

SATELLITENBASIERTE PV POTENTIAL KLIMATOLOGIE FÜR ALPINE REGIONEN

Jochen WAGNER¹, Martial DUGUAY¹, Anke TETZLAFF², Reto STÖCKLI² and Marc ZEBISCH¹

Einleitung

In den Alpenen Regionen dominiert Wasserkraft bei der regenerativen Stromerzeugung. In den letzten Jahren hat aber auch hier die Bedeutung der Photovoltaik zugenommen. Vor allem die Südalpen und inneralpine Regionen bieten gute Bedingungen für Photovoltaik (PV). Die Kombination von hoher Einstrahlung und niedrigen Temperaturen ist für Solarzellen besonders geeignet. Um die Verbreitung von PV-Anlagen zu fördern sollte PV ein wichtiger Bestandteil in der Regionalplanung sein. Im Alpenen Gelände ist die Abschätzung des PV Ertrags besonders schwierig und vorhandene Datensätze weisen große Ungenauigkeiten auf. Aus diesen Gründen wurde das Projekt „PV-Alps“ im Jahr 2012 gestartet. Für den Kanton Graubünden und die Provinz Bozen wurde die solare Einstrahlung und der PV Ertrag für die beiden Technologien Cadmium Tellurid (CdTe) und polykristallines Silizium (pcSi) berechnet. Jetzt steht das Projekt unmittelbar vor dem Abschluss und die wesentlichen Ergebnisse liegen bereits vor.

Methodik

Ziel des Projekts war es, bestehende Algorithmen zur Strahlungs-/PV-Ertragsberechnung für Berggebiete zu adaptieren. In mehreren Bereichen wurden Verbesserungen zu herkömmlichen Berechnungsmethoden eingeführt. Dazu zählt eine verbesserte Wolkenerkennung durch Satellitendaten. Speziell die Unterscheidung zwischen schneebedeckten Flächen bzw. Gletschern und Wolken, die ähnliche Reflexionseigenschaften besitzen, konnte signifikant verbessert werden. Weiters konnte die Abschattung durch Berge mit Hilfe eines digitalen Höhenmodells mit 100 m räumlicher Auflösung, sehr präzise, und mit hoher zeitlicher Auflösung von 15 Minuten, bestimmt werden. Als zusätzliche Information wurde die Strahlung spektral berechnet, es liegt also nicht nur die (Breitband) Globalstrahlung vor, sondern es wurde die Strahlung in 32 spektralen Bändern berechnet.

Die Umrechnung der Solaren Strahlung in PV Ertrag erfolgte mit der sogenannten „Performance Matrix“ Methode für zwei Technologien (CdTe und pcSi).

Eingangsdaten für den Algorithmus sind:

- Satellitenbasierter Bewölkungsindex in ca. 2 x 2 km, 15 min Auflösung, Zeitraum 2004 bis 2012 (MeteoSwiss Produkt)
- Digitales Höhenmodelle der Provinz Bozen / Kanton Graubünden in 100 m Auflösung

¹EURAC research, Institute for Applied Remote Sensing, Bolzano, Italy

²Meteoswiss, Federal Office of Meteorology and Climatology, Zürich, Switzerland

- Aerosol Klimatologie - Aerosol optische Dicke und Einfachstreueralbedo, 2.5° x 2.5°, Monatsklimatologie (Kinne et al. 2006 und Holben et al.1998)
- Wasserdampf Monatsklimatologie 2.5° x 2.5°, vom Europäischen Zentrum für Mittelfrist Wettervorhersagen (EZMWF) (Betts et al. 2003, Dee et al. 2009)

Für die Horizontberechnung (siehe Abbildung 2) wurde das Modul r.horizon des Geografischen Informationssystems GRASS (<http://grass.osgeo.org/grass64/manuals/r.horizon.html>) verwendet. Kernstück des verwendeten Algorithmus bildet das modifizierte Programm SPECMAGIC, das vom Deutschen Wetterdienst entwickelt wurde (Mueller et al. 2012).

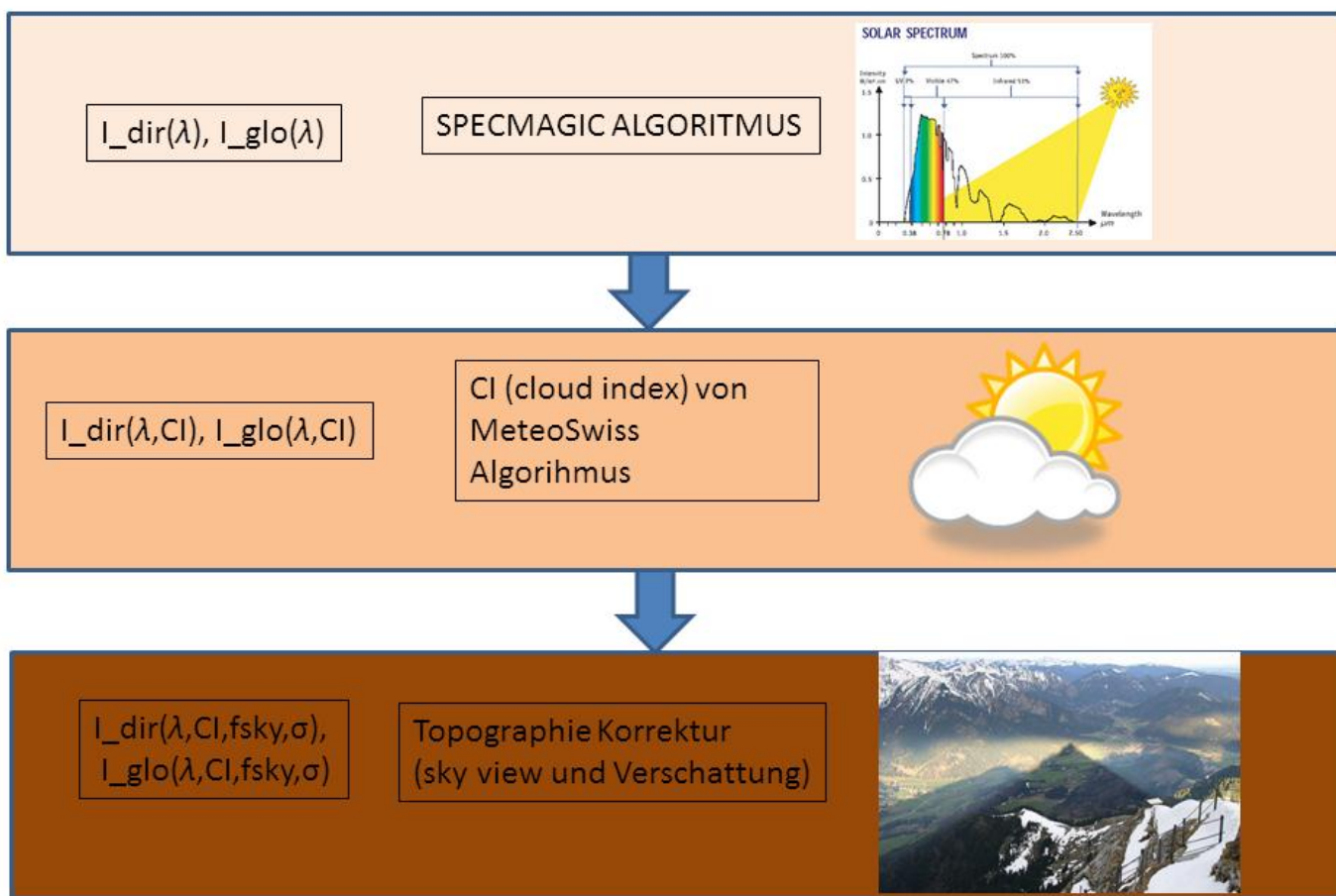


Abb. 1: Überblick zur Methodik „Räumliches und spektrales Downscaling“ (1. Berechnung der wolkenlosen spektrale Bestrahlungsstärken mit dem Algorithmus SPECMAGIC; 2. Bewölkungskorrektur mit Satellitendaten von Meteoswiss, 2x2 km, 15 min; 3. Topographiekorrektur anhand der Horizontfiles aus r.horizon.

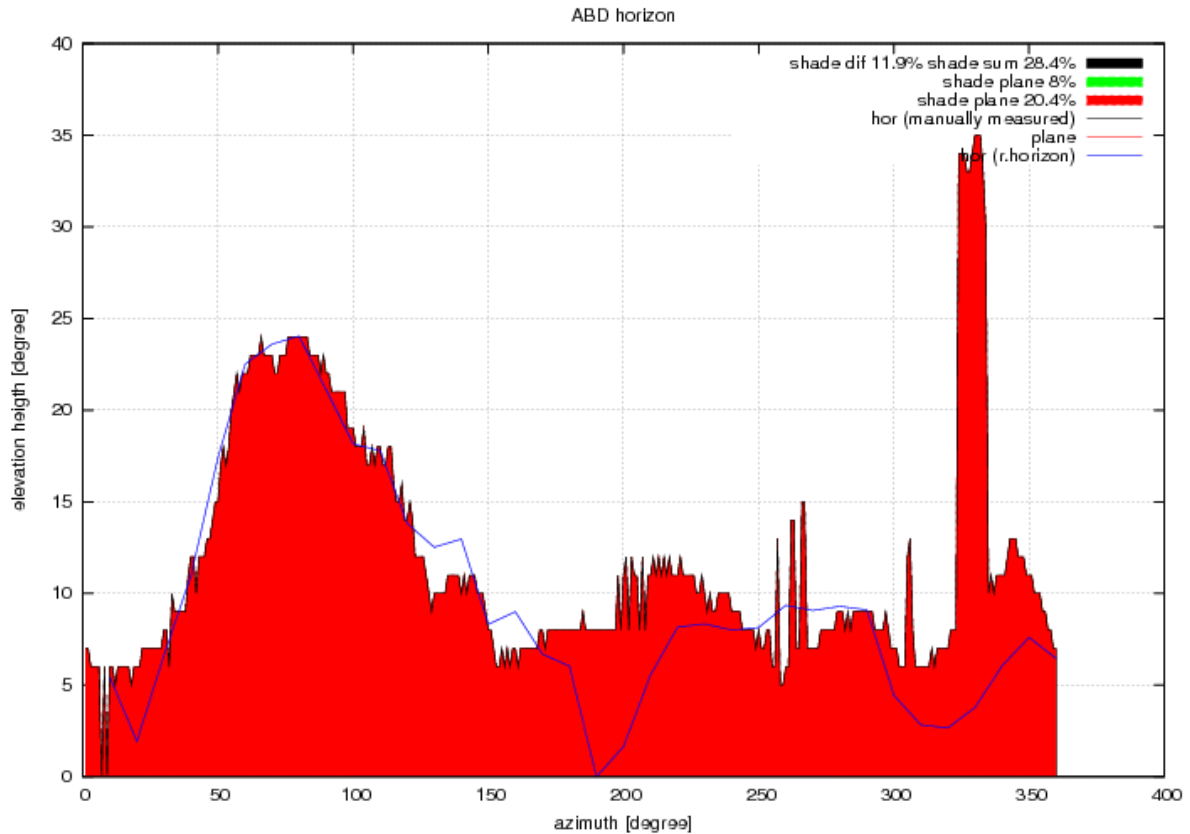


Abbildung 2: Gemessener (rot) und mit *r.horizon* berechneter (blau) Horizont am Flughafen Bozen. Nahverschattung (Mast bei 325°) wird nicht berücksichtigt.

In einem zweiten Schritt wurde aus der berechneten solaren Strahlung am Boden der PV-Ertrag für zwei Modultypen (pcSi und CdTe) bestimmt. Die einfachste Methode verwendet dabei einen konstanten Wirkungsgrad (siehe Formel 1). Der Wirkungsgrad ist allerdings vor allem von der Modultemperatur und der Einstrahlung abhängig. Deshalb verwenden wir die „Performance Matrix“ Methode (siehe Abbildung 3).

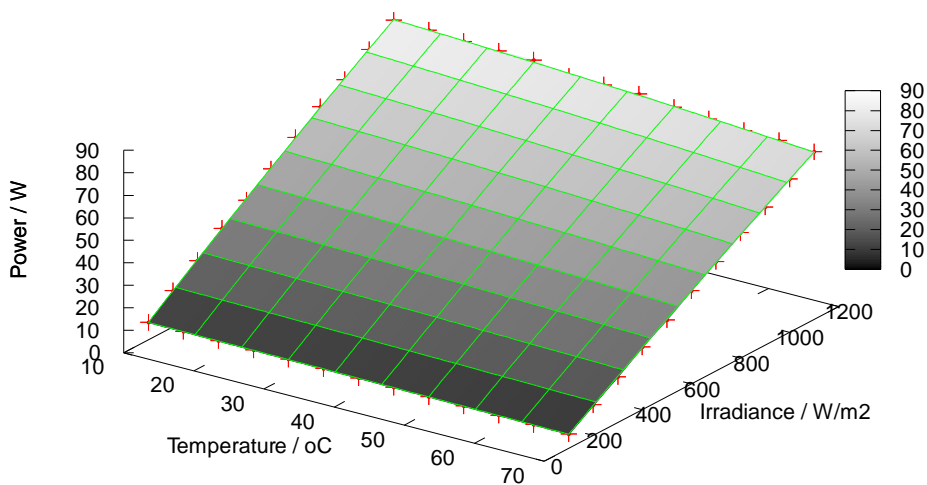


Abbildung 3: „Performance Matrix für CdTe. Im Labor wurden wurde die Modulleistung bei unterschiedlichen Modultemperaturen und Bestrahlungsstärken gemessen.

Aufgrund der im Labor bestimmten Messwerte, konnten die modulspezifischen Koeffizienten k_1 bis k_6 (siehe Formel 2) bestimmt werden. Die erforderlichen Datensätze der Monatsklimatologien des 2m Temperaturtagesgangs (1km x 1km) wurden von PVGIS (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>, Huld et al., 2006) bezogen.

$$E = \eta \cdot H \quad (1)$$

$$\eta_{rel}(G', T') = 1 + k_1 \cdot \ln(G') + k_2 \cdot (\ln(G'))^2 + T' \cdot (k_3 + k_4 \cdot \ln(G') + k_5 \cdot (\ln(G'))^2) + k_6 \cdot T'^2 \quad (2)$$

mit

$$G' = G/G_{STC} ; T' = T_{mod} - T_{mod_STC} \quad (3)$$

H – solare Bestrahlungsstärke

η – Wirkungsgrad

E – PV- Ertrag

Ergebnisse

Solare Bestrahlungsstärke

Zunächst wurde die solare Bestrahlungsstärke am Boden bestimmt. Es wurde die Durchschnittliche jährliche Bestrahlungsstärke der Jahre 2004 bis 2012 (15 min zeitliche Auflösung !) bestimmt. Es liegen Datensätze für den gesamten Alpenraum mit einer räumlichen Auflösung von ca. 2km x 2km vor (siehe Abbildung 4). Mit einer räumlichen Auflösung von 100m x 100m liegt zusätzlich die Bestrahlungsstärke in Graubünden (Abbildung 6) und Südtirol vor. Hier ist vor allem die Abschattung durch Berge und die Zunahme der Bestrahlungsstärke mit der Höhe genauer berücksichtigt.

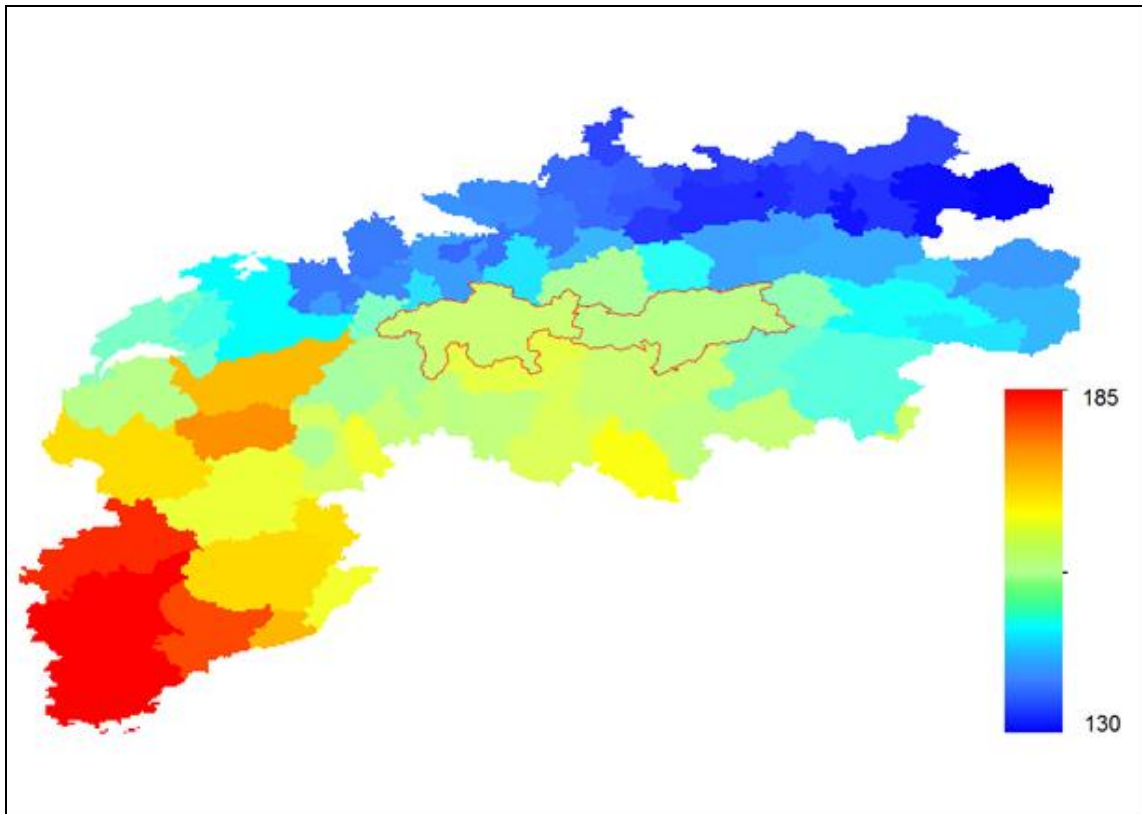


Abbildung 4: Durchschnittliche jährliche Bestrahlungsstärke in den Regionen des Alpenbogens (Periode 2004 bis 2012) in W/m^2 . Der Wert für Südtirol beträgt $155,2 W/m^2$ ($1360 kWh$). Graubünden empfängt durchschnittlich $157,1 W/m^2$ ($1376 kWh$).

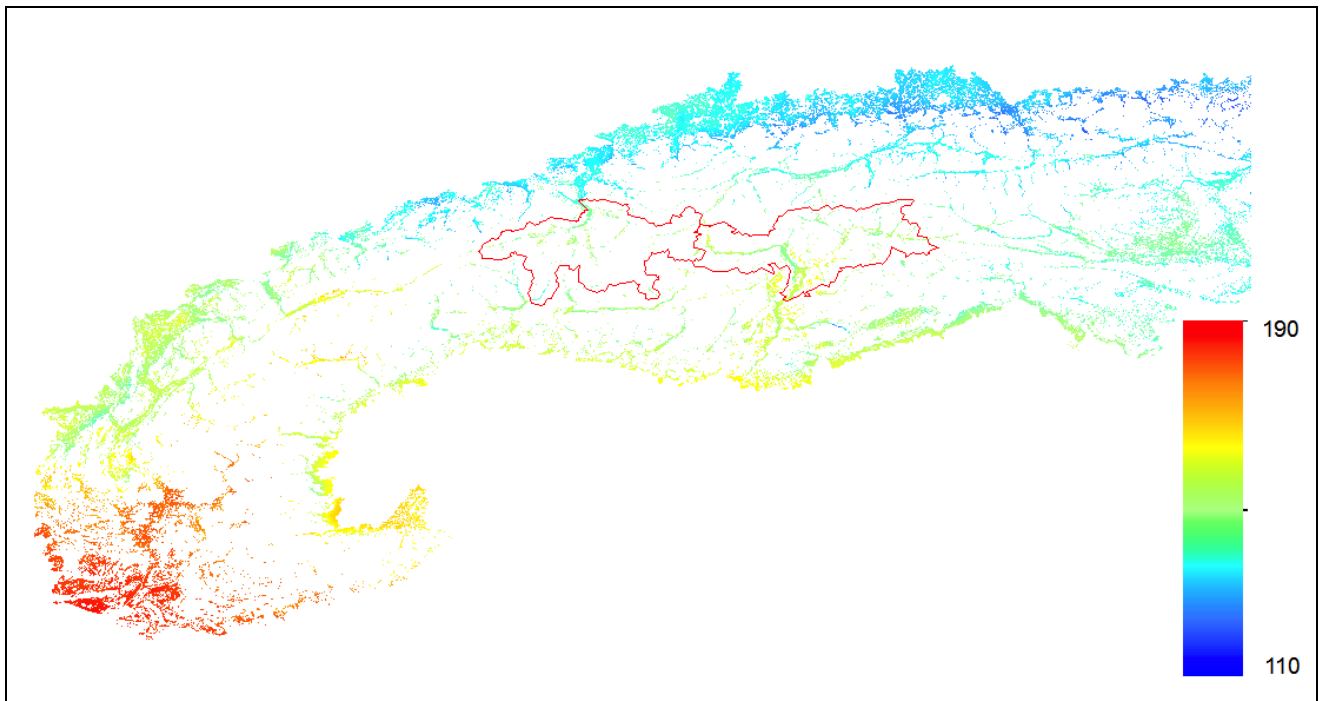


Abbildung 5: Wie Abbildung 4. Die jährliche Bestrahlungsstärke in den besiedelten Regionen ist dargestellt. Solche Analysen erleichtern die (über)regionale Raumplanung.

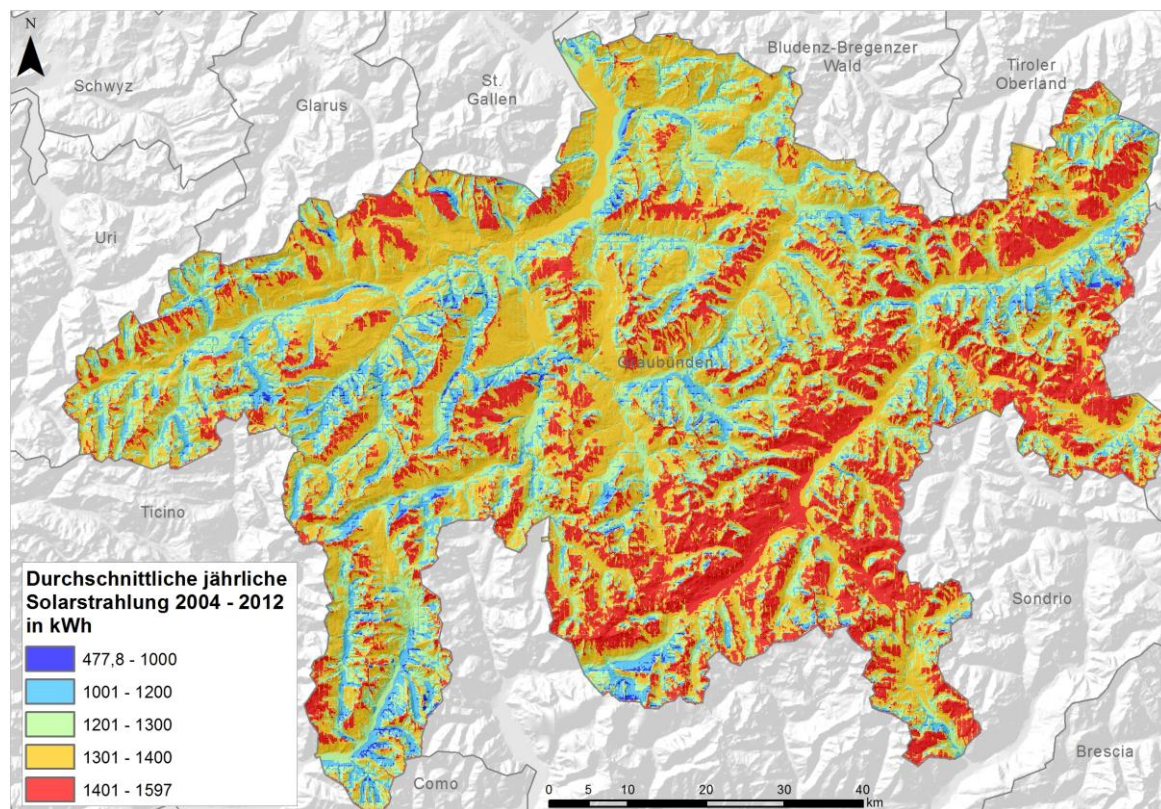


Abbildung 6: Wie Abbildung 4 mit der Einheit kWh/m². Die Abschattung durch die Berge und die Zunahme der Strahlung mit der Meereshöhe ist klar zu erkennen.

Validierung

Anschließend wurden die Daten für Graubünden und Südtirol verifiziert. Dabei wurden Messungen von Bodenstationen verwendet. Die Auswertungen konzentrierten sich auf die Monatsmittelwerte. Leider lagen vor allem in Südtirol keine (zuverlässigen) langen Zeitreihen der Bestrahlungsstärke vor. Es wurden deshalb nur die Jahre 2011 und 2012 ausgewertet. Gegenüber der Referenzberechnungsmethode „The Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF)“ (<http://www.cmsaf.eu/bvbw/appmanager/bvbw/cmsaf/Internet>) zeigen beide Methoden (PV Alps 1 – 2 km x 2 km Auflösung, PV Alps 2 – 100 m x 100 m Auflösung) eine deutliche Verbesserung. Die Genauigkeit der Messungen liegt bei 5 W/m². Weniger als 25 % der berechneten Monatsmittelwerte weist einen Unterschied von mehr als 5 W/m² auf. Der absolute BIAS liegt in der als Ziel definierten Größenordnung von 10 W/m². Der erstellte Datensatz erreicht somit auch in komplexem Alpinen Gelände höchste Qualitätsansprüche.

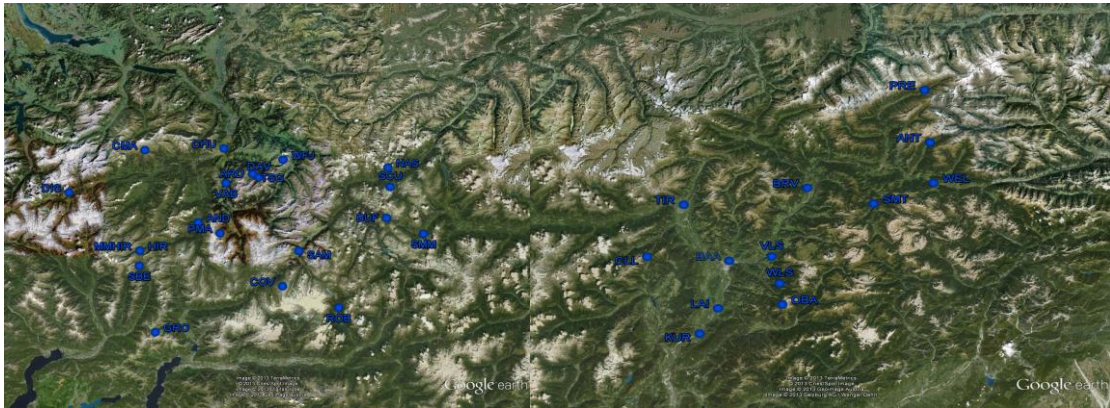


Abbildung 7: Lage der Stationen des Schweizer Messnetzes (SwissMetNet) innerhalb des Kantons Graubünden (links) und der Provinz Graubünden (rechts).

Tabelle 1: Ergebnisse der Validierung für Südtirol und Graubünden. Es wurden berechnete Monatsmittelwerte an 12 Stationen (siehe Abbildung 7) verglichen. Dabei wurden drei verschiedene Berechnungsmethoden verglichen (siehe Text).

	ANT	BAA	BRV	CLL	KUR	LAI	PRE	SMT	VLS	WEL	WLS	AV.
CMSAF												
MAB [W/m ²]	6,1	8,3	4,6	22,5	13,9	5,0	18,5	14,5	13,0	20,9	20,4	13,4
MBE [W/m ²]	1,2	-0,7	2,5	-20,4	13,6	-0,9	-18,5	-14,5	-13,0	-20,9	-8,9	-7,3
PV Alps 1												
MAB [W/m ²]	11,7	9,5	4,2	13,3	17,8	6,9	8,7	3,9	7,6	6,5	5,7	8,7
MBE [W/m ²]	2,9	-0,8	1,0	7,3	17,8	6,3	0,6	-1,4	7,6	-1,2	2,5	3,9
PV Alps 2												
MAB [W/m ²]	13,0	10,6	5,8	8,9	12,3	3,8	10,3	7,2	3,6	8,8	11,2	8,7
MBE [W/m ²]	10,8	-6,9	4,7	2,8	10,2	-2,1	7,9	1,5	2,1	-2,1	8,4	3,4
Analysed Month	n=8	n=12	n=12	n=12	n=12	n=7	n=12	n=12	n=12	n=12	n=6	

	AND	ARD	BUF	CHU	CMA	COV	DAV	DIS	NAS	PMA	ROB	SAM	SBE	SCU	SMM	TSG	VAB	
CMSAF																		
MAB	10,2	19,3	31,3	9,6	37,5	51,5	35,0	32,7	37,6	45,2	10,5	35,4	15,1	29,2	20,2	38,0	22,5	28,3
MBE	-6,1	17,9	31,3	-9,6	37,5	-1,5	35,0	32,7	37,6	5,2	7,5	35,4	-9,4	29,2	20,2	38,0	22,5	26,6
PV Alps 1																		
MAB	14,9	18,7	7,9	6,5	17,8	40,6	6,6	8,9	10,5	20,5	11,1	6,9	12,2	6,5	15,8	8,0	7,7	13,0
MBE	14,7	18,7	-1,1	5,2	-9,5	40,2	-2,9	2,2	0,1	16,6	9,6	-4,4	11,5	-3,2	-10,2	-1,4	6,8	-1,2
PV Alps 2																		
MAB	14,0	15,1	8,2	4,5	11,7	11,4	5,6	9,2	10,2	7,1	5,3	6,7	9,0	11,4	11,8	6,4	6,0	9,0
MBE	14,0	15,1	-2,5	-0,3	-5,5	-9,6	-2,5	1,6	-5,4	-4,9	4,5	-6,6	8,7	-9,9	1,3	-5,0	3,3	-0,2

Temporale Variabilität der solaren Bestrahlungsstärke

Um die Anwendungsmöglichkeiten des komplexen Datensatzes zu demonstrieren, ist in Abbildung 8 beispielhaft die jährliche Variabilität dargestellt. Im Untersuchungszeitraum 2004 bis 2012 wurde für neun Jahre der jährliche Mittelwert berechnet. Mit diesen Werten wurde der Variationskoeffizient C_t bestimmt (siehe Formeln 4 und 5). Die jährlichen Schwankungen sind also innerhalb von Südtirol keineswegs konstant, sondern bewegen sich zwischen weniger als einem Prozent und Werten über drei Prozent. Diese Information kann die Risikoabschätzung bei der Anlagenplanung verringern. Die Analyse der zeitlichen Variabilität im Bereich von Monaten oder Tagen hilft außerdem entscheidend bei der Netzplanung.

$$S_t = \left[\sum_{i=1}^{i=9} (\langle E_p \rangle - E_i)^2 / 8 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$C_t = S_t / \langle E_p \rangle \quad (5)$$

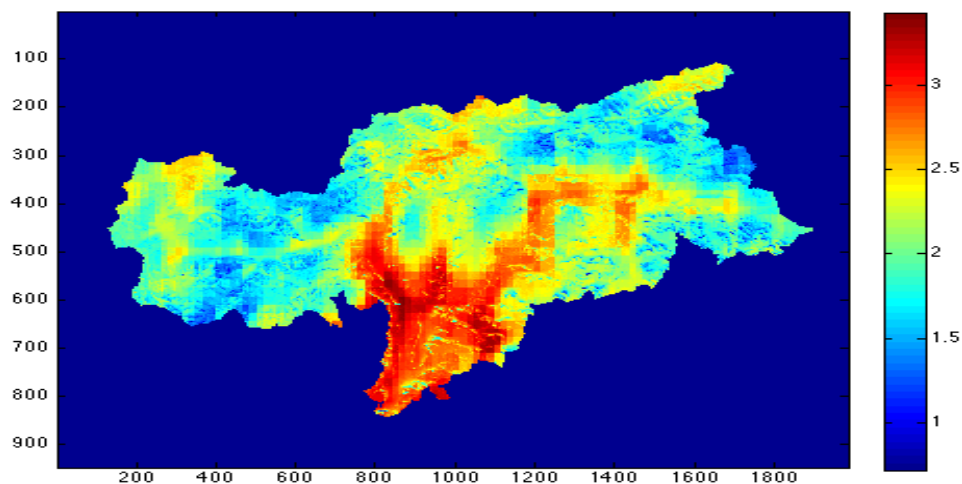


Abbildung 8: jährlicher Variationskoeffizient der solaren Bestrahlungsstärke in Prozent, in Südtirol.

PV Energieertrag

Letztlich wurde der Energieertrag für die beiden Technologien CdTe und pcSi berechnet. Es liegen sowohl monatliche Mittelwerte, als auch der jährliche Mittelwert aus den Jahren 2004 bis 2012 vor. Exemplarisch ist, in Abbildung 9, der durchschnittliche jährliche Ertrag für CdTe in Graubünden dargestellt. Ca. 10% (abhängig von Temperatur und Einstrahlung) der solaren Einstrahlung kann in elektrischen Strom umgewandelt werden (Vergleich mit Abbildung 6). Unsere Daten bieten aufgrund der hohen Genauigkeit und der hohen zeitlichen Auflösung – es liegen Jahresmittelwerte, Monatsmittelwerte, Tagesmittelwerte und sogar Mittelwerte zu bestimmten Tageszeiten (mit 15 Minuten zeitlicher Auflösung vor) eine hervorragende Grundlage für die regionale PV Planung in Graubünden und Südtirol.

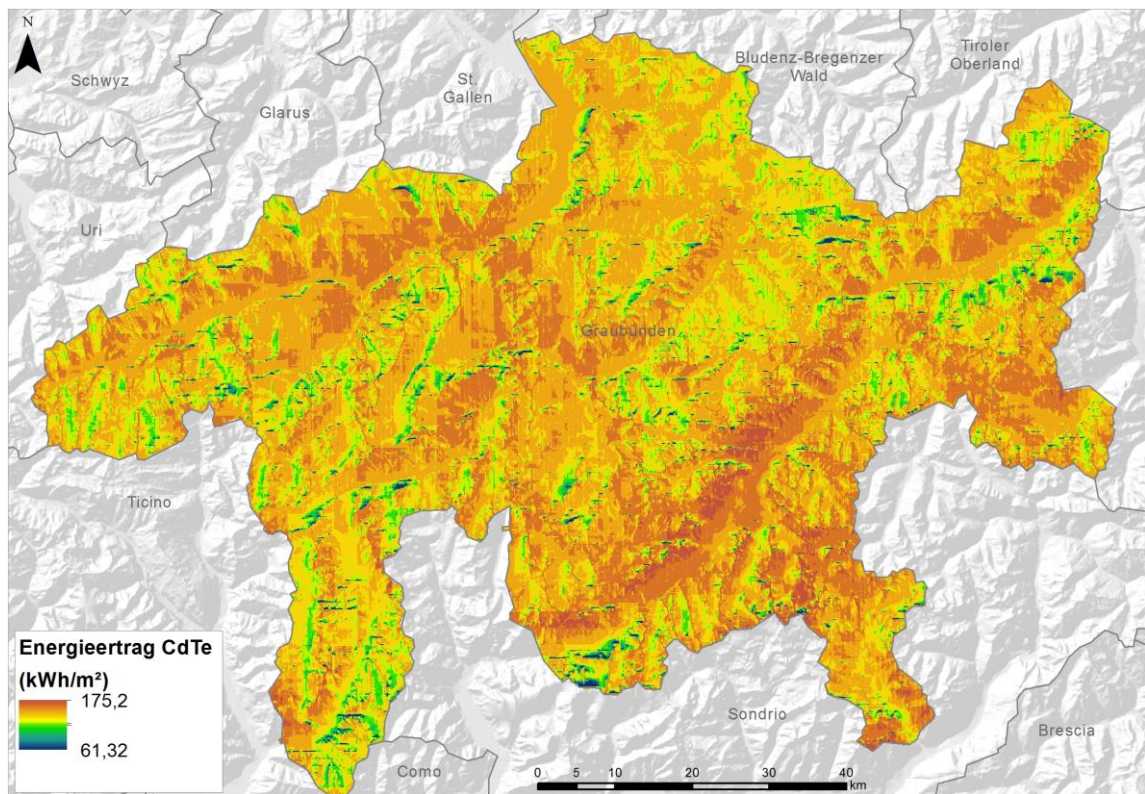


Abbildung 9: Mittlerer jährlicher Energieertrag (Periode 2004 bis 2012) in Graubünden für CdTe Solarmodule.

Literatur

Betts, A.K.; Ball, J.H.; Bosilovich, M.; Viterbo, P.; Zhang, Y.; Rossow, W.B. Intercomparison of water and energy budgets for five Mississippi subbasins between ECMWF re-analysis (ERA-40) and NASA Data Assimilation OcfvGCM for 1990-1999. *J. Geophys. Res.* 2003, 108, doi:10.1029/2002JD003127.

Dee, D.P., Uppala, S. Variational bias correction of satellite radiance data in the ERA-interim reanalysis. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2009, 135, 1830-1841.

Dozier, J., and D. Marks (1987), Snow mapping and classification from Landsat Thematic Mapper data, *Annals of Glaciology*, 9, 97-103

Thomas A. Huld, Marcel Šúri, Ewan D. Dunlop, Fabio Micale, *Estimating average daytime and daily temperature profiles within Europe, Environmental Modelling & Software, Volume 21, Issue 12, December 2006, Pages 1650-1661,*
Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman,

Y.J., Nakajima, T., et al. *AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. Remote Sens. Environ. 1998, 66, 1-16.*

Kinne, S., Schulz, M., Textor, C., Guibert, S., Balkanski, Y., Bauer, S.E., Berntsen, T., Berglen, T.F., Boucher, O., Chin, M.; et al. *An AeroCom initial assessment-Optical properties in aerosol component modules of global models. Atmos. Chem. Phys. 2006, 6, 1815-1834.*

Mueller, R., T. Behrendt, A. Hammer, A. Kemper: *A New Algorithm for the Satellite-Based Retrieval of Solar Surface Irradiance in Spectral Bands. Remote Sens. 2012, 4, 622-647; doi:10.3390/rs4030622*

Danksagung

Der Forschungsbeitrag wurde durch des Interreg Programm IV Italien - Schweiz im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) finanziert.