

Albedo-Bestimmung von photovoltaisch relevanten Materialien

Daniel Fluhr¹, Stefan Krischok¹

¹ Institut für Physik und Institut für Micro- und Nanotechnologie MacroNano,
Technische Universität Ilmenau, 98693 Ilmenau, Deutschland

Abstract

In der vorliegenden Arbeit wurde der räumlich integrierte Reflexionsgrad von Materialien untersucht, die als Hintergrund für bifaciale Solarzellen eingesetzt werden könnten. Dabei wurden eine weiße Dachbahn, eine Dachpappe, eine weiße Reflexionsfolie und eine silberne Reflexionsfolie für die Eignung als Rückreflektoren untersucht, sowie in wie weit sich ein schwarzer Bühnenmolton als Lichtfalle für Charakterisierungsaufbauten eignet. Dabei wurde zwischen dem spektral gemittelten Reflexionsgrad und einem durch das Sonnenspektrum gewichteten gemittelten Reflexionsgrad unterschieden. Diese Unterscheidung zeigt, dass bei Materialien mit starken spektralen Änderungen des Reflexionsgrades, eine Über- oder Unterschätzung des Materials bezüglich seiner Tauglichkeit als Reflektor, im photovoltaischen Bereich, durch eine Reine Mittelung des Reflexionsgrades, auftreten kann. Für alle untersuchten Materialien würde, im für Silizium Solarzellen relevanten Bereich, die direkte und die diffuse Reflexion bestimmt.

1. Einleitung

Bifaciale Solarzellen haben gegenüber den weit verbreiteten monofacialen Solarzellen den Vorteil, dass sie Licht von beiden Seiten der Zelle zur Energiekonvertierung verwenden. Damit kann nicht nur das direkte Licht der sonnenzugewandten Seite umgesetzt werden, sondern auch Licht, welches durch Reflexion in der Umgebung direkt oder diffus auf die Rückseite der Zelle bzw. des Moduls fällt. Damit sind Effizienzsteigerungen bis zu 50% möglich [1]. Es erschließt sich leicht, dass die Beschaffenheit der Umgebung um die installierten Photovoltaik-Anlagen einen wesentlichen Einfluss auf die Energieausbeute solcher Anlagen hat: Stark reflektierende Hintergründe ermöglichen einen beträchtlichen Beitrag der rückseitig eingestrahlt Leistung. Mit dieser Abhängigkeit der Effizienz von der Bestrahlung auf Vorder- und Rückseite geht auch ein Problem bei der Charakterisierung der Zellen und Module einher. Es zeigt sich, dass es von Vorteil ist, wenn beide Seiten unabhängig voneinander mit Licht bestrahlt werden können. Damit ergibt sich die Notwendigkeit, Materialien mit geringer Reflektivität zur Verfügung zu haben, mit denen entsprechende Teststände aufgebaut werden können. Andererseits sind bei Photovoltaik-Anlagen Materialien gefragt, die eine hohe Reflektivität (Albedo) aufweisen. Im Allgemeinen sind sowohl die direkte Reflektivität unter dem Glanzwinkel, wie auch die diffuse Reflektivität von Interesse, z.B. als Eingangsparameter für Energieertragssimulationen.

In dieser Arbeit wurden zwei Arten der Reflektivität bestimmt, die direkte Reflektivität unter senkrechtem Einfall und die diffuse Reflektivität unter nahezu senkrechtem Einfall. Dazu wurde eine Reihe von Materialien untersucht, die als Hintergrund für Photovoltaik-Anlagen in Frage kommen, sowie ein Material, das ggf. zur Konstruktion eines Messstandes in Frage kommt.

Abb. 1 zeigt jeweils eine Probe der untersuchten Materialien, im Einzelnen sind das: a) weiße Dachbahn in neuwertigem Zustand, b) Dachbahn in verwittertem Zustand nach 9 Monaten, c) Dachpappe, d) weiße Folie, e) silberne Folie, f) schwarzes Bühnenmolton. Die Dachbahn ist von der Firma Renolit mit dem Namen Alkorbright [2]. Die Verwitterung bestand in einer 9 monatigen Lagerung im Freien ohne Reinigung.

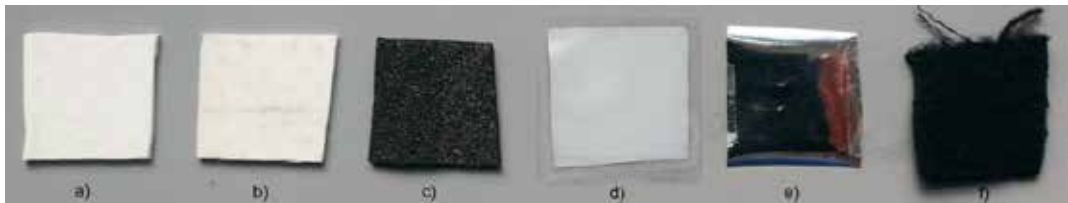


Abb. 1: Untersuchte Materialien: weiße Dachbahn a), weiße Dachbahn verwittert b), Dachpappe c), weiße Reflexionsfolie d), silberne Reflexionsfolie e), schwarzes Bühnenmolton f)

2. Messungen

An jeder Probe wurden drei unterschiedliche Messungen durchgeführt. In einem Varian Cary 5000 wurde, mit einem DRA 2500 Modul, wurden diffuse Reflexion und die Summe aus diffuser und direkter Reflexion gemessen. Das Messgerät erlaubt einen Messbereich von 200 – 2500 nm Anregungswellenlänge. Zur Messung der diffusen Reflexion, wird die Probe unter 0° Einfallswinkel bestrahlt, dadurch verlässt die direkte Reflexion die zur räumlichen Integration verwendete Ulbrichtkugel durch das Eintrittsloch wieder und wird somit nicht mit erfasst. Zur Messung der kombinierten Reflektivität, wurde durch Kippen der Probe um $3,3^\circ$ erreicht, dass bei einer weiteren Messung, der direkte Anteil mit auf die Ulbrichtkugel fällt und mit erfasst wird.

Die dritte Messung bestand darin, die direkte Reflektivität der Probe zu bestimmen. Dies geschah in einem optischen Eigenaufbau. Dabei wird Licht aus einer Halogenlampe in einem Monochromator spektral aufgespalten, anschließend durch einen Chopper zu einem rechteckigen Wechselsignal bei 160 Hz moduliert und unter nahezu 0° Einfallswinkel auf die Probe fokussiert. Die Rückreflexion wird durch einen Spiegel und eine Linse auf einen siliziumbasierten Halbleiterdetektor abgebildet. Das Kurzschlussstromsignal des Detektors wird anschließend durch einen Lock-In-Verstärker ausgewertet. Zur Bestimmung des Reflexionsgrades werden die Signale auf die Kalibrationsmessung einer Siliziumprobe mit bekannten Reflexionsgrad bezogen.

3. Ergebnisse

Der für Si-Solarzellen relevante Wellenlängenbereich ist durch dessen externe Quanteneffizienz gegeben und reicht von 380 nm bis 1100 nm. In den nachstehenden Abbildungen sind alle drei Messungen für jedes Material in folgenden Farben dargestellt: die integrale Messung mit direkter Reflexion, auch als kombinierte Messung bezeichnet (schwarz), die Messung ohne direkter Reflexion (rot) und die Messung der direkten Reflexion (grün). Zusätzlich zu diesen drei Messungen ist auch die Differenz zwischen der integralen Messung mit direkter Reflexion und der Messung ohne direkter Reflexion gezeigt (blau). Diese Auswertung liefert ebenso die direkte Reflektivität der Probe, hat dabei aber einen deutlich größeren Akzeptanzwinkel als die direkte Messung, d.h. nur geringfügig gestreute Anteile werden mit registriert.

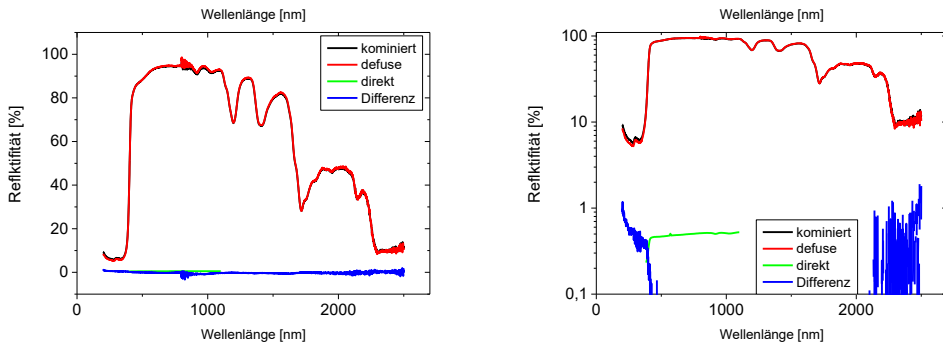


Abb. 2: Reflektivität der weißen Dachbahn (vgl. Abb. 1a). Links linear, rechts logarithmisch, Bezeichnungen vgl. Text

Ab 400 nm zeigt sich bei der Reflektivität der weißen Dachbahn (Abb. 2) ein starker Anstieg der diffusen Reflexion auf über 80%, im Mittel weist das Material im Bereich von 380 – 1100 nm eine durchschnittliche diffuse Reflexion von 90% auf. Eine direkte Reflexion ist mit unter 1% zu vernachlässigen.

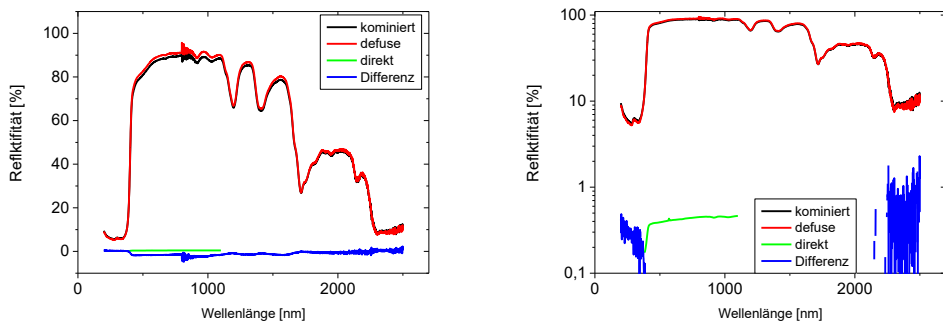


Abb.3: Ergebnisse für die weiße Dachbahn in verwittertem Zustand (vgl. Abb. 1b). Links linear, rechts logarithmisch, Bezeichnungen vgl. Text

Ab 400 nm zeigt sich bei der verwitterten weißen Dachbahn (Abb. 3) ein starker Anstieg der diffusen Reflexion auf über 80%, im Mittel weist das Material im Bereich von 380 – 1100 nm eine durchschnittliche diffuse Reflexion von 85% auf, dabei ist eine direkte Reflexion zu vernachlässigen. Es zeigt sich ein Rückgang der Reflektivität auf Grund der Verwitterung von 5% gegenüber der neuen Dachbahn.

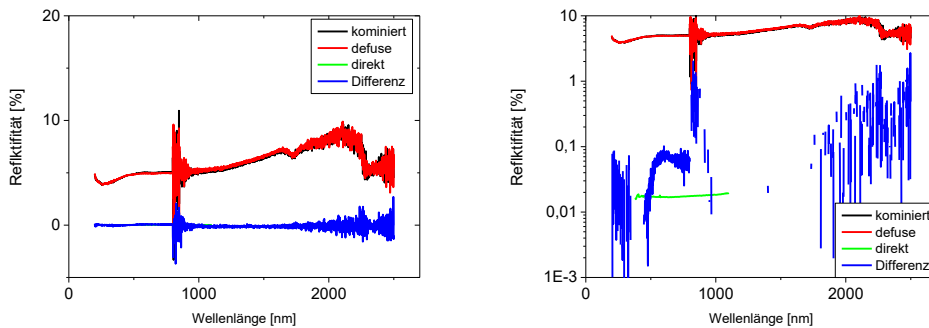


Abb.4: Ergebnisse der Reflektivitätsmessung für die schwarze Dachpappe (vgl. Abb. 1c). Links linear, rechts logarithmisch, Bezeichnungen vgl. Text

Im Mittel weist die schwarze Dachpappe (Abb. 4) im Bereich von 380 – 1100 nm eine durchschnittliche diffuse Reflexion von 5% auf, auch hier ist eine direkte Reflexion mit unter 1% zu vernachlässigen.

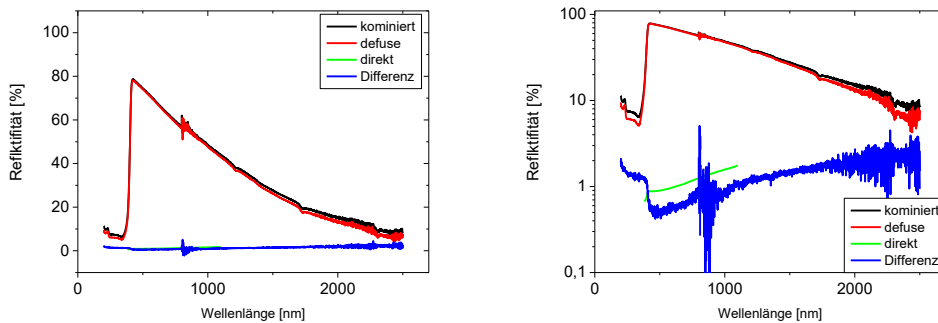


Abb.5: Ergebnisse der Reflektivitätsmessung für die weiße Reflexionsfolie (vgl. Abb. 1d). Links linear, rechts logarithmisch, Bezeichnungen vgl. Text

Ab 400 nm zeigt sich für die weiße Reflexionsfolie ein starker Anstieg der diffusen Reflexion auf ein Maximum von 78% bei 420 nm. Dieser Wert nimmt über das sichtbare und NIR Spektrum kontinuierlich bis auf einen Wert von 43% bei 1100 nm ab. Im Mittel weist das Material im Bereich von 380 – 1100 nm eine durchschnittliche diffuse Reflexion von 60% auf. Die direkte Reflexion beträgt 1%.

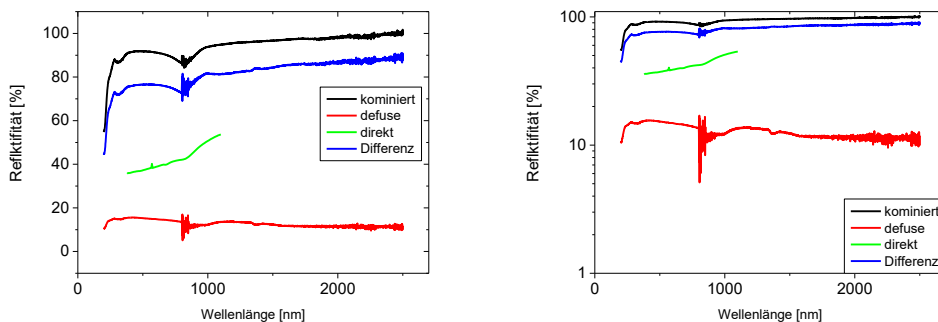


Abb.6: Ergebnisse der Reflektivitätsmessung für die silberne Reflexionsfolie (vgl. Abb. 1e). Links linear, rechts logarithmisch, Bezeichnungen vgl. Text

Ab 200 nm zeigt sich für die silberne Reflexionsfolie ein starker Anstieg der Reflexion. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen der Messung mit direkter Reflexion (rot) und ohne direkte Reflexion (gelb), was auf einen hohen Anteil gerichteter Reflexion schließen lässt. Durch den Vergleich der Differenzkurve (violett) und der direkten Reflexion (blau) zeigt sich, dass der direkte Reflexionsanteil nicht vollständig gerichtet ist, sondern deutlich aufgeweitet. Die Messung mit kleinem Akzeptanzwinkel zeigt ca. 40%, die Messung mit größerem Akzeptanzwinkel ca. 75% Reflektivität. Im Mittel weist das Material im Bereich von 380 – 1100 nm eine durchschnittliche diffuse Reflexion von 10% und eine kombinierte Reflexion von 90% auf.

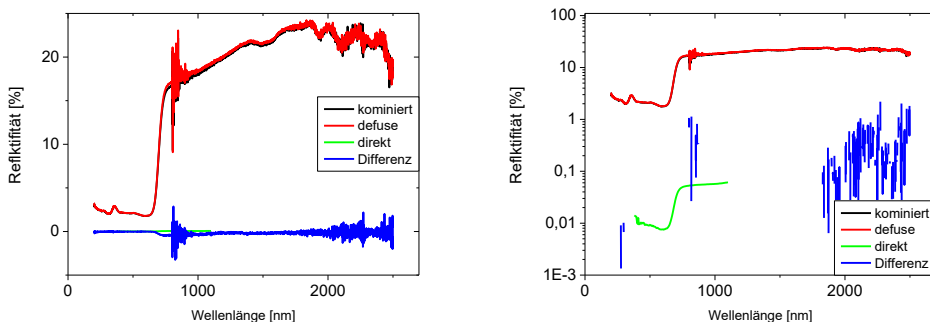


Abb.7: Ergebnisse der Reflektivitätsmessung für das schwarze Bühnenmolton (vg. Abb. 1f). Links linear, rechts logarithmisch, Bezeichnungen vgl. Text

Im Spektralbereich bis 660 nm bleibt die Reflektivität des schwarzen Bühnenmoltons unter 3% (Abb. 7). Zwischen 650 nm und 750 nm zeigt sich ein Anstieg der diffusen Reflexion auf einen Werte über 15%. Dieser Wert nimmt über das NIR Spektrum kontinuierlich bis über 1100 nm leicht zu. Im Mittel weist das Material im Bereich von 380 – 1100 nm eine durchschnittliche diffuse Reflexion von 10% auf. Die direkte Reflexion beträgt unter 1%.

4. Potenzial der untersuchten Materialien zur Leistungsreflexion auf die Rückseite von bifacialen Zellen

Der gemittelte Reflexionsgrad sagt aus, wie viel Licht reflektiert wird unter der Annahme einer spektralen Gleichverteilung der auftreffenden Intensität. Da die Intensität im Sonnenspektrum aber nicht gleich verteilt ist, stellt ein Leistungsreflexionsgrad, bei dem die Mittelung der Reflektivität durch das AM1.5 Spektrum gewichtet wird eine bessere Kenngröße dar. Die gesamte Intensität des AM1.5 Spektrums im Wellenlängenbereich zwischen 380 – 1100 nm beträgt ca. 772 W/m². Im Weiteren wurde im Rahmen dieser Untersuchung die reflektierte Strahlungsleistung, bei Bestrahlung unter AM1.5, aus den spektralen Reflexivitätsgraden berechnet. Die spektral gemittelte Strahlungsleistung wurde mit dem gemittelten Reflexionsgrad verglichen, um zu zeigen in wie weit die spektrale Abhängigkeit des Reflexionsgrades hier Unterschiede aufzeigt. Dazu wurde das AM1.5 Spektrum mit der kombinierten Reflektivität der Proben spektral multipliziert und das Integral in Bezug zu 100% Reflektivität (772 W/m²) gesetzt. Daraus ergeben sich die in Tab. 1 gezeigten Werte.

Die Werte sind im Allgemeinen sehr ähnlich. Es zeigen sich Unterschiede zwischen dem kombinierten Reflexionsgrad und dem Leistungsreflexionsgrad bei den Proben mit einer starken Variation des spektralen Verlaufes der Reflexion im relevanten Bereich von 380 – 1100 nm (vgl. Abb. 5 und Abb. 7). Die weiße Reflexionsfolie (Abb. 5) zeigt eine starke Inhomogenität der Reflexion in diesem Bereich, dabei wird Licht im Bereich höherer Intensität um 500 nm überdurchschnittlich gut reflektiert. Entsprechend bewirkt, beim schwarzen Bühnenmolton (Abb. 7), der Anstieg der Reflektivität bei 700 nm einen höheren kombinierten Reflexionsgrad, als der entsprechende Leistungsreflexionsgrad, da die

Sonnenintensität ab 700 nm unterdurchschnittlich zum Rest des relevanten Bereiches ist.

Tab. 1: Übersicht des Reflexionsgrades und des kombinierten Reflexionsgrades

Probe	Leistungsreflexionsgrad	Kombinierter Reflexionsgrad
weiße Dachbahn in neuwertigem Zustand	90%	90%
Dachbahn in verwittertem Zustand nach 9 Monaten	84%	84%
Dachpappe	5%	5%
weiße Reflexionsfolie	63%	60%
silberne Reflexionsfolie	91%	91%
schwarzes Bühnenmolton	9%	11%

5. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der direkte und diffuse Anteil der Reflexion von mehreren in der bifacialen Photovoltaik relevanten Materialien untersucht. Diese Untersuchungen können als Grundlage für Energieertragssimulationen verwendet werden, bzw. inwieweit sich schwarzer Bühnenmolton als Verkleidung für Messstände bei der Charakterisierung von bifacialen Solarzellen und Modulen eignet. Dabei wurde insbesondere ein 5%iger Rückgang der Reflektivität der weißen Dachbahn bei Verwitterung gezeigt. Als diffuser Reflektor mit hoher Reflektivität zeigte sich die weiße Dachbahn. Die silberne Reflexionsfolie zeigte vor allem in UV-Bereich eine höhere Reflektivität als die anderen Proben, wobei diese Folie überwiegend direkt reflektiert. Die auf Dächern weit verbreitete Dachpappe zeigt wie erwartet mit nur 5% wenig Potenzial als bifacialer Hintergrund. Die weiße Reflexionsfolie zeigt zwar eine starke spektrale Abhängigkeit, hat dabei ihre hohen Reflexionswerte aber vor allem im Bereich hoher Sonnenintensität, wodurch der Leistungsreflexionsgrad über dem durchschnittlichen Reflexionsgrad liegt. Abschließend muss beim Blick auf den Bühnenmolton als Lichtsenke in Messaufbauten der Anstieg der Reflektivität im IR berücksichtigt werden.

6. Danksagungen

Dieses Projekt wird von der Europäischen Union (ESF) und dem Freistaat Thüringen (Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft) kofinanziert.

7. Literaturverzeichnis

[1] Cuevas et al., "50% more output power from an albedo collecting flat panel using bifacial solar cells" Solar Energy 1982, 29, 5, 419-420.

[2] renolit, <http://www.renolit.com/waterproofing-roofing/de/produkte/renolit-alkorbright/> aufgerufen am 15.12.2017