

Zuverlässigkeit von Einstrahlungsdaten aus mesoskalen Wettermodellen

Michael Bühner⁽¹⁾, Karl G. Gutbrod⁽¹⁾, Mathias D. Müller⁽²⁾, Jakob Doll⁽³⁾

⁽¹⁾ meteoblue AG - Clarastr.2 - CH-4058 Basel - www.meteoblue.com
Michael.Buehrer@meteoblue.com - +41 61 535 3301

⁽²⁾ Universität Basel – Institut für Meteorologie, Klimatologie & Fernerkundung – www.mcr.unibas.ch
Klingelbergstrasse 27 - CH-4056 Basel – mathias.mueller@unibas.ch

⁽³⁾ Solarschmiede GmbH - Abteilung Engineering
Schwanthalerstr. 75A - 80336 München - Tel: 089/9901384-25 - Fax: 089/9901384-9
<http://www.solarschmiede.de> - doll@solarschmiede.de

1. Einleitung

Verfügbarkeit und Qualität von Strahlungsdaten aus verschiedenen Quellen als Grundlage von Ertrags- und Standortgutachten werden schon lange thematisiert. Durch die zunehmende Internationalisierung der Photovoltaikbranche werden in den letzten Jahren vermehrt globale Daten benötigt. Hierbei wird auf Einstrahlungsmessungen nationaler Wetterdienste und anderer Institute zurückgegriffen, die den geforderten Qualitätsstandard nicht immer erreichen können, uns oft nicht flächendeckend verfügbar sind. Satellitendaten sind nahezu flächendeckend verfügbar für einige Jahre verfügbar, zeigen jedoch teilweise größere Ungenauigkeiten.

Die Berechnung von Einstrahlungsdaten aus mesoskalen (mit einer Gitterweite von 3km bis 18km) Wettermodellen bietet eine zusätzliche Alternative: Sie sind weltweit in hoher räumlicher Auflösung verfügbar und bieten dank Berücksichtigung lokaler Effekte und des Abgleiches mit Wetterstationen, Satellitendaten und globalen Modellen (GFS) eine hohe Präzision. Somit lassen sich nicht nur Ertragsprognosen um eine zusätzliche Datenquelle erweitern. Aufgrund der stetigen Aktualisierung des Datenbestands können auch Sensordaten einer PV-Anlage abgeglichen oder direkt Performance-Bewertungen durchgeführt werden.

Um die Zuverlässigkeit der berechneten Einstrahlungsdaten und damit auch der Archivdaten aus mesoskalen Wettermodellen nachzuweisen, werden die berechneten Daten mit realen Daten von einigen zuverlässig kalibrierten Stationen anhand der üblichen Fehlergrößen (MAE, RMSE, BIAS, stddev) verglichen. Für die Berechnung der Fehlergrößen werden Stundendaten, Tagessummen und Monatssummen analysiert. Damit wird die erreichbare Genauigkeit der Einstrahlungsdaten aus mesoskalen Wettermodellen und deren Einsetzbarkeit im Solarbereich dargestellt.

2. Datenquellen und -qualität

Modelldaten:

Die Modelldaten sind archivierte Vorhersagen aus dem NMM (Numerisches Mesoskala-Modell) der meteoblue AG, mit welchem große Flächen (Kontinente) in hoher räumlicher Auflösung (18, 12 oder 3 km) simuliert, und damit hochpräzise Wettervorhersagen in Stundenintervallen für die nächsten 6 Tage erstellt werden. Für die Initialisierung werden die Daten globaler Wettermodelle verwendet (GFS, WRF, ECMWF), welche wiederum mit weltweiten Wetterstationen gespeist werden.

Das meteoblue NMM zeichnet sich durch eine eigene Mikro-Physik, hohe räumliche Auflösung, extrem hohe Rechengeschwindigkeit und daraus folgend einer höheren Anzahl an Vorhersage-Parametern und Zeitpunkten aus. Im Gegensatz zu anderen Vorhersagemethoden werden bei kleinräumigen Simulationen keine Extrapolation oder mechanistischen Down-Scaling Verfahren verwendet: jede Vorhersage beruht auf einer physikalischen Simulation, die das Wetter in der Modell-Gitterzelle abbildet. Damit lassen sich hohe Genauigkeiten bei unterschiedlichen Geländeformen und Standortbedingungen erzielen.

Für die vorliegende Analyse werden die berechneten, stündlichen Globalstrahlungswerte aus den meteoblue Archiven extrahiert und zu den gewünschten Zeiträumen aggregiert. Es handelt sich jeweils um die archivierte Prognose des Vortages (24-Stunden-Vorhersage).

Messdaten:



Abb.1: Lage der 21 Messstationen auf der Nordhalbkugel

(Quelle: google maps)

Zunächst wurden verschiedene Datenquellen identifiziert und auf deren Qualität geprüft. Neben Daten aus öffentlich zugänglichen Netzwerken des World Radiation Data Centre (BSRN, GAW) wurden auch andere Datenquellen genutzt um möglichst viele Regionen abdecken zu können. Das chilenischen Energieministerium und zwei Universitäten in Südafrika stellten Daten zur Verfügung. Außerdem wurden noch Daten aus Quellen der meteoblue AG genutzt. Sicherlich sind die Daten aus zuverlässigen Quellen wie BSRN und GAW eher vertrauenswürdig als die anderen Standorte. Aus technischen Gründen ist es nicht möglich, Kalibrierungsfehler hundertprozentig auszuschließen.

Tab.1: Messstationen mit Strahlungsmessungen auf der Nordhalbkugel

No.	Domain	Station Name	Short Name	Year	Source	Country	Latitude	Longitude	Height
1	EUR-12	Cabauw	CAB	2011	BSRN ¹	Netherlands	52.0	4.9	0
2	EUR-12	Carpentras	CAR	2011	BSRN ¹	France	44.1	5.1	85
3	EUR-12	Cener	CNR	2011	BSRN ¹	Spain	42.8	-1.6	471
4	EUR-12	Payerne	PAY	2009	BSRN ¹	Switzerland	46.8	6.9	491
5	EUR-12	Sede Boquer	SBO	2009	BSRN ¹	Israel	30.9	34.8	500
6	EUR-12	Toravere	TOR	2009	BSRN ¹	Estonia	58.3	26.5	70
7	EUR-12	Bari	BAR	2011	meteoblue	Italia	41.1	16.9	15
8	EUR-12	Brescia	BRE	2011	meteoblue	Italia	45.4	10.0	94
9	EUR-12	Cagliari	CAG	2011	meteoblue	Italia	39.2	9.1	23
10	EUR-12	Catania	CAT	2011	meteoblue	Italia	37.6	15.1	45
11	EUR-12	Corsica	COR	2011	meteoblue	France	42.7	9.5	159
12	EUR-12	Cuneo	CUN	2011	meteoblue	Italia	44.9	7.3	352
13	EUR-12	Foggia	FOG	2011	meteoblue	Italia	41.9	16.2	5
14	EUR-12	Ravenna	RAV	2011	meteoblue	Italia	44.1	12.5	3
15	EUR-12	Udine	UDI	2011	meteoblue	Italia	46.0	13.3	90
16	EUR-12	Roma	ROM	2011	meteoblue	Italia	41.9	12.5	40
17	EUR-12	Hohe Warte	HWA	2011	GAW ²	Austria	48.3	16.4	203
18	EUR-12	Sonnblick	SON	2010	GAW ²	Austria	47.1	13.0	3105
19	EUR-12	Grossenzersdorf	GZD	2011	GAW ²	Austria	48.2	16.6	157
20	EUR-12	Kishinev	KIS	2011	GAW ²	Moldavia	47.0	28.8	205
21	EUR-12	Camborne	CAM	2010	GAW ²	United Kingdom	50.2	-5.3	88

¹Baseline Surface Radiation Network, ²Global Atmosphere Watch

Alle Datensätze wurden einer ausführlichen Qualitätskontrolle unterzogen. Standorte mit Qualitätsproblemen wurden mithilfe des eigenen Prüfungsverfahrens identifiziert und ausgeschlossen, wobei zumeist Unregelmäßigkeiten der Zeitachse oder eine beträchtliche Anzahl fehlender Stundenwerte Grund für die mangelnde Qualität waren. Je nach Verfügbarkeit wurden die Analysen für das Jahr 2009, 2010 oder 2011 an 21 Stationen der Nordhalbkugel und 14 Stationen der Südhalbkugel

durchgeführt (vgl. Abb. 1 & 2). Die beiden Hemisphären werden getrennt betrachtet, da die räumliche Auflösung der meteoblue-Domains – große Gebiete (meistens Kontinente) für die eine eigene Berechnung erfolgt – auf der Nordhalbkugel deutlich höher ist.

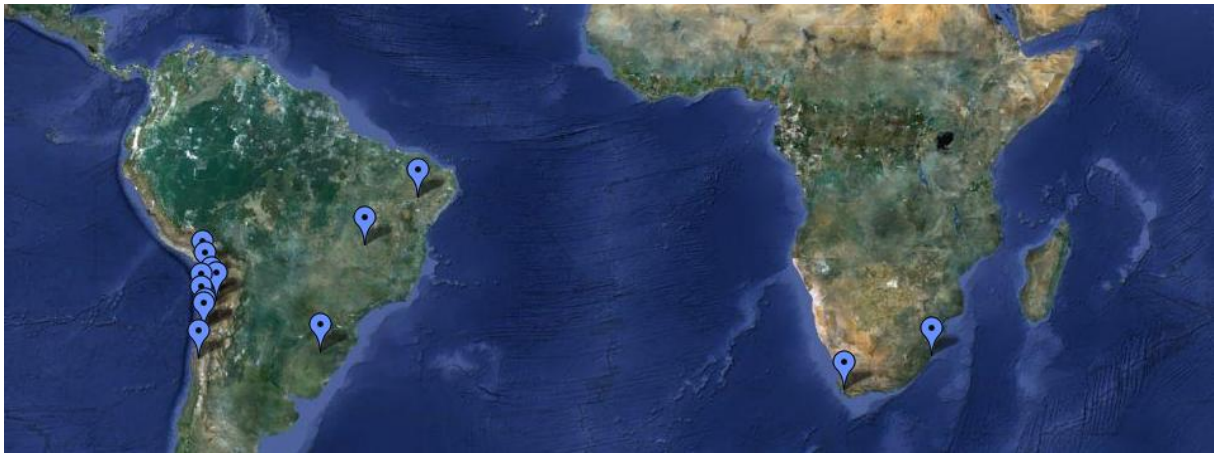


Abb.2: Lage der 14 Messstationen auf der Südhalbkugel

(Quelle: google maps)

Tab.2: Messstationen mit Strahlungsmessungen auf der Südhalbkugel

No.	Domain	Station Name	Short Name	Year	Source	Country	Latitude	Longitude	Height
22	SAM-18	Brasilia	BRB	2011	BSRN ¹	Brazil	-15.6	-47.7	1023
23	SAM-18	Petrolina	PTR	2011	BSRN ¹	Brazil	-9.1	-40.3	387
24	SAM-18	São Martinho da Serra	SMS	2011	BSRN ¹	Brazil	-29.4	-53.8	489
25	SAM-18	El Tololo	ELT	2011	GAW ²	Chile	-30.144	-70.703	2030
26	SAM-18	Cerro Armazones	CER	2011	CHILE ³	Chile	-24.6	-70.2	2581
27	SAM-18	Inca De Oro	INC	2010	CHILE ³	Chile	-26.8	-69.9	1461
28	SAM-18	Pampa Camarones	PAM	2011	CHILE ³	Chile	-18.9	-70.2	795
29	SAM-18	Pozo Almonte	POZ	2011	CHILE ³	Chile	-20.3	-69.8	1024
30	SAM-18	Puerto Angamos	PUE	2011	CHILE ³	Chile	-23.1	-70.4	10
31	SAM-18	Salar	SAL	2011	CHILE ³	Chile	-22.3	-68.9	2407
32	SAM-18	Salvador	SVD	2011	CHILE ³	Chile	-26.3	-69.8	1617
33	SAM-18	San Pedro de Atacama	SPE	2010	CHILE ³	Chile	-23.0	-68.2	2390
34	SAF-18	Durban	DB1	2011	SERG	South Africa	-29.9	31.0	113
35	SAF-18	Stellenbosch	STB	2011	STERG	South Africa	-33.9	18.9	105

¹Baseline Surface Radiation Network, ²Global Atmosphere Watch, ³Ministerio de Energia de Chile, ⁴Sustainable Energy Research Group at the University of KwaZulu-Natal, ⁵Solar Thermal Energy Research Group at Stellenbosch University

3. Qualitätskontrolle der Messdaten

Um die Qualität der Messdaten zu bewerten, muss sichergestellt sein, dass es keine zeitlichen Verschiebungen zwischen den einzelnen Datensätzen gibt. Fehler bei der zeitlichen Zuordnung führen aufgrund des meist sinusförmigen Tagesganges der Strahlung zu deutlichen Abweichungen, sind häufig und haben verschiedene Ursachen. Neben korrigierbaren Fehlern, die durch unterschiedliche Zeitzonen und Verschiebungen zwecks Sommer- und Winterzeit entstehen, gibt es noch Fehler, die durch unterschiedliche Mittelwertbildung verursacht sind, wobei zur Bildung von Stundenmitteln einerseits die vorangehende Stunde (Backward Averaging) oder andererseits die umschließende Stunde (Centered Averaging) verwendet wird.

Für die vorliegenden 35 Stationen wurde die Symmetrie des Strahlungsverlaufes in Abhängigkeit der Sonnenhöhe optisch anhand von Plots überprüft, um verschobene Zeitachsen auszuschließen (vgl. Abb. 3 & 4). Zudem wurde die Plausibilität der Messungen geprüft, indem diese mit der extraterrestrisch verfügbaren Strahlung verglichen wurden (vgl. Abb.5). Die 35 verwendeten Stationen haben die Qualitätsprüfung bestanden. Die Daten von elf der 46 Stationen wurden als ungeeignet qualifiziert.

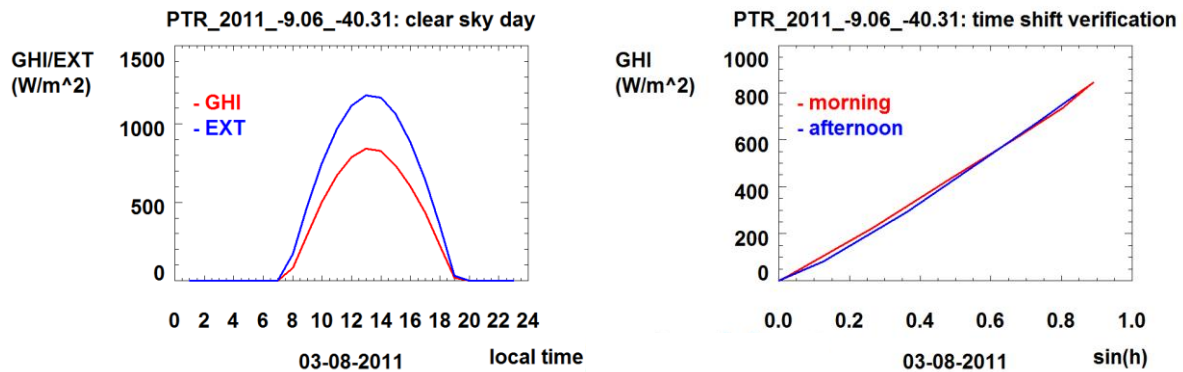


Abb.3 & 4: Optische Qualitätskontrolle am Beispiel des Standortes in Petrolina, Brasilien.

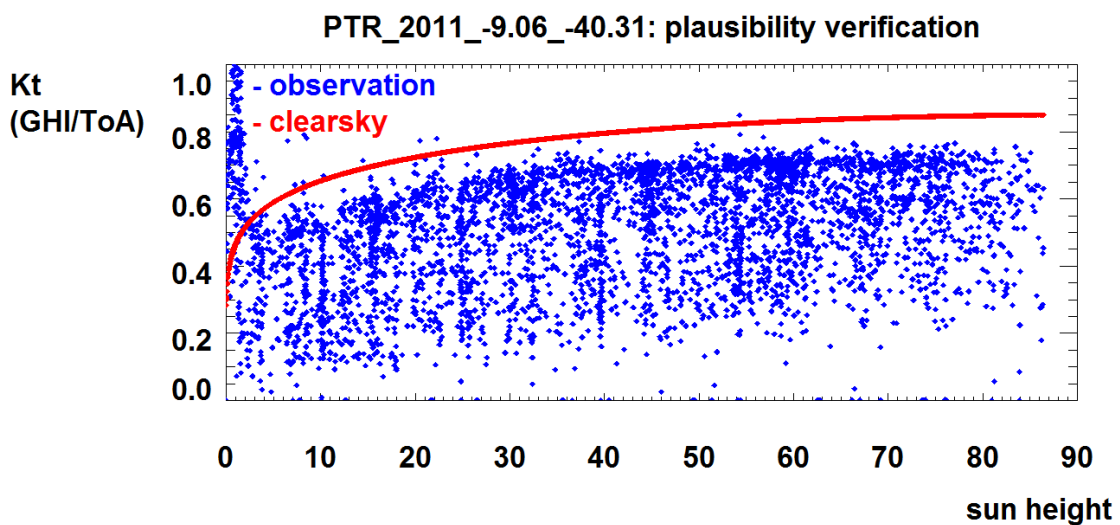


Abb.5: Optische Qualitätskontrolle durch Vergleich mit der extraterrestrisch verfügbaren Strahlung am Beispiel des Standortes in Petrolina, Brasilien.

4. Berechnungen

Fehlergrößen:

Zur Bewertung der Daten aus NMM Wettermodellen wurden die üblichen Fehlergrößen berechnet, anhand in der Branche üblicher Algorithmen [1], jeweils für Stunden, Tages- und Monatswerte:

- BIAS: Mean Biased Error – Indikator für systematischen Fehler
- rBIAS: relative Mean Biased Error – Prozentualer BIAS
- RMSE: Root Mean Squared Error – Wurzel des mittleren Quadratfehler
- rRMSE: relative Root Mean Squared Error – Prozentualer RMSE
- MAE: Mean Absolute Error – Mittlerer Absoluter Fehler
- rMAE: relative Mean Absolute Error – Prozentualer MAE
- stddev: Standard Deviation – Standardabweichung
- rstdev: relative Standard Deviation – prozentuale Standardabweichung

Fehlerursachen:

Es gibt verschiedene Ursachen für Unterschiede zwischen Messung und Modell. Zunächst ist das Modell eine Vereinfachung der Realität, wodurch es zu Fehlern kommt. Diese Fehler, welche schon bei der Initialisierung (Beginn der Berechnung) vorhanden sein können, nehmen mit dem Vorhersagezeitraum zu.

Das Wettermodell besteht aus Gitterzellen, also beschreiben die Modelldaten nicht die Strahlung an einem bestimmten Punkt, sondern die mittlere Strahlung in einem Gebiet von der Größe der Gitterzelle. Je größer die Unterschiede innerhalb dieses Gebietes sind, desto größer wird der Unterschied zwischen Messung und Modell. Dies spielt vor allem in komplexem Gelände eine wichtige Rolle.

Auch fehlerhafte Messungen sind möglich. Strahlungsmessungen erfordern sehr teure Geräte, eine sorgfältige Kalibrierung und regelmäßige Wartung. Solche Fehler sind je nach Quelle der Strahlungsmessung nicht zu vernachlässigen. Aufgrund der ausführlichen Qualitätskontrolle können sie in dieser Studie als recht gering angenommen werden. Elf Stationen, von insgesamt 46, deren Messdaten Unregelmäßigkeiten aufwiesen, wurden nicht mit in die Studie aufgenommen.

5. Analyse der Stundenwerte

Die systematischen Fehler auf der Nordhalbkugel liegen zwischen -32 W/m^2 und $+33 \text{ W/m}^2$, was einem systematischen Fehler zwischen -8% und $+11\%$ entspricht. Die Kalibrierung des Modells ist daher absolut vertretbar. Die Abweichungen sind aufgrund von Einzelfallanalysen vermutlich auf lokale Effekte wie bspw. Nebel zurückzuführen, die bei 3km - 12km Auflösung nicht immer abgebildet werden können. Der RMSE liegt zwischen 104 W/m^2 und 146 W/m^2 , was auf eine flächendeckend vergleichbare Qualität schließen lässt. Die relativen Werte des RMSE weisen ein deutlich höhere Schwankungsbreite auf (21% - 50%), was auf die stark unterschiedlichen Strahlungssummen zurückzuführen ist. Die Standardabweichung ist mit dem RMSE nahezu identisch, da der systematische Fehler durchweg

niedrig ist und geringe Schwankungen aufweist. Die südlicheren Standorte weisen geringere prozentuale Fehler auf. Der mittlere absolute Fehler liegt für die Stationen der nördlichen Hemisphäre zwischen 13 W/m² und 33 W/m², und über alle Stationen betrachtet bei 25 %.

Tab.3: Fehlergrößen für die Messtationen auf der Nordhalbkugel

No.	Domain	Station Name	BIAS (W/m ²)	rBIAS (%)	RMSE (W/m ²)	rRMSE (%)	MAE (W/m ²)	rMAE (%)	stddev (W/m ²)	stddev (%)
1	EUR-12	Cabauw	-2	0	123	49	82	33	122	49
2	EUR-12	Carpentras	-4	-1	112	29	73	18	111	28
3	EUR-12	Cener	12	3	133	38	89	25	132	38
4	EUR-12	Payerne	33	11	139	46	98	32	135	45
5	EUR-12	Sede Boquer	0	0	104	21	67	13	104	21
6	EUR-12	Toravere	9	4	105	47	70	31	104	47
7	EUR-12	Bari	3	0	130	34	84	22	129	34
8	EUR-12	Brescia	-32	-8	137	35	94	24	133	34
9	EUR-12	Cagliari	14	3	129	34	80	21	128	34
10	EUR-12	Catania	-16	-4	143	39	92	25	142	39
11	EUR-12	Corsica	-11	-3	146	40	97	27	145	40
12	EUR-12	Cuneo	3	1	139	46	86	28	138	46
13	EUR-12	Foggia	20	5	130	34	81	21	128	34
14	EUR-12	Ravenna	3	0	117	33	79	22	116	33
15	EUR-12	Udine	21	6	118	38	70	22	116	38
16	EUR-12	Roma	27	7	111	30	69	18	107	29
17	EUR-12	Hohe Warte	22	7	125	44	80	28	123	43
18	EUR-12	Sonnblick	-13	-4	143	45	93	29	142	45
19	EUR-12	Grossenzersdorf	31	11	126	45	79	28	122	44
20	EUR-12	Kishinev	13	4	122	39	77	25	121	39
21	EUR-12	Camborne	-15	-5	130	50	84	32	129	49
Mittelwert			6	2	127	39	82	25	125	39
Minimum			-32	-8	104	21	67	13	104	21
Maximum			33	11	146	50	98	33	145	49

Auf der Südhalbkugel liegen die systematischen Abweichungen etwas höher als auf der nördlichen Hemisphäre, was wahrscheinlich mit der geringeren räumlichen Auflösung des Wettermodelles zu begründen ist. Dafür spricht auch, dass die sehr nahe beieinander liegenden chilenischen Stationen, auch Unterschiede aufweisen. In Durban und Puerto Angamos belegt der BIAS eine Überschätzung des Modells von 21%, allerdings ist es auch möglich, dass diese Stationen nicht optimal kalibriert wurden. Über alle Stationen gemittelt gibt es auf der Südhalbkugel einen systematischen Fehler von 31 W/m². Der absolute RMSE liegt etwas höher als für die Standorte auf der Nordhalbkugel, wobei vor

allem Brasilia mit 216 W/m^2 , schlecht abschneidet. Die hochgelegenen Standorte in Chile werden von den Wettermodellen deutlich besser dargestellt. Die Standorte mit hohem BIAS schneiden natürlich auch beim RMSE nicht besser ab. Die Standardabweichung ist an diesen Standorten niedriger als der RMSE. Der mittlere absolute Fehler liegt zwischen 32 W/m^2 und 144 W/m^2 , wobei für alle Stationen das Ergebnis von 17% noch besser ist als auf der Nordhalbkugel. Bei 30 Stationen liegt der MAE unter 100 W/m^2 und bei 19 Stationen sogar unter 80 W/m^2 (vgl. Abb. 6).

Betrachtet man die unsystematischen Fehlergrößen in Abhängigkeit der geographischen Breite fällt auf, dass die sonnenreicheren Standorte, der subtropischen Breiten am besten abschneiden. Dies ist bei den prozentualen Fehlern naheliegend, da diese ein Quotient der mittleren Strahlungsintensität sind. Dieser Effekt ist aber auch für die absoluten Werte gültig und überlagert auch die Qualitätsunterschiede der unterschiedlichen räumlichen Auflösungen (vgl. Abb. 6 & 12). Dies ist auf die Anzahl von Strahlungstagen (Clear-Sky-Days) pro Jahr zurückzuführen. So schneidet auch Inca de Oro mit über 340 Strahlungstagen im Jahr am besten ab.

Tab.4: Fehlergrößen für die Messtationen auf der Südhalbkugel

No.	Domain	Station Name	BIAS (W/m^2)	rBIAS (%)	RMSE (W/m^2)	rRMSE (%)	MAE (W/m^2)	rMAE (%)	stddev (W/m^2)	stddev (%)
22	SAM-18	Brasilia	-48	-10	216	48	144	32	210	47
23	SAM-18	Petrolina	44	9	176	39	129	29	170	38
24	SAM-18	São Martinho da Serra	-11	-2	184	44	116	28	183	44
25	SAM-18	El Tololo	34	7	91	20	63	14	84	19
26	SAM-18	Cerro Armazones	-8	-1	91	14	41	6	90	14
27	SAM-18	Inca De Oro	26	4	61	10	32	5	55	9
28	SAM-18	Pampa Camarones	68	12	122	21	76	13	101	17
29	SAM-18	Pozo Almonte	47	8	95	16	59	10	82	13
30	SAM-18	Puerto Angamos	112	21	163	30	114	21	118	22
31	SAM-18	Salar	10	1	125	20	66	10	124	20
32	SAM-18	Salvador	25	4	80	13	39	6	75	12
33	SAM-18	San Pedro de Atacama	40	6	81	13	50	8	70	11
34	SAF-18	Durban	79	21	177	48	126	34	158	42
35	SAF-18	Stellenbosch	22	4	143	32	91	20	141	31
Mittelwert			31	6	129	26	82	17	119	24
Minimum			-48	-10	61	10	32	5	55	9
Maximum			112	21	216	48	144	34	210	47

meteoblue Radiation forecast validation 2009-2011: 35 Stations sorted by Latitude (N-S)

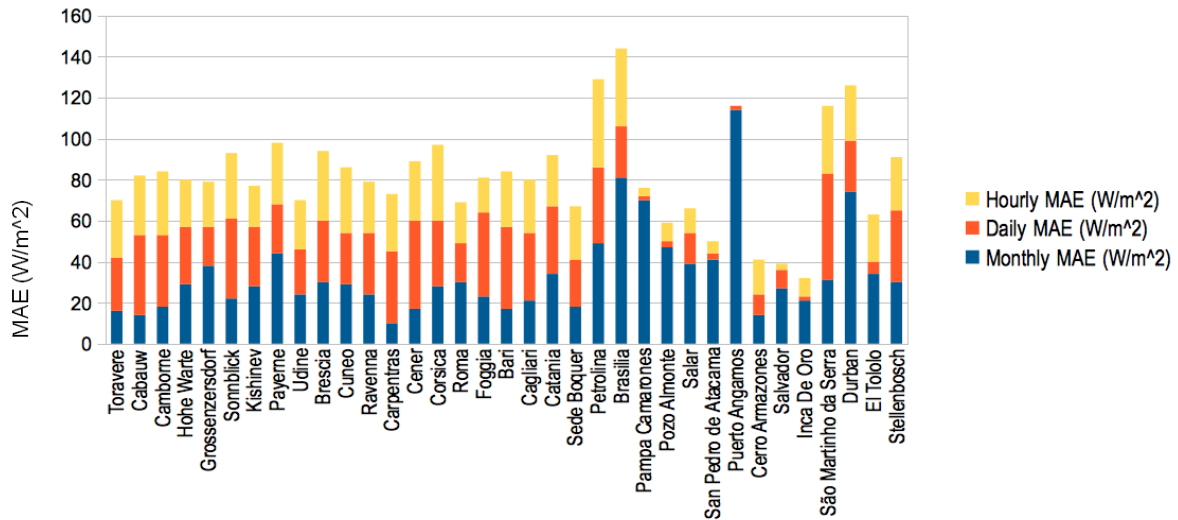


Abb.6: Verteilung des absoluten Fehlers (MAE) über alle Stationen von Nord nach Süd. Die Standorte mit hoher jährlicher Einstrahlung schneiden beim absoluten Fehler gut ab.

6. Vergleich mit Strahlungsdaten aus Satellitenbildern

Tab.5: Vergleich mit Satelliten basierten Strahlungsdaten

No.	Station Name	BIAS (W/m ²)			stddev (W/m ²)		
		meteoblue	SolarGis ¹	IrSolAv ¹	meteoblue	SolarGis ¹	IrSolAv ¹
1	Cabauw	-2	-6	-	122	49	-
2	Carpentras	-4	4	-6	111	48	121
4	Payerne	11	4	-1	135	67	85
5	Sede Boquer	0	12	-29	104	55	70
6	Toravere	-4	4	-	104	53	-
18	Sonnblick	-4	-3	2	142	134	172
21	Camborne	-4	-5	-	122	49	-
Mittelwert		-1	0	-9	121	65	112
Minimum		-5	-6	-29	104	48	70
Maximum		11	12	2	142	134	172

¹Quelle: [2]

In einer weithin bekannten Studie der Internationalen Energieagentur von Ineichen [2] wurden aus Satellitenbildern abgeleitete Strahlungsdaten verschiedener Anbieter anhand derselben Fehlergrößen evaluiert. Sieben der Stationen sind in beiden Studien vorhanden und sollen hier verglichen werden, um die Qualität der stündlichen Einstrahlungsdaten aus dem Wettermodell besser einordnen zu können.

Auf Satellitenbildern basierende Strahlungsdaten gelten als qualitativ eher hochwertig und werden häufig als Grundlage für Ertragsgutachten von Solaranlagen und -kraftwerken verwendet. Es wurden exemplarisch zwei Anbieter aus der Studie ausgewählt, jeweils der am besten, bzw. am schlechtesten abgeschnitten hat.

Die systematischen Fehlergrößen sind bei den drei Datensätzen vergleichbar, außer dass IrSolAv die Strahlung in Sede Boquer deutlich unterschätzt. Die Standardabweichungen sind im Wettermodell höher, wobei der Unterschied zu den Daten von IrSolAv nicht allzu groß ist. Sonnblick wurde als schneereicher Standort von Ineichen für die Berechnung von Mittelwerten ausgeschlossen. Im Gegensatz dazu werden NMM-Strahlungssimulationen nicht von auftretenden Schneedecken beeinträchtigt: die Strahlungssimulation an den Bergstandorten (Sonnblick, El Tololo) fallen nicht durch höhere Fehlerquoten auf. Satellitenbasierte Strahlungsprodukte müssen im Laufe ihrer Entwicklung anhand von Strahlungsdaten kalibriert werden, weshalb die Schlussfolgerung naheliegt, dass Sie an den international anerkannten Strahlungsmessstationen verhältnismäßig gut abschneiden. Die Einstrahlungsdaten des Wettermodells erreichen demnach auf Stundenbasis in etwa die Qualität der weniger präzisen Satellitendaten.

Für eine Tages- und Monatswertanalyse sind meteoblue NMM-Strahlungsdaten im Vergleich mit Satellitendaten gut geeignet: Sie weisen keinen höheren BIAS auf als die Satellitendaten. Zudem liegt nahe, dass die Vorhersagen eines Wettermodelles sich demnach mit post-processing Methoden wie bspw. MOS für Standorte mit Strahlungsmessungen noch verbessern ließen.

7. Analyse der Tageswerte

Die verschiedenen Fehlerwerte verringern sich in der gröberen Auflösung der Tagessummen (bzw. Tagesmittelwerte, da diese direkt mit den Stundendaten vergleichbar sind) zunächst nur marginal. Trägt man die einzelnen Tage einer Station auf einer Zeitachse auf, wird der Grund erkennbar. Systematische Fehler (Über- oder Unterschätzung, jahreszeitliche Abweichung) sind über verschiedene zeitliche Aggregationsstufen vorhanden wie man am Beispiel von Durban sehr gut sehen kann (vgl. Abb. 7). In Abbildung 9 ist sehr gut zu sehen, dass diese Tatsache für alle Standorte gilt. Insgesamt ist ein positiver BIAS deutlich häufiger als eine Unterschätzung. Dass der rBIAS für Tages- und Monatsmittel teilweise höher ist als für Stundenwerte liegt an einem Rundungseffekt – Ein Wintertag mit 8 Stunden bekommt dasselbe Gewicht wie ein Sommertag mit 16 Stunden. Bis auf Durban und Puerto Angamos liegt der Betrag des systematischen Fehlers unter 15%. Eine Tendenz abhängig von der geographischen Breite ist nicht zu erkennen.

Diese systematischen Fehler finden sich auch in den anderen Fehlergrößen wieder, wenngleich diese geringer sind als in stündlicher Auflösung. Die nicht systematischen Fehler beziehen sich meistens entweder auf eine unterschiedliche Entwicklung der Wetterlage im Modell verglichen mit der Realität oder auf lokale Effekte (z.B. Nebel), die aufgrund mangelnder räumlicher Auflösung nicht abgebildet werden können. Solche Fehlergrößen finden sich fast immer auch in den Tageswerten wieder und können an einem sonnenreichen Standort (Abb. 8, Frühjahr/links) sehr gut beobachtet werden: An zwei kurz aufeinanderfolgenden Tagen ging das Modell fälschlicherweise von bedecktem Himmel aus. Anders verhalten sich Tage mit wechselhafter Bewölkung, an denen die exakte zeitliche Zuordnung von sonnigen und bewölkten Stunden nicht stimmt. In diesem Fall weist der Tageswert im Gegensatz zu den Stundenwerten nur einen geringen Fehler auf.

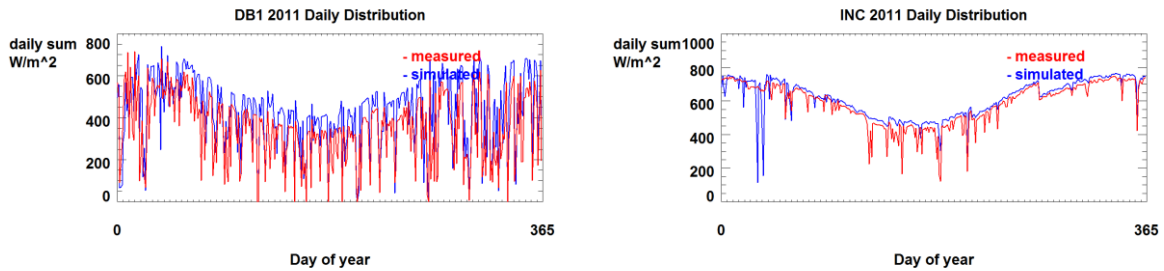


Abb.7 & 8: Verteilung der Tagesmittelwerte am Beispiel Durban und Inca De Oro. Die gemessene Strahlung wird in Durban vom Modell ganzjährig überschätzt, während Sie in Inca De Oro bis auf zwei Tage sehr gut abgebildet wird.

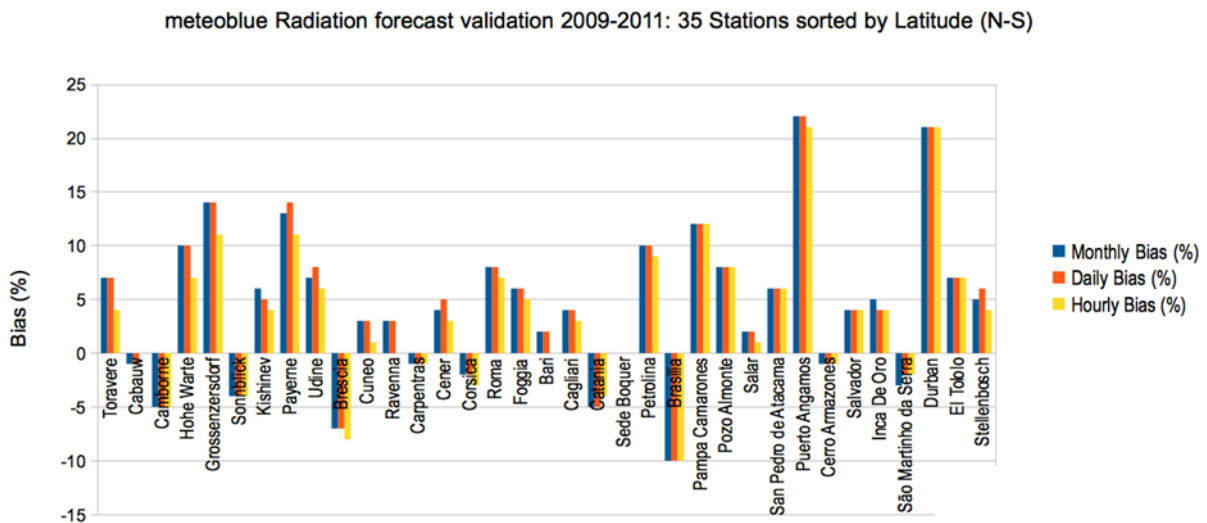


Abb.9: Verteilung des systematischen Fehler über alle Stationen von Nord nach Süd. Es gibt kaum Unterschiede zwischen den zeitlichen Aggregationen.

8. Analyse der Monatswerte

Wie schon in Abschnitt 7 begründet, unterscheiden sich die systematischen Fehler verschiedener zeitlicher Auflösungen nur unwesentlich. Dies gilt auch für die Monatswerte, wie an den zeitlich konstanten Abweichungen am Beispiel von Pampa Camarones gut ersichtlich ist (vgl. Abb.9 & 10).

Schon mehrfach wurden lokale Effekte als Ursache von Fehlern angesprochen. Nebel ist ein typisches lokales Phänomen, das zudem auch nur jahreszeitlich auftritt. An mehreren Standorten sind Überschätzungen in den Herbstmonaten und/oder Wintermonaten erkennbar. Besonders ausgeprägt am Standort Payerne, der sich bekanntermaßen in einer Kessellage an einem See befindet, wo von September bis März häufig Nebel zu beobachten ist (vgl. Abb. 11).

Durch die Aggregation zu Monatswerten werden die anderen Fehlergrößen aber deutlich geringer. Die Monatssummen unterscheiden sich bei den allermeisten Standorten nur geringfügig. Der mittlere absolute Fehler liegt außer an drei Stationen durchweg unterhalb von 50 W/m² und beträgt im Schnitt 10% (vgl. Abb. 6). Die mittlere Standardabweichung der monatlichen Strahlungswerte liegt immer unter 20% und für 31 von 35 Standorten nicht höher als 10% (vgl. Abb. 12)

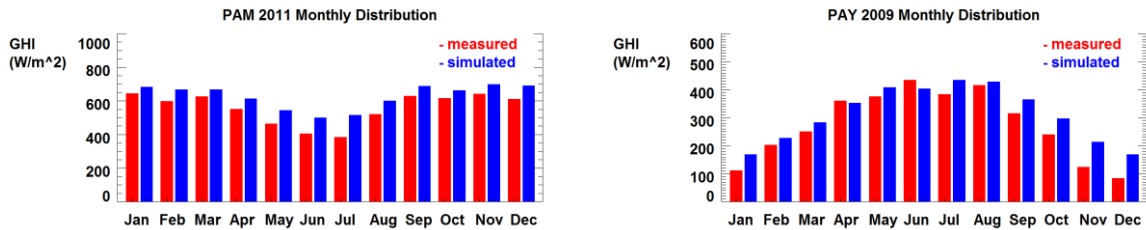


Abb. 10 & 11: Verteilung der Monatsmittelwerte am Beispiel Pampa Camarones und Payerne. Die ganz- bzw. halbjährige Überschätzung des Modells ist gut zu erkennen.

meteoblue Radiation forecast validation 2009-2011: 35 Stations sorted by Latitude (N-S)

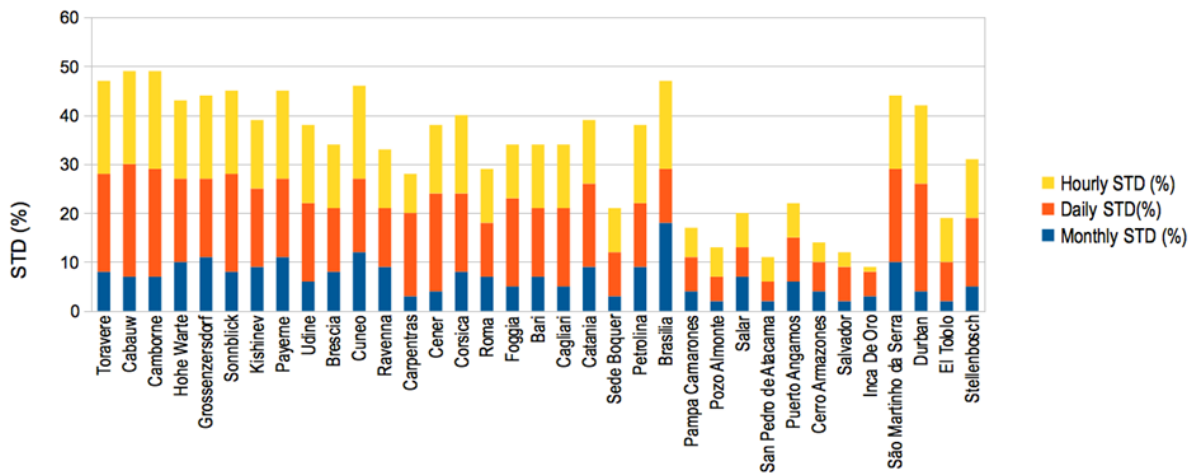


Abb. 12: Verteilung der Standardabweichung über alle Stationen von Nord nach Süd. Die subtropischen Standorte schneiden am besten ab.

9. Fazit

Die Strahlungsdaten aus NMM-Wettermodellen sind für verschiedene Zwecke geeignet. Die Daten in stündlicher Auflösung sind zwar nicht so exakt wie auf Satellitenbildern basierende Strahlungsprodukte, aber bei diesen handelt es sich auch nicht um Vorhersagen. Die Standardabweichung für Stundendaten liegt zwischen 9 % und 49 % und im Mittel bei 33 %. Die mittleren absoluten Fehler liegen unter 34% und betragen im Mittel 22%.

Für Tagesmittel liegt die Standardabweichung durchweg unter 30 % und beträgt durchschnittlich 20 %. Die Standardabweichung der Monatsmittel beträgt maximal 18 %, wobei 31 Stationen sogar unter der 10-Prozent Marke liegen. Im Schnitt liegt die monatliche Standardabweichung unter 7 %.

Der BIAS ist bei allen zeitlichen Auflösungen vergleichbar und schwankt zwischen -10 % und +22 % und liegt durchschnittlich bei +1 %.

Da die Standardabweichungen im Vergleich zur Stundenauflösung deutlich reduziert sind, eignen sich die Tages- und Monatswerte auch als Alternative zu Satelliten basierten Strahlungsdaten für Ertragsgutachten und Standortanalysen.

Die NMM-Strahlungsprognosen erreichen die Qualität von Messdaten, die aufgrund von weniger optimierten Satellitendaten ermittelt werden. Auf Tages- und Monatsbasis eignen sie sich somit genauso wie Satellitendaten für die Ermittlung von TMY (Typical Meteorological Years), regionalen Potentialabschätzungen und Ermittlung von jahreszeitlicher oder saisonaler Performance. Sie eignen sich im Vergleich zu den meist-optimierten Satellitendaten dahingegen weniger zur Ermittlung von stundengenauen Verlaufsprofilen (z.B. Erzeugungskurven) für einzelne Tage.

Ein Vorteil der NMM-Strahlungsprognosen gegenüber Satellitendaten ist, dass historische NMM-Modelldaten flächendeckend (über einem Großteil der Kontinente) in gleichbleibender Qualität verfügbar sind, und für weitere Gebiete jederzeit anhand vorliegender Archivdaten nach Bedarf rekonstruiert werden können. Ein weiterer Vorteil von NMM-Strahlungsprognosen gegenüber Satellitendaten ist, dass sie bereits 12-48 Stunden vor der Messung vorliegen, und damit eine Prognose der zu erwartenden Einstrahlung mit der oben beschriebenen Genauigkeit möglich ist.

An allen Stationen mit überdurchschnittlich hohen Fehlerwerten der NMM-Strahlungsprognosen konnten entweder ganzjährige oder jahreszeitliche Skalierungs-Effekte beobachtet werden. Diese Fehler bieten weiteres Optimierungspotential.

Ausblick:

Die NMM-Strahlungsprognosen eignen sich somit bestens für eine bessere Vermarktung von solar erzeugtem Strom, um mittels Direktvermarktung oder Eigenverbrauchsoptimierung die Wettbewerbsfähigkeit des Solarstroms noch zu erhöhen. Die Qualität erreicht fast die von satellitenbasierten Messdaten der tatsächlichen Einstrahlung. Für große Photovoltaikanlagen und solarthermische Kraftwerke könnten die Prognosen mit Hilfe von statistischen Verfahren noch deutlich verbessert werden. Systematische Fehler und lokale Effekte wie Herbstnebel können damit deutlich reduziert werden.

Eine Verringerung des systematischen Fehlers durch bessere Berücksichtigung von Nebel und anderen lokalen oder jahreszeitlichen Effekten könnte die Modelldaten noch deutlich verbessern. Möglicherweise lassen sich die Algorithmen der NMM-Modelle diesbezüglich noch verbessern. Zudem bieten post-processing Methoden für Strahlungsprognosen großes Potential, um die Vermarktung von Strom aus Sonne zu optimieren.

Durch zunehmende technologische Möglichkeiten wie bspw. höhere Rechenleistung wird sich die räumliche Auflösung der NMM-Modelle weiter erhöhen. Die Präzision wird dadurch weiter gesteigert.

10. Literatur

[1] Beyer et al. (2009): MESOR – D 1.1.3 Report on Benchmarking Radiation Products.

http://www.mesor.net/docs/MESoR_Benchmarking_of_radiation_products.pdf

[2] Ineichen (2011): Five satellite products deriving beam and global irradiance validation on data from 23 ground stations.

[http://www.cuepe.ch/html/biblio/pdf/ineichen_2011_Five_satellite_products_deriving\(iea\).pdf](http://www.cuepe.ch/html/biblio/pdf/ineichen_2011_Five_satellite_products_deriving(iea).pdf)