

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

---

### Schlussbericht

# Entwicklung von Modul- und Systemtechnologie sowie Charakterisierungsmethoden für bifaciale Solarzellen und - module

### Akronym: MOSBIT

Laufzeit: 01.05.2016 – 12.05.2017

Förderkennzeichen: 0324036B

Zuwendungsempfänger: SolarWorld Innovations GmbH  
Berthelsdorfer Straße 111A  
09599 Freiberg

Projektleiter: Dipl.-Phys. Martin Kutzer

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

---

### Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzdarstellung des Vorhabens .....	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	4
1.3	Planung und Ablauf .....	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Vorhabensbeginn.....	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	6
2.	Detaillierte Dokumentation der Ergebnisse .....	8
2.1	Teilprojekt 1 Modulcharakterisierung.....	8
2.2	Teilprojekt 2 Ertragsanalyse .....	13
2.3	Teilprojekt 3 Lebensdaueranalysen und- prüfung .....	21
2.4	Teilprojekt 4 Technologieentwicklung .....	23
2.5	Teilprojekt 5 Kostenanalyse.....	28
3.	Literatur.....	29

## **1. Kurzdarstellung des Vorhabens**

### **1.1 Aufgabenstellung**

Die bifaciale PV-Technologie im kompatiblen Modul- und Systemaufbau birgt das Potential eines bedeutenden Sprungs hinsichtlich Mehrertrag und Kostendegression. Das Projekt MOSBIT sollte sich der Methodenentwicklung zur umfassenden Modul- und Systemcharakterisierung sowie der Technologieentwicklung auf Modul- und Systemebene für eine bifaciale PV-Technologie auf PERC-Basis, mit Blick auf Leistung, Ertrag, Lebensdauer und Kosten widmen.

Als Basis für jegliche Qualifizierung sollten grundlegende Verfahren zur präzisen Laborcharakterisierung von bifacialen Modulen unter modifizierten STC-Bedingungen und für das erweiterte Energy-Rating entwickelt werden. Die Definition eines Leistungsäquivalents für bifaciale Module zum direkten Vergleich mit monofacialen Modulen, mit der Perspektive der Standardisierung in IEC-Normen war ebenfalls Aufgabe des Vorhabens. Für die produktionsbegleitende Modulcharakterisierung sollte ein Konzept für ein inline-fähiges Messverfahren erarbeitet werden.

Durch die Erweiterung bestehender Rechenmodelle für die Ertragssimulation auf Systemebene zur präzisen Berücksichtigung der rückseitigen Einstrahlung sollten präzise Ertragsmodelle entstehen, mit deren Hilfe der Aufbau und die Montage der Module optimiert werden sollten. Auf diese Weise sollten Systeme entwickelt werden, die sich durch eine Performance Ratio (PR) von mindestens 100% für bifaciale PV-Kraftwerke auszeichnen (bei 80% Moduleffizienzverhältnis hinten/vorne und einem Albedo von maximal 50%). Weiterhin galt es Ertragsprognosen für repräsentative Standortklassen und Albedo-Werte aufzustellen und diese Simulationsergebnisse zur Validierung vereinfachter Ertragsmodelle für die laufende Anlagenprojektierung zu nutzen. Über ein Modulmonitoring an verschiedenen Standorten sollten die Ertragsmodelle validiert werden. Die Ergebnisse der Einstrahlungsanalyse sollte weiterhin genutzt werden, um verschiedene Ansätze zur Verbesserung der CTM-Leistung und der Reaktion des Moduls auf inhomogene Bestrahlungsstärken zu bewerten.

Mechanische, thermische und Diffusionsmodelle sollten für einen bifacialen Modulaufbau erstellt werden. Damit sollten Belastungen u. a. im Zusammenhang mit der Integration von Dioden in das Laminat, dem Feuchteeintrag und der Entwicklung des Mikroklimas im Modul für repräsentative Klimate, abhängig von verwendeten Materialien und Randabdichtung, sowie weitere wesentliche Degradationspfade untersucht werden, um schließlich das Lebensdauerpotential der Module abzuschätzen. Der IEC-Prüfzyklus (IEC 61215, IEC 61730) sollte auf die notwendigen Anpassungen und Auslegungen für bifaciale Modultypen hin untersucht werden, mit der Perspektive der Modifikation von Normen in Zusammenarbeit mit der internationalen Fachwelt. Jenseits der grundlegenden IEC-Typenprüfung galt es, tiefergehende beschleunigte Prüfungen durchzuführen und mit den Ergebnissen der Freilandmessungen und der numerischen Simulationen abzugleichen. Für den Abgleich

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

sollten bestehende Degradationsindikatoren und In-situ-Werkzeuge für das Degradationsmonitoring. Modulaufbau und -montage genutzt werden und unter Berücksichtigung der Prüfergebnisse optimiert werden.

Die durch transparente Rückseite und serienwiderstandsbedingte geringere Vorderseitenleistung der bifacialen Module sollte gesteigert werden. Dafür wurden Verschaltungskonzepte und Lichteinfangmethoden an der Zellrückseite für einen bifacialen Modulaufbau entwickelt. Eine weitere Aufgabe war der Technologieentwicklung war die Steigerung der Bifacialität (Verhältnis aus Vorder- und Rückseitenleistung).

Werkzeuge zur Analyse von Produktionskosten (TCO), Stromgestehungskosten (LCOE) und Lebenszyklus (LCA) sollten für die bifaciale Technologie bereitgestellt werden. Die angepassten Werkzeuge sollten einerseits für Parameterstudien im Hinblick auf die Produktoptimierung eingesetzt werden, andererseits sollte ein umfassender Kostenvergleich mit monofacialer Technologie als Referenz durchgeführt werden.

### 1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Mit der Insolvenzmeldung der SolarWorld AG am 11.05.2017 und der folgenden Insolvenzmeldung der SolarWorld Innovations GmbH am 12.05.2017 musste das Projekt seitens SWIN abgebrochen werden.

### 1.3 Planung und Ablauf

Der Strukturplan des Projektes ist in Abbildung 1 dargestellt. Durch die Insolvenzanmeldung der SWIN am 12.05.17 sind der Vorhabensstatus sowie die Ergebnisse nur bis zu diesem Tag dokumentiert.

	2016																																				2017												2018												2019			
	Kalendermonat												Projektmonat																																																			
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																				
<b>Teilprojekt 1</b>																																																																
1.1 Implementierung Labormesstechnik																																																																
1.2 Optimierung Messaufbau																																																																
1.3 Modellentwicklung zu Inhomogenität																																																																
1.4 Entwicklung Produktions-Messtechnik																																																																
1.5 Normative Aktivitäten																																																																
<b>Teilprojekt 2</b>																																																																
2.1 Modellentwicklung, Simulation, Studien																																																																
2.2 Ertragsmodell für Projektgeschäft																																																																
2.3 Monitoring und Auswertung																																																																
2.4 Normative Aktivitäten																																																																
<b>Teilprojekt 3</b>																																																																
3.1 Herstellung von Modulprüflingen																																																																
3.2 Degradations- und Schadensanalyse																																																																
3.3 Labor-in-situ-Monitoring Degradation																																																																
3.4 Permeationsraten-Messung																																																																
3.5 FEM-Simulation Feuchtepermeation																																																																
3.6 Monitoring Gran Canaria																																																																
3.7 Monitoring Negev																																																																
3.8 Normative Aktivitäten																																																																
<b>Teilprojekt 4</b>																																																																
4.1 Simulation der Modulleistung																																																																
4.2 Komponenten- und Prozessentwicklung																																																																
4.3 Schutzdiodenkonfiguration und -integration																																																																
4.4 Systementwicklung																																																																
<b>Teilprojekt 5</b>																																																																
5.1 TCO Modul und Aufständigung																																																																
5.2 Stromgestehungskosten (LCOE)																																																																
5.3 Lebenszyklus-Analyse (LCA)																																																																

Abbildung 1 Projektstrukturplan mit Stand zum 12.05.2017

Aus dem Projektstrukturplan ist ersichtlich, dass noch kein Meilenstein erreicht werden konnte. Die Meilensteine der Arbeitspakete 3.6 und 3.7 mussten aufgrund von

Verzögerungen bei der Auswahl geeigneter Gestelle für die beiden Standorte verschoben werden

### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Vorhabensbeginn

Die PERC-Zelltechnologie (Passivated Emitter and Rear Cell) hat einen Entwicklungsstand erreicht, der mit geringfügigen Anpassungen eine bifaciale Nutzung der Zellen ermöglicht [1]. SolarWorld ist bei der Entwicklung der PERC-Zelle führend und konnte das 2015 mit einem neuen Weltrekord für p-Typ-PERC-Zellen mit einem Wirkungsgrad von 21,7% demonstrieren [2]. Auch den Schritt von der PERC-Zelle hin zur bifacialen Zell-Technologie hat SolarWorld bereits realisiert und führte ein neues bifaciales Produkt „SunModule Protect 360° duo“ ein [3]. Es wird erwartet, dass der Marktanteil bifacialer PV-Technologie bis zum Jahr 2019 auf 15% ansteigt [4].

Für monofaciale Module ist eine umfassende und genaue Charakterisierung Stand der Technik. Zahlreiche Messlabore weltweit können die Modulleistung und andere Eigenschaften (Schwachlichtverhalten, Temperaturabhängigkeit etc.) zwar mit unterschiedlicher Präzision, aber nach definierten und weltweit gleichartigen Methoden bestimmen. Dabei führen Labormessungen und Freilandtests zu weitgehend vergleichbaren Ergebnissen. Das Kalibrierlabor des Fraunhofer ISE ist mit einer akkreditierten Messgenauigkeit von 1,6% für monofaciale c-Si Module weltweit führend [5].

Bei bifacialen Modulen ist die tatsächliche Modulleistung deutlich stärker von den Umgebungs- und Betriebsbedingungen abhängig. Die bislang nur für monofaciale Module verfügbaren Messverfahren lassen daher Interpretationsspielraum, und einige Hersteller verunsichern den Markt durch fragwürdige Leistungs- und Ertragsangaben. Ein dringendes Interesse von SolarWorld ist daher die Bewertung und idealerweise Vereinheitlichung möglicher Messverfahren zur Charakterisierung bifacialer Module.

Die für den Erfolg der bifacialen Technologie notwendige Wende von der Bewertung von PV Systemen von €/W hin zu €/kWh ist noch nicht weit genug fortgeschritten. Hier fehlen vor allem standardisierte Messmethoden und Berechnungsvorschriften für die Ermittlung des bifacialen Mehrertrags, um die Marktakzeptanz der Technologie zu fördern. Für die Prognose des langjährigen Ertrags von PV-Kraftwerken mit monofacialen Modulen existieren eingeführte und validierte Simulationswerkzeuge – sowohl bei kommerziellen Anbietern als auch bei Forschungsinstitutionen. Fraunhofer ISE hat über mehr als 10 Jahre hinweg eine hochpräzise, flexible Software für die Ertragssimulation entwickelt und mit umfangreichen Datenbeständen aus dem Anlagenmonitoring validiert. Es gibt jedoch noch kein validiertes Werkzeug, mit dem die zusätzliche Einstrahlung auf die zweite Modulseite für verschiedenste Geometrien einfach und verlässlich berechnet werden kann. Damit fehlt eine wesentliche Voraussetzung sowohl für die Optimierung von Montagekonstruktionen als auch für zuverlässige Ertragsprognosen.

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

Seit vielen Jahren werden monofaciale PV-Module in einer quasi-standardisierten Bauweise gefertigt, mit einem Glas-Folien-Verbund, einer extern aufgebrachten Anschlussdose mit Schutzdioden und einem Rahmen. Diese Bauweise und die dafür vorgesehene Montage sind für bifaciale Module ungeeignet, weil sie eine homogene Bestrahlung der Rückseite behindert.

IEC-Normen decken viele Aspekte der Modulqualifikation (Gebrauchstauglichkeit, Sicherheit, grundlegende Qualitätssicherung) ab, deren Interpretation und Anpassung für bifaciale Module noch offen sind. Für monofaciale Module konnten die Projektpartner umfassende Erkenntnisse zu Umweltlasten, beschleunigten Prüfungen und Rechenmodellen im Hinblick auf Degradation und Gebrauchsdauer in den beiden geförderten Verbundprojekten „Zuverlässigkeit von PV-Modulen“ I und II sammeln.

### 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben bestand aus einer bilateralen Kooperation des Fraunhofer ISE und der SolarWorld Innovations GmbH. Die Arbeitsteilung im Projekt ist in Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1 Arbeitsteilung im Verbundvorhaben

TP	Fraunhofer ISE	SWIN
1	Definition von Messbedingungen für präzise einseitige Messung bifacialer Module;  Vergleiche von Labor- und Freiluft-Messungen und Rundvergleiche Fraunhofer ISE–SolarWorld;  Qualifikation und Optimierung eines Flashers mit simultaner zweiseitiger Beleuchtung;  Vermessung und Modellierung der Effekte inhomogener Einstrahlung auf der Modulrückseite;  Teilnahme an Standardisierungsgremien	Erweiterung bestehender Teststände für bifaciale Module;  Optimierung der Prüfverfahren im Industrie-Labor;  Definition von Randbedingung für die Anwendbarkeit der Testmethoden im industriellen Umfeld;  Entwicklung von Prüfverfahren für die Serienproduktion;  Aufbau von Muster-Modulen und Prüflingen
2	Erstellen eines umfassenden Strahlverfolgungs-Modells für die präzise Prognose der rückseitigen Einstrahlung;  Erstellen eines elektrischen Modells für bifaciale Module;  Parameterstudien für systematische	Aufbau von Muster-Modulen und Prüflingen;  Erstellung eines empirischen Modells, Implementierung in existierende Planungs-Tools;  Realisierung eigener Demonstratorsysteme

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

	<p>Variationen von Moduleigenschaften und Montagegeometrien;</p> <p>Kurzzeit-Monitoring an Einzelmodulen und Kleinanlagen in Freiburg;</p> <p>Zusammenfassung und Auswertung der Monitoring-Daten von vier Standorten;</p> <p>Teilnahme an Standardisierungsgremien</p>	<p>mit multivariater Gestelltechnik</p>
3	<p>Aufbau von Muster-Modulen und Prüflingen;</p> <p>Zerstörungsfreie analytische und elektrische Charakterisierung von Mustermodulen;</p> <p>Anpassung beschleunigter Alterungstests an bifaciale Modulaufbauten;</p> <p>Untersuchung von Transportparametern in neuartigen Modulmaterialien und deren Kombinationen;</p> <p>FEM-Simulation des Feuchtetransports in neuartigen Materialkombinationen;</p> <p>Langzeit-Kennlinien-Monitoring von bifacialen Modulen an zwei Standorten mit extremen klimatischen Anforderungen;</p> <p>Teilnahme an Standardisierungsgremien</p>	<p>Prüfung von bifacialen Modulen nach neuentwickelten Prüf- und Testverfahren,</p> <p>Anwendbarkeit der Testmethoden im industriellen Umfeld der Prüf- und Testmethoden</p> <p>Ableitung von Optimierungen im Modulaufbau zur Verbesserung der Langzeitstabilität</p> <p>Aufbau von Muster-Modulen und Prüflingen</p>
4	<p>Erweiterung bestehender Modelle zur Berechnung des CtM, der Modulleistung und der Bifacialität, Vergleich mit den Ergebnissen von SolaerWorld;</p> <p>Elektrisches FEM-Modell für Multiwire / Multiribbon-Module;</p> <p>Thermisches Management durch FEM-Simulation;</p> <p>Prozessentwicklung für integrierte Dioden</p>	<p>Erweiterung bestehender Modelle zur Berechnung des CtM, der Modulleistung und der Bifacialität;</p> <p>Ableitung von Entwicklungsplänen für Rückseitenabdeckung des Moduls und Verschaltungstechnologie;</p> <p>Spezifikationsentwicklung für elektrische Auslegung des Systems (Anschlussdose Wechselrichter und Verkabelung);</p> <p>Aufbau von Demonstrator-Module zur Validierung der Modelle;</p> <p>Gestell-Entwicklung für bifaciale Module, Konzeption und Realisierung in Demonstrator</p>

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

5	Erstellen / Anpassen eines LCOE-Modells für bifaciale PV-Anlagen;  Beitrag von Daten zu einem LCA-Modell für bifaciale PV-Module	Aufstellung einer TCO für bifaciale Module;  Implementierung des Bifacialen Mehrertrags in LCOE und LCA Modelle

## 2. Detaillierte Dokumentation der Ergebnisse

### 2.1 Teilprojekt 1 Modulcharakterisierung

#### AP 1.1 Implementierung Labormesstechnik

Die bisherigen Konzepte von Testanlagen sind ausgelegt für mono-faciale Messungen. Diese können teilweise umgerüstet bzw. aufgerüstet und erweitert werden. Doch nicht alle Anlagen eignen sich dafür.

Es wurden diverse Konstruktionen erstellt und erste Möglichkeiten der Erweiterung diskutiert, sowie Machbarkeiten in der Konstruktionsabteilung erstellt.

#### UV-Teststand:

Die Bestandsanlage kann durch eine Erweiterung der Lichtröhrenreihen auf eine einfache Art und Weise zur Bifacialität erweitert werden, allerdings gilt dies nur für den mechanischen Bereich. Die Herausforderungen sind hier in der Steuerung, Synchronisation und im Temperatur-Management zu sehen, welche eine Weiterentwicklung erfordern.

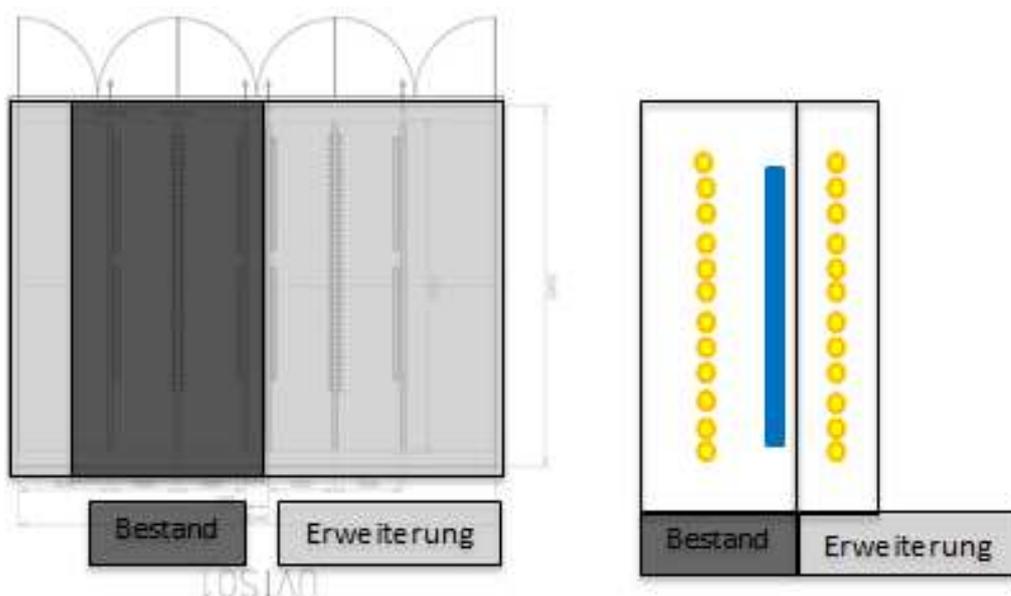


Abbildung 2 Erweiterungskonzept für UV-Teststand

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

### Dauerlicht Sonnensimulator:

Für den Dauerlicht-Sonnensimulator sind verschiedene Möglichkeiten der Aufständering konstruiert worden und sollen hinsichtlich des Homogenitätseinflusses, Abschattungsverhalten und Intensitätsverschiebungen geprüft werden. Diese konstruktiven Maßnahmen konnten auf zwei Varianten beschränkt werden (Abbildung 3).



Abbildung 3 Konstruktive Lösungen für Dauerlicht Sonnensimulator

Die erforderliche Einstrahlung auf der Rückseite des Moduls kann durch direkte oder indirekte Beleuchtung erzeugt werden. Im ersten Schritt sollen die Grenzen der indirekten Beleuchtung durch hoch-reflektierende Folien erprobt werden.

Zur Steigerung der Homogenität und Erhöhung des Streulichtverhaltens wurden weiße Polymerfolien untersucht und mit circa 1290 kWh/m<sup>2</sup> beleuchtet, um eine mögliche Vergilbung, Versprödung oder weitere Degradationen festzustellen, welche unter UV-Licht auftreten kann. Eine erste Verträglichkeit von solchen Materialien wurde in diesen orientierenden Versuchen in Abbildung 4 untersucht.

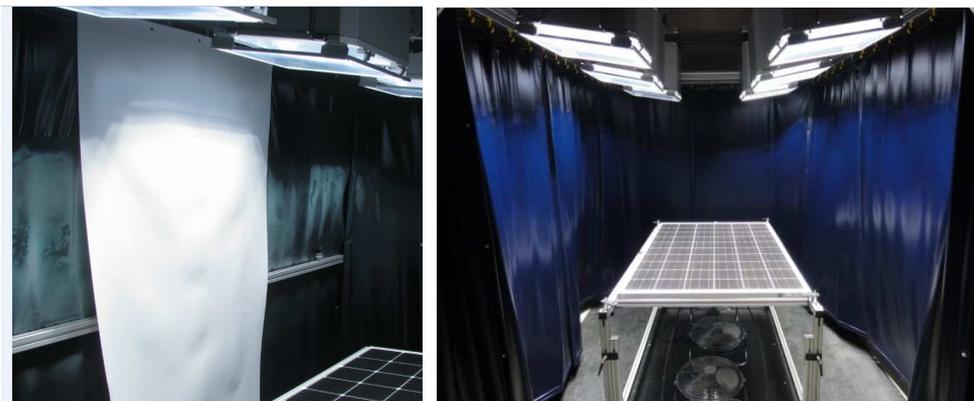


Abbildung 4 Erprobung von reflektiven Materialien im Dauerlicht

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

Weiterhin konnten bereits Einstrahlungsversuche durchgeführt werden, welche mit dem derzeitigen Messaufbau einfach umsetzbar waren und eine Maßzahl des Weiteren nötigen Optimierungsaufwands zeigen sollten.

### ○ Versuchsaufbau:



Abbildung 5 Versuchsaufbau für beidseitige Beleuchtung im Dauerlicht Sonnensimulator, links oben: Modulvorderseite, links unten: Modulrückseite mit Temperatursensoren, rechts: mit reflektiver Folie (weiß) ausgekleidete Umhausung

Mit dem Aufbau wurde der Kurzschlussstrom: von 8,4 A vor dem Umbau auf 10,1 A nach dem Umbau gesteigert. Dies entspricht einem Anstieg von 20%. Unter Berücksichtigung der Bifacialität des Moduls von 60% entspricht die Messbedingung ca. BIFI30 entsprechend des Normvorschlages IEC 60904-1-2. Allerdings konnte die geforderte Homogenität in dem Versuch nicht erreicht werden. (Tabelle 2)

## Projekt MOSBIT

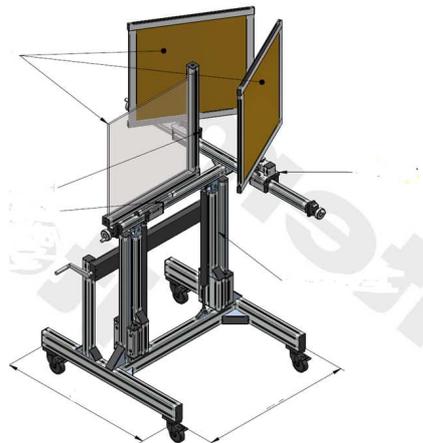
Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

*Tabelle 2 Homogenitätsbestimmung auf Vorder- und Rückseite*

	<b>Modulvorderseite</b>	<b>Modulrückseite</b>
<b>Einstrahlung max.</b>	1109 W/m <sup>2</sup>	219 W/m <sup>2</sup>
<b>Einstrahlung min.</b>	1062 W/m <sup>2</sup>	173 W/m <sup>2</sup>
<b>Inhomogenität</b>	2,16%	11,7%
<b>Klasse (Homogenität)</b>  A < 2%, B < 5%,  C < 10%, ohne	B	ohne

### Blitzlicht-Sonnensimulator (Flasher)

Die erste Konstruktion und ein erster Probeaufbau für den Blitzlicht-Sonnensimulator konnte für die Machbarkeit in der Umgebung eines Industrielabors realisiert werden (Abbildung 6).



*Abbildung 6 Konzept und Realisierung eines Versuchsaufbau für einen bifacialen Flasher*

Für die Auswahl geeigneter Materialien im Innenraum des Flashers konnten erste Versuchsmessungen durchgeführt werden. Die Einflüsse der Materialien auf die Leistungsmessung wurden untersucht, die Ergebnisse in Abbildung 7 dargestellt.

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

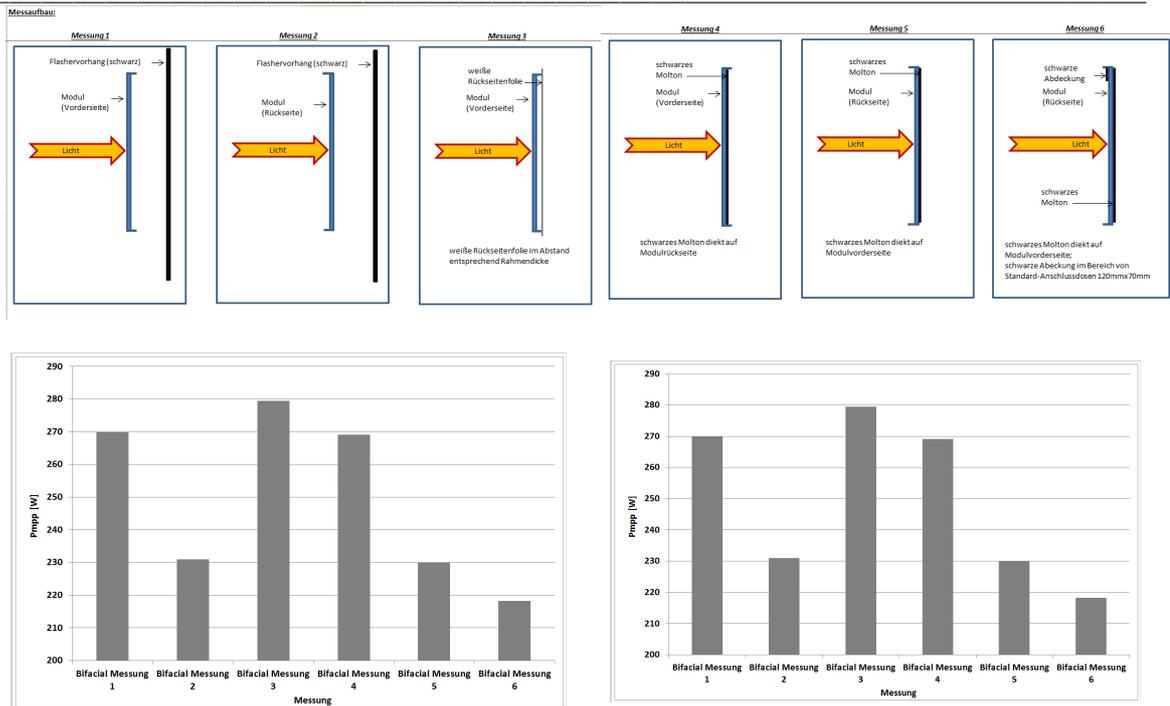


Abbildung 7 Leistungsmessung bifacialer Module unter Einfluss unterschiedlicher Materialien und Messanordnungen

### AP 1.3 Modellentwicklung zur Inhomogenität

AP wurde planmäßig gestartet.

### AP 1.4 Entwicklung Produktionsmesstechnik

AP wurde noch nicht gestartet.

### AP 1.5 Normative Aktivitäten

AP wurde planmäßig gestartet.

Es wurde gemeinsam mit dem Projektpartner eine Überarbeitung der IEC 60904-1-2: *I-V characterisation of bifacial devices* erstellt und in das Normungsgremium gegeben.

## 2.2 Teilprojekt 2 Ertragsanalyse

### AP 2.1 Modellentwicklung, Simulation, Studien

Auf Basis der beim Projektpartner durchgeführten Simulationen wurde ein vereinfachtes empirisches Model entwickelt, das die Interpolation zwischen den konkreten Stützstellen erlaubt und auf diese Weise die Berechnung der jährlichen bifaciale Mehrerträge (EnergyBoost) für definierte Installationsgeometrien ermöglicht. Das aktuelle Modell wird durch folgenden Ausdruck beschrieben:

$$EB = Albedo \cdot Bifacialität \cdot s \cdot \left[ a \cdot \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{b \cdot H}{A}} \right) + c \cdot \left( 1 - \frac{1}{A^4} \right) \right]$$

$$a = 1,03 \quad b = 8,69 \quad c = 0,12 \quad s = 0,95$$

$$A = \frac{\text{Reihenabstand}}{\text{Tischbreite}} \quad H = \frac{\text{Montagehöhe}}{\text{Tischbreite}}$$

Wobei a, b, c Parameter des empirischen Modells sind und s einen Faktor für die Berücksichtigung von Verschattungseffekten der Rückseite durch das Gestell darstellt. A ist der Reihenabstand und H die Montagehöhe, jeweils normiert über die Tischbreite (siehe Abbildung 9).

Die Variation der Modulneigung im Bereich von 10 – 30 ° weist nahezu keinen Einfluss auf den Mehrertrag auf – weshalb dieser Parameter bisher nicht in die Interpolation einfließt.

Die Korrelation des empirischen Modells und des physikalischen Modells des Projektpartners zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (siehe Abbildung 8).

Damit wird die Berechnung für eine Vielzahl von Installationen möglich. Folgende Installations-Parameter können variiert werden:

- Modulorientierung (landscape oder porträt)
- Installationsart (1-reihig; 2-reihig, 3-reihig, 4-reihig)
- Reihenabstand
- Montagehöhe
- Albedo des Untergrundes
- Modulneigung (in den Grenzen 10-30 ° ohne relevanten Einfluss)

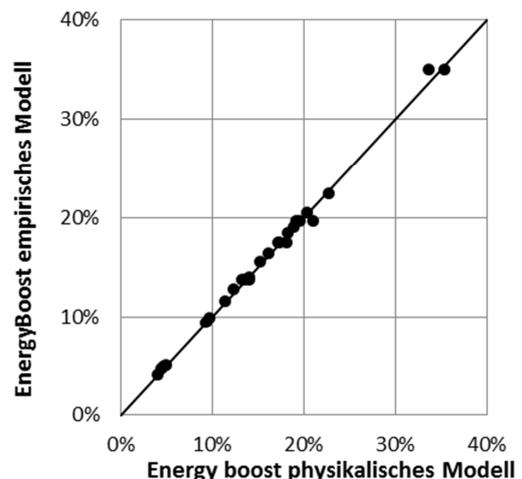


Abbildung 8 Validierung der physikalisch modellierten Werte gegen das empirische Interpolationsmodell

# Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

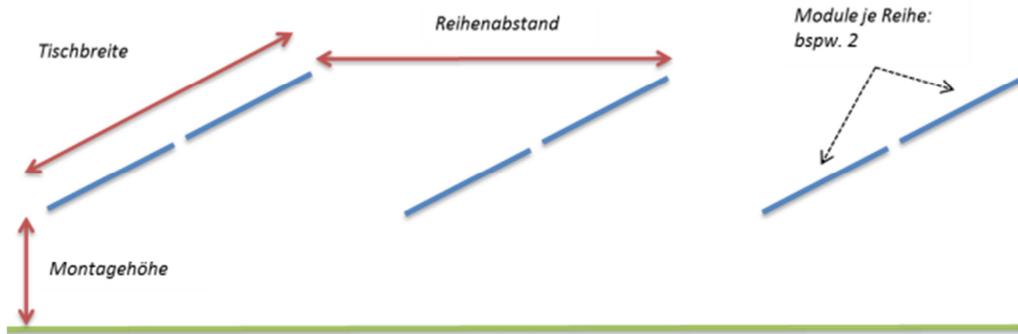


Abbildung 9 Übersicht über die geometrischen Variablen des Modells zur Berechnung des EnergyBoost.

## AP 2.2 Ertragsmodell für Projektgeschäft

Das in AP 2.1 vorgestellte empirische Modell zur Berechnung des bifacialen Mehrertrags wurde in ein Excel-basierten Rechner überführt und darüber hinaus bereits in eine Browser-basierten Rechner umgesetzt, der bereits online verfügbar ist:

<http://www.solarworld.de/fileadmin/calculator/index.php>

Damit ist eine erste Plattform geschaffen, in der interessierte Kunden für verschiedene Anlagenkonfigurationen den bifacialen Mehrertrag selbstständig berechnen können. Abbildung 10 zeigt den Online-Rechner.

Das Bild zeigt die Benutzeroberfläche eines Online-Rechners für den bifacialen Mehrertrag. Die Oberfläche ist in verschiedene Abschnitte unterteilt:

- MODULTYP:** Auswahl zwischen '58x 27x 160' und '58x 20x 16, BUD'.
- AUFSTÄNDERUNG:** Auswahl zwischen 'HÖCHSTFORMAT' und 'QUERFORMAT'.
- INSTALLATION:** Auswahl zwischen 1, 2, 3 und 4 Reihen.
- MONTAGEHÖHE:** Ein Schieberegler, der von 0,00 bis 1,00 m eingestellt ist.
- REIHENABSTAND:** Ein Schieberegler, der von 1,50 bis 3,00 m eingestellt ist.
- UNTERGRUND:** Auswahl zwischen verschiedenen Untergrundtypen wie 'GRAS', 'BETON VERMURTELT', 'HELLER KIESEL', 'TRAPPELDECK WEISS', 'TRAPPELDECK GRÜN', 'DACHBAHN WEISS', 'DACHBAHN EXTRA WEISS' und 'WEGESAND'.
- ALBEDO-WERT IN %:** Ein Feld mit dem Wert '80 %' und einem 'ALBEDO-FREI WÄHLEN' Button.
- ALBEDO-KATALOG:** Ein Feld mit dem Wert '80 %'.
- BERECHNEN:** Ein gelber Button, der auf 'BERECHNEN' beschriftet ist.

Ein prominentes gelbes Banner zeigt das Ergebnis: **+ 26,67% MEHRERTRAG**. Unten rechts steht ein Hinweis: 'Hinweis: Bei Änderung Ihrer Angaben, klicken Sie bitte erneut auf Berechnen, um das aktualisierte Ergebnis zu sehen.'

Abbildung 10 Online-Rechner für den bifacialen Mehrertrag

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

### AP 2.3 Monitoring und Auswertung

Im ersten Projektabschnitt standen die Auswertungen von Freifelddaten bestehender bifacialer Feldinstallationen im Vordergrund.

Der Einfluss von Aufständering, Installationsart, Untergrundbeschaffenheit sowie Ausrichtung ist im Hinblick auf den Ertrag bifacialer Module sehr groß. Aus diesem Grund soll eine möglichst große Datenbasis geschaffen werden, um verschiedenste Varianten zu vergleichen und im Sinne eines maximalen Energieertrages zu bewerten. Weiterhin soll auf diesem Wege das Produktmanagement (PM) mit verlässlichen Aussagen unterstützt werden, um so die optimale Konfiguration für Kundenanlagen anbieten zu können. Weiterhin bietet diese Datenbasis die Möglichkeit das in AP 1 entwickelte Modell zu verifizieren.

Die Daten der vorhandenen Anlagen wurden gesichtet und gesammelt und einer Auswerteroutine in Statistica zugeführt. Auf diese Weise war es möglich, über Excel-Import Funktionen die aktualisierten Rohdaten Rechenoperationen zur Bestimmung des EnergyBoost (bifacialer Mehrertrag) zu unterziehen. Die dafür notwendigen Stammdaten wurden anhand der Anlagen evaluiert. Abbildung 11 zeigt die Projektoberfläche zur automatisierten Berechnung der bifacialen Mehrerträge-

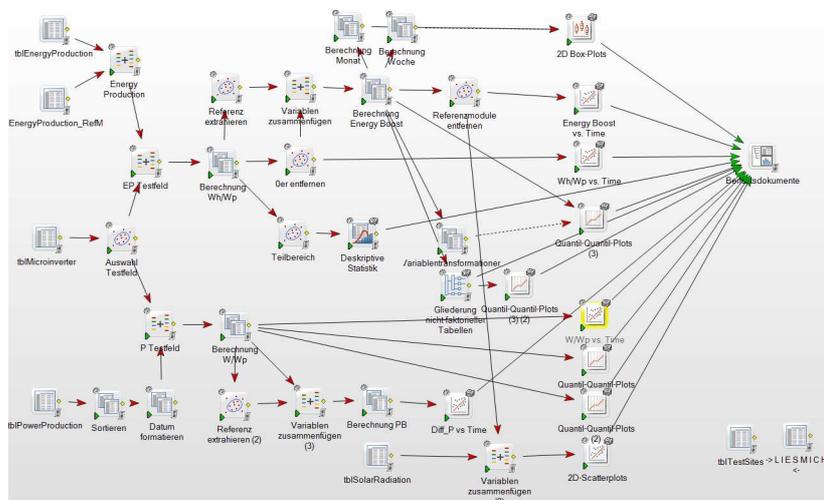


Abbildung 11 Energy- und Powerboost-Berechnung sowie grafische Darstellung in einer Projektoberfläche.

Die Rohdaten (Energie- und Leistungsdaten) weiterer Testanlagen wurden von verschiedensten Portalen als CSV Datei heruntergeladen, passend formatiert und ausgewertet.

Auf diese Weise können nun verschiedene Anlagen mit der gleichen Routine ausgewertet werden.

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

### Beispielanlagen

Nachfolgend werden Versuchsanlagen an drei unterschiedlichen Standorten mit unterschiedlicher Konfiguration vorgestellt. Abbildung 12 gibt einen Überblick, im Detail werden die Anlagen nachfolgend erläutert

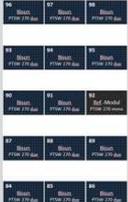
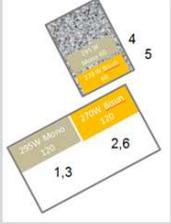
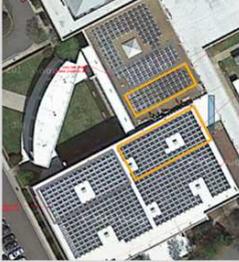
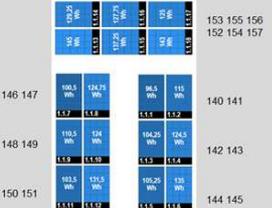
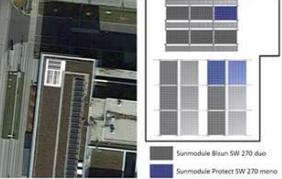
<p>➤ Euskirchen_5.3</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Regarded Time period: 26.08.2016-jetzt</li> <li>➤ Size: 14 x SW 270 duo, 1 x 270 mono (Ref.)</li> <li>➤ Inverter: Enphase</li> <li>➤ Mounting: Roof top Landscape 10° inclination 28,9 cm mounting height 1,68 m row pitch</li> <li>➤ Direction: Southwest</li> <li>➤ ALBEDO: 80 % → 74 % (white roof paint)</li> </ul>	
<p>➤ Richmond</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Regarded Time period: 01.09.2016-12.12.2016</li> <li>➤ Size: 3 SMA Inverters (3 strings of 20) SW 270 duo, Ref: 3 SMA Inverters (3 strings of 20) SW 295 mono Inverter: SMA</li> <li>➤ Mounting: Roof top Landscape 15,24 cm mounting height 1,47 m row pitch</li> <li>➤ Direction: Southwest</li> <li>➤ ALBEDO: 62 % (white TPO roof) 27 % (gravel roof)</li> </ul>	
<p>➤ SWIT</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Regarded Time period: 10.10.2016-06.11.2016</li> <li>➤ Size: 15 SW 270 duo Ref.: 3 SW 270 mono Inverter: Solaredge</li> <li>➤ Mounting: ground mount portrait 10° inclination 30 cm mounting height 1,70 m row pitch (single array)</li> <li>➤ Direction: south (10 modules) west (5 modules)</li> <li>➤ ALBEDO: Alkorbright 80%</li> </ul>	

Abbildung 12 Übersicht über 3 verschiedene Testanlagen.

### Testanlage Euskirchen 5.3

Der Aufbau der Anlage erfolgte bereits im September 2015. Nach vielfältigen Konfigurationswechseln soll nun der Zeitraum zwischen 26.08.2016 und Januar 2017 betrachtet werden.

Auf Basis des in AP 2.1 entwickelten Modells ist es möglich, den theoretischen Mehrertrag (EnergyBoost EB) der bifacialen Module der jeweiligen Anlage zu bestimmen. In Abbildung 13 ist aufgezeigt, wie hoch der Mehrertrag jedes Modul des Feldes gegenüber dem Referenzmodul ist.

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

Calculated EB: 12,6 %		
Measured EB:		
8,32 %	10,51 %	13,7 %
8,08 %	10,91 %	13,86 %
8,62	11,87 %	Ref.
8,3 %	10,98 %	13,54 %
13,86 %	15,68 %	14,92 %

Abbildung 13 Berechneter gegenüber gemessenem EnergyBoost der Testanlage Euskirchen

Im Folgenden steht die detaillierte Analyse der Daten im Fokus. Zunächst wurde ein Q-Q-Plot über alle anfallenden Daten erstellt. Auf diese Weise ist es möglich, eine Verteilung des Energyboost über den gesamten Zeitraum für jedes Modul darzustellen (Abbildung 14).

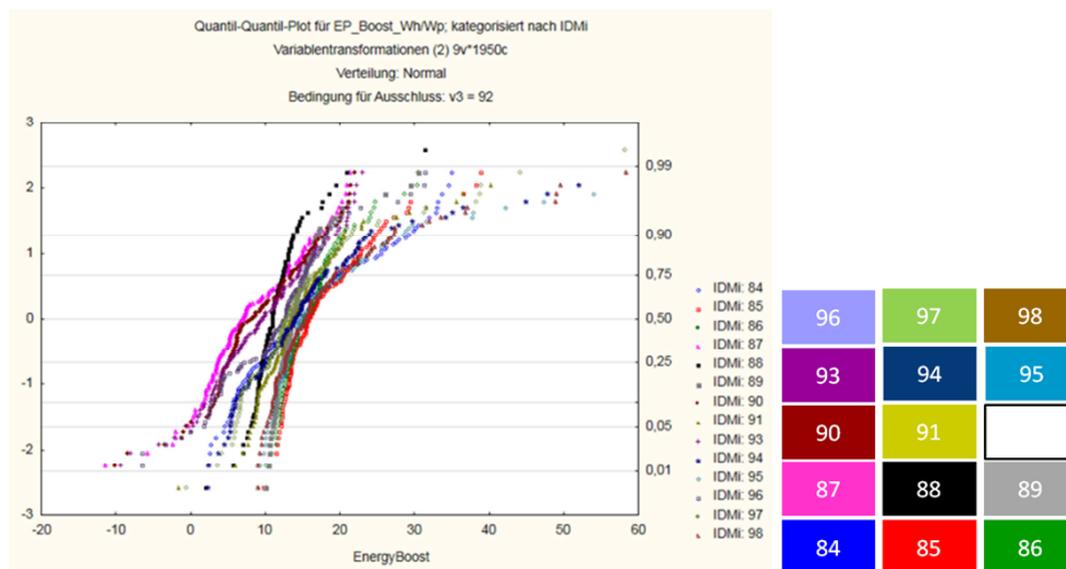


Abbildung 14 links: Q-Q-Plot aller erhaltenen Daten; rechts: Farbcodierung der verschiedenen Module entsprechend der Position in der Testanlage

Hier zeigt sich unter anderem, welche Module unplausible Werte (z. B. Negativwerte) aufzeigen und wie groß die Streuung der Werte ist. Infolgedessen kann man bereits jetzt eine erste Gruppierung der verschiedenen Module des Feldes vornehmen. In Abbildung 14 ist beispielsweise ersichtlich, dass die Module der linken Reihe (87, 90, 93, 96) negative EB-Werte liefern und auch mehr als die Hälfte aller erhaltenen Erträge unter dem theoretisch berechneten Wert liegen. Erklärbar ist dies mit Abschattungseffekten durch eine Hauswand direkt links neben dem Testfeld. Weiterhin befindet sich in Höhe von Modul 87 ein Schornstein, welcher den Abschattungseffekt noch intensiviert. Die Analyse der Daten lässt also den Schluss zu, dass aufgrund verschiedener Effekte nur Module 88, 89, 91, 94 und 95 repräsentative Werte liefern. Diese befinden sich alle sehr nahe am errechneten Wert 12,6%.

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

In Abbildung 15 ist der Verlauf des EB ausgewählter Module der verschiedenen Gruppierungen als Boxplot pro Monat dargestellt. Hier ist zu sehen, dass sich die EB-Werte der Module der zweiten und dritten Reihe nahe am oder über dem berechneten Wert befinden. Weiterhin ist ein leichter Aufwärtstrend mit fortschreitender Jahreszeit zu verzeichnen. Grund hierfür könnte der flachere Sonnenstand und damit der veränderte Einstrahlwinkel sein, in dessen Folge sich Abschattungseffekte verringern. Eine weitere mögliche Ursache ist eine jahreszeitliche Variation des bifacialen Mehrertrags. Bei höheren Sonnenständen wirft das Modul vermehrt Schatten direkt unter sich. Bei flachen Sonnenstand ist die Fläche direkt unter dem Modul eventuell stärker beleuchtet, so dass mehr Licht die Rückseite des Modules erreichen kann. Diesen Effekt gilt es mit den Simulationen aus AP 2.1 abzugleichen.

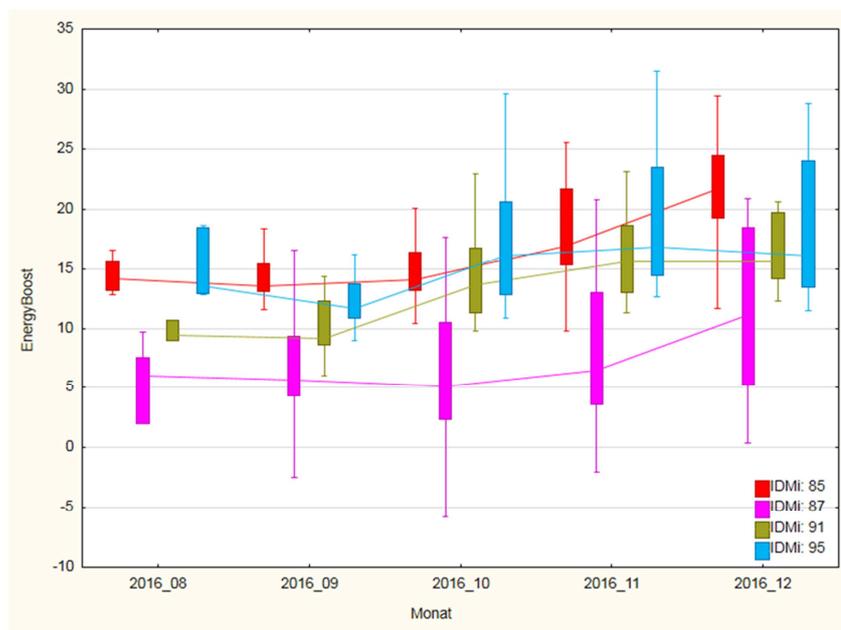


Abbildung 15 BoxPlot ausgewählter Module gruppiert nach Monat.

### Testanlage Richmond

Ein sehr großes Testfeld wurde 2016 auf dem Dach der Universität in Richmond in Betrieb genommen. Im Gegensatz zu Euskirchen, wo die Erträge jedes einzelnen Moduls einzeln ausgelesen werden konnte, sind die Module in Richmond in Strings verschaltet, welche über jeweils String-Inverter angeschlossen werden. Ein Inverter beinhaltet jeweils 3 Strings mit 20 Modulen, d. h. ein Inverter repräsentiert 60 Module. Insgesamt befinden sich 4 Inverter (2 bifacial, 2 monofacial) auf einem weißen Dach und 2 Inverter (1 bifacial, 1 monofacial) auf einem grauen Kies-Dach. In Abbildung 16 sind die Gesamt-Mehrerträge für einen Zeitraum von September-Dezember gezeigt.

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

White TPO roof		Gravel roof
Calculated EB: 8,1 %		Calculated EB: 3,5 %
Measured EB:		Measured EB:
Inverter 2	Inverter 6	Inverter 5
9,10 %	8,1 %	2,9 %

Abbildung 16 Berechneter gegenüber gemessenem EnergyBoost der Testanlage Richmond

Es ist ersichtlich, dass Mehrerträge besonders für die bifacialen Module auf dem weißen Untergrund erhalten wurden. Diese lagen im erwarteten Bereich. Diagramm Abbildung 17 zeigt einen Scatterplot, in dem der EB der Inverter über den Zeitraum aufgetragen ist. Deutlich ersichtlich ist das geringere Niveau des Mehrertrages für die Module auf grauem Untergrund. Inverter 2 und 6 hingegen pendeln sich ohne große Streuung um den erwarteten Wert ein.

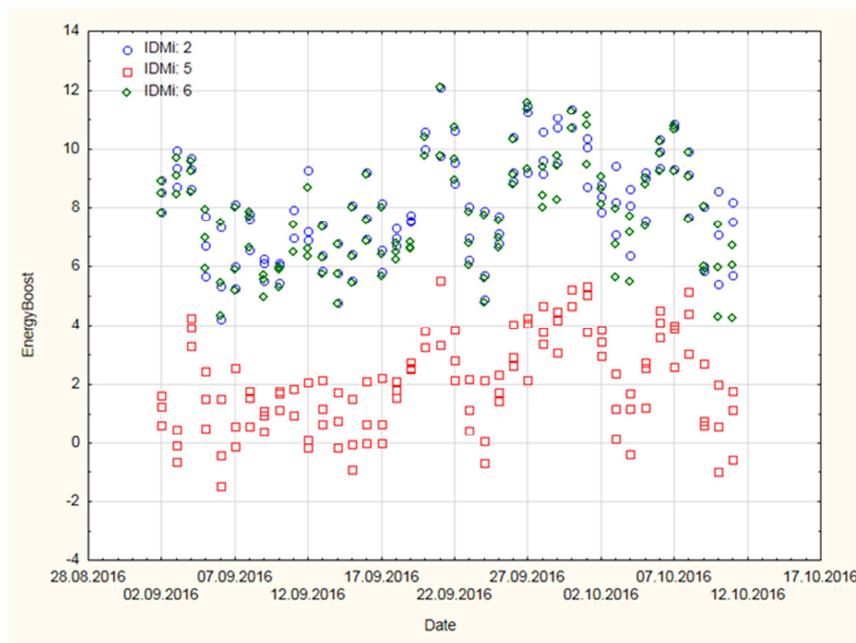


Abbildung 18 Scatterplot EB über Zeit (Testanlage Richmond)

### Testanlage SWIT/Arnstadt

Im Oktober 2016 wurde in Arnstadt ein Aufdach-Testfeld bestehend aus 18 Bisun-Modulen aufgebaut, welches eine Kombination aus Nord-Süd- und Ost-West-Ausrichtung ist. Hier ist die Fragestellung, ob auch andere Ausrichtungsformen noch die erwarteten bifacialen Mehrerträge liefern. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es noch kein Modell, wodurch die Mehrerträge für andere Ausrichtungen nicht kalkulierbar sind. Deshalb wird als Anhaltspunkt der berechnete EnergyBoost für die N-S-Ausrichtung heran gezogen. Dieser ist bei gewählter Aufständigung 14,8%. Eine Besonderheit ist weiterhin, dass es 3 Referenzmodule (270 Wp Mono) gibt. Aufgrund dessen erfolgte die

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

Berechnung des Energyboost separat für Ost-, West- und Südausrichtung. In Abbildung 19 sind die jeweiligen Q-Q-Plots dargestellt.

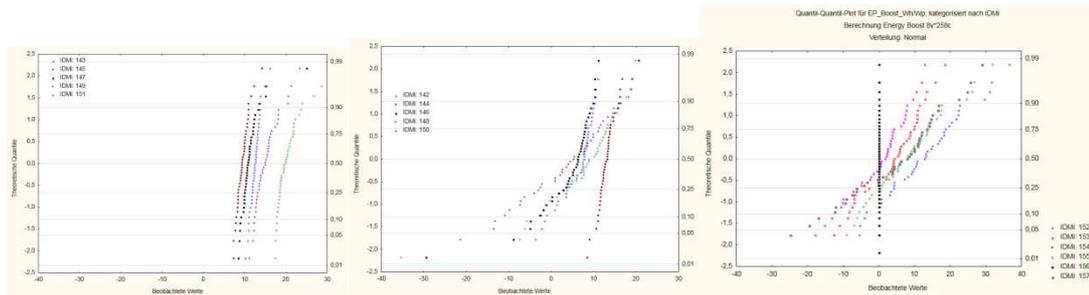


Abbildung 19 a) Q-Q-Plot Ost-Ausrichtung; b) Q-Q-Plot West-Ausrichtung; c) Q-Q-Plot Südausrichtung (Testanlage SWIT/Arnstadt)

Auffällig im Vergleich aller Diagramme ist die größere Streuung des EBs für West- und Südausrichtung. In beiden Fällen wurden auch negative Werte gefunden, welche auf nicht-reguläre Effekte hindeuten. Weiterhin befindet sich ein Großteil der EB-Werte unterhalb des errechneten EBs. Die nähere Betrachtung der Daten zeigt, dass die Module der vorderen Reihe in Südausrichtung die höchsten Erträge liefern (Tabelle 3)

Tabelle 3 EB-Werte für N-S-Ausrichtung, monatsaufgelöst und über Gesamtzeitraum

	EB_Okt	EB_Nov	Gesamt
152	13,7	17,8	15,49
153	8,5	7,6	8,1
154	11,6	16,5	13,6
155	5,1	3,7	4,5
157	8,9	10,4	9,5

Bei Modulen mit O-W-Ausrichtung findet man hohe Mehrerträge für Module der vorderen Reihe. (Abbildung 20). Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Sonne aus Süden direkt unter die Module scheint und daraus eine erhöhte rückseitige Bestrahlung resultiert. Deshalb sollte man an der Stelle nur die Module 142, 143, 148, 149, 146 und 147 (siehe Abbildung 20) zur näheren Betrachtung heranziehen. Der Wert für den EB ist dann 10,2%. Dieser ist nahezu identisch mit dem für die N-S-ausgerichteten Module (10,3%), jedoch muss beachtet werden, dass im O-W-Fall die insgesamt erhaltenen Energieerträge signifikant niedriger ausfallen als in N-S-Ausrichtung.

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

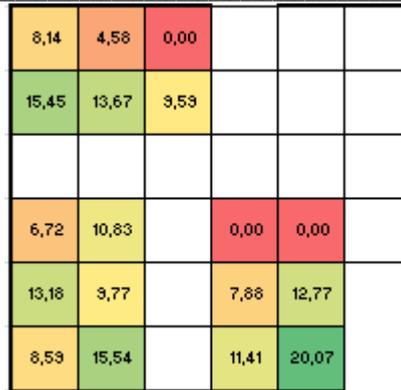


Abbildung 20 farbskalierter Flächenplot des EnergyBoost für Testfeld SWIT

### AP 2.4 Normative Aktivitäten

AP wurde planmäßig gestartet.

## 2.3 Teilprojekt 3 Lebensdaueranalysen und- prüfung

### AP 3.1 Herstellung von Modulprüflingen

In Abstimmung mit dem Projektpartner wurden verschiedene Zellen, Kleinlaminare, Module und spezielle Prüfmuster (bspw. mit einzeln Kontaktierbaren Strings) aufgebaut und für weiterführende Versuche zur Verfügung gestellt.

### AP 3.2 Degradations und Schadensanalyse

Für bifaciale Module mit bedrucktem Rückseitenglas wurde ein Prüfplan erarbeitet. Die geplanten Alterungsuntersuchungen konnten innerhalb der Projektlaufzeit abgeschlossen werden. Abbildung 21 zeigt die positiven Ergebnisse.



Abbildung 21 Prüfplan und Prüfergebnis für die Qualifizierung bedruckter Rückseiten Gläser

### AP 3.3 Labor-in-situ-Monitoring Degradation

AP wurde planmäßig gestartet.

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

### AP 3.6 +3.7 Monitoring in Gran Canaria und Negev

Für die Aufbauten in Gran Canaria und Negev wurden Testfeldkonfigurationen erarbeitet und konzeptionell finalisiert. Ziel hierbei ist eine Freifeldinstallation zu realisieren. Dabei wurde in Gran Canaria eine einreihige Anlage geplant (Abbildung 22) und in Negev eine zweireihige Anlage (Abbildung 23).

Für das Testfeld in Gran Canaria wurde das komplette Material (Testmodule und Dummies sowie das Gestellmaterial) durch SWIN bereitgestellt und versandt.

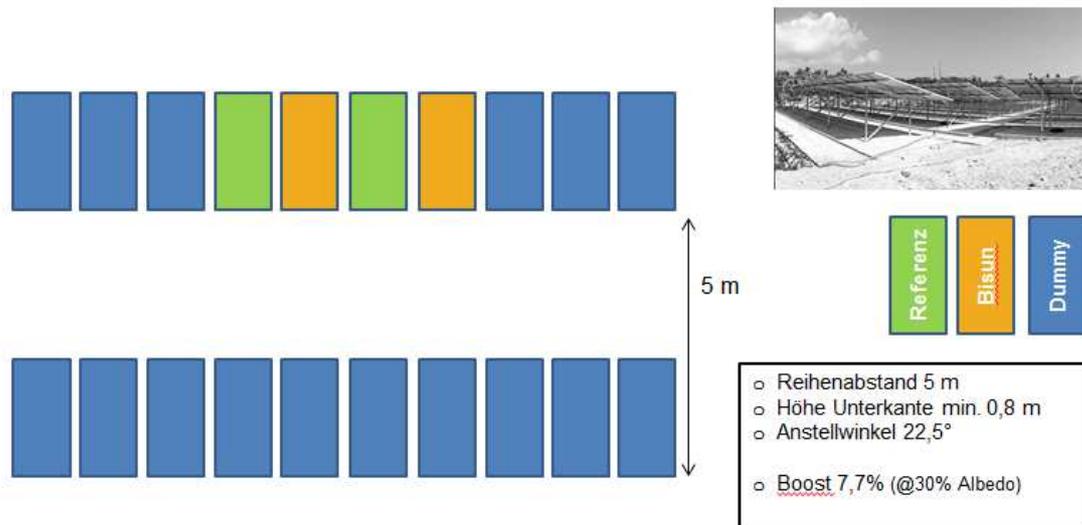


Abbildung 22 Testfeldkonzept Gran Canaria

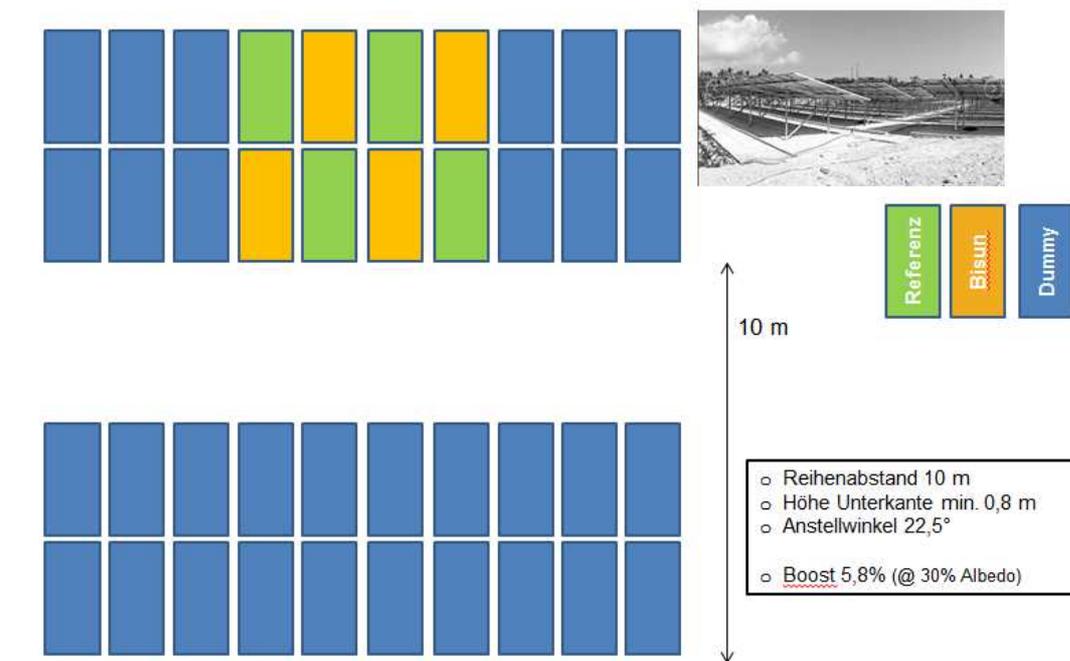


Abbildung 23 Testfeldkonzept Negev

## AP 3.8 Normative Aktivitäten

AP wurde planmäßig gestartet.

## 2.4 Teilprojekt 4 Technologieentwicklung

### AP 4.1 Simulation der Modulleistung

Bezüglich des Zell-zu-Modul-Verlustes wurde der Lichteinfall unter Berücksichtigung einer aktiven Zellerückseite untersucht. Für die Abschätzung der Effekte wurde ein vereinfachtes Modell erstellt, das den Lichteinfall am Zellspalt simuliert.

Dafür werden Zufallskoordinaten ( $n > 10.000$ ) in einem sphärischen Koordinatensystem generiert, die dann unter Anwendung des Lambert'schen Gesetzes in eine räumliche Intensitätsverteilung umgewandelt werden (Abbildung 24).

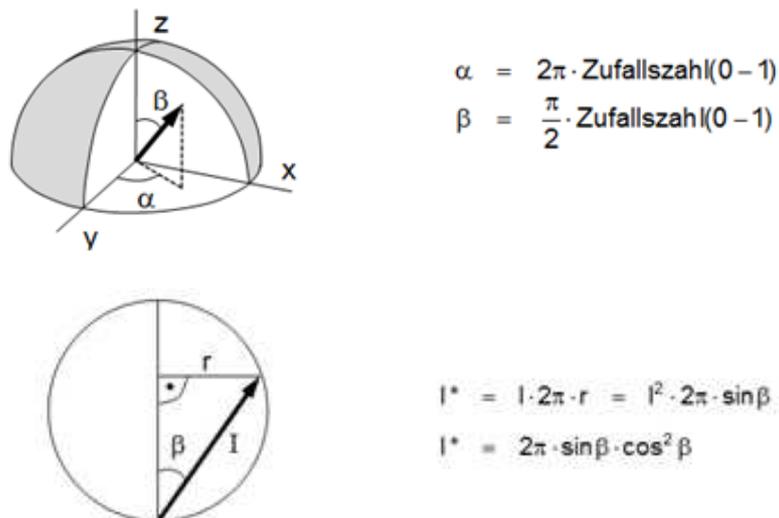


Abbildung 24 Generierung einer räumlichen Intensitätsverteilung

Im nächsten Schritt wird diese Intensitätsverteilung auf äquidistant verteilte Abschnitte des Zellspaltes gelegt. Eine Schrittweite von  $< 0,1$  mm ist hierbei empfehlenswert. Der Zellspalt wird als unendlich lang in y-Richtung ausgedehnt angenommen. Der Koordinatenursprung wird auf die Lambert'sch strahlende Fläche und die Kante der Zelle gelegt (positive Richtung zur Nachbarzelle hin). Die Zelle wird im Abstand  $t$  (= Zellspalttiefe) über den Strahler gelegt. (siehe Abbildung 25).

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

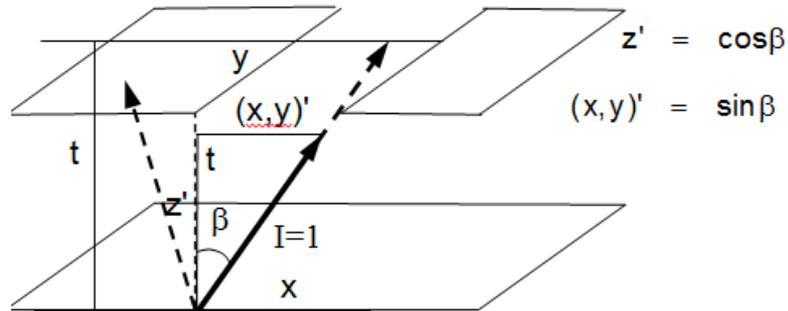


Abbildung 25 Modell zur Ermittlung des Lichteinfangs

Abschließend wird über geometrische Auswahlverfahren für jeden einzelnen Fall der Intensitätsverteilung geprüft, ob:

- i. der reflektierte Strahl die Zellrückseite erreicht,
- ii. die oberste Modulrenzfläche Glas-Luft unter den Winkel der Totalreflexion erreicht oder
- iii. das Modul verlässt.

Unter Berücksichtigung der Fälle i und ii kann der Anteil des im Zellsplatt reflektierten Lichtes ermittelt werden der durch internen Lichteinfang

- i. die Zellrückseite
- ii. die Zellvorderseite

erreicht.

Zur Validierung des Modells wurden Kleinlaminare hergestellt, an denen der Lichteinfang im Zellsplatt durch Abklebeversuche ermittelt wurde. Die Versuche zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modell. Erst ab großen Zellabständen ( $>9$  mm) treten größere Abweichungen auf. Dies kann durch Mehrfachreflexionen erklärt werden, die im Modell noch nicht berücksichtigt werden.

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

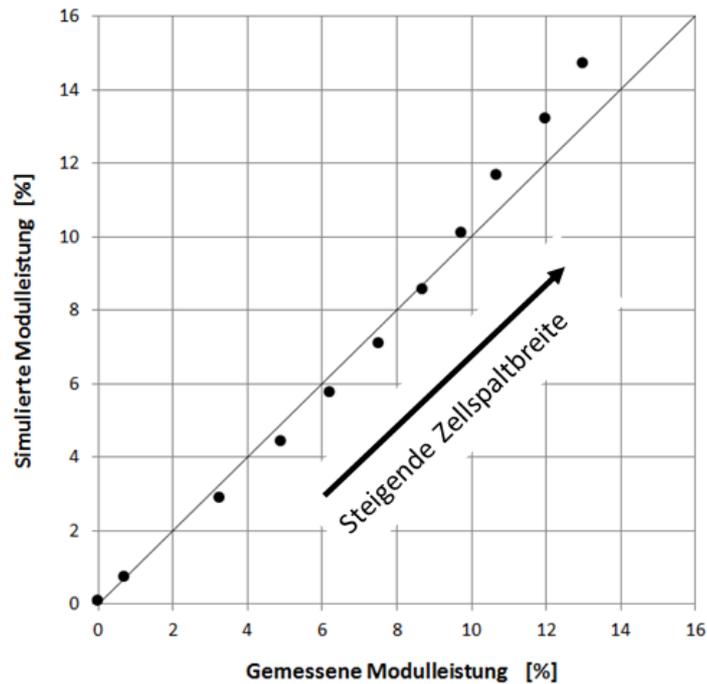


Abbildung 26 Vergleichsmessungen eines Minilaminats (4 mm starkes, weißes Rückseiten-Glas mit Bifacialzelle) und der Simulation

Das Modell wurde genutzt, um den Lichteinfang verschiedene Rückseitenmaterialien zu bestimmen. Die Ergebnisse in Tabelle 4 zeigen, dass bei der aktuellen Bifacialität der Solarzelle von 60% der Lichteinfang auf der Vorderseite überwiegt.

Tabelle 4 Simulierter Lichteinfang am Rückseiten-Reflektor (Zellabstand im String 3 mm, Stringabstand 3,5 mm, Bifacialität 60%)

Rückseitenreflektor	Licht-einfang Vorderseite	Licht-einfang Rückseite	Licht-einfang Total
Weißes Backsheet / Weißer Reflektor auf der Glasinnenseite	2,2%	0,4%	2,6%
2,0 mm Glas bedruckt auf Außenseite	1,2%	1,2%	2,4%
2,8 mm Glas bedruckt auf Außenseite	0,9%	1,4%	2,3%

## AP 4.2 Komponenten und Prozessentwicklung

### Bedruckte Rückseitengläser

Der Einsatz von bedruckten teiltransparenten Rückseiten Gläsern hat den Nachteil, dass sich der Reflektor nur auf den Zellzwischenraum begrenzen sollte. Unter Berücksichtigung der Fertigungstoleranzen (Herstellung des Glases, Aufbringen des Druckes, Positionierung des Glases auf der Modulmatrix, Verschwimmen des Glases während der Lamination) müssen jedoch deutlich breitere Strukturen verwendet werden, die zu einer Abschattung der Zellrückseite führen und damit auch zu einer Reduktion der Bifacialität des Modules.

Im Berichtszeitraum wurden eine Toleranzbetrachtung durchgeführt und darauf basierend ein Layout für die bedruckte Rückseitenscheibe erarbeitet (Abbildung 27). Weiterhin konnten bereits erste Muster gefertigt werden.

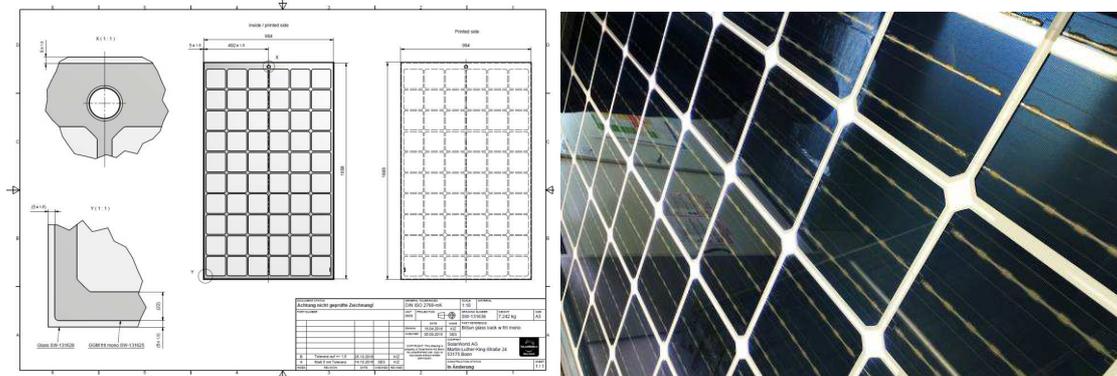
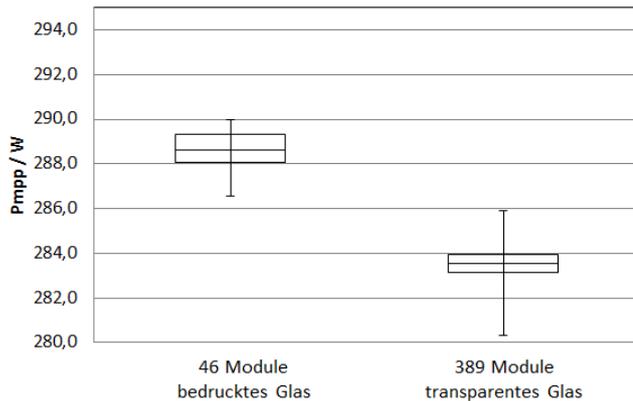


Abbildung 27 *Layout für bedrucktes Rückseiten-Glas (links) und Blick auf ein bifaciales Modul mit bedrucktem Rückseitenglas (rechts)*

Die Testmodule dienen zum einen zur Bestimmung des Leistungshubs durch den Rückseiten-Reflektor und zum anderen zur Qualifizierung des neuen Materials in Langzeitprüfungen. In Abbildung 28 sind die Leistungsdaten der Module dargestellt. Es wurde nur eine Zellklasse verwendet, die Referenzklasse besteht aus 389 Modulen, die bis auf das Rückseitenglas mit gleicher Stückliste verarbeitet wurde. Ein Leistungszuwachs von 1,8% wurde beobachtet.

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi



$P_{mpp}$	+ 1.8%
Isc	+ 2.1%
FF	- 0.3%

Abbildung 28 Auswertung Modulversuch mit bedruckten Rückseitenglas

Das Experiment validiert gleichzeitig das in AP 4.1 entwickelte Modell zum Lichteinfang in bifacialen Modulen. Für den Kurzschlussstrom wurde ein Anstieg von 2,1% festgestellt, dies entspricht, dem Wert aus Tabelle 4 für ein bedrucktes Glas mit nach innen orientierten Druck abzüglich der 0,5% aufgrund andere hier nicht erläuterten Lichteinfangs-Effekte

Darüber hinaus konnte die optische Qualität der Module hinsichtlich des Glasdruckes untersucht werden. Dabei wurde festgestellt, dass sich Fehler hinsichtlich der Lagetoleranz Druckgitter-Matrix in einem vertretbaren Rahmen bewegen und keine weitere Anpassung des Druckes notwendig ist. Abbildung 29 zeigt eines der wenigen Beispiele bei dem Matrix und Glas zu weit gegeneinander verschoben sind und ein Durchblicken durch zwischen Zellkante und Druckkante möglich ist.



Abbildung 29 Optisches Modul in B-Qualität aufgrund verschobener Matrix

Das bedruckte Rückseitenglas wurde im AP 3.2 erfolgreich qualifiziert werden und konnte damit für die Serienproduktion freigegeben werden.

## Projekt MOSBIT

Methodenentwicklung zur Modul- und Systemcharakterisierung für bifaciale PV-Technologie  
Förderkennzeichen 0324036B / Projektträger Jülich (PTJ) / BMWi

### AP 4.3 Schutzdiodenkonfiguration und –integration

Zu Beginn des Projektes wurden verschiedene verfügbare Anschlussdosen hinsichtlich ihrer Beständigkeit bei höheren Strömen untersucht. Besonders kritisch ist dabei die Prüfung des Thermal Runaway der Dioden entsprechend IEC CD 62979. Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse verfügbarer Dosen bezogen auf unterschiedlicher Module und die daraus resultierenden Testparameter. Grundlage für die Berechnung des Bemessungsstroms ist dabei der aktuelle Kurzschlussstrom der Module unter STC Bedingungen erhöht um einen maximalen bifacialen Mehrertrag von 25%. Dabei zeigt sich das eine Dose die Anforderung für alle aktuell verfügbaren Module erfüllt.

Load point		Test Parameter			1	1 opt	2	3	4	5	1 opt 2	6	2 opt
		I [A]	U [V]	T [°C]									
initial		9,50	8,40	25									
Monofacial M60 SW290	calculated value	9,50	8,40	90									
Monofacial M72 SW325	calculated value	9,50	10,00	90									
Bifacial M60	calculated value	11,17	8,40	90									
Bifacial M72	calculated value	11,17	10,20	90									
		11,50	10,50	90									
		11,50	11,00	90									
		11,50	11,50	90									
		11,50	12,00	90									
		11,50	12,50	90									
		11,50	13,00	90									
		12,00	13,00	90									
Monofacial M60 SW290	IEC requirement	12,50	13,00	90									
		13,00	13,00	90									
Bifacial M60	IEC requirement	14,00	13,00	90									
		14,90	13,00	90									
		14,90	14,00	90									
		14,90	15,00	90									
Bifacial M72	IEC requirement	14,90	15,50	90									
Monofacial M72 SW325	IEC requirement	12,00	15,50	90									
Monofacial M72 SW360	IEC requirement	12,50	16,20	90									

Abbildung 30 Übersicht der auf Thermal Runaway geprüften Anschlussdosen (Rote Felder markieren die maximale Belastung, bei der die Dose in den Thermal Runaway geht)

### AP 4.4 Systementwicklung

AP wurde noch nicht gestartet.

## 2.5 Teilprojekt 5 Kostenanalyse

### AP 5.1 TCO Modul und Gestell

Für die rückseitige Glasabdeckung mit gedrucktem Reflektor konnte eine Leistungssteigerung von 1,8% nachgewiesen werden. Die Materialkosten erhöhen sich aufgrund des aufwendigeren Rückseitenglases. Für die Berechnung des finalen Kostenbenefits steht noch die Serieneinführung und dabei zu erfassende Rate an optischen Mängeln aus.

### AP 5.2 Stromgestehungskosten (LCOE)

AP wurde noch nicht gestartet.

### AP 5.3 Lebenszyklus-Analyse (LCA)

AP wurde noch nicht gestartet.

### **3. Literatur**

- [1] T. Dullweber, C. Kranz, R. Peibst, U. Baumann, H. Hannebauer, A. Fülle, S. Steckemetz, T. Weber, M. Müller, P. Palinginis, D. H. Neuhaus: PERC+: Industrial PERC solar cells with rear Al grid enabling bifaciality and reduced Al paste consumption; Proceedings of EUPVSEC 2015
- [2] SolarWorld Press release 17.05.2015. Available at <http://www.solarworld.de/en/group/investor-relations/news-announcements/corporate-news/single-ansicht/article/solarworld-expands-production-in-arnstadt/> [accessed on 17 Jun 2015]
- [3] SolarWorld press release, May 2015. Available at [http://www.pv-tech.org/news/intersolar\\_europe\\_solarworld\\_to\\_launch\\_glass\\_glass\\_bifacial\\_modules](http://www.pv-tech.org/news/intersolar_europe_solarworld_to_launch_glass_glass_bifacial_modules) [accessed on 17 Jun 2015]
- [4] International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), 2014 Results, April 2015
- [5] Dirnberger D, Kräling U, Müllejans H, Salis E, Emery, K, Hishikawa Y, Kiefer K. Progress in photovoltaic module calibration - results of a worldwide intercomparison between four reference laboratories. Measurement Science and Technology 2014; 25, No. 10.
- [6] Cuevas et al., "50% more output power from an albedo collecting flat panel using bifacial solar cells"; Solar Energy Vol. 29 No. 5 pp. 419-420, 1982
- [7] Romijn IG, Van Aken BB, Anker J, Barton P, A. Gutjahr A, Komatsu Y, Koppes M, Kossen EJ, Lamers MWPE, Saynova DS, Tool KCJJ, Zhang-Steenwinkel Y, Venema PR, Vlooswijk AHG, Schmitt C, Kühnlein H, Bay N, König M, Stassen A. Industrial cost effective n-PASHA solar cells with >20% cell efficiency. Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, 2013; 736–740.
- [8] Song D, Xiong J, Hu Z, Li G, Wang H, An H, Yu B, Grenko B, Borden K, Sauer K, Roessler T, Cui J, Wang H, Bultman J, Vlooswijk AHG, Venema PR. Progress in n-type Si solar cell and module technology for high efficiency and low cost. Pro-ceedings of the 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, USA, 2012; 3004–3008.
- [9] Mihailetchi VD, Jourdan J, Edler A, Kopecek R, Harney R, Stichtenoth D, Lossen J, Boescke T, Krokoszinski HJ. Screen printed n-type silicon solar cells for industrial application. Proceedings of EUPVSEC 2010, 1446–1448.
- [10] <http://www.b-solar.com/Products.aspx>
- [11] <http://www.sunpreme.com/gxb-series/>
- [12] Eternal Sun, White Paper, Standardized Testing of bifacial PV-Modules, Oct 2015
- [13] B.v. Aken, Field measurement under different condition; Bifacial Workshop Chambery, 2014
- [14] <http://www.txspc.com/documents/HITDouble190DataSheet1.pdf>

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel <b>Entwicklung von Modul- und Systemtechnologie sowie Charakterisierungsmethoden für bifaciale Solarzellen und -module</b>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] <b>Kutzer, Martin; Hahn, Harald; Kirchner, Johannes; Kühn, Sandro</b>	5. Abschlussdatum des Vorhabens Mai 2017
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  <b>SolarWorld Innovations GmbH Berthelsdorfer Str. 111 a 09599 Freiberg</b>	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen <b>0324036B</b>
	11. Seitenzahl 29
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  <b>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn</b>	13. Literaturangaben 14
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 30
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung <b>Die bifaciale Modultechnologie auf Basis einer PERC-Solarzelle – als kosteneffektive, industriell herstellbare Hocheffizienz-Plattform – beinhaltet ein immenses Potential zur Steigerung des Energieertrages von PV-Systemen bei vergleichsweise geringen Herstellkosten und stellt damit eine Möglichkeit der deutlichen Reduktion der solaren Stromgestehungskosten dar. Der Verbund MOSBIT hatte das Ziel, Methoden zur systematischen Charakterisierung und Bewertung der bifacialen PV-Module und -systeme zu entwickeln, die Basis für eine Standardisierung sind. Im Fokus der Entwicklung stehen dabei:</b> 1) Charakterisierung der Module unter Beachtung der beidseitigen Beleuchtung 2) Modellentwicklung für die Ertragsprognose sowie die Validierung durch Ertragsmessung 3) Lebensdaueranalyse und –prüfung für die neuen Modultypen 4) Entwicklung der Modul- und Systemtechnologien 5) Kostenanalyse der bifacialen Technologie	
19. Schlagwörter Bifaciale Modultechnologie, Ertragsanalyse, Glas-Glas-Module, Modulcharakterisierung	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Technology development of module and system technology and characterization methods for bifacial solar cells (MOSBIT)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Kutzer, Martin; Hahn, Harald; Kirchner, Johannes; Kühn Sandro	5. end of project May 2017
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address)  SolarWorld Innovations GmbH Berthelsdorfer Str. 111 a 09599 Freiberg	9. originator's report no.
	10. reference no. 0324036B
	11. no. of pages 29
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 14
	14. no. of tables 4
	15. no. of figures 30
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract  The bifacial solar cell, which is based on the cost-effective and industrial PERC process, is one key technology in order to improve significantly the energy yield of pv systems without increasing the production cost for solar modules. The project MOSBIT has been installed to systematically work out methods for the characterization of bifacial modules and standards for the energy yield rating of those modules. The main topics are: <ul style="list-style-type: none"> <li>i. Characterization of modules with double-side illuminations</li> <li>ii. Development of energy yield models and their validation</li> <li>iii. Lifetime analysis and tests for bifacial module</li> <li>iv. Technology development for modules and systems</li> <li>v. Cost analysis for bifacial technology</li> </ul>	
19. keywords Bifacial Technology, Energy Yield, Module Characterization, Glass-glass modules,	
20. publisher	21. price