

# ENTWICKLUNG EINES NEUARTIGEN LICHT-TRANSMISSIONSENSORS

W. Mühleisen\*, T. Maier†, L. Neumaier\*, C. Hirschl\*

\*CTR Carinthian Tech Research AG, Europastraße 4/1, 9524 Villach /Austria

Tel.: +43 4242 56300238; e--mail: Wolfgang.muehleisen@ctr.at

†AIT Austrian Institute of Technology, Donau-City-Straße 1, 1220 Wien /Austria

Tel.: +43 50 5504303; e--mail: thomas.maier@ait.ac.at

**Kurzfassung** – Bei vielen lichtdurchlässigen Materialien ist oft die Frage, wieviel Licht prozentual hindurchgeht. Da es nicht nur glatte, sondern auch strukturierte transparente Materialien gibt, wurde ein neuartiger Sensor entwickelt, mit dem prinzipiell alle transparenten Materialien im Wellenlängenbereich zwischen 350 bis 1100 Nanometer charakterisiert werden können. In Voruntersuchungen wurden verschiedene Messsysteme auf ihre Tauglichkeit bezüglich glatten und diffus streuenden Oberflächen geprüft. Dabei kamen Standardmessgeräte wie ein Einstrahlungssensor, eine optische Integrationskugel (Ulbrichtkugel) oder ein Spektrometer zum Einsatz. Der anschließende Vergleich der Lichtdurchlässigkeit an verschiedenen Gläsern mit den geeigneten Standardmesssystemen und der Neuentwicklung zeigte die Vorteile des neuen Messsystems. Diese sind Preis, Systemgröße, Anwendbarkeit und Genauigkeit. Im Vergleich zu den am Markt üblichen Messgeräten erwies sich der neuartige Lichttransmissionssensor als praktikable Messalternative, wenn die spektrale Information nicht notwendig ist.

**Schlüsselwörter** – Transmissionsmessung, diffuse Materialien, Lichtsensor, Lichtdurchlässigkeitsgrad.

## I. EINLEITUNG

Das Vermessen lichtdurchlässiger Materialien wie Glas oder Kunststofffolien und die Bestimmung der Lichttransmission ist ein wichtiges Thema in der Photovoltaik und deren Effizienzsteigerung [1, 2]. Je höher die Transmission der Deckmaterialien, desto mehr Strom können die Solarzellen produzieren. In den letzten Jahren haben neue Produkte wie Antireflex-Glas (AR-Glas) oder tiefstrukturiertes Walzglas Einzug in den Markt erhalten. Auch neue Einbettungsfolien für Solarzellen im Modul sind entwickelt worden. Im Bereich Forschung und Entwicklung sind neue Felder entstanden, die eine korrekte Messung von sowohl verschiedenen Gläsern beziehungsweise Folien als auch Glas-Folien-Laminaten erforderten. Das Vermessen von beispielsweise planen Gläsern oder Kunststoffen wird von Standardmessgeräten erledigt, die eine Charakterisierung problemlos ermöglichen. Für diffuse Gläser werden spezielle Aufbauten benötigt.

Im Allgemeinen werden in Laboren zwei gängige Standardmethoden zur Transmissionsbestimmung genutzt. Möglichkeit eins für transparente und oberflächenglatte Materialien ist die Messung mittels eines Photospektrometers. Dabei wird Licht durch das Material auf einem Detektor hinter der Messprobe aufgefangen. Möglichkeit zwei für strukturierte und oberflächendiffuse Materialien stellt die aufwendige Messung über eine Ulbricht-Kugel dar [3]. Dabei wird diffus gestreutes Licht von der zu messenden Materialoberfläche hinter dieser in eine hochreflektiv innenbeschichtete Kugel gelenkt und so oft gestreut, dass ein gleichmäßiges Lichtfeld entsteht. Dieses Lichtfeld kann mittels eines Detektors gemessen werden. Bei beiden Standardmethoden errechnet man durch eine Referenzmessung in Luft die Transmission der Probe. Unter zusätzlicher Nutzung eines Monochromators und Spektrometers erhält man eine wellenlängenabhängige Transmissionsmessung. Der Nachteil einer Apparatur mit einer optischen Integrationskugel ist, dass diese relativ teuer, platzbeanspruchend und standortgebunden ist, zudem wird vom Anwender ein gewisses Maß an Erfahrung abverlangt.

Für die in der Photovoltaik Technologie genutzten Materialien wie Gläser und Einbettungsfolien interessiert sich der Modulhersteller im Allgemeinen nur für die Gesamttransmission. Das bedeutet, dass detaillierte Informationen zur Wellenlängenabhängigkeit nicht nötig sind. Ein kostengünstiges und unaufwendiges Messgerät mit großer Genauigkeit soll den Anforderungen zum Messen von transparenten Materialien mit glatten und rauen Oberflächen gerecht werden. Zusätzlich sollte dieser Sensor strukturierte Materialien schnell, präzise und ohne großen Aufwand sowohl unter freiem Himmel mit Sonnenlicht als auch im Labor mit künstlichem Halogenlicht vermessen können. Für alle diese Aufgaben ist ein großflächiger Sensor entwickelt worden. Dieser basiert auf dem Grundprinzip der proportionalen Wandlung von Licht in elektrischen Strom. Durch eine Relativmessung sind Kalibrationsschritte nicht erforderlich. Die Wahl der Lichtquelle steht dem Endbenutzer frei. Sonnenlicht wird in der Photovoltaik genutzt, dennoch ist es nicht immer verfügbar und kann nur sinnvoll bei blauem Himmel genutzt werden. Halogenlicht kann im Labor jederzeit genutzt werden, jedoch ist auf die Wärmeentwicklung und zeitliche Konstanz der Lichtleistung zu achten.

## II. THEORIE

Für die in der Photovoltaik benutzten Materialien wie Glas oder Folien bzw. Glas-Folien Laminare ist die Maximierung der Transmission das Ziel. Ein Material was transparent ist hat die Eigenschaft, dass von eingestrahltm Licht ein gewisser Teil reflektiert, absorbiert und durchgelassen wird. Die Summe aus Absorption, Reflexion und Transmission muss 1 ergeben (Abb. 1).

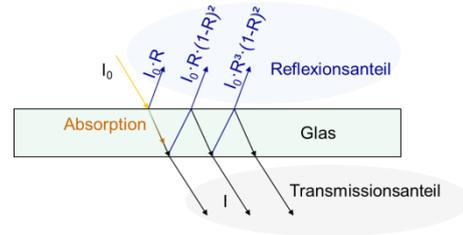


Abb. 1: Reflexion, Absorption und Transmission an Glas

Für die Absorption in einem Material steht das Beer'sche Gesetz:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (1)$$

wobei gilt

$I_0$  Lichtintensität vor Absorption in einem Material;  
 $I(x)$  Lichtintensität an der Stelle  $x$  im Material;  
 $\alpha$  Absorptionskoeffizient;  
 $x$  Materialdicke;

Zur Bestimmung der Absorption in einem Material wie Glas werden unterschiedliche Dicken benötigt. Durch Vermessung der Lichtintensität der unterschiedlichen Probendicken bei jeweils gleich bleibendem Reflexionsanteil kann der Absorptionskoeffizient ermittelt werden.

Um die Reflexion zu berechnen wird der Brechungsindex der beteiligten Medien benötigt. Das Reflexionsgesetz für senkrechten Lichteinfall nach Fresnel lautet:

$$R = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (2)$$

wobei gilt

$R$  Reflexion durch Brechungsindexdifferenz  
 $n_1$  Brechungsindex Luft = 1  
 $n_2$  Brechungsindex vom Material z.B. Glas = 1,5

aus dieser Gleichung folgt beispielsweise für Glas, dass pro Grenzfläche etwa vier Prozent der eingestrahltm Lichtmenge durch Reflexion verloren geht. Für die genaue Berechnung der Reflexion an Glas muss die Mehrfachreflexion berücksichtigt werden. Dieser Term steht in Gleichung (3) in eckiger Klammer.

Um die Transmission  $T$  zu bestimmen ist das Verhältnis aus Lichtintensität  $I$  zu Gesamtlichtintensität  $I_0$  zu bilden. Reflexions- und Absorptionsanteil sind dabei gegebenenfalls zu berücksichtigen. Da bei dünnen transparenten Gläsern die Absorption mit etwa einem Prozent relativ schwach ist, kann diese vernachlässigt werden.

$$I = I_0 - \left[ \begin{array}{l} (I_0 \cdot R) + (I_0 \cdot R \cdot (1 - R)^2) \\ + I_0 \cdot R^3 \cdot (1 - R)^2 \end{array} \right] \quad (3)$$

## III. EXPERIMENTELLER AUFBAU

### A. Problemstellung

Für die Vermessung verschiedener Gläser und Glas Folien Laminaten soll die Lichtdurchlässigkeit bestimmt werden, um das bestmögliche Produkt für die Photovoltaikanwendung zu identifizieren. Zur Verfügung standen verschiedene Glassorten (Abb. 2).

### B. Testsatz Gläser und Glas-Folien Laminare

- Eisenarmes Floatglas mit 3,0 mm Dicke
- Eisenarmes Floatglas mit 3,2 mm Dicke und Antireflexschicht (AR)
- Eisenarmes feinstrukturiertes Walzglas mit 3,2 mm Dicke und Antireflexschicht (AR)
- Tiefstrukturiertes Walzglas mit 4 mm Dicke
- Eisenarmes feinstrukturiertes Walzglas mit 3,2 mm Dicke

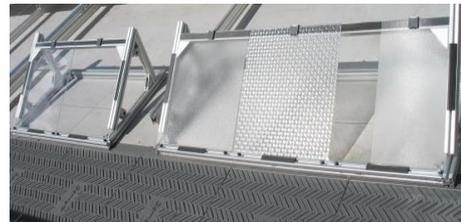


Abb. 2: Testsatz verschieden strukturierter Gläser

### C. Beschreibung der Versuche mit Problematik der jeweiligen Methode:

Test mittels Photospektrometer:

Messung verschiedener Glasproben mit einem Photospektrometer Cary 60 der Firma Agilent (Abb. 3). Das Gerät misst mittels zwei Siliziumdiodendetektoren gleichzeitig den Probenstrahl und einen Referenzstrahl. Aus der Differenz ergibt sich das Verhältnis der Lichtintensitäten. Um eine Wellenlängeninformation zu erhalten, wird ein Monochromator eingesetzt, der das Licht vorher spektral aufteilt.



Abb. 3: Photospektrometer Cary 60 von Agilent

Feststellung: Glatte Glasproben zeigen eine Transmission wie im Datenblatt des Herstellers angegeben. Strukturierte Gläser lassen sich nicht mit dem System vermessen, da durch die Strukturen der Messlichtstrahl umgelenkt und der Detektor nur noch teilweise erreicht wird. Auch Glas-Folien Lamine lassen sich aufgrund der Streuwirkung nicht vermessen.

Test mittels Einstrahlungssensor:

Die Glasproben mit verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten wurden mittels Einstrahlungsmessgerät in Form eines Siliziumdetektors vermessen (Abb. 4). Aus der Messung der senkrechten Einstrahlung zur Probe ohne und mit Glas wurde die Lichtdurchlässigkeit bestimmt.



Abb. 4: Einstrahlungssensor von HT Instruments

Feststellung: Glatte Glasproben zeigen eine Transmission wie im Datenblatt des Herstellers angegeben. Fein strukturierte Gläser und Glas-Folien Lamine lassen sich mit dem System auch vermessen, hingegen grob strukturierte Gläser nicht. Der Grund ist, dass die groben Strukturen und die resultierenden Lichtstremuster von der Detektorfläche nicht vollständig erfasst werden (Abb. 5).

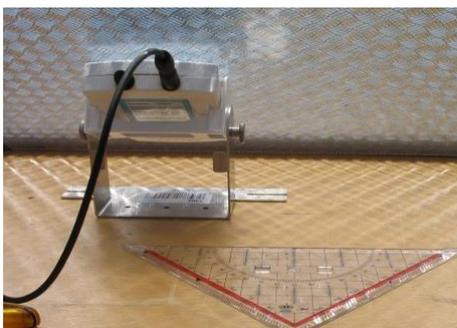


Abb. 5: Lichtstremuster grober Glasstruktur

Test mittels optischer Integrationskugel:

Da grob strukturierte Gläser sich schwer vermessen lassen wurden diese mit einer optischen Integrationskugel untersucht. Sowohl die Messungen mit Sonnen- als auch Halogenlicht waren reproduzierbar (Abb. 6 und Abb. 7).



Abb. 6: Optische Integrationskugel im Außentest

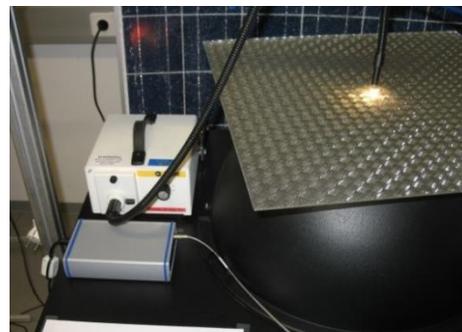


Abb. 7: Optische Integrationskugel im Labor

Der Test im Labor mit Halogenlicht zeigte, dass die Lichtstreuung an der groben Glasstruktur für eine akkurate Messung eine Herausforderung ist. Bereits eine leichte Schiefstellung der Lichtquelle führt zu einer niedrigeren Transmissionsmessung (Abb. 7).

Aufgrund aller dieser Erfahrungen mit Standardmessequipment ist der Gedanke entstanden einen großflächigen Detektor zu nutzen, der direkt hinter dem zu messenden Material alle Lichtstrahlen auffängt.

Test mittels großflächiger Siliziumsolarzelle als Detektor: Als geeigneten, neuartigen Lichttransmissionssensor stellen wir hier eine quadratische Solarzelle mit einer Kantenlänge von 15,6 cm vor (Abb. 8).

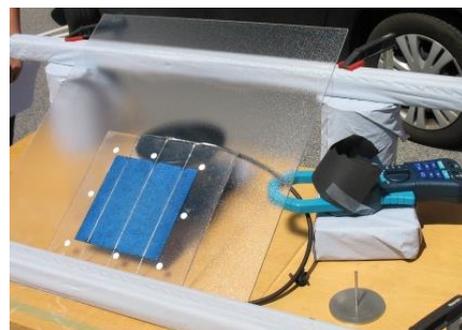


Abb. 8: Großflächiger Silizium Detektor

Der Vorteil hierbei ist die große Detektorfläche von 243 cm<sup>2</sup>, was sowohl für Transmissions-Messungen von glatten als auch rauen Materialien sehr gut geeignet ist. Für die Messung werden die zu untersuchenden Materialien knapp vor den großflächigen Solarzellensensor gehalten. Bei strukturierten oder rauen Oberflächen, die Licht stark streuen, werden die gestreuten Lichtstrahlen aufgrund der großen Detektorfläche auch aufgefangen.

#### Messablauf und Evaluierung:

Die eigentliche Messung wird durch die kurzgeschlossene Solarzelle realisiert. Dabei ist der Kurzschlussstrom zum Lichtstrom proportional. Mittels Strommesszange wird der Kurzschlussstrom durch das sich einstellende Magnetfeld kontaktlos ermittelt. Bei Lichteinstrahlung von 1000 Watt pro Quadratmeter kann ein Kurzschlussstrom von etwa 8,80 A gemessen werden. Die Messung mit der Stromzange ist sehr komfortabel da z.B. keine Zuleitungs-, Kontakt- oder Messwiderstände in einem Messgerät berücksichtigt werden müssen.

#### IV. ABSCHÄTZUNG DES FEHLERS

In dem Messaufbau mit dem neuartigen großflächigen Solarzellendetektor können Fehler auftreten, die näher betrachtet werden sollten. Die Stromzange hat eine maximale Ungenauigkeit von etwa 1 %. Da relativ gemessen wird ist dieser Fehler zu vernachlässigen. Beim Messen muss auf eine konstante Temperatur zwischen den einzelnen Messungen geachtet werden da die eingesetzte Silizium Solarzelle laut Herstellerdatenblatt pro Grad Celsius Erwärmung 4 mA mehr Strom ausgibt. Eine Erwärmung um 3 K würde also ebenfalls etwa 1 % Fehler verursachen. Da beim Messen der Sensor erst ins thermische Gleichgewicht gebracht wird, ist dieser Fehler eher zu vernachlässigen. Bei Messungen mit transparenten Materialien vor dem Sensor können Mehrfachreflexionen auftreten und so das Messergebnis beeinflussen. Eine Abschätzung des Fehlers durch Mehrfachreflexion zeigt bei gängiger Annahme von 8 % Reflexion [4] an der Messsolarzelle und 7,6 % an der glatten Glasscheibe eine Überschätzung der Transmission von 0,6 %. Bei einseitig strukturierten Glasflächen unter Annahme von 6 % Reflexion wäre die Überschätzung bei etwa 0,48 %. Die durchzuführende Korrektur zwischen glattem und einseitig strukturiertem Glas wäre etwa 0,1 %. Dieser Wert liegt innerhalb der Messtoleranz und kann vernachlässigt werden.

#### V. ERGEBNIS

Der Wellenlängenbereich, der von einer Silizium Solarzelle erfasst wird erstreckt sich etwa von 300 nm bis 1100 nm. Hier wird teils der UV Bereich, der komplette sichtbare Bereich als auch teils der nahe Infrarotbereich erfasst. Für den Vergleich an glatten beziehungsweise streuenden transparenten Materialien wie Glas oder Glas-Folienlaminaten wurde sowohl Sonnenlicht als auch

Halogenlampenlicht verwendet. In *Tabelle 1* und *Tabelle 2* sind die Messergebnisse für verschiedene Gläser und Glas-Folien Laminaten dargestellt. Um die Genauigkeit des neuen Sensors zu evaluieren, ist die bewährte Standardmethode mittels Integrationskugel gegenübergestellt.

*Tabelle 1: Messung diverser Glastypen*

Glassorte	243 cm <sup>2</sup> Si Detektor – Sonne [%]	Integrationskugel – Sonne [%]	Integrationskugel – Halogen [%]
glatt 3,0 mm	91,7 ± 0,5	91,8 ± 0,1	91,8
AR glatt 3,2 mm	94,8 ± 0,2	94,6 ± 0,3	94,9
AR feine Struktur 3,2 mm	95,1 ± 0,2	95,3 ± 0,2	94,9
feine Struktur 3,2 mm	93,4 ± 0,2	93,0 ± 0,4	91,4
Grobe Struktur 4 mm	93,9 ± 0,4	93,0 ± 0,1	92,6

*Tabelle 2: Messung diverser Glas-Folien Laminaten*

Glassorte mit auflaminiertes Einbettungsfolie	243 cm <sup>2</sup> Si Detektor – Sonne [%]	Integrationskugel – Sonne [%]	Integrationskugel – Halogen [%]
glatt 3,0 mm	90,8 ± 0,3	91,8 ± 0,3	91,2
AR glatt 3,2 mm	93,5 ± 0,3	94,2 ± 0,3	94,4
AR feine Struktur 3,2 mm	93,7 ± 0,2	94,7 ± 0,3	94,0
feine Struktur 3,2 mm	91,3 ± 0,3	92,1 ± 0,3	92,0
Grobe Struktur 4 mm	93,1 ± 0,4	93,6 ± 0,3	92,7

An den Resultaten ist zu sehen, dass für glatte Gläser sowohl die Standardmethode (Ulbricht-Kugel) als auch der neuartige Sensor praktisch gleiche Werte erzielen. In der Diskussion ob Sonnenlicht oder Halogenlicht besser ist, hat sich gezeigt, dass beides als Lichtquelle dienlich ist. Somit fällt der kleine spektrale Unterschied nicht ins Gewicht. Sobald strukturierte Gläser beziehungsweise streuende Glas-Folien Laminaten verglichen werden, beginnen die Werte um etwa ein Prozent zu variieren. Zu erkennen ist auch, dass der großflächige Solarzellendetektor etwas konsistentere Ergebnisse liefert als die Integrationskugel. Dies ist daran festgemacht, dass im Messverlauf von reinen Gläsern zu Glas-Folien Laminaten eine Senkung der Transmission erfolgen muss. Dieser Fakt ist für die Messungen mit der Integrationskugel nicht immer der Fall.

## VI. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde ein neuartiger Lichttransmissionssensor zur Vermessung von transparenten Materialien wie Glas oder Glas-Folien-Lamine vorgestellt. Der Sensor deckt den spektralen Bereich von 300 – 1100 nm ab. In den Versuchen zeigte der 243 cm<sup>2</sup> großflächige Detektor in Form einer Standardsolarzelle seine Vorteile an oberflächenrauen, diffusen transparenten Materialien, die ohne Sonderequipment nicht vermessen werden konnten. Das einfache Messprinzip der Relativmessung mittels Sonnenlicht oder wahlweise Labor Halogenlicht ermöglichen eine präzise und schnelle Charakterisierung von Proben. Vergleichend zu üblichen Standardmethoden zeigte sich der vorgestellte Sensor gleichwertig, wenn die spektrale Information nicht benötigt wird und nur die integrale Lichtdurchlässigkeit von Interesse ist. Unter Beachtung von theoretischen Aspekten und Fehlerabschätzung, konnte auch die absolute Transmission im Bereich 300 – 1100 nm an glattem Glas ermittelt werden, die mit der Angabe im Herstellerdatenblatt übereinstimmte. Im Umgang mit allen benutzten verschiedenen Messgeräten zeigte sich, dass der neuartige Lichttransmissionssensor einfach in der Handhabung und Bedienung ist.

## VII. REFERENZEN

- [1] ISO 9050:2003, -- Glas im Bauwesen - Bestimmung von Lichttransmissionsgrad, direktem Sonnenlichttransmissionsgrad, Gesamttransmissionsgrad der Sonnenenergie und Ultravioletttransmissionsgrad sowie der entsprechenden Verglasungsfaktoren
- [2] DIN EN 410:2011-04 -- Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen
- [3] DIN EN ISO 13696:202 -- Optik und optische Instrumente - Bestimmung von Streustrahlung, hervorgerufen durch optische Komponenten
- [4] M.H. Kang, A. Ebong, B. Rounsaville, A. Rohatgi, J. Hong; "Optimization of Silane Free PECVD SiC<sub>x</sub>N<sub>y</sub> as Passivation and Antireflection Coating of Silicon Solar Cell", 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany

## VIII. LEBENSLAUF

Wolfgang Mühleisen arbeitet seit 2010 bei der CTR Carinthian Tech Research AG im Bereich Solarzellen- und Solarmodulentwicklung. Neben der beruflichen Karriere her wurde 2012 ein berufsbegleitendes Studium „Electrical Energy and Mobility Systems“ (EEMS) an der FH Kärnten zum Maser of Science (M.Sc.) absolviert.