

# Zertifizierung von Solarglas-PV Photovoltaische Module

*Version 1.3, Juli 2019*

## Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Grundlagen .....	2
1.1	Einleitung .....	2
1.2	Geltungsbereich .....	2
2	Technische Grundlagen .....	3
2.1	Leistungsfähigkeit von Solarglas .....	3
2.2	Definition des Glaswirkungsgrades .....	3
3	Zertifizierung .....	4
3.1	Allgemeines .....	4
3.2	Klasseneinteilung und Kennzeichnung .....	4
3.3	Zertifikatbezeichnung .....	5
3.4	Gültigkeit .....	5
	Annex A: Der Transmissionsfaktor $F_{t,PV}$ .....	6
	Annex B: Der Winkelgewichtungsfaktor $F_{IAM,PV}$ .....	9
	Annex C: Der Fotodegradationsfaktor $F_{UV,PV}$ .....	11
	Annex D: Glaszertifikate als Grundlage für Qualitätssicherung .....	13
	Annex E: Weiterführende Dokumente und Informationen .....	13
	Referenzen .....	14

## 1 Allgemeine Grundlagen

### 1.1 Einleitung

Die Leistungsfähigkeit eines photovoltaischen Moduls ist direkt von den optischen Eigenschaften der Abdeckung abhängig. Dieser Einfluss des Glases auf den effektiven Ertrag kann mit aufwändigen optischen Messungen abgeschätzt und bewertet werden. Da in den letzten Jahren der Kostendruck auf die Hersteller massiv zugenommen hat, ist diese Leistungsbewertung besonders wichtig um den energetischen Nutzen eines Glases mit dessen Kosten in die richtige Relation zu setzen.

Für die optische Bewertung von Solarglas bestehen keine geeigneten Normen. Aus diesem Grund hat das SPF eigene Zertifizierungsschemata etabliert. Dabei werden die Gläser aufgrund von optischen Messungen in Leistungsklassen eingeteilt. Diese Einteilung ermöglicht die Einschätzung der effektiven Leistungsfähigkeit und damit den korrekten Vergleich verschiedener Gläser. Die SPF Glaszertifikate sind damit auch eine gute Grundlage für technische Spezifikationen zur Beschaffung und Qualitätssicherung von Solarglas für die Fertigung von PV Modulen.

Die SPF Solarglaszertifizierung berücksichtigt ausschliesslich die optischen Eigenschaften. Sicherheitsaspekte, mechanische Eigenschaften sowie Einflüsse durch Verschmutzung sind explizit nicht Teil dieser Zertifizierung. Es wird auch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die einschlägigen Normen und Vorschriften unabhängig von dieser Zertifizierung berücksichtigt werden sollen. Insbesondere empfiehlt das SPF ausschliesslich gehärtetes Glas einzusetzen das mindestens den Anforderungen der Norm EN12150 genügt.

Aus physikalischen Gründen sind die Anforderungen an Solarglas für solarthermische Kollektoren und für photovoltaische Module verschieden. Es gibt deshalb zwei unterschiedliche Bewertungen und Zertifikate für Solarglas:

- Solarglas-PV, geeignet für **Photo**Voltaische Module.
- Solarglas-ST, geeignet für **Solar**Thermische Kollektoren.

### 1.2 Geltungsbereich

Das vorliegende Zertifizierungsverfahren gilt für Flachglas (mit flachen, strukturierten oder anti-reflexbeschichteten Oberflächen) für den Einsatz in PV-Modulen mit Zellen aus kristallinem Silizium. Falls die beiden Glasoberflächen („innen“ und „ausser“) unterschiedlich sind, muss die Orientierung vom Hersteller festgelegt werden. Soll das Glas mit beiden Orientierungen eingesetzt werden, ist für jede Orientierung ein gesondertes Zertifikat nötig.

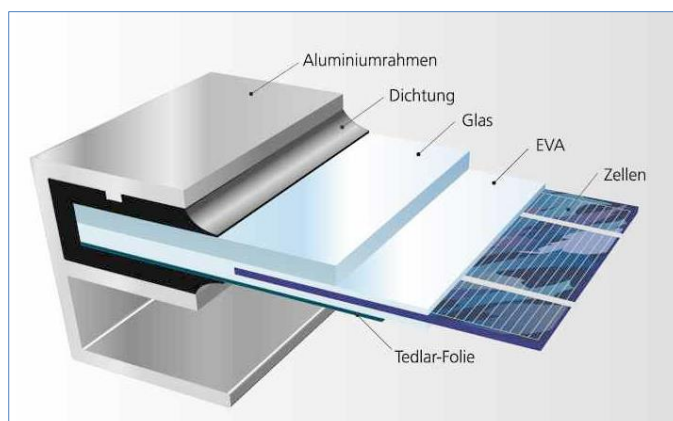


Abbildung 1: Aufbau eines typischen PV-Moduls mit Zellen aus kristallinem Silizium  
(Quelle: [www.renewable-energy-concepts.com](http://www.renewable-energy-concepts.com))

## 2 Technische Grundlagen

### 2.1 Leistungsfähigkeit von Solarglas

Die optische Leistungsfähigkeit von Solarglas für den Einsatz in PV-Modulen wird im Wesentlichen durch folgende drei Parameter bestimmt:

**Einseitig grenzflächenkorrigierte Transmission:** Die einseitig grenzflächenkorrigierte Transmission bezeichnet den Anteil der senkrecht einfallenden Strahlung, der das Glas transmittiert und in das dahinterliegende Einbettungsmaterial geleitet wird und somit dem PV-Modul zur Stromerzeugung zur Verfügung steht. Bei der Messung einer Glasscheibe in Luft treten dabei Extinktionen im Glaskörper, sowie Reflexionen an der Vorder- und der Rückseite des Glases auf, welche die Transmission des Glases reduzieren. Da in PV-Modulen bei geeigneten Einbettungsmaterialien nahezu keine Reflexion an der Glasrückseite auftritt, muss die gemessene Transmission des Glases in Luft um die Reflexion an der Rückseite korrigiert werden. Die einseitig grenzflächenkorrigierte Transmission wird mit spezialisierten Spektrometern in einer „direkt-hemisphärischen“ Geometrie über den ganzen Wellenlängenbereich bestimmt, der für den Wirkungsgrad des PV-Moduls von Bedeutung ist. Dabei muss berücksichtigt werden, dass bei der Photovoltaik nur ein beschränkter Anteil des Lichtspektrums genutzt werden kann. Das gemessene Transmissionsspektrum muss daher noch mit der Verteilung der Solarstrahlung und mit der Sensitivität von Solarzellen gewichtet werden, um den für die Beurteilung des Glases relevanten Faktor zu bestimmen. Dieser Faktor wird hauptsächlich durch den Brechungsindex und die chemische Zusammensetzung des Glases aber auch durch eine etwaige Antireflexschicht bestimmt. Diese Beurteilung ist wegen deren bedeutender Marktstellung für Module mit kristallinen Siliziumzellen optimiert und kann nur bedingt auf andere Technologien übertragen werden.

**Winkelfaktor:** Für den Jahresertrag einer Solaranlage ist nicht nur die Leistung bei senkrechter Einstrahlung, sondern auch die Leistung bei unterschiedlichen Einfallswinkeln entscheidend. Diesem Effekt wird mit dem Winkelgewichtungsfaktor Rechnung getragen. Er gibt an wie stark das getestete Glas die Leistung einer kristallinen Solarzelle bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln beeinflusst und welche Einbussen oder Gewinne dadurch für eine typische Solaranlage zu erwarten sind. Gewisse strukturierte Glas-Oberflächen oder Antireflexschichten führen zu einem verbesserten Verhalten des Moduls bei flachen Einfallswinkeln und können daher einen positiven Effekt auf den Jahresertrag von Solaranlagen haben.

**Alterung durch Fotodegradation:** Fotodegradation oder auch Solarisation entsteht durch lange UV Bestrahlung von Glas, welche zu einer Änderung des Oxidationszustandes einzelner Glas-komponenten führen kann, was wiederum zu einer Verfärbung des Glases und damit zu einer Reduktion der solaren Transmission führen kann. Nicht berücksichtigt werden Einflüsse durch Verschmutzung und durch andere witterungsbedingte Degradationsfaktoren.

### 2.2 Definition des Glaswirkungsgrades

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Solargläsern wird der PV-Glaswirkungsgrad  $\eta_{GL,PV}$  eingeführt. Der PV-Glaswirkungsgrad beschreibt den Einfluss des Glases auf den Jahresertrag einer Referenzanlage mit PV-Modulen aus kristallinem Silizium mit Standort Rapperswil SG in der Schweiz (typisches Mitteleuropäisches Klima, Koordinaten OL=-8.82, NB=47.23) und einer südorientierten Montage mit 30° Neigung.

Der Glaswirkungsgrad ist das Produkt einzelner, die oben aufgeführten unterschiedlichen Glaseigenschaften beschreibender Faktoren. Alle einzelnen Faktoren, und damit auch der gesamte

Glaswirkungsgrad  $\eta_{GL,PV}$ , sind derart definiert, dass diese proportional zum simulierten Jahresertrag einer Referenzanlage sind:

$$\eta_{GL,PV} = F_{t,PV} \cdot F_{IAM,PV} \cdot F_{UV,PV} \quad (2.1)$$

Die technischen Erklärungen und genauen Definitionen der drei Faktoren sind in den Annexes A - C zu finden. Diese Faktoren sind so bestimmt, dass sie denselben Einfluss auf den Jahresertrag der oben beschriebenen Referenzanlage haben. Ein PV-Glaswirkungsgrad von 1 entspräche einem Modul mit einer fiktiven Abdeckung ohne Reflexions- und Absorptionsverluste welche die winkelabhängige Sensitivität einer nur mit Einbettungsmaterial abgedeckten c-Si Solarzelle nicht beeinflusst und welche im Laufe der Zeit keine Fotodegradation aufweist.

### 3 Zertifizierung

#### 3.1 Allgemeines

Die Rechte und Pflichten im Rahmen der Zertifizierung sowie die Gültigkeit des Zertifikates sind vertraglich zwischen dem Institut für Solartechnik SPF und dem Glashersteller festgeschrieben. Als Hersteller können auch Vertreiber oder OEM Hersteller auftreten. Die Verpflichtungen bezüglich der Einhaltung der Regeln der Zertifizierung gelten dabei uneingeschränkt.

Die zertifizierten Solargläser werden im Internet unter [www.solarenergy.ch](http://www.solarenergy.ch) publiziert. Eine Zertifizierung ohne Publikation ist ausgeschlossen. Neben Namensnennung und Bezugsquelle werden auch die wichtigsten optischen Kennzahlen sowie die Leistungsklasse, der das Glas zugeordnet wird, dargestellt.

#### 3.2 Klasseneinteilung und Kennzeichnung

Für die Zertifizierung wird das Glas einem der drei folgenden Glastypeen zugeordnet:

Px: Unbehandeltes Solarglas

PC: Farbbeschichtetes Solarglas

Rx: Einseitig behandeltes AR-Solarglas

Innerhalb dieser Glastypeen werden dann gemäss den unten folgenden Tabellen je vier Leistungsklassen unterschieden. Aufgrund des ermittelten Wirkungsgrades wird das Glas dann entsprechend klassifiziert:

<b>P unbehandelte Gläser</b>				
Klasse P1		$\eta_{GL,PV}$	$\geq$	0.940
Klasse P2	0.940	$>$	$\eta_{GL,PV}$	$\geq$ 0.925
Klasse P3	0.925	$>$	$\eta_{GL,PV}$	$\geq$ 0.910
Klasse P4	0.910	$>$	$\eta_{GL,PV}$	$\geq$ 0.890
Kein Solarglas	0.890	$>$	$\eta_{GL,PV}$	

Tabelle 1: Klasseneinteilung unbehandeltes Glas

<b>P farbbeschichtete Gläser</b>				
Klasse PC	0.0	$>$	$\eta_{GL,PV}$	$\geq$ 1.000

Tabelle 2: Klasseneinteilung farbbeschichtetes Glas

<b>R einseitig AR-behandelte Gläser</b>				
Klasse R1			$\eta_{GL,PV} \geq$	0.980
Klasse R2	0.980	>	$\eta_{GL,PV} \geq$	0.965
Klasse R3	0.965	>	$\eta_{GL,PV} \geq$	0.950
Klasse R4	0.950	>	$\eta_{GL,PV} \geq$	0.925
Kein Solarglas	0.925	>	$\eta_{GL,PV}$	

Tabelle 3: Klasseneinteilung AR-behandeltes Solarglas

Das Glaszertifikat weist einen Wert aus, der sich aus dem Glastype und der erreichten Leistungsklasse zusammensetzt (z.B. **R4** entspricht einem AR-behandeltem Glas der Klasse 4). Unter einem gewissen Schwellenwert werden die Gläser nicht mehr als Solarglas bezeichnet.

### 3.3 Zertifikatbezeichnung

Für jedes zertifizierte Glas wird eine eindeutige Zertifikatbezeichnung erstellt die alle relevanten Eigenschaften in Kurzform beinhalten. Die entsprechenden Angaben und Abkürzungen lauten:

Zertifikatkennung : SPF  
Zertifikatnummer : Jahr (2 Stellen) • Laufnummer (3 Stellen)  
Klasse : gemäss Tabellen 1, 2 oder 3

Beispiel einer kompletten Kennzeichnung:

**SPF19•999-R3:** Glas mit Testnummer 999, geprüft im Jahr 2019, Anti-Reflex behandeltes Glas der Leistungsklasse 3

### 3.4 Gültigkeit

Die erteilten Glaszertifikate sind grundsätzlich während 3 Jahren gültig. Der Zertifikatinhaber verpflichtet sich dafür Sorge zu tragen, dass unter dem erteilten Zertifikat nur die entsprechenden Gläser vertrieben werden. Bei unstatthafter Verwendung, insbesondere dann wenn die Gewissheit besteht, dass nicht zertifizierte Gläser mit einem SPF Zertifikat vertrieben werden, können Zertifikate jederzeit und ohne Vorwarnung für ungültig erklärt und gelöscht werden. Der Zertifikatinhaber wird darüber informiert, es besteht aber kein Anspruch auf Rückerstattung der Zertifizierungskosten.

## Annex A: Der Transmissionsfaktor $F_{\tau, PV}$

Der Transmissionsfaktor  $F_{\tau, PV}$  quantifiziert den Einfluss des solaren Transmissionsgrades auf den Ertrag eines typischen c-Si PV-Modules. Er wird wie folgt bestimmt:

$$F_{\tau, PV} = \tau_{cSi} \quad (A.1)$$

Dabei bezeichnet  $\tau_{cSi}$  den „direkt – hemisphärischen Transmissionsgrad bei nahezu senkrechtem Einfall mit einseitiger Grenzflächenkorrektur und c-Si-Wichtung“. Als Bezugsspektrum für die Wichtung wird das mit der spektralen Empfindlichkeit einer c-Si Zelle gewichtete Solarspektrum der Luftmasse 1.5 (AM1.5) der ISO9845-1 verwendet.

Da bei c-Si PV Modulen die Solarzelle optisch an die Glasrückseite gekoppelt ist, müssen für die Beurteilung der Glasqualität nur die Reflexionsverluste an der Glasvorderseite sowie die Extinktionsverluste im Glas (bzw. die interne Transmission) berücksichtigt werden. Durch die direkte Lamination der Solarzellen auf die Glasrückseite treten an dieser Grenzfläche nahezu keine Reflexionsverluste auf. Das direkt messbare Transmissionsspektrum  $\tau_{tot}(\lambda)$  eines Glases in Luft, welches neben der internen Transmission  $t(\lambda)$  auch die Reflexionsverluste der beiden Glas-Luft Grenzflächen ( $r_1(\lambda)$  und  $r_2(\lambda)$ ) beinhaltet, muss also um die Reflexion der zweiten Grenzfläche korrigiert werden. Diese Größen sind wellenlängenabhängig und werden spektral beurteilt, dies wird aber in der folgenden Notation aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht weiter dargestellt.

Unter der Annahme, dass bei allen Mehrfachreflexionen dieselbe Streuung auftritt, wird hierfür folgendes Modell verwendet:

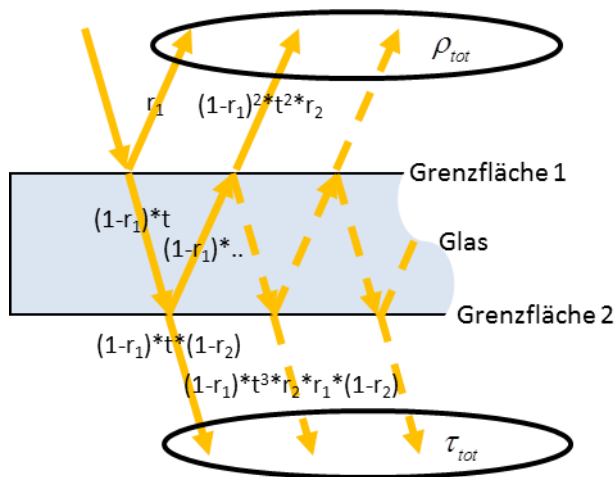


Abbildung 2: Skizze der transmittierten und reflektierten Strahlen für ein flaches Glas. Aus der Reflexion an der Grenzfläche 1 ( $r_1$ ), die Reflexion an der Grenzfläche 2 ( $r_2$ ) und die interne Transmission ( $t$ ) werden dargestellt.

Wie aus Abbildung 2 ersichtlich setzen sich die durch Messungen unmittelbar zugänglichen Größen der gesamten direkt-hemisphärischen Transmission  $\tau_{tot}$  und der gesamten direkt-hemisphärischen Reflexion  $\rho_{tot}$  folgendermassen aus der Reflexion an der Vorderseite  $r_1$ , der internen Transmission im Glas  $t$  und der Reflexion an der Rückseite  $r_2$  zusammen:

$$\tau_{tot} = (1 - r_1)(1 - r_2)t \sum_{n=0}^{\infty} r_1^n r_2^n t^{2n} \quad (A.2)$$

$$\rho_{tot} = r_1 + (1 - r_1)^2 r_2 t^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_1^n r_2^n t^{2n} \quad (A.3)$$

wobei  $r_1$ ,  $r_2$  und  $t$  als durchschnittliche Werte für unterschiedlich gestreute Lichtstrahlen angesehen werden. Die Rechnung gilt nur unter der Annahme einer für alle Mehrfachreflexionen gleichen Streuung. Dies ist sowohl bei flachen als auch bei isotrop streuenden Oberflächen zutreffend. Bei nicht isotrop streuenden Oberflächen ist das Modell nicht ganz korrekt. Der auftretende Fehler bleibt unberücksichtigt, da er für typische Gläser weit unter der Unsicherheit der Messgrößen liegt.

Wird an der Rückseite des Glases (d.h. an der zweiten Luft-Glas Grenzfläche) eine Lichtfalle optisch angekoppelt, so wird dort  $r_2 = 0$  und, wie aus Gl. A.3 ersichtlich, wird dann die gemessene direkt-hemisphärische Reflexion mit Lichtfalle  $\rho_{tot,Lf} = r_1$ . Neben  $\rho_{tot}$  und  $\tau_{tot}$  kann unter Verwendung einer Lichtfalle auch  $\rho_{tot,Lf} = r_1$  (die direkt-hemisphärische Reflexion an der Grenzfläche 1) direkt gemessen werden. Die verbleibenden unbekannten Größen  $r_2$  und  $t$  können dann mittels der Glgn. A.2. und A.3. iterativ aus den Messgrößen  $\tau_{tot}$ ,  $\rho_{tot}$  und  $\rho_{tot,Lf}$  bestimmt werden. Die gesuchte einfach grenzflächenkorrigierte Transmission folgt unmittelbar aus Gl. A.2 mit  $r_2 = 0$ :

$$\tau_{Kor,G2} = (1 - r_1)t \quad (A.4)$$

Die einseitig grenzflächenkorrigierte Transmission wird spektral gemessen und mit einem typischen Solarspektrum und der Sensitivität einer typischen c-Si-Zelle gewichtet:

$$\tau_{cSi} = \frac{\int \tau_{Kor,G2}(\lambda) \cdot AM_{1.5}(\lambda) \cdot cSi(\lambda) \cdot d\lambda}{\int AM_{1.5}(\lambda) \cdot cSi(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (A.5)$$

Als solares Bezugsspektrum ( $AM_{1.5}(\lambda)$ ) wird das der Luftmasse 1.5 verwendet, wie dies in der ISO 9845-1<sup>1</sup> unter „hemispherical solar spectral irradiance“ zu finden ist. Zur Gewichtung der Empfindlichkeit einer typischen Solarzelle  $cSi(\lambda)$  wurde die von Thomas et al.<sup>2</sup> publizierte IQE (internal quantum efficiency) für typische polykristalline Si Zellen verwendet und angenommen, dass ein Photon nur ein Elektron-Loch Paar erzeugt. Die IQE wurde verwendet, da sie nicht von der Einbindung der Solarzelle ins Modul und der verwendeten Antireflexschicht abhängt und stellt das obere Limit der erreichbaren EQE (external quantum efficiency) dar. Eine Absorption durch Einbettungsmaterialien wurde nicht berücksichtigt, auch wenn das typische Einbettungsmaterial EVA hauptsächlich unterhalb von 400 nm einen Anteil des Lichtes absorbiert. Die Anteile unterhalb von 400 nm werden aber mit ca. 1.5 % auch so nur schwach gewichtet.

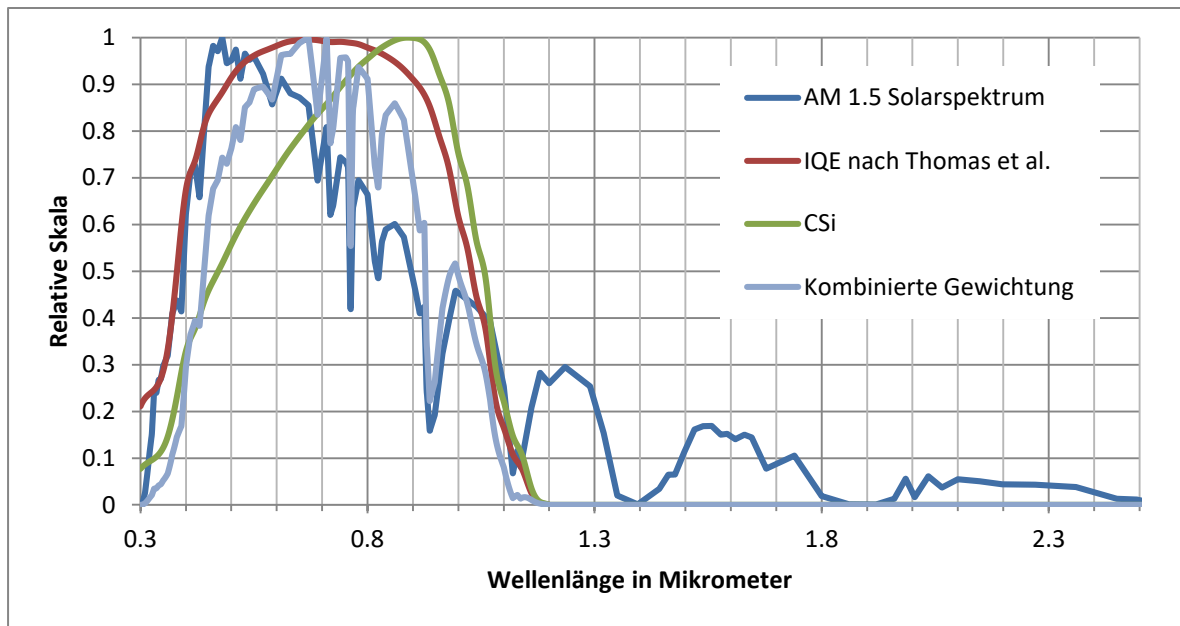


Abbildung 2 Darstellung der zur Gewichtung verwendeten Spektren (alle auf eine relative Skala normiert); Das AM 1.5 Standard Solarspektrum, die verwendete internal quantum efficiency (IQE) und die daraus resultierende Effizienz der Energieumwandlung (Gewichtungsspektrum cSi). Die ‚Kombinierte Gewichtung‘ entsteht durch die Überlagerung von cSi und AM 1.5 Gewichtung, wie sie durch Formel (A.5) auf das Glas angewendet wird.



## Annex B: Der Winkelgewichtungsfaktor $F_{IAM,PV}$

Der Winkelgewichtungsfaktor  $F_{IAM,PV}$  quantifiziert den Einfluss der winkelabhängigen Transmission auf den jährlichen Ertrag einer typischen PV-Anlage. Er wird folgendermassen definiert:

$$F_{IAM,PV} = \min([F_V^T + F_H^L], [F_V^L + F_H^T]) \quad (B.1)$$

wobei:

$$F_{Geo}^{Axis} = \sum_n (IAM_n^{Axis} / IAM_{ref,n}) \cdot S_n^{Geo} \quad (B.2)$$

und

$IAM_n^{Axis}$	IAM-Messwerte an der Winkelposition n bei optischer Koppelung des Testglases an die Messzelle.
$IAM_{ref,n}$	Referenz-IAM-Messwert der Messzelle in EVA eingebettet ohne Glasabdeckung.
$S_n^{Geo}$	Koeffizient für die Winkelposition n
$n = 0, \dots, 5$	Index der Winkelposition
$Axis \in (T, L)$	Achse des Glases auf die sich der gemessene IAM bezieht (Transversal, Longitudinal)
$Geo \in (V, H)$	Orientierung der entsprechenden Glasachse (vertikal, horizontal): horizontale Achse liegt parallel zur Erdoberfläche, vertikale Achse und Erdoberfläche bestimmen Anstellwinkel

Die Koeffizienten  $S_n^{Geo}$  geben den Anteil der jährlichen Einstrahlungssumme aus dem jeweiligen Einstrahlungswinkel (n) für ein südorientiertes Modul mit einer Neigung von 30° in Zentraleuropa (Standort Rapperswil SG, CH) wieder. Da die Montageorientierung von PV-Modulen im Normalfall nicht vorgegeben wird (portrait oder landscape), wird zur Bewertung des gemessenen Glases die schlechtere der möglichen Einbauvarianten verwendet. Die zu messenden Winkel und die dazugehörigen Koeffizienten  $S_n^{Geo}$  werden in Tabelle 2 angegeben.

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  $S_n^{Geo}$  geben den Anteil der jährlich aus einem bestimmten Winkel eintreffenden Einstrahlung für ein südorientiertes und mit 30° aufgeständertes Modul in Rapperswil SG, CH wieder.

Der Einfluss eines Glases auf das IAM-Verhalten von PV Modulen wird mittels einer Testzelle gemessen. Diese Testzelle verfügt über einen aktiven Bereich von 20x20mm. Als Lichtquelle wird ein auf etwa 60 mm Durchmesser aufgeweiteter, homogenisierter und kollimierter Lichtstrahl einer Laserdiode eingesetzt. Die Wellenlänge beträgt 650nm und liegt damit im Zentrum des verwendeten Gewichtungsspektrums (siehe Annex A). Wie anhand von Modellrechnungen und Messungen gezeigt werden konnte<sup>3</sup>, kann diese monochromatische Messung als repräsentativ für den gesamten relevanten Wellenlängenbereich angesehen werden.

Da das IAM-Verhalten stark durch die Polarisation des Lichtes beeinflusst wird, muss entweder vollständig unpolarisiertes Licht verwendet werden, oder der Mittelwert aus zwei Messungen mit um 90° gedrehter Polarisation gebildet werden. Als Referenzmessung wird das IAM-Verhalten der Messzelle (Polykristallines Silizium eines führenden Herstellers in 0.5mm EVA eingebettet) verwendet. Das Glas wird mittels eines Glycerinfilms an die EVA-Abdeckung der Zelle optisch angekoppelt. Die Gewichtungsfaktoren wurden anhand von Jahressimulationen ermittelt. Mit der Software Polysun 5<sup>4</sup> wurde die jährliche Strahlungsverteilung in Abhängigkeit des Einfallswinkels berechnet. Polysun 5 greift dabei auf Wetterdaten von Meteonorm 6<sup>5</sup> zurück. Dabei wird mit einer anisotropen Verteilung der Diffusstrahlung nach Perez et al.<sup>6</sup> gerechnet.

Die Summe der Einstrahlung, die während eines Jahres aus einem bestimmten Winkel auf das Modul trifft, ergibt den Gewichtungs-Koeffizienten  $S_n^{Geo}$  bei diesem Winkel n. Liegt der Einstrahlungswinkel zwischen den Stützstellen, wird die Strahlung linear auf die benachbarten Stützstellen aufgeteilt. So trägt beispielsweise Strahlung, welche unter einem Einfallswinkel von 10° auftrifft, zu zwei Dritteln zu einer Erhöhung des Koeffizienten bei 0° und zu einem Drittel zur Erhöhung des Koeffizienten bei 30° bei. Die gemessene Änderung der IAM-Sensitivität durch das angekoppelte Glas im Vergleich zur Messzelle (ohne Glas, nur Zelle in EVA eingebettet) bei einem bestimmten Einfallswinkel wird also mit der Strahlungssumme gewichtet, welche während eines Jahres aus diesem Winkel auf das Referenzmodul auftrifft.

Als Referenz wurde ein Modul am Standort Rapperswil (SG, CH) mit einem Neigungswinkel von 30° und südorientiert ausgewählt. Der Einfluss unterschiedlicher Ausrichtung und unterschiedlicher Standorte wurde untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass die räumliche Strahlungsverteilung für unterschiedliche Standorte (Madrid, Rapperswil, Freiburg und Stockholm) ähnlich ausfällt und auch unterschiedliche Ausrichtungen zu ähnlichen Koeffizienten führen. Lediglich für sehr steile Anstellwinkel (z.B. Fassadenintegration) sind im Vergleich zu einem Anstellwinkel von 30° deutliche Unterschiede in der Einstrahlungsverteilung auszumachen. Für die Bewertung der Gläser wird dieser Spezialfall aber nicht berücksichtigt, da es sich dabei um eine seltene Anwendung handelt.

### Annex C: Der Fotodegradationsfaktor $F_{UV,PV}$

Der PV-Fotodegradationsfaktor  $F_{UV,PV}$  beschreibt die Änderung des Transmissionsgrades der durch UV Strahlung ausgelösten Fotodegradation (Solarisation). Damit quantifiziert er den Einfluss der Fotodegradation auf den Jahresertrag einer PV-Anlage. Er wird wie folgt bestimmt:

$$F_{UV,PV} = \frac{\tau_{cSi}^{UV}}{\tau_{cSi}^{ref}} \quad (C.1)$$

Dabei bezeichnet  $\tau_{cSi}^{ref}$  den für Module mit kristallinen Siliziumzellen relevanten, einseitig grenzflächenkorrigierten Transmissionsgrad des unbelasteten Glases, wie er bereits im Kapitel 3 (Transmissionsfaktor) eingeführt wurde, und  $\tau_{cSi}^{UV}$  denjenigen, nachdem das Glas mit ultravioletter Strahlung belastet wurde. Eine Veränderung der Transmission ist dabei hauptsächlich auf Veränderungen der internen Transmission oder der Antireflexschicht auf der Glasvorderseite zurückzuführen. Diese kann auch in einer guten Näherung durch die Veränderung der direkt hemisphärischen Transmission ohne einseitige Grenzflächenkorrektur angenähert werden (siehe auch Formel A.2.):

$$\frac{\tau_{tot}^{UV}}{\tau_{tot}^{ref}} = \frac{(1-r_1^{UV})(1-r_2^{UV})t^{UV}}{(1-r_1^{ref})(1-r_2^{ref})t^{ref}} * \frac{(1+r_1^{UV}r_2^{UV}(t^{UV})^2 + \dots)}{(1+r_1^{ref}r_2^{ref}(t^{ref})^2 + \dots)} \quad (C.2)$$

Die Grössen in Formel C.2. Sind wellenlängenabhängig, dies wurde in der Notation zwecks Übersichtlichkeit nicht explizit dargestellt. Unter der Annahme, dass die Reflexionen an den Grenzflächen bei ca. 4% (für typische Gläser) oder deutlich darunter (für Antireflexschichten) liegen, kann gezeigt werden, dass die erste Mehrfachreflexion weniger als 1.6 Promille des direkt transmittierten Lichtstrahles ausmacht. Weitere Mehrfachreflexionen (wurden in der Formel C.2. nicht mehr ausgeschrieben) liegen im Tausendstel-Promille-Bereich und können vernachlässigt werden. Im Weiteren wird angenommen, dass sich die Reflexion an der unbeschichteten Glasrückseite  $r_2$  durch die UV-Exposition nicht verändert und sich somit der Term  $(1-r_2)$  in Gl. C.2 kürzen lässt. Somit ergibt sich ohne Berücksichtigung der Mehrfachreflexionen:

$$\frac{\tau_{tot}^{UV}}{\tau_{tot}^{ref}} \approx \frac{(1-r_1^{UV})t^{UV}}{(1-r_1^{ref})t^{ref}} * \frac{(1)}{(1)} = \frac{\tau_{Kor,G2}^{UV}}{\tau_{Kor,G2}^{ref}} \quad (C.3)$$

Und damit kann die Grenzflächenkorrigierte Transmission nach der UV-Exposition durch eine Korrektur der grenzflächenkorrigierten Transmission im Ursprungszustand angenähert werden:

$$\Rightarrow \tau_{Kor,G2}^{UV} \approx \tau_{Kor,G2}^{ref} * \frac{\tau_{tot}^{UV}}{\tau_{tot}^{ref}} \quad (C.4)$$

$\tau_{cSi}^{UV}$  kann somit nach Formel A.4. bestimmt werden. Durch diese Vereinfachung kann auf eine zweite Messung der direkt-hemisphärischen Reflexion mit und ohne Lichtfalle verzichtet werden. Der Fehler, der durch diese Vereinfachung in Kauf genommen wird, liegt bei weniger als 0.2 Promille bei einer Veränderung der internen Transmission um 5% über den gesamten Wellenlängenbereich (was im besten Fall noch zu einer Klassifizierung in der letzten Klasse führen würde). Eine Veränderung der Reflexion an der Vorderseite  $r_1$  ist bei antireflexbeschichteten Gläsern nicht auszuschliessen. Aber selbst bei einer gravierenden Veränderung der Antirefle-

xeigenschaften um  $\Delta r_1=0.02$  (was in etwa einer Halbierung des maximal möglichen Zugewinnes durch die Antireflexschicht entsprechen würde) liegt der Fehler, welcher durch diese Vereinfachung in Kauf genommen wird, deutlich unter einem Promille. Die Veränderung eines Testglases durch Solarisation (relativ zum Ursprungszustand) kann also auch ohne Grenzflächenkorrektur mit ausreichender Genauigkeit quantifiziert werden.

Die Strahlungsdosis für die Belastung soll mindestens  $80 \text{ kWh/m}^2$  für UVA und  $3 \text{ kWh/m}^2$  für UVB betragen. Diese Energie entspricht in etwa der UV Belastung während eines Zeitraumes von 1 Jahr in Zentraleuropa.

## **Annex D: Glaszertifikate als Grundlage für Qualitätssicherung**

Die SPF Glaszertifikate werden mittlerweile von vielen Herstellern von PV Modulen als Grundlage für die Qualitätssicherung verwendet. Damit diese Qualitätssicherung funktioniert, empfiehlt das SPF die folgenden Punkte zu beachten:

Die technischen Spezifikationen sollten explizit die Bezeichnung eines Glaszertifikates enthalten, so wie in Abschnitt 3.3 beschrieben. Es empfiehlt sich, darauf hinzuweisen, dass sowohl Material als auch Oberflächenstruktur dem zertifizierten Glas entsprechen müssen. In den vertraglichen Abmachungen (wie z.B. Lieferspezifikationen, Qualitätssicherungsvereinbarungen, Bestellungen, etc.) sollte die Pflicht zur Lieferung des zertifizierten Glases mit der entsprechenden Zertifikatsnummer verankert werden. Zur Absicherung oder im Rahmen der Wareneingangskontrolle wird dem Modulhersteller empfohlen, auch stichprobenartig Glasproben am SPF überprüfen zu lassen. Es wird empfohlen, nur Messungen des SPF als Referenzmessungen anzuerkennen. Damit kann eine sehr hohe Qualitätssicherheit erzielt werden.

Diese Empfehlungen betreffen ausschliesslich die optischen Eigenschaften des Glases. Weitere Aspekte wie zum Beispiel Massgenauigkeit oder Anforderungen betreffend Glashärtung sind in jedem Fall zusätzlich zu beachten.

## **Annex E: Weiterführende Dokumente und Informationen**

Glas im Bauwesen, Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas, Europäische Norm EN12150, Teil 1: Definition und Beschreibung

Glas im Bauwesen, Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronglas, Teil 5: Ornamentglas, Europäische Norm EN 572-5, November 1974

[www.spf.ch](http://www.spf.ch)

## Referenzen

---

<sup>1</sup> „ISO 9845-1:1992-10 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“, International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 1992.

<sup>2</sup> C.P. Thomas, A.B. Wedding and S.O. Martin, „Theoretical enhancement of solar cell efficiency by the application of an ideal ‘down-shifting’ thin film“, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 98, (2012): p.: 455–464.

<sup>3</sup> F. Ruesch, L. Omlin, S. Brunold, „Solarglas-PV- Schlussbericht“, Schweizerisches Bundesamt für Energie BFE, 2012.

<sup>4</sup> *Polysun 5.2 (developer Version)*, Velasolaris, 8400 Winterthur, Switzerland, [www.velasolaris.ch](http://www.velasolaris.ch)

<sup>5</sup> *Meteonorm 6.1*, METEOTEST, Bern, Schweiz, [www.meteonorm.com](http://www.meteonorm.com)

<sup>6</sup> R. Perez, R. Steward, C. Arbogast, R. Seals, J. Scott, „An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: Description, performance validation, site dependency evaluation“, *Solar Energy* 36, Nr. 6 (1986): p.: 481–497.