



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 08.06.2026

CoSoG4PV

Zertifizierung von farbigem Solarglas für Photovoltaik-Module



Quelle: © Sunage 2023



INSTITUT FÜR
SOLARTECHNIK



Datum: 08.06.2026

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:innen:

OST-Ostschweizer Fachhochschule
Institut für Solartechnik, SPF
Oberseestr. 10
8640 Rapperswil SG
www.spf.ch

Autor:innen:

Vera Gütle, OST-SPF, vera.guetle@ost.ch
Mario Lehmann, OST-SPF, mario.lehmann@ost.ch
Ramon Mattle, OST-SPF, ramon.mattle@ost.ch
Stefan Brunold, ehemals OST-SPF

BFE-Projektbegleitung:

Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502531-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autor:innen dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Die Nachfrage nach farbigen Gläsern für Photovoltaik Module steigt stetig, insbesondere durch die Integration von Photovoltaik (PV) in der Fassade. Bis anhin fehlt eine Charakterisierungsmethode, die den Einfluss von farbigen Gläsern in einem PV-Modul auf dessen Leistungsfähigkeit quantifiziert. Das vom SPF eingeführte Prüfverfahren «SPF Zertifikat Solarglas», das den Glaswirkungsgrad von Solargläsern quantifiziert, hat sich in der Industrie als Qualitätsnachweis für Solargläser etabliert. Über den Glaswirkungsgrad wird der Einfluss des Glases, aufgrund dessen solarer Transmission, dessen winkelabhängiger Transmission sowie dessen Alterung durch Solarisation auf den Ertrag einer PV-Anlage bestimmt. Farbige Solargläser für die Photovoltaik können mit dem bestehenden Messverfahren jedoch nicht bewertet werden. Daher wurde im Projekt «CoSoG4PV» ein neuer Messaufbau entwickelt, um das bereits bestehende Prüfverfahren auf farbige Gläser zu erweitern.

Bei PV-Modulen ist das Solarglas optisch an die in EVA eingebettete Zelle gekoppelt. Dies stellt die Bestimmung der Leistung von Solargläsern vor eine Herausforderung. Denn bei direkt-hemisphärischen Transmissionsmessungen, z. B. mit einer Ulbricht-Kugel, treten Reflexionsverluste an der Vorder- und Rückseite des Glases auf. Bei PV-Modulen treten durch die optische Kopplung jedoch keine Reflexionsverluste an der Glasrückseite auf, was bei der Bestimmung des Transmissionsgrades berücksichtigt werden muss.

Mit dem im Projekt «CoSoG4PV» entwickelten Messaufbau wurde das Ziel verfolgt, die spektral-aufgelöste solare Transmission für den im PV-relevanten Wellenlängenbereich für verschiedene Einfallswinkel mit einem Fourier-Transform-Infrarot (FTIR)-Spektrometers zu bestimmen und hierdurch den Glaswirkungsgrad zu quantifizieren. Hierzu musste ein Messkonzept entwickelt werden, bei dem das weisse Licht des verwendeten FTIR-Spektrometers ausgekoppelt und in eine Optikeinheit geführt wird, die sich mit Hilfe eines Goniometers um die polare und azimutale Drehachse bewegen lässt. Zudem musste eine geeignete Kombination aus Strahlquerschnitt der weissen Lichtquelle und Detektor gefunden werden, womit die solare Transmission ohne Reflexionsverluste an der Rückseite gemessen werden kann. Ein Probenhalter musste konstruiert werden, der es ermöglicht, die Glasprobe mit wieder lösbarer Verbindung optisch an den Detektor zu koppeln.

Zur Validierung des Messaufbaus wurden klare Gläser mit bereits bekanntem Glaswirkungsgrad, quantifiziert nach dem «SPF Zertifikat Solarglas PV», gemessen und die Resultate verglichen. Aufgrund der guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass mit dem neuen Messaufbau der spektral aufgelöste solare Transmissionsgrad für variable Einfallswinkel gemessen werden kann.



Résumé

La demande en verres colorés destinés aux modules photovoltaïques ne cesse d'augmenter, notamment en raison de l'intégration du photovoltaïque (PV) dans les façades. Jusqu'à présent, il n'existait aucune méthode de caractérisation permettant de quantifier l'influence des verres colorés d'un module PV sur ses performances. La méthode d'essai « Certificat SPF pour le verre solaire », mise en place par le SPF et permettant de quantifier le rendement optique des verres solaires, s'est imposée dans l'industrie comme un gage de qualité pour ces verres. Le rendement optique permet de déterminer l'influence du verre sur le rendement d'une installation photovoltaïque, en fonction de sa transmission solaire, de sa transmission en fonction de l'angle d'incidence et de son vieillissement dû à la solarisation. Les verres solaires colorés destinés au photovoltaïque ne peuvent toutefois pas être évalués à l'aide de la méthode de mesure existante. C'est pourquoi un nouveau dispositif de mesure a été développé dans le cadre du projet « CoSoG4PV » afin d'étendre la méthode d'essai existante aux verres colorés.

Dans les modules photovoltaïques, le verre solaire est couplé optiquement à la cellule intégrée dans l'EVA. Cela complique la détermination des performances des verres solaires. En effet, lors de mesures de transmission hémisphérique directe, par exemple à l'aide d'une sphère d'Ulbricht, des pertes par réflexion se produisent à l'avant et à l'arrière du verre. Dans le cas des modules photovoltaïques, le couplage optique empêche toutefois l'apparition de pertes par réflexion au niveau de la face arrière du verre, ce qui doit être pris en compte lors de la détermination du degré de transmission.

Le dispositif de mesure développé dans le cadre du projet «CoSoG4PV» avait pour objectif de déterminer la transmission solaire à résolution spectrale dans la gamme de longueurs d'onde pertinente pour le photovoltaïque, pour différents angles d'incidence, à l'aide d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), et de quantifier ainsi le rendement du verre. Pour ce faire, il a fallu mettre au point un concept de mesure dans lequel la lumière blanche du spectromètre FTIR utilisé est découplée et acheminée vers un système optique pouvant être orienté autour des axes de rotation polaire et azimutal à l'aide d'un goniomètre. Il a également fallu trouver une combinaison appropriée entre la section transversale du faisceau de la source de lumière blanche et le détecteur, permettant de mesurer la transmission solaire sans pertes par réflexion à l'arrière. Un porte-échantillon a dû être conçu pour permettre de coupler optiquement l'échantillon de verre au détecteur via une connexion amovible. Pour valider le dispositif de mesure, des verres transparents dont le rendement était déjà connu, quantifié selon le «certificat SPF pour le verre solaire PV», ont été mesurés et les résultats comparés. Grâce à la bonne reproductibilité des résultats, il a été démontré que le nouveau dispositif de mesure permettait de mesurer le coefficient de transmission solaire à résolution spectrale pour des angles d'incidence variables.



Summary

Demand for coloured glass for photovoltaic modules is rising steadily, particularly due to the integration of photovoltaics (PV) into building façades. To date, there has been no characterisation method that quantifies the impact of coloured glass in a PV module on its performance. The 'SPF Solar Glass Certificate' testing procedure introduced by the SPF, which quantifies the glass efficiency of solar glass, has become established in the industry as a mark of quality for solar glass. Glass efficiency is used to determine the influence of the glass – based on its solar transmittance, its angle-dependent transmittance and its ageing due to solarisation – on the yield of a PV system. However, coloured solar glass for photovoltaics cannot be assessed using the existing measurement method. Consequently, a new measurement setup was developed as part of the 'CoSoG4PV' project to extend the existing test method to coloured glass.

In PV modules, the solar glass is optically coupled to the cell embedded in EVA. This poses a challenge when determining the performance of solar glass. This is because, during direct hemispherical transmission measurements – for example, using an integrating sphere – reflection losses occur at the front and rear surfaces of the glass. In PV modules, however, due to the optical coupling, no reflection losses occur at the rear surface of the glass, a factor that must be taken into account when determining the transmission coefficient.

The aim of the measurement setup developed in the 'CoSoG4PV' project was to determine the spectrally resolved solar transmission across the wavelength range relevant to PV for various angles of incidence using a Fourier-transform infrared (FTIR) spectrometer, and thereby to quantify the glass efficiency. To this end, a measurement concept had to be developed in which the white light from the FTIR spectrometer used is decoupled and directed into an optical unit that can be moved around the polar and azimuthal axes using a goniometer. In addition, a suitable combination of the beam cross-section of the white light source and the detector had to be identified, enabling solar transmission to be measured without reflection losses at the rear surface. A sample holder had to be designed that allows the glass sample to be optically coupled to the detector via a detachable connection. To validate the measurement setup, clear glass samples with a known glass efficiency – quantified according to the 'SPF Certificate for Solar Glass PV' – were measured and the results compared. Due to the good reproducibility of the results, it was demonstrated that the new measurement setup can be used to measure the spectrally resolved solar transmittance for variable angles of incidence.



«Take-home messages»

- Die Quantifizierung der Leistungsfähigkeit von Solargläsern hat in der Vergangenheit zur Qualitätsentwicklung von Solargläsern für den Einsatz in der Solarthermie und der Photovoltaik beigetragen. Eine vergleichbare Quantifizierung von farbigen Solargläsern birgt daher grosses Potential, um die Qualitätsentwicklung von farbigen Gläsern zu fördern und dem steigenden Markt an farbiger Photovoltaik gerecht zu werden.
- Der entwickelte Messaufbau ermöglicht es, den Transmissions- und Winkelfaktor von farbigen Solargläsern für Photovoltaik-Module zu quantifizieren. Hierzu wird ein Proben-glas optisch an den Detektor gekoppelt, um Reflexionsverluste an der Glasrückseite zu vermeiden und die spektralaufgelöste solare Transmission unter verschiedenen Einfallswinkel mittels FTIR-Spektrometrie zu messen.
- Die Validierung des Messaufbaus mittels klarer Gläser zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem bestehenden «SPF Zertifikat Solarglas PV». Die relativen Abweichungen für den Transmissionsfaktor liegen unter 1 %, und für den Winkelgewichtungsfaktor unter 0,3 %, was die Eignung des neuen Verfahrens für die Charakterisierung von Solargläsern bestätigt.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	10
1.1	Ausgangslage und Hintergrund	10
1.2	Leistungsfähigkeit von Solarglas	11
1.3	Glaswirkungsgrad	12
1.4	Farbige Solargläser	13
2	Motivation des Projektes.....	14
2.1	Projektziele	15
3	Vorgehen und Methode	16
3.1	Evaluation, Beschaffung und Inbetriebnahme des Detektors	16
3.2	Design und Bau der Lichtquelle	19
3.2.1	Teil 1: Die Lichtauskoppeleinheit.....	19
3.2.2	Teil 2: Die Optikeinheit	20
3.3	Design und Bau des Goniometers	22
4	Messmethode und Zertifizierung.....	24
4.1	Messablauf	24
4.2	Transmissionsfaktor.....	24
4.3	Winkelgewichtungsfaktor	25
4.4	Fotodegradationsfaktor	26
4.5	Messergebnisse.....	26
4.5.1	Einfach-Grenzflächenkorrigierte Transmission	26
4.5.2	Winkelgewichtungsfaktor.....	27
4.5.3	Messunsicherheit.....	30
4.6	Klassifizierung.....	33
5	Ergebnisse und Diskussion	33
6	Schlussfolgerungen und Fazit.....	35
7	Ausblick und zukünftige Umsetzung	35
8	Literaturverzeichnis.....	37
	Annex A: IAM Gewichtungsfaktoren	38



Abkürzungsverzeichnis

AM1.5	Solares Bezugsspektrum Luftmasse 1.5
AR	Antireflexionsbeschichtung
BIPV	Building-Integrated Photovoltaics (gebäudeintegrierte Photovoltaik)
EVA	Ethylen-Vinylacetat
FTIR	Fourier-Transformation-Infrarot
IAM	Winkelfaktor (Incidence Angle Modifier)
IQE	Internal Quantum Efficiency
LWL	Lichtwellenleiter
UV	Ultraviolett
c-Si	kristallines Silizium

Formelverzeichnis

F_{τ}	Transmissionsfaktor
F_{IAM}	Winkelgewichtungsfaktor
F_{UV}	Fotodegradationsfaktor
M	Messsignal
S	IAM Gewichtungsfaktor
k	Korrekturfunktion
η_{GL}	PV-Glaswirkungsgrad
θ	Polarwinkel
λ	Wellenlänge
φ	Azimutwinkel
τ	Transmission



Indizes

<i>FTIR</i>	Fourier-Transformation-Infrarot Spektrometer
<i>PV</i>	Photovoltaik
<i>Probe</i>	Glasprobe
<i>Ref</i>	Referenz
<i>cSi</i>	c-Si Gewichtung
<i>horz</i>	horizontal
<i>kor</i>	grenzflächenkorrigiert
<i>n</i>	Winkelposition
<i>vert</i>	vertikal



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

An ein Glas, das zur Abdeckung auf Solarkollektoren oder PV-Modulen zur Anwendung kommt, werden besondere Anforderungen gestellt. Zum einen muss es den thermischen und mechanischen Belastungen, denen es ausgesetzt ist, standhalten. Zum anderen soll eine Solaranlage möglichst viel Energie umwandeln, folglich muss die Strahlung der Sonne das Glas weitestgehend verlustfrei passieren können. Damit kommt der solaren Transmission des Glases eine entscheidende Rolle zu. Zuletzt hat die Glasabdeckung eine wichtige optische Komponente, beispielsweise kommen Oberflächenbehandlungen zum Einsatz, die Reflexionen oder Spiegeleffekte vermeiden sollen [1]. Letzteres wird durch den Einsatz von farbigen Gläsern, vor allem durch die steigende Nachfrage nach gebäudeintegrierter Photovoltaik, immer wichtiger.

Um Gläser quantifizieren zu können, die in Solaranlagen zum Einsatz kommen, wurde am SPF das Prüfverfahren «SPF Zertifikat Solarglas» entwickelt. Dieses wurde 2002 eingeführt und verbreitete sich in der Solarbranche weltweit rasch zu einem willkommenen Werkzeug zur Qualitätssicherung. Dieses zunächst nur für Gläser in solarthermischen Kollektoren entwickelte Zertifizierungsverfahren wurde 2012 im Rahmen des BFE Projektes SI/500614 (Solarglas PV - Zertifizierungsverfahren für Gläser im Einsatz in c-Si Fotovoltaikmodulen) auf Solargläser für PV-Module erweitert [2]. Bei dem «SPF Zertifikat Solarglas» handelt es sich um ein durch das SPF Institut für Solartechnik ausgestelltes Qualitäts-Zertifikat, in welchem ein Glas nach aktueller SPF Prüfvorschrift [3] gemessen wird und das Ergebnis unter SPF Testing Reports [4] veröffentlicht wird. Im Rahmen des Prüfverfahrens wird der Einfluss der 1) Lichttransmission durch das Moduldeckglas/Frontglas, 2) der licht-induzierten Degradation des Modulglases auf Grund von UV-Einstrahlung (Solarisation) sowie des Winkelfaktors (IAM – Incidence Angle Modifier) auf die Leistungsfähigkeit auf das gesamte PV-Modul in einem einzigen numerischen Faktor, dem Glaswirkungsgrad, zusammengefasst.

Mithilfe des Prüfverfahrens konnte die Qualität der Solargläser entscheidend verbessert werden. So verzichteten die Hersteller zunehmend auf stark strukturierte Gläser, deren Transmission typischerweise eine grössere Winkelabhängigkeit aufweist. UV-Absorber, wie Ceroxid, die dem Glas beigemischt werden, um die Laminierfolie des PV-Moduls vor UV-Strahlung zu schützen, die jedoch die Fotodegradation negativ beeinflussen, konnten identifiziert werden. Zudem wurde festgestellt, dass die getesteten Gläser zunehmend eisenärmer wurden [5]. Verunreinigungen wie Eisen, Kupfer und Nickel wirken sich negativ auf die Transmission im sichtbaren Bereich aus [6].

Die Erfahrungen aus dem Projekt «SPF Zertifikat Solarglas» zeigen, dass die Quantifizierung der Leistungsfähigkeit eines Solarglases, entscheidend zur Entwicklung und Qualitätssicherung von Gläsern beitragen kann. Mit dem aktuellen Messverfahren zur Quantifizierung von Solargläsern für den PV Einsatz können farbige Gläser jedoch nicht korrekt bewertet werden. Daher soll im Rahmen dieses Projektes ein neues Messverfahren zur Quantifizierung von farbigen Gläsern entwickelt werden, um der steigenden Nachfrage nach farbigen Solargläsern Rechnung zu tragen.



1.2 Leistungsfähigkeit von Solarglas

Die optische Leistungsfähigkeit von Solarglas für den Einsatz in solarthermischen Anlagen oder in Photovoltaik wird hauptsächlich durch drei Faktoren beeinflusst:

Die **solare Transmission für senkrechte Einstrahlung** ist der Anteil der einfallenden solaren Strahlung, welcher das Glas transmittiert und zur Wärme-bzw. Stromerzeugung genutzt werden kann. Brechungsindex und die chemische Zusammensetzung des Glases bestimmen im Wesentlichen die solare Transmission. Verunreinigungen bei der Glasherstellung wie zum Beispiel ein zu hoher Anteil an Eisenoxid, können die Transmission deutlich reduzieren. Sie sind mit dem Auge meist nicht sichtbar und sind bei normalen Gläsern teilweise erwünscht, wie zum Beispiel bei Fensterglas [2], [7].

Der **IAM (incident angle modifier, Winkelfaktor)** beschreibt den Einfluss der winkelabhängigen solaren Transmission. Er ist definiert als das Verhältnis der Transmission bei Einstrahlung unter einem Einfallswinkel zur Transmission bei senkrechter Einstrahlung. Unstrukturierte und leicht strukturierte Gläser haben in der Regel einen besseren Winkelfaktor als stark prismierte Gläser [2], [7].

Alterung durch Fotodegradation, auch Solarisation genannt, entsteht durch langanhaltende UV-Bestrahlung von Glas. Dies kann zu einer Änderung des Oxidationszustandes einzelner Glaskomponenten und somit zu einer Verfärbung des Glases und einer Reduzierung der solaren Transmission führen [2], [7].

Bei der Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Solarglases muss nach dessen Einsatz – PV oder Thermie – unterschieden werden. Bei Solarkollektoren befindet sich zwischen Absorber und Solarglas eine Luftschicht, folglich passiert die Strahlung, welche auf den Absorber trifft eine Luft-Glas-Luft Übergang. Aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindexe von Luft und Glas, entstehen Reflexionsverluste an der Vorder- und Rückseite des Glases (siehe Abbildung 1, links). Beim PV-Modul hingegen wird Glas direkt auf das EVA der Solarzelle laminiert. Da Glas und EVA einen vergleichbaren Brechungsindex aufweisen, treten Reflexionsverluste nur an der Glasvorderseite beim Übergang Luft-Glas auf. Dies ist bei Messungen zu berücksichtigen und im Falle von direkt-hemisphärischen Messungen (bspw. mit integrierenden Kugeln) muss die Transmission bei Solargläsern für PV-Module um die hintere Grenzfläche korrigiert werden. Im folgenden wird die, um die hintere Grenzfläche korrigierte Transmission als «einseitig-grenzflächenkorrigierte Transmission» bezeichnet.

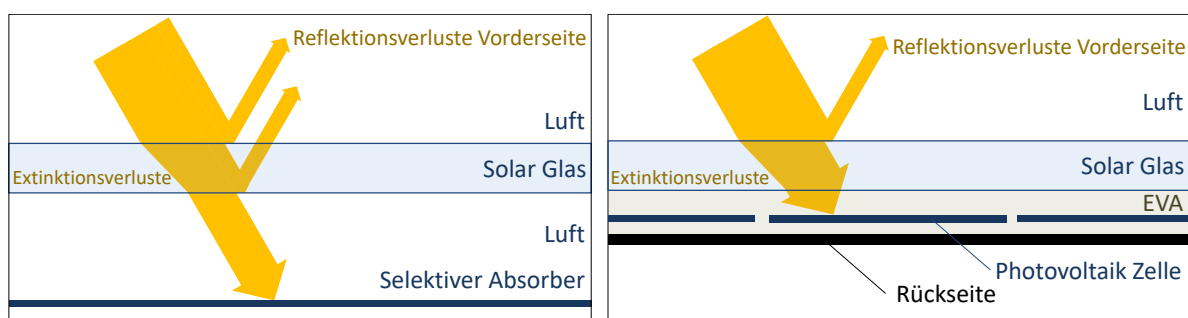


Abbildung 1: Reflexions- und Extinktionsverluste bei Solargläsern, links: Solarglas für solarthermische Anlagen, rechts: Solarglas für PV-Module



1.3 Glaswirkungsgrad

Im Rahmen des SPF-Solarglas Zertifizierungsverfahren wurde ein Glaswirkungsgrad eingeführt. Der Glaswirkungsgrad bewertet den Einfluss des Solarglases auf den Jahresertrag einer Referenzanlage. Bei einer solarthermischen Anlage entspricht die Referenzanlage einem nach Süden ausgerichteten Kollektor zur Wassererwärmung mit 40° Anstellwinkel. Für die Photovoltaik ist ein ebenfalls Süd ausgerichtetes PV-Modul mit 30° Neigung und Zellen aus kristallinem Silizium definiert. Beide Referenzanlagen beziehen sich auf den Standort Rapperswil SG (Schweiz, typisches Mitteleuropäisches Klima).

Der Glaswirkungsgrad ist definiert als das Produkt aus Transmissionsfaktor, Winkelgewichtungsfaktor und Fotodegradationsfaktor

$$\eta_{GL} = F_t * F_{IAM} * F_{UV}$$

Formel 1

F_t	Transmissionsfaktor
F_{IAM}	Winkelgewichtungsfaktor
F_{UV}	Fotodegradationsfaktor

Hierbei quantifiziert der Transmissionsfaktor den Einfluss der solaren Transmission des Glases auf den Ertrag des Kollektors bzw. des Moduls und den Einfluss der winkelabhängigen solaren Transmission durch den Winkelgewichtungsfaktor quantifiziert. Mögliche Änderungen der solaren Transmission aufgrund durch UV-Strahlung ausgelöster Fotodegradation wird durch den Fotodegradationsfaktor bestimmt. [2], [7].

In Abhängigkeit des erreichten Glaswirkungsgrades und der Behandlung des Glases (Antireflexbeschichtung) erfolgt eine Einteilung in Leistungsklassen. Die Einteilung für Solargläser für Thermie und Photovoltaik ist in Tabelle 1 aufgezeigt. Beispielweise erhält ein unbehandeltes Glas für die solarthermische Anwendung, das einen Glaswirkungsgrad grösser 0.9 erzielt die Klasse U1 [3].

Tabelle 1: Einteilung nach Leistungsklassen von Solargläsern nach dem «SPF Zertifikat Solarglas»

		1	2	3	4
Solarthermie					
Unbehandelte Gläser	U	$\eta_{GL} \geq 0.900$	$\eta_{GL} \geq 0.885$	$\eta_{GL} \geq 0.870$	$\eta_{GL} \geq 0.850$
Einseitig AR-behandelte Gläser	Y	$\eta_{GL} \geq 0.925$	$\eta_{GL} \geq 0.910$	$\eta_{GL} \geq 0.895$	$\eta_{GL} \geq 0.870$
Beidseitig AR-behandelte Gläser	X	$\eta_{GL} \geq 0.950$	$\eta_{GL} \geq 0.935$	$\eta_{GL} \geq 0.920$	$\eta_{GL} \geq 0.890$
Photovoltaik					
Unbehandelte Gläser	P	$\eta_{GL} \geq 0.940$	$\eta_{GL} \geq 0.925$	$\eta_{GL} \geq 0.910$	$\eta_{GL} \geq 0.890$
Einseitig AR-behandelte Gläser	R	$\eta_{GL} \geq 0.980$	$\eta_{GL} \geq 0.965$	$\eta_{GL} \geq 0.950$	$\eta_{GL} \geq 0.925$



Seit der Einführung des Prüfverfahrens für Solargläser am SPF wurden insgesamt 264 Gläser für solarthermische Anlagen und 73 für Photovoltaikmodule gemessen. 65 % der geprüften Gläser fielen in die erste Leistungsklasse und damit in die bestmögliche Leistungsklasse ihrer Kategorie.

1.4 Farbige Solargläser

Die Farbgebung eines Photovoltaikmoduls kann durch verschiedene Verfahren erzeugt werden. Der schematische Aufbau eines PV-Moduls ist in Abbildung 2 links dargestellt. Die Zelle wird in eine Schicht aus EVA eingebettet und mit einem Frontglas und einer rückseitigen Abdeckung (z.B. Folie oder Glas) versehen. Eine farbliche Gestaltung des Moduls kann in allen Ebenen (Glas, EVA, Zelle, Rückseite) erfolgen. Durch spezielle Zellen wie z.B. Farbstoffsolarzelle (Grätzel Zelle) oder Streulicht- und Reflexionsfilter wird die Farbgebung des Moduls auf Ebene der Zelle respektive EVA erzeugt. Zudem können durch eine einlamierte Folie zwischen Glas und EVA oder eines farbigen Polymers auf der Rückseite in Kombination mit einer transparenten Zelle farbige Module erzeugt werden [8], [9].

Zuletzt kann durch verschiedene Verfahren zum Einfärben und Beschichten des Glases eine farbliche Gestaltung des Moduls erzielt werden. Diese Verfahren sind unabhängig von der verwendeten Zelltechnologie, da die Färbung bzw. Behandlung durch das Glas erfolgt. Zusätzlich kann durch Oberflächenbehandlungen, wie z.B. Sandstrahlen oder Satinieren die Optik des Moduls gestaltet werden [8], [9]. Im Projekt CoSoG4PV wird dies als farbiges Solarglas bezeichnet. Eine Übersicht der Herstellungsprozesse farbiger Solargläser ist in Tabelle 2.

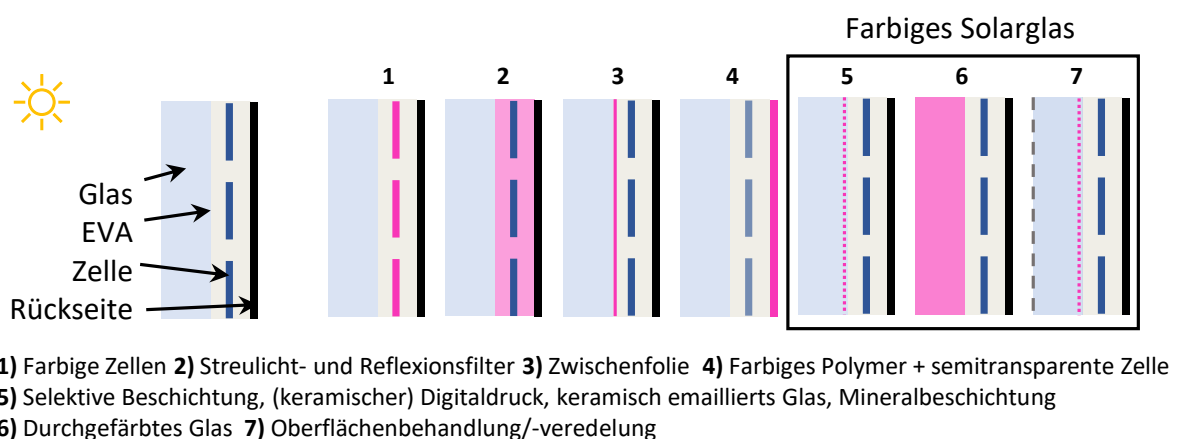


Abbildung 2: Schematischer Aufbau Solarzelle und Darstellung verschiedener Methoden zur Herstellung eines farbigen Solarmoduls (pink)



Tabelle 2: Übersicht Herstellungsprozesse farbiger Solargläser [8]

Herstellungsprozess	Funktionsprinzip	Vorteile
Spektralselektive Beschichtungen	Mehrschichtige Nanobeschichtungen erzeugen Interferenzfarben	hochwertige Farbwiedergabe
Keramisch emailliertes Glas	Keramikpaste wird auf Glas gedruckt und eingebrannt	langlebig, architektonisch attraktiv
(Keramischer) Digitaldruck	Digitale Drucktechnik mit speziellen (keramischen) Farben	hochauflösende Bilder und Muster möglich
Mineralbeschichtung	Mineralische Farbschicht wird bei hoher Temperatur eingebrannt	hohe Beständigkeit
Durchgefärbtes Glas	Glas wird während der Herstellung durchgefärbt	langlebige Farbgebung

2 Motivation des Projektes

Der Nachfrage nach farbigen Gläsern für PV Module steigt, vor allem aufgrund der Integration von Photovoltaik in das Gebäude. Mit dem aktuellen Messverfahren für Solargläser für PV kann jedoch der Glaswirkungsgrad nicht korrekt bestimmt werden, da der IAM, durch die Verwendung eines Lasers als Lichtquelle, nur für einen sehr kleinen Wellenlängenbereich bestimmt wird. Der Entscheid für einen Laser als Lichtquelle wurde getroffen, da damit ein «flat-top» Strahlprofil, d.h. ein Strahlprofil mit einem konstanten Intensitätsprofil, relativ einfach umsetzbar war. Als wichtige Einschränkung wurde dies damals nicht betrachtet, da die monochromatische Messung für nicht-farbiges Glas genügend genau ist, und der Bedarf für farbige Gläser noch nicht gesehen wurde.

Ein zum «SPF Zertifikat Solarglas PV» vergleichbares Messverfahren, das einen quantitativen Vergleich verschieden farbiger Gläser bezüglich des Einflusses auf den Ertrag einer PV-Anlage ermöglicht, fehlt bislang. Dies ist jedoch von Relevanz, da neben den grösseren Transmissionsverlusten, die höheren Absorptionsraten von farbigen Gläsern zu einer stärkeren Winkelabhängigkeit führen können. Damit kommt der Winkelabhängigkeit und deren Einfluss auf den Ertrag des Moduls eine grössere Bedeutung zu, als dies bei klaren Gläsern der Fall ist. Diesem Umstand kann mit reinen Leistungsmessungen der Module nicht Rechnung getragen werden.

Zudem treten bei Solargläsern für PV, Reflexionsverluste nur an der Vorderseite auf, weshalb bei direkt-hemisphärischen Transmissionsmessungen eine Korrektur erfolgen muss. Im Messverfahren für das «SPF-Zertifikat Solarglas PV» werden hierzu drei unterschiedliche spektrale direkt-hemisphärische Transmissions- und Reflexionsmessungen durchgeführt. Das Messverfahren wird durch die benötigten unterschiedlichen Messungen relativ zeitaufwändig und damit



kostenintensiv. Daher soll das Verfahren im Rahmen dieses Projektes entsprechend angepasst und hinsichtlich des Aufwands optimiert werden.

Die Erfahrungen mit dem am SPF entwickelten Messverfahren zur Quantifizierung von Solargläsern und das damit eingeführte «SPF Zertifikat Solarglas» haben gezeigt, dass es entscheidend zur Entwicklung von Solargläsern beigetragen hat. Mit einem neuen Messverfahren soll die Entwicklung von farbigen Solargläsern unterstützt werden.

2.1 Projektziele

Das übergeordnete Ziel ist, mit der neuen Messtechnik und angepasster Methodik das «SPF Zertifikat Solarglas für PV» so anzupassen, dass damit auch farbige Gläser beurteilt und zertifiziert werden können. Hierzu soll das am SPF vorhandene FTIR-Spektrometer (Vertex 70, Bruker) zum Einsatz kommen. Ein neuer Messaufbau, der mit dem FTIR elektronisch und optisch gekoppelt wird, soll entwickelt werden.

Dazu sind folgende untergeordneten Ziele zu erreichen:

- 1) Eine geeignete Kombination aus «weisser» Lichtquelle des FTIR-Spektrometers und eines Detektors muss gefunden werden. Dieser Detektor muss an das zu zertifizierende Glas mit wieder lösbarer Verbindung angekoppelt und in das FTIR elektrisch integriert werden können. Folgende Varianten werden betrachtet:
 - a) **Kleiner Detektor, grosser Strahl (kDgS)**: die Lichtquelle muss mittels optischer Komponenten derart modifiziert werden, dass diese als kollimierter Strahl in der Messebene ein «flat-top»-Strahlprofil von genügend grossem Querschnitt und genügender Qualität aufweist. Angestrebt wird eine gleichmässige Intensität über einen Strahldurchmesser von mindestens 80 mm, die um maximal $\pm 10\%$ variiert.[S

Ein geeigneter breitbandiger (d.h. mit spectral response mindestens im Bereich 400 nm – 1'070 nm) Detektor mit einer Fläche von mindestens 15 x 15 mm muss gefunden oder ein erhältlicher Standard-Detektor entsprechend modifiziert werden.
 - b) **Grosser Detektor, kleiner Strahl (gDkS)**: die Lichtquelle des FTIR-Spektrometers muss mittels optischer Komponenten als kollimierter Strahl mit ca. 20 mm Durchmesser angekoppelt werden. Ein geeigneter breitbandiger (d.h. spectral response mindestens 400 nm – 1'070 nm) Detektor mit einer Fläche von mindestens 100 x 100 mm muss gefunden oder ein erhältlicher Standard-Detektor entsprechend modifiziert werden, dessen Sensitivität über eine Fläche mit 100 mm Durchmesser maximal um $\pm 5\%$ variiert.
- 2) Ein opto-mechanisches Messgerät (Goniometer), bestehend aus einem drehbaren Probenhalter mit o.g. Detektor in welchen die o.g. Lichtquelle eingekoppelt wird und welcher vom FTIR gesteuert werden kann, muss entwickelt und aufgebaut werden.
- 3) Die Methodik, um aus den erhaltenen Messungen die zur Zertifizierung des Glases benötigten Grössen (Transmission, IAM) ableiten zu können, muss entwickelt werden.

3 Vorgehen und Methode

Wie eingangs beschrieben, sollen mit dem neuen Messgerät die Zertifizierung auch von farbigen Gläsern ermöglicht werden und gleichzeitig, durch Reduzierung des zeitlichen Aufwandes zum Durchführen der Messungen, die Kosten für das bisherige «SPF Zertifikat Solarglas PV» gesenkt werden.

Abbildung 3 zeigt die schematische Darstellung des Messaufbaus. Die Lichtquelle des FTIR-Spektrometers wird mittels Lichtwellenleiter ausgekoppelt und in die Optikeinheit des Goniometers überführt. Die Optikeinheit ist um die azimuthale und transversale Achse zur Glasprobe mit optisch gekoppeltem Detektor schwenkbar. Die Optikeinheit erzeugt ein kollimiertes Strahlenbündel und leitet ein Teil des Lichtes auf einen Referenzdetektor. Die ausführliche Beschreibung der Komponenten erfolgt in den nachfolgenden Unterkapiteln.

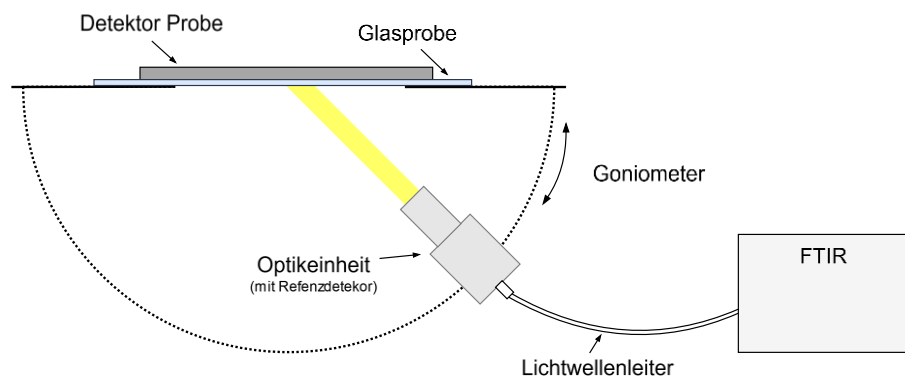


Abbildung 3: schematische Darstellung des Messaufbaus

Das Goniometer mit Optikeinheit und Probendetektor ist über digitale, analoge und optische Schnittstellen an das FTIR-Spektrometer angebunden, hierdurch können spektral aufgelöste Messungen über verschiedene Einfallswinkel durchgeführt werden. Aus den Messungen resultiert die einseitig-grenzflächenkorrigierte Transmission für den jeweiligen Einfallswinkel. Somit können mit dem Messaufbau sowohl die Transmission bei nahem senkrechtem Einfall als auch IAM-Messungen durchgeführt werden. Die Messung erfolgt automatisiert durch ein Makro des FTIR-Spektrometers, wodurch der personelle Zeitaufwand reduziert werden kann.

3.1 Evaluation, Beschaffung und Inbetriebnahme des Detektors

In einem ersten Schritt musste entschieden werden, ob für das Messgerät das Prinzip «kDgS» oder «gDkS» verfolgt werden soll. Da einerseits die Erzeugung eines kollimierten Lichtstrahls mit «flat-top» Strahlprofil mit erheblichem (finanziellen) Aufwand verbunden ist aber andererseits mit der neuen SunPower Maxeon GEN-5 Solarzelle ein grossflächiger (161 x 161 mm²) Detektor zur Verfügung steht, wurde das Prinzip «gDkS» verfolgt.



Bei kleinem Strahlquerschnitt stellt die Erzeugung des kollimierten Strahls kein grösseres Problem dar, da durch den grossflächigen Detektor der gesamte Lichtstrahl detektiert wird und somit keine Homogenität des Strahlprofils sichergestellt werden muss.

Die Zelle wurde elektrisch kontaktiert, laminiert und in einen Vakuumhalter eingepasst. Auf diesen wird die Glasprobe aufgelegt. Wird der Vakuumhalter evakuiert, saugt sich dieser am Glas fest und presst die Solarzelle an die Glasoberfläche. Eine gute optischen Ankopplung der Zelle an das Glas wird mittels Zugabe einer kleinen Menge Glycerin erreicht. Hierdurch kann ein Luftspalt zwischen Glasprobe und Detektor verhindert werden. Dies ist notwendig damit keine zusätzliche Grenzfläche aufgrund des unterschiedlichen Brechungsindex von Luft und Glas entsteht. In Abbildung 4 ist die erste Design Variante des Vakuumhalters abgebildet. Bei der Inbetriebnahme des Halters zeigte sich, dass sich durch das Vakuumieren die Glasprobe nicht vollständig an den Detektor anpressen lässt. In der überarbeiteten Variante (Abbildung 5), wird der Vakuumhalter durch eine Membran in zwei Kammern geteilt. In Abbildung 6 ist der überarbeitete Vakuumhalter schematisch dargestellt. Der Detektor wird in die obere Kammer eingelegt. Vergleichbar, wie bei einem Laminator für Solarzellen, werden zunächst beide Kammern vakuumiert, um Lufteinschlüsse im Glycerin zu vermeiden. Anschliessend wird die untere Kammer belüftet und es entsteht ein Überdruck relativ zur oberen Kammer. Dadurch wird die Membran nach oben gedrückt und der Detektor an die Glasprobe gepresst.



Abbildung 4: Variante 1: Lamierte und kontaktierte SunPower Zelle im Vakuumhalter



Abbildung 5: Variante 2: Überarbeiteter Vakuumhalter mit SunPower Zelle

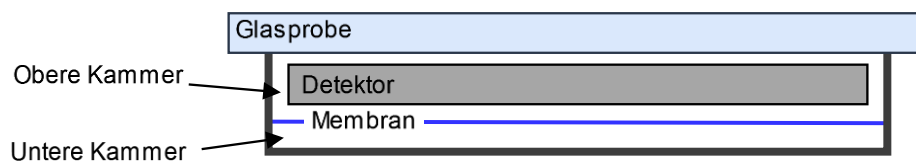


Abbildung 6: Schematischer Querschnitt des überarbeiteten Vakuumhalters (Design 2)

Für den Anschluss des Detektors an das FTIR-Spektrometer mussten Anpassungen des Detektor-Verstärkers an die physikalischen Eigenschaften der SunPower-Zelle vorgenommen



werden. Da die üblichen Detektoren für die FTIR-Spektrometrie-Detektorflächen maximal wenige mm^2 aufweisen, stellte die Anpassung an einen Detektor mit über $25'000 \text{ mm}^2$ eine Herausforderung dar. Da das Rauschen mit der Detektorfläche steigt, muss diesem mit langen Messzeiten entgegengewirkt werden. Zudem schränkt dieses Rauschen das Spektrum des nutzbaren Signals an den Grenzen des Messbereichs ein, welcher durch die Kombination der spektralen Empfindlichkeit des Detektors und der wellenlängenabhängigen Intensitätsverteilung der Lichtquelle gegeben ist, (Abbildung 7).

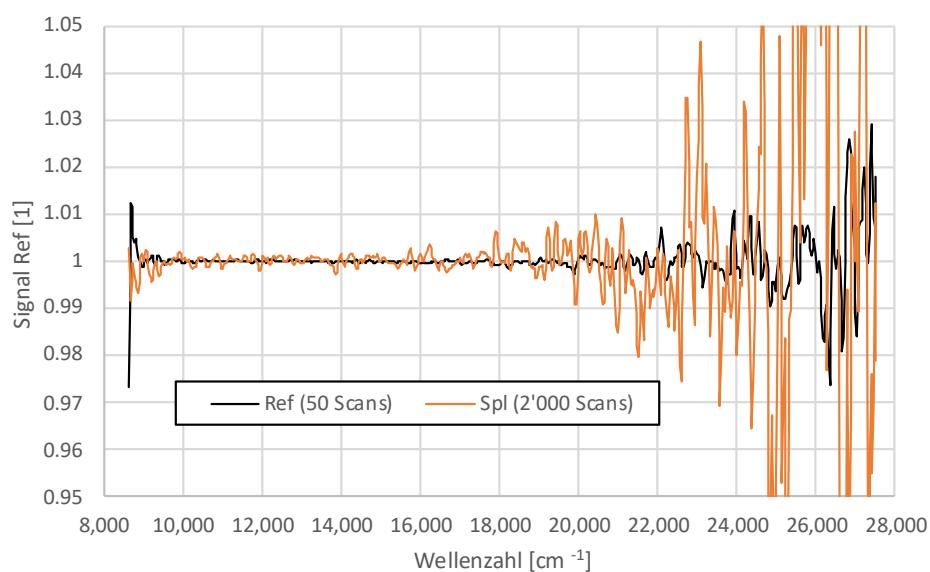


Abbildung 7: Qualität des Signals der Referenzzelle bei 50 Scans (Ref) gegenüber der grossen Messzelle für die Glasprobe bei 2'000 Scans (Spl). Trotz 40 mal mehr Scans ist das Rauschen des Probensignals etwa einen Faktor 10 grösser als das des Referenzsignals

Zur Evaluierung der Homogenität des Detektors wurden insgesamt 9 Messungen verteilt über ein 3×3 -Raster an verschiedenen Stellen des Detektors gemacht. In Abbildung 8 ist die relative Abweichung des Messsignals einer Messung zum Mittelwert über alle Messungen gezeigt. Für Wellenzahlen, bei welchen das Signal nicht durch starkes Rauschen überlagert wird, liegt die Abweichung im Bereich $\pm 5\%$. Die verwendete Zelle weist daher eine ausreichende Homogenität auf.

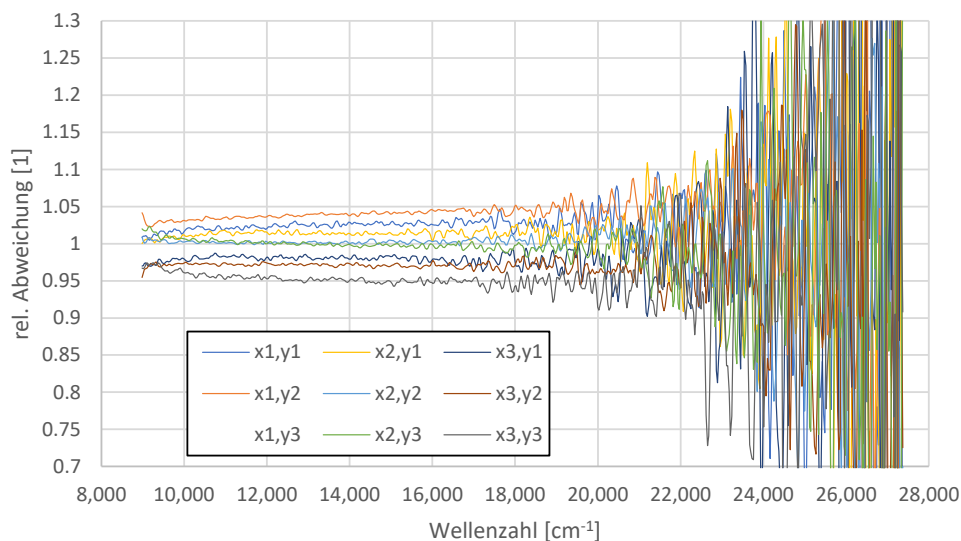


Abbildung 8: Homogenität des Detektors, dargestellt als relative Abweichung zum Mittelwert über alle Messungen

Mit grösserem Einfallswinkel ändert sich auch die Grösse des Lichtflecks, der auf den Detektor trifft. Der Einfluss des Lichtflecks auf das Messsignal wurde untersucht. Tabelle 3 zeigt die Spotgrösse der verschiedenen Messungen, sowie die relative Flächenänderung und Signaländerung. Die Grössenänderung des Lichtflecks hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Messsignal.

Tabelle 3: Einfluss Spotgrösse auf das Messsignal des Detektors

Spotgrösse	relative Fläche	Abweichung
30 mm	1	1.000
40 mm	1.78	1.000
60 mm	4	1.003
80 mm	7.11	1.007

3.2 Design und Bau der Lichtquelle

3.2.1 Teil 1: Die Lichtauskoppereinheit

Um das vom FTIR-Spektrometer modulierte «weisse» Licht auszukoppeln und im Goniometer als Lichtquelle einzusetzen, wurde eine 3-Achsig justierbare Glasfaseraufnahme aufgebaut. Damit kann das im Probenraum des Spektrometers fokussierte Licht in die Öffnung der Faser effizient eingekoppelt werden (Abbildung 9).



Abbildung 9: 3-Achsig justierbare Faser-aufnahme im Probenraum des FTIR zur Auskopplung der Lichtquelle.



3.2.2 Teil 2: Die Optikeinheit

Mit der neu gebauten Optikeinheit, dem Kollimator (Abbildung 10) wird ein paralleles Strahlenbündel von ca. 20 mm Durchmesser erzeugt. Dazu wird das aus dem Lichtleiter austretende divergente Strahlenbündel durch eine asphärische plano-konvexe Quarzlinse gebündelt. Zwischen Lichtleiter und Linse wird ein kleiner Teil des Lichtes über eine Strahlteiler unter 45° ausgekoppelt und auf einen Si-Detektor gelenkt, welcher zur Referenzmessung dient.

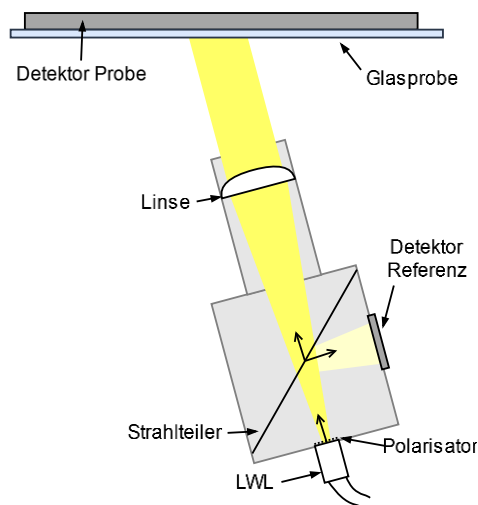


Abbildung 10: Schematischer Aufbau Kollimator

Da das Licht im FTIR-Spektrometer eine gewisse Polarisation aufweist, stellt sich die Frage, inwieweit das aus dem Kollimator austretende Licht noch polarisiert ist. Sollte dies der Fall sein, so müsste dies bei den IAM-Messungen berücksichtigt werden. Es zeigt sich, dass das aus dem Kollimator austretende Licht eine Polarisation aufweist und diese sich darüber hinaus in Abhängigkeit der Lage (Bewegung, Krümmung) des Lichtwellenleiters (LWL) ändert. In Abbildung 11 ist das auf das Maximum normierte Signal für verschiedene Lagen des LWL über die Winkel eines Polarisationsfilters aufgezeigt. Sowohl Intensität als auch Polarisationsrichtung ändern sich deutlich.

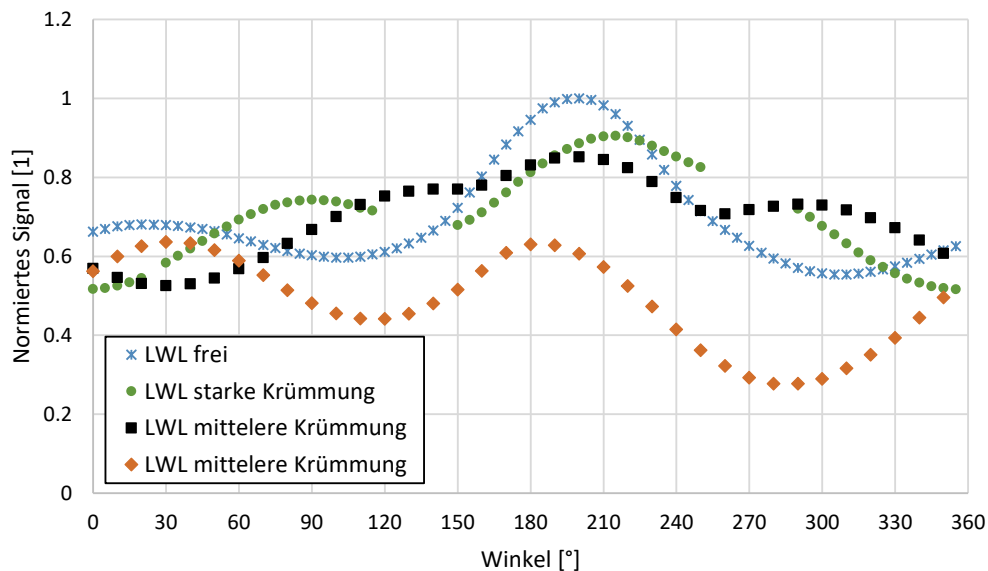


Abbildung 11: Normiertes Signal über verschiedene Winkel Einstellungen des Polarisationsfilters und verschiedene LWL Positionen

Die Messung des Referenzsignals ist empfindlich gegenüber der Polarisationsrichtung des Lichts, da der Strahlteiler in Abhängigkeit der Polarisation mehr oder weniger stark transmittiert beziehungsweise reflektiert. Abbildung 12 zeigt den theoretischen Wert der Reflexion des Strahlteilers für senkrecht polarisiertes Licht (ρ_{hs}) respektive parallel polarisiertes Licht (ρ_{hp}) [10]. Im Kollimator steht der Strahlteiler unter 45° zum einfallenden Licht. Hieraus folgt, dass am Strahlteiler rund 10 % der s-Polarisation und unter 1 % p-Polarisation des Lichtes reflektiert wird.

Für die IAM-Messung wird der Kollimator und damit auch der Lichtwellenleiter bewegt. Hierdurch kann es, wie oben gezeigt, zu einer Änderung der Polarisation kommen und damit würde sich das Verhältnis zwischen Proben- und Referenzsignal ändern. Um dies zu verhindern, wurde am Austritt des LWL ein Polarisationsfilter angebracht, welcher nur den senkrecht polarisierten Anteil des Lichtes passieren lässt (bzgl. des Strahlteilers). Über den Strahlteiler wird dadurch immer der gleiche Anteil des Lichtes auf die Referenzzelle ausgekoppelt. Hierdurch ist sichergestellt, dass sich das Verhältnis von Proben- zu Referenzsignal durch die Bewegung des LWL nicht ändert. Am Austritt des Kollimators steht dadurch polarisiertes Licht zur Verfügung. Die Polarisation des Lichtes hat jedoch einen Einfluss auf den IAM. Für eine korrekte IAM-Messung müsste diese mit unpolarisiertem Licht erfolgen. Dies wird erreicht, indem der Kollimator so ausgerichtet wird, dass die Polarisationsrichtung bezüglich des Testglases um 45° gedreht ist, womit die s- und die p-Komponente dieselbe Intensität haben.

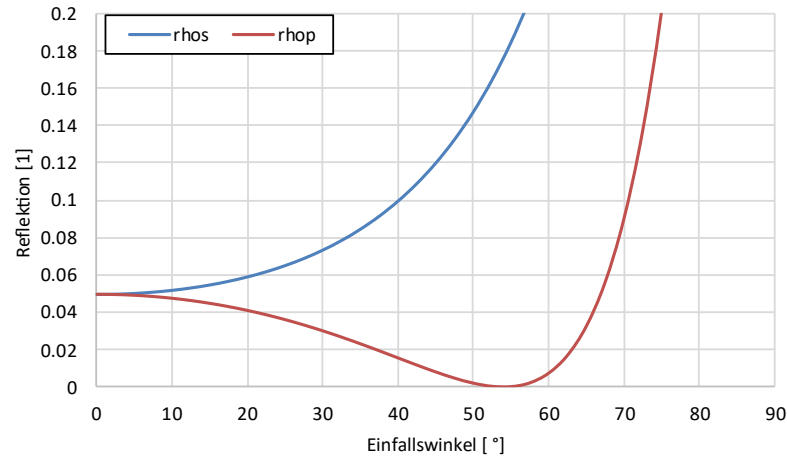


Abbildung 12: Reflexion des Strahlteilers in Abhängigkeit des Einfallswinkels, für den senkrecht (r_{hos}) und parallel (r_{hop}) polarisierten Anteil des Lichtes.

3.3 Design und Bau des Goniometers

Die neu entwickelte Messeinheit zur Bestimmung der optischen Effizienz von farbigen Gläsern ist in Abbildung 13 dargestellt. Oberhalb der kreisförmigen Öffnung liegt die Glasprobe mit Probendetektor auf der Grundplatte auf. Der aus der Optik austretende kollimierte Lichtstrahl ist auf die Glasoberfläche im Zentrum der kreisförmigen Öffnung ausgerichtet. Um diesen Punkt kann der Lichtstrahl via Zahnkranz-Linearführungen mittels Schrittmotoren azimuthal (φ) um die senkrechte Glasachse gedreht sowie zur senkrechten Glasachse polar (θ) geneigt werden. Zur Einstellung des Azimutwinkels durch Rotation, ist auf der Grundplatte eine 360°-Bogenführung montiert. Auf dieser 360°-Bogenführung ist senkrecht dazu, zur Einstellung des Polarwinkels gegenüber der Glasoberfläche, eine 180°-Bogenführung montiert, auf welcher sich die Optik befindet. Dadurch kann der Einfallswinkel zur Glasnormalen um $\pm 70^\circ$ variiert und um $\pm 90^\circ$ um die Glasnormale rotiert werden. Ebenso sind auf der 360°-Bogenführung der Verstärker für den Referenzdetektor sowie die Elektronik zur Ansteuerung der Schrittmotoren montiert. Die Einstellung der Winkel erfolgt über Analogsignale als Sollwert aus dem FTIR, welche mittels Arduino mit dem Istwert der Drehgeber der Schrittmotoren verglichen werden. Bei Abweichungen werden die Positionen entsprechend den Sollwerten korrigiert.

Abbildung 14 zeigt das fertig installierte Goniometer.

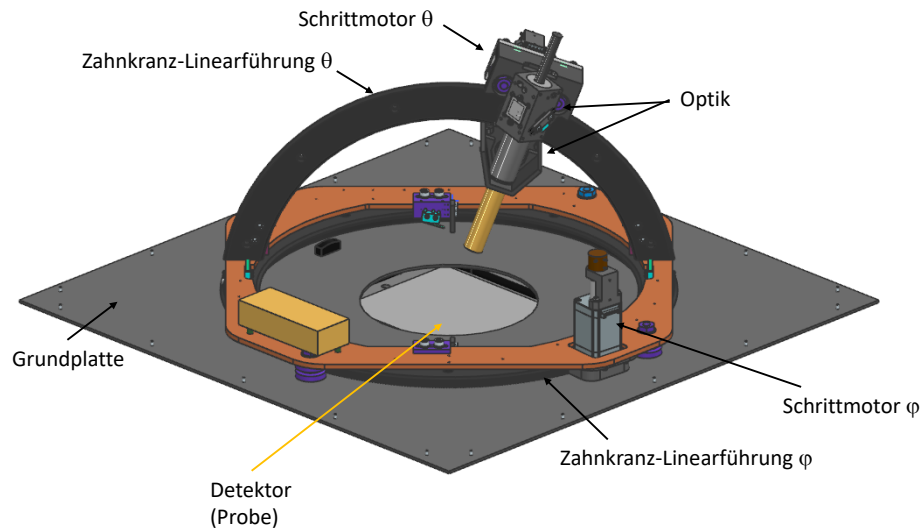


Abbildung 13 Messeinheit zur Bestimmung der winkelabhängigen spektralen Transmission von Gläsern für den Einsatz in PV-Modulen.
(Ansicht von Unten)

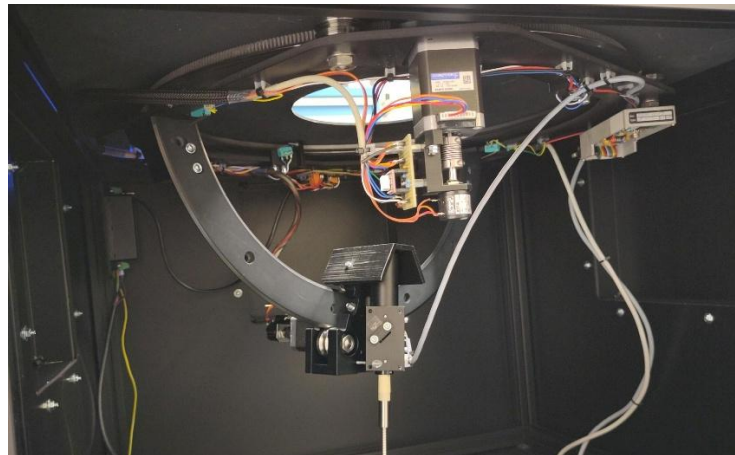


Abbildung 14: Goniometer mit Optik mit Schrittmotor zur Verstellung des Azimutwinkels vorne mittig und dem Verstärker des Referenzdetektors rechts hinten. Im Zenit der 180°-Führung zur Einstellung des Polarwinkels befindet sich die Optik mit der Glasfaseraufnahme unten. Das Goniometer befindet sich in einer Einhausung, um Störlicht auf dem Referenzdetektor zu vermeiden. Auf die Öffnung (oben mittig), wird das zu messende Glas aufgelegt. Auf das Glas wird dann der grossflächige Detektor mittels Vakuumhalterung angebracht

Erst in Kombination mit einem FTIR-Spektrometer wird aus der beschriebenen Messeinheit, dem Goniometer, ein Messgerät zur Bestimmung der winkelabhängigen spektralen Transmission von Gläsern für den Einsatz in PV-Modulen. Das Signal des einfallenden Lichtstrahls (Referenz) wird mittels Referenz-Detektor vom FTIR spektral aufgelöst gemessen. Ebenso wird das, durch das zu messende Glas, transmittierte und vom Detektor (Probe) registrierte Signal vom FTIR gemessen.



4 Messmethode und Zertifizierung

Die hier entwickelte Messmethode soll das Zertifizierungsverfahren für Solarglas PV [2] ersetzen. Um eine Übertragbarkeit des Glaswirkungsgrades von der bisherigen auf die neue Vorgehensweise sicherzustellen, müssen alle drei Faktoren invariant gegenüber den unterschiedlichen Messmethoden sein. Da der PV-Fotodegradationsfaktor auf der Bestimmung des PV-Transmissionsfaktors vor und nach UV-Exposition des Prüfglases beruht, genügt es, die Invarianz für die beiden Faktoren $F_{T,PV}$ und $F_{IAM,PV}$ sicherzustellen.

4.1 Messablauf

Mit dem neu entwickelten Messaufbau erfolgt eine automatisierte Messung über die verschiedenen Einfallswinkel. Bei jeder Messung erfolgt eine simultane Messung von Probendetektor und Referenzdetektor, das hieraus resultierende spektralaufgelöste Signal wird als $M_{Probe}(\lambda)$ für den Probendetektor respektive $M_{Ref}(\lambda)$ für den Referenzdetektor bezeichnet. Das anschliessend vom FTIR-Spektrometer ausgegebene Messsignal M_{FTIR} ist das Verhältnis der Signale von Proben- und Referenzdetektor.

$$M_{FTIR}(\lambda) = \frac{M_{Probe}(\lambda)}{M_{Ref}(\lambda)} \quad \text{Formel 2}$$

$M_{FTIR}(\lambda)$ wird als relatives Signal ausgegeben, um den Einfluss von Schwankungen der Intensität der Lichtquelle zu eliminieren. $M_{FTIR}(\lambda)$ korreliert mit der einseitig-grenzflächenkorrigierten Transmission der gemessenen Glasprobe.

4.2 Transmissionsfaktor

Die solare einseitig-grenzflächenkorrigierte Transmission wird durch eine Vergleichsmessung des Probenglases mit einem Referenzglas mit bekannter solarer einseitig-grenzflächenkorrigierter Transmission $\tau_{Kor,ref}(\lambda)$ ermittelt. Mit dem Messsignal des Referenzglases $M_{FTIR,ref}(\lambda)$ folgt die Korrekturfunktion:

$$k(\lambda) = \frac{\tau_{Kor,ref}(\lambda)}{M_{FTIR,ref}(\lambda)} \quad \text{Formel 3}$$

Hieraus folgt für die Transmission der Glasprobe

$$\tau_{Kor,Probe}(\lambda) = k(\lambda) * M_{FTIR,Probe}(\lambda) \quad \text{Formel 4}$$

Somit kann mit einer Messung und bekannter Korrekturfunktion die "einfach grenzflächenkorrigierte spektrale Transmission" des Glases ermittelt werden. Analog zum bisherigen Zertifizierungsverfahren wird, um den Einfluss auf den Ertrag einer Referenzanlage zu ermitteln, das Spektrum sowohl mit einem typischen Solarspektrum (AM1.5) als auch mit der Sensitivität



einer angekoppelten Zelle gewichtet. Der daraus resultierende einseitig-grenzflächenkorrigierte Transmissionsgrad bei nahezu senkrechtem Einfall mit c-Si Wichtung τ_{cSi} entspricht dem Transmissionsfaktor.

$$F_{\tau,PV} = \tau_{cSi}$$

Formel 5

mit:

$$\tau_{cSi} = \frac{\int \tau_{kor,Probe}(\lambda) * AM1.5(\lambda) * cSi(\lambda) * d\lambda}{\int AM1.5(\lambda) * cSi(\lambda) * d\lambda}$$

Formel 6

Hierbei entspricht $AM1.5(\lambda)$ dem solarem Bezugsspektrum der Luftmasse 1.5 nach der Norm ISO 9845-1 [11]. Zur Gewichtung der Empfindlichkeit einer typischen Solarzelle $cSi(\lambda)$ wurde die von Thomas et al. [12] publizierte IQE (internal quantum efficiency) für typische polykristalline Siliziumzellen verwendet.

4.3 Winkelgewichtungsfaktor

Im Falle des PV-Winkelgewichtungsfaktors unterscheidet sich die neue Messung von der bisherigen nur dadurch, dass der IAM neu über den gesamten Empfindlichkeitsbereich der Solarzelle spektral aufgelöst gemessen wird, anstatt integral nur bei einer Wellenlänge mit einer schmalbandigen Laserdiode [2].

Der IAM wird für zwei Azimutwinkel ($\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 90^\circ$) gemessen. Dies erfolgt, weil die Montageorientierung von PV-Modul (portrait oder landscape) in der Regel nicht vorgegeben ist. Der Winkelgewichtungsfaktor ist wie folgt definiert:

$$F_{IAM,PV} = \min([F_{vert}^{0^\circ} + F_{horz}^{90^\circ}], [F_{vert}^{90^\circ} + F_{horz}^{0^\circ}])$$

Formel 7

Mit:

$$F_{Geo}^\varphi = \sum_n \frac{IAM_n^\varphi}{IAM_{ref,n}} * S_n^{Geo}$$

Formel 8

IAM_n

IAM Messung an der Winkelposition

$$IAM_n = \frac{\int M_{FTIR,n}(\lambda) * AM1.5(\lambda) * cSi(\lambda) d\lambda}{\int M_{FTIR,n=0}(\lambda) * AM1.5(\lambda) * cSi(\lambda) d\lambda}$$

$IAM_{ref,n}$

Referenz-IAM-Messwert

S_n^{Geo}

IAM Gewichtungsfaktor an der Winkelposition n

$n = 0, \dots, 5$

Index der Winkelposition ($10^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$)

$\varphi \in (0^\circ, 90^\circ)$

Achse bezogen auf die Glasoberfläche (Azimut $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 90^\circ$)

$Geo \in (vert, horz)$

Orientierung bezogen auf die Einstrahlungsverteilung (vertikal, horizontal)



Die Tabelle mit den Gewichtungsfaktoren befindet sich in Annex A

4.4 Fotodegradationsfaktor

Der Fotodegradationsfaktor $F_{UV,PV}$ beschreibt die Änderung des Transmissionsgrades aufgrund von UV Bestrahlung und die daraus resultierende Fotodegradation (Solarisation). Hierzu wird das Glas, wie in dem bisherigen Zertifizierungsverfahren [2] mit UV bestrahlt. Anschliessend wird die einseitig-grenzflächenkorrigierte spektrale Transmission wie in Kapitel 4.2 erneut gemessen und analog der Transmissionsgrad $\tau_{cSi,UV}$, nach Formel 6 bestimmt. Der Fotodegradationsfaktor ergibt sich wie folgt:

$$F_{UV,PV} = \frac{\tau_{cSi,UV}}{\tau_{cSi,ref}} \quad \text{Formel 9}$$

Hierbei ist $\tau_{cSi,ref}$ der Transmissionsgrad vor der Exposition mit UV und $\tau_{cSi,UV}$ der Transmissionsgrad nach UV-Bestrahlung.

4.5 Messergebnisse

Mit dem neu entwickelten Aufbau wurden zur Validierung des Messverfahrens klare Gläser gemessen, welche bereits nach dem «SPF Zertifikat Solarglas PV» gemessene worden sind, sowie ein klares Glas ohne Oberflächenbehandlung, für das keine Messdaten vorliegen. Nachfolgende Tabelle führt die Probengläser auf.

Tabelle 4: Übersicht über Glasproben, welche zur Validierung des Messverfahrens gemessen worden sind.

Bezeichnung	Oberfläche	Glasdicke
matt	matt, leicht strukturiert	3.2 mm
matt-AR	matt, leicht strukturiert mit Antireflex Beschichtung	3.2 mm
prism	strukturiert (prismatisch)	3.2 mm
klar	ohne Oberflächenbehandlung	3.2 mm

4.5.1 Einfach-Grenzflächenkorrigierte Transmission

In Abbildung 15 ist die einseitig-grenzflächenkorrigierte Transmission für zwei verschiedene Gläser dargestellt. Dabei wird jeweils die direkte Messung, welche durch den neu entwickelten Messaufbau möglich ist, mit der indirekten Messung nach dem bisherigem Messverfahren verglichen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse ab einer Wellenlänge $\lambda > 0.5 \mu\text{m}$. Für kleinere Wellenlängen wird das Ergebnis der direkten Messung stark durch Rauschen überlagert.

Der anhand der zwei verschiedenen Messverfahren ermittelte Transmissionsfaktor $F_{\tau,PV}$ ist in Tabelle 5 aufgeführt. Hierzu wurde für die direkte Messung über den Spektralbereich von



0.5 μm bis 1.1 μm integriert. Die relative absolute Abweichung liegt für beide verglichenen Gläser unter 1 %.

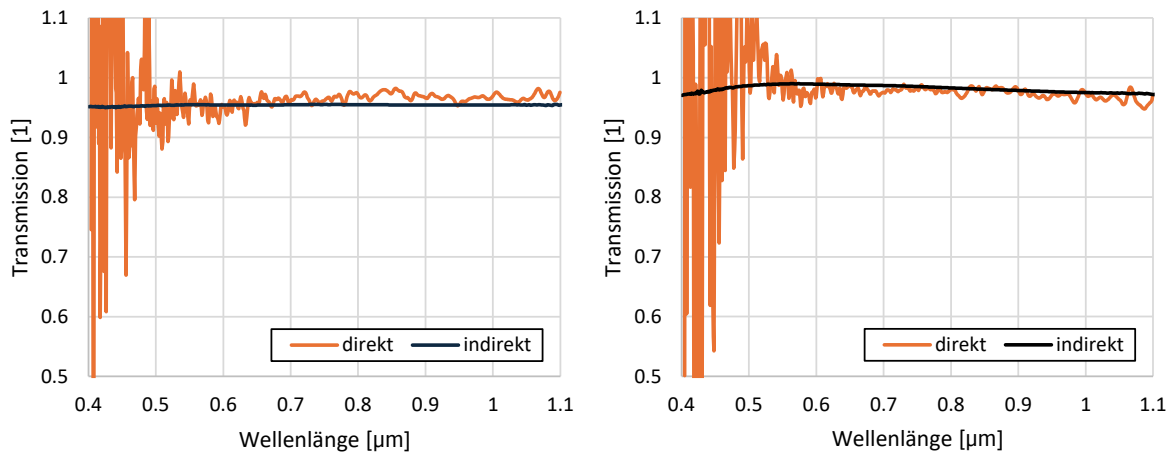


Abbildung 15: Einfach-Grenzflächenkorrigierte Transmission, jeweils direkt (neu entwickelter Aufbau) und indirekt (3 Messungen: Transmission, Reflexion und Reflexion mit Lichtfalle) gemessen, links: prismatisches Glas, rechts: mattes Glas mit AR

Tabelle 5: Vergleich der Transmissionsfaktoren, ermittelt durch die indirekte bzw. direkte Messung der einfach-grenzflächenkorrigierten Transmission, für ein prismatisches Glas ($F_{\tau,PV,prism}$) und ein mattes Glas mit AR-Beschichtung ($F_{\tau,PV,matt-AR}$)

	$F_{\tau,PV,prism}$	$F_{\tau,PV,matt-AR}$
indirekt	0.953	0.983
direkt	0.962	0.983
rel. abs. Abweichung	0.9 %	0.1%

4.5.2 Winkelgewichtungsfaktor

In Abbildung 16 und Abbildung 17 ist der IAM verschiedener Gläser, welche am alten und neuen Messplatz gemessen worden sind, aufgezeigt. Erstere Abbildung zeigt die Messung für den Azimuth $\varphi = 0$ und zweitere die Messung für $\varphi = 90$. Sowohl für das Glas «matt» als auch das Glas «prism» zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem alten und neuen Messverfahren. Die relative Abweichung der Messwerte liegt für alle Winkel unter 1.2 % (Vgl. Tabelle 6). Lediglich bei dem Glas mit AR Beschichtung (matt-AR) zeigt sich mit zunehmendem Einfallswinkel eine Abweichung zwischen den beiden Messverfahren. Diese steigt für einen Einfallswinkel von 70° auf 3 % für die longitudinale, respektive 2 % für die transversale Achse.

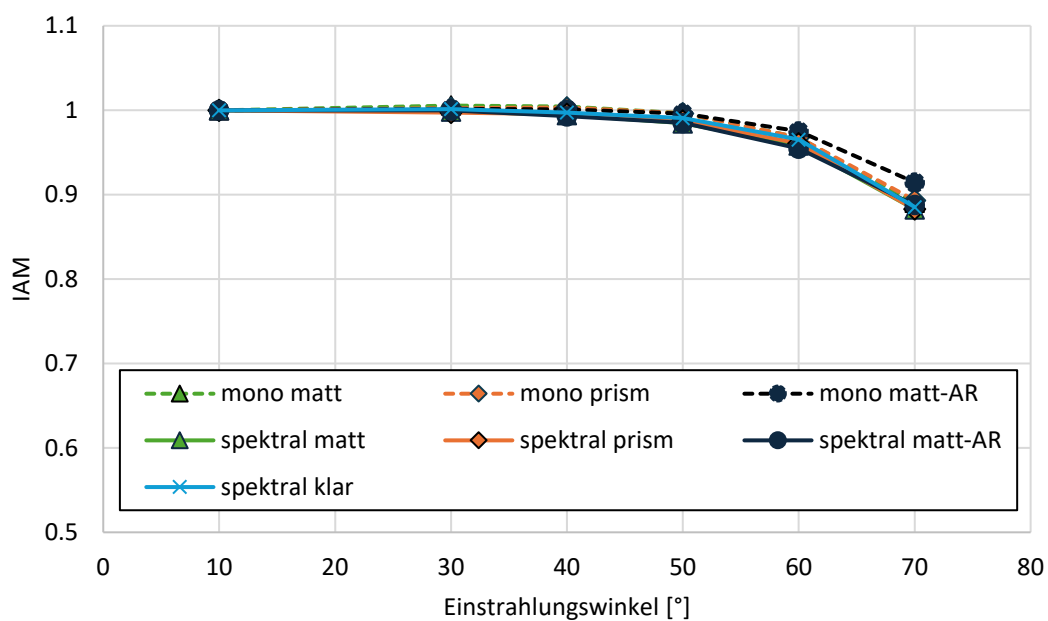


Abbildung 16 IAM für Azimut $\varphi = 0^\circ$: Vergleich verschiedener Gläser gemessen mit dem alten (mono) und neuen (spektral) Messplatz.

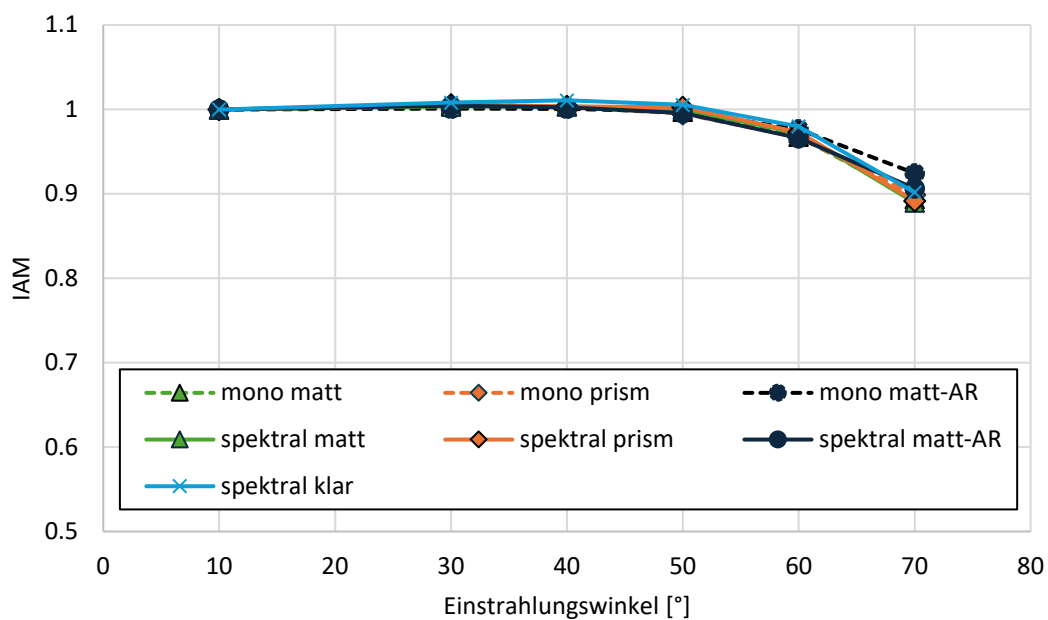


Abbildung 17 IAM für Azimut $\varphi = 90^\circ$: Vergleich verschiedener Gläser gemessen mit dem alten (mono) und neuen (spektral) Messplatz.



Tabelle 6 Relative Abweichung (absoluter Wert) des IAM zwischen dem alten und neuen Messaufbau; Abweichung in % für den jeweiligen Einfallswinkel

Winkel	Azimut $\varphi = 0^\circ$			Azimut $\varphi = 90^\circ$		
	matt	prism	matt-AR	matt	prism	matt-AR
10°	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
30°	0.7%	0.5%	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%
40°	1.0%	0.8%	0.8%	0.0%	0.1%	0.2%
50°	1.2%	0.9%	1.1%	0.3%	0.8%	0.2%
60°	1.0%	0.7%	2.1%	0.4%	0.6%	1.1%
70°	0.9%	1.2%	3.0%	0.5%	0.8%	2.0%

Da im alten Messverfahren mit einem schmalbandigen Laser gemessen wurde, wurde der IAM weder mit einem Solarspektrum noch mit der spektralen Empfindlichkeit einer kristallinen Solarzelle (c-Si) gewichtet. Der Einfluss einer solchen Korrektur im neuen Messverfahren ist in Abbildung 18 für die Gläser «matt» und «prism» dargestellt. Für beide Gläser zeigt sich ein leicht höherer IAM, wenn die spektral aufgelöste Messung nicht gewichtet wird.

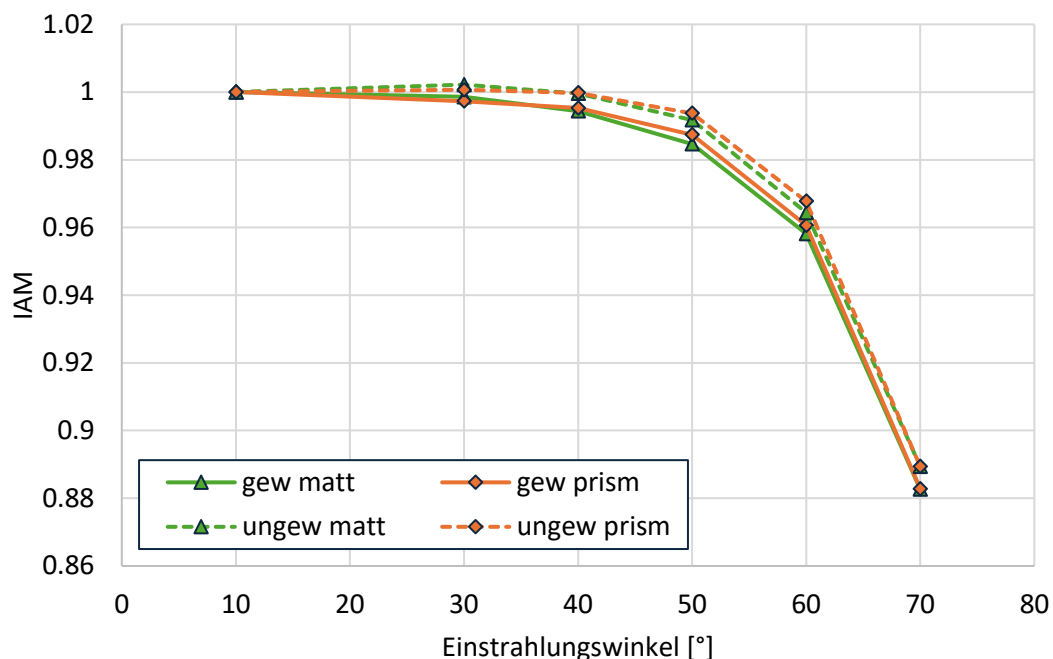


Abbildung 18 Einfluss auf den IAM der Gewichtung durch das Solarspektrum AM1.5(λ) und die Sensitivität c-Si(λ) einer typischen Solarzelle.



Die aus den Messungen resultierenden Winkelgewichtungsfaktoren $F_{IAM,PV}$, jeweils ermittelt durch Messungen mit altem und neuem Messverfahren, sind in Tabelle 7 aufgeführt. Zur Vergleichbarkeit der beiden Messverfahren wurde für die Ermittlung des $F_{IAM,PV}$ die gleiche Referenz $IAM_{ref,n}$ verwendet und für die spektral aufgelöste Messung wurde der IAM ohne Wichtung ermittelt. Die aus den beiden Messverfahren resultierenden Winkelgewichtungsfaktoren zeigen eine gute Übereinstimmung: Der absolute Wert der relativen Abweichung liegt für alle unter 0.3 %.

Tabelle 7 Vergleich des Winkelgewichtungsfaktors zwischen monochromatischer Messung (alt) und spektral aufgelöster Messung (neu), für verschiedene Gläser. $F_{IAM,PV} (30^\circ \text{ Süd})$ entspricht dem IAM-Faktor für ein mit 30° aufgeständertes, nach Süden ausgerichtetes Modul am Standort Rapperswil. $F_{IAM,PV} (Fassade)$ entspricht dem IAM-Faktor dem eines vertikal aufgeständerten Moduls nach Süden ausgerichtet am Standort Rapperswil.

	$F_{IAM,PV} (30^\circ \text{ Süd})$			$F_{IAM,PV} (Fassade)$		
	matt	prism	prism-AR	matt	prism	prism-AR
monochromatisch	0.997	0.996	0.998	0.99	0.99	0.995
spektral	0.992	0.993	0.992	0.987	0.988	0.988
abs. rel. Abweichung	0.0 %	0.1 %	0.1 %	0.3 %	0.2 %	0.3 %

4.5.3 Messunsicherheit

Um die Unsicherheit der Messungen zu beurteilen, wurden 500 Messungen à je 200 Scans ohne Glasprobe durchgeführt, und 4 Monate später wiederholt. Des Weiteren wurden nochmals 500 weitere Messungen mit einem klaren Glas vor dem Proben-Detektor durchgeführt. Die auf diese Weise gemessenen Spektren sind beispielhaft für den ersten Messdurchgang ohne Glasprobe in Abbildung 19 dargestellt.

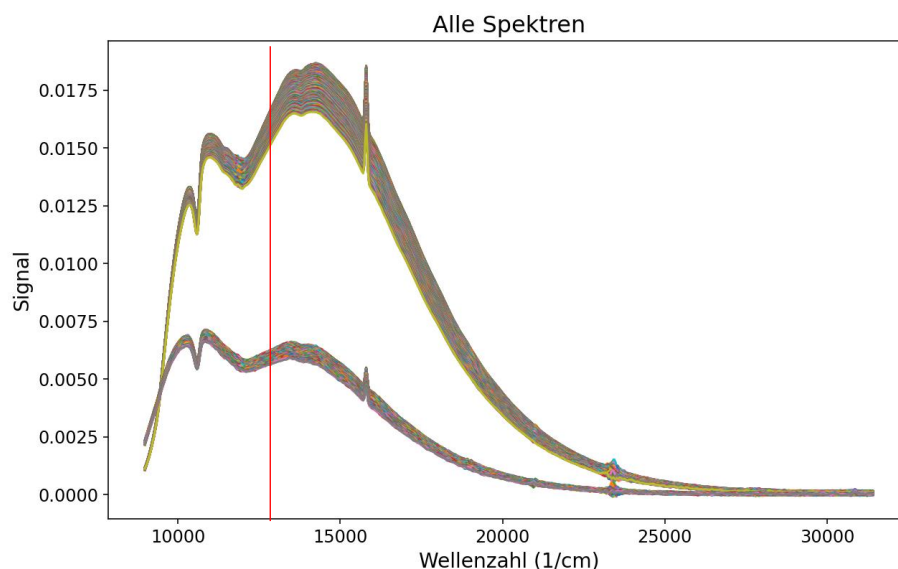


Abbildung 19 Darstellung aller 500 gemessenen Spektren des Referenz-Detektors (höhere Signale) und des Proben-Detektors (tiefere Signale) ohne Glasprobe. Die senkrechte rote Linie zeigt die Position von 12775 cm^{-1} an, für welche die Signal-Entwicklung in Abbildung 20 dargestellt ist.



In Abbildung 20 ist das Messsignal für die Wellenzahl $12\,775\text{ cm}^{-1}$ über die 500 Messungen beider Detektoren dargestellt. Es wird ersichtlich, dass das Messsignal beider Detektoren an der gezeigten Position deutliche Schwankungen in der Signal-Stärke zwischen den einzelnen Messungen aufweist. Die Messsignale weisen jedoch eine vergleichbare Änderung über den Verlauf der Messungen auf. Relevant für die Berechnung des Glaswirkungsgrades ist jedoch das Integral des Messsignals gewichtet mit dem solaren Bezugsspektrum und der Empfindlichkeit einer typischen Solarzelle. Vergleichbar zu Formel 5, ergibt sich:

$$M_{FTIR, gew} = \frac{\int M_{FTIR}(\lambda) * AM1.5(\lambda) * cSi(\lambda) * d\lambda}{\int AM1.5(\lambda) * cSi(\lambda) * d\lambda} \quad \text{Formel 10}$$

Da für kleine Wellenlängen das Probensignal stark von Rauschen überlagert wird, wurde der Integrationsbereich auf 0.4 bis $1.1\text{ }\mu\text{m}$ eingeschränkt. Der nach Formel 10 gewichtete Messwert wurde für alle drei Messdurchgänge berechnet. Die Resultate in Tabelle 8 zusammengefasst und die Entwicklung über die 500 Messungen sind beispielhaft in Abbildung 21 für eine Messung ohne Glasprobe dargestellt.

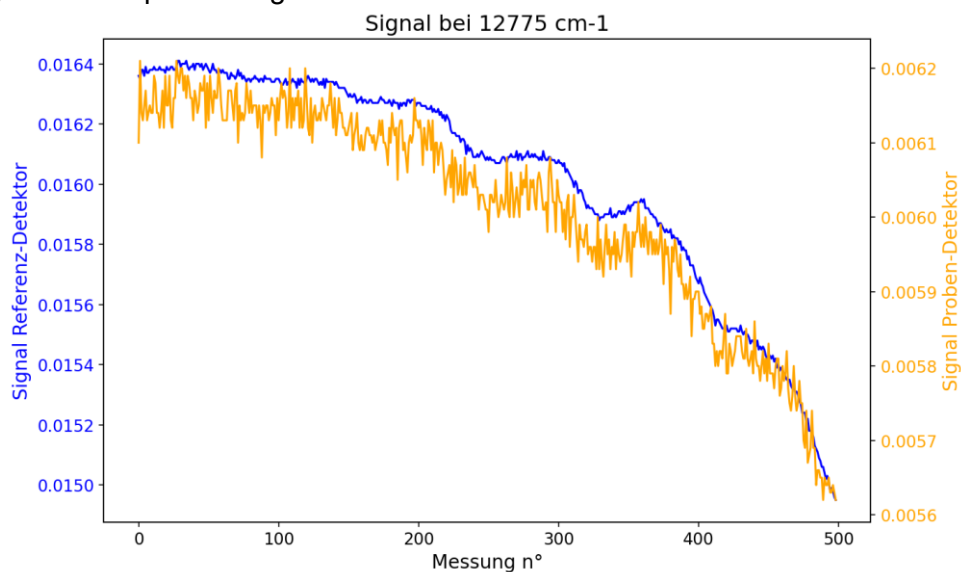


Abbildung 20 Entwicklung der Signale des Referenz-Detektors (blau) und des Proben-Detektors (orange) bei $12\,775\text{ cm}^{-1}$ (783 nm) über den Verlauf der 500 Messungen (ohne Glasprobe). Die Wellenzahl von $12\,775\text{ cm}^{-1}$ wurde gewählt, weil sie auf dem Messspektrum in einer Region ist mit hohem Signal, geringem Rauschen und mittlerer Steigung, wie in Abbildung 19 ersichtlich ist.

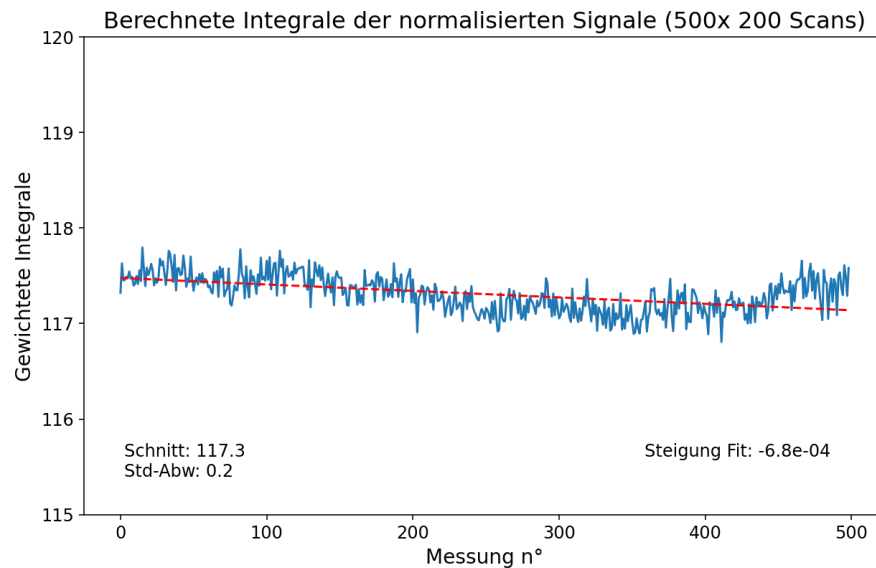


Abbildung 21: Entwicklung des gewichteten Messwertes $M_{FTIR,gew}$ über den Verlauf der 500 Messungen (ohne Glasprobe).

Tabelle 8: Mittelwert, Standardabweichungen und Trendlinien-Steigung der jeweils 500 gewichteten Messwerte.

Gewichtete Messwerte	Ohne Glasprobe	Ohne Glasprobe 4 Monate später	Mit Glasprobe
Mittelwert	117.3	116.2	129.5
Standardabweichung	0.16 %	0.28 %	0.58 %
Trendlinien-Steigung	-6.76e-4	1.69e-3	3.20e-3

Ohne Glasprobe liegt die Standardabweichung bei rund 0.3 %, während sie mit Glasprobe bei rund 0.6 % liegt. Die Steigungen der Trendlinien weisen unterschiedliche Vorzeichen auf, was auf eine stochastische Streuung der Messwerte hindeutet. Grösser als die Abweichung innerhalb der 500 Messungen ist mit einer Abweichung von rund 1 % jene zwischen den beiden identischen Messungen ohne Glasprobe.

Unter der Annahme von unkorrelierten und normalverteilten Messunsicherheiten ergibt sich die kombinierte Standardabweichung des Glaswirkungsgrades aus der Quadratwurzel der Summe der Quadrate der einzelnen Faktoren ($F_{\tau,PV}$, $F_{IAM,PV}$, $F_{UV,PV}$). Es wurden folgende Annahmen getroffen:

- Unsicherheit des neuen Messaufbaus beträgt 1 %.
- Da die Transmissions-Kurven von Gläsern zwischen $0.4 \mu m$ bis $1.1 \mu m$ nahezu flach verlaufen [2], wurde $\tau_{kor,ref}(\lambda)$ in Formel 3 als konstant angenommen, mit einer relativen Messunsicherheit von 0.2 %.
- Der Korrekturfaktor $k(\lambda)$ im Integral von Formel 5 führt, unter obiger Annahme, zu einer Erhöhung der Messunsicherheit um einen Faktor $\sqrt{2}$ für Formel 9.
- Die Faktoren S_n^{Geo} und $IAM_{ref,n}$ in Formel 8 sind Konstanten ohne Messunsicherheit.



- Die Unsicherheiten der Messungen von IAM_n sind für alle Winkelpositionen gleich gross.
 - Die Unsicherheiten der Messung für $\tau_{cSi,UV}$ in Formel 8 ist gleich gross wie jene für τ_{cSi} .
- Hieraus ergibt sich eine relative Messunsicherheit von 2.5 % auf den Glaswirkungsgrad.

4.6 Klassifizierung

Das «SPF-Zertifikat Solarglas PV» sieht eine Einteilung in verschiedene Klassen für klare Gläser vor. In den Leistungsklassen wird zwischen unbehandelten und einseitig Anti-Reflexion (AR)-behandelten Gläsern unterschieden. Damit ein Glas ein «SPF-Zertifikat» als Solarglas erhält, muss der Glaswirkungsgrad grösser 89 % für unbehandelte respektive 92.5 % für einseitig AR-behandelte Gläser sein [2].

Eine Klasseneinteilung oder eine minimale Anforderung an den Glaswirkungsgrad für farbige Gläser wird zum jetzigen Zeitpunkt nicht vorgenommen. Bei farbigen Solargläsern sind grössere Einbussen auf die Leistung des PV-Moduls und eine grössere Spannweite zwischen den Glaswirkungsgraden der verschieden farbigen Gläser zu erwarten, als dies bei klaren Gläsern der Fall ist. Um eine Klasseneinteilung zu ermöglichen, fehlt daher die notwendige Datenbasis an Glaswirkungsgraden für farbige Gläser.

Der mit dem neuen Messverfahren ausgewiesene Glaswirkungsgrad ermöglicht dennoch einen direkten Vergleich zwischen verschiedenen farbigen Gläsern und quantifiziert den Einfluss auf den Ertrag des PV-Moduls.

5 Ergebnisse und Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass mit dem neuen Messaufbau die spektral aufgelöste solare Transmission für variable Einfallswinkel gemessen werden kann. Somit eignet sich der im Projekt CoSoG4PV entwickelte Messaufbau zur Quantifizierung der Leistungsfähigkeit von farbigen Solargläsern.

Für die Entwicklung des Aufbaus musste eine geeignete Kombination aus Detektor und Lichtstrahl gefunden werden. Die SunPower Maxeon GEN-5 Solarzelle hat sich als geeigneter grossflächiger Detektor zur Messung der einseitig-grenzflächenkorrigierten Transmission in einem für PV-Module relevanten spektralen Bereich erwiesen. Als Herausforderung gestaltete sich die optische Kopplung der weissen Lichtquelle des FTIR-Spektrometers mit der rotierbaren Optikeinheit. So hat sich im Verlauf des Projekts herausgestellt, dass der Lichtwellenleiter, welcher das FTIR-Spektrometer mit der Optikeinheit des Goniometers optisch koppelt, das Licht polarisiert. Zudem ändert sich die Polarisierung in Stärke und Lage durch die Bewegung des Lichtwellenleiters. Durch den Einbau eines Polarisationsfilters und der Rotation der Optikeinheit um 45° zur Glasebene, konnte ein Einfluss der Polarisierung des Lichtes auf die Messung eliminiert werden.

Im bisherigen Zertifizierungsverfahren für Solarglas PV wird der Transmissionsfaktor über drei Messungen – Transmission, Reflexion und Reflexion mit Lichtfalle – ermittelt und ist daher sehr zeitintensiv. Mit dem neu entwickelten Messaufbau ist das erhaltene, spektralaufgelöste Messsignal direkt abhängig von der einseitig-grenzflächenkorrigierten Transmission des Gla-



ses. Diese kann daher mittels eines Referenzglases mit bekannter einseitig-grenzflächenkorrigierter Transmission bestimmt werden. Der Vergleich des im Rahmen dieses Projektes entwickelten Messverfahrens für farbige Solargläser zeigt, dass die Ergebnisse des «SPF Zertifikat Solarglas PV» ab einer Wellenlänge $\lambda > 0.5\mu\text{m}$ reproduziert werden können. Jedoch zeigt sich mit dem neuen Messverfahren, bedingt durch die grössere Detektorfläche, deutlich mehr Rauschen. Zwar kann das Rauschen durch Erhöhung der Scan-Anzahl verbessert werden, die gute Übereinstimmung, der aus beiden Messverfahren ermittelten Transmissionsfaktoren weist jedoch darauf hin, dass das Rauschen die Messunsicherheit nicht negativ beeinflusst. Die gewählte Anzahl von 200 Scans ist somit ein Kompromiss zwischen tiefem Rauschen und kurzer Messzeit.

Die Bestimmung des Winkelgewichtungsfaktors erfolgte bislang durch die Messung des IAMs mit monochromatischem Licht (Laser, $\lambda = 635\text{ nm}$) [2]. Mit dem im Rahmen dieses Projektes entwickelten Messaufbau kann für alle Einstrahlungswinkel eine spektral aufgelöste Messung, über den für eine PV-Zelle relevanten Wellenlängenbereich von 0.4 bis 1.1 μm , gemessen werden. Zur Ermittlung des IAMs wird das Messsignal mit dem Solarspektrum und der Empfindlichkeit einer typischen Solarzelle gewichtet und anschliessend das Integral gebildet. Die beiden Messverfahren zeigen eine gute Übereinstimmung der IAM-Werte. Unterschiede sind vor allem auf die Einführung der Wichtung zurückzuführen, wie im Abschnitt 4.5.2 erläutert wurde. Auf diese wurde zuvor auf Grund der monochromatischen Messung verzichtet. Da diese vor allem für farbige Gläser einen relevanten Einfluss haben kann, soll diese für die Quantifizierung von farbigen Gläsern Anwendung finden. Hierdurch sind die Winkelgewichtungsfaktoren nach neuem Messverfahren nicht mehr direkt mit denen aus dem bisherigen Solarglas PV Zertifikat vergleichbar.

Untersuchungen zur Messunsicherheit haben ergeben, dass bei Messungen mit dem neu entwickelten Messaufbau, die Messunsicherheit des Transmissionsgrades bei 1 % liegt. Damit ist eine präzise Messung der Transmission des Glases für verschiedene Einfallswinkel möglich. Unter Beachtung der Fehlerfortpflanzung ergibt sich eine Unsicherheit von rund 2.5 % auf den Glaswirkungsgrad. Ein klares Glas muss mindestens einen Glaswirkungsgrad von 0.89 erreichen, um das «SPF Zertifikat Solarglas PV» zu erhalten. Das bedeutet, dass mindestens 89 % der jährlichen Einstrahlung das Glas passieren muss. Hierdurch sind nicht nur die Anforderungen an das zu testende Glas hoch und sondern auch an das Prüfverfahren. Um den Glaswirkungsgrad und die eingeführten Leistungsklassen ermitteln zu können, muss die Messunsicherheit entsprechend klein sein. Bei Modulen mit farbigen Gläsern sind grössere Ertragsminderungen zu erwarten. Feldmessungen von sieben Modulen mit farbigen Gläsern zeigten, dass die jährlichen Ertragseinbussen im Vergleich zu Modulen mit klarem Glas zwischen 16 % und 45 % liegen [13]. Der Einfluss der getesteten Gläser auf das Modul variiert somit um rund 30 % zwischen dem farbigen Glas mit den geringsten und den grössten Verlusten. Die Messkampagne verdeutlicht, dass die durch farbige Solargläser verursachten Ertragseinbussen eine grosse Streuung zwischen verschiedenen Gläsern (durch Unterschiede in Farbe, Oberfläche und Herstellungsprozess) aufweist. Schlussendlich folgt hieraus, dass mit dem neu entwickelten Messaufbau und dessen Messunsicherheit farbige Gläser quantifiziert werden können. Die auf den Glaswirkungsgrad resultierende Messunsicherheit ist für die hohen Anforderungen an klare Gläser jedoch zu gross, weshalb das neue Messverfahren nicht für klare Gläser zur Anwendung kommt.



6 Schlussfolgerungen und Fazit

Mit dem im Projekt «CoSoG4PV» entwickelten Messaufbau erfolgt die Messung für alle Einstrahlungswinkel spektral aufgelöst und automatisiert über die Steuerung des FTIR-Spektrometers. Hierdurch kann mit einem Messgerät die einseitig-grenzflächenkorrigierte Transmission und der IAM gemessen werden. Die spektral aufgelöste Messung über alle Einstrahlungswinkel ermöglicht zudem die Quantifizierung des Einflusses von farbigen Gläsern für PV-Module. Zudem konnte der Zeitaufwand für Messungen deutlich verringert werden.

Wie die Messungen von klaren Gläsern gezeigt haben, sind die Resultate des «SPF-Zertifikat Solarglas PV» mit dem neu entwickelten Messaufbau reproduzierbar. Dies wurde durch den Vergleich von Transmissionsfaktor und Winkelgewichtungsfaktor von Gläsern, welche mit dem alten Messverfahren und dem neu entwickelten Aufbau gemessen worden sind, aufgezeigt. Damit ist auch die Invarianz des Fotodegradationsfaktor gegeben, da sich dieser aus dem Verhältnis der Transmissionsfaktoren vor und nach UV-Bestrahlung ergibt.

Es hat sich gezeigt, dass die Messunsicherheit des entwickelten Messaufbaus für die Zertifizierung von klaren Gläsern nicht ausreichend ist. Bei farbigen Gläsern sind höhere Absorptions-Werte zu erwarten, was zu tieferen Glaswirkungsgraden und einer grösseren Streuung an Glaswirkungsgraden führt, als dies bei klaren Gläsern der Fall ist. Deshalb ist hier eine grössere Messunsicherheit vertretbar. Somit ist eine Quantifizierung des Glaswirkungsgrades von farbigen Gläsern gegeben und eine Einschätzung der Ertragsverluste gegenüber klaren Gläsern oder zwischen verschiedenen farbigen Gläsern ist möglich.

Eine Zertifizierung mit Klasseneinteilung von farbigen Gläsern erfolgt nicht, da einerseits ein möglichst hoher Glaswirkungsgrad nicht im Fokus von Herstellern von farbigen PV-Modulen liegt und andererseits eine Datenbasis fehlt, die eine Einteilung in Klassen ermöglicht. Dennoch kann mit dem neuen Messverfahren, durch die spektral aufgelöste Messung über alle Einstrahlungswinkel, eine aussagekräftige Bestimmung des Glaswirkungsgrades von farbigen Gläsern erfolgen. Damit bietet es Herstellern von farbigen Modulen, sowie Architektinnen und Bauherren die Möglichkeit, verschiedene Gläser untereinander zu vergleichen.

7 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Das neu entwickelte Messverfahren soll entsprechenden Akteuren und Akteurinnen in der PV-Branche eine Möglichkeit zur Quantifizierung des Einflusses von farbigen Gläsern auf den Ertrag einer PV-Anlage bieten und damit hilfreich für die Optimierung von farbigen Gläsern sein, sowie einen Beitrag zur weiteren Entwicklung der gebäudeintegrierten Photovoltaik leisten. Mit der Methode kann insbesondere durch die Bestimmung des Glaswirkungsgrades die Leistungsfähigkeit farbiger Solargläser quantifiziert werden. Zusätzlich können Kennwerte wie Transmissionsfaktor und Winkelgewichtungsfaktor miteinander verglichen werden. Dadurch wird eine quantitative Bewertung unterschiedlicher farbiger Gläser ermöglicht.

Ein weiterer Vorteil des entwickelten Messverfahrens liegt darin, dass die Gläser unabhängig vom jeweiligen PV-Modul untersucht und verglichen werden können. Dadurch wird eine standardisierte Bewertung verschiedener Glasarten ermöglicht, ohne dass modulspezifische Ein-



flüsse die Resultate beeinflussen. Dies schafft eine bessere Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Herstellungsverfahren, Beschichtungen und Farbkonzepten und erleichtert die gezielte Optimierung von Solargläsern.

Wie bereits erwähnt, sind bei farbigen Gläsern neben Wirkungsgrad, die visuellen Eigenschaften, sowie deren Stabilität, von zentraler Bedeutung. Vor allem die Farbstabilität und welche Umweltparameter diese beeinflussen, ist bislang wenig erforscht. Zum derzeitigen Zeitpunkt ist der Einfluss der UV-Bestrahlung, wie sie bei klaren Gläsern Anwendung findet, auf farbige Gläser nicht quantifiziert. Möglich wäre, dass durch die UV-Bestrahlung die Färbung degradiert, was unter Umständen zu einer verbesserten Transmission führen könnte. Somit kann der Glaswirkungsgrad, welcher sich aus den drei Faktoren – Transmissionsfaktor, Winkelgewichtungsfaktor und Fotodegradationsfaktor, zusammensetzt, durch die UV- Bestrahlung positiv beeinflusst werden. Eine Degradation der Färbung wäre jedoch unerwünscht, vor allem dann, wenn diese für Menschen visuell wahrnehmbar ist.

Nicht zuletzt konnte, auch dank dem «SPF-Zertifikat Solarglas», die Qualität und Leistungsfähigkeit von Solargläsern entscheidend verbessert werden. Es hat sich gezeigt, dass der Vergleich verschiedener Gläser bezüglich ihres Einflusses auf den Ertrag eines PV-Moduls, das Potential hat, die Weiterentwicklung von Solargläsern zu unterstützen. Der neue Versuchsaufbau bietet daher die Möglichkeit, das Mess- und Prüfverfahren weiterzuentwickeln, um die Veränderungen der Färbung unter Umwelteinflüssen charakterisieren zu können.

Im Rahmen zukünftiger Messkampagnen soll zudem eine Datenbank mit farbigen Gläsern aufgebaut werden. Diese soll die gemessenen optischen, energetischen und gegebenenfalls alterungsbedingten Eigenschaften unterschiedlicher Gläser systematisch erfassen und vergleichbar machen. Eine solche Datenbasis könnte künftig sowohl Forschungsinstitutionen als auch industriellen Akteuren und Akteurinnen als Grundlage für die Entwicklung und Bewertung neuer farbiger Solargläser dienen. Es sind Gespräche mit industriellen Akteuren und Akteurinnen in der Schweiz geplant, um dieser Idee nachzugehen.



8 Literaturverzeichnis

- [1] S. Brunold und U. Frei, „Was ist Solarglas?“, in *Zwölftes Symposium Thermische Solarenergie: 24. bis 26. April 2002, Kloster Banz*, Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI).
- [2] F. Ruesch, L. Omlin, und S. Brunold, „Solarglas PV – Zertifizierungsverfahren für Gläser im Einsatz in c-Si Fotovoltaikmodulen“, SPF Institut für Solartechnik, Rapperswil, Schlussbericht, Mai 2012. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=50419&Load=true>
- [3] „Mehr zu Solarglas – Zertifizierung“, OST. Zugriffen: 24. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ost.ch/de/forschung-und-dienstleistungen/technik/erneuerbare-energien-und-umwelttechnik/spf-institut-fuer-solartechnik/testing/solarglas/mehr-zu-solarglas-zertifizierung>
- [4] „SPF Testing Reports | SPF-Testing Rapperswil“. Zugriffen: 24. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://spftesting.info/>
- [5] „Je ausgeprägter die Struktur, desto schlechter“, *Sonne, Wind und Wärme: das Branchen-Magazin für alle erneuerbaren Energien*, Bielefelder Verlag.
- [6] „Werkstoff Glas. 3: Sachgerechte Auswahl, optimaler Einsatz, Neuentwicklungen, Gestaltung und Pflege“, in *Kontakt + Studium*, no. 448. , Ehningen bei Böblingen: expert-Verl, 2001.
- [7] „Zertifizierung von Solarglas-ST Solarthermische Kollektoren“. SPF Institut für Solartechnik, Januar 2026. Zugriffen: 13. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ost.ch/de/forschung-und-dienstleistungen/technik/erneuerbare-energien-und-umwelttechnik/spf-institut-fuer-solartechnik/testing/solarglas>
- [8] G. Eder, G. Peharz, R. Trattig, P. Bonomo, und E. Saretta, „Coloured BIPV Market, Research and Development“, IEA International Energy Agency, IEA-PVPS T15-07: 2019, Feb. 2019.
- [9] S. Wittkopf, „Farbige Photovoltaik für die Gebäudeintegration“, gehalten auf der Schweizer Baumuster-Centrale Zürich, Brownbag-Luncg „Sonnenwende“, Zürich, 18. April 2018.
- [10] J. A. Duffie und W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition*. Wiley, 2013.
- [11] ISO 9845-1:2022, *Solar energy — Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions — Part 1: Direct normal and hemispherical solar irradiance for air mass 1,5*, 12. August 2022.
- [12] C. P. Thomas, A. B. Wedding, und S. O. Martin, „Theoretical enhancement of solar cell efficiency by the application of an ideal ‘down-shifting’ thin film“, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Bd. 98, S. 455–464, März 2012, doi: 10.1016/j.solmat.2011.11.027.
- [13] R. R. Molinero, G. Friesen, und M. Caccivio, „ENHANCE Next Generation Photovoltaic Performance“, SUPSI, Canobio, Final Report, Aug. 2019.



Annex A: IAM Gewichtungsfaktoren

Tabelle 1: Die Winkelgewichtungsfaktoren S_n geben den Anteil der jährlich aus einem bestimmten Winkel eintreffenden Einstrahlung für ein südorientiertes und mit 30° aufgeständertes Modul in Rapperswil SG, CH wieder [2].

N	0	1	2	3	4	5
Winkel [°]	0	30	40	50	60	70
S_n^{Ver}	0.068	0.121	0.078	0.055	0.036	0.027
S_n^{Hor}	0.070	0.194	0.108	0.097	0.087	0.059

Tabelle 2: Die Winkelgewichtungsfaktoren S_n geben den Anteil der jährlich aus einem bestimmten Winkel eintreffenden Einstrahlung für ein südorientiertes und mit 90° aufgeständertes Modul in Rapperswil SG, CH wieder (Fassadenintegration) [2].

N	0	1	2	3	4	5
Winkel [°]	0	30	40	50	60	70
S_n^{Ver}	0.028	0.121	0.097	0.101	0.112	0.096
S_n^{Hor}	0.020	0.089	0.082	0.086	0.081	0.087