „Hohe Warte“

Die Kalibrierung auf Monatsmittelwertbasis ist eine Vereinfachung, welche für die Gewährleistung der statistischen Robustheit und wegen des extremen Rechenaufwandes bei der Anwendung des ArcGIS-Tools *Solar Radiation* für ein Untersuchungsgebiet der Größe Österreichs notwendig ist. Auch die geostatistische Interpolation der an den Messstationen beobachteten Globalstrahlung bringt naturgemäß Interpolationsfehler mit sich. Um diese zu

verifizieren, wurde eine *Leave-One-Out*-Kreuzvalidierung, wie sie in Abbildung 3 dargestellt ist, für ausgewählte Tage im Jahreslauf vorgenommen.

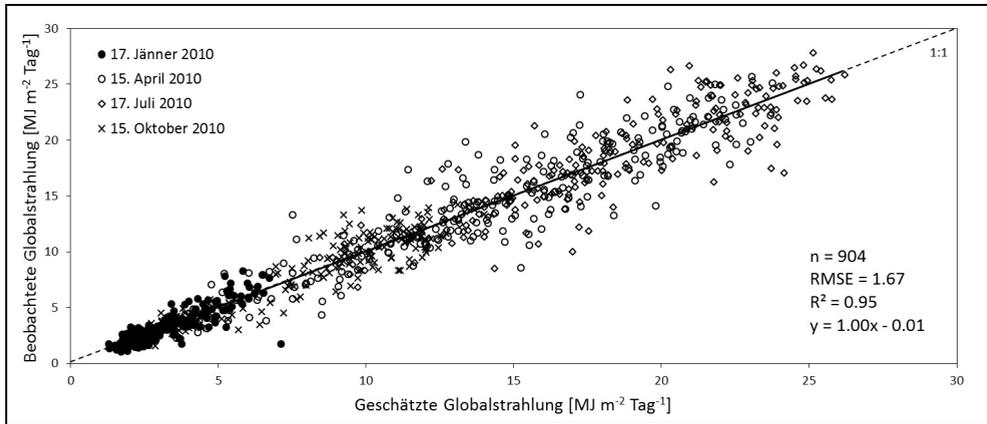


Abb. 3: Kreuzvalidierung der geostatistischen Interpolation der Globalstrahlung für ausgewählte Tage an den ZAMG-Wetterstationen im Jahr 2010

Die relative Streuung der Werte in den einzelnen Monaten ist ähnlich hoch. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,95 und einem *RMSE* von 1,67 ist die Qualität der Interpolation auch mit der Validierung der Ergebnisse des ArcGIS-Modells *Solar Radiation* vergleichbar. Dabei werden den Beobachtungen an allen Messstationen die Simulationsergebnisse auf Basis der Parametereinstellungen in Tabelle 1 gegenübergestellt. Dieses Ergebnis zeigt mit einem R^2 von ebenfalls 0,95 und einem *RMSE* von 1,98 einen starken Zusammenhang.

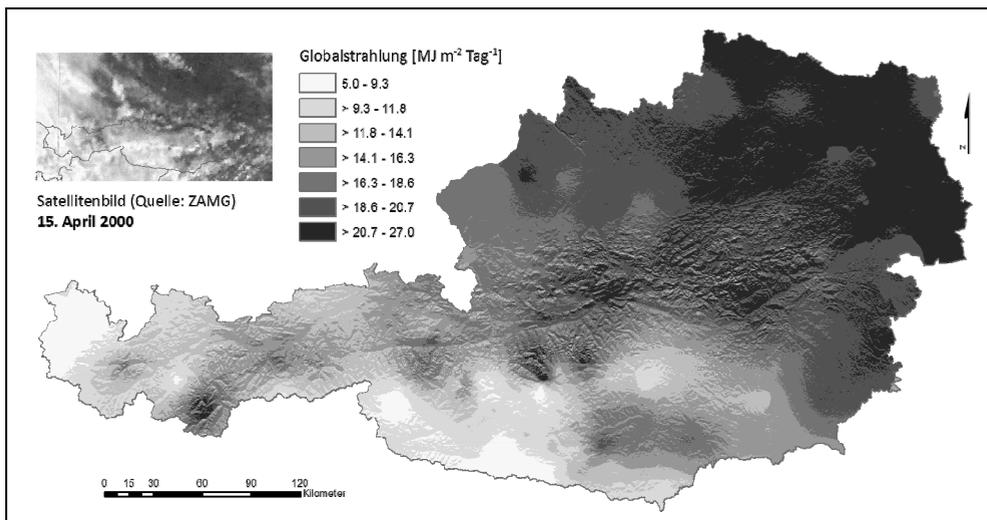


Abb. 4: Oberfläche der Globalstrahlung am 15. April 2000 im Vergleich zum Satellitenbild (Darstellung des sichtbaren Spektralbereiches) dieses Tages

Das Endergebnis der hier vorgestellten räumlichen Implementierung wird in Abbildung 4 am Beispiel einer Oberfläche vom 15. April 2000 gezeigt. Im direkten Vergleich dazu befindet sich ein Satellitenbild, aufgenommen um 12:00 Uhr desselben Tages. In Gebieten mit dichter Bewölkung tritt die Topografie aufgrund des hohen Anteils an diffuser Himmelsstrahlung in den Hintergrund (z. B. in Osttirol), wo hingegen in den östlichen Ausläufern des Alpenbogens diese klar hervortritt. Verantwortlich dafür ist die direkte Strahlung, die in Bereichen mit geringer Bewölkung stärker zur Wirkung kommt.

4 Schlussfolgerungen

Mit dem vorliegenden Ansatz einer Kombination von Beobachtung und Modellierung der Globalstrahlung sowie deren räumliche Implementierung mit Methoden der Geoinformatik werden Oberflächen generiert, welche sowohl Informationen über die Atmosphäre als auch über die Topografie in sich vereinen.

Eine exakte Validierung der Endergebnisse ist schwierig, weil dafür sehr viele Sensoren mit langen Messreihen notwendig wären. Aus diesem Grund werden einfachere Strahlungsmodelle oft nur mit komplexeren verglichen und damit deren Qualität bestimmt. Die Einbeziehung von Fernerkundung zur Unterstützung und Evaluierung der Interpolation von Beobachtungen ist denkbar; nach einer vergleichenden Arbeit von MARTÍNEZ-DURBÁN et al. (2009) können DHM-basierte Strahlungsmodelle mit entsprechender Kalibrierung, insbesondere in topografisch komplexen Gebieten, jedenfalls gute Ergebnisse liefern. In der vorliegenden Arbeit stehen ausschließlich die Möglichkeiten und Voraussetzungen einer Anwendung des ArcGIS-Tools *Solar Radiation* im Mittelpunkt des Interesses. Eine tiefer gehende Darstellung zu diesem Thema, dessen wichtigste Punkte hier zusammengefasst wurden, findet sich in SCHAUMBERGER (2011). Künftige Entwicklungen können auf diesen einfachen Modellansätzen aufbauen und bei entsprechender Datenverfügbarkeit mit anderen Effekten, wie z. B. der fotosynthetisch aktiven Strahlung (PAR), erweitert werden.

Indem die Anwendung lediglich von Beobachtungen in Form von Strahlungsmessungen an Wetterstationen abhängig ist, und nicht wie bei anderen Arbeiten auch von Fernerkundungsdaten (vgl. JOURNÉE & BERTRAND 2010), kann dieser Ansatz auch für die Verarbeitung von Klimaszenarien eingesetzt werden. Alle Anwender, welche für ihre Analysen räumliche Strahlungsdaten benötigen, haben damit die Möglichkeit, nicht nur vergangene Perioden zu analysieren, sondern sie auch in fachliche Applikationen zur Abschätzung der Folgen von Klimaveränderungen in hoher räumlicher Auflösung einzusetzen.

Danksagung

Wir danken der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) für die Bereitstellung der Wetterdaten.

Literatur

- ÅNGSTRÖM, A. (1924), Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50 (210), 121-126.
- BASLER, M. (2005), Untersuchungen zur Strahlungs- und Energiebilanz an den Muschelkalksteilhängen um Jena. Diploma Thesis, Friedrich-Schiller-Universität, Geographie, Jena, 98 S.
- DUBAYAH, R. & RICH, P. M. (1995), Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9 (4), 405-419.
- FU, P. & RICH, P. M. (1999), Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales. ESRI International User Conference, San Diego, Environmental Systems Research Institute (ESRI), 23.
- FU, P. & RICH, P. M. (2000), The Solar Analyst 1.0 User Manual, Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), Kansas, USA, 53 S.
- FU, P. & RICH, P. M. (2002), A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37 (1-3), 25-35.
- GEIGER, R. (1950), Das Klima der bodennahen Luftschicht. Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie. Die Wissenschaft. Einzeldarstellungen aus der Naturwissenschaft und der Technik. 3. Auflage. Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, 460 S.
- HARTMANN, G. M. (2007), Investigation of Evapotranspiration Concepts in Hydrological Modelling for Climate Change Impact Assessment. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, Stuttgart, 170 S.
- HOFIERKA, J. & SÚRI, M. (2002), The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. Proceedings of the Open source GIS – GRASS users conference 2002, Trento, Italy, 11.-13. September 2002, 19.
- HUANG, S. & FU, P. (2009), Modeling Small Areas Is a Big Challenge. *ArcUser* (Spring 2009), ESRI, Redlands, CA, USA, 28-31.
- HUANG, S., RICH, P., CRABTREE, R., POTTER, C. & FU, P. (2008), Modeling Monthly Near-Surface Air Temperature from Solar Radiation and Lapse Rate: Application over Complex Terrain in Yellowstone National Park. *Physical Geography*, 29 (2), 158-178.
- HUANG, S., CONNAUGHTON, Z., POTTER, C., GENOVESE, V., CRABTREE, R. & FU, P. (2009), Modeling Near-Surface Air Temperature From Solar Radiation and Lapse Rate: New Development on Short-Term Monthly and Daily Approach. *Physical Geography*, 30 (6), 517-527.
- HUGHES, P. (2000), Direct Solar Radiation: A Modelling Technique. The 12th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre, Dunedin, New Zealand, University of Otago, 10.-13. Dezember 2000, 10.
- JOURNÉE, M. & BERTRAND, C. (2010), Improving the spatio-temporal distribution of surface solar radiation data by merging ground and satellite measurements. *Remote Sensing of Environment*, 114 (11), 2692-2704.
- KLEIN, S. A. (1977), Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 19, 325-329.
- KUDISH, A. I., WOLF, D. & MACHLAV, Y. (1982), A novel approach for calculating the monthly average daily fraction of diffuse solar radiation. *Solar Energy*, 28 (3), 181-186.

- MARTÍNEZ-DURBÁN, M., ZARZALEJO, L. F., BOSCH, J. L., ROSIEK, S., POLO, J. & BATLLES, F. J. (2009), Estimation of global daily irradiation in complex topography zones using digital elevation models and meteosat images: Comparison of the results. *Energy Conversion and Management*, 50 (9), 2233-2238.
- PRESCOTT, J. A. (1940), Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 64, 114-118.
- REHMAN, S. & GHORI, S. G. (2000), Spatial estimation of global solar radiation using geostatistics. *Renewable Energy*, 21 (3-4), 583-605.
- RUIZ-ARIAS, J. A., TOVAR-PESCADOR, J., POZO-VÁZQUEZ, D. & ALSAMAMRA, H. (2009), A comparative analysis of DEM-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain. *International Journal of Geographical Information Science*, 23 (8), 1049-1076.
- SAUBERER, F. & DIRMHORN, I. (1958), Das Strahlungsklima. In: STEINHAUSER et al. (Eds.), *Klimatographie von Österreich*, Band 3, 1. Lieferung. *Denkschriften der Gesamtkademie*. Springer Verlag, Wien, 13-102.
- SCHAUMBERGER, A. (2005), Ertragsanalyse im österreichischen Grünland mittels GIS unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Veränderungen. Diplomarbeit, Johannes Kepler Universität Linz; eingereicht am Institut für Geoinformation der Technischen Universität Graz, Rottenmann, 138 S.
- SCHAUMBERGER, A. (2011), Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland. Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Geoinformation, 264 S.
- THOMPSON, G. (2003), Effects of DEM resolution on GIS-based solar radiation model output: A comparison with the National Solar Radiation Database. Master Thesis, University of Cincinnati, Department of Geography, Cincinnati, 48 S.
- TOVAR-PESCADOR, J., POZO-VÁZQUEZ, D., RUIZ-ARIAS, J. A., BATLLES, J., LÓPEZ, G. & BOSCH, J. L. (2006), On the use of the digital elevation model to estimate the solar radiation in areas of complex topography. *Meteorological Applications*, 13 (3), 279-287.