

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

28/08/2024

Projekttitlel:

Blendreduktion

**Materialmodifikationen zur Reduzierung der
Blendung von Photovoltaik-Modulen**

Projektnummer: 900217

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	XX. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/01/2023
Projektende	29/02/2024
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	14 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	TPPV Österreichische Technologieplattform Photovoltaik
AnsprechpartnerIn	Lukas Plessing
Postadresse	Mariahilferstrasse 37-39, 1060 Wien
Telefon	+43-681-20892144
Fax	
E-mail	l.plessing@tppv.at
Website	tppv.at

Blendreduktion

Materialmodifikationen zur Reduzierung der Blendung von Photovoltaik-Modulen

AutorInnen:

Rosa Pajkanovic

Lukas Plessing

Roman Trattnig

Wolfgang Nemitz

Jakob Zehndorfer

Christian Ulrich

Daniel Gutleiderer

Markus Feichtner

Luis Castillon

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung	6
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	17
5	Ausblick und Empfehlungen	18
6	Literaturverzeichnis	19
7	Anhang	19
8	Kontaktdaten	28

2 Einleitung

Aufgabenstellung

Die Blendwirkung von Photovoltaik (PV)-Modulen führt oft dazu, dass ökonomisch und energetisch sinnvolle PV Projekte nicht realisiert werden können.

Die aktuell eingesetzten Methoden zur Blendreduktion sind Antireflexionsschichten und zum Teil satinierte Gläser. Beide Methoden stoßen insbesondere bei flach einfallendem Licht an Ihre Grenzen. Dies führt insbesondere bei PV-Anlagen entlang von Infrastruktur- und anderen nutzungsnahen Anwendungen oftmals zu problematischen Blendsituationen, was zum Stopp der Projektentwicklung bzw. nachträglich manchmal zum Abbau der Anlagen führt.

In der Literatur sind unterschiedliche Wege beschrieben, um sich dem Thema Blendung durch Sonnenlichtreflexionen anzunähern. Neben Glanzmessungen und Vergleichen ist insbesondere die BRDF-Messung (Bidirectional Reflectance Distribution Function, Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion) und die Angabe von Leuchtdichten in verschiedenen Varianten anzutreffen. Allerdings ist uns keine einheitliche Beschreibung der Messung und Auswertung bekannt. Ebenso wenig gibt es eine einheitliche Darstellung und Bewertung.

Lösungsansätze zur gezielten (Weiter-)Entwicklung von Technologien, die geeignet sind, um die Blendwirkung von Solarmodulen zu reduzieren, wurden recherchiert und analysiert. Materialforschung und Entwicklung im Labor wurden durch digitale Technologien der Simulation und Modellierung sowie der Mess- und Prüftechnik unterstützt. Methodisch wurde ein „Open Innovation Prozess“ angewendet, um ein möglichst breites Spektrum an Ideen und Ansätzen zur Blendreduktion von PV-Modulen aus ganz unterschiedlichen Bereichen („out of the box“) zu gewinnen. Dieser Prozess wurde mit allen Partnern der Technologieplattform und internationalen Partnern durchgeführt.

Schwerpunkte des Projektes, verwendete Methoden und Aufbau der Arbeit

Projektziel 1: Konkret geht es um die Identifikation von Möglichkeiten zur raschen Optimierung des Blendverhaltens von PV-Modulen mit unterschiedlichen Frontmaterialien.

Folgende unterschiedliche Solarmodulaufbauten wurden analysiert:

- Leichte PV-Module mit GFK-Verbundmaterialien und Vorderseitenfolie.
- Doppelglasmodule mit Floatglas.
- PV-Module mit gezogenem (gewalztem) Solarglas auf der Vorderseite.

Projektziel 2: Erarbeitung einer Messvorschrift zur Bewertung von PV-Modulen aus blendtechnischer Sicht. Für die oftmals als blendfrei beworbenen PV-Module liegen einerseits keine technischen Daten zur Blendwirkung vor, es fehlt aber auch die Beschreibung (Norm bzw. Standard) einer geeigneten Messeinrichtung zur Beurteilung der Blendwirkung. Auf Basis der Erfahrungen in der Beurteilung der Blendwirkung wurde eine Vorschrift konzipiert, die erstmals einen qualitativen Vergleich der

Blendwirkung von Solarmodulen ermöglicht. Das Konzept einer Messvorschrift wird sowohl für Solarmodule als auch für Vorprodukte wie Solargläser und Einkapselungsfolien geeignete Bedingungen zur Messung festlegen. Dazu wurde eine Messrichtlinie erarbeitet. Dieses Ziel wurde erfolgreich erreicht.

Projektziel 3: Erstellen einer Übersicht über die verschiedenen im Rahmen der Sondierung untersuchten Ansätze zur Blendreduktion. Bewertet wurden die technologischen Ansätze in folgenden Kategorien:

- Potential zur Blendreduktion
- Technologische Reife, notwendiger Forschungs- und Entwicklungsaufwand
- Wirtschaftlichkeit und Kostensenkungspotenziale
- Synergien mit anderen Technologien für weitere Kostensenkungen durch höhere Wirkungsgrade und Langzeitstabilität.
- Ökologische Auswirkungen und Wiederverwertung.

Projektziel 4: Erstellung einer Entwicklungsroadmap für die vielversprechendsten Ansätze zur Blendreduktion von PV-Modulen. Die Roadmap soll als Ausgangspunkt für Folgeprojekte, aber auch für die Entwicklungsarbeit in den beteiligten Unternehmen gelten.

Einordnung in das Programm

Die Ergebnisse der Sondierung Blendreduktion sind nicht nur für PV-Module relevant, sondern auch für viele solarthermische Kollektoren. Die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und Festigung der Marktposition der beteiligten österreichischen Modulhersteller durch blendarme Module ist klares Ziel dieser Sondierung.

Durch die Ergebnisse der Sondierung leistet das Projekt auch einen Beitrag zur Verringerung der hohen technologischen und ökonomischen Risiken von Forschungs- und Technologieentwicklung, die vom Markt nicht abgedeckt werden und zur Vermeidung von „Stranded Assets“ bei zukünftigen Investitionsentscheidungen.

Beitrag zu den Nachhaltigkeitszielen (SDG): Die PV unterstützt die Nachhaltigkeitsziele durch die ökologische und ökonomische Bereitstellung von Energie. Die hier geplante Sondierung stärkt den Beitrag der Photovoltaik durch breit akzeptierte Integration in bestehende Strukturen. Die Blendreduktion ist ein wesentlicher Katalysator für eine schnellere Realisierung von PV-Projekten im verbauten Raum sowie bei Infrastruktureinrichtungen wie bspw. Bahnstrecken, Autobahnen und Flughäfen und trägt so direkt zu Ziel 7 "Bezahlbare und saubere Energie", Ziel 9 "Industrie, Innovation und Infrastruktur", Ziel 11 "Nachhaltige Städte und Gemeinden" und Ziel 13 "Maßnahmen zum Klimaschutz" bei.

3 Inhaltliche Darstellung

- **Analyse unterschiedlicher Ansätze zur Blendreduktion**

Wichtige Arbeitsschritte:

- Auswahl der Materialien für die Prototypen
- Übersicht über die Möglichkeiten zur Blendreduktion von PV-Modulen
- Bewertung der technischen Lösungen und Ansätze
- Entwicklungspläne, Materialanalysen, Simulation und Optimierung
- Workshop zum Start des „Open Innovation Prozesses“

Aufbauend auf den Überlegungen im Rahmen der Projektplanung und den Ergebnissen des Kick-Off Meetings wurde mit den Modulherstellern diskutiert, welche Materialien und Muster in einer ersten Runde gefertigt und evaluiert werden. Die erzeugten Muster wurden vermessen und ausgewertet. Die gewonnenen Erfahrungen und Ergebnisse flossen in die „Bewertung der technischen Lösungen und Ansätze“ ein und dienten gemeinsam mit dem Open Innovation Workshop und intensiver Recherche als Grundlage für die Auswahl der Materialien für die Prototypen. Laufend wurden die Zwischenergebnisse gesammelt und für die weiteren Arbeiten aufbereitet. Zusammenfassend wurde eine Übersicht über die Möglichkeiten zur Blendreduktion von PV-Modulen erstellt. Ein Höhepunkt des Arbeitspaketes war der Open Innovation Workshop.

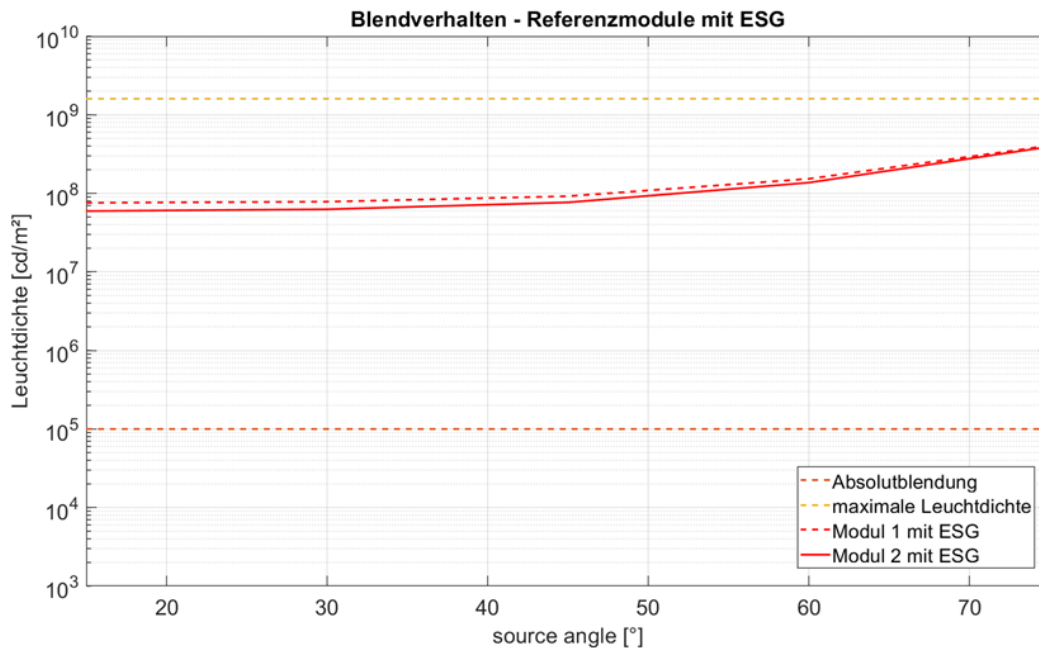


Abbildung 2.2.1: Referenzmodule mit unbehandeltem ESG als Deckschicht.

Zur Einordnung der Blendeigenschaften der unterschiedlichen Solarglasmuster und Folienmuster wurde zunächst unbehandeltes Einscheibensicherheitsglas vermessen. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.2.1 dargestellt. Diese Richtwerte lieferten die Grundlage für die Bewertung der in weiterer Folge vermessenen Muster.

Intensive Recherche und Beiträge im Rahmen des Open Innovation Workshops haben zur Erweiterung des technologischen Kanons beigetragen. Zunächst wurden in 2 Gruppen Ideen gesammelt:

Analyse unterschiedlicher Ansätze zur Blendreduktion durch den Open Innovation Workshop

<p>Gruppe 1</p> <p>1. Glas Strukturierung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Chemisch - Laserbehandlung <p>2. Glasbeschichtung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sol-Gel Varianten, graded index, Nano-Particles - Lack (graded index) - NIL (photonic-, plasmonic structures) <p>3. Folie:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lamination über Adhesive - Polymerschichten auftragen <p>4. Diverse:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Up- und Down-Conversion - Nachträgliches Auftragen auf Module oder Solarglas (Retrofitting?) 	<p>Gruppe 2</p> <p>1. Wechselbare Beschichtungen</p> <p>2. Glasstruktur:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sol-Gel - Wellenförmige Prismen - Lebende Antireflexschicht (Bakterien) - Kooperation mit Photonics <p>3. UV-beständige anorganische „Polymere“ (Sol-Gel)</p> <p>4. Faltmodule:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Feste und flexible Faltung - Tracker zur Blendungsvermeidung <p>5. Glasfaser aufkleben:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erzeugung einer „rauen“ Oberfläche mit optimaler Lichteinkopplung 	<p>Fazit</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Reflexion an optischen Grenzflächen minimieren 2. Fließender optischer Übergang als ideales Ziel 3. Bewertung der Technologien in vier Ansätzen zur Minimierung der Reflexion und Blendung
--	--	---

Abbildung 1: Ideenübersicht

Aus diesen Ideen wurden jeweils zwei vielversprechende Ansätze ausgewählt. Für diese wurden im Rahmen des Workshops Ideenkonzepte und Steckbriefe formuliert, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden:

Ansätze, wichtige Zutaten und Konzepte

	<p>Entwicklung organischer Schichten:- Hohe Flexibilität, zusätzliche Funktionalisierung, Strukturierung, Additive (DYES, Up-Down-Conversionparticles), Nanopartikel (Lichstreuung), Beschichtung verbauter Module</p>		<p>Entwicklung einer Sol-Gel Beschichtung: Anorganische Beschichtung, Index-Grading, Anti-Soiling, Kratzfestigkeit, Nanopartikel (Lichstreuung)</p>
	<p>Bedruckte PET-Folie mit strukturierter Oberfläche: „Blendfreie Verkapselungsfolie“ für flexible Solarmodule, Ermöglicht ETFE-freie flexible Solarmodule</p>		<p>Leuchtturmprojekt: Blendarmes PV Modul, vertikaler Einsatz, skalierbar durch vorhandene Technologien (Z.B. Photonics)</p>

Abbildung 2: Ausgewählte und verfeinerte Ideen

Reflexion erfolgt an optischen Grenzflächen, daher wäre die ideale „Moduloberfläche“ eine solche, die einen fließenden optischen Übergang aus der Luft in das Vorderseitenmaterial realisiert. Verschiedene Ansätze versuchen die Moduloberflächen an dieses Ideal anzunähern. Die Ergebnisse des Open Innovation Workshops fließen ebenfalls in die Beurteilung und der unterschiedlichen Technologien ein. Diese lassen sich in vier Ansätze zur Minimierung der Reflexion und somit der Blendung durch PV-Module einteilen.

1. **AR-Beschichtungen:** Reflexionsminderung durch transparente Interferenzschichten ist eine in der Optik weit verbreitete Methode zur Entspiegelung von Gläsern. Die Methode wird auch bei PV-Modulen zur besseren Lichteinkopplung und somit zur Leistungssteigerung verwendet. Standardmodule mit AR-beschichtetem Solarglas erreichen gute Ergebnisse bei sehr steilen Einfallswinkeln. Die einzelnen Interferenzschichten haben eine optische Dicke der halben Wellenlänge oder eines Viertels der Wellenlänge, was, je nachdem ob ein Übergang zu höherem oder niedrigerem Brechungsindex vorliegt, zu Auslöschung oder Verdopplung der Intensität führt. Die gängigen AR-Beschichtungen sind daher, wellenlängen- und stark winkelabhängig. Einfache AR-Schichten werden etwa bei Fenstergläsern zur Reduktion des Wärmeeintrags, zur Minderung der Wärmestrahlung nach außen und zur Entspiegelung eingesetzt. Sehr komplexe Multi-Schichtaufbauten können sowohl die Winkel- als auch die Wellenlängenabhängigkeit stark reduzieren, sie werden bei hochwertigen optischen Instrumenten eingesetzt. Die einzelnen optischen Schichten werden in Vakuumanlagen abgeschieden. Sie haben Potential zu effektiver Blendreduktion über weite Winkelbereiche. Aufgrund der hohen Kosten und Prozessdauer beim Auftrag einer Vielzahl an Schichten ist die aktuelle Technologie nicht zur Blendreduktion von PV-Modulen geeignet.
2. **Makroskopische Strukturierung** der Oberfläche ermöglicht eine Verteilung des reflektierten Lichtes über einen weiteren Winkelbereich, wodurch nur ein Teil des einfallenden Lichtes in Richtung des Betrachters reflektiert wird. Hier wird ein fließender Materialübergang makroskopisch realisiert, bei flach einfallendem Licht wird die Reflexion an „rauen“ Oberflächen durch einen effektiv reduzierten Einfallswinkel deutlich herabgesetzt. Satinierte Gläser und andere strukturierte Gläser erreichen zum Teil sehr gute Entblendung und gelten unter den etablierten Technologien als wirkungsvollste Lösung zur Blendreduktion. Allerdings sind die Eigenschaften unterschiedlicher Produkte keineswegs vergleichbar und lassen sich durch visuelle Inspektion kaum quantitativ beurteilen. Ohne genaue Messdaten ist keine Aussage über die Blendwirkung matter/satinierter PV-Glas-Oberflächen möglich. Relativ hohe Kosten der Oberflächenbehandlung schränken den praktischen Einsatz bei den meist ökonomisch optimierten PV-Anlagen stark ein. Hinreichend kostengünstige und effektive Technologien zur Oberflächenbehandlung könnten eine Tür zur Verbreitung blendarmer PV-Module öffnen.
3. **Mikroskopische Strukturierung** der Oberfläche eröffnet vielfältige Möglichkeiten über die „einfache“, lineare Optik hinaus. Sie bieten das Potential dem Ideal eines fließenden optischen Übergangs sehr nahe zu kommen. Als Nebenprodukt sind faszinierende optische Effekte und neue gestalterische Möglichkeiten durch gezielte Oberflächenstrukturen im Bereich der Lichtwellenlänge

und darunter möglich. Die gängigen Vorbilder dazu stammen aus der Natur wie etwa der Mottenaugeneffekt oder der bunte Morphofalter. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes konnte eine beeindruckende Struktur dieser Art vermessen werden. Allerdings muss die Lebensdauer und Kosteneffizienz erst bewiesen werden. Der weite Bereich der Nanostrukturen bildet ein vielversprechendes Forschungsfeld mit Anwendungsbereichen weit über die Photovoltaik hinaus.

4. **Up- und Down-Converter:** Spezielle photoaktive Materialien sind in der Lage aus einem kurzwelligem Photon zwei langwelligere Photonen zu generieren (Down-Conversion) oder aus zwei langwelligem Photonen ein kurzwelliges Photon zu generieren (Up-Conversion). Beide Effekte haben das Potential, Solarzellen deutlich effektiver zu machen und werden in der Zellforschung bereits umgesetzt^{[2],[3],[4]}. Effektive Down-Converter reduzieren den gefährlichen kurzwelligem Lichtanteil (UV-Bereich) und können auch bei der Blendreduktion eingesetzt werden. Der Doppelnutzen Blendreduktion und Leistungssteigerung eröffnet ein faszinierendes Entwicklungsfeld.

In der industriellen Praxis wurden unterschiedliche Beschichtungsverfahren entwickelt und für die gewünschten Anwendungen optimiert. Dieses weite Spektrum an Technologien bildet gemeinsam mit den unterschiedlichen Materialien den Ausgangspunkt für die Verfeinerung und Realisierung optimierter kosteneffizienter Lösungen. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Ansätze und die wesentlichen Eigenschaften, Vor- und Nachteile sowie technologische Reife und ökologische Risiken aufgelistet. Die Tabelle wurde im Rahmen der Sondierung erstellt, laufend ergänzt und erweitert:

	Methode	Beispiele	Potential zur Blendreduktion	Reife/Aussicht	Preis	Synergien	Ökologie und Wiederverwertung	Bemerkungen
Beschichtung	Einfache AR-Beschichtung Glatte Beschichtung	Zahlreiche Standard Module	Unzureichend	Standard	günstig	Neutral im Vergleich zum Standard /Modulleistungssteigerung gegenüber unbeschichteten Gläsern	keine Einschränkungen	Die grosse Mehrheit der PV-Module ist mit einem AR-beschichteten Frontglas ausgestattet. Die reflektierte Lichtstärke liegt meist bei allen Einfallswinkeln über 100.000cd/m²
	Mehrfachbeschichtung Glatte Beschichtung	Optische Bauteile	Keine Streuung, daher auch bei geringer Reflexion relativ hohe Leuchtlichkeiten	Nicht für großflächige Anwendungen entwickelt	sehr teuer	Modulleistungssteigerung	keine Einschränkungen zu erwarten	Der vielschichtige Aufbau und die geringen Toleranzen für die Schichtdicken stehen einer kommerziellen Nutzung für großflächige Anwendungen im Wege
Beschichtung, strukturiert gedruckt	Strukturierte AR-Beschichtung	Deflect	Starke Reduktion der Blendwirkung	In Verwendung	Akzeptable Zusatzkosten	Neutral, Leistungssteigerungen bei diffusen Licht und großen Einfallswinkeln zu prüfen	keine Einschränkungen	-
	Nanostruktur nach Bionischen Vorlagen	Phytonics	Sehr stark, reflektierte Leuchtlichte: deutlich unter 100.000cd/m²	Prototypen im Einsatz, Langzeitverhalten ist zu prüfen	Zusatzkosten relativ hoch, im Anbetracht der Performance akzeptabel	Leistungssteigerung wird erwartet, Puldoormessungen müssen erst erfolgen	Material unbekannt	Außerordentlich starke Reduktion der reflektierten Leuchtlichte. Pilotprojekte in Planung
	Mico und Nanostrukturierte Beschichtungen	-	Großes Potential	In Entwicklung	Abhängig von Struktur Material Und Verfahren	Leistungssteigerungen bei diffusen Licht und großen Einfallswinkeln	Materialabhängig	Forschung und Entwicklung im Rahmen von Folgeprojekten geplant
Oberflächenbearbeitung	Wälzgläser können direkt im Produktionsprozess Strukturen eingepress werden	Ertek	Deutliche Reduktion der Blendwirkung möglich, Abhängig von der gewählten Struktur	Im Einsatz bewährt	Bei hohem Durchsatz geringe Mehrkosten möglich	Module unterscheiden sich von der Masse	keine Einschränkungen	Keine signifikanten Leistungsverluste
	Sattinierte Gläser	Mehere Moduhersteller verwendende sattinierte Gläser	Deutliche Reduktion der Blendwirkung möglich.	Im Einsatz bewährt	deutliche Mehrkosten	Typisch mattes Erscheinungsbild	keine Einschränkungen	Blendwirkung sollte geprüft werden, Leistungsrisiken möglich, Verschmutzung und Fächte ändert die Eigenschaften
	Einpresen von Strukturen in Folien	DAS	Reduktion der Blendwirkung	Im Einsatz bewährt	gering	Wiedererkennungsmerkmal	ETFE zählt zur Produktgruppe der PFAS	An der entwicklung geeigneter PFA-freier Folien und Beschichtungen wird geforscht
	Folienoberfläche mattiert	DAS	Starke Reduktion der Blendwirkung	Im Einsatz bewährt	gering	Wiedererkennungsmerkmal	Manche FoETFE zählt zur Produktgruppe der PFAS	An der entwicklung geeigneter PFA-freier Folien und Beschichtungen wird geforscht

Abbildung 2.2.2: Übersichtstabelle zu den Methoden und Technologien zur Blendreduktion

[1] Benjamin Fritz: Bioreplicated Light-Harvesting Layers for Photovoltaics

<https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000147774>

[2] Abinaya Mayavan, Comprehensive Review on Downconversion/Downshifting Silicate-Based Phosphors for Solar Cell Applications, DOI: 10.1021/acsomega.3c08806

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38645325/>

[3] Ram Datt et al, Downconversion Materials for Perovskite Solar Cells

<https://doi.org/10.1002/solr.202200266>

[4] Aline M., Photon Converters for Photovoltaics

<https://hal.science/hal-02341164/document>

- **Prototypenfertigung**

Wichtige Arbeitsschritte:

- Bestellung der Materialien
- Modulprototypen und Produktmuster
- Musterfertigung und Beschaffung
- Prototypenfertigung

Im Rahmen der Prototypenfertigung wurden Materialien beschafft, um Produktmuster und Proben herzustellen und verschiedene Technologien zur Blendreduktion zu bewerten. Die Prototypen wurden anhand von Messungen und Erfahrungen bei der Herstellung bewertet. Alle Muster und Proben wurden einer gründlichen visuellen Inspektion und Messungen unterzogen, um ihre Blendwirkung zu bewerten. Gemäß der Messvorschrift zur qualitativen Vergleichbarkeit der Blendwirkung, die im Rahmen des Projektes formuliert wurde, konnten die Muster beurteilt werden

Material: (Glas,Folie) ▾	Glastyp ▾	Glasoberfläche ▾	Bemerkungen ▾	Proben-Nr / Name ▾
ETFE50µm	Folie	Glatt, gepresst, Negative Abdruck in Moduloberfläche	Alte Modul Produktion	1 Glas Wträger
ETFE50µm matt	Folie	Matt, gepresst, negative Abdruck in Moduloberfläche	Alte Modul Produktion	2 Glas Wträger
ETFE50µm	Folie	Glatt, gepresst, Negative Abdruck in Moduloberfläche	PTFEMembran Struktur 9004	3 Glas Wträger
ETFE50µm matt	Folie	Matt, gepresst, negative Abdruck in Moduloberfläche	PTFEMembran Struktur 9004	4 Glas Wträger
ETFE50µm	Folie	Glatt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	PTFEGitter Typ G Ty 0.66	5 GWT gep PTF
ETFE50µm matt	Folie	Matt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	PTFEGitter Typ G Ty 0.66	6 GWT gep PTF
ETFE50µm	Folie	Glatt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	PTFEGitter Strukture Kombi	7 GWT gep PTF
ETFE50µm matt	Folie	Matt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	PTFEGitter Struktur kombi	8 GWT gep PTF
ETFE50µm	Folie	Glatt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	PTFEGitterTyp A 0.70	9 GWT gep PTF
ETFE50µm matt	Folie	Matt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	PTFEGitter Typ A 0.70	10 GWT gep PTF
ETFE50µm	Folie	Glatt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	PTFEGitter H.11-0040	11 GWT gep PTF
ETFE50µm	Folie	Glatt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	PTFEGitter Typ A Ty 0.66	12 GWT gep PTF
ETFE50µm matt	Folie	Glatt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	Standard Produktion	13 CW Träger
ETFE50µm	Folie	Glatt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	Standard produktion	14 CW Träger
ETFE50µm matt	Folie	Matt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	Färbiges Modul	39 CWT blackred matt
ETFE50µm matt	Folie	Matt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	Färbiges Modul	40 CWT green matt
ETFE50µm	Folie	Glatt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	Färbiges Modul	41 CWT beige clear
ETFE50µm	Folie	Glatt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	Färbiges Modul	42 CWT grey clear
ETFE50µm	Folie	Glatt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	Färbiges Modul	43 CWT black clear
ETFE50µm matt	Folie	Matt, gepresst, Positiv Abdruck in Moduloberfläche	Färbiges Modul	44 CWT blau matt
Gas	Walzglas	gewalzt strukturiert		17 Ornament K
Gas	Walzglas	gewalzt strukturiert		19 Ornament S-O
Gas	Walzglas	gewalzt strukturiert		21 Ornament FR
Gas	Walzglas	gewalzt strukturiert		23 Ornament Prisma
Gas	Walzglas	gewalzt strukturiert	aktuell nicht erhältlich	25 Albarino S
Gas	Walzglas	gewalzt strukturiert	aktuell nicht erhältlich	27 Albarino P
Gas	Floatglas	glatt		29 ESG
Gas	Floatglas	sandstrahlen und ätzen / glatt		38 Lux Fine
Gas	Floatglas	sandstrahlen und ätzen / glatt		48 Reflo
Gas	Floatglas	chemisch oder sandgestrahlt / glatt		50 Satinato
Gas	Floatglas	angeblich Nanonbeschichtung/ähnlich Silikon		52 Phytomics
Gas	Floatglas	chemisch oder sandgestrahlt / glatt		30-50295
Gas	Floatglas	chemisch oder sandgestrahlt / glatt; Beschichtung innen	Solarglas sat. Light Grey	31-501446
Gas	Floatglas	AR-Schicht, strukturiert	Solarglas	32-Blendoptimiert
Gas	Floatglas	matt prismiert	Solarglas	33-501456
Gas	Floatglas	AR-Schicht	Solarglas (unstrukturiert)	34-50387

Abbildung 2.3.1: Übersichtstabelle der Proben und Muster

Im Folgenden werden die Aktivitäten der drei Modulhersteller beschrieben.

Sonnenkraft GmbH

Sonnenkraft Energy GmbH (vormals KIOTO) hat zur Erstevaluierung geeigneter Frontgläser für konventionelle Photovoltaikmodule (Glas-Folien Photovoltaikmodule) eine Auswahl an Solarglastypen untersucht. Dabei wurden Gläser mit unterschiedlichen Strukturierungen/Prismierungen und unterschiedlichen Antireflexschichten, welche mit unterschiedlichen Verfahren hergestellt wurden, verglichen. Hierfür gab es vor allem Austausch mit Glasherstellern aus Europa und Asien. In Asien sind primär der chinesische und der indische Markt von Interesse, da China einerseits die Spitzenposition in der Herstellung von Glas für die Photovoltaikindustrie innehat und Indien auf der anderen Seite eine immer stärkere Position in diesem Zusammenhang einnimmt.

Folgende Glastypen wurden den Forschungspartnern für Vermessungen zur Verfügung gestellt:

- Solarglas blendoptimiert Glas
- Alpin Glas (4mm Dick)
- ESG Solarglas matt prismiert
- TVG Glas satiniert
- Solarglas satiniert lightgrey

Zur Evaluierung des Einflusses der ausgewählten Glastypen auf die elektrischen Eigenschaften eines Photovoltaikmoduls wurden Funktionsmuster hergestellt, welche mittels Flasher elektrisch charakterisiert wurden.

Ertext Solar GmbH

Ertext Solartechnik ist auf die Produktion von maßgeschneiderten Modulen spezialisiert und konnte seine Erfahrungen bei der Prozessanpassung an verschiedene Modulgrößen einbringen.

Zwecks Bestimmung geeigneter Frontgläser, die im BIPV-Bereich eingesetzt werden können, wurden seitens ertext-solartechnik verschiedene Glastypen von frontseitig glatt bis strukturiert zur Verfügung gestellt. Dafür wurden 10 unterschiedliche Gläser bereitgestellt:

- 2x Ornament K klar
- 2x Ornament K mit Zelle
- 2x Ornament S-O klar
- 2x Ornament S-O mit Zelle
- 2x Ornament FR klar
- 2x Ornament FR mit Zelle
- 2x Ornament Prisma klar
- 2x Ornament Prisma mit Zelle
- 2x Albarino S klar
- 2x Albarino S mit Zelle
- 2x Albarino P klar
- 2x Albarino P mit Zelle
- 2x ESG klar
- 2x ESG mit Zelle

- 2x Satinato
- 2x Phytonics

Um eventuelle Einflussfaktoren der Photovoltaikzelle mit einfließen zu lassen wurden die Einzelscheiben der von ertex-solartechnik bereitgestellten Gläser zu PV-Elementen zusammengebaut. Die PV-Modulmuster wurden zu sogenannten Verbundsicherheitsgläsern zusammengebaut, wobei verschiedene Glasaufbauvarianten ausprobiert wurden.

Der grundsätzliche Aufbau der VSG PV-Elemente von außen nach innen ist folgender: gehärtetes eisenarmes Glas, 0,76 mm PVB-Folie, Zellnetz, 0,76 mm PVB-Folie und gehärtetes Glas. Die verschiedenen Varianten umfassen:

- Zellnetz silber / Zellnetz schwarz
- Siebdruck #1 / Siebdruck #2
- Emailierung auf #3
- Strukturierung immer nach außen

Alle Modultypen wurden elektrotechnisch vermessen, um die Leistung zu prüfen und evtl. Einflussfaktoren Betreff Blendverhalten bewerten zu können. Ein direkter Zusammenhang zwischen Blendreduktion und Leistung konnte nicht evaluiert werden, da bspw. die Leistung für 4mm ESG eisenarm bzw, 4mm Satinato eisenarm gleich auf ist. Die unterschiedlichen Leistungen ergeben sich durch die Glasdicke, Strukturierungen und dadurch, dass einige Sondergläser nicht eisenarm erhältlich sind.

DAS-Energy

Zur Herstellung von Mustern, entsprechend den Projektzielen und internen Anfragen, im geplanten Zeitrahmen wurden mehrere Muster einzelner Solarzellenlaminare angefertigt. Diese Muster unterscheiden sich in drei Aspekten: Oberflächenstruktur, Oberflächenbeschaffenheit und Modulfarbe. Die laminierten Muster wurden im A4-Format (21 x 29,7 cm) hergestellt. Alle Proben wurden mit den gleichen Laminierzeit-, Temperatur- und Druckparametern laminiert, die für leichte PV-Module von DAS Energy Standard sind.

Die leichten PV-Module von DAS Energy verwenden eine polymere Frontfolie anstelle von Glas wie bei typischen PV-Modulen. Bisher wurde Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE) mit einer Dicke von 50 Mikrometern verwendet. Aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften kann dieser Polymerfilm beim Pressen mit einer „negativen“ Struktur beim Laminieren geformt werden, um eine endgültige „positive“ Oberflächenstruktur zu erhalten. Bezüglich der Oberflächenstruktur der Probe wurden verschiedene Strukturen getestet: i) Pyramiden, ii) Halbkugel und iii) rechteckiges Prisma. Für das rechteckige Prisma wurden fünf verschiedene Varianten getestet.

Was die Oberflächenbeschaffenheit betrifft, kann die ETFE-Frontplatte bei gleicher Dicke entweder matt oder glänzend sein. Die Art der Oberfläche reflektiert das Licht auf unterschiedliche Weise und hängt von der vom Hersteller angegebenen (Mikro-)Struktur ab.

Abschließend wurden auch verschiedenfarbige Laminare getestet. Typischerweise sind Einkapselungsmaterialien für PV-Module transparent, um die Durchlässigkeit des einfallenden Lichts zur Solarzelle zu maximieren. Neu entwickelte farbige polyolefinische Vergussmaterialien wurden von der Lenzing Plastics AG entwickelt. Dieses neue Verkapselungsmaterial verfügt über sogenannte Interferenzpigmente, die sich von typischen organischen oder anorganischen Verkapselungsmaterialien

unterscheiden. Natürlich wird die Stromproduktion des PV-Moduls aufgrund der Absorption durch die Pigmente reduziert. Folgende Farben wurden getestet: „Schwarz-Rot“, „Blau“ und „Schwarz“. Es wurden auch andere Farben, „Beige“ und „Grau“, getestet, diese gehören jedoch zu einer anderen Folienart

- **Vermessung und Auswertung**

Wichtige Arbeitsschritte und Ergebnisse:

- Mustervermessung und Bewertung
- Vermessung und Auswertung von Modulen und Produktmustern
- Messvorschrift zur Beurteilung des Blendverhaltens von PV Modulen

Eine detaillierte Messvorschrift zur Beurteilung des Blendverhaltens von PV-Modulen wurde erarbeitet, die eine qualitative Vergleichbarkeit der Blendwirkung verschiedener Module und Produktmuster ermöglicht. Die Mustervermessung und Bewertung, sowie die Vermessung und Auswertung der Module und Produktmuster wurden durchgeführt, um die Effizienz und Blendwirkung der Prototypen zu bestimmen. Die Arbeitsschritte zur Vermessung und Auswertung wurden gemäß Plan abgeschlossen.

Messaufbau und Durchführung

Insgesamt konnten fast 50 Muster im Labor gemessen werden, wobei der Großteil als Modul und über 10 Muster sowohl als Modul als auch als reine Deckschicht und 5 Muster nur als Deckschicht vorlagen. Durch eine visuelle Inspektion konnten die Muster in verschiedene Kategorien eingeteilt werden: isotrope Reflexionen (Einfallswinkel entspricht Ausfallswinkel), anisotrope Reflexionen, spiegelnde Reflexionen und diffuse Reflexionen. Es hat sich durch die nachfolgenden Messungen gezeigt, dass diffuse Reflexionen, bei denen das auftreffende Licht in viele Winkel aufgeweitet wird, für eine Verminderung der Blendwirkung sorgen. Schon bei der visuellen Inspektion lässt sich daher beurteilen, ob ein Material oder eine Strukturierung der Deckschicht das grundlegende Potential hat, Blendung zu reduzieren. Durch die hohe Anzahl an Mustern in beiden Varianten war es möglich einen Messaufbau im Labor zu entwickeln, der eine Messung der isolierten Deckschicht möglich macht. Die Ergebnisse entsprechen den Messungen am laminierten Modul, so dass für eine Charakterisierung von Materialien der Laminierungsschritt entfallen kann (vgl. Abbildung 2.4.1). Bei diesem Messaufbau ist es notwendig, die Deckschicht optisch an die Rückseitenfolie anzubinden. Dafür kann z.B. Rapsöl verwendet werden. Die Methode wird auf der PVSEC 2024 in Wien präsentiert.

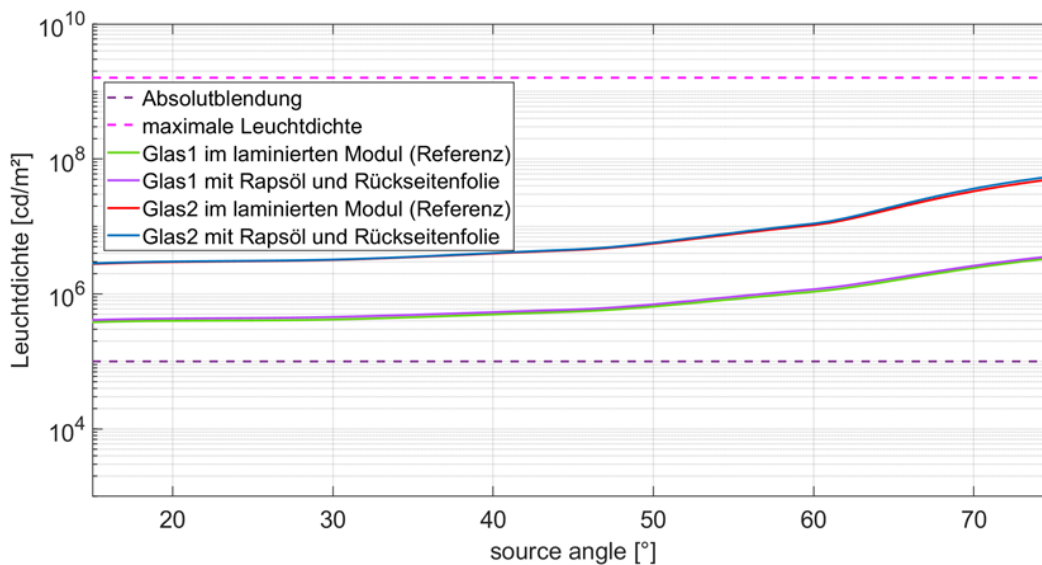


Abbildung 2.4.1: Vergleich der Messergebnisse an der isolierten Deckschicht mit dem laminierten Modul.

Im Labor wurden die Messungen mit dem Goniometer GON360 von Instrument Systems durchgeführt. Dabei wird das Muster mit Halogenlicht in einem einstellbaren Winkel beleuchtet und mit dem auf einen bestimmten Winkel eingestellten Detektorarm der reflektierte Anteil in diese Richtung gemessen. Durch eine Kalibration auf die Halogenlichtquelle lässt sich daraus die spektral aufgelöste Reflexion für dieses Winkelpaar bestimmen. Diese Reflexionsdaten werden in Leuchtdichte umgerechnet und für jeden Beleuchtungswinkel die maximal reflektierte Leuchtdichte bestimmt.

Da bei den Messungen im Labor eine Umrechnung der radiometrischen Messdaten, in die zur Beurteilung des Blendverhaltens photometrische Leuchtdichte notwendig war, wurden diverse Muster mit der Leuchtdichtekamera direkt im Sonnenlicht gemessen. Der Vorteil dieser Outdoor-Messung liegt darin, dass die Sonnenstrahlen (genau wie in der Realität) auf das Modul einfallen (und nicht eine künstliche Lichtquelle). Lichtspektrum, Lichtverteilung und Parallelität der Lichtstrahlen entsprechen daher dem realen Fall. Auch spezielle Effekte, wie anisotrope Reflexionen und Bündelverschiebung, lassen sich bei der Outdoor-Messung besser beobachten und messen als bei einachsigen Messsystemen und erlauben daher ein sicheres Auffinden des absoluten Maximums der reflektierten Leuchtdichte. Der Nachteil der Outdoormessung liegt in einem deutlich höheren Aufwand und in der geringeren Wiederholbarkeit im Vergleich zur Labormessung, da es sich um eine manuelle Messung handelt. Voraussetzung für die Outdoor-Messung ist die drehbare Lagerung des Musters, sodass unterschiedliche Winkel des Sonneneinfalls eingestellt werden können (ohne auf den natürlichen Verlauf der Sonne warten zu müssen). Der Sonnenwinkel wird mit einem Sonnenwinkelmesser festgestellt, der den Normalwinkel der Sonne auf die Oberfläche des Prüflings anzeigt. Für jeden Einfallswinkel (z.B. in 10° Schritten) wird so das Maximum der reflektierten Leuchtdichte gemessen. Ein Vergleich der beiden Messergebnisse ist in Abbildung 2.4.2 zu sehen. Die Kurven liegen weitgehend übereinander.

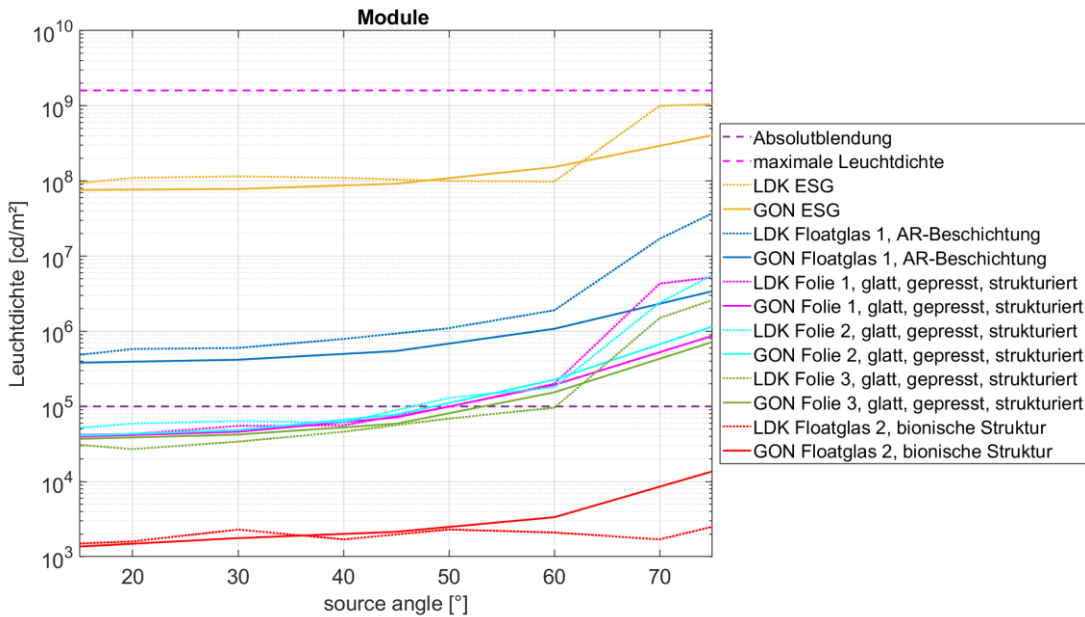


Abbildung 2.4.2: Vergleich der Messungen im Labor (,GON‘) und Outdoor (,LDK‘).

Beide Messaufbauten und die Berechnungsformeln wurden in einer allgemeinen Messrichtlinie zusammengefasst, die als Grundlage für Blendeeigenschaftsmessungen von PV-Modulen dienen soll. Von allen Modulherstellern wurden Module und Materialien gemessen, die oftmals im gesamten Bereich über der Grenze der Absolutblendung liegen. Die maximal auftretenden Leuchtdichten für jeden Quellwinkel sind in Abbildung 2.4.3 dargestellt. Man muss daher davon ausgehen, dass PV-Module, die nicht hinsichtlich des Blendverhaltens optimiert sind, so stark reflektieren, dass Personen im Bereich des direkt reflektierten Sonnenlichtes den Blick vom Modul abwenden oder die Augen schließen müssen.

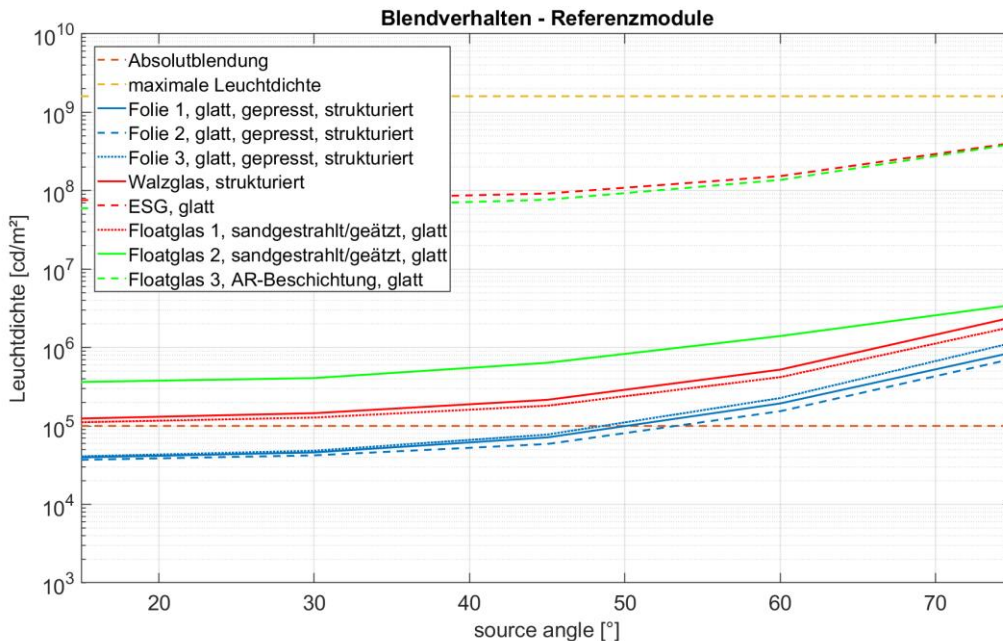


Abbildung 2.4.3: Blendverhalten der Referenzmuster der Modulhersteller

Bei der Erarbeitung der Messrichtlinie gab es zunächst einige Unklarheiten, die anhand von Messungen an verschiedenen Messnormalen sowohl im Labor als auch outdoor schlussendlich geklärt werden konnten.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Projektes wurden bei unterschiedliche Vorderseitenmaterialien für PV-Module, mit verschiedenen Strukturen, die Reflexionen gemessen, um refelxionsarme Module anfertigen zu können. Aus den Varianten mit den vielversprechendsten Ergebnissen wurden, wo es möglich und sachdienlich war, Modulmuster gefertigt, die wiederum gemessen wurden, um die vorherigen Ergebnisse zu bestätigen und Leistungsmessungen durchzuführen. Wie in Abbildung 2.4.4 zu erkennen, bleiben die maximalen Leuchtdichten für diese Module unter der Grenze der Absolutblendung, weswegen diese Module als blendarm bezeichnet werden können.

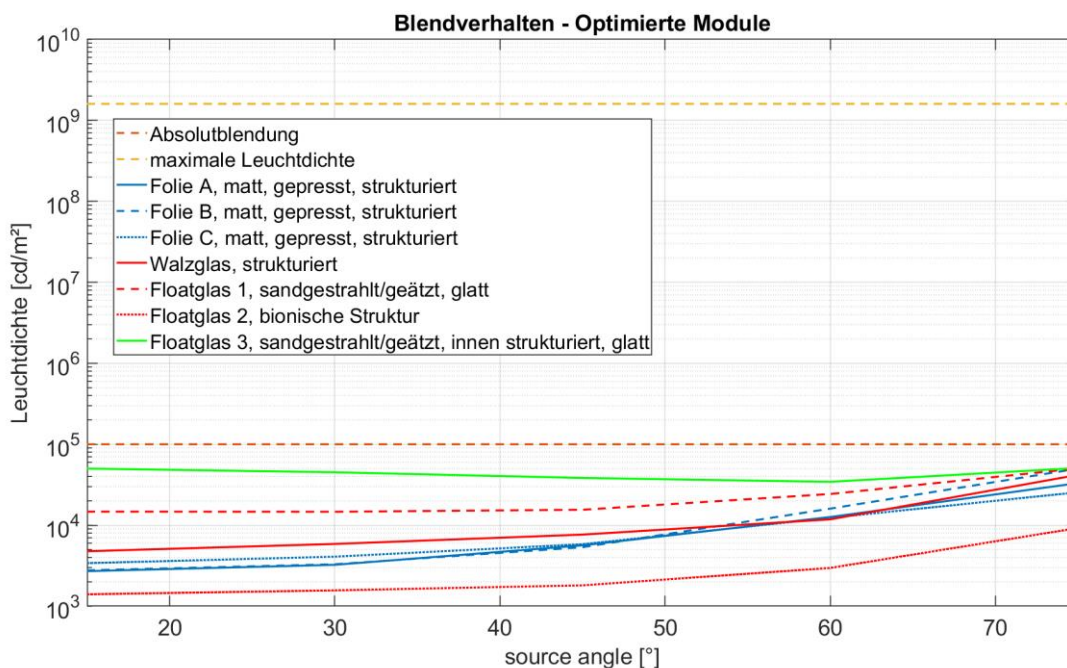


Abbildung 2.4.4: Blendverhalten der optimierten Module.

Es gab Abweichungen und neue Beurteilungen bei bestimmten Glassorten. Beispielsweise wurde bisher angenommen, dass Albarino-Gläser in Bezug auf die Blendreduktion sehr gut geeignet sind. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass diese nicht so optimal sind wie bisher angenommen und sich eher im messtechnischen Mittelfeld befinden. Gute Resultate zeigten etwa Satinato und das Lamberts Prisma Glas. Während dies für Satinato bereits im Vorfeld angenommen wurde, ist die Erkenntnis, dass das

Lambertsglas den Blendreduktionseigenschaften von Satinato fast ebenbürtig ist, neu. Die beste Beschichtung war jene von Phytonics, jedoch ist diese produktionstechnisch noch nicht ausgereift.

Dissemination und Verwertung

Das Projekt wurde bei der PVSEC 2023 in Lissabon vorgestellt und erste Ergebnisse präsentiert. Bei der PV und Speichertagung 2023 in Graz wurde ein Poster eingereicht und ein Beitrag zum Thema Blendung durch PV-Anlagen vorgetragen. Die Messvorschrift wird auf der Homepage der TPPV veröffentlicht und dient als Basis für die weitere Entwicklung von Richtlinien und Normen im Bereich der Blendung. Derzeit ist ein Fact-Sheet zum Thema Blendung in Vorbereitung, dieses wird ebenfalls auf der TPPV-Homepage abrufbar sein. Bei der PVSEC 24 in Wien wird ein Poster zur Lichtfalle präsentiert, ein weiteres zur Messvorschrift ist in Vorbereitung. Die Ergebnisse dienen den Projektpartnern als Grundlage für weitere Entwicklungsschritte und Forschungsvorhaben.

5 Ausblick und Empfehlungen

Da aktuell nur strukturierte Gläser ein sehr gutes Blendreduktionsverhalten aufweisen, besteht durchaus Weiterentwicklungsbedarf, da diese sehr kostenintensiv sind. Es wird laufend an bestimmten Beschichtungen, wie beispielsweise Phytonics oder speziellen Beschichtungen vom Fraunhofer-Institut, gearbeitet, die zwar aktuell in der Forschungs- und Entwicklungsphase sind, jedoch nach ersten Prognosen äußerst günstig auf das Glas aufzutragen sind. Voraussetzung dafür ist eine industrielle Produktion und eine Maschine, die es ermöglicht, Beschichtungen in größeren Mengen und gleicher Qualität aufzutragen. Ein solches Vorhaben wäre eventuell für die FFG als Blendreduktion II in Betracht zu ziehen.

Derzeit ist ein Fact-Sheet zum Thema Blendung in Vorbereitung, dieses wird ebenfalls auf der TPPV-Homepage abrufbar sein. Bei der PVSEC 24 in Wien wird ein Poster zur Lichtfalle präsentiert, ein weiteres zur Messvorschrift ist in Vorbereitung. Die Ergebnisse dienen den Projektpartnern als Grundlage für weitere Entwicklungsschritte und Forschungsvorhaben.

Die Projektpartner planen Folgeaktivitäten in folgenden Bereichen.

Alternative Materialien und Verfahren. Insbesondere für Vorderseitenfolien von PV-Modulen werden langlebige Materialkombinationen gesucht. Die Entwicklung neuer Bearbeitungsmethoden zur Oberflächenstrukturierung zum Beispiel mit Lasern sowie skalierbare und kosteneffiziente Beschichtungsverfahren zählen zu den zentralen Entwicklungsaufgaben.

Funktionelle Beschichtungen zur Verbesserung der Eigenschaften von PV-Modulen. Neben Reflexionsminderung werden dabei weitere Ziele wie Leistungssteigerung, Selbstreinigung (Anti soiling coatings), verringerte Schneeshaftung (Anti iceing coatings) parallel verfolgt.

Bionische Strukturen beziehungsweise Kombinationen von Mikro- und Nanostrukturen haben enormes Potential bewiesen. In diesem Bereich ist neben der Untersuchung geeigneter Strukturen, Feldtests verfügbarer Beschichtungen, und Entwicklung neuer Strukturen insbesondere im Bereich der Beschichtung und Produktionsverfahren großes Forschungs- und Entwicklungspotential offensichtlich.

Rahmenbedingungen: Es zeigt sich enormer Aufholbedarf bei der Vereinheitlichung der Bewertung und der rechtlichen Beurteilung des Blendverhaltens. Das trifft auf nationaler und internationaler Ebene gleichermaßen zu. Ein wichtiges Zwischenziel ist dabei die Vereinheitlichung der Beurteilung von Baumaterialien und der Richtlinien zur Blendung von Baumaterialien.

6 Literaturverzeichnis

[1] Benjamin Fritz: Bioreplicated Light-Harvesting Layers for Photovoltaics

<https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000147774>

[2] Abinaya Mayavan, Comprehensive Review on Downconversion/Downshifting Silicate-Based Phosphors for Solar Cell Applications, DOI: 10.1021/acsomega.3c08806

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38645325/>

[3] Ram Datt et al, Downconversion Materials for Perovskite Solar Cells

<https://doi.org/10.1002/solr.202200266>

[4] Aline M., Photon Converters for Photovoltaics

<https://hal.science/hal-02341164/document>

7 Anhang

Messrichtlinie

Anleitung zur Untersuchung der „Blendeigenschaften“ von künstlichen Oberflächen in der gebauten Umgebung.

Einleitung und Motivation

In der Literatur sind unterschiedliche Wege beschrieben um sich dem Thema Blendung durch Sonnenlichtreflexionen anzunähern. Neben Glanzmessungen und Vergleichen ist insbesondere die

BRDF-Messung (Bidirectional Reflectance Distribution Function, Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion) und die Angabe von Leuchtdichten in verschiedenen Varianten anzutreffen. Allerdings ist uns keine einheitliche Beschreibung der Messung und Auswertung bekannt. Ebenso wenig gibt es eine einheitliche Darstellung und Bewertung. Oftmals sind keine Daten für Baustoffe, Fenster, Fassadenelemente, Dachziegel oder Solarmodule zu finden, falls doch, sind diese nicht mit den Werten anderer Hersteller vergleichbar. Die folgende Beschreibung des Messvorgangs im Labor mittels Goniometer und unter freiem Himmel mittels Leuchtdichtekamera bildet die Grundlage für reproduzierbare und vergleichbare Messungen und den Ausgangspunkt zur Diskussion der Messmethoden und Bewertung hinsichtlich Blendwirkung. Ausgangspunkt für die vorliegende Richtlinie war die Diskussion um die Beurteilung der Blendwirkung von PV-Anlagen, daher standen bei den Messungen und Auswertungen insbesondere Vorderseitenmaterialien für PV-Module im Fokus. Die so gewonnenen Ergebnisse schaffen die Grundlage für den direkten Vergleich unterschiedlicher Materialien und die Bewertung von PV-Anlagen ohne weitere Modulmessungen.

Ziel dieses standardisierten Leitfadens zur Blendungsmessung ist es, ein umfassendes und wiederholbares Verfahren zur Bewertung der potenziellen Blendung durch künstliche Oberflächen und Baumaterialien wie Photovoltaik (PV)-Modulen oder PV-Deckgläsern unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen festzulegen. Das primäre Ziel ist es, die Sicherheit und den Komfort von Personen zu gewährleisten, die Sonnenlichtreflexionen ausgesetzt sind, indem Blendungsphänomene genau quantifiziert und analysiert werden. Das sekundäre Ziel besteht darin, den Herstellern von PV-Modulen und den Installateuren eine einfach zu reproduzierende Methode zur Bewertung des Blendungspotenzials zur Verfügung zu stellen.

- **Umfang:** Dieser Leitfaden enthält eine einfach zu befolgende Messanleitung, die es ermöglicht das Blendungspotenzial zu bewerten, das sich aus der Reflexion von Sonnenlicht auf PV-Modulen ergibt. Sie gilt für eine breite Palette von PV-Modultypen, einschließlich, aber nicht beschränkt auf monokristalline, polykristalline, Dünnschicht- und bifaziale Module. Zwei Messverfahren werden beschrieben; i) Labormessung mit Goniometer; ii) Freiluftmessung mit Leuchtdichtekamera.
- **Messbedingungen:** Der Leitfaden definiert ein Messverfahren für einen spezifischen, aber einfach reproduzierbaren Satz von Bedingungen, einschließlich Umgebung, Einfallswinkel, Erfassungswinkel, Anforderungen an die Lichtquelle sowie Anforderungen an einen Detektor.
- **Messparameter:** Der Leitfaden wird die Messung von Parametern wie Leuchtdichte, Beleuchtungsstärke, Spektraldaten und Blendungsindizes zur Quantifizierung und Charakterisierung von Blendung festlegen. Außerdem werden Faktoren wie zeitliche Schwankungen und die Auswirkungen von polarisiertem Licht behandelt.
- **Messprotokoll:** Die Richtlinie wird das Format und den Inhalt von Messberichten umreißen.
- **Dokumentation:** Grundlegende Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Grundlagen der Reflexion und Blendung messtechnische Sicht

Blendung bezeichnet eine durch zu hohe Lichtintensitäten ausgelöste visuelle Störung und eine damit einhergehende Verminderung der Sehleistung. Es wird zwischen Direktblendung, die bei Lichtquellen

mit zu hoher Leuchtdichte auftritt, und Reflexionsblendung, die durch Reflexionen auf Oberflächen entsteht, unterschieden. Zur Absolutblendung kommt es, wenn die Blendung durch so hohe Leuchtdichten erfolgt, dass die Anpassungsmöglichkeiten des menschlichen Auges überfordert sind. *Im Bereich von 10^4 bis $1,6 \cdot 10^5$ cd/m² reicht die Adaptation nicht mehr aus, und es kommt zu einer Absolutblendung, bei der mit einer zunehmenden direkten Gefährdung des Auges gerechnet werden muss¹.* Viele gängige Baustoffe überschreiten die untere Schwelle des Grenzbereiches². Als Grenzwert für Absolutblendung haben sich daher auch in der Österreichischen Rechts- und Guthaberpraxis 100.000 cd/m² etabliert. Zur Reflexionsblendung kommt es häufig bei Beleuchtung einer Glanzoberfläche von einer Lichtquelle außerhalb des Gesichtsfeldes. Die dadurch entstehenden Leuchtdichten überlagern die zu erkennenden Details auf oder hinter dieser Oberfläche teilweise oder ganz und reduzieren damit ihren *Kontrast*. Die Blendwirkung von PV-Modulen wird weitgehend durch Material und Oberfläche auf der Vorderseite des Moduls bestimmt, da der Aufbau der Module dafür sorgt, dass kaum Licht aus dem Modul zurückgestreut wird. Bei glatten Oberflächen gilt das Reflexionsgesetz, das besagt, dass der Ausfallswinkel dem Einfallswinkel entspricht, der reflektierte Lichtanteil steigt mit zunehmendem Winkel zunächst langsam an, ab 70° Quellwinkel (zur Normalen der Moduloberfläche) immer schneller und erreicht bei 90° (parallel zur Moduloberfläche) 100%. Daher ist es besonders wichtig die durch hohe Quellwinkel (flacher Lichteinfall) erzeugten Reflexionen besonders genau zu analysieren. Bei Proben, bei denen die Reflexionen durch die Oberflächenstruktur anisotrop sind, ist für jeden Quellwinkel der Messwinkel mit der maximalen Reflexion zu bestimmen, wobei zu beachten ist, dass dieser auch außerhalb der Messebene, die durch die Quellwinkel aufgespannt wird, liegen kann.

Als Quellwinkel werden folgende Winkel empfohlen, wobei 90° senkrechtem Einfall entspricht: 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80°. Für die Darstellung ist es notwendig, für jeden Quellwinkel die maximale Reflexion zu bestimmen und diese in Abhängigkeit des Quellwinkels als Leuchtdichte in [cd/m²] darzustellen. Dabei ist es möglich eine winkelabhängige Reflexionsmessung, eine BRDF-Messung (Bidirectional Reflectance Distribution Function) oder eine Leuchtdichtemessung durchzuführen. Jedenfalls ist eine geeignete, gerichtete Lichtquelle zu verwenden, die den sichtbaren Teil des Sonnenspektrums lückenlos emittiert. Sollte der Raumwinkel der Reflexion kleiner sein als der Raumwinkel des Messgerätes, was sich dadurch erkennen lässt, dass Fläche des Detektors nicht vollständig ausgeleuchtet ist, ist ein Messkegelkorrekturfaktor zu verwenden. Näheres dazu findet sich in den Beschreibungen der Messmethoden.

Die durch die Messung ermittelten winkelabhängigen Reflexionsdaten lassen sich ebenfalls als Grundlage für Simulation von Blendung für einen bestimmten Aufbau einer PV-Anlage und bestimmte Beobachterposition (Tagesverlauf/Jahresverlauf) verwenden.

Labormessung, Messaufbau und Methode

Der Vorteil der Messung im Labor liegt darin, dass immer unter den gleichen definierten Bedingungen gemessen werden kann und die Messungen somit reproduzierbare Messergebnisse liefern.

¹ SSK, Sitzung 205, 2006

² Methode zur Quantifizierung der Blendung durch Solaranlagen - Vergleich mit anderen Materialien der Gebäudehülle, Florian Rüscher et al.

Voraussetzung ist eine gerichtete Lichtquelle, die zumindest den sichtbaren Teil des Sonnenspektrums lückenlos emittiert. Ferner ist es notwendig, dass die zu messende Oberfläche ausschließlich von dieser Lichtquelle beleuchtet wird. Es ist zu verhindern, dass etwaiges Streulicht einer anderen Lichtquelle auf der Messoberfläche auftrifft. Vor der eigentlichen Messung der unterschiedlichen Quell- und Detektorwinkel ist eine Kalibrierung des Messsystems auf die verwendete Lichtquelle notwendig, um das Spektrum der verwendeten Lichtquelle herausrechnen zu können. Als Messgerät wird z.B. ein Gonioreflektometer oder eine Imaging Sphere benötigt. Die Messdaten lassen sich ebenfalls zur Simulation von Blendung für einen bestimmten Aufbau und eine bestimmte Beobachterposition (Tagesverlauf/Jahresverlauf) verwenden. Ein weiterer Vorteil liegt in der Automatisierung des Messvorgangs, die durch die Goniometerarme ermöglicht wird. Der Nachteil liegt darin, dass bei den meisten Messgeräten radiometrische Größen gemessen werden, welche erst durch aufwändige Umrechnungen in die für die Blendbewertung genutzte Leuchtdichte umgewandelt werden müssen.



Abbildung 3: Gonioreflektometer

Die gemessenen Reflexionswerte R_{mess} in Abhängigkeit der Wellenlänge λ , dem Beleuchtungswinkel ϑ_{in} und dem Messwinkel ϑ_{out} . liegen im Wertebereich zwischen 0 und 1: . Diese werden mit Hilfe des Sonnenspektrums mit der Luftmasse 1.5 (AM1.5G) in Bestrahlungsstärke E_{mess} umgerechnet:

$$E_{\text{mess}}(\lambda, \vartheta_{\text{in}}, \vartheta_{\text{out}}) = R_{\text{mess}}(\lambda, \vartheta_{\text{in}}, \vartheta_{\text{out}}) * AM15(\lambda) \quad [\text{W/m}^2]$$

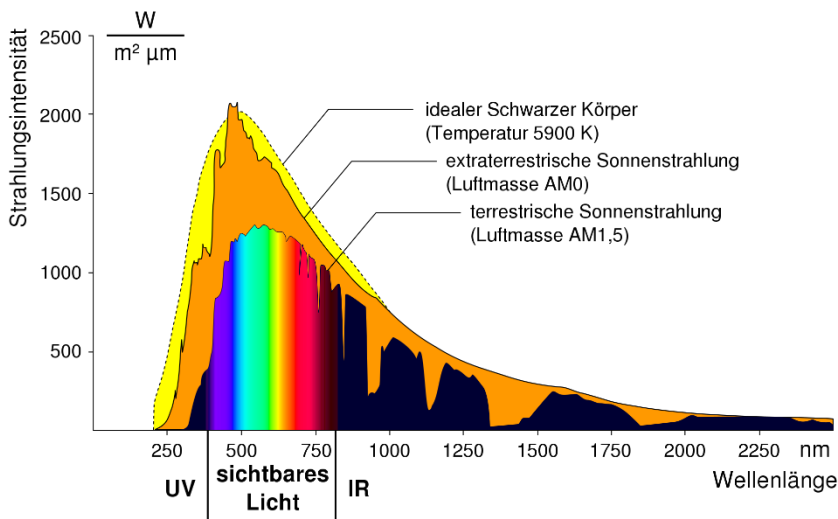


Abbildung 4: Sonnenspektren Quelle: Wikipedia

Somit ergeben sich Werte für die Bestrahlungsstärke, als ob die Messprobe von der Sonne beleuchtet wurde. Mit der Augenempfindlichkeitskurve für Tagsehen wird die Bestrahlungsstärke E_{mess} in die Beleuchtungsstärke E_{phot} umgerechnet:

$$E_{phot}(\vartheta_{in}, \vartheta_{out}) = K \cdot \int_{380nm}^{780nm} E_{mess}(\lambda, \vartheta_{in}, \vartheta_{out}) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad [lm/m^2] \quad \text{mit } K = 683 \text{ lm/W}$$

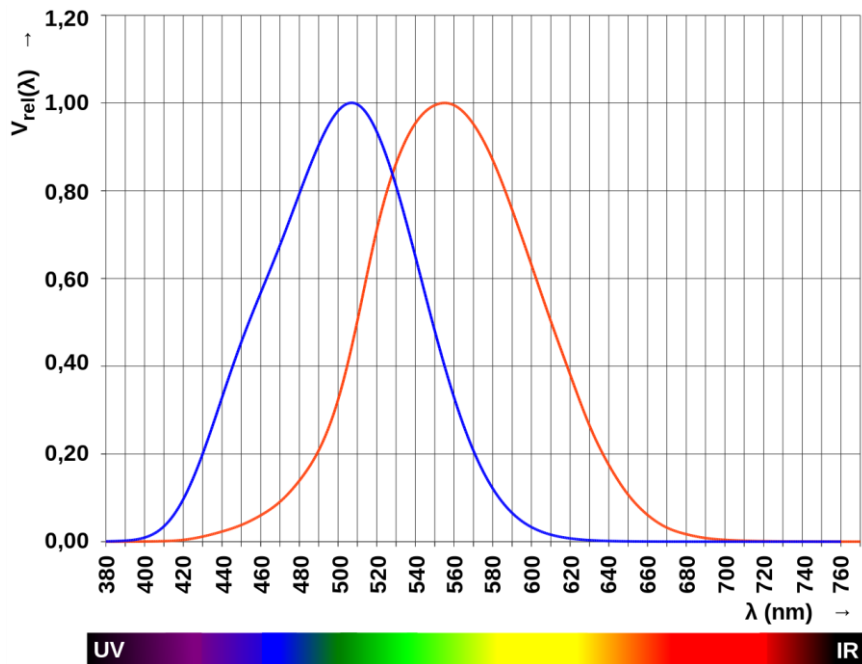


Abbildung 5: Normierte Augenempfindlichkeitskurve für Tagsehen (rot) und Nachtsehen (blau) Quelle: Wikipedia

Bei der Beleuchtungsstärke handelt es sich um eine photometrische Größe, die nur mehr vom Beleuchtungswinkel und dem Messwinkel abhängt. Die Beleuchtungsstärke wird für diffus reflektierende Oberflächen (Öffnungswinkel der Reflexion ist größer als der Raumwinkel des Messgerätes) mittels des Raumwinkels des Messgerätes Ω_{Mess} in Leuchtdichte L_{phot} umgerechnet:

$$L_{\text{phot}}(\vartheta_{\text{in}}, \vartheta_{\text{out}}) = \frac{E_{\text{phot}}(\vartheta_{\text{in}}, \vartheta_{\text{out}})}{\Omega_{\text{Mess}}} \quad [\text{cd/m}^2]$$

Für spekulär reflektierende Oberflächen (Öffnungswinkel der Reflexion ist kleiner als der Raumwinkel des Messgerätes) wird die Beleuchtungsstärke mittels des Raumwinkels der Sonne $\Omega_{\text{SUN}} = 6.8 \cdot 10^{-5}$ sr in Leuchtdichte L_{phot} umgerechnet:

$$L_{\text{phot}}(\vartheta_{\text{in}}, \vartheta_{\text{out}}) = \frac{E_{\text{phot}}(\vartheta_{\text{in}}, \vartheta_{\text{out}})}{\Omega_{\text{SUN}}} \quad [\text{cd/m}^2]$$

Für jeden Beleuchtungswinkel wird die maximale Leuchtdichte $L_{\text{phot}}(\vartheta_{\text{in}}) = \max(L_{\text{phot}}(\vartheta_{\text{in}}, \vartheta_{\text{out}}))$ [cd/m²] ermittelt.

Outdoormessung, Messaufbau und Methode

Der Vorteil der Outdoor Messung liegt darin, dass die Sonnenstrahlen (genau wie in der Realität) auf das Modul einfallen (und nicht eine künstliche Lichtquelle). Lichtspektrum, Lichtverteilung und Parallelität der Lichtstrahlen entsprechen daher dem realen Fall. Auch spezielle Effekte wie anisotrope Reflexionen und Bündelverschiebung lassen sich bei der Outdoor Messung besser beobachten und messen, als bei einachsigen Messsystemen und erlauben daher ein besseres Auffinden des absoluten Maximums der reflektierten Leuchtdichte. Darüber hinaus wird mit einem Leuchtdichte-Spotmeter gemessen, das direkt die Leuchtdichte (den relevanten Wert für Blendungen) anzeigt und somit nachträgliche Berechnungen weitgehend überflüssig macht. Der Nachteil der Outdoormessung liegt in einem deutlich höheren Aufwand und in der geringeren Wiederholbarkeit, als bei der Labormessung, da es sich um eine manuelle Messung handelt.

Voraussetzung für die Messung ist die drehbare Lagerung des Prüflings, sodass unterschiedliche Winkel des Sonneneinfalls eingestellt werden können (ohne auf den natürlichen Verlauf der Sonne warten zu müssen). Der Sonnenwinkel wird mit einem Sonnenwinkelmesser festgestellt, der den Normalwinkel der Sonne auf die Oberfläche des Prüflings anzeigt.

Da die Leuchtdichte der Reflexionen den Messbereich des Messgeräts übersteigen können, kann der Einsatz von ND-Filtern (Neutral Density = Graufiltern), notwendig werden. Die Filterfaktoren, die auf den ND-Filtern angegeben sind, weichen in der Regel von den tatsächlichen Werten stark ab, sodass diese vor der Messung zu kalibrieren sind.



Abbildung 6: Sonnenwinkelmesser

Der partielle Reflexionsfaktor ρ_p wird ermittelt, indem man die reflektierte Leuchtdichte L_{R-B} durch die einfallende Leuchtdichte L_{S-B} (der Sonne) dividiert. Für die Messung ist ein Leuchtdichte-Spotmeter mit kleinem Messkegel (z.B. 1° oder kleiner) zu verwenden, um das Maximum der Leuchtdichte erfassen zu können. Die folgende Formel für den partiellen Reflexionsfaktor beschreibt die Division der berechneten Leuchtdichtewerte von Sonne und Reflexion.

$$\rho_p = \frac{L_{R-B}}{L_{S-B}}$$

Da die Leuchtdichte der Sonne, wegen der atmosphärischen Absorption, vom Sonnenhöhenwinkel und der Luftfeuchtigkeit abhängt, ist die tatsächliche Sonneneinstrahlung zu erfassen. Dies wäre prinzipiell mit dem gleichen Leuchtdichte-Spotmeter möglich, mit dem auch die Reflexionen gemessen werden. Es besteht allerdings der Nachteil, dass das Spotmeter genau auf die Sonne zentriert werden muss, was bei kleinem Messkegel und der kleinen Sonnenscheibe, mit der Hand schwierig ist. Die extrem hohe Leuchtdichte der Sonne wird auch einen Filterwechsel erforderlich machen (z.B. ND Filter 40k). Einfacher ist es, ein Luxmeter mit einer Abschattung des sonstigen Halbraumes zu verwenden (eine Blende, die also nur das direkte Sonnenlicht E_{DNI} einfallen lässt und den restlichen Himmel ausblendet) und die Leuchtdichte aus der Beleuchtungsstärke, dividiert durch den Raumwinkel der Sonne ω_s , mit folgender Formel zu berechnen.

$$L_{S-B} = \frac{E_{DNI}}{\omega_s}$$

Für jeden Einfallswinkel (z.B. in 10° Schritten) wird nun das Maximum der reflektierten Leuchtdichte gemessen und daraus der partielle Reflexionsfaktor ermittelt. Die reflektierte Leuchtdichte ist gegebenenfalls mit dem Wert des verwendeten ND-Filters zu multiplizieren.

Bei Proben, die vorwiegend spiegelnd (also nicht diffus) reflektieren, ist das Messergebnis mit einem Messkegelkorrekturfaktor f_s zu multiplizieren. Dieser Korrekturfaktor ist der Kehrwert des Teils des Messkegels, der tatsächlich von der (kleineren) Sonnenscheibe bedeckt ist. Die folgende Formel beschreibt die Division der Raumwinkel von Messgerät ω_{MG} und Sonne ω_s .

$$f_s = \frac{\omega_{MG}}{\omega_s}$$

Berechnungen und Vergleichbarkeit der Ergebnisse

Wurde die maximale Leuchtdichte für jeden Beleuchtungswinkel ermittelt, lässt sich diese übersichtlich in einer Grafik darstellen. Auf der x-Achse sind die Beleuchtungswinkel (0° entspricht senkrechtem Lichteinfall) und auf der y-Achse das zugehörige Maximum der Leuchtdichte. Die maximale Leuchtdichte entspricht einer spiegelnden Oberfläche mit regulärer Reflexion. Der Wert entspricht der maximalen Leuchtdichte der Sonne auf der Erde (1.6 * 10⁹ cd/m²). Die Grenze der Absolutblendung ist mit 100000 cd/m² festgelegt. Somit lässt sich auf einen Blick erfassen, ob bzw. für welche Beleuchtungswinkel dieser Grenzwert überschritten wird. Abhängig von der Einbausituation lässt sich somit schnell einschätzen, ob es zu Blendungen durch die Module kommen kann.

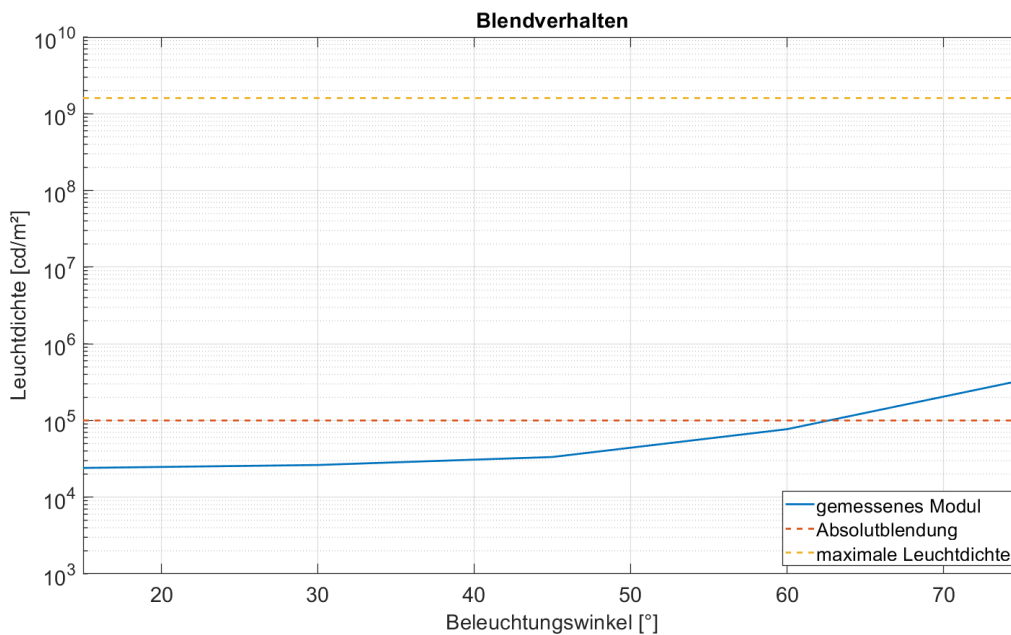


Abbildung 7: Leuchtdichteskala für Blendungsuntersuchungen, Modulummessung

Weitere Messmethode und Aufbauten (WN+)

Neben der Reflexionsmessung sind auch andere Messmethoden und Aufbauten denkbar. Beispielsweise ist es auch möglich, eine Leuchtdichtekameramessung im Raum durchzuführen. Es ist dafür zu gewährleisten, dass eine Lichtquelle mit kontinuierlichem Spektrum im sichtbaren Bereich verwendet wird und dass die Winkel exakt und reproduzierbar eingestellt werden können. Auch eine Imaging Sphere oder andere Messgeräte zur BRDF-Messung können verwendet werden. Die BRDF-Daten sind in Leuchtdichtedaten umzurechnen, um einen Vergleich zu ermöglichen.

Messprotokoll:

Das Messprotokoll zur Richtlinie für standardisierte Blendungsmessungen für Baustoffe und Fassadenelemente dient dem Zweck, eine einheitliche und nachvollziehbare Methode zur Bewertung der Blendwirkung von Oberflächen zu gewährleisten. Da Reflexionen potenziell störend oder sogar gefährlich für Anwohner, Verkehrsteilnehmer und Flugzeugpiloten sein können, ist eine genaue Messung und Bewertung der Blendwirkung unerlässlich.

Dieses Messprotokoll bietet klare Anweisungen zur Durchführung von Blendungsmessungen, definiert die zu verwendenden Messinstrumente und -parameter und stellt sicher, dass die Ergebnisse unter verschiedenen Bedingungen vergleichbar sind. Ziel ist es, mögliche Blendungsrisiken frühzeitig zu identifizieren und gegebenenfalls geeignete Maßnahmen zur Minderung der Blendwirkung zu empfehlen, um die Sicherheit und den Komfort für alle Betroffenen zu gewährleisten.

Im Kontext des Vorschungsprojektes Blendreduktion wurden PV-Module und Voerderseitenmaterialien (Fronsheets) für PV-Module untersucht. Beschreibung der Messprobe (Modul, Frontsheet, Solarglas, Baustoff): Folgende Informationen sind jedenfalls anzugeben:

- Foto der Probe
- Materialbeschreibung und Anwendung.
- Oberflächencharakterisierung und Beschreibung des Aufbaus, insbesondere Oberflächenbeschichtungen
- Beschreibung der erwartbaren optischen Eigenschaften, hier ist auch die Möglichkeit einer Anisotropie zu erörtern, diese ist bei der Messung gegebenenfalls zu berücksichtigen.
- Hersteller, Seriennummer falls vorhanden
- Speziell für Solarmodule:
 - Modultyp
 - Modulbeschreibung inklusive Aufbau der Modulvorderseite soweit bekannt und möglich.
 - Verkapselungsmaterial, Beschichtungen und Struktur der Oberfläche, inklusive optischer Beschreibung des Moduls sind wesentliche Aspekte der Dokumentation .

Beschreibung der Messmethode:

- Messmethode
- Messaufbau
- Messgeräte sind zu beschreiben und zu dokumentieren, Hersteller, Name und Seriennummer.

Darstellung der Messergebnisse

- Leuchtdichte bei unterschiedlichen Einfallswinkeln (10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°)
- Tabellarisch und graphisch
- Beschreibung unter welchen Bedingungen ist Absolutblendung (> 100.000cd/m² zu erwarten)
- Beschreibung der Blendwirkung bei reflexionsarmen Proben

-Dokumentation und Qualitätssicherung: Zu Dokumentations- und Prüfungszwecken werden Verfahren für die Aufzeichnung von Messdaten, Kalibrierungszertifikaten und Messberichten bereitgestellt. Die Richtlinien der Hersteller der Messgeräte sind jedenfalls zu beachten. Alle relevanten Daten und Zwischenergebnisse sind nachvollziehbar im Protokoll oder Messbrief festzuhalten.

Zusammenfassung: Werte (einfallswinkelabhängig) über 100.000cd/m² hervorheben. Relevanz bezüglich Richtlinien, rechtlichem Rahmen. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse kann eine Anwendungsempfehlung ausgesprochen werden. Dies kann auch die Bewertung von potenzieller Unbehaglichkeit und die Identifizierung kritischer Blendungszonen umfassen.

8 Kontaktdaten

Projektleitung: Lukas Plessing
TPPV Österreichische Technologieplattform Photovoltaik,
Mariahilferstrasse 37-39, 1060 Wien
Tel.: +43-681-20892144
Mail: l.plessing@tppv.at
Web: www.tppv.at

Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen Name / Institut oder Unternehmen

Wolfgang Nemitz: JOANNEUM RESEARCH
Roman Trattng: JOANNEUM RESEARCH
Jakob Zehndorfer: Zehndorfer Engineering GmbH
Luis Castillon DAS Energy Ltd.
Markus Feichtner Sonnenkraft GmbH
Christian Ulrich ertex solartechnik GmbH
Daniel Gutleiderer ertex solartechnik GmbH