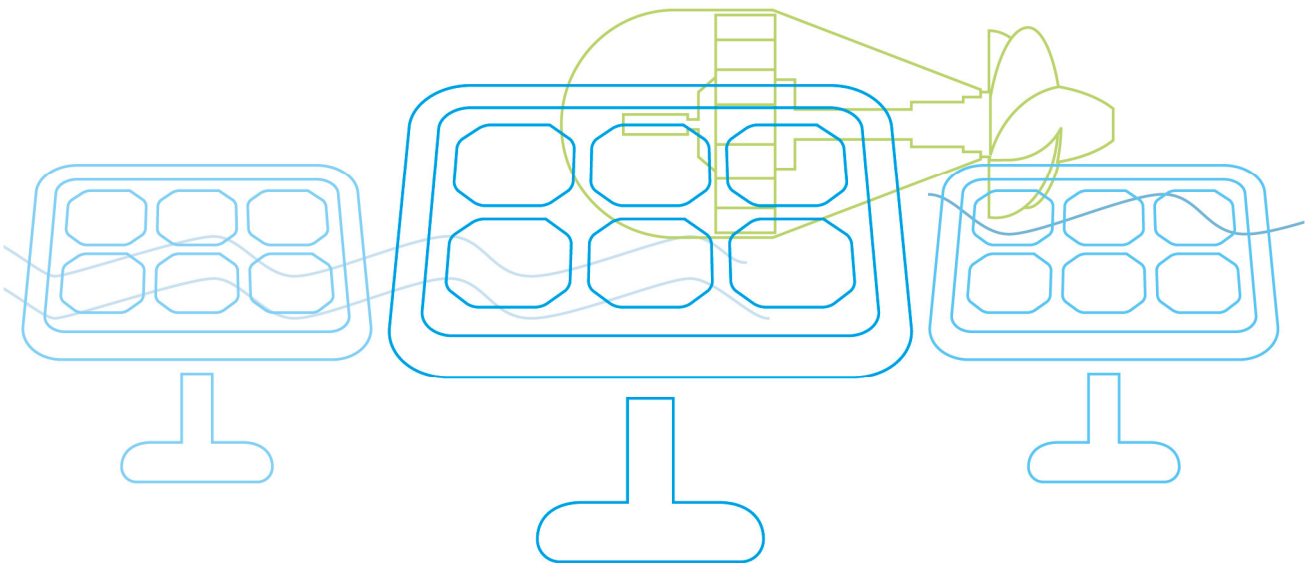




Einfluss von Sonnenspektrum
und Klima auf die Performance von
photovoltaischen Anlagen:

Regionale Abschätzung des Sonnen-
energiepotentials Österreichs



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A stylized, handwritten signature in black ink.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink that reads 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

Einfluss von Sonnenspektrum und Klima auf die Performance von photovoltaischen Anlagen: Regionale Abschätzung des Sonnenenergiepotentials Österreichs

AutorInnen:

Philipp Weihs, Jochen Wagner, Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur
Markus Rennhofer, Austrian Institute of Technology
Alexander Molodczak, Andreas Mursch-Radlgruber, Green Jobs Austria

1	Einleitung	5
	Aufgabenstellung	5
	Schwerpunkte des Projektes.....	6
	Einordnung in das Programm.....	6
	Verwendete Methoden	6
	Aufbau der Arbeit.....	7
2	Durchgeführte Arbeiten	7
2.1	Messaufbau (AP2)	7
2.2	Datenanalyse und Modellierung (AP3).....	8
2.3	Auswertung der Wolkenkamerabilder (AP3)	9
2.4	Berechnung des Korrekturfaktors (AP4) von Ertragsprognosen.....	10
2.5	Aufbau der Homepage (AP5)	12
3	Ergebnisse	14
3.1	Pre- und Postcharakterisierung der Module (AP2)	14
3.2	Fallstudien zu spektralem Einfluss und Topographieeffekt (AP3).....	15
3.3	Spektraler Einfluss (AP3).....	17
3.4	Wolkeneinfluss (AP3)	20
3.4.1	Bewölkungsgrad und Kurzschlussstrom.....	20
3.4.2	Verschiedene Wolkentypen und Kurzschlussstrom.....	20
3.4.3	Kondensstreifen.....	21
3.5	Homepage (AP5).....	23
3.5.1	Kurzbeschreibung zur Bedienung der Projekthomepage	23
3.5.2	Modelle für Leistungshochrechnung (AP4)	24
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	26
5	Ausblick und Empfehlungen.....	26

1 Einleitung

Photovoltaik (PV) besitzt mittelfristig das Potential, einen signifikanten Beitrag bei der Stromerzeugung durch erneuerbare Energieträger in Österreich zu leisten. Die eingestrahlte Sonnenenergie übersteigt um mehrere Größenordnungen den Energiebedarf. Bei der Planung von PV-Anlagen liefert die Ertragsprognose trotzdem einen wesentlichen Beitrag. Oft kann eine Änderung des zu erwartenden Jahresertrages um wenige Prozent über die Wirtschaftlichkeit einer Anlage entscheiden. Die mit vereinfachten meteorologischen Bedingungen bisher für Österreich durchgeführten PV Energiepotentialabschätzungen liefern Ergebnisse mit einer hohen Unsicherheit. Ein besonders hohes Informationsdefizit besteht im Bereich des spektralen Einflusses auf den Ertrag von PV-Anlagen. Während im Labor spektrale Einflüsse auf den Ertrag leicht simuliert werden können, gibt es bisher wenige Untersuchungen unter Outdoor-Bedingungen. Die spektrale Empfindlichkeit der PV-Paneele liegt bei a-Si Zellen im Wellenlängenbereich zwischen 300 und 800 nm, bei c-Si zwischen 300 und 1200 nm und bei CIS Modulen zwischen 300 und 1250 nm (Kenny et al., 2006). Der Einfluss der spektralen Zusammensetzung auf den Ertrag von amorphen (a-Si), kristallinen (c-Si) und multikristallinen Silizium (mc-Si) und CIS PV Modulen wurde u.a. von Gottschalg et al. (2005), Kenny et al. (2006), Minemoto et al. (2007a,b) und Santbergen und van Zolingen (2008) untersucht. Für die a-Si Module war der Einfluss der spektralen Zusammensetzung am meisten ausgeprägt. Die c-Si und CIS Module waren etwas weniger von der spektralen Strahlung abhängig (und deswegen auch weniger abhängig vom Sonnenstand). Minemoto zeigt außerdem, dass der Ertrag der mc-Si Module vor allem von der Paneeltemperatur abhängt und kaum vom Spektrum. Die Verwendung der Sonnenenergie ist außerdem auch durch die Integration von PV Paneelen auf Dächern und in Wänden von Gebäuden möglich (Boyle, 2004). Die übliche Orientierung der Paneele ist Richtung Süden. In Zukunft werden aber vor allem in städtischen Gebieten die Integration von PV Paneelen in andere Himmelsrichtungen in Betracht gezogen werden.

Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes sollten umfangreiche Messungen durchgeführt werden, um an zwei Standorten in Österreich das Strahlungsklima detailliert in Bezug auf photovoltaische Nutzung zu untersuchen. Dabei sollte der Einfluss von meteorologischen Parametern, vor allem spektrale Einflüsse und Bewölkungseinflüsse, auf den Ertrag unterschiedlicher PV-Technologien abgeschätzt werden. Die Abhängigkeit des Ertrages von Sonnenhöhe, Seehöhe und (Modul)Temperatur sollte ebenfalls für drei unterschiedliche Modultechnologien für Österreich abgeschätzt werden.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse sollten Aussagen über die Eignung unterschiedlicher Modultechnologien an verschiedenen Standorten in Österreich getroffen werden. Dazu sollten zusätzlich zu den durchgeführten Messdaten, regionale Strahlungs-, Temperatur- und Wolkenklimatologien verwendet werden. Letztlich sollte eine Darstellung der Ergebnisse in Kartenform angestrebt werden.

Außerdem sollten die erhobenen Daten dazu beitragen, ein verbessertes Prognosewerkzeug zur Bestimmung des PV-Ertrages zu entwickeln. Dieses Werkzeug sollte PV-Erträge in Abhängigkeit von Zeit, Standort, Orientierung und Neigung und PV-Modultyp berechnen.

Schwerpunkte des Projektes

Besonderes Augenmerk sollte dabei auf den spektralen Einfluss gelegt werden, weil dazu bisher wenige Untersuchungen vorlagen.

Neben standortspezifischen Vor- und Nachteilen bestehender PV-Technologien sollten die Anforderungen an zukünftige PV-Technologien speziell für Österreich definiert werden. Die Grundlage dafür sollten Untersuchungen des spektralen Strahlungsklimas und der Temperatur an zwei typischen Standorten in Österreich bilden.

Einordnung in das Programm

Das Projekt wird folgenden übergeordneten Themen des Neue Energien 2020 Programms zugeordnet:

Themenpunkt 3.3.8: Effizienzsteigerung von Produkten und Systemen: Thema: Systemverbesserungen zur Erzielung deutlicher Effizienzsteigerungen bei Endverbrauchsgeräten und deren Anwendungen. Nachrüstung und Aufrüstung bestehender Produkte

Themenpunkt 3.5: Klima und Energiemodellregionen

Themenpunkt 3.5.3: Ebene regionaler Energiesysteme: Thema: Aufbau regionaler Wärme- und Kälteversorgungsstrukturen mit möglichst geringem Primärenergieeinsatz und hohem Anteil an Erneuerbaren Energieträgern

Themenpunkt 3.6 Entscheidungsgrundlagen für die österreichische Klima- und Energiepolitik: Thema: Erstellung von Grundlagen und Werkzeugen.

Verwendete Methoden

Diese Untersuchungen wurden einerseits experimentell durchgeführt: Messstationen wurden an zwei Standorten installiert: auf der Kanzelhöhe (1600 m) und am AIT (160 m Seehöhe). Hiermit wird diese Studie in zwei unterschiedlichen Klimaregionen durchgeführt: an einem alpinen Standort und in der Tiefebene.

Es werden außerdem zusätzliche Modellsimulationen verwendet. Diese werden zuerst mit Hilfe der erhobenen Daten validiert um diese dann für österreichweite Berechnungen des PV Ertrags zu verwenden.

Aufbau der Arbeit

In den nächsten Kapiteln werden wir zuerst die verwendeten Methoden vorstellen. Im Ergebniskapitel wird dann auf die Einflüsse des solaren Spektrums sowie auf die Effekte von Bewölkung und Kondensstreifen auf den Ertrag von PV Modulen näher eingegangen.

2 Durchgeführte Arbeiten

2.1 Messaufbau (AP2)

Als Grundlage für die weiteren Untersuchungen wurden die elektrischen Kenngrößen und die spektrale Empfindlichkeit der drei verwendeten Modultypen charakterisiert (siehe Abbildung 1). Danach wurden die beiden Messstandorte (AIT(Wien) und Kanzelhöhe (Kärnten)) eingerichtet. Es wurden und werden (Langzeitmonitoring) an beiden Messorten in einer zeitlichen Auflösung von einer Minute umfangreiche Strahlungsmessungen und synchron, Messungen der Kurzschlussströme der Module durchgeführt.

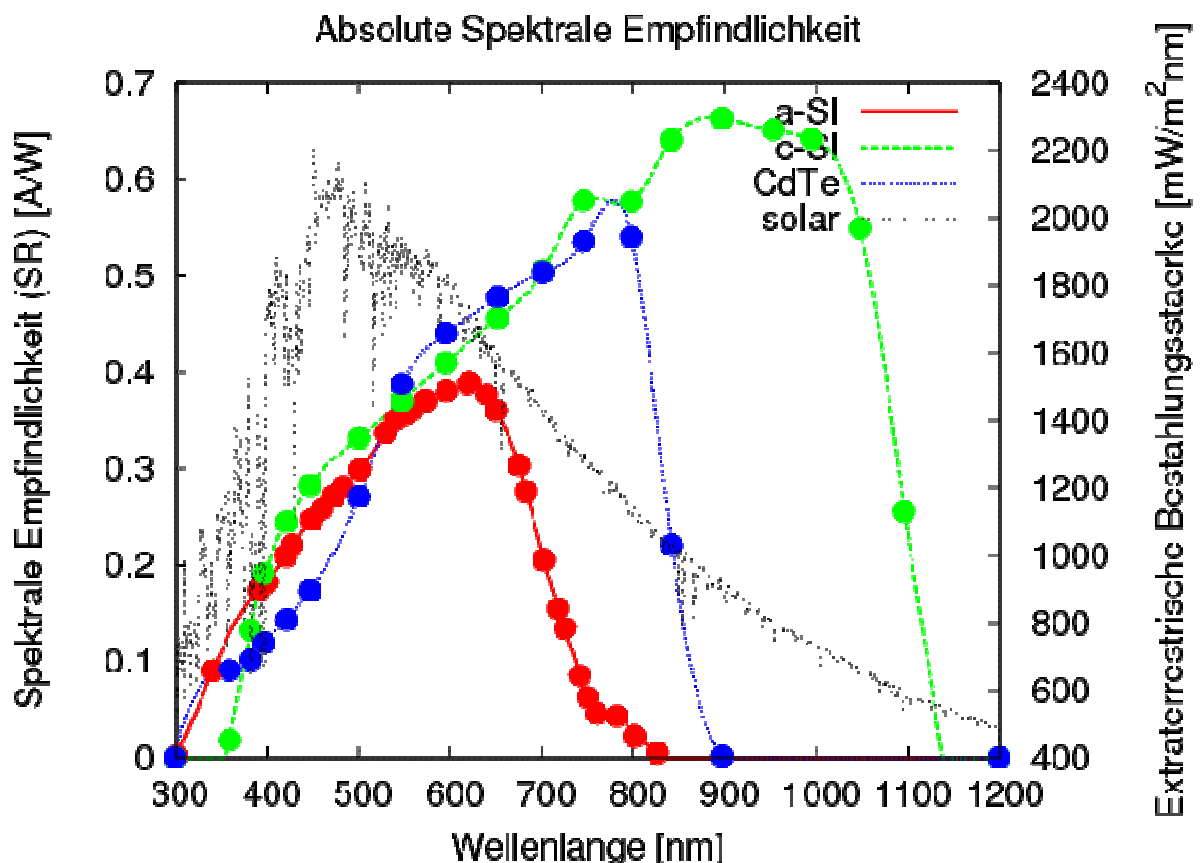


Abbildung 1: Die spektrale Empfindlichkeit für die drei unterschiedlichen Modultypen (amorphes Silizium – a-Si, monokristallines Silizium – c-Si und Cadmium-Tellur – CdTe) ist dargestellt (linke Ordinate).

Folgende Messungen werden minütlich an beiden Standorten durchgeführt:

- Fotos mit der Wolkenkamera
- Spektrale Bestrahlungsstärke mit dem Spektralradiometer (horizontal)
- Globale Bestrahlungsstärke mit dem Pyranometer (horizontal)
- Globale Bestrahlungsstärke mit dem Pyranometer (nach Osten, 35° Neigung)
- Globale Bestrahlungsstärke mit dem Pyranometer (nach Süden, 35° Neigung)
- Globale Bestrahlungsstärke mit dem Pyranometer (nach Westen, 35° Neigung)
- 3 mal (Osten, Süden, Westen) Kurzschlussstrom a-Si Modul
- 3 mal (Osten, Süden, Westen) Kurzschlussstrom c-Si Modul
- 3 mal (Osten, Süden, Westen) Kurzschlussstrom CdTe Modul
- 3 mal (Osten, Süden, Westen) Modultemperatur a-Si Modul
- 3 mal (Osten, Süden, Westen) Modultemperatur c-Si Modul
- 3 mal (Osten, Süden, Westen) Modultemperatur CdTe Modul

Die Messungen laufen derzeit noch und sollen auch weiter betrieben werden (Monitoring). Ergebnisse werden in dem Kapitel 3 vorgestellt. Diese wurden auch im Rahmen von Tagungen präsentiert (siehe u.a. Wagner et al.(2010), Rennhofer et al.(2010) und Weihs et al. (2011)).

2.2 Datenanalyse und Modellierung (AP3)

Auswertungen der Messdaten von beiden Standorten wurden zunächst im Rahmen von Fallstudien durchgeführt. Es zeigte sich insgesamt eine gute Qualität der Messdaten. Um die gemessenen Spektren sinnvoll vergleichen zu können wurde jeweils die Gleichgewichtswellenlänge (siehe auch Minemoto, (2007a,2007b)) bestimmt (siehe Abbildung 2).

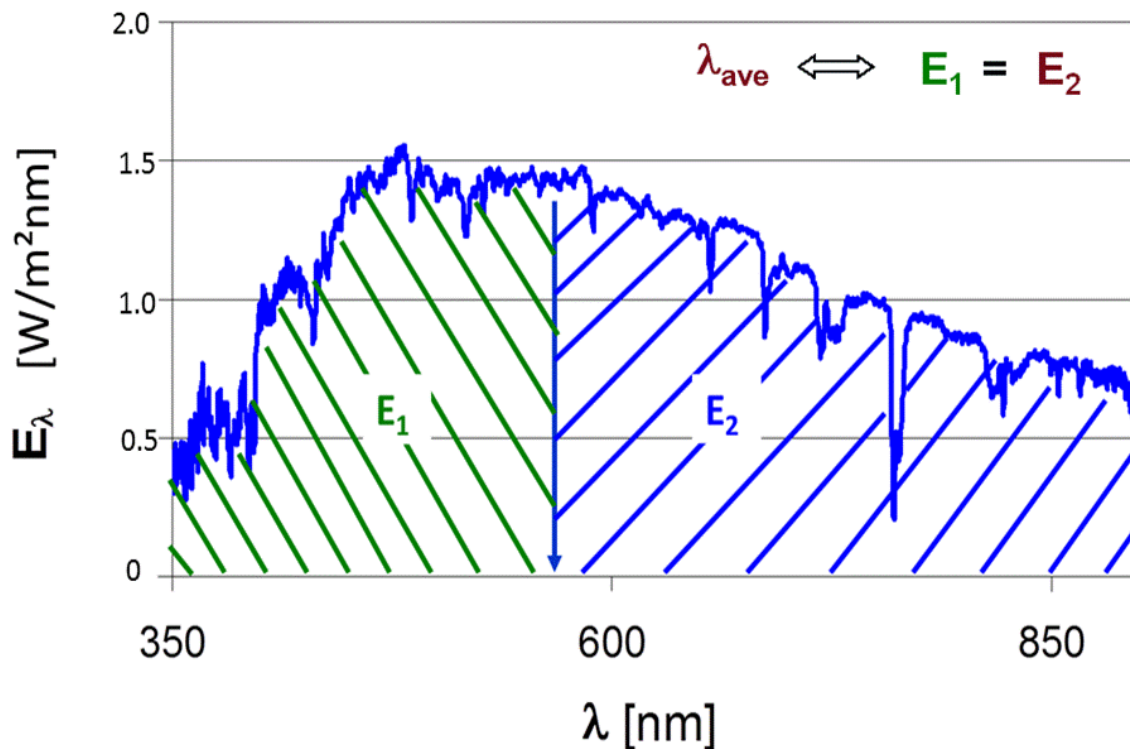


Abbildung 2: Bestimmung der Gleichgewichtswellenlänge des Sonnenspektrums. Die Abbildung stellt ein repräsentatives Spektrum für einen Sonnenzenitwinkel von 48 Grad (ca. AM1.5).

Um die Daten effizient auszuwerten, wurden umfangreiche Simulationen durchgeführt. Für wolkenlose Bedingungen wurde der Kurzschlussstrom für alle Modultypen und Ausrichtungen bestimmt. Somit steht zu jedem Zeitpunkt ein Referenzwert zur Verfügung.

2.3 Auswertung der Wolkenkamerabilder (AP3)

Weiters wurden die Kamerabilder der Wolkenkamera ausgewertet, um den Einfluss von Wolken im Allgemeinen und Kondensstreifen im Speziellen zu untersuchen. Die automatische Bildauswertung (siehe Abbildung 3 und 4) ermöglicht die Bestimmung des Bedeckungsgrades und bestimmt außerdem, ob die Sonne von Wolken verdeckt war oder nicht. Die Art der Wolken (siehe 3.4.2) lässt sich nur visuell bestimmen. Um die Software sinnvoll einzusetzen, mussten Fallstudien zur Validierung durchgeführt werden. Es zeigte sich, dass sich die automatische Auswertung durch geeignete Auswahl des untersuchten Ausschnitts (horizontnahe Bereiche sollten nicht analysiert werden) verbessern lässt. Bei sehr tiefen Sonnenständen ist die Software unzuverlässig. Diese Situationen sind aber auch bei der Strahlungsmessung schwer zu erfassen und wurden deshalb bei den meisten Untersuchungen nicht berücksichtigt.

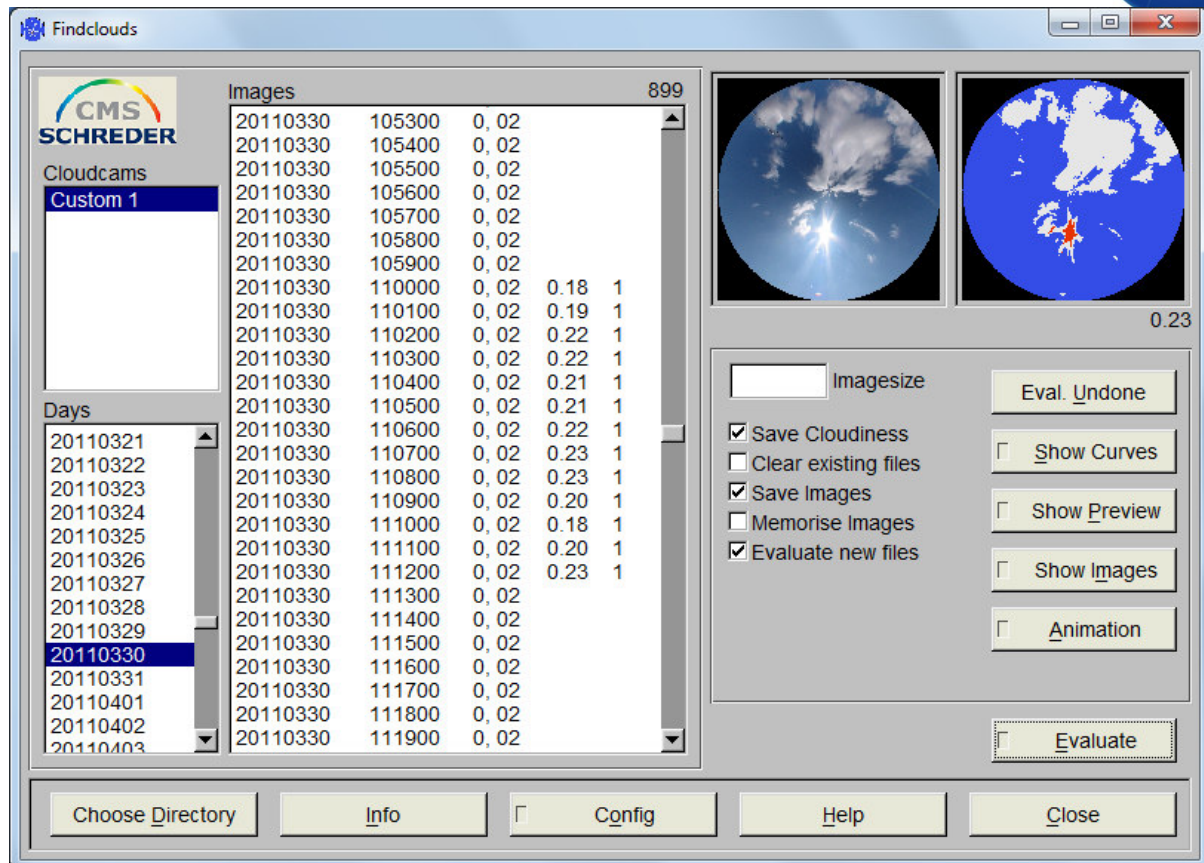


Abbildung 3: Screenshot der Software zur Auswertung der Wolkenkamerabilder

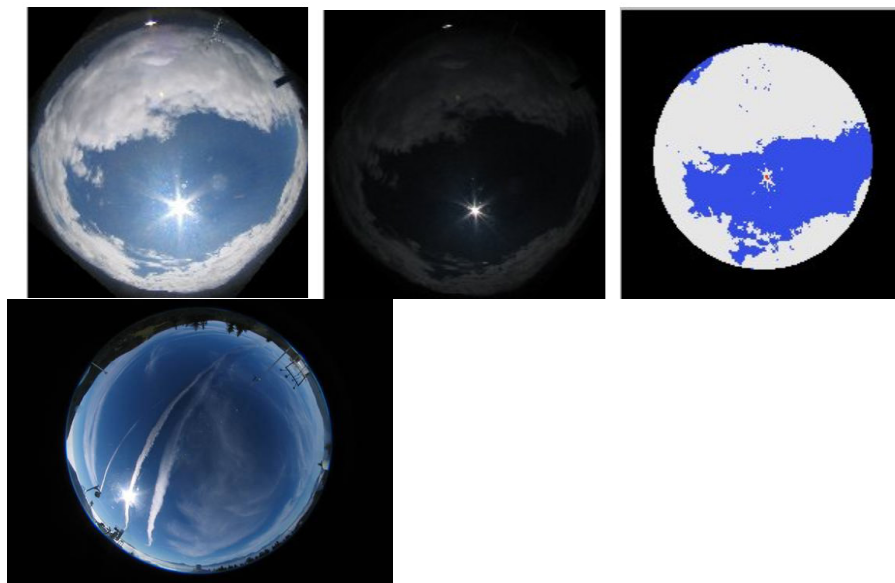


Abbildung 4: Auswertung der Wolkenkamerabilder und Abschattung der direkten Sonnenstrahlung durch Kondensstreifen (rechts) .

2.4 Berechnung des Korrekturfaktors (AP4) von Ertragsprognosen

Um den Einfluss des Spektrums im Strahlungsklima Österreichs abzuschätzen wurden die Messdaten in die drei Kategorien direkte Sonnenstrahlung, diffuse Himmelsstrahlung und diffuse Wolkenstrahlung eingeteilt. Jede dieser drei Kategorien weist ein typisches

Spektrum auf. Die direkte Sonnenstrahlung liefert langwelliges (rotes) Licht, diffuse Himmelsstrahlung kurzwelliges (blaues) und diffuse Wolkenstrahlung eher kurzwelliges Licht (leicht ins Blaue verschoben)- siehe Abbildung 5. Seehöhe und Bewölkungsverhältnisse bestimmen wesentlich den Anteil der Kategorien an der Jahressumme der Bestrahlungsstärke. Weitere signifikante Einflussfaktoren auf das Spektrum sind die Wolkendicke und die Wolkenart sowie die Aerosole. Die Wolkenart kann nicht automatisch bestimmt werden und wurde deshalb nicht berücksichtigt. Die optische Dicke der Wolken und der Aerosole wird nur kontinuierlich und flächendeckend durch Satelliten gemessen. Die Ungenauigkeit der Bestimmung ist aber noch beträchtlich. Für die jeweiligen Monate wurden deshalb - mit Hilfe der Spektrometermessungen - über den Tag gemittelte Spektren für bewölkte (8/8 Bewölkungsgrad) und für wolkenlose (0/8) Verhältnisse bestimmt und für die Berechnung des Korrekturfaktors verwendet.

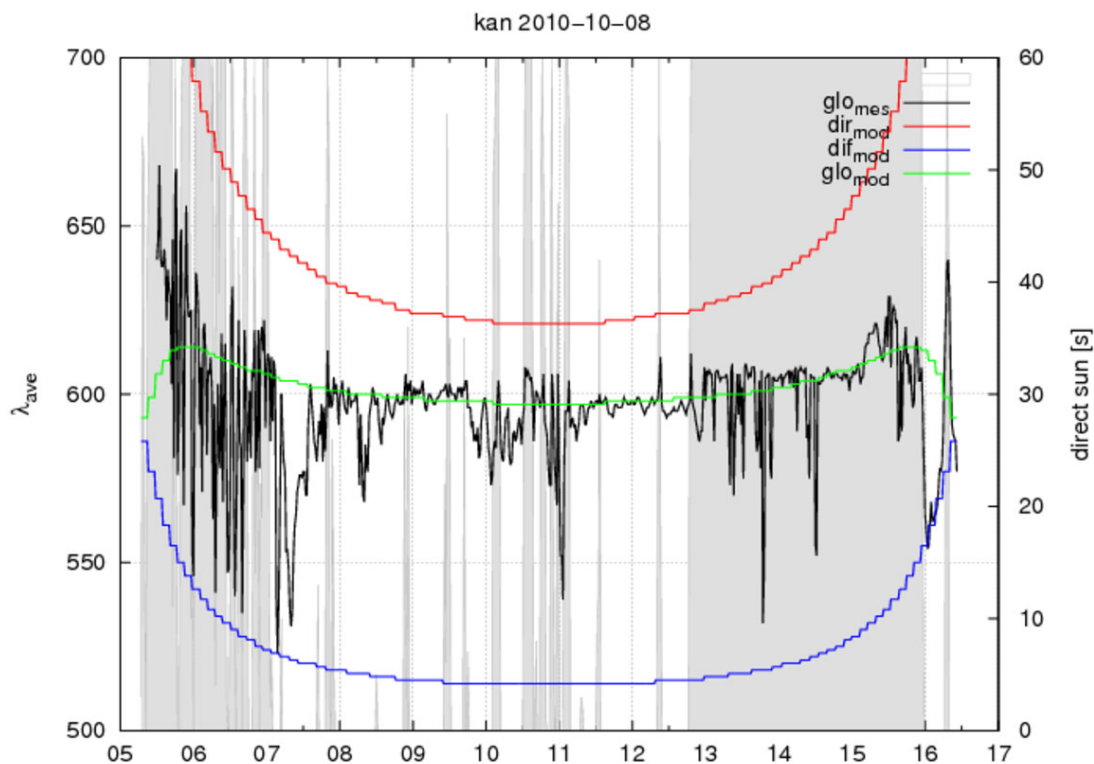


Abbildung 5: Tagesgang der Gleichgewichtswellenlänge an einem Tag mit durchbrochener Bewölkung (8. Oktober 2011). Es sind Messungen (schwarze Linie) und Modellrechnungen (rot – direkte Bestrahlung, blau – diffuse Bestrahlung und grün – globale Bestrahlung) dargestellt (Wagner et. al., 2012).

Mithilfe von klimatologischen Globalstrahlungsdaten des österreichischen Wetterdienstes und eines digitalen Höhenmodells konnte ein Korrekturfaktor „C“ bestimmt werden, der den Einfluss des Spektrums auf den Ertrag für die drei untersuchten Modultypen beschreibt. Diese Bestimmung des Korrekturfaktors C bestand darin die Abweichungen des realen Spektrums vom Standardspektrum $G_{AM1.5}(\lambda)$ zu bestimmen, den Kurzschlussstrom neu zu berechnen und so den Einfluss der spektralen Variabilität auf

den Kurzschlussstrom abzuschätzen. Der spektrale Korrekturfaktor wurde mit Hilfe folgender Gleichung berechnet:

$$C(m, d, z, t) = \frac{A \cdot \int S(\lambda, m) \cdot G(\lambda, d, z, t) d\lambda}{A \cdot \int S(\lambda) \cdot G_{AM1.5}(\lambda) d\lambda}$$

mit A – Modulfläche und $S(\lambda)$ – spektrale Empfindlichkeit (siehe Abb. 1)

Durch die Einteilung des Lichtes in die beschriebenen drei Kategorien, konnten somit auch drei Korrekturfaktoren (C_{wol} , C_{dir} , C_{dif}) bestimmt werden. Aufgrund des klimatologischen Bedeckungsgrades P_{wol} und des mit Strahlungstransfermodellen bestimmten Anteils der direkten Strahlung P_{dir} , konnten diese Korrekturfaktoren entsprechend gewichtet zum effektiven Korrekturfaktor aufsummiert werden (siehe folgende Formel):

$$C(m, d, z, t) = C_{wol}(m) \cdot P_{wol}(d, t) + C_{dir}(m, d, t) \cdot (1 - P_{wol}(d, t)) \cdot P_{dir}(d, z, t) + C_{dif}(m, t) \cdot (1 - P_{wol}(d, t)) \cdot (1 - P_{dir}(d, z, t))$$

Mit :

m – Technologie (aSi, cSi, CdTe)

d – Ausrichtung (ost, süd, west) (ost und west sind identisch, es soll also nur süd und ost dargestellt werden)

z – Meereshöhe

t – Zeit (Sommerhalbjahr, Winterhalbjahr, Jahr)

Mit dieser Berechnungsmethode wurden die auf der Homepage (siehe auch Abbildung 17) dargestellten Ergebnisse bestimmt.

2.5 Aufbau der Homepage (AP5)

Im Rahmen von Expertengesprächen bei Fachtagungen stellte sich heraus, dass eine Eigenentwicklung einer Software zur Ertragssimulation wegen des geschätzten hohen Aufwands und den bereits zahlreich vorhandenen Programmen innerhalb des Projektes nicht sinnvoll ist. Ebenso wurde eine weitere Möglichkeit, die Erweiterung von vorhandenen PV-Ertragswerkzeugen geprüft. Die Softwareprogramme PV-Sol und Insel wurden auf Ihre Einsatzfähigkeit für das gegenständliche Projekt getestet. Ergebnis der Prüfung war, dass die Programme aufgrund ihrer Komplexität und Einschränkungen durch die jeweiligen Entwickler für eine Erweiterung ungeeignet sind. Es wurde deshalb vereinbart, nur den prozentuellen Korrekturfaktor „k“ zu ermitteln und graphisch darzustellen. Dazu und allgemein für die Präsentation des Projektes wurden zwei Domainnamen (www.sonnenkarte.at und www.pvspec.at) gekauft und die

Programmierung einer Internetseite zur Darstellung der Ergebnisse begonnen. Im Zentrum stand dabei eine thematische Karte von Österreich, die spektral bedingte regionale Ertragsunterschiede quantifiziert. Intuitive Bedienung soll Nutzer mit wenig Vorwissen ansprechen. Zusätzlich zu den auf Konferenzen bzw. in wissenschaftlichen Journalen veröffentlichten Beiträgen sind hier Ergebnisse des Projektes anschaulich für die interessierte Öffentlichkeit dargestellt. Zunächst wurden dazu in einer konzeptuellen Phase Aufbau und Design abgestimmt.

Für die Realisierung eines Designs und Programmierung der Projekthomepage engagierte green jobs Austria den Webdesigner und Programmierer Andreas Mursch-Radlgruber. In den Abbildungen 6 und 17 wird die Entwicklung des Designs der Projekthomepage vom Erstentwurf zum fertigen Endprodukt dargestellt.

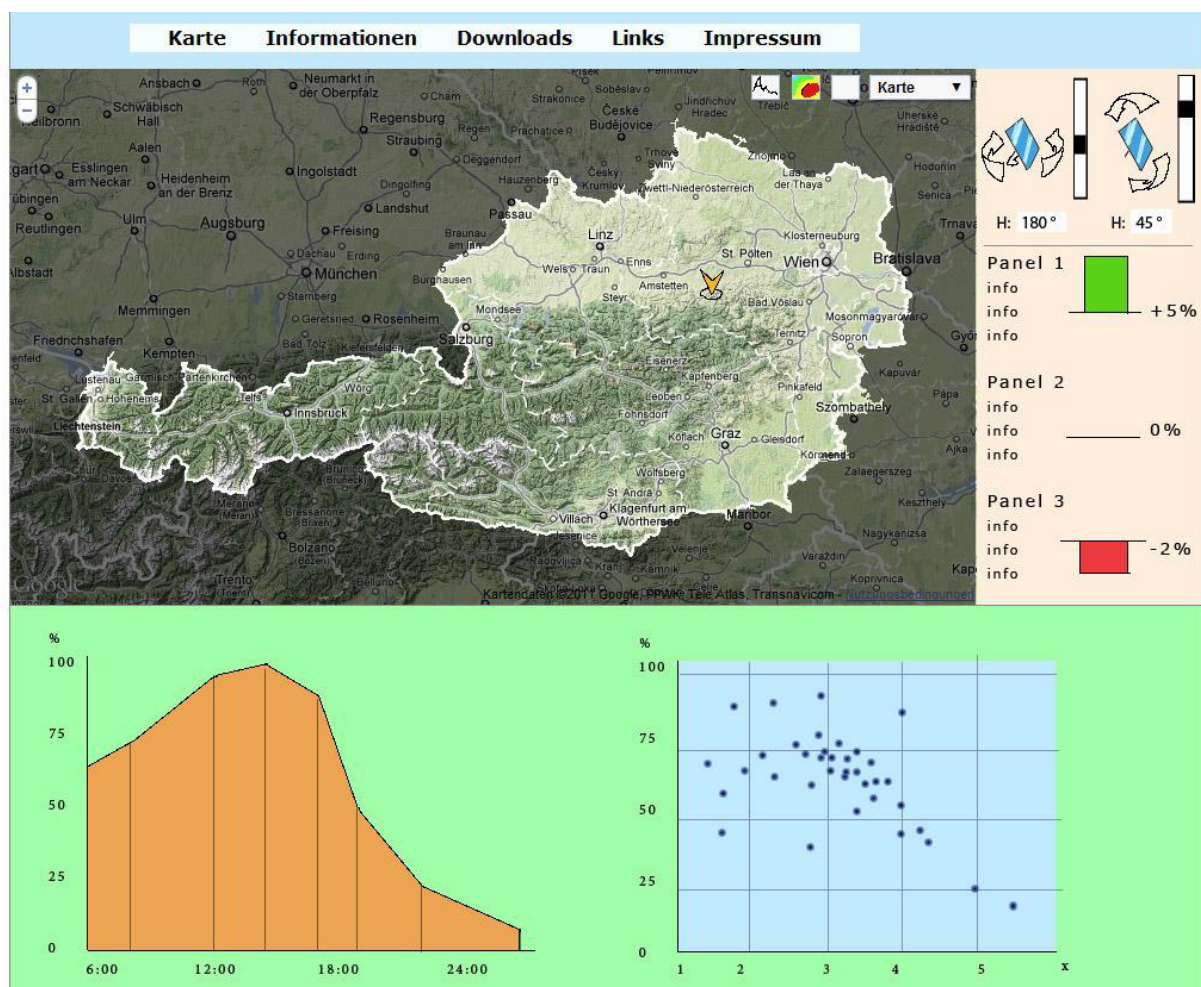


Abbildung 6: Erstentwurf für Design der Projekthomepage sonnenkarte.at

3 Ergebnisse

3.1 Pre- und Postcharakterisierung der Module (AP2)

Die für die Untersuchung verwendeten Module wurde hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften, spektralen Empfindlichkeit und Produktgüte vor und nach dem Projekt untersucht.

Vor dem Projekt wurde die Spektrale Empfindlichkeit am JRC in Ispra bestimmt (siehe Abbildung 1). Die Elektrischen Kennwerte wurden gemessen und eine Elektrolumineszenzaufnahme intrinsischer Defekte wurde am AIT angefertigt. Nach der Versuchsdauer wurden diese Messungen wiederholt. Man kann dadurch die geringe Alterung der Module und damit die Zuverlässigkeit der Messdaten feststellen.

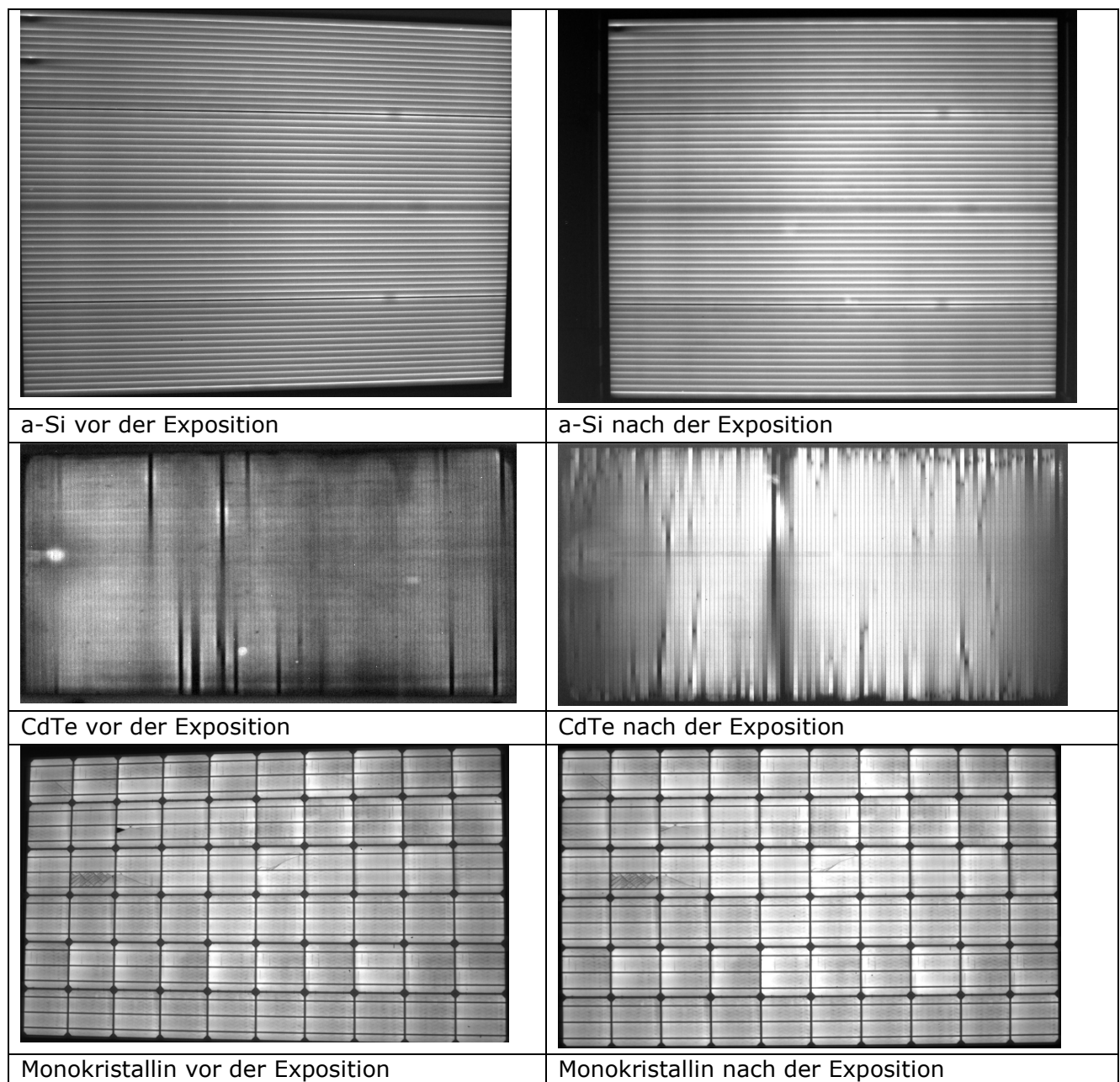


Abbildung 7: Elektrolumineszenzaufnahmen der Modulschäden.

3.2 Fallstudien zu spektralem Einfluss und Topographieeffekt (AP3)

Es wurde nachgewiesen, dass ein Einfluss des Spektralen Sonnenlichtes auf die Umwandlungseffizienz der untersuchten Photovoltaikmodule in Abhängigkeit von Wetter, Klima und Topographie existiert. Dazu wurden exemplarisch geeignete Tage als Referenz herangezogen und die Amplitude des erwarteten Effektes rein messtechnisch erfasst. Die Verschiebung der Gleichgewichtswellenlänge aufgrund von Topographie und Wetter konnte aus den Messdaten eindeutig gezeigt werden (siehe Abbildungen 8 und 9). Die Gleichgewichtswellenlänge verschiebt sich damit nicht nur jeweils im Tagesverlauf, sondern ist auch von der topographischen Lage (hier 170 m und 1600 m) und der Wettersituation (z.B. Regen, Sonne, etc.) abhängig. Erklärbar ist dies durch die unterschiedlichen Anteile an direkt- und Diffusstrahlung und den Einfluss von Mie- und Rayleighstreuung. Durch die unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten wird die direkte Abhängigkeit der Modulströme sichtbar.

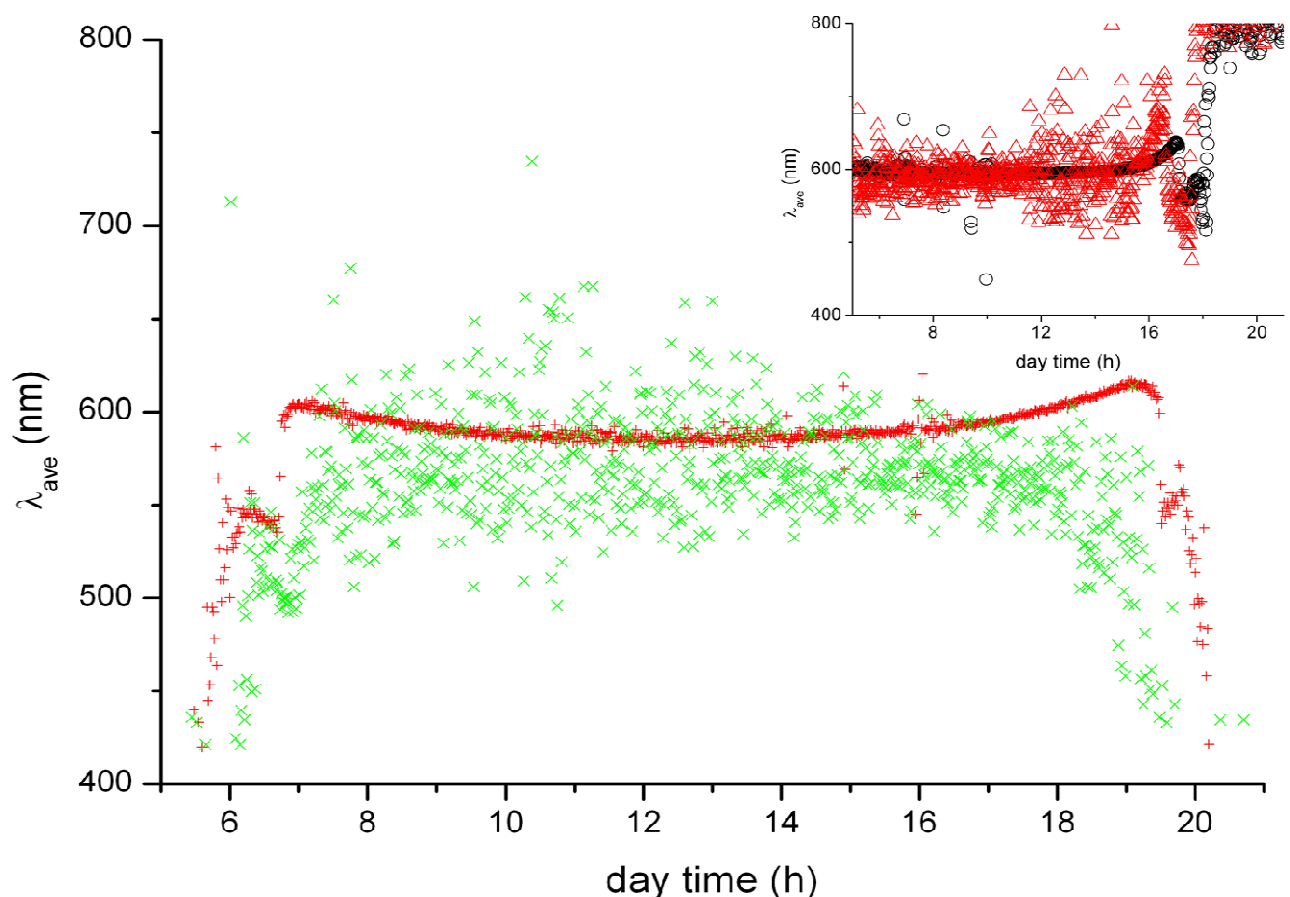


Abbildung 8: Zeitabhängigkeit von λ_{ave} für 170 m (x) and 1600 m (+) an einem sonnigen. Das Inset zeigt die Daten eines vollständig bewölkten Tages auf 170 m (O) und 1600 m (Δ) (Rennhofer et al., 2012).

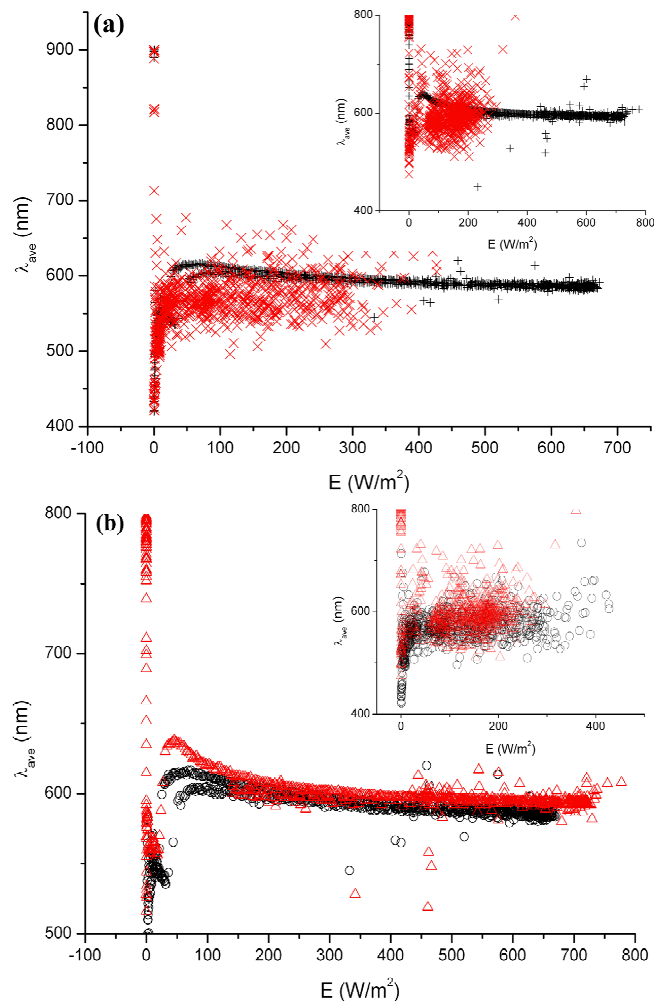


Abbildung 9: Gleichgewichtswellenlänge als Funktion der Einstrahlung für (a) 170 m und 1600 m (Inset) für Bewölkung (x) und Sonne (+) und (b) 170 m (O) und 1600 m (Δ) für Sonne und Bewölkung (Inset). Die Stromumwandlungseffizienz der Modultypen (ein Maß für den Einfluss der spektralen Änderungen) ergibt sich dann durch Vergleich der gemessenen Kurzschlussströme mit den STC-Werten (Laborwerte bei AM1,5, 1000W/m² und 25°C) und der Einstrahlung bezogen auf 1000W/m². Es konnte eine deutliche Abhängigkeit vor allem für die Dünnschichtmodule festgestellt werden, siehe Abbildung 10 (Rennhofer et al., 2012).

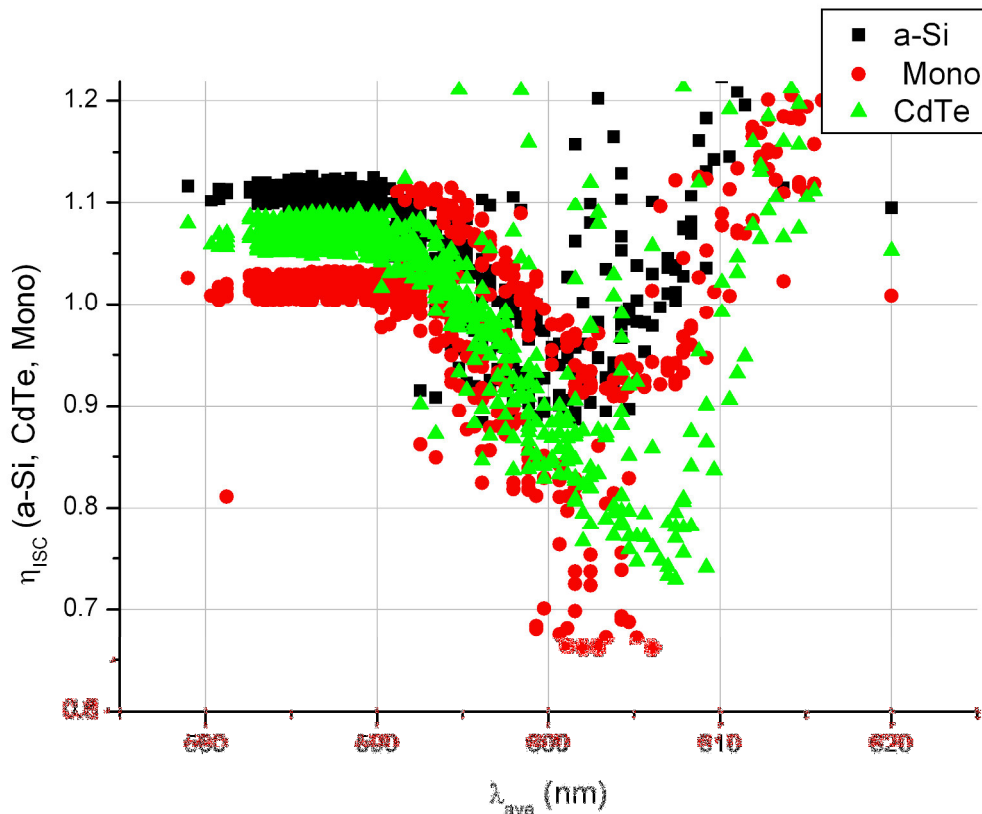


Abbildung 10: Umwandlungseffizienz der einzelnen Modultypen (Rennhofer et al., 2012).

3.3 Spektraler Einfluss (AP3)

Der Einfluss des Spektrums auf den Kurzschlussstrom konnte für die drei untersuchten Modultypen und Ausrichtungen quantifiziert werden. Dazu waren neben den Messdaten auch umfangreiche Modellberechnungen nötig. Mithilfe der im Labor bestimmten spektralen Empfindlichkeit, dem in der Modulebene mit Pyranometern gemessenen Globalstrahlung und dem AM1.5-Spektrum (Norm) konnte zu jedem Zeitpunkt der zu erwartende Kurzschlussstrom bestimmt werden. Dieser Wert wurde mit dem gemessenen Kurzschlussstrom verglichen. Um die spektrale Abhängigkeit zu untersuchen wurden nur Situationen mit großen Sonnenhöhen (> 20 Grad über Modulebene) untersucht. Bei tiefen Sonnenständen beeinflussen Reflexionen wesentlich den Kurzschlussstrom. Das gemessene Spektrum in der Horizontalen unterscheidet sich wesentlich vom Spektrum, das in der Modulebene auftritt. Deshalb musste das gemessene Spektrum zunächst in die Modulebene umgerechnet werden. Dazu wurde die schon in den 1970er Jahren beschriebene Methode nach Klucher (1979) verwendet. Als Maßzahl für das Spektrale Verhalten wurde anschließend die Gleichgewichtswellenlänge bestimmt. Entsprechend der spektralen Empfindlichkeit der drei Modultechnologien (Abbildung 1) wurde erwartet, dass aSi- und CdTe-Module bei eher blauem Licht (kleine Gleichgewichtswellenlänge) höhere Kurzschlussströme liefern, während cSi-Module bei rotem Licht (hohe Gleichgewichtswellenlänge) höhere Erträge liefern. Die erwartete Abhängigkeit des

Kurzschlussstromes vom Spektrum konnte großteils bestätigt werden. In Abbildung 11 ist die prozentuale Änderung des Kurzschlussstromes im Verhältnis zu dem mit dem AM1.5 (Gleichgewichtswellenlänge 597 nm) berechneten Kurzschlussstrom dargestellt. Spektrale Unterschiede sorgen zeitweise für bis zu 10 % höhere bzw. bis zu 15 % niedrigere Erträge. Im zeitlichen Mittel zeigt sich allerdings ein wesentlich geringerer Einfluss, weil zum Zeitpunkt der größten Einstrahlung (mittags) das Spektrum meist etwa dem AM1.5 Spektrum entspricht. Außerdem treten Situationen mit rotem Licht in etwa so häufig auf, wie Situationen mit eher blauem Licht (siehe Abbildung 12) und somit gleichen sich erhöhte Erträge und Mindererträge etwa aus. Letztlich konnte der Einfluss des Spektrums im Jahresmittel auf ca. +1 % (aSi), -2 % (cSi) und -1 % (CdTe) für die nach Süden ausgerichteten Module bestimmt werden. Die nach Osten bzw. Westen montierten Module hatten noch etwas höhere Erträge (aSi) bzw. etwas höhere Mindererträge (cSi- und CdTe-Module). Exemplarisch sind Ergebnisse in Abbildung 17 dargestellt. Detailliert können die Ergebnisse auf der Projekthomepage www.sonnenkarte.at abgerufen werden.

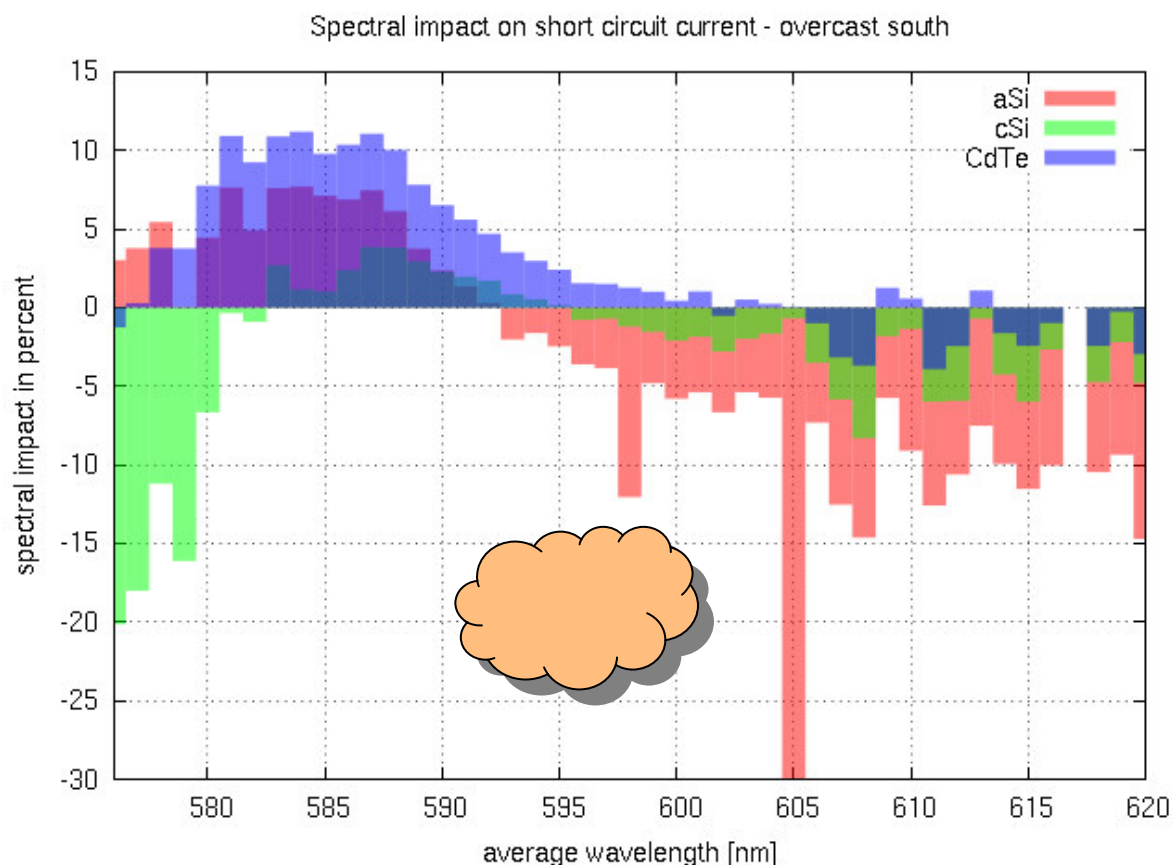


Abbildung 11: Einfluss des Spektrums auf den Ertrag an bewölkten Tagen.

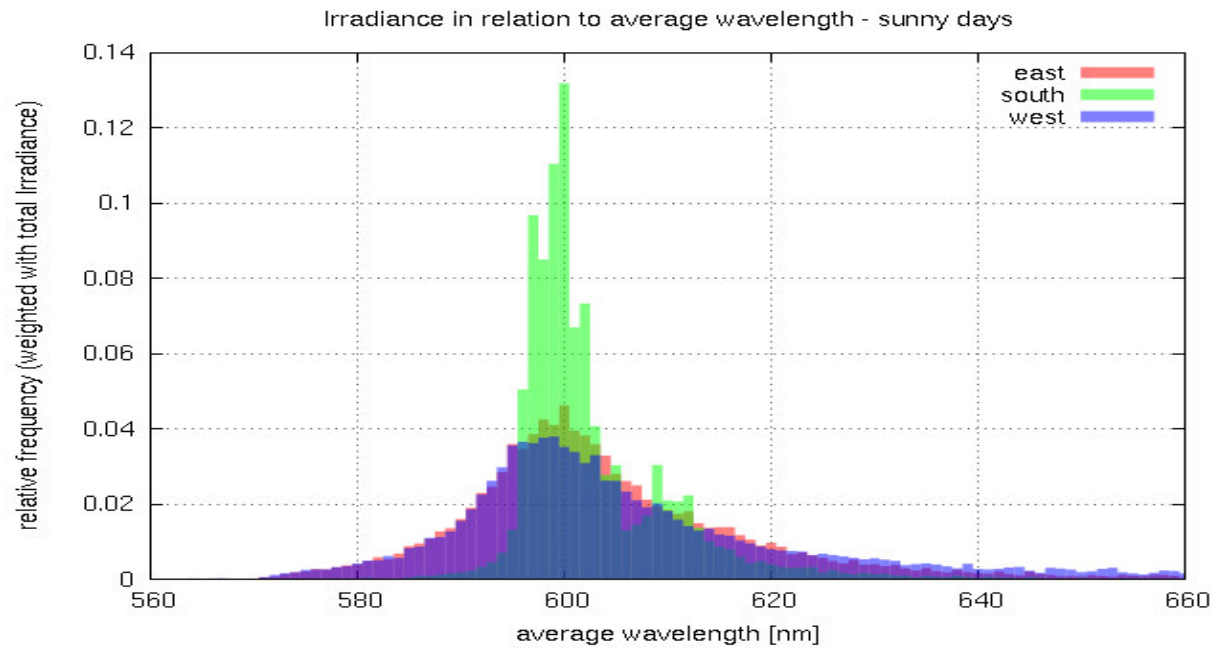


Abbildung 12: Histogramm der Gleichgewichtswellenlänge in Modulebene.

3.4 Wolkeneinfluss (AP3)

3.4.1 Bewölkungsgrad und Kurzschlussstrom

Mit Hilfe der Auswertung der Fischaugenkamerabilder konnte ein Zusammenhang zwischen dem Bewölkungsgrad und dem gemessenen Kurzschlussstrom hergestellt werden. Für die Periode von Mai 2011 bis August 2011 wurde der Bewölkungsgrad mit der Auswertungssoftware „findclouds“ bestimmt. Um einen von der Tageszeit unabhängigen Vergleichswert für den gemessenen Kurzschlussstrom zu verwenden, wurde für alle Tage der Messperiode ein maximal möglicher Kurzschlussstrom modelliert (bei wolkenlosen Bedingungen). Der Quotient aus gemessenem und modelliertem Kurzschlussstrom kann als ein von der Tageszeit unabhängiger Wert mit dem Bewölkungsgrad verglichen werden.

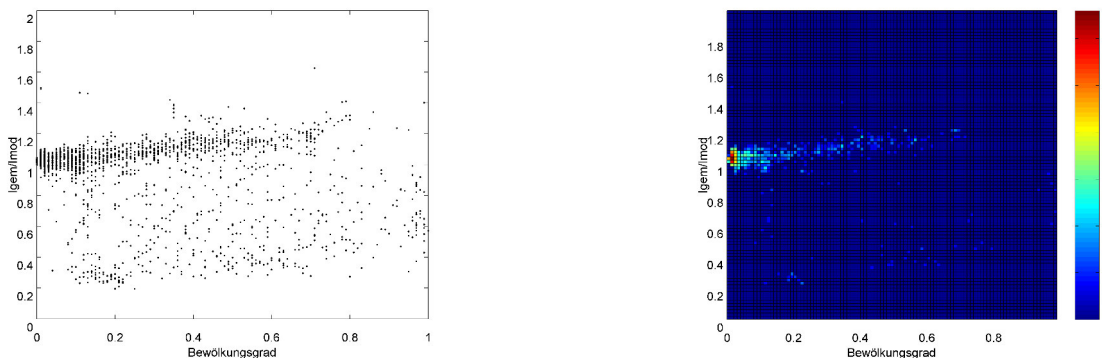


Abbildung 13: Einfluss der Bewölkung auf den Kurzschlussstrom (kristallines Silizium) bei sichtbarer Sonne (links: Messwerte, rechts: Verteilung der Messwerte).

Die beiden Abbildungen zeigen das Ergebnis der Auswertung für das nach Süden ausgerichtete Modul mit Zellen aus kristallinem Silizium bei sichtbarer Sonne. Die Werte konzentrieren sich erwartungsgemäß bei geringer Bewölkung um 1 und man kann einen leichten Anstieg bei zunehmender Bewölkung erkennen. Dieser ist bedingt durch die Strahlungsüberhöhung die bei sichtbarer Sonne und mittlerer Bewölkung auftritt und dabei höhere Einstrahlungswerte verursacht, als dies bei wolkenlosen Bedingungen der Fall wäre. Ab einer Bedeckung von ca. 60% werden allerdings wieder hauptsächlich niedrigere Werte gemessen und auch die Häufigkeit der Messwerte nimmt erwartungsgemäß ab.

3.4.2 Verschiedene Wolkentypen und Kurzschlussstrom

Neben dem Einfluss des Bewölkungsgrades wurde ebenfalls untersucht inwiefern sich verschiedene Wolkentypen auf die Performance der verschiedenen Zellen auswirken. Es wurde wieder für jeden Tag der Messperiode der Kurzschlussstrom für wolkenlose Bedingungen modelliert und anschließend die prozentuale Abweichung der jeweiligen

gemessenen Werte, für bestimmte Zeitspannen mit dem gewünschten Wolkentyp, bestimmt.

Cirrus		
Tage:	4	
Gesamtzeit:	4 h 48 min	
Durchschnittlicher Minderertrag:		
aSi	CdTe	cSi
-7,3 %	-6,8 %	-5,5 %

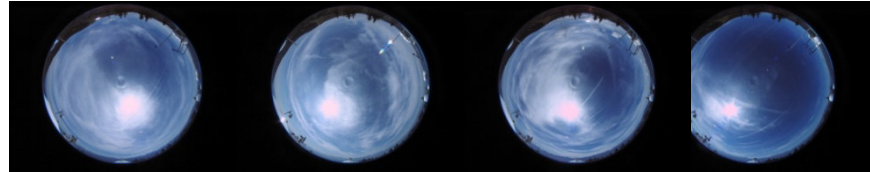


Abbildung 14: Durchschnittlicher Minderertrag bei Cirrusbewölkung (aSi = amorphes Silizium, CdTe = Cadmium Tellurid, cSi = kristallines Silizium)

In der obigen Abbildung sind exemplarisch die Endergebnisse für den Vergleich der verschiedenen Zelltypen bei Cirrus-Bewölkung dargestellt. Für diesen Wolkentyp wurden 4 verschiedene Situationen (siehe Kamerabilder rechts in der Abbildung), bei denen sich durchgehend Cirrus-Wolken vor der Sonne befanden, untersucht. Gleiche Untersuchungen wurden für Zeiträume mit Cumulus-Bewölkung, Nebel, und Durchzügen von Regenfronten durchgeführt. In den meisten untersuchten Fällen zeigte das Modul mit kristallinen Silizium-Zellen die geringsten prozentualen Mindererträge im Vergleich zum modellierten Kurzschlussstrom.

3.4.3 Kondensstreifen

Im Rahmen der Untersuchungen des Einflusses der Bewölkung auf die einfallende Sonnenstrahlung wurde auch der Einfluss der Kondensstreifen auf den solaren Ertrag untersucht. Daten von neun Monaten wurden untersucht. Es wurden mit Hilfe von Fischaugenkameraaufnahmen zwischen Tagen mit Kondensstreifenpersistenz und manchen ohne Persistenz unterschieden, wobei die Persistenz so definiert ist, dass der Kondensstreifen noch sichtbar bleibt, wenn das Flugzeug außer Sichtweite ist. An manchen Tagen mit tiefer 8/8 Bewölkung ist es nicht möglich Aussagen bzgl. Persistenz zu treffen. Dies kann in manchen Monaten mehr als 60% der Tage betreffen. Die Persistenz ist grundsätzlich höher während der späten Sommermonate und während der Herbst- und Wintermonate. Es wurden in manchen Wintermonaten bis zu einem Drittel der Tage als Kondensstreifenpersistente eingeordnet. Abbildung 15 zeigt den Tagesgang der Globalstrahlung von 2 aufeinanderfolgenden Tagen: dem 22. September 2010, ein wolkenloser Tag ohne Kondensstreifenpersistenz und dem 23. September 2010 mit 49 beobachteten persistenten Kondensstreifen während des Tages, von denen 27 eine Abschattung der Sonne verursachten.

Wie in Abbildung 15 ersichtlich ist, wurden kurzzeitige Abnahmen der Globalstrahlung von bis zu 370 W/m^2 (-68%) beobachtet. Die Abnahme der einfallenden Globalstrahlung

auf den nach Osten, Süden und Westen geneigten Flächen entspricht ca. der Abnahme der Globalstrahlung auf die horizontale Ebene.

Es zeigt sich aber auch, dass die Kondensstreifen genauso wie Cirren zu einer Erhöhung der diffusen Strahlung und deswegen der Globalstrahlung von bis zu 10% (bei Nichtbeschattung der Sonne) führen kann. Die durchschnittliche Abnahme der Globalstrahlung (während der Abschattung durch den Kondensstreifen) als Funktion der Dauer einer Beschattung ist in Abbildung 16 ersichtlich. Die maximale Dauer einer Abschattung durch einen Kondensstreifen oder durch mehrere übereinander gelagerte Kondensstreifen liegt bei 15 Minuten. Die mittlere Abnahme der Globalstrahlung während des Beschattungsereignisses liegt zwischen 1 und 68% wobei sich die meisten Werte im Bereich zwischen -1 und -20% befinden. Im Durchschnitt beträgt die mittlere Abnahme der Globalstrahlung während der Abschattung durch den Kondensstreifen 8%. Die zwischen den Abschattungsereignissen berechnete mittlere Strahlungsüberhöhung beträgt ca. 8.3%. Grob lässt sich die Behauptung aufstellen dass, eine Abschattung durch Kondensstreifen von ca. 30-35 Minuten notwendig ist, um zu einer Abnahme der Globalstrahlung zu führen. Dies entspricht im Schnitt ca. 6 bis 7 Kondensstreifen, die zu einer Abschattung der Sonne führen.

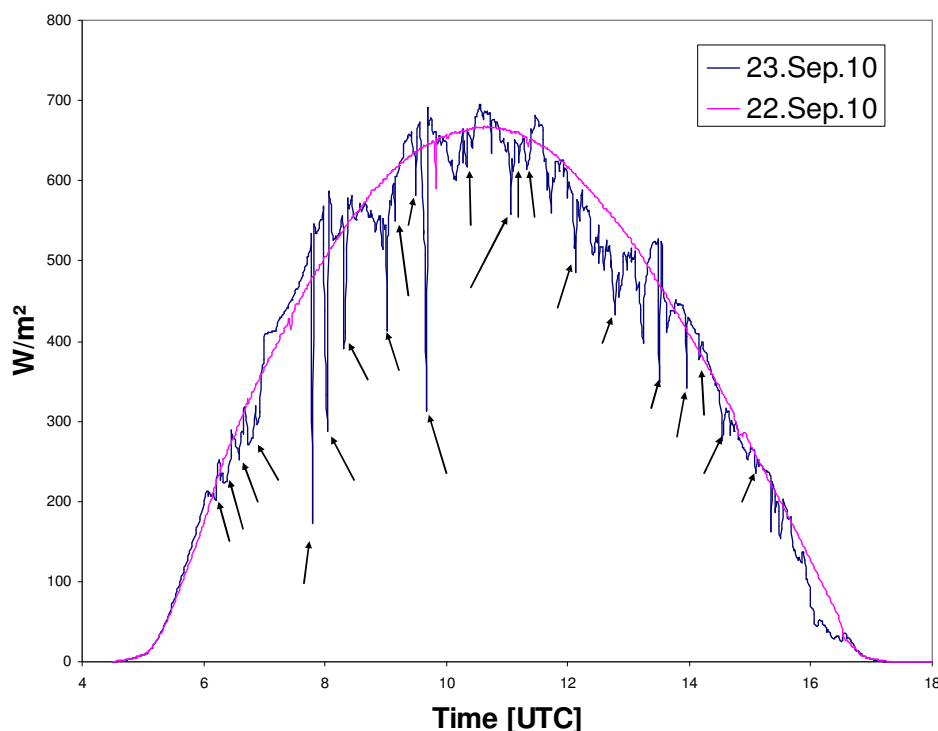


Abbildung 15: Einfluss der Kondensstreifen auf die Globalstrahlung. Hier ist der Tagesgang der Globalstrahlung an zwei aufeinanderfolgenden Tagen 22 und 23. September gezeigt. Der 22. September ist wolkenlos ohne Kondensstreifenpersistenz. Am 23. September traten viele persistente Kondensstreifen (49 wurden beobachtet von denen 27 –durch die Höhenwinde – vor die Sonne wanderten). Die Pfeile zeigen die einzelnen Ereignisse an denen durch Abschattung durch einen Kondensstreifen es zu einer Globalstrahlungsabnahme gekommen ist.

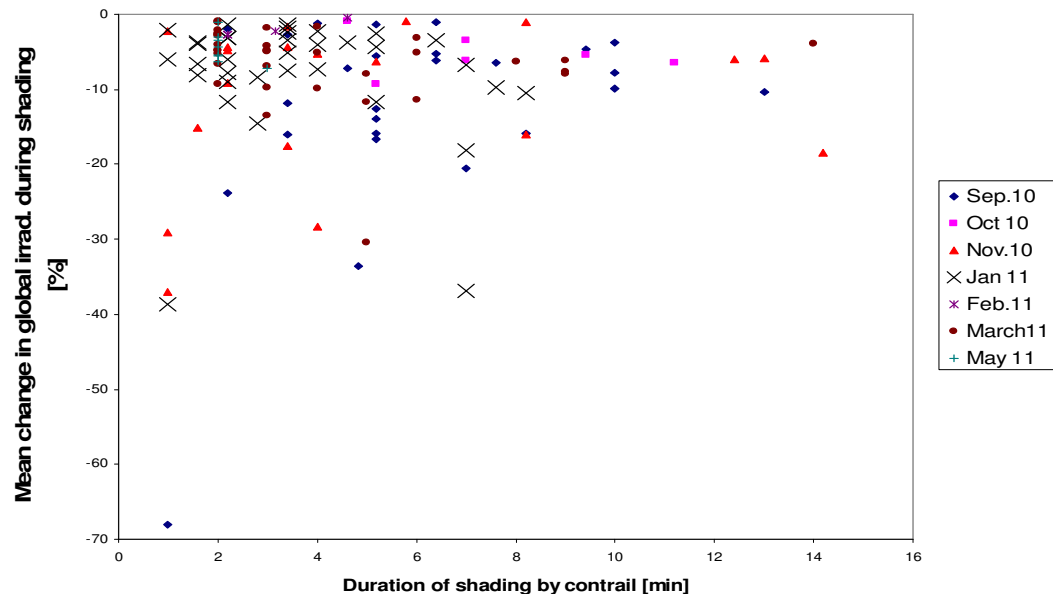


Abbildung 16: Einfluss der Kondensstreifen auf die Globalstrahlung. Hier ist die durchschnittliche Abnahme während der Abschattung durch den Kondensstreifen als Funktion der Beschattungsdauer dargestellt. Im Schnitt bleibt der Kondensstreifen 5 Minuten zwischen Sonne und Beobachter und führt zu einer mittleren Abnahme der Globalstrahlung während der Abschattung von 8%.

3.5 Homepage (AP5)

Die Homepage wird als Plattform für die Veröffentlichung des Korrekturfaktors „k“ verwendet. Dieser beschreibt den Einfluss des Spektrums auf den Ertrag und wird in grafischer Form als interaktive Karte von Österreich dargestellt. Diese Homepage wird auch für die Veröffentlichung der Forschungsergebnisse verwendet. Die Internetadresse lautet www.sonnenkarte.at.

3.5.1 Kurzbeschreibung zur Bedienung der Projekthomepage

Im ersten Schritt gelangt der Besucher zu einer Willkommenseite mit einer Übersicht zu Nutzerbedingungen und technischen Hinweisen, denen er durch einen Klick auf den Button „Akzeptieren“ zustimmt. Das dient einerseits zur Vorabinformation der Besucher über Inhalt und Technik der Internetseite, andererseits zur rechtlichen Absicherung für die Betreiber und Entwickler der Seite.

Im zweiten Schritt gelangt der Besucher zur Startseite von sonnenkarte.at mit der interaktiven Karte von Österreich als Hauptinhalt. Mittels des angezeigten Menüs - es besteht aus den Punkten „Karte“, „Informationen“, „Downloads“, „Links“ und „Impressum“- kann der Besucher auf der Internetseite zu den gewünschten Inhalten navigieren. Gleich unterhalb des Menüs befindet sich die Steuerleiste für die Einstellung der interaktiven Karte. Mögliche Einstellungen betreffen die gewünschte Zoomstufe, Jahreszeit, Himmelsrichtung und Art des PV-Moduls. Am unteren Ende der Seite befindet sich in der Mitte die Legende, in der die Korrekturfaktoren aller drei PV-Modultypen, die

mittlere Sonneneinstrahlung in kWh/m² über den gewählten Zeitraum und der Wertebereich der Korrekturfaktoren angezeigt werden.

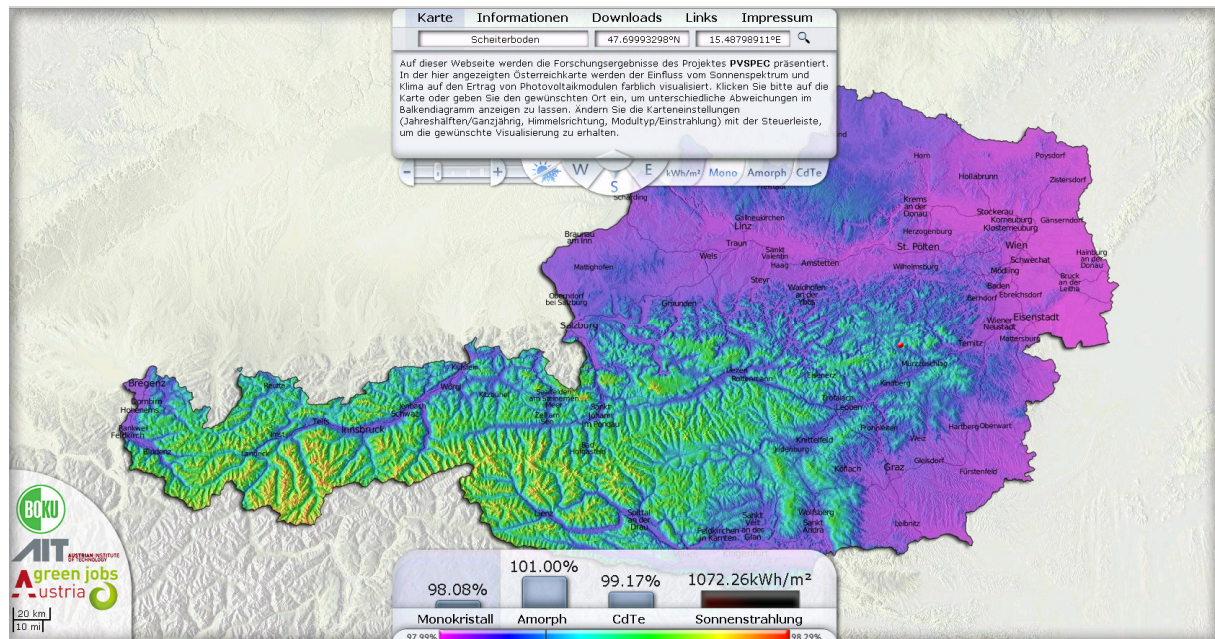


Abbildung 17: Finales Design und Darstellung der interaktiven Karte von sonnenkarte.at

3.5.2 Modelle für Leistungshochrechnung (AP4)

Im Versuchsaufbau wurden die Kurzschlussströme der PV-Module gemessen. Für Aussagen über reale Jahreserträge ist die Leistung notwendig. Es wurden daher mehrere Modelle analysiert, die eine Hochrechnung der Leistung aus lediglich den Kurzschlussströmen erlauben. Im Zuge dessen müssen aus Messwerten (Einstrahlung E und Kurzschlussstrom I_{SC} sowie Modultemperatur T_M) sowie Datenblattwerten (Temperaturkoeffizienten, Nennkurzschlussstrom, Nennleistung und Nennspannung) die Leistung genähert werden. Problematisch dabei ist, dass alle Werte temperaturabhängig sind. Eine lineare Näherung erster Ordnung unter Einbeziehung des ebenfalls temperaturabhängigen Füllfaktors ist in Abbildung 18 dargestellt. Wenn auch der grundsätzliche Trend der Ergebnisse der Umwandlungseffizienz wiedergegeben wird, sind die Ergebnisse nicht zuverlässig. Ursache ist vor allem der nicht konstante Füllfaktor sowie die Temperaturabhängigkeit der miteinander korrelierten elektrischen Parameter (Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung, Füllfaktor, Spannung maximaler Leistung, Strom maximaler Leistung, maximale Leistung).

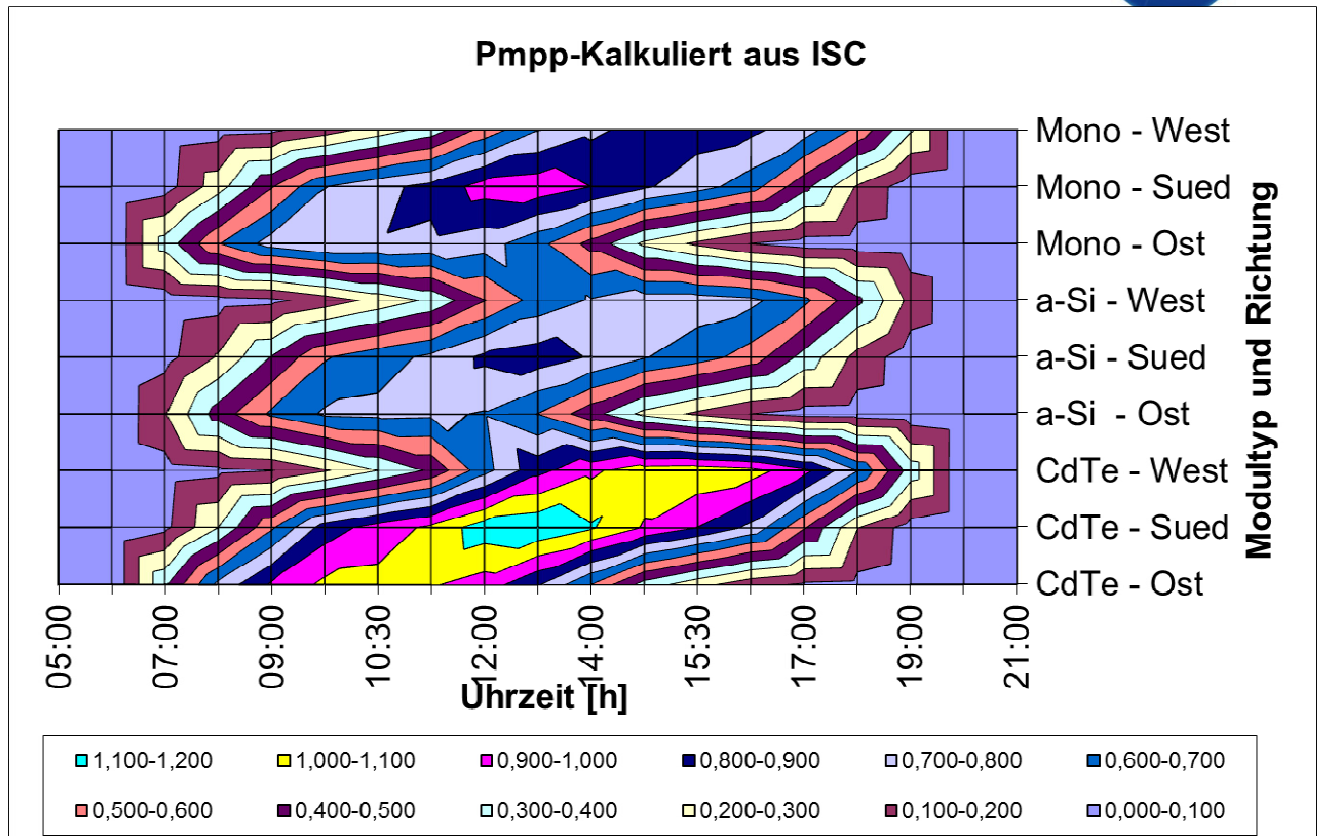


Abbildung 18: Lineare Näherung der maximalen Leistung aus den Kurzschlussströmen berechnet. Wolkenlose Verhältnisse, typischer Sommertag.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

- Eine sehr wertvolle Datenreihe wurde erstellt. Die zwei Standorte Kanzelhöhe und Wien AIT erwiesen sich als ideal für die Durchführung von wissenschaftlichen Untersuchungen. Die Durchführung von Nachfolgeforschungsprojekten (z.B. Langzeituntersuchungen bzgl. Degradation von PV –Modulen) wäre sehr sinnvoll.
- Die Abhängigkeit von Kurzschlussstrom und Ertrag vom solaren Spektrum wurde gut dokumentiert, es zeigte sich aber über längere Perioden sowie über den ganzen Tag gemittelt kein Einfluss. Dies entsprach einerseits nicht den Erwartungen der Antragsteller, es zeigt aber andererseits die Sinnhaftigkeit der Verwendung des AM1.5 Spektrums bei den bekannten weitverbreiteten Prognosetools.
- Die Verwendung einer Fischaugenkamera bei den Untersuchungen zeigte umfassende Verwendungsmöglichkeiten für wissenschaftliche Fragestellungen auf. Kurzfristige Einflüsse (Bewölkung Kondensstreifen) lassen sich viel besser dokumentieren und genauere Analysen können mit deren Hilfe durchgeführt werden.
- Beachtenswert sind die durch Abschattung der Sonne durch Kondensstreifen verursachten und beobachteten kurzzeitigen Abnahmen der Globalstrahlung von bis zu 370 W/m^2 . Es wurde außerdem auch ersichtlich, dass Kondensstreifen viel öfter vor die Sonne wandern als ursprünglich vermutet wurde.
- Es zeigt sich bei der Studie des Einflusses der Bewölkung auf den Ertrag, dass bei der Analyse der Daten die Unterscheidung zwischen Fällen mit direktem Sonnenschein und welchen mit Sonnenbedeckung durch Wolken unbedingt Sinn macht. Die Bedeckung/Sichtbarkeit der Sonne ist von entscheidender Bedeutung für die Magnitude der solaren Bestrahlungsstärke. Die Unterscheidung beider Fälle (bedeckte oder nicht bedeckte Sonne) ermöglicht eine genauere Analyse der unterschiedlichen Einflussfaktoren (z.B. Untersuchung des Einflusses von Wolkentyp auf die Bestrahlungsstärke) auf die zur Verfügung stehende Sonnenenergie.

5 Ausblick und Empfehlungen

Im Bereich des Langzeitverhaltens von PV Modulen ist noch erheblicher Forschungsbedarf gegeben.

Das bereits seit zwei Jahren stattfindende Monitoring der Kurzschlussströme von PV-Modulen und die parallel durchgeführte Messreihe der spektralen Bestrahlungsstärke

sollten aus diesem Grund weiter durchgeführt werden (Monitoring). Ein Langzeitmessprogramm mit erweiterter Standortzahl (Zypern/AIT/Kanzelhöhe) kann sehr wahrscheinlich bei einem der kommenden Calls der Förderprogramme des FFG eingereicht werden. Andere Möglichkeiten schließen Energieerzeuger und Netzbetreiber ein, die ein spezielles Interesse an Langzeiterfahrungen sowie Technologiewahl für kommende Anlagen haben. Erste Gespräche dazu sind in Anbahnung. Dabei ist es sehr erstrebenswert, nicht nur den Kurzschlussstrom, sondern die gesamte Kennlinie zu messen. Ein entsprechendes Gerät wurde AIT-intern zur Nutzung auch in diesem Projekt entwickelt, konnte letztlich aber (noch) nicht im Routinemess-betrieb eingesetzt werden. Die derzeit geplante Variante einer Umsetzung greift auf eine Hausinterne Entwicklung des AIT zurück, die höchst wahrscheinlich im Herbst 2012 einsatzbereit sein wird und elektronisch topologische Fehler der Prototypenversion verbessert. Die Messung wird dann an beiden Standorten synchron erfolgen. Dies wird noch genauere Abschätzungen des spektralen Einflusses auf den Ertrag ermöglichen.

6 Literaturverzeichnis:

Boyle, G. (2004), *Renewable Energy: Power for a sustainable future*, Second edition ed., 452 pp., Oxford University Press in association with The Open University, Milton Keynes, Oxford, United Kingdom.

Gottschalg, R., et al. (2005), The effect of spectral variations on the performance parameters of single and double junction amorphous silicon solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 85, 415-428.

Kenny, R. P., et al. (2006), Performance of thin film PV modules, *This solid films*, 511-512, 663-672.

Klucher, T. M. (1979), Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* 23(2), 111-114

Minemoto, T., et al. (2007a), Effect of spectral irradiance distribution on the outdoor performance of amorphous Si/thin-films crystalline Si stacked photovoltaic modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, 120-122.

Minemoto, T., et al. (2007b), Impact of spectral irradiance distribution and temperature on the outdoor performance of amorphous Si photovoltaic modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, 919-923.

Rennhofer, M., Berger, K., Wagner, J., Leidl, R., Zamini, S., Laube, W., Baumgartner, D., Weihs, P. (2010), Impact of climatic induced spectral changes on thin film PV-module performance In: G.F. DE SANTI, H. OSSENBRINK, P. HELM, Proceedings: 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6-10 September 2010, Valencia, Spain; ISBN: 3-936338-26-4.

Rennhofer, M., Berger, K., Wagner, J., Leidl, R., Laube, W., Baumgartner, D., Weihs, P. (2012), Spektraler und topographischer Einfluss auf die Effizienz von Dünnschicht-photovoltaikmodulen. In: OTTI, Training Seminare Tagungen, Photovoltaische Solarenergie, 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie [27. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Bad Staffelstein, 27.-28. Februar 2012]

Santbergen, R., and R. J. C. van Zolingen (2008), The absorption factor of crystalline silicon PV cells: A numerical and experimental study, Solar Energy Materials and Solar Cells, 92, 432-444.

Wagner, J.E., Weihs, P., Rennhofer, M., Zamini, S., Brence, F., Fallent, G., Feitzinger, E. (2010), Einfluss von Sonnenspektrum und Klima auf die Performance von c-Si, a-Si und CdTe Modulen. In: OTTI, 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V., Regensburg; ISBN: 978-3-941785-23-6. [25. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 3.-5. März 2010].

Wagner, J.E., Laube, W., Rennhofer, M., Berger, K., Leidl, R., Baumgartner, D. and Weihs P.(2012), Ist der spektrale Einfluss in Ertragsprognosen zu berücksichtigen?. In: OTTI, Training Seminare Tagungen, Photovoltaische Solarenergie, , 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie [27th Symposium „Photovoltaische Solarenergie“, Bad Staffelstein, Germany (2012), Bad Staffelstein, 27.-28. Februar 2012].

Weihs, P., Wagner, J., Rennhofer, M., Zamini, S., Feitzinger, E., Laube, W., Baumgartner, D.j. (2011): Muss die spektrale Variabilität des solaren Spektrums in PV-Ertragsmodellen berücksichtigt werden?. In: OTTI, Training Seminare Tagungen, Photovoltaische Solarenergie, 496-501; ISBN: 978-3-941785-51-9.

IMPRESSUM

Verfasser

Universität für Bodenkultur, Institut für
Meteorologie
Peter Jordan Strasse 82, A-1190 Wien
Tel: 01 47654 5624
E-Mail: Philipp.weihs@boku.ac.at
Web: www.wau.boku.ac.at/met

AutorInnen

- Philipp Weihs, Jochen Wagner, Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur
- Markus Rennhofer, Austrian Institute of Technology
- Alexander Molodczak, Andreas Mursch-Radlgruber, Green Jobs Austria

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH