

## **Öffentlicher Abschlussbericht des Forschungsvorhabens**

# **"Entblendete bifaziale High-Efficiency-Solarmodule für hohen Ertrag an Fassaden"**

## **Akronym "HighFas"**

### **Teilvorhaben des Fraunhofer ISE: „Glasbearbeitung, Blendungsbewertung, Solarzellen und -module“**

Förderkennzeichen: 03EE1105A

Projektlaufzeit: 01.06.2021 - 30.11.2024

Berichterstattung:

Lasse Bienkowski, Benedikt Bläsi, Frank Ensslen, Martin Heinrich, Marc Hofmann, Sebastian Nold, Sebastian Pingel, Dirk Reinwand, Erdmut Schnabel, Janina Willmann, Martin Zimmer

Freiburg, 30.05.2025

Zuwendungsempfänger und ausführendes Institut:

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE

Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg

Tel. 0761 4588 -5051

E-Mail: marc.hofmann@ise.fraunhofer.de

Projektleiter: Dr. Marc Hofmann

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03EE1105A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt bei den Autoren.

**Gefördert durch:**



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz**

**aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung, Zielsetzung und Voraussetzungen</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Planung und Ablauf des Vorhabens</b> .....	<b>7</b>
3.1	Arbeitsprogramm, Zusammenarbeit und Zeitplan .....	7
3.2	Zielerreichung und Meilensteine .....	16
3.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn .....	17
3.4	Fortschritt auf dem Gebiet während des Vorhabens .....	19
<b>4</b>	<b>Erzielte Ergebnisse</b> .....	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>Verwertungsplan</b> .....	<b>81</b>
<b>6</b>	<b>Veröffentlichungen und Patentanmeldungen</b> .....	<b>82</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>83</b>

# 1 Zusammenfassung

Die Grundidee für das Projekt ist folgende: An der Fassade lassen sich ähnlich hohe kumulierte Einstrahlungen und damit Erträge realisieren wie auf Dächern (bis zu 1000 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) Einstrahlung), wenn man bifaziale Module (Annahme 80% Bifazialität) als fixe vertikale Glas-Glas-Lamellen („Glasschwerter“) ausbildet. Der Ertrag verteilt sich dabei auf einen größeren Zeitraum über den Tag, entlastet also damit die Stromnetze. Vertikale Blechlamellen werden bei modernen Gebäuden wiederholt an Fassaden angeordnet. Wir strebten im Projekt eine ähnliche Architektur an, verwendeten anstelle der Blechlamellen BIPV-Glaslamellen, die ebenfalls als Sonnenschutz für das Gebäudeinnere fungieren und dennoch den Blick nach draußen ermöglichen. Bei solchen Glaslamellen ist eine mattierte Anti-Blend-Oberfläche wichtig, damit weder Außenblendung noch Blendung im Raum auftritt. Innovativ ist zudem die Anti-Blend-Oberflächenstrukturierung, die mittels nasschemischer und Laser-Oberflächenbehandlung der Gläser auf Basis von Optik-Simulationen erzielt wurde. Am Fraunhofer ISE wurde außerdem auch die Weiterentwicklung von Heterojunction-Solarzellen vorangetrieben, die in den PV-Lamellen aufgrund ihrer hohen Wirkungsgrade, geringer Temperaturkoeffizienten und einer hohen erreichbaren Bifazialität verwendet werden kann. Außerdem wurde die experimentelle Blendungsbewertung für PV-Gebäudehüllen weiterentwickelt, damit man valide Optimierungskriterien bei der Anwendung hat. Eine Outdoor-Testinstallation zeigte, dass sowohl der erwünschte Anti-Blend-Effekt erzielt wurde als auch ein erhöhter Ertrag bei PV-Modulen mit neuartig strukturierter Glasoberfläche erreicht werden kann, der bei flachen Einstrahlwinkeln im Bereich 3% bis 4,5% gesteigert werden konnte. Der Effekt blieb über den Betrachtungszeitraum von 9 Monaten im Outdoor-Test bestehen, der im Rahmen dieses Projekts realisiert werden konnte.

Die Verwertung der Projektergebnisse erfolgt durch Lizenzierung von Schutzrechten sowie den Transfer in Folgeprojekten.

## 2 Aufgabenstellung, Zielsetzung und Voraussetzungen

### *Kurzfassung der Vorhabensbeschreibung*

Wie oben beschrieben, lassen sich an der Fassade ähnlich hohe kumulierte Einstrahlungen und damit Erträge realisieren wie auf Dächern (bis zu 1000 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) Einstrahlung), wenn man bifaziale Module (Annahme 80% Bifazialität) als fixe vertikale Glas-Glas-Lamellen ("Glas-schwerter") ausbildet. Der Ertrag verteilt sich dabei auf einen größeren Zeit-raum über den Tag, entlastet also damit die Stromnetze. Vertikale Blechlamellen werden bei modernen Gebäuden wiederholt an Fassaden angeordnet. Wir strebten im Projekt eine ähnliche Architektur an, verwendeten anstelle der Blechlamellen BIPV-Glaslamellen, die ebenfalls als Sonnenschutz für das Gebäudeinnere fungieren und dennoch den Blick nach draußen ermöglichen. Bei solchen Glaslamellen ist eine mattierte Anti-Blend-Oberfläche wichtig, damit weder Außenblendung noch Blendung im Raum auftritt. Innovativ ist zudem die Anti-Blend-Oberflächenstrukturierung, die mittels nasschemischer und Laser-Oberflächenbehandlung der Gläser auf Basis von Optik-Simulationen erzielt wurde. Am Fraunhofer ISE wurde außerdem auch die Weiterentwicklung von Heterojunction-Solarzellen vorangetrieben, die in den PV-Lamellen aufgrund ihrer hohen Wirkungsgrade, geringer Temperaturkoeffizienten und einer hohen erreichbaren Bifazialität verwendet werden kann. Außerdem wurde die experimentelle Blendungsbewertung für PV-Gebäudehüllen weiterentwickelt, damit man valide Optimierungskriterien bei der Anwendung hat.

### *Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen*

Das Vorhaben HighFas adressiert folgende von der Bundesregierung im 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“ (BAnz AT 01.10.2018 B1) in Absatz 3.1 „Gebäude und Quartiere“ gesetzte Ziele:

- Entwicklung von gebäudeintegrierter Photovoltaik
- Kostenreduktion der Komponenten hocheffizienter innovativer Technologien

Darüber hinaus werden die folgenden Ziele, die in Absatz 3.5 „Photovoltaik“ zu finden sind, verfolgt:

- Die Position der deutschen Anlagenbauer und Materialhersteller im internationalen Markt zu stärken durch die Entwicklung von fortschrittlichen und innovativen Technologien und Prozessen
- Über effizienzsteigernde technologische Innovationen die Kostensenkungspotenziale in der Herstellung von PV-Modulen zu heben
- Erhöhung der Lebensdauer effizienzsteigernder Maßnahmen im Solarmodulaufbau

Der Ansatz des Projektes verschiedene Technologien zur Herstellung hocheffizienter innovativer Solarmodule zu evaluieren reduziert das technologische Risiko. Die starke technologische Kompetenz der Partner ermöglicht die Auswahl und Entwicklung geeigneter Prozesse und Anlagenkonzepte. Da die wirtschaftlichen und technischen Eigenschaften einiger Ansätze noch relativ unbekannt sind, weist das Vorhaben dennoch ein hohes wirtschaftlich-technisches Risiko auf. Die Realisierung dieses Projektes ist daher nur mit Fördermitteln möglich.

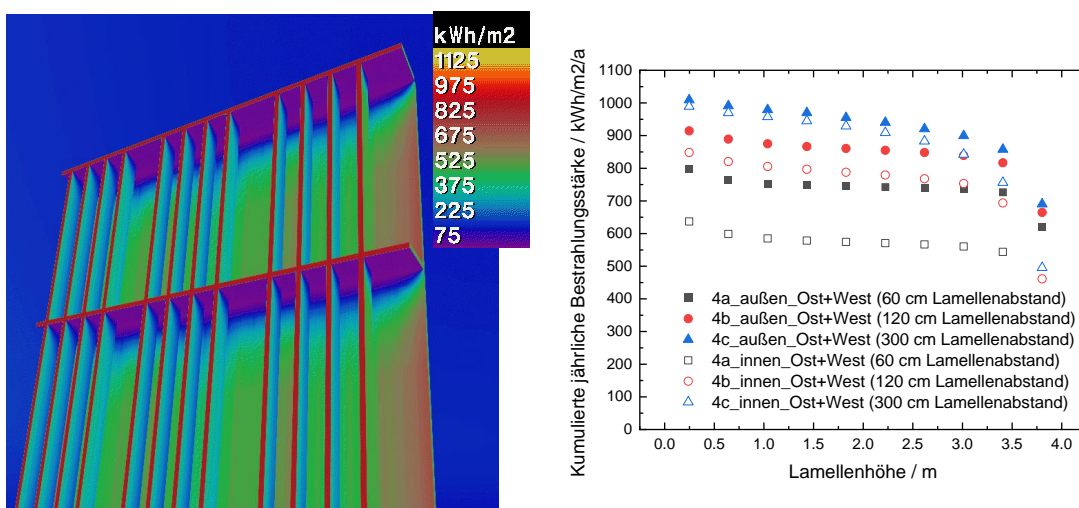
### *Wissenschaftliche/technische Arbeitsziele des Teilvorhabens*

Es sollen bifaziale Module (Annahme 80% Bifazialität) als vertikale Glas-Glas PV-Lamellen ("Glasschwerter") entwickelt werden, die ebenfalls als Sonnenschutz für das Gebäudeinnere dienen. Der Ertrag verteilt sich dabei auf einen größeren Zeitraum über den Tag, entlastet also auch die Stromnetze.

Noch höhere Erträge lassen sich bei nachgeführten Lamellen realisieren. Allerdings erfordert die Nachführung eine deutlich aufwendigere und damit teurere Lagerung der Lamellen. Im

Projekt wird analysiert, ob sich das finanziell darstellen lässt, Schwerpunkt sind aber fixe Lamellen.

Zur Erzielung der PV-Lamellen ist es notwendig, die Lamellen so auszuführen, dass sie Personen, die im Gebäude wohnen und/oder arbeiten oder Personen, die sich im Umkreis der Fassade aufhalten, nicht blenden. Gleichzeitig ist für eine optimale Funktion der PV-Lamellen eine Entwicklung hin zu möglichst hohen Stromerträgen wichtig. Daher müssen die Gläser, die die Vorder- und Rückseite der PV-Lamellen darstellen, strukturiert werden. Hierzu sollen nasschemische als auch Laser-basierte Glas-Behandlungsprozesse entwickelt werden. Darüber hinaus werden Solarmodulstrukturen für den Anwendungsfall optimiert. Durch die unübliche Modulgeometrie sind mechanische Belastungen zu prüfen und deren Einfassung zu entwickeln. Die Verschaltung und das elektrische Layout der Module muss dahingehend entwickelt werden, dass eine hohe Effizienz auch bei den auftretenden Verschattungen möglich ist, sowie der optische Eindruck durch z.B. notwendige Querverbinder nicht gestört wird. Solarzellen nach Heterojunction-Technologie sind hierfür vorgesehen und werden optimiert, da sie hohe Bifazialitäten und Effizienzen ermöglichen.



**Abbildung 1:** Links: Simulation der solaren Bestrahlungsstärke auf eine Beispielstruktur einer Fassade. Rechts: Kumulierte jährliche Bestrahlungsstärke für unterschiedliche PV-Lamellen an

## 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

### 3.1 Arbeitsprogramm, Zusammenarbeit und Zeitplan

Die Vorgehensweise ist detailliert im Folgenden entlang der Arbeitspakete beschrieben.

#### **AP 0 Projektkoordination (AP-Leitung: ISE)**

In diesem AP erfolgt die Koordination der Projektarbeit: Abstimmung mit den Projektpartnern innerhalb der APs und AP-übergreifend, Planung und Durchführung von internen und externen Treffen, sowie Berichterstattung.

#### **AP 1 Technisch-Wirtschaftliche Konzepte (AP-Leitung: ISE)**

In diesem AP werden Aussagen über die erzielbaren Preise und die erlaubten Kosten für die zu entwickelnde Struktur bereitgestellt. Dazu werden die Materialpreise, die Herstellungskosten und notwendige Anlageninvestitionen ermittelt, um die Mehrkosten zu bestimmen, die für die Solarisierung von Glasschwertern an der Fassade benötigt werden. Andererseits werden die Kosten von konventionellen, nicht solar-aktiven Bauteilen mit den Kosten für die aktiven Bauteile verglichen, und es werden die Grenzkosten ermittelt, die maximal erlaubt sind, damit sich die Solarisierung der Bauteile lohnt.

Die Kostenstrukturen der im Rahmen des Projekts entwickelten Technologien werden aufgenommen und gegen den Stand der Technik evaluiert. Variationen der Entwicklungen des Projekts werden hierbei besonders unter die Lupe genommen und die ökonomisch vorteilhaftesten Entwicklungen, auch in Bezug auf eine lange Betriebszeit der Solarmodule, herausgearbeitet. Hierbei kommt das am Fraunhofer ISE bestehende und fortlaufend weiterentwickelte Kostenkalkulationstool zum Einsatz. Die Partner führen eigene techno-ökonomische Bewertungen zur Bewertung der Technologiebausteine durch. Am Fraunhofer ISE soll das techno-ökonomische Bewertungsmodell SCost [18] herangezogen werden, um die im Projekt laufenden Prozessentwicklungen von techno-ökonomischer Seite zu evaluieren und deren Wirtschaftlichkeit zu untersuchen. Die Berechnung der Fertigungskosten erfolgt dabei auf Basis der Cost of Ownership (COO) nach den SEMI Standards E35 [19] und E10 [20], wobei sämtliche direkte und indirekte Kosten über den gesamten Nutzungszeitraum des Produktionsequipments berücksichtigt werden. Besonderer Fokus der Analysen soll auf den projektspezifischen Prozesstechnologien für Zell- und Modulfertigung liegen.

Neben der Betrachtung der COO, welche sich explizit nur an einzelne Fertigungstechnologien richtet, soll auch die Wirtschaftlichkeit der Prozessintegration innerhalb der Prozesskette einer Solarzellenproduktion mit Betrachtung der Total Cost of Ownership (TCO) der gesamten Produktionseinheit (Fabrik) erfolgen.

Ausgehend von der Betrachtung der TCO der Solarzellenproduktion soll im Rahmen der techno-ökonomischen Analyse auch der Einfluss von Kosten und Wirkungsgrad der HJT-Technologie entlang der PV-Wertschöpfungskette über das PV-Modul bis in das PV-System und hin zu den Stromgestehungskosten im Vergleich mit den Referenztechnologien analysiert werden. Neben einer detaillierten Kostenbetrachtung ist hierfür eine Ertragsprognose notwendig (€/kWh). Eine Schnittstelle zwischen technischer und ökonomischer Bewertung wird hierfür ausgebaut.

Das Fraunhofer ISE wird hierbei die Kostenanalyse der Prozesse in der Glasproduktion (Glaszuschnitt, thermisch Vorspannung etc.) durchführen. Die BIPV-Lamellenstruktur wird in unterschiedlichen Größen durchkalkuliert. Der Stand der Technik dient als Vergleichsmittel zu den im Projekt hergestellten Solarmodulen. ISE plant hierbei, für spezielle Geometrien der BIPV-Lamellen Kostenberechnungen durchzuführen. Hierbei werden Kostendaten der Projektpartner in die Berechnungstools integriert.

## **AP 2 Optische Anforderungen (AP-Leitung: ISE)**

Das Fraunhofer ISE wird als Leiter des APs die folgenden zwei Ziele verfolgen:

1. Erarbeitung einer Anforderungsliste im Hinblick auf optische Eigenschaften für die nachfolgenden APs
2. Entwicklung einer neuen Methode zur Evaluierung von Außenblendung, die auch nano- und/oder mikrostrukturierte Anti-Blend Oberflächen berücksichtigen kann.

In AP2 soll im Rahmen einer Dissertation auf der Basis von umfangreichen Nutzerbefragungen das Verfahren zur Beurteilung von Außenblendung weiterentwickelt werden, insbesondere sollen photonische Oberflächenstrukturen berücksichtigt werden können. Aktuelle Blend-Beurteilungsmethoden gehen von einer glatten Glasoberfläche aus, was zu weit weg von der Realität – auch im Rahmen dieses Projekts – ist. Eine Kombination aus Antireflex- und Mattierungsstrukturen ist notwendig, um die extrem hohe Leuchtdichte der Sonne (rund  $10^9$  cd/m<sup>2</sup>) auf ein im Blendungsfall erträgliches Maß (sehr wahrscheinlich im Bereich  $10^3$  -  $10^4$  cd/m<sup>2</sup>) zu reduzieren. Zusätzlich zu einer Anti-Reflex-Schicht wird eine Streuung (= matte Oberfläche) notwendig sein, weil man bei Antireflexschichten nur sehr schwer Reflexionsgrade kleiner 1% realisieren kann und weil der Reflexionsgrad außerdem bei schrägem Lichteinfall in der Regel nochmals deutlich ansteigt. Selbst bei 1% Reflexionsgrad ergäbe sich eine Leuchtdichte von  $0.01 * 10^9$  cd/m<sup>2</sup> =  $10^7$  cd/m<sup>2</sup>, was immer noch sicher zu hoch ist. Eine isotrop diffuse Streuung würde die Leuchtdichte um den Faktor  $10^{-5}$  reduzieren, lässt sich aber sehr wahrscheinlich nicht realisieren, ohne die Effizienz des Moduls zu beeinträchtigen. Sehr wahrscheinlich kann man aber mit einer Kombination aus Antireflex-Funktion und Mattierung (= Lichtstreuung) einen Kompromiss finden und das Problem in den Griff bekommen bei gleichzeitig erhöhter Effizienz im Vergleich zu einem Modul mit glatter, unbeschichteter Glasoberfläche. Alle diese Fragen können momentan jedoch noch nicht zuverlässig beantwortet werden, weil das Bewertungsverfahren diese Aspekte überhaupt nicht berücksichtigt und weil noch niemand Nutzerversuche zu diesem Aspekt durchgeführt hat. Genau das soll in AP2 erfolgen, was dann die Grundlage für die Entwicklung von neuen photonischen Strukturen in AP3 sein wird. Ein weiterer Aspekt ist, dass die Beurteilung einer zulässigen Dauer und Häufigkeit einer Blenderscheinung auf Untersuchungen an Windkraftanlagen beruht, bei denen eine periodische Unterbrechung des Sonnenlichts vorliegt. In AP2 wird deshalb nochmals überprüft, inwieweit diese Ergebnisse auf den Fall der Reflexblendung übertragbar sind, falls nicht werden neue Kriterien auf der Basis von Nutzerversuchen vorgeschlagen.

Die optischen Eigenschaften, die nötig sind, um die benötigten geringen Reflexionsgrade unter allen relevanten Einstrahl- und Reflexionswinkeln zu erreichen, werden zunächst im Rahmen von Optik-Simulationen erarbeitet. Die Glas-Oberflächenstrukturen, die sich simulativ als vielversprechend herausgestellt haben, werden anschließend in AP3 experimentell umgesetzt. Hierbei in AP3 erkannte Beschränkungen in der Umsetzbarkeit mancher Strukturen werden in anschließenden neuen Simulationsrunden berücksichtigt. So entsteht iterativ ein

gutes Verständnis der optisch optimalen real erreichbaren Glasoberfläche. Für die Modellierung komplexer optischer Grenzflächen werden, je nach konkreter Strukturgeometrie und Schichtaufbau Strahlverfolgung, Streutheorien, die Transfer-Matrix-Methode oder skalare bzw. rigoros wellenoptische Ansätze eingesetzt. Als Input für die optischen Modelle wird die Oberflächentopographie in mikroskopischen Verfahren vermessen. Je nach Oberflächeneigenschaften kommen Konfokalmikroskopie, Weißlicht-Interferenzmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie oder Rasterkraftmikroskopie in Frage. Um die Modelle zu validieren, werden winkel- und spektral abhängige Reflexions- bzw. Transmissionsmessungen (Gonio-Spektrometrie) genutzt.

Für die Interaktion verschiedener optisch wirksamer Grenzflächen und die Bewertung unter verschiedenen Einfallswinkeln wird der OPTOS-Formalismus eingesetzt. Die berechneten Effekte werden in ein konsistentes Schema zur Verlustkanalbewertung integriert und mit Modellen für die Modulverlustbetrachtung homogenisiert.

### **AP 3 Entwicklung von Antireflexions-Glasstrukturen mit hoher Transmission (AP-Leitung: RENA)**

In diesem AP sollen Strukturen für die Außenoberfläche des Abdeckglases entwickelt werden. Hierbei ist das Ziel, die in AP2 theoretisch entwickelten Glas-Oberflächenstrukturen experimentell umzusetzen und Herstellungsprozesse dafür zu entwickeln. Es werden nasschemische Prozesse und Methoden auf der Basis von Laser-Bestrahlung zur Oberflächenstrukturierung evaluiert und entwickelt. Hierbei werden zunächst kleinere Gläser bearbeitet, um eine effiziente Prozessentwicklung zu ermöglichen. Eine detaillierte Charakterisierung der Oberflächenstrukturen und der optischen Eigenschaften der Gläser ermöglicht Rückschlüsse auch für die Weiterentwicklung der Optik-Simulationen in AP2. Eine Auswahl geätzter und/oder gelasertes Gläser werden dann am ISE in erste Funktionsmuster integriert, um die Wirksamkeit überprüfen zu können. Weitere Gläser werden in AP4 beim Projektpartner Flachglas Sachsen in Teststrukturen und Solarmodule eingebaut und evaluiert. Es werden Anlagenkonzepte für eine spätere industrielle Fertigung der PV-Lamellen entworfen.

#### Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich Laser-Glasbearbeitung

Um die Reflexionseigenschaften des Glases zu modifizieren, werden periodische oder zufällige Strukturen im oder auf dem Glas benötigt. Welche Strukturgröße und Periodizität gewünscht ist, wird zunächst in einem anderen Arbeitspaket simulativ erarbeitet. In diesem AP geht es um die Entwicklung von Lasermaterialbearbeitungsprozessen, um diese periodischen Strukturen möglichst kostengünstig herstellen zu können.

Die dazu geplanten Forschungsarbeiten am ISE im Bereich der Laser-Glasbearbeitung gliedern sich in drei Phasen. Zunächst muss untersucht werden, wie zielführende Modifikationen überhaupt hergestellt werden können. Dabei soll ein „Direktstrukturierungsansatz“ genauso wie ein Ansatz bestehend aus einer Laserschädigung des Substrats in Verbindung mit einer nasschemischen Ätze entwickelt werden.

In Phase 2 sollen verschiedene technologische Ansätze evaluiert werden, um die oder den in Phase 1 entwickelten Prozess möglichst kostengünstig auf große Flächen zu skalieren. Entsprechende optische Aufbauten sollen im Labor getestet und bewertet werden. Auch eine

techno-ökonomische Bewertung der verschiedenen Ansätze in enger Zusammenarbeit mit dem Industriepartner und AP1 ist geplant.

In Phase 3 sollen großflächige Testmuster hergestellt, weiterbearbeitet und qualifiziert werden.

### Phase 1: Grundlegende Prozessentwicklung zur Herstellung von Modifikationen auf Glas

In diesem AP wird untersucht, wie sich zunächst einzelne Modifikationen herstellen lassen. Die Untersuchungen haben einen grundlegenden Charakter. Zum Einsatz kommen verschiedene Laserquellen. Das interessante Spektrum reicht von diodengepumpten, gepulsten Festkörperlasern im Femtosekunden- bis Nanosekundenregime unterschiedlicher Wellenlänge von UV bis Infrarot bis hin zu gepulsten CO<sub>2</sub>-Lasern. Am ISE stehen zu diesen Zwecken zwei fs-Laser der Firma „Light Conversion“ mit Frequenzverdopplung und Verdreifachung, sowie ein IR Amplitude Laser zur Verfügung. Im ps-Bereich können die Versuche in IR, grün und UV mit einem Laser der ehemaligen Firma „Lumera“ – heute „Coherent“ – durchgeführt werden. Im ns-Bereich können weite Pulsdauerbereiche mit „IPG“, „Amphos“ und „Coherent“ Quelle adressiert werden. Mit diesen unterschiedlichen Strahlquellen sollen in Abhängigkeit der Laserparameter Pulsenergie, Pulsspitzenleistung, Wellenlänge, Repetitionsrate und Verfahrensgeschwindigkeit sowie in Abhängigkeit des verwendeten Spotdurchmesser unterschiedliche Schwellkriterien ermittelt werden, ab denen bestimmte Veränderungen des Glases eintreten. Dabei sind unterschiedliche Kategorien von „Veränderungen“ von Interesse. Allgemein wird das Aufschmelzen oder Verdampfen des Substrats als wichtig erachtet. Hinzu kommen in diesem Projekt auch morphologische Veränderungen, ab denen sich das Ätzverhalten bei der nasschemischen Nachbehandlung im Vergleich zum ungelaserten Glas verändert. Es soll eine detaillierte Wissensgrundlage geschaffen werden, wie Laserparameter, Substratveränderung und Ätzrate miteinander zusammenhängen. Diese Untersuchungen werden mit verschiedenen nasschemischen Prozessen gekreuzt und bei ggf. unterschiedlichen Glasarten angewendet.

Die so hergestellten Modifizierungen im Glas sollen in Kategorien eingeordnet werden. Denkbar sind Bereich mit veränderten Volumen, z.B. Vertiefungen oder Löcher, oder Bereiche in denen sich die chemische Zusammensetzung (z.B. Oxidation) oder die optischen Eigenschaften verändert haben. Anschließend soll bewertet werden wie zielführend solche Glasveränderungen für die anschließende chemische Ätze sind und wie gut sich die danach resultierende Struktur zum Herabsetzen der Reflexionseigenschaften eignet. Sicherlich wird auch untersucht werden, ob überhaupt eine nasschemische Nachbehandlung nötig ist, da hier ggf. Kosten im Gesamtprozess eingespart werden können.

Es sollen nicht nur verschiedenen Arten von Glasveränderungen hervorgerufen werden, sondern auch unterschiedliche Geometrien, Größen und vor allem Periodizität der Modifikationen erzeugt und untersucht werden, da auch hiervon die Reflexionseigenschaften des Glases maßgeblich beeinflusst werden.

Insgesamt soll so eine ganze Reihe verschiedener Prozesse und Prozesssequenzen untersucht werden, aus denen dann unter qualitativen und gesamtökonomischen Gesichtspunkten die am besten geeigneten ausgewählt werden können.

Neben dem Laserprozess muss auch ein Charakterisierungsverfahren etabliert werden, mit dem sich die strukturellen Veränderungen einfach und automatisiert messen lassen und systematisch eingeordnet werden können.

Ziel dieser Phase ist es, eine die Reflexionseigenschaften beeinflussende Struktur zu identifizieren, die nach Möglichkeit mit einem günstigen Laser, möglichst geringer Leistung und ohne aufwendige Nachbehandlung realisiert werden kann.

## Phase 2: Evaluation verschiedener Ansätze zur Skalierung der Ergebnisse aus Phase 1 auf große Flächen

Für die Skalierung von Laserprozessen auf große Flächen kommen grundsätzlich unterschiedliche technische Herangehensweisen in Frage, abhängig von der erforderlichen Strukturgröße und Laserparametern.

Die parallele Bearbeitung in einer Maschine mittels mehrerer Galvanometer Scannern und jeweils dazugehörendem eigenem Laser oder durch bestimmte Optiken ist die einfachste und naheliegende Umsetzung, die aber bei sehr kleinen Strukturgrößen an ihre physikalischen Grenzen kommt und bei Prozessen, die einen Ultrakurzpulslaser benötigen nicht als die günstigste angesehen wird.

Sehr schnelles Scannen mit einem Polygonscanner mit mehreren 100m/s-1000m/s kann bei Ultrakurzpulslasern mit sehr hohen Repetitionsraten das Mittel der Wahl sein. Für entsprechende Versuche stehen am ISE ein Polygonscanner für IR von der Hochschule Mittweida sowie zu Projektbeginn zwei verschiedene Polygonscanner der Firma „Moewe“ bereit, einer für IR und einer für UV. Betrieben werden können diese mit hochfrequenten IR ns-Quellen der Firma „Amphos“ sowie mit einem hochfrequenten IR fs-Laser der Firma „Amplitude“ und einem UV-fs-Laser der Firma „Edgewave“.

Im Rahmen des Projekts soll die speziell für die Großflächenstrukturierung entwickelte Technik des „Direkt Laser Interferenz Patterning“ (DLIP) aufgebaut und evaluiert werden. Kern dieser Technologie sind spezielle Scanköpfe, in denen der einfallende Laserstrahl zunächst in zwei oder mehrere Teilstrahlen zerlegt wird und diese anschließend miteinander interferieren. In den entsprechenden Maxima findet eine Modifizierung des Substrats statt. Je nach Interferenzmuster können so mit jedem Laserpuls eine Vielzahl an Veränderungen in einem bestimmten Muster gleichzeitig erzeugt werden. Die Periodizität und Strukturgröße hängt vom Aufbau des Scankopfs ab und kann in bestimmten Bereichen variiert werden. Dieses Verfahren würde sich insbesondere dann anbieten, wenn sehr kleine Strukturen erforderlich sind und diese mit geringer Intensität erzeugt werden können, da andernfalls sehr hohe Pulsspitzenleistungen benötigt werden.

Am Fraunhofer ISE sollen insbesondere die innovativen Ansätze „Polygonscanning“ und „DLIP“ demonstriert und untersucht werden und die Randbedingungen und Limitierungen der einzelnen Ansätze bestimmt werden. Zusammen mit dem Industriepartner Manz soll auf Basis dieser Ergebnisse eine gemeinsame Bewertung der Ansätze erfolgen und diese mit dem konventionellen Ansatz der Parallelisierung verglichen werden. Dabei soll insbesondere auch auf die Investitionskosten der jeweils benötigten optischen Komponenten eingegangen werden.

### Phase 3: Herstellung von Mustern

Mit der in Phase 2 gemeinsam mit dem Partner Manz identifizierten Skalierungstechnologie sollen im folgenden Projektverlauf zahlreiche Muster für die Herstellung von Modulgläsern gefertigt werden. Ziel sind zunächst Substrate der Größe 300x300 mm. Anhand dieser Muster können wiederum Ätzprozesse untersucht, als auch Minimodule gefertigt und charakterisiert werden. Ebenfalls können die Gläser hinsichtlich optischer Homogenität oder Ihrer Tragfähigkeit sowie anderer modulspezifischer Kriterien, wie z.B. Vereisung, getestet werden und auch in Freiflächentests zum Einsatz kommen.

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der nasschemischen Glasbearbeitung

Ähnlich zu den Laser-basierten Entwicklungsarbeiten zur Strukturierung von Glasoberflächen wird auch im Bereich nasschemischer Glasbearbeitung zunächst der Aufbau grundlegenden Wissens der Wechselwirkung zwischen Prozess und Glas durchgeführt. Im nasschemischen Ätzprozess wird hierbei wesentlich zwischen alkalischer und saurer Lösung unterschieden. Beide Ansätze bieten Vorteile unterschiedlicher Art, daher sollen sie zunächst parallel untersucht werden.

Es wird für den sauren Prozess eine deutlich höhere Ätzrate erwartet, die einen höheren Durchsatz für zukünftige industrielle Prozesse ermöglichen würde. Bei der Entwicklung der sauren Ätzprozesse werden die Auswirkungen unterschiedlicher Parameter wie Konzentrationen der unterschiedlichen Lösungsbestandteile, Badtemperatur und Verweilzeit evaluiert werden. Zusätzlich kann eine Vorbehandlung der Glasoberfläche vor dem Ätzprozess wichtig sein. Insbesondere eine Oberflächenreinigung kann ein wichtiger Baustein zur Erzeugung reproduzierbarer und vorteilhafter Bedingungen sein.

Zur Entwicklung alkalischer Prozesse zur Glasbearbeitung werden ebenfalls wichtige Prozessparameter wie Badtemperatur, Konzentrationen der Lösungskomponenten untersucht. Es ist zu erwarten, dass alkalisch basierte Bäder geringere Ätzraten ermöglichen werden und diese Ätzraten aber von höheren Prozesstemperaturen profitieren.

Zunächst werden erste Untersuchungen im Becherglas mit kleinen Volumina durchgeführt, die grundlegende Mechanismen offenlegen sollen. Hierbei werden nur relativ kleine Gläser bearbeitet. Darauf aufbauend werden Ansätze für Prozessbecken für etwas größere Glaswerkstücke im Bereich von 20x20 cm<sup>2</sup> für die weitergehenden Arbeiten verwendet.

Die Kombination von Laser- und nasschemischen Prozessen zur Erzielung weitergehender Strukturen an den Glasoberflächen, die mit nur einem der technologischen Ansätze nicht oder nicht wirtschaftlich möglich wären, bildet die nächste Stufe der Entwicklungsarbeiten ab.

Abschließend wird das ISE die Arbeiten von RENA zur Erzeugung eines Konzepts für eine Hochdurchsatz-Industrieanlage unterstützen. Im Rahmen dieses Anlagenkonzepts wird das technisch-wirtschaftlich vielversprechendste Verfahren weitergeführt. Die technisch-wirtschaftliche Bewertung wird in AP1 erfolgen, d.h., diese Aktivität wird einer starken Kooperation zwischen AP1 und AP3 benötigen.

Zur Bewertung der entwickelten Glas-Oberflächenstrukturen werden Messverfahren evaluiert und als Standard für die weitere Projektarbeit definiert. Zusätzlich erfolgt die optische Bewertung der Oberflächenstrukturen in Zusammenarbeit mit AP2.

#### **AP 4 Entwicklung von Glas-Glas-Lamellenmodulen mit entsprechender Lagerung (AP-Leitung: Flachglas Sachsen)**

In diesem AP findet die Entwicklung der PV-Lamellen statt. Hierbei sollen bifaziale blendfreie Glas-Glas-Module mit hoher Verschattungstoleranz entwickelt werden. Da die Module in einer langen und zugleich dünnen Geometrie ausgeführt sind (Länge > 3m), werden besonders lange Zellstrings und ein angepasstes Handling während der Produktion erforderlich sein. Zusätzlich wird der Modulaufbau abhängig von den sich aus der Geometrie ergebenden mechanischen Lasten optimiert und eine geeignete Bill-of-Material (BOM) für dieses extreme Moduldesign entwickelt. Dabei wird nicht nur auf dieses spezielle Modul eingegangen, sondern Modelle und Modulaufbauten für die Belastung und Verschaltung von großen Modulen im Allgemeinen entwickelt. Das elektrische Layout der Module muss an die erweiterten Geometrien und höheren Abschattungsanforderungen angepasst werden und die Verwendung von Querverbindern optimiert werden. Dafür werden Modelle erstellt, die ein Layouting ausgehend von den Designregeln und den Designanforderungen vornehmen können. Heterojunction-Solarzellen bieten neben hohen Wirkungsgraden auch hohe Bifazialitäten und geringe Temperaturkoeffizienten, sodass die PV-Lamellen eine hohe Solarstrom-Ausbeute versprechen. Das Produkt soll in der Regel nicht als "Glas-Glas-BIPV-Modul" verkauft werden, sondern als Gesamtsystem inklusive Lagerung (Befestigung am Bauwerk) und BOS, damit große Teile der Wertschöpfung und damit die Marge beim Industriepartner Flachglas Sachsen anfallen.

##### AP4.1 Layouting von Lamellenmodulen

In diesem AP sollen Modelle entwickelt werden, die ausgehend von einer beliebigen, rechteckigen Geometrie einer Solarlamelle oder eines großen Moduls (> 2,0 m an einer Seite), diese mit Standardformat-Solarzellen auslegen und Querverbinder an die benötigten Stellen einfügen. Dabei wird auf eine maximale Belegungsdichte und notwendige Randabstände geachtet. Zusätzlich soll ein Algorithmus entwickelt werden, der die Belegung dahingehend optimiert, dass abhängig von zu definierenden Einstrahlungsfällen der Ertrag maximiert und die Kosten minimiert sind. Dafür werden Freiheitsgerade von einem beliebigen Mix aus Reihen- und Parallel-Verschaltung möglich sein, genauso wie eine beliebige Anzahl an Bypassdioden. Eine Wichtung der Optimierungskriterien ist jedoch notwendig und soll ebenfalls als Input für die Modelle dienen. Für die Modellerstellung sind zuerst die Rahmenbedingungen an PV-Module aus Sicherheitsrelevanter Sicht (z.B. notwendige Mindestrandabstände) sowie aus technologischer Sicht (erlaubte/mögliche Verlegungsgeometrien von Verbindern, Anzahl an möglichen Zellen in Reihen- und Parallel-Verschaltung, Stringlänge mit oder ohne Bypassdiode) und aus Ertragssicht (Mögliche Abschattungsfälle) zu recherchieren und definieren. Dafür sind Experimente notwendig, um einzelne Rahmenbedingungen zu bestimmen (z.B. Abschattungsfälle, Hotspot-Toleranz der Zellen und des Modulaufbaus). In einem zweiten Schritt ist ein Algorithmus zu entwickeln der die Belegungsdichte innerhalb der Modulgeometrie und der Rahmenbedingungen (insbesondere Diodenzahl) maximieren kann und gleichzeitig Querverbinder entsprechen des Moduldesigns an geeignete Stellen verlegt. In einem nächsten Schritt wird dieser Algorithmus um die Berücksichtigung von Abschattungsfällen erwei-

tert, um den Gesamtertrag des Moduls zu optimieren. Im letzten Schritt wird der Optimierungsalgorithmus um Kostenbetrachtungen ergänzt, sodass ein Optimum hinsichtlich Dioden-Anzahl, Leiterbahn-Länge und aktiver Solarzellfläche gefunden werden kann. Im Rahmen des Projektes werden dazu verschiedene Methoden für die Algorithmusfindung erprobt, um einen geeigneten Algorithmus zu entwickeln.

#### AP4.2 Anpassung und Herstellung von Solarzellen

Im Rahmen dieses APs werden Silicium-Heterojunction-Solarzellen hergestellt. Heterojunction-(HJT) -Solarzellen bestehen aus einem Stapel aus mehreren extrem dünnen (nur wenige nm dicken) amorphen Siliciumschichten, die mittels PECVD auf einem kristallinen Siliciumwafer abgeschieden werden. Durch die teilweise Dotierung der amorphen Siliciumschichten und die vorherige gezielte Verunreinigung der Wafer mit Fremdatomen wird ein pn-Übergang erzeugt. Weitergehend werden transparente leitfähige Oxide (TCO) auf Vorder- und Rückseite der Solarzellen abgeschieden, die sowohl als Antireflexschicht dienen als auch die benötigte Querleitfähigkeit zum Abtransport des solar generierten elektrischen Stroms bereitstellen. Zum weiteren Transport der Ladungsträger werden auf die TCO-Schicht per Siebdruck dünne Metallfinger aufgebracht. Wichtig für eine gute Effizienz der BIPV-Lamellenmodule wird die Bifazialität (Beidseitigkeit) der Solarzellen sein. Es wird in der Solarzellenherstellung also ein besonderes Augenmerk auf einen hohen Wirkungsgrad bei Beleuchtung sowohl von der Vorder- als auch von der Rückseite der Solarzellen gelegt. Hierbei kann es von Vorteil sein, im Zweifel kleine Einbußen bei der Effizienz unter Beleuchtung von vorne in Kauf zu nehmen, wenn im Gegenzug die Rückseiteneffizienz überproportional zulegt. Wichtig ist die genaue Abstimmung der einzelnen Prozessschritte aufeinander. Hier ist z.B. essenziell, dass die Oberflächenstrukturierung (Textur) eine sehr gute Homogenität aufweist, die Schnittstelle Oberflächenreinigung/konditionierung und nachfolgende a-Si Beschichtung ohne Wartezeit bearbeitet wird, um eine optimale Passiviergüte zu erzielen. Zudem ist darauf zu achten, dass die Eigenschaften der Einzelschichten im a-Si/TCO Schichtstapel der HJT Zelle gut auf die gezielte Applikation im späteren Modul angepasst werden.

Die Charakterisierung der Solarzellen erfolgt mithilfe der Aufnahme von IV-Messkurven im beleuchteten und unbeleuchteten Fall, um einzelne Eigenschaften der Zellen unterscheiden zu können. Wichtige Hinweise für die Entwicklung der Zellen werden auch aus der Analyse von Zwischenprodukten erwartet, beispielsweise Teststrukturen ohne Metallkontakte und/oder ohne TCO können Hinweise auf die Prozessqualität der Beschichtung oder vorgelagerten Texturierung und Reinigung der Wafer-Oberflächen geben.

#### AP4.3 Herstellung von Solarmodulen incl. Integration strukturierte Gläser

In diesem AP entwickelt Fraunhofer ISE ein optimiertes Moduldesigns (Materialienkombination), die für die Verwendung strukturierte Gläser in Solarlamellen und für besonders große Module (>2,0 m an einer Seite) geeignet ist. Durch diese besondere Geometrie ist die mechanische Beanspruchung stärker ausgeprägt und die Wahrscheinlichkeit von Lufteinschlüssen (Bläschen) im Modulherstellungsprozess erhöht (durch z.B. dickere, unebenere Materialien, längere Wege zum Rand). Dafür muss eine angepasste Materialkombination und Prozessparameter gefunden werden. Zusätzlich können durch das strukturierte Glas ebenfalls veränderte Haftkräfte auftreten, die insbesondere durch die Beanspruchung unter thermischer Wechsellast als Blasenbildung aufgezeigt werden. Darüber hinaus ergeben sich Anforderungen an die Materialien aus dem Gebäudebereich. Es werden in einem ersten Schritt Muster

mit unterschiedlichen Materialsystemen hergestellt und der Laminationsprozess für die großen Modulgeometrien gemeinsam mit Flachglas Sachsen erprobt. Belastungsfälle werden an den Modulen iterativ überprüft (z.B. mechanische Belastung, TC und DH-Test). Nachdem geeignete Materialkombination gefunden wurden, können Prozessparameter unterstützt durch Tests ebenfalls iterativ optimiert werden, um eine möglichst geringe Prozess-Zeit bei einer hohen Laminationsqualität zu ermöglichen. Die gefundenen Materialkombinationen und Prozesse werden zur weiteren Optimierung in einer industriellen Produktionsumgebung (höhere Durchsätze, größere Modulflächen) an den Projektpartner, Flachglas Sachsen, übergeben. Dafür werden gemeinsam mit Flachglas Sachsen Module an den Anlagen hergestellt und die Mitarbeiter geschult und ertüchtigt sodass eine eigene Fertigung bei Flachglas Sachsen möglich ist.

#### AP4.4 Gesamtkonzeptionierung Lamellenmodule mit Lagerung

In diesem AP unterstützt Fraunhofer ISE die Entwicklung eines Lagerungssystems der Module. Dafür sind enge Absprachen mit Flachglas Sachsen zu führen, um, ausgehend von bisherigen Modellen und Berechnungen, die Kraftaufnahme der Aufhängung und die Kraftübertragung von der Modulrahmung zur Aufhängung vorteilhaft zu gestalten.

#### **AP 5 Pilotinstallation und Vermessung (AP-Leitung: ISE)**

Für eine spätere Verbreitung am Markt ist es extrem wichtig, dass die vorhergesagten hohen Erträge an der Fassade durch Messungen an realen Gebäuden validiert werden und dass die Architekten Referenzobjekte anschauen können, bei denen die neuen, bifazialen Fassadenlamellen installiert sind. Deshalb werden die entwickelten Lamellen an der Fassade eines realen Gebäudes installiert. Es ist geplant diese Installation neben wissenschaftlichen Veröffentlichungen zusätzlich über Architekturzeitschriften wie "Detail" oder "Deutsche BauZeitschrift (DBZ)" zu verbreiten.

Es sind sowohl am Fraunhofer ISE (in kleinerem Umfang) und beim Partner Flachglas Sachsen Pilotinstallationen geplant.

### 3.2 Zielerreichung und Meilensteine

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die erreichten Meilensteine (MS).

Zusammengefasst wurden die wesentlichen Ziele des Projekts, die sich in den Meilensteinen ausdrücken, erreicht.

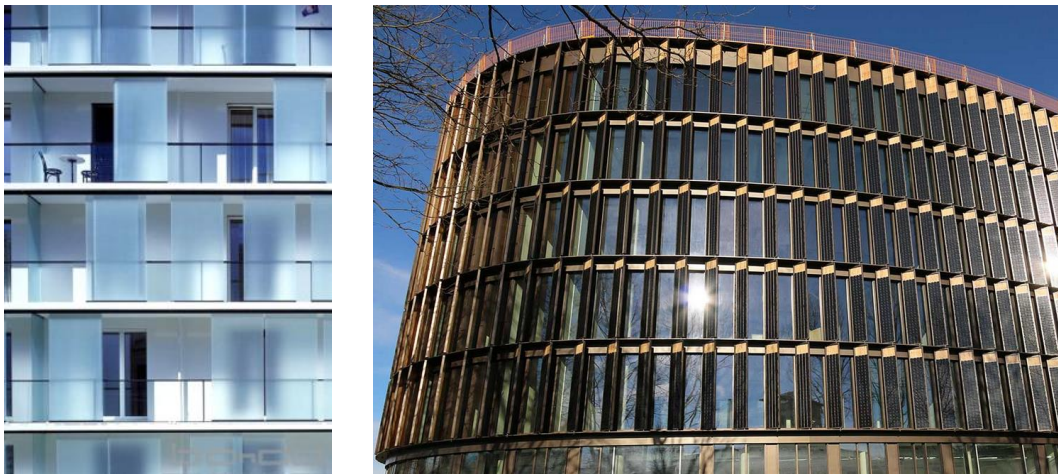
AP	MS	MS Inhalt	Verantw.	Zielmonat	Erreicht in	Kommentar
1	MS 1.2	Einbindung der Kostendaten im Projekt entwickelter Technologien	ISE	15	12	Kosten der Technologien sind vielversprechend
2	MS 2.1	Basis-Simulationsmodell für Glasstrukturen liegt vor	ISE	12	12	Simulationsmodell erfolgreich erstellt
	MS 2.2	Methode zur Blendbewertung entworfen	ISE	24	19	Blendbewertungsmethode wurde erarbeitet
3	MS 3.3	Verständnis grundlegender Strukturtypen aus Kombination von Laser- und Ätzprozessen erreicht	ISE	18	17	Grundlegende Zusammenhänge zwischen Laserprozess-Eigenschaften und nasschemischem Ätzen in Bezug auf das Strukturierungsergebnis erarbeitet
4	MS 4.1	Für Fassaden-Anwendung optimiertes Modullayout liegt vor	ISE	9	19	Evaluierung des optimalen Modul-Layouts dauerte länger als erwartet aufgrund detaillierter Betrachtungen zu Windlast-Situationen
	MS 4.2	Erstes Modul mit im Projekt strukturiertem Glas erzeugt und gemessen	Flachglas & ISE	15	19	Minimodule hergestellt und indoor gemessen
5	MS 5.1	Test erster Module gestartet	ISE	27	36	Verspäteter Start der Outdoor-Tests in Monat 36. Durch Projektverlängerung aber noch gut innerhalb der Projektlaufzeit durchführbar.

Tabelle 1: Übersicht über Meilensteine (MS) und Status der Erreichung

### 3.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Der wissenschaftliche und technische Stand zu Projektbeginn ist ausführlich im Projektantrag aufgeführt.

**AP1 Technisch-Wirtschaftliche Konzepte und AP4 Entwicklung von Glas-Glas-Lamellenmodulen mit entsprechender Lagerung:** Es gibt keine vergleichbaren Produkte auf dem Markt, auch wird in der Literatur keine vergleichbare PV-aktive Fassadenstruktur beschrieben. AP1 ist notwendig, um Aussagen über die erzielbaren Preise und die erlaubten Kosten für die zu entwickelnde Struktur bereit zu stellen. In AP4 findet die eigentliche Entwicklung statt. Die Entwicklung kann allerdings basierend auf dem Wissen zu bifazialen Solarzellen und Solarmodulen starten, die auf dem Markt erhältlich sind bzw. bereits teilweise erforscht wurden. Bifaziale Solarzellen und -module auf dem Markt zeigen eine Bifazialität von ca. 70% (z.B. von LG [1]). Für Heterojunction- (HJT) Solarzellen wurden auch Bifazialitäten von ~90% in Aussicht gestellt (MeyerBurger [2]). HJT-Solarzellen sollen aufgrund dessen und wegen ihrer hohen erreichbaren Wirkungsgrade und geringer Temperaturkoeffizienten im Projekt verwendet und für die Lamellenstruktur und die Einstrahlbedingungen optimiert werden. Für HJT-Solarzellen- und -Module wird generell ein steigender Weltmarktanteil erwartet [3]. Große Glaslamellen existieren bereits für Gebäude werden aber bisher noch nicht mit bifazialen Solarzellen kombiniert (siehe Abbildung 2 links). Auch wurden PV-Lamellen im Einfachglasaufbau bereits an Gebäuden umgesetzt (siehe Abbildung 2 rechts). Hier sind die PV-Module von einem komplett umlaufenden Rahmen mit der dahinterliegenden Holzverkleidung an dem Gestell verbunden. Außenblendung an großen Fassaden führt immer wieder zu Problemen, insbesondere wenn Verkehrsbereiche betroffen sind. Prominente Beispiele hierfür sind das "Walkie-Talkie" Gebäude in der 20 Fenchurch Street, London UK [4] und die Universitätsbibliothek in Freiburg [5]. Darüber hinaus mussten einige PV- und Solarthermie-Anlagen an Dächern und Fassaden aufgrund von Gerichtsurteilen abgebaut werden, weil Nachbarn geblendet wurden.



**Abbildung 2:** Links: Glaslamellen als Schiebeelement vor Balkonen. Rechts: Technisches Rathaus Freiburg im Stühlinger mit monofazialen BIPV-Lamellen von Fa. A2Solar.

**AP2 Optische Anforderungen:** Im Bereich Blendung in Büros und Innenräumen wurde der Blendindex DGP im Rahmen des EU-Projekts ecco-build (NNE5-2001-00778) federführend vom Fraunhofer ISE entwickelt. Der DGP ist europaweit anerkannt und in Normen [6] (z.B.

EN17037, EN14500 und EN14501) verankert. Es existiert aber kein wissenschaftlich anerkannter Blendindex für Außenblendung. Zur Berechnung der wärmetechnischen, solaren und tagelichtbezogenen Eigenschaften von Bauteilen und -elementen existiert eine Norm, in der aber die Bewertung von Blendeigenschaften nicht hinreichend mit abgedeckt ist [7]. Die Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Außenblendung ist notwendig: Die Landesumweltämter haben 2012 ein Verfahren zur Bewertung der Blendwirkung von PV-Anlagen aller Art (BIPV bis Freifläche) erlassen [8], was auch die Grundlage für Gerichtsprozesse war und ist. Das Verfahren geht von einer glänzenden Glasoberfläche aus, es kann insbesondere keine matten Oberflächen berücksichtigen, die das reflektierte Licht nicht gerichtet reflektieren, sondern in einen gewissen Raumwinkelbereich streuen. Solche Oberflächenstrukturen sind jedoch notwendig, um die extrem hohe Leuchtdichte der Sonne auf ein erträgliches Maß zu reduzieren (siehe Kapitel 2 (Arbeitsplan), wo der neue Lösungsansatz beschrieben wird). Ein weiterer Aspekt ist, dass die Beurteilung einer zulässigen Dauer und Häufigkeit einer Blenderscheinung auf Untersuchungen an Windkraftanlagen beruht, bei denen eine periodische Unterbrechung des Sonnenlichts vorliegt. In AP2 wird deshalb nochmals überprüft, inwieweit diese Ergebnisse auf den Fall der Reflexblendung übertragbar sind. Falls sie nicht übertragbar sind, werden neue Kriterien auf der Basis von Nutzerversuchen vorgeschlagen. Bei diesen Arbeiten kann auf die umfangreichen Erfahrungen des Fraunhofer ISE bei der Entwicklung des Blendindex DGP, siehe z.B. [9-11] und erste Arbeiten zu Außenblendung [12] aufgebaut werden. Darüber hinaus sollen in AP2 optische Simulationen durchgeführt werden. Dafür existiert am ISE bereits ein sehr gute Erfahrungsbasis. Diese basiert auf der wellen- und strahlenoptischen Modellierung, Entwicklung und Bewertung von Entblendungs-Oberflächen für Displays („Antiglare“) [13-15]. Die Erfahrungen und komplexen Modellierungsansätze sind zu einem wichtigen Teil im Simulationstool OPTOS zusammengeführt ist [16]. Hierbei können Kombinationen aus Grenzflächen im Solarmodul theoretisch untersucht werden und Strukturierungsvorschläge erarbeitet werden.

**AP3 Entwicklung von Antiblend-Glasstrukturen mit hoher Transmission:** Auf dem Markt sind sowohl geprägte Kunststoffoberflächen als auch geätzte Gläser bekannt, die mit nanostrukturierten (nicht streuenden) Antireflexstrukturen oder mit streuenden Mikrostrukturen zur Mattierung versehen sind [17]. Da keine Kriterien zur Bewertung der Außenblendung vorliegen, die solche innovativen Strukturen berücksichtigen, konnten auch keine zuverlässig wirksamen Produkte entwickelt werden. Fraunhofer ISE hat PV-Module mit kommerziell verfügbaren mattierten mikrostrukturierten Abdeckgläsern herstellen lassen und bei realer Sonneneinstrahlung die Helligkeit (Leuchtdichte bestimmt). Die Helligkeit der Muster war in der Richtung des gerichteten Reflexes (also der Richtung, unter der auch an einer ebenen Glasoberfläche der Reflex zu sehen wäre), trotz Struktur immer noch um 1-2 Größenordnungen höher als die einer weißen Wand. Existierende Mikro-Strukturen verbessern die Situation, reduzieren die Leuchtdichte von Modulen aber nicht auf ein sicher unbedenkliches Niveau. Die Entwicklung und Vermarktung weiter verbesserter Anti-Blend-Strukturen wird dadurch gehemmt, dass ihre Vorteile bei der Beurteilung der Blendwirkung nicht berücksichtigt werden können (AP 2).

### **3.4 Fortschritt auf dem Gebiet während des Vorhabens**

Yoo et al. am Helmholtz-Zentrum Berlin untersuchten Glasoberflächen für PV-Modulanwendung, die mittels eines Imprint-Prozesses mit einer strukturierten Beschichtung versehen wurden, die sich nach Aushärten optisch sehr ähnlich wie Glas verhält. Durch unterschiedliche Strukturen im Meso-, Micro- und Nanometer-Bereich wurden die optischen Eigenschaften dieser Strukturen ausgebildet und untersucht [21]. Es zeigten sich vielversprechende Eigenschaften, die teils den Strukturen, die im Projekt HighFas hergestellt und untersucht wurden, ähnlich sind. Hierbei handelte es sich um eine akademische Arbeit, die keine industriell kostengünstig anwendbare Technologie nachweist.

Die Firma Phytonics ([www.phytonics.tech](http://www.phytonics.tech)) bietet eine strukturierte Folie an, die sich auf PV-Module aufbringen lässt und optische Effekte ähnlich wie die im Projekt entwickelten Glas-Oberflächenstrukturen ermöglicht. Da es sich hierbei allerdings um eine aufgebrachte Folie und nicht um eine Oberflächenstrukturierung des Glases selbst handelt, sind die Ansätze nicht direkt vergleichbar.

Im Forschungsprojekt „OPTOMOD“, das zeitlich teilweise parallel zu HighFas durchgeführt wurde, wurden texturierte Flachgläser für den Einsatz in PV-Modulen entwickelt. Hierbei konnte ebenfalls ein positiver Effekt auf den Ertrag von PV-Modulen nachgewiesen werden. Zur Strukturierung der Gläser wurden nasschemisches Ätzen, teils nach vorherigem Bestrahlen mit harten Partikeln, trockenes Ätzen und Rollen des noch heißen und dabei weichen Glases über strukturierte Rollen verwendet [22].

## 4 Erzielte Ergebnisse

### **AP 1: Technisch-Wirtschaftliche Konzepte**

In AP 1 wurde das Kostenmodell für eine technisch-wirtschaftliche Analyse von PV-Lamellen-Systemen erstellt. In Zusammenarbeit mit den Teilnehmern der weiteren Projekt-APs wurden die relevanten Parameter zur Analyse der Vorteilhaftigkeit dieser PV-Systemkonfiguration identifiziert. Darauf basierend wurden erste Erweiterungen am bestehenden ISE-Kostenmodell für PV-Systeme durchgeführt, um Grenzkosten ermitteln zu können, bis zu welchen sich eine Solarisierung von Glasschwertern an der Fassade lohnt.

Parallel dazu wurden Kosten für die solar-aktiven als auch für die nicht-aktiven Bauteile von PV-Lamellenfassaden ermittelt, um diese für einen wirtschaftlichen Vergleich verschiedener Systemkonfigurationen im Kostenmodell einbeziehen zu können.

Hinsichtlich der Analyse zusätzlicher Bearbeitungsschritte für die Herstellung von Anti-Blend-Glasstrukturen mit hoher Transmission, wurde die Ermittlung von Kostendaten für die im Projekt betrachteten Produktionsverfahren durchgeführt.

In AP1 erfolgte die Erstellung des Basiskostenmodells zur wirtschaftlichen Analyse für die im Projekt verfolgten Entwicklungen.

#### *Solare Einstrahlungsanalyse der Pilotinstallation: Eine parametrische Studie.*

In diesem Abschnitt wird auf eine parametrische Einstrahlungsanalyse basierend auf dem Entwurf für die Pilotinstallation mit PV-Modullamellen eingegangen. Die Analyse diente als Grundlage für deren Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die im Anschluss folgt.

Zahlreiche Abstimmungsgespräche mit der Projektpartnerin Flachglas Sachsen GmbH identifizierten in Bezug auf die reale Pilotinstallation (vgl. Abschnitt AP 5) einstrahlungs-, stromertrags- und kostenrelevante Aspekte. Gemeinsam wurden dabei Vor- und Nachteile verschiedener Einbauszenarien und Fassadenstandorte abgewogen.

Am Ende wurde beschlossen, die PV-Lamellenkonstruktion vor der Produktionshalle mit nahezu südwestlicher Ausrichtung auf dem Gelände von Flachglas Sachsen in Sülzfeld zu montieren. Diese finale Konfiguration diente als Basis für die durchgeführte Simulation.

Um den jährlichen Solarertrag zu maximieren und die Wirtschaftlichkeit dabei abzuschätzen, wurden Simulationen des Solarertrags für verschiedene Einbauszenarien durchgeführt. Die betrachteten Einbauszenarien umfassten unter anderem die Variation des Drehwinkels der Lamellen um die vertikale Achse (d.h. deren Ausrichtung zur Himmelsrichtung) sowie der Abstand der Lamellen (und damit auch deren Anzahl) pro Modulreihe.

Das CAD-Modell der Module ist in Abbildung 3 dargestellt. Dabei können der Winkel zwischen der Modul- und Fassadennormalen und der Abstand zwischen den Modulmittelpunkten (fortan Modulabstand) als freie Parameter betrachtet werden. Unter den Randbedingungen, dass die PV-Fläche mindestens 80 m<sup>2</sup> betragen soll und die Fassade für die Pilotinstallation eine Länge von 16,5 m aufweist, ergibt sich bei drei Modulreihen ein maximaler Abstand zwischen den Modulmittelpunkten von ungefähr 50 cm.

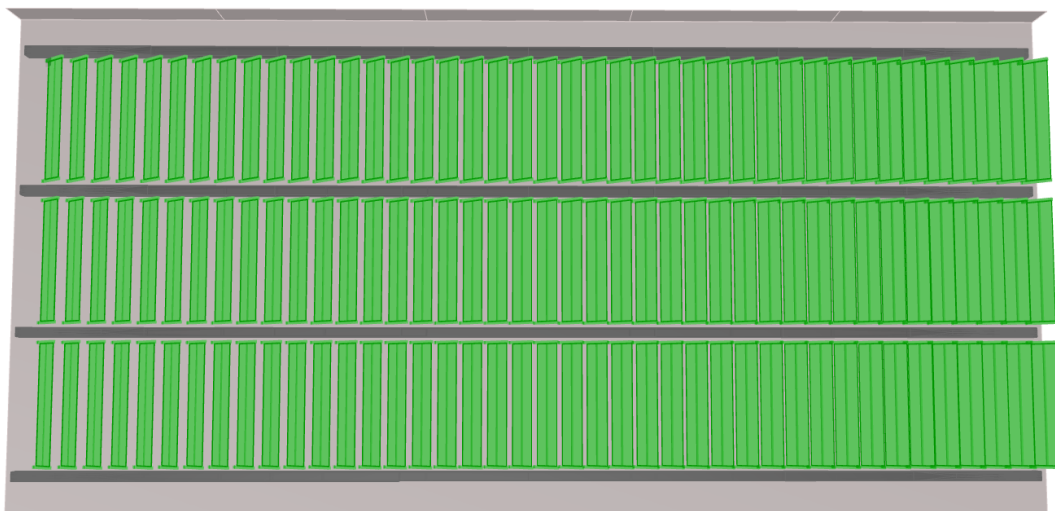


Abbildung 3: Beispielhaft schematische Darstellung der Fassade mit Modulen im Abstand von 50 cm.

Die ersten Simulationen wurde mit folgenden Parametern durchgeführt: Sensorpunktauflösung auf der gesamten Glasoberfläche von etwa  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , stündliche zeitliche Auflösung über eine Zeitspanne von einem Jahr. Als Basis für die Wetterdaten wurden reale Wetterdaten aus dem nahe gelegenen Ort Hof (Saale) verwendet. Die Ergebnisse in Abbildung 4 der Parameterstudie zeigen, dass bei einem Modulabstand von 50 cm ein Winkel von ungefähr  $20^\circ$  der Modulnormalen zur Fassadennormalen den höchsten Solarertrag erzielt.

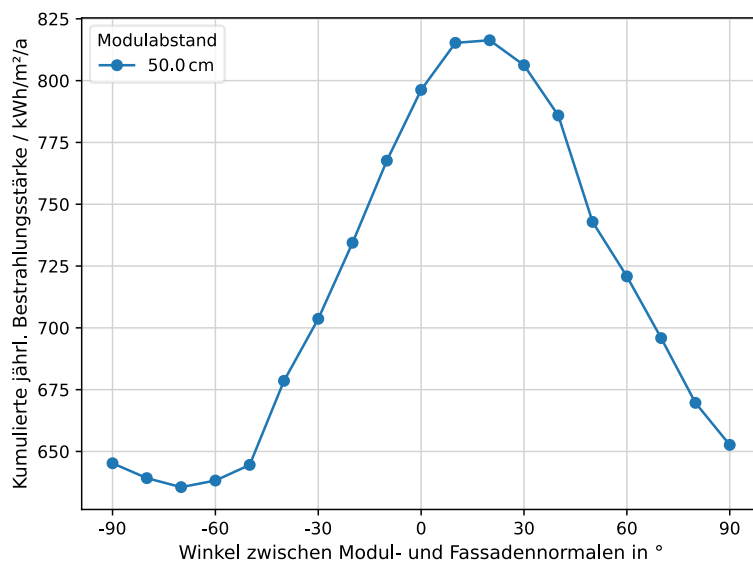


Abbildung 4: Kumulierte jährliche Bestrahlungsstärke an der Pilotinstallation.

Ein Modulabstand von 50 cm sowie ein kleiner Winkel zwischen Modul- und Fassadennormalen entspricht einer sehr engen Belegung der Lamellenfassade wie aus Abbildung 3 zu ersehen und bringt einige Nebeneffekte mit sich, die es zu bedenken gilt. Zum einen kann durch diese Gestaltungsvariante das Erscheinungsbild der Fassade in Mitleidenschaft gezogen werden, da die

Fassade aufgrund des kleinen Modulabstands und des kleinen Winkels zwischen der Modul- und Fassadennormalen überladen wirkt. Außerdem wird der Innenraum hinter der zum großen Teil aus Glas bestehenden Fassade stark abdunkelt. Zum anderen werden bei diesem Modulabstand zwar mehr Module installiert, allerdings spielen Verschattungseffekte eine größere Rolle. Durch den kleinen Modulabstand kommt es zu einer stärkeren Verschattung durch benachbarte Module und des Weiteren verursacht bei dieser dreireihigen Variante der Dachüberstand und vor der Fassade parkende Autos Verschattungen. Zudem besteht die Gefahr der Beschädigung einer der unteren Reihen durch vorbeifahrende Autos und LKWs. Zudem wird die Bifazialität der Module weniger genutzt, wenn die Module so montiert sind, dass die Normalen von Modul und Fassade nahezu parallel zueinanderstehen.

Die Möglichkeit einer zweireihigen Variante mit Fortsetzung auf der Süd-Ost-Fassade wurde betrachtet. Diese Variante hätte eine großflächigere Installation ermöglicht und damit auch die Möglichkeit für höhere Modulabstände und weniger Verschattung geboten. Allerdings hätte diese Variante einen höheren Stahlverbrauch für die Unterkonstruktion bedeutet. Da die Stahlkosten für die Unterkonstruktion eine große Position in den Kosten der Pilotinstallation sind, sollte der Stahlverbrauch niedrig gehalten werden, weshalb die Möglichkeit einer zweireihigen Variante mit Fortsetzung auf der Süd-Ost-Fassade wieder verworfen wurde und der Fokus auf die dreireihe Variante gelegt wurde. Diese steht allerdings im Konflikt mit dem Bestreben nach wenig Verschattung durch benachbarte Module und damit einem größeren Modulabstand bei gleicher Modulanzahl.

Daher ergab sich die Notwendigkeit, weitere Varianten mit folgenden Randbedingungen zu untersuchen:

- Die Fassade verfügt über drei Modulreihen, Modulabstand jeweils 40 cm
- Die Fassade verfügt über drei Modulreihen, Modulabstand jeweils 80 cm
- Die Fassade verfügt über drei Modulreihen, Modulabstand jeweils 120 cm

Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 visualisiert.

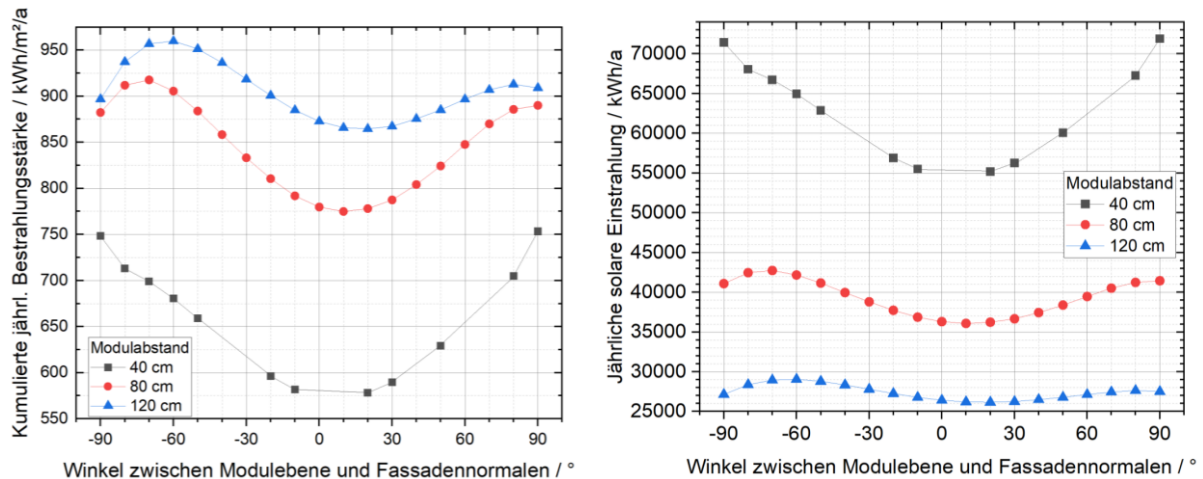


Abbildung 5: Die kumulierte jährliche Bestrahlungsstärke in kWh/m²/a (links) und die kumulierte jährliche solare Einstrahlung auf die gesamte Fassade in kWh/a (rechts), geplottet über den Winkel zwischen Modulebene und Fassadennormale für die Modulabstände 40 cm, 80 cm und 120 cm.

Der linke Plot in Abbildung 5 stellt die kumulierte jährliche Bestrahlungsstärke in kWh/m²/a für die unterschiedlichen Orientierungen des Moduls und für drei verschiedene Modulabstände (40 cm, 80 cm, 120 cm) dar. Der Winkel bezieht sich auf den Winkel zwischen Modulebene und Fassadennormale. Bei einem Winkel von -90° zeigt die Normale der Modulvorderseite (versteifendes T-Profil auf der Rückseite) von der Fassade weg. Mit anderen Worten: Die Ausrichtung der Moduloberfläche ist nahezu parallel zur Fassade

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine Erhöhung des Modulabstandes den Solarertrag pro Fläche deutlich steigern kann. Eine Erhöhung des Modulabstands von 40 cm auf 80 cm hat dabei einen deutlich stärkeren positiven Einfluss auf den Solarertrag als eine Erhöhung des Modulabstands von 80 cm auf 120 cm. Bei kleinen Modulabständen gibt es deutlich mehr Verschattung durch die jeweils benachbarten Module.

Zudem lässt sich feststellen, dass der optimale Winkel zwischen der Modulebene und Fassadennormale vom Abstand abhängt. So liegt dieser für einen Abstand von 40 cm bei 90°, bei 80 cm ungefähr bei -70° und für 120 cm ungefähr bei -60°. Außer wenn die Module parallel zur Fassade ausgerichtet sind (40 cm), ist der Solarertrag höher, wenn die Normale der Modulvorderseite von der Fassade weg zeigt. Der Grund dafür ist, dass dann weniger Verschattung durch das T-Profil auf der Modulrückseite auftritt.

Es reicht allerdings nicht, nur den Solarertrag pro Fläche zu analysieren, denn bei einem niedrigeren Modulabstand können insgesamt mehr Module auf der gleichen Fassadenfläche installiert werden und so der Solarertrag der Gesamtfassade steigen. Dieser Effekt ist im Plot rechts in Abbildung 5 dargestellt. Hier sind die kumulierte jährliche solare Einstrahlung auf die gesamte Fassade in kWh/a über den Winkel zwischen Modulebene und Fassadennormale für die Modulabstände 40 cm, 80 cm und 120 cm dargestellt. Die jährliche solare Einstrahlung ist für einen Modulabstand von 40 cm ungefähr bis zu einem Faktor von 1,7 höher als bei einem Modulabstand von 80 cm und ungefähr bis zu einem Faktor von 2,4 höher als bei einem Modulabstand von 120 cm.

Da die vorangegangenen Simulationen gezeigt haben, dass eine Ausrichtung der Module nahezu parallel zur Fassade günstig ist, erfolgte die Untersuchung, wie stark der Solarertrag durch die Verwendung von bifazialen Modulen im Vergleich zu monofazialen Modulen steigt. Der Solarertrag der Rückseite des Moduls wurde hierbei allerdings nicht gewichtet, d.h. es wurde eine Bifazialität von 100% angenommen. Abbildung 6 zeigt den Vergleich zwischen der kumulierten jährliche Bestrahlungsstärke von monofazialen und bifazialen Modulen.

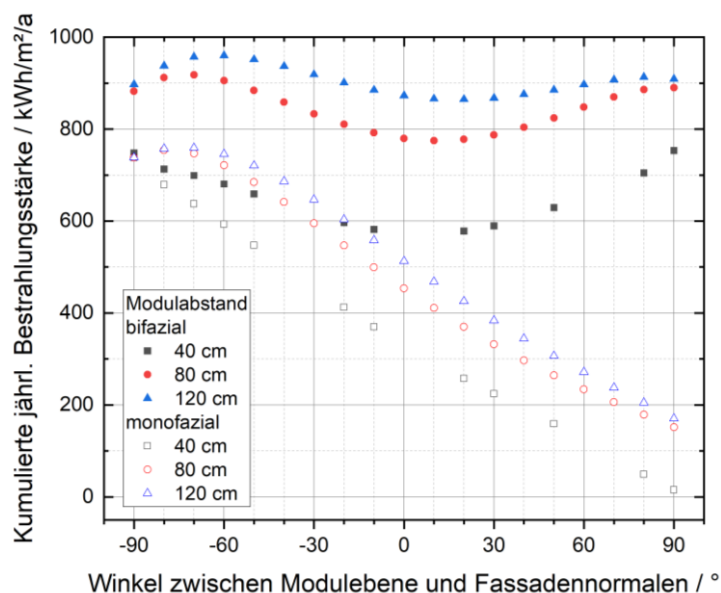


Abbildung 6 Vergleich der kumulierten jährliche Bestrahlungsstärke von monofazialen und bifazialen Modulen bei einer Bifazialität von 100%.

Der positive Effekt der bifazialen Module auf den Solarertrag tritt verstärkt bei größeren Modulabständen auf und steigert den Solarertrag bei optimaler Modulausrichtung um ungefähr 25% im Vergleich zu monofazialen Modulen.

#### *Vorgehen zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit*

Auf Basis der Methodik der Berechnung der Stromgestehungskosten bzw. engl. Levelized Cost of Electricity (LCOE) zeigt nachfolgende Abbildung 7 die Sensitivität der PV-Systemkosten und der LCOE mit abweichendem Flächenkosten des PV-Systems (links) sowie der Einfluss der Flächenkosten und des PV-Systemertrages (Delta Electricity Yield) auf die LCOE (rechts).

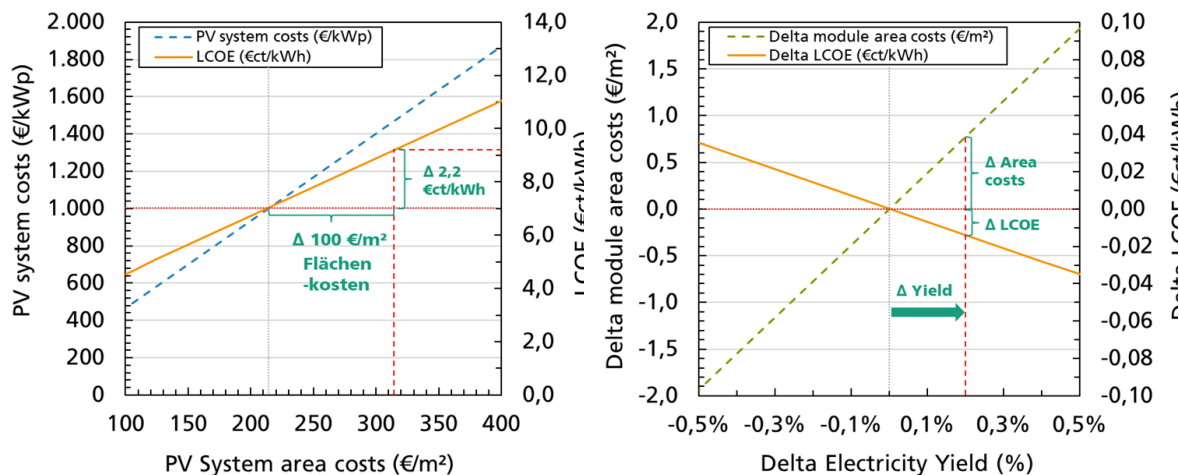


Abbildung 7: Sensitivität der PV-Systemkosten und der LCOE mit abweichendem Flächenkosten des PV-Systems (Graph links) sowie der Einfluss der Flächenkosten und des PV-Systemertrages (Delta Electricity Yield) auf die LCOE (rechts).

Die in Abbildung 7 links dargestellten Ergebnisse zeigen, dass eine Änderung der Flächenkosten des PV-Systems um  $\pm 10$  €/m<sup>2</sup> bzw.  $\pm 100$  €/m<sup>2</sup> zu einer Änderung der LCOE um  $\pm 3\%$  bzw.  $\pm 30\%$  (hier  $\pm 2,2$  €/kWh) führt. Die rechts dargestellten Ergebnisse zeigen, dass eine Verbesserung der Systemertrages des PV-Systems um 0,5% zu einer Verringerung der LCOE um 0,5% führt bzw. eine maximale Erhöhung des Systempreises um 2,0 €/m<sup>2</sup> ermöglicht. Das zur Berechnung der hier dargestellten Top-Down-Sensitivitätsanalyse entwickelte Kostenmodell wurde verwendet, um die im Projekt betrachteten PV-Lamellensystemstrukturen hinsichtlich der zu erwartenden PV-Systemkosten und LCOE unter Einbezug der PV-Lamellensystemkomponenten sowie des zu erwartenden PV-Systemertrages zu untersuchen.

In Absprache mit den Projektpartnern wurde vereinbart, die Wirtschaftlichkeit für folgende PV-Systemvarianten im weiteren Projektverlauf gegenüberzustellen:

- 1) Reine Glas-Lamellenstruktur an der Gebäudefassade (ohne PV)
- 2) HighFas-PV-Lamellensystem (bifazial & blendfrei)

Die Methodik für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit eines bifazialen und blendfreien HighFas-PV-Lamellensystems wurde wie folgt vereinbart:

- LCOE-Analysen für Varianten 2)
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung: Zusätzliche Kosten der PV-Integration müssen sich über 20 Jahre amortisieren
  - Invest-Mehrkosten = Systemkosten Varianten 2) minus Variante 1)
  - Analyse der Wirtschaftlichkeit über Ersatz von Stromerkauf
- Ergebnis: Rendite der PV-Integration

Zusätzlich zur Berechnung der Rendite gegenüber des lokalen Stromersatzes gegenüber Netzbezug sollten die reinen Stromgestehungskosten einer PV-Integration in Fassaden-Glaslamellen ermittelt werden. Für weitere Informationen zu diesen Kalkulationen wird auf den Bericht des Projektpartners Flachglas Sachsen verwiesen.

Zusätzlich zur LCOE und PV-Systemkostenbetrachtung werden auf Basis der Ergebnisse der weiteren Projekt-APs Cost of Ownership (COO) Berechnungen der Einzelschritte zu Bearbeitung der Modulgläser für deren Entblendung durchgeführt.

Es wurde eine Kostenbetrachtung der industriellen Umsetzung des zweistufigen HighFas-Prozesses betrachtet. Dieser besteht aus den beiden Prozessschritten:

1. Laser-Patterning mit anschließender
2. nasschemischer Glas-Strukturierung.

Dabei wurde von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Alle Berechnungen basieren auf einer Glasgröße von 1.0 x 1.0 m<sup>2</sup>
- Es wurde von einem Glaspreis von 5.0 €/m<sup>2</sup> ausgegangen
- Eingehendes Glas ist mit einer Opferschicht beschichtet: Kosten Opferschicht: 1.0 €/m<sup>2</sup>
- Produktion in Deutschland im Dreischichtbetrieb mit 4500 h/a Betriebszeit in 3 Schichten und ~50% OEE (Overall Equipment Efficiency)
- Annahme einer Glas-Bruchrate von 0.5% bei jedem Prozessschritt

Tabelle 2 zeigt eine Zusammenfassung der aus dem zweistufigen ISE-Laborprozesses (linke Spalte) abgeleiteten Prozessparameter für vier verschiedene industriell umsetzbare Hochdurchsatz-Prozesse.

Tabelle 2: Prozessparameter für den zweistufigen ISE-Laborprozesse und daraus abgeleiteten Parameter für vier verschiedene industriell umsetzbare Hochdurchsatz-Prozesse.

Prozess		ISE	Hochdurchsatz-Prozesse			
		Laborprozess	5 µm	8 µm	25 µm	40 µm
Lochabstand		200 µm				
Pulsenergie/Loch	µJoule	40	1.25	1.25	1.25	1.25
Lochabstand	µm	200	5	8	25	40
Löcher pro m <sup>2</sup>	Löcher/m <sup>2</sup>		4.00E+10	1.56E+10	1.60E+09	6.25E+08
Rate	Löcher/s		1.60E+08	1.60E+08	1.60E+08	1.60E+08
	m <sup>2</sup> /s		0.0040	0.0102	0.1000	0.2560
Durchsatz	s/m <sup>2</sup>		250.0	97.7	10.0	3.9
	min/m <sup>2</sup>	60	4.17	1.63	0.17	0.07
Ätzdauer	min	15.4	0.38	0.62	1.92	3.08
Nasschemieprozess	s	923	23	37	115	185

Für den Laserprozess gilt der Zusammenhang, dass der Durchsatz des Laserprozesses von der Pulsenergie je Loch sowie des Lochabstandes abhängig ist. Die Ätzdauer des Nasschemieprozesses ist abhängig vom Lochabstand zwischen benachbarten Löchern aus der Laser-Vorprozess. Für die Berechnung der Ätzdauer wurde eine Ätzgeschwindigkeit von 6,5 µm/min angenommen.

Für die COO-Analyse der Laserbearbeitung wurden folgende Annahmen getroffen:

- Gesamt CAPEX Laser: 700 k€
  - Basis-CAPEX Laseranlage: 500 k€
  - CAPEX Laser/Scanner/Optik: 200 k€ (1x 200 W IR-Laser für alle Prozesse)
- Automatisierung hier nicht Durchsatz-limitierend

Für die COO-Kalkulation des „Nasschemischen Glasstrukturätzen“ wurden folgende Annahmen getroffen:

- Equipment: Nasschemische PV Inline Ätzanlage
- Durchfahrsgeschwindigkeit  $v = 900-1000$  mm/min (außer bei 5  $\mu$ m Lochabstand mit 23 s Ätzzeit bei  $v = 1560$  mm/min)
- Die Ätzdauer bestimmt die Anlagenlänge, der Durchsatz bleibt entsprechend konstant:
  - 23 s  $\rightarrow$  8,4 m | 37 s  $\rightarrow$  5,4 m | 115 s  $\rightarrow$  6,6 m | 185 s  $\rightarrow$  7,8 m Anlagenlänge
  - 15 min  $\rightarrow$  55 m<sup>2</sup>/h | 23 s  $\rightarrow$  92 m<sup>2</sup>/h | 37 s  $\rightarrow$  55 m<sup>2</sup>/h | 115 s  $\rightarrow$  55 m<sup>2</sup>/h Durchsatz
- Chemikalienverbrauch & -preise (bei 15 min Ätzzeit)
  - HF-50: 470 ml/m<sup>2</sup> x 1,67 €/l = 0,78 €/l
  - HCl-37: 240 ml/m<sup>2</sup> x 0,85 €/l = 0,20 €/l
  - dKOH: 40 ml/m<sup>2</sup> x 1,51 €/l = 0,06 €/l
  - Bad-Erstansatz alle 10.000 Gläser

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der COO-Analyse für beide Prozessschritte (links Laserbearbeitung, rechts Nasschemisches Glasstrukturätzen):

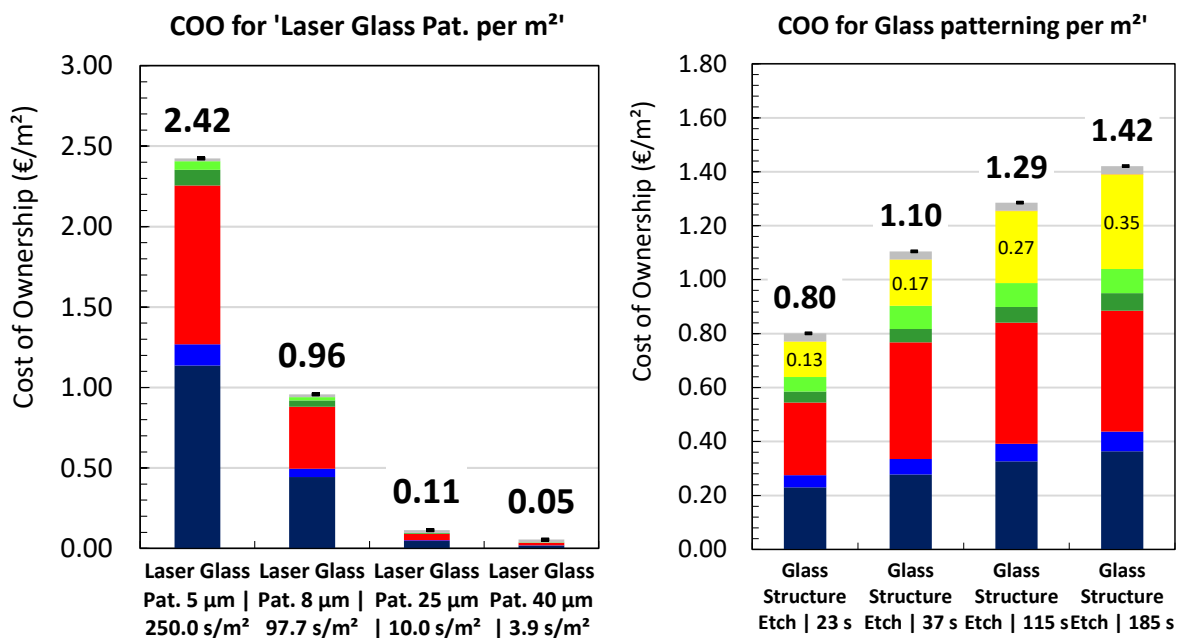


Abbildung 8: Ergebnisse der COO-Analyse für beide Prozessschritte (links Laserbearbeitung, rechts Nasschemisches Glasstrukturätzen).

Die Ergebnisse zeigen, dass die COO der Laserbearbeitung der Gläser stark mit dem Lochabstand und entsprechend geringeren Lochanzahl skaliert. Bei einem Lochabstand von 5 µm fallen 2.42 €/m<sup>2</sup> Glasstrukturierungskosten per Laser an, bei einem Lochabstand von 40 µm nur 0.05 €/m<sup>2</sup>. Die COO des nasschemischen Glasstrukturätzens skalieren in entgegengesetzter Richtung zum Lochabstand, da bei größerem Lochabstand eine größere Fläche zu ätzen ist. Jedoch skalieren die COO nicht im selben Maße.

Eine Zusammenführung beider Schritte mittels Addition der COO für korrespondierende Lochabstände ist in Abbildung 9 dargestellt. Der Graph links zeigt die COO der zweistufigen Glasbearbeitung für die Lochabstände von 5 µm, 8 µm, 25 µm und 40 µm. In der rechts dargestellten Abbildung wurden die COO für weitere Lochabstände auf Basis der zuvor beschriebenen Annahmen und Abhängigkeiten hinzugefügt.

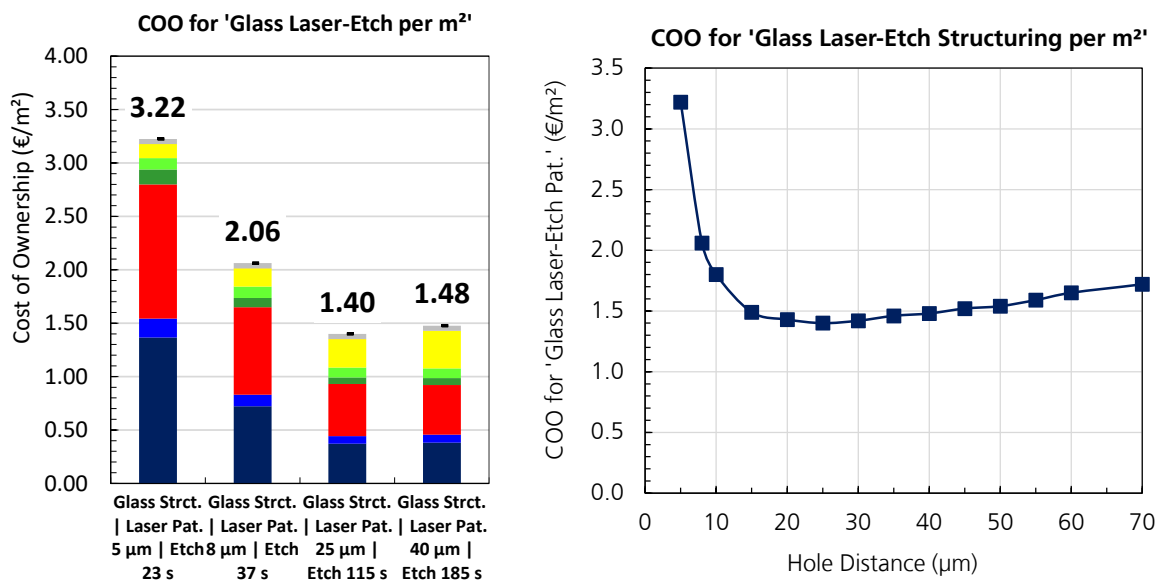


Abbildung 9: COO der zweistufigen HighFas-Anti-Blend-Glasbearbeitung für verschiedene Lochabstände.

Es ist zu erkennen, dass das Kostenminimum für bei einem Lochabstand von ca. 25 µm liegt, mit Glasbearbeitungskosten von 1.4 – 1.5 €/m<sup>2</sup>. Inklusiv Opfer-schichtkosten von hier zusätzlich angenommenen 1.0 €/m<sup>2</sup> ergibt sich eine Summe von ca. 2.4 – 2.5 €/m<sup>2</sup> für die zweistufige HighFas-Anti-Blend-Glasbearbeitung.

Damit ist ein niedriges Niveau der Prozesskosten für die Herstellung von strukturiertem Glas für PV-Module mit HighFas-Technologien nachgewiesen.

## AP 2: Optische Anforderungen

Das Arbeitspaket 2 – optische Anforderungen – ist in zwei Meilensteine geteilt: die „Entwicklung eines Basis-Simulationsmodells für Glasstrukturen“ und die „Entwicklung einer Methode zur Blendungsbewertung“. Dementsprechend ist auch der Bericht gegliedert.

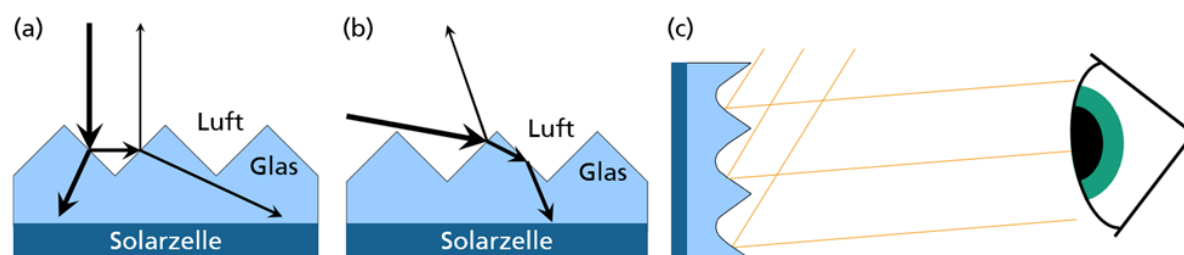
### Basis-Simulationsmodell für Glasstrukturen

Dieser Meilenstein ist ein Grundbaustein für die Realisierung einer blendarmen oder blendfreien Struktur in den weiteren Arbeitspaketen, denn dieser dient dazu Anforderungen für die Struktur der Glasoberfläche zu ermitteln.

Bevor eine Analyse mit einem Simulationsmodell durchgeführt werden konnte, musste eine Auswahl sinnvoller und vielversprechender Strukturen ausgewählt werden. Hierfür wurden zuerst theoretische Überlegungen zu den Anforderungen an die Oberflächenstrukturen angestellt. Anschließend sollte überprüft werden, inwieweit diese Anforderungen realisierbar sind und anhand welcher Messungen die Güte der strukturierten Gläser bewertet wird.

Aus theoretischen Überlegungen ergab sich zum einen, dass steile Flanken in der Struktur nötig sind, um den Reflexionsgrad zu verringern. Denn dadurch wird die Anzahl der Möglichkeiten zur Transmission und demzufolge der Einkopplung in die Solarzelle erhöht (wie in Abbildung 10 (a) für kleine Einfallswinkel und (b) für große Einfallswinkel zur Flächennormalen zu sehen), während der Reflexionsgrad wird.

Aus dieser Theorie ließ sich ebenfalls schlussfolgern, dass steile Flankenwinkel besonders im oberen Strukturbereich wichtig sind und sich Rundungen an den Spitzen besonders negativ auswirken. Bei Rundungen im oberen Strukturbereich nähert sich das Reflexionsverhalten dem einer planaren Oberfläche an. Insbesondere bei schrägem Einfall steigt dann der Reflexionsgrad an, da die Strahlung vermehrt unter einem steileren Winkel zur lokalen Flächennormalen auftrifft, weil mehr Flächenanteile mit steilen Flanken im geometrischen Schattenbereich liegen. Weiterhin ist es günstig, wenn die Struktur eine Vielfalt von Flankenwinkeln, also gekrümmte statt lokal planare Oberflächenelemente aufweist. Dadurch wird die reflektierte Strahlung in einen großen Raumwinkel verteilt.



**Abbildung 10:** Schematische Darstellung des Reflexions- und Transmissionsverhaltens einer beispielhaften strukturierten Oberfläche unter (a) kleinem und (b) großem Einfallswinkel zur Oberflächennormalen. (c) Schematische Darstellung zur Veranschaulichung der Erhöhung der Blendungswahrscheinlichkeit bei einer strukturierten Glasoberfläche mit Fernordnung.

Zusätzlich zu diesen Anforderungen wird es wahrscheinlich auch nötig sein, dass die Struktur keine Fernordnung besitzt, d.h. die Struktur darf über einen großen Bereich nicht das gleiche

Muster aufweisen. Anderenfalls haben die einfallenden Strahlen den gleichen lokalen Einfallswinkel und werden, wie in Abbildung 10 (c) schematisch darstellt, in den gleichen Raumwinkel gestreut, sodass das Blendungspotential hoch ist.

Für die Simulation von Glasstrukturen wurden verschiedene Modelle entwickelt und etabliert, die sich durch unterschiedliche Komplexität, Genauigkeit und Vielseitigkeit auszeichnen:

- (a) Grundlegende Blendungsabschätzung auf Basis der aus Topographiedaten gewonnenen Flankenwinkelverteilungen. Damit lassen sich Leuchtdichtewerte bei senkrechtem Lichteinfall berechnen und grundlegende Zusammenhänge bzw. Optimierungskriterien ableiten.
- (b) Berechnung der Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) auf Basis des Mikrofacettenmodells auf Basis der aus Topographiedaten gewonnenen Flankenwinkelverteilungen. Damit lassen sich Lichtverteilungen für beliebige Ein- und Ausfallswinkel berechnen. Der Näherungsansatz (statistische Repräsentation der Topographie, keine Mehrfach-Interaktion mit der Oberfläche) kommt bei steilen oder komplexen Topographien und bei großen Einfallswinkeln an Grenzen.
- (c) Berechnung der BRDF durch Strahlverfolgung auf Basis der mikroskopisch gewonnenen Topographiedaten. Damit lassen sich Lichtverteilungen für beliebige Ein- und Ausfallswinkel berechnen. Ungenauigkeiten treten bei sehr hohen Einfallswinkeln auf.

Mit der grundlegenden Blendungsabschätzung konnten folgende Leuchtdichten für senkrechten Lichteinfall abgeschätzt werden:

Konfiguration	Leuchtdichte
Sonne	$1.4 \times 10^9 \text{ cd/m}^2$
Direkte Reflexion der Sonne an planer Glasoberfläche	$5.7 \times 10^7 \text{ cd/m}^2$
Direkte Reflexion der Sonne an planer entspiegelter Glasoberfläche	$1.4 \times 10^7 \text{ cd/m}^2$
Texturiertes Glas, dessen Flankenwinkelverteilung bei $7^\circ$ maximal ist	$12\,700 \text{ cd/m}^2$
Texturiertes Glas, dessen Flankenwinkelverteilung bei $14^\circ$ maximal ist	$3\,300 \text{ cd/m}^2$
Lambert'sch streuende Glasoberfläche	$1\,576 \text{ cd/m}^2$

Ein wichtiger Vergleichswert dazu ist die in der Nähe von Flughäfen geforderte maximale Leuchtdichte von  $20\,000 \text{ cd/m}^2$ .

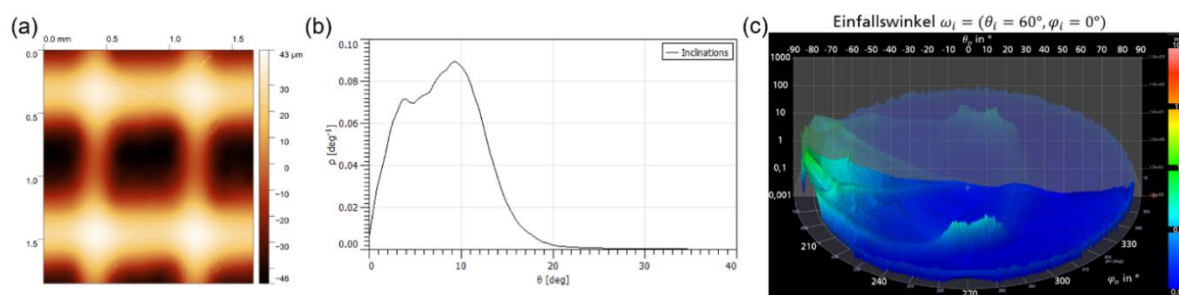
Mit der Etablierung und Validierung dieser Modelle ist Meilenstein MS 2.1 („Basis-Simulationsmodell für Glasstrukturen liegt vor“) abgeschlossen.

Diese basierend auf den Modellen definierten Anforderungen sagen allerdings nichts über deren Realisierbarkeit aus. Um zu ermitteln, welche Flankenwinkel(verteilungen) realisierbar sind und um zu einem späteren Zeitpunkt Referenzgläser zur Einordnung der Güte neuer innovativer

Strukturen vorweisen zu können, wurden neben den im Projekt hergestellten strukturierten Gläsern gleichfalls einige auf dem Markt erhältliche betrachtet.

Um die Untersuchung einer großen Anzahl an Proben effizient zu gestalten, wurden zunächst optisch interessante Proben mit dem Konfokalmikroskop untersucht. Anhand der resultierenden Strukturen und Flankenwinkelverteilungen wurde die Auswahl weiter eingegrenzt, sodass nur für eine kleine Anzahl Simulationen mit dem Basis-Simulationsmodell und Messungen mit dem Goniophotometer durchgeführt werden mussten. Beide Analysen gaben Aufschluss über das Reflexionsverhalten des Materials. Für die ersten photogoniometrischen Messungen wurde die Rückseite der Proben schwarz eingefärbt, um die absorbierende Solarzelle zu imitieren.

Als optisch interessant wurden einige Walzgläser und zwei geätzte Gläser eingestuft. Bei den untersuchten Walzgläsern wurden Flankenwinkelverteilungen mit einem Maximum von maximal  $10^\circ$  des polaren Winkels festgestellt. Ein Beispiel einer Struktur und deren Flankenwinkelverteilung ist in Abbildung 11(a) und (b) dargestellt. Ein exemplarisches Messergebnis der Goniophotometermessungen eines Mini-Moduls mit einem Walzglas mit makroskopischen, umgekehrten Pyramiden bei einem polaren Lichteinfallswinkel von  $60^\circ$  ist in Abbildung 11(c) als Mountain-Plot visualisiert. Von zwei untersuchten geätzten Glasstrukturen besaß eine ein Maximum bei  $14^\circ$ . Deshalb ist diese Struktur ein vielversprechender Kandidat für weitere Untersuchungen.



**Abbildung 11:** (a) Mit dem Konfokalmikroskop gemessene Oberflächenstruktur eines Walzglases mit kleinen umgekehrten Pyramiden. (b) Flankenwinkelverteilung der Probe aus (a). (c) Mountain-Plot der Messergebnisse mit dem Goniophotometer eines Walzglases im Mini-Modul mit großen umgekehrten Pyramiden.

### *Charakterisierung und Blendungsbewertung von strukturierten Gläsern*

Für die verschiedenen Iterationen in der Strukturierung wurden vier im Projekt hergestellte Proben, drei kommerziell erhältliche, strukturierte Walzgläser, eine kommerziell erhältliche geätzte Probe und eine unstrukturierte Probe, die aus der gleichen Charge wie das Glas der innerhalb des Projekts hergestellten Proben ist, im Goniophotometer vermessen.

Als Beispiel soll hier die Charakterisierung eines kommerziellen Produkts vorgestellt werden. Die Probe wurde nach der Konfokalmikroskopiemessung rückseitig mit mattschwarzem Lack eingefärbt, um das Reflexionsverhalten eines Solarmoduls mit Zelle oder schwarzem Backsheet zu imitieren. Die anschließende visuelle Inspektion zeigt ein homogenes, diffuses und recht winkelstabiles Reflexionsverhalten. Lediglich beim Blick unter streifenden Lichteinfallswinkeln

(großen Winkeln zur Flächennormalen) zeigen sich ausgeprägtere Reflexionen. Dies bestätigen auch die Goniophotometermessungen dieser Probe.

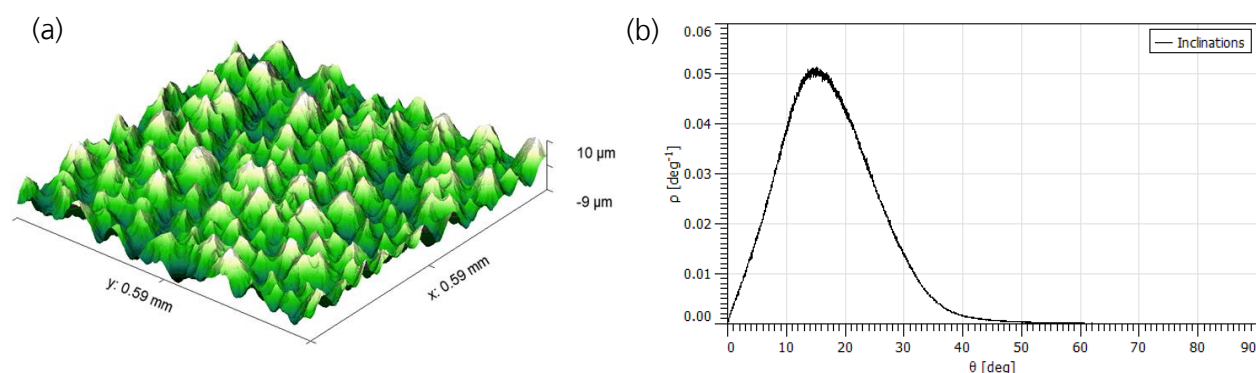
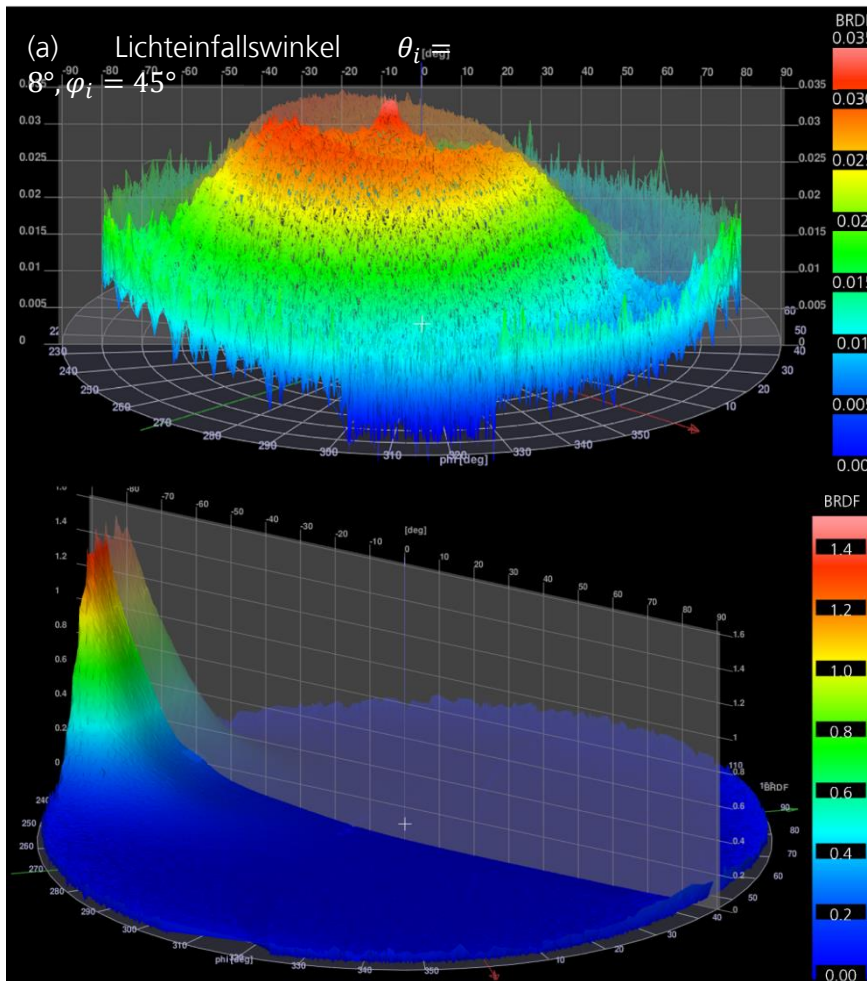


Abbildung 12: Die geätzte Glasprobe Sevasa Probe 897. (a) Visualisiert ist die Oberflächenstruktur auf Basis einer Konfokalmikroskopiemessung. (b) Flankenwinkelverteilung mit Maximum bei ca.  $14^\circ$ , abgeleitet aus der Oberflächenstruktur.

Wie in Abbildung 13 zu sehen, reflektiert die Probe unter einem kleinen Einfallswinkel des Lichtes zur Flächennormalen in einen sehr großen Raumwinkel. Aus diesem Grund ist auch der Maximalwert der BRDF mit  $BRDF_{\text{max}} \approx 0,035 \frac{1}{\text{sr}}$  um einen Faktor von mehr als  $10^3$  kleiner als bei unstrukturierten Gläsern. Bei einer solaren Bestrahlungsstärke von  $100.000 \text{ lx}$  entspricht das im Maximum einer Leuchtdichte von  $3500 \text{ cd/m}^2$ . Das ist nur etwa doppelt so viel wie die Leuchtdichte einer Lambert'sch streuenden Glasoberfläche ( $1576 \text{ cd/m}^2$ ). Für größere Einfallswinkel des Lichts verschiebt sich der Peak zu großen Ausfallswinkeln, wobei auch hier die maximale BRDF mit  $BRDF_{\text{max}} \approx 1,4 \frac{1}{\text{sr}}$  sehr klein und um einen Faktor von fast  $10^3$  kleiner ist im Vergleich zu unstrukturierten Gläsern (Vergleich mit PV-Minimodul mit unstrukturiertem Glas).



**Abbildung 13:** Plots der im Goniophotometer gemessenen BRDFs der Sevasa Probe 897. (a) Plot unter einem Einfallswinkel von  $\theta_i = 8^\circ$  und  $\varphi_i = 45^\circ$ . (b) Plot unter einem Einfallswinkel von  $\theta_i = 60^\circ$  und  $\varphi_i = 45^\circ$ .

### Entwicklung einer Methode zur Blendungsbewertung

Bisher fehlt es an Bewertungsmethoden, die bauvorhabenunspecifisch sind und anwendbar sind auf stark diffuse Oberflächen, wie die in HighFas entwickelten und analysierten Proben. Um die Proben dennoch vergleichen zu können und damit auch die Güte der verschiedenen Entwicklungsschritte aufzeigen zu können, wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Bewertungsmethoden zur Abschätzung des Blendungspotenzials von (BI)PV-Deckgläsern entwickelt. Aus diesem Grund geht die Analyse der im Projekt vermessenen Proben in den zweiten Meilenstein über. Im zweiten Unterarbeitspaket 2.2 soll eine Methode zur Bewertung der Blendung durch PV-Anlagen entwickelt werden. Dieses Unterarbeitspaket gliedert sich in zwei Teile: Der Bewertung von Strukturen anhand ihrer Oberflächeneigenschaften sowie Nutzerbefragungen zur Blendungsbewertung von stark strukturierten Oberflächen.

Die Methoden zur Bewertung von Strukturen anhand ihrer Oberflächeneigenschaften sind nicht spezifisch für Bauvorhaben und berücksichtigen lediglich die Eigenschaften der Oberflächenstruktur der Gläser. Die Auswahl an Bewertungsmethoden beinhaltet den gerichtet-konischen Reflexionsgrads sowie dessen Anteil am gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrads und die Flankenwinkeldichteverteilung. Die Bewertungsmethoden werden auf drei unterschiedlich strukturierte Glasproben angewendet.

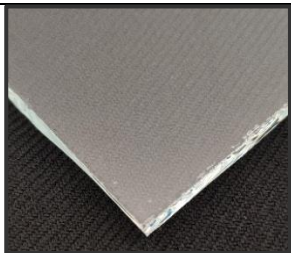
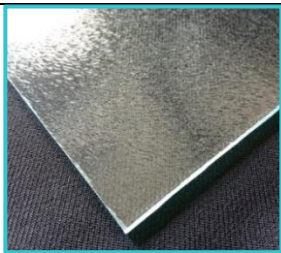
#### *Messmethoden*

Verwendete Messmethoden sind die Photogoniometrie, bei der die Reflexionsverteilung von Oberflächen gemessen wird und die Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) ermittelt (wurde bereits in vorherigen Zwischenberichten beschrieben) und die Konfokalmikroskopie, ein optisches Verfahren zur Messung der Oberflächentopografie als 3D-Datensatz.

#### *Proben*

Die Bewertungsmethoden werden auf drei unterschiedlich strukturierte Glasproben angewendet und zudem gibt es ein unstrukturiertes Referenzglas (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Überblick über die untersuchten Proben sowie deren Namensgebung

<b>Referenzglas</b>	<b>Rillen</b>	<b>Pyramiden</b>	<b>Laser</b>
Unstrukturiert	Leicht strukturiert	Moderat strukturiert	Stark strukturiert
			

#### *Bewertungsmethoden*

Die ausgewählten Bewertungsmethoden umfassen den gerichtet-konischen Reflexionsgrad sowie den Anteil des gerichtet-konischen Reflexionsgrads am gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrad bei unterschiedlichen Lichteinfallswinkeln. Für den gerichtet-konischen Reflexionsgrad wurde ein Kegel mit einem halben Öffnungswinkel von  $\alpha = 10^\circ$  verwendet. Für diese Bewertungsmethode werden die im Photogoniometer gemessenen BRDFs verwendet.

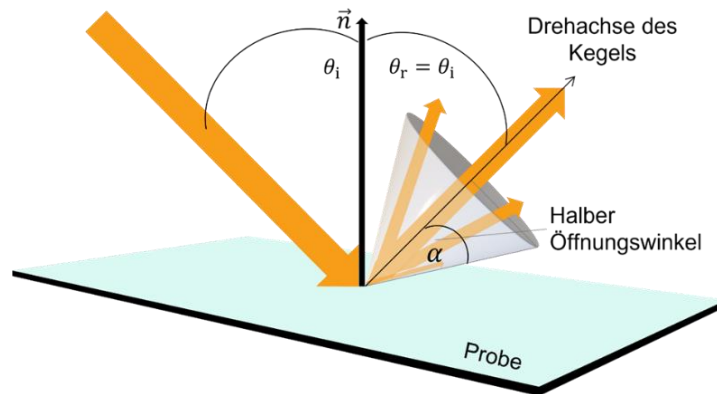


Abbildung 14: Schematische Darstellung des gerichtet-konischen Reflexionsgrads. Aus den Konfokalmikroskopieaufnahmen wird die Flankenwinkeldichteverteilung ermittelt. Die Kenngrößen Halbwertsbreite und die Breite der Flankenwinkeldichteverteilung und der am häufigsten vorkommende Flankenwinkel werden für die strukturierten Proben ermittelt.

### Ergebnisse

Das Referenzglas hat den höchsten gerichtet-konischen Reflexionsgrad. Die Proben "Pyramiden" und "Laser" zeigen deutlich niedrigere Werte und somit eine höhere Diffusität der Reflexion und folglich auch ein niedrigeres Blendungspotential (siehe Abbildung 15).

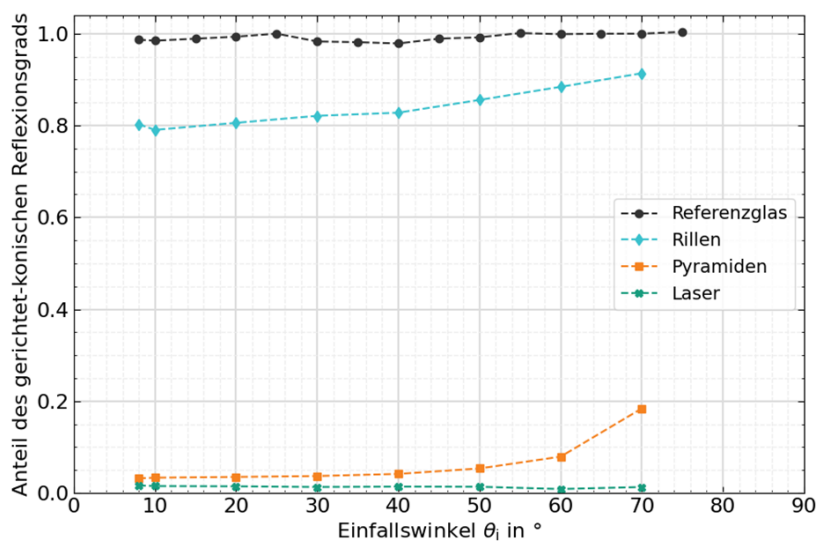


Abbildung 15: Der Anteil des gerichtet-konischen Reflexionsgrads am gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrad über den Lichteinfallswinkel für das Referenzglas sowie die drei strukturierten Proben.

Abbildung 16 zeigt die Verteilung der Flankenwinkel der Oberflächenstrukturen. Die Proben "Pyramiden" und "Laser" weisen die breiteste Verteilung auf, was auf eine hohe Reflexionsdiffusität hinweist.

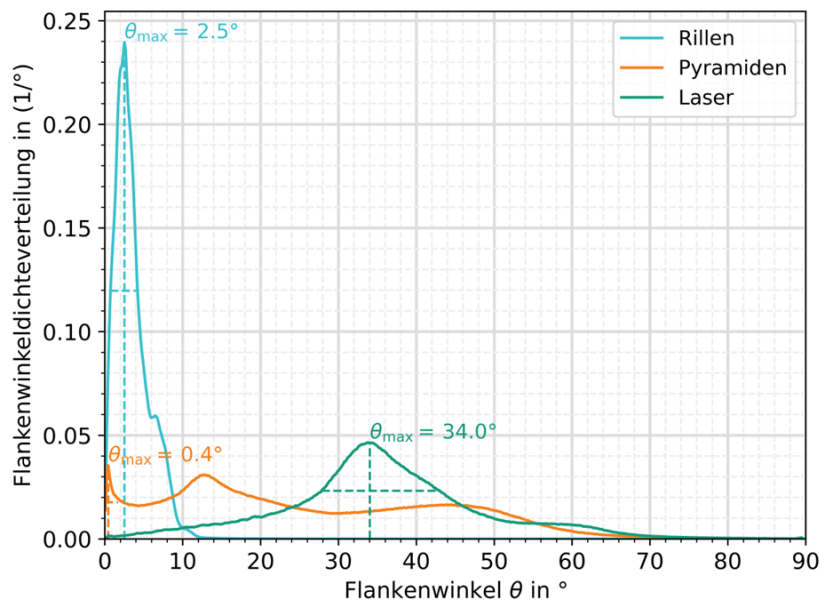


Abbildung 16: Flankenwinkeldichteverteilungen der drei strukturierten Proben. In jeder Verteilung sind der am häufigsten vorkommende Flankenwinkel  $\theta_{max}$  sowie die Halbwertsbreite FWHM markiert.

Die Betrachtung des Reflexionsverhaltens lässt eine Reihenfolge des Blendungspotenzials der drei Proben zu, diese stimmt auch mit dem in Tabelle 3 angegebenen Maß der Strukturiertheit überein. Dabei besitzt die Probe "Rillen" das höchste und die Probe "Laser" das niedrigste Blendungspotenzial (ohne dem Referenzglas). Die Ergebnisse aus dem Anteil des gerichtet-konischen Reflexionsgrads und die Breite der Flankenwinkeldichteverteilung liefern die gleiche Reihenfolge und zeigt das höchste Blendungspotential für das Referenzglas.

Diese Bewertungskriterien müssen allerdings noch auf deutlich mehr Proben angewendet werden, um über ihre Güte und Anwendbarkeit urteilen zu können. Daraus können sich zudem auch Verbesserungen dieser Kriterien oder ganz neue Kriterien herausbilden. Es befinden sich auch noch weitere Methoden, die auf der BRDF einer Probe basieren, in der Entwicklung.

Für nähere Details zu diesem Unterkapitel verweisen wir auf den zugehörigen Konferenzbeitrag „Bewertung des Blendungspotenzials verschiedener BIPV-Deckgläser: Untersuchung der Oberflächenstruktur“ des 39. PV-Symposiums (2024).

### HighFas Proben

Im Anschluss werden die für die verschiedenen Iterationen in der Strukturierungsentwicklung hergestellten Proben, die zuvor untersuchte kommerziell erhältliche geätzte Probe und eine unstrukturierte Probe, die aus der gleichen Charge wie das Glas der innerhalb des Projekts hergestellten Proben ist, verglichen. Die im Projekt hergestellten Proben werden entsprechend nach Herstellungszeitpunkt als „HF1“, „HF2“, „HF3“ bezeichnet. In Abbildung 17 ist ein Foto der rückseitig geschwärzten Probe HF3 zu sehen. Durch die Strukturierung weist sie ein mattes, homogenes Erscheinungsbild auf.



Abbildung 17: Foto der Probe HF3, die ein mattes Erscheinungsbild aufgrund ihrer Struktur aufweist

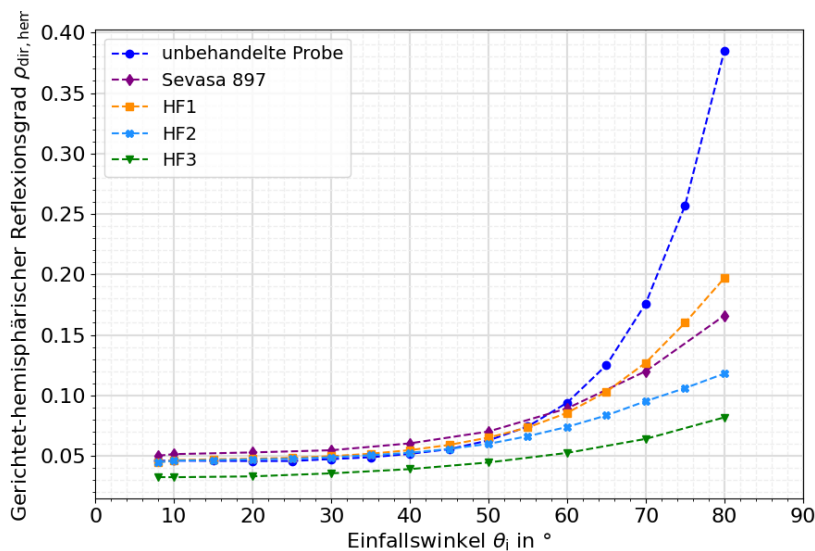


Abbildung 18 Gerichtet-hemisphärischer Reflexionsgrad über den polaren Lichteinfallswinkel von fünf unterschiedlichen rückseitig geschwärtzten Glasproben: unstrukturierte Probe aus der HighFas-Charge (unstrukturiertes Glas), Sevasa 897, erste, zweite und dritte am ISE gelaserte und geätzte Probe aus der HighFas-Charge („HF1“, „HF2“, „HF3“).

Zunächst wird der gerichtet-hemisphärische Reflexionsgrad der unterschiedlichen Glasproben über den polaren Lichteinfallswinkel betrachtet (siehe Abbildung 18).

Für Lichteinfallswinkel nahe der Normalen ist der gerichtet-hemisphärische Reflexionsgrad aller Proben außer der Probe „HF3“ ungefähr gleich und liegt zwischen 0,045 und 0,050. Dahingegen liegt der gerichtet-hemisphärische Reflexionsgrad der Probe „HF3“ bei lediglich 0,032.

Für alle Lichteinfallswinkel liegt der gerichtet-hemisphärische Reflexionsgrad der Probe „HF3“ deutlich unter dem gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrad aller anderen Proben und steigt

auf einen gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrad von 0,085 bei einem polaren Lichteinfallswinkel von  $80^\circ$ . Das ist ein Hinweis darauf, dass die Transmission und damit der Ertrag eines Moduls mit einem derart strukturierten Deckglas gesteigert werden kann, insbesondere bei hohen Lichteinfallswinkeln. Durch die Strukturierung sind bei hohen Lichteinfallswinkeln gegenüber der Flächennormalen die lokalen Lichteinfallswinkel auf die Flanken der Struktur kleiner und dies bewirkt nach den Fresnelgleichungen einen niedrigeren Reflexionsgrad an dieser lokalen Stelle. Da die Lichteinfallswinkel bei Installationen an der Fassade höher sind als bei Dachinstallationen oder Freiflächenanlagen, tritt dieser Effekt verstärkt bei vertikalen Installationen wie an der Fassade auf.

Abbildung 18 zeigt, dass mit jedem Iterationsschritt in der Strukturentwicklung eine Verbesserung, d.h. eine Senkung des gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrads, erreicht werden konnte. Bereits die in der zweiten Iteration hergestellte Probe weist einen niedrigeren gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrad auf als die geätzte, kommerziell erhältliche Probe Sevasa 897.

Der gerichtet-hemisphärische Reflexionsgrad allein sagt wenig über die Blendungseigenschaften aus. Im Bereich der Photovoltaik tritt Blendung insbesondere auf, wenn das einfallende Sonnenlicht verstärkt in einen kleinen Raumwinkel reflektiert wird. Da die strukturierten Proben das einfallende Licht in einen größeren Raumwinkel reflektieren, wird für den Vergleich ein weiteres Maß eingeführt. Als Maß wird der in einen Kegel mit einem halben Öffnungswinkel von  $10^\circ$  um den Ausfallswinkel laut Reflexionsgesetz reflektierten Anteil (fortan gerichtet-konischer Reflexionsgrad genannt) betrachtet. Abbildung 19 zeigt die Ergebnisse des gerichtet-konischen Reflexionsgrads über den polaren Lichteinfallswinkel für die fünf verschiedenen Proben. Auch hier zeigt sich, dass die Probe „HF3“ für alle Lichteinfallswinkel den niedrigsten gerichtet-konischen Reflexionsgrad besitzt. Dies ist unter anderem durch den niedrigeren gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrad begründet.

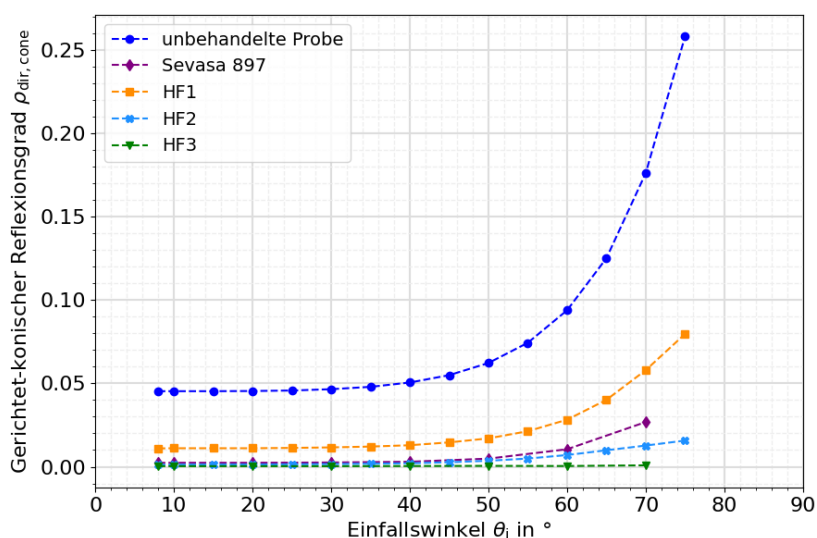


Abbildung 19 Reflexion in einen Kegel mit einem halben Öffnungswinkel von  $10^\circ$  um den Ausfallswinkel laut Reflexionsgesetz

Um zu prüfen, ob der niedrigere gerichtet-konische Reflexionsgrad der Probe „HF3“ auf den niedrigeren gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrad zurück geht oder ob die Begründung auch in einer diffuseren Reflexion liegt, wird in Abbildung 20 durch den Anteil des gerichtet-

konischen am gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrad analysiert. Das unstrukturierte Glas reflektiert für alle Lichteinfallswinkel nahezu das gesamte reflektierte Licht in einen Kegel mit einem halben Öffnungswinkel von  $10^\circ$ . Währenddessen reflektiert die Probe „HF3“ nur einen Anteil von 0,008 bis 0,013 in besagten Kegel und weist damit über alle Einfallswinkel den niedrigsten Anteil des gerichtet-konischen am gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrads auf. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Probe „HF3“ das einfallende Licht sehr diffus reflektiert.

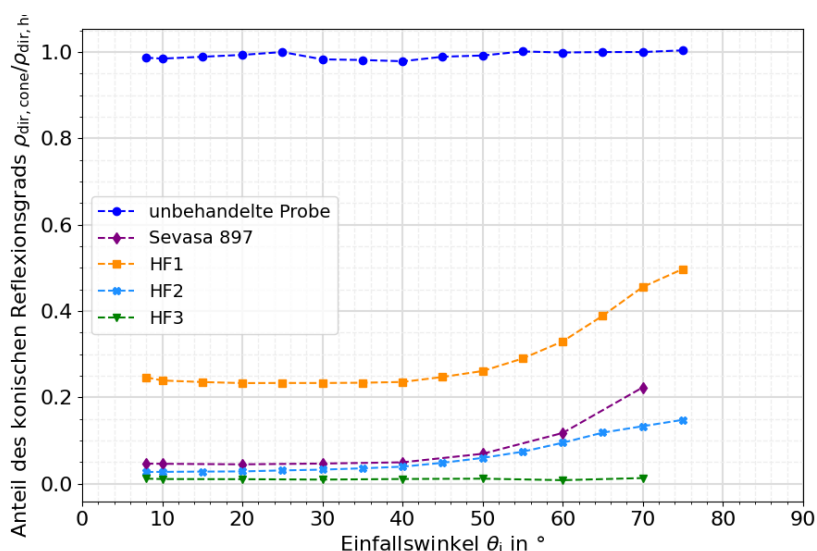


Abbildung 20 Anteiliger Reflexionsgrad in einen Kegel mit einem halben Öffnungswinkel von  $10^\circ$  um den Ausfallswinkel laut Reflexionsgesetz

Um Blendung durch eine Oberfläche zu verhindern, sollte diese in einen großen Raumwinkel reflektieren und keine scharfen Peaks aufweisen. Aus diesem Grund zeigt Abbildung 21 die im Goniophotometer vermessenen Reflexionsverteilungen, die Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF), der Probe „HF3“ für verschiedene polare Lichteinfallswinkel  $\theta_i$ .

Wie in Abbildung 21 dargestellt und aus der vorangegangenen Evaluation zu erwarten, zeigt die Probe „HF3“ außer bei einem Lichteinfallswinkel von  $\theta_i = 50^\circ$  und  $\theta_i = 80^\circ$  nur sehr schwache, leicht ausgeschmierte spekulare Peaks. Bei den Lichteinfallswinkel  $\theta_{in} = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$  wird das Licht in alle Azimutwinkel reflektiert.

Bei einer Beleuchtungsstärke an einem sonnigen Tag von  $E_v = 100.000 \text{ lx}$  besäßen Module mit einem solch strukturierten Deckglas entsprechend der Probe „HF3“ maximal eine Leuchtdichte von  $L_v = 17.500 \text{ cd/m}^2$ , wenn die Sonne unter einem Winkel von maximal  $50^\circ$  auf das Deckglas fällt. Bei einem Einfallswinkel der Sonne von  $80^\circ$  hätte die Oberfläche eine maximale Leuchtdichte von ungefähr  $L_v = 300.000 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ . Psychologische und physiologische Blendung können bereits bei deutlich niedrigeren Leuchtdichten auftreten. Ab einer Leuchtdichte von  $L_v = 10^5 \text{ cd/m}^2$  kann es zu Absolutblendung kommen. In diesem Fall verfügt das Auge über keinen Adaptionsmechanismus mehr, um sich an die Helligkeit anzupassen.

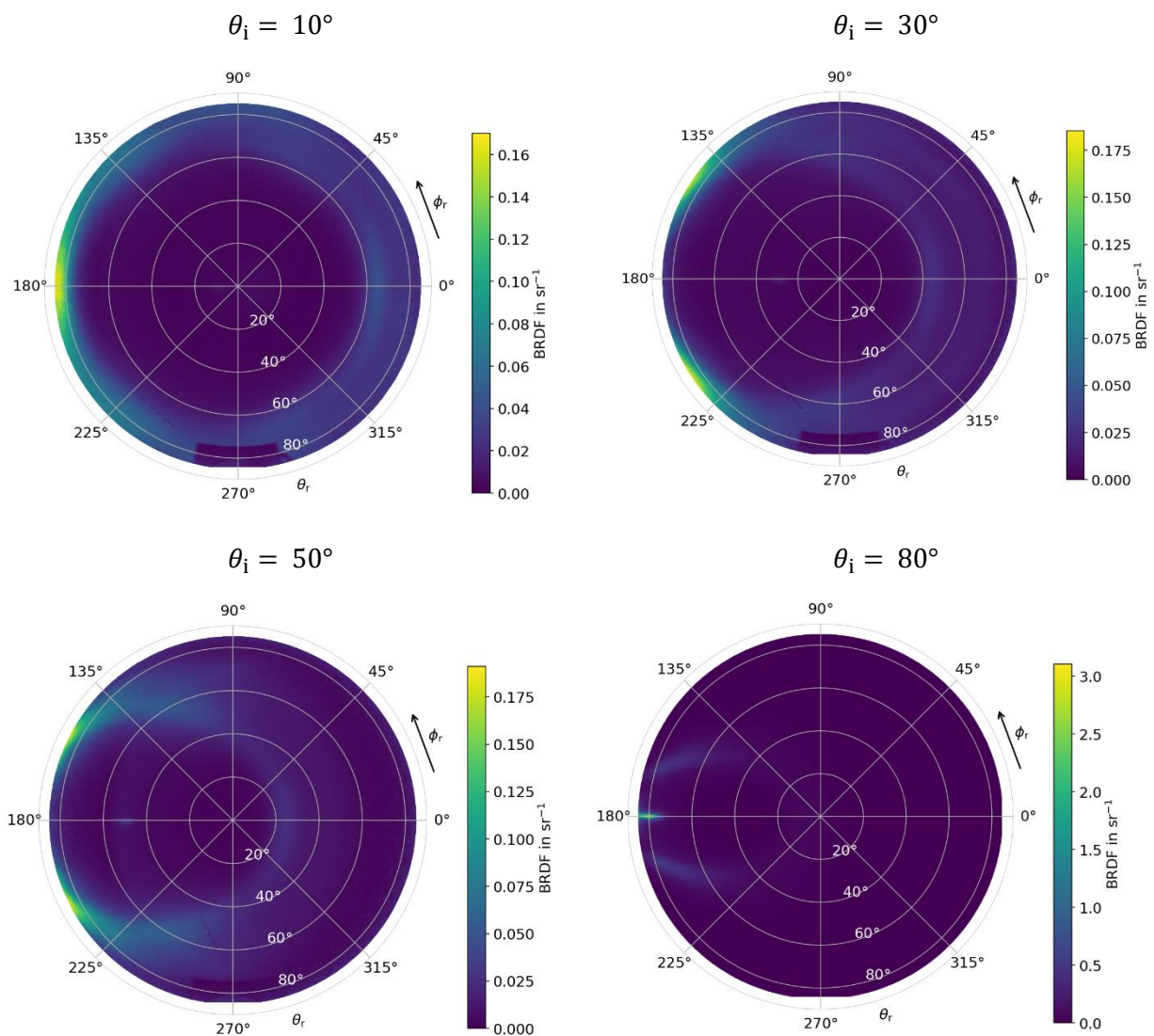


Abbildung 21 Plots der unter einem Einfallswinkel von  $\theta_i = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 80^\circ$  gegenüber der Flächennormalen im Goniophotometer gemessenen BRDFs der Probe „HF3“.

Ob Blendung im Einzelfall auftritt, hängt nicht allein von der Leuchtdichte ab, sondern von einer Vielzahl an Faktoren, die die Blendungswahrnehmung beeinflussen: Vertikale Bestrahlungstärke am Auge, von der Blendquelle eingenommener Raumwinkel, Adaptionzustand des Auges, Adaption-/Umgebungsleuchtdichte, Expositionsdauer, Winkel zur Sichtlinie unter der die Blendquelle im Sichtfeld erscheint, Alter, Augenpigmentierung usw.

### *Vergleich von rückseitig geschwärzten Proben und PV-Minimodulen mit unterschiedlichen Metallisierungsgraden*

Aus mehreren Gründen haben wir im Projekt zunächst Gläser rückseitig geschwärzt, um sie zu vermessen. Die Gründe waren zum einen wirtschaftliche und ökologische Gründe und zum anderen diente dieses Vorgehen der Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit. Bei der Modulherstellung können unterschiedliche Komponenten verwendet werden, sodass die Metallisierung variieren kann sowie das Einkapselungsmaterial. Bei der Vermessung dieser Proben kann

der Anteil der beleuchteten und metallisierten Probenfläche zwischen zwei Messungen variieren, da die beleuchtete Fläche nicht homogen ist.

Nun wollen wir untersuchen, welchen Einfluss ein unterschiedlicher Metallisierungsgrad hat und wie vergleichbar die rückseitige Schwärzung mit einer Modulkonfiguration ist. Hierfür wurden für unbehandelte und strukturierte Oberflächen jeweils vier Module mit unterschiedlichem Metallisierungsgrad hergestellt. Hierbei sind die Module mit steigendem Metallisierungsgrad: (i) Modul mit einer eingekapselten Zelle, (ii) Modul mit eingekapselter Zelle mit metallischen Kontaktfingern, (iii) Modul mit eingekapselter Zelle, Fingern sowie Busbars und (iv) ein funktionsfähiges Modul. Für die Module wurden Silizium-Heterojunction-Präkursoren (Blue Cell; Format M6, Kantenlänge: 166 mm, Dicke:  $\sim 110 \mu\text{m}$ ) verwendet und anschließend am ISE weiterverarbeitet. Die Proben wurden mit einer Kombination aus LSMC, (Laser Scribe and Mechanical Cleave) auf eine Kantenlänge von 156 mm geschnitten, um sie in mit den kleinen Glasproben in ein Minimodul integrieren zu können. Die Gridfinger basieren auf einer silberhaltigen Niedertemperaturpaste und wurden mittels Siebdruck aufgebracht. Ulbrich Runddraht mit Sn60Pb40 (60% Zinn, 40% Blei) Legierung mit einem Gesamtdurchmesser von  $355 \mu\text{m}$  wurde für die Busbars verwendet. Als Einkapselungsfolie wurde POE (Hangzhou First TF4) eingesetzt.

Diese vier Module mit variierendem Metallisierungsgrad sowie eine rückseitig geschwärzte Glasprobe wurden im Goniophotometer vermessen und werden im Anschluss verglichen.

### Unstrukturierte Proben

Für die fünf unterschiedlichen Proben wird zunächst der gerichtet-hemisphärische Reflexionsgrad in Abbildung 22 betrachtet. Für kleine polare Lichteinfallswinkel zeigt sich, dass mit steigendem Metallisierungsgrad der gerichtet-hemisphärische Reflexionsgrad von 0,045 (Modul mit Zelle) auf 0,061 (Modulkonfiguration) ansteigt. Zudem zeigt sich, dass das Modul mit Zelle und ohne jegliche Metallisierung einen vergleichbaren gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrad aufweist. Lediglich für große Lichteinfallswinkel liegt der gerichtet-hemisphärische Reflexionsgrad der rückseitig geschwärzten Probe leicht unter dem gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrad des Moduls mit Zelle.

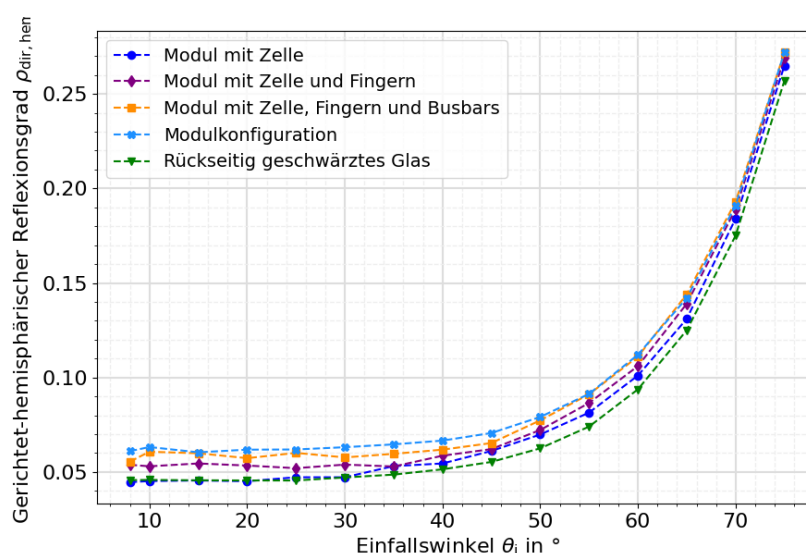


Abbildung 22: Gerichtet-hemisphärischer Reflexionsgrad über den polaren Lichteinfallswinkel auf die unstrukturierten Proben.

In Abbildung 23 ist der wie oben definierte gerichtet-konische Reflexionsgrad über den polaren Lichteinfallswinkel für die fünf betrachteten unstrukturierten Proben dargestellt. Zwischen den fünf verschiedenen Proben zeigen sich nur minimale Unterschiede. Dies zeigt, dass der durch die Metallisierung zusätzliche reflektierte Anteil diffus reflektiert wird. Ein Grund hierfür könnten die verwendeten Rundverbinder sein, die nicht gerichtet reflektieren.

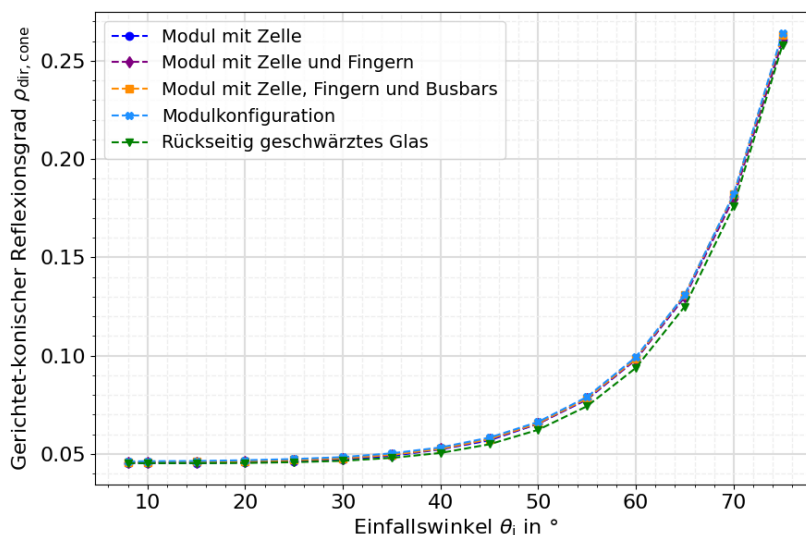


Abbildung 23: Gerichtet-konischer Reflexionsgrad über den polaren Lichteinfallswinkel auf die unstrukturierten Proben.

### Strukturierte Proben

In Abbildung 24 zeigt sich für die strukturierten Proben ein anderes Verhalten. Zwar sind die Verläufe des gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrads über den polaren Einfallswinkel für alle Proben ähnlich, allerdings entspricht die Reihenfolge der Höhe des gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrads nicht der erwarteten.

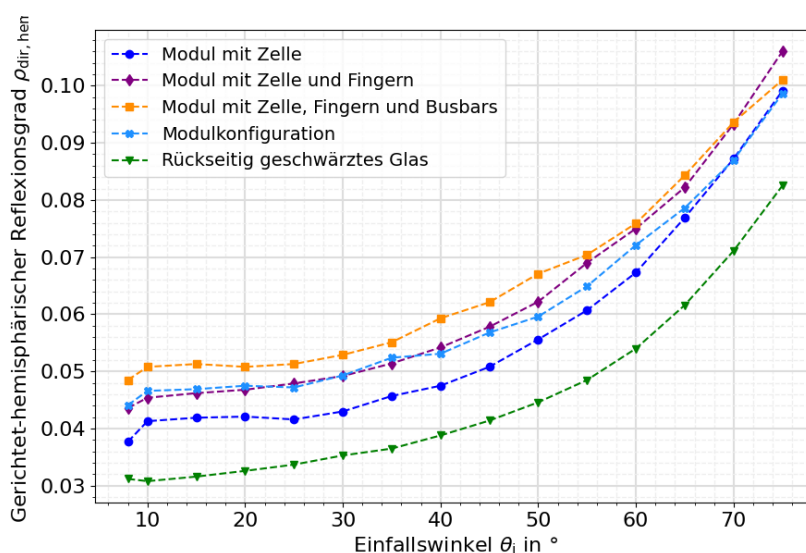


Abbildung 24: Gerichtet-hemisphärischer Reflexionsgrad über den polaren Lichteinfallswinkel auf die strukturierten Proben.

In Abbildung 25 ist ein sehr deutlicher Unterschied im Verlauf des gerichtet-konischen Reflexionsgrads über den polaren Lichteinfallswinkel für das Modul mit Modulkonfiguration und das Modul mit Zelle, Fingern und Busbars zu sehen. Der deutlich niedrigere Verlauf kann nicht durch die Metallisierung erklärt werden. Eine mögliche Erklärung ist ein Unterschied in der Strukturierung der Deckgläser. Leichte Unterschiede in der Strukturierung der Deckgläser können insbesondere bei den niedrigen Werten des gerichtet-konischen Reflexionsgrads einen deutlichen Einfluss haben. Für die strukturierten Proben werden in Abbildung 26 die Reflexionsverteilungen als BRDFs der fünf Proben für einen polaren Lichteinfallswinkel von  $\theta_i = 30^\circ$  betrachtet.

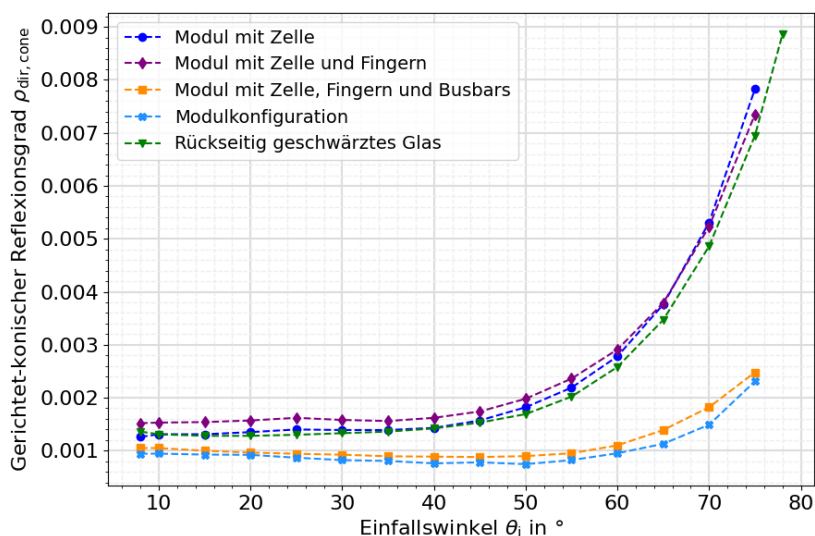
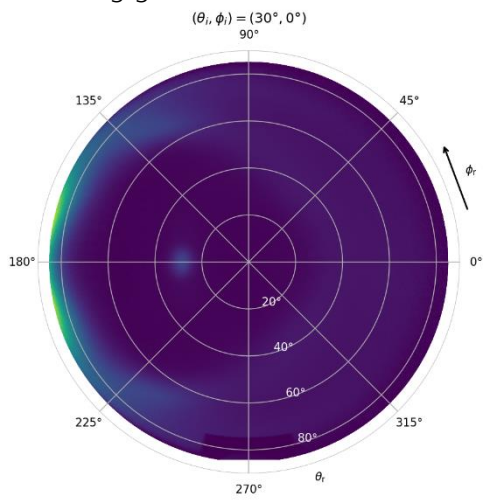


Abbildung 25: Gerichtet-konischer Reflexionsgrad über den polaren Lichteinfallswinkel auf die strukturierten Proben.

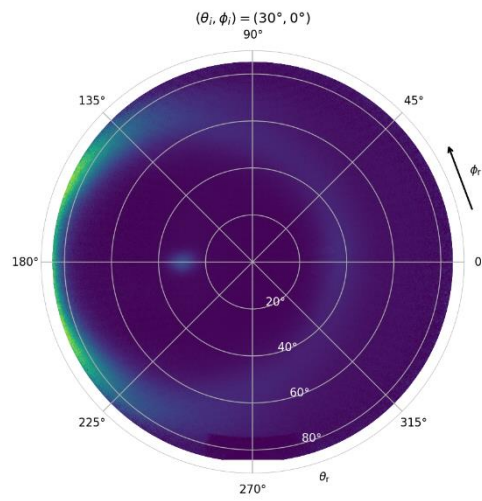
In Abbildung 26 ist zu erkennen, dass der gerichtete Peak in die Ausfallsrichtung  $\theta_a = 30^\circ$  und  $\phi_a = 180^\circ$  in der BRDF der Probe mit Zelle, Fingern und Busbars und in der Probe mit Modulkonfiguration schwächer ausgeprägt ist als bei den anderen Proben. Dies erklärt die Unterschiede im gerichtet-konischen Reflexionsgrad in Abbildung 25 und ist vermutlich auf leichte Unterschiede in der Struktur zurückzuführen, die wahrscheinlich durch geringfügige Abweichungen im Herstellungsprozess verursacht wurden. Zudem scheint der Wall um den gerichteten Peak, insbesondere bei dem rückseitig geschwärzten Glas, weniger stark ausgeprägt zu sein, was den niedrigsten gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrad erklärt.

Der Vergleich von rückseitig geschwärzten Proben und PV-Minimodulen mit unterschiedlichen Metallisierungsgraden zeigt, dass die Ergebnisse für nicht strukturierte Proben mit ausgeprägtem gerichtetem Reflexionsverhalten zwischen rückseitig geschwärzten Proben und PV-Minimodulen vergleichbar sind. Bei stark strukturierten, diffus streuenden Proben ergibt sich zwar ein ähnlicher Verlauf des gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrads in Abhängigkeit vom polaren Lichteinfallswinkel, jedoch kann der gerichtet-konische Reflexionsgrad in diesem Fall nicht als Vergleich herangezogen werden. Dies liegt daran, dass hier nur der gerichtet reflektierte Peak verglichen wird, der bei stark strukturierten Proben in der Regel nur schwach ausgeprägt ist und somit sehr niedrige Werte aufweist. Deshalb können bereits kleine Variationen in der Struktur einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

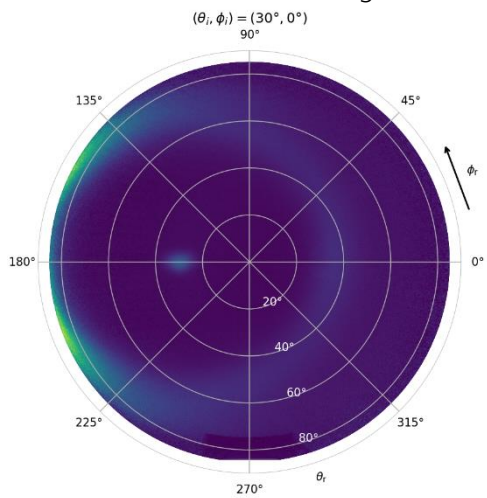
Rückseitig geschwärztes Glas



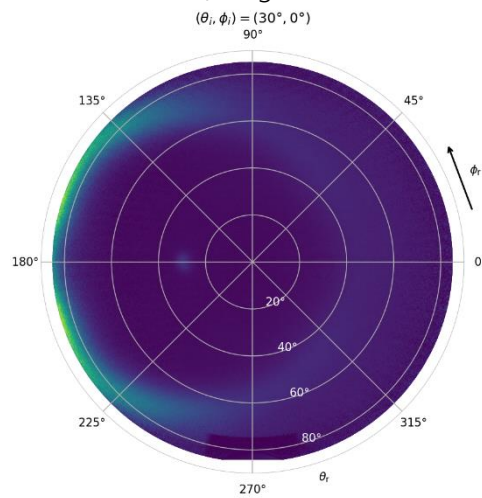
Modul mit Zelle



Modul mit Zelle und Fingern



Modul mit Zelle, Fingern und Busbars



Modulkonfiguration

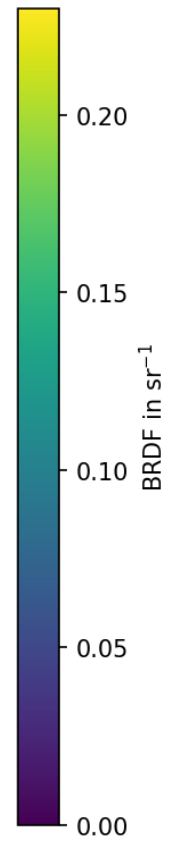
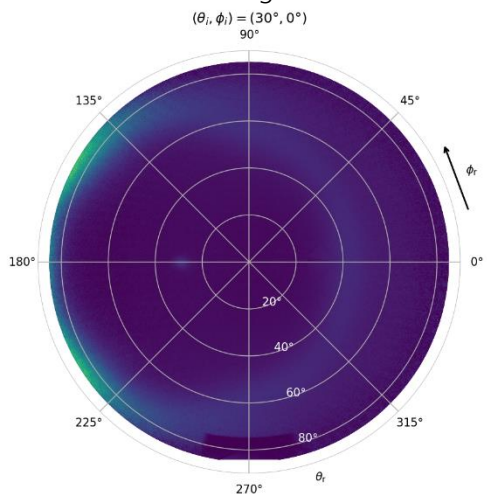


Abbildung 26: BRDFs der fünf Proben für einen polaren Lichteinfallswinkel von  $\theta_{ai} = 30^\circ$

### AP 3: Entwicklung von Anti-Blend-Glasstrukturen mit hoher Transmission

#### Charakterisierung der optischen Eigenschaften des Glases sowie der Laser-Glas Interaktion

Zu Beginn der Projektlaufzeit wurden die Voraussetzungen für die Prozessentwicklung zur Herstellung von Laser-basierten Modifikationen der Glasoberfläche geschaffen. In drei Versuchsteilen wurden die Grundlagen für eine effiziente Laserstrukturierung von Glas untersucht. Ein Teilaspekt befasst sich mit den erforderlichen Schwellfluenzen für die Glasbearbeitung mit IR- und UV-Lasern. Ein weiterer Aspekt beschäftigt sich mit dem direkten Laserabtrag von Glas. Schließlich werden die Farbzentren untersucht, die sich während der Strukturierung bilden.

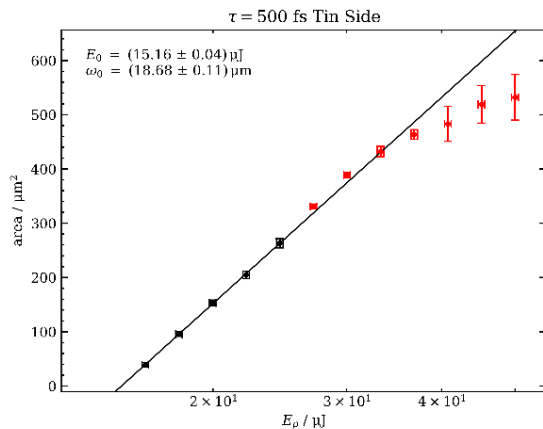


Abbildung 27 Ergebnis der Abtraguntersuchung von IR-Laserpulsen auf der Zinnseite des Glases. Die Schwellfluenz wird nach Lius Methode bestimmt. Die Energie der roten Datenpunkte ist ein Vielfaches über der Schwellenergie, hier wird der lineare Zusammenhang verlassen.

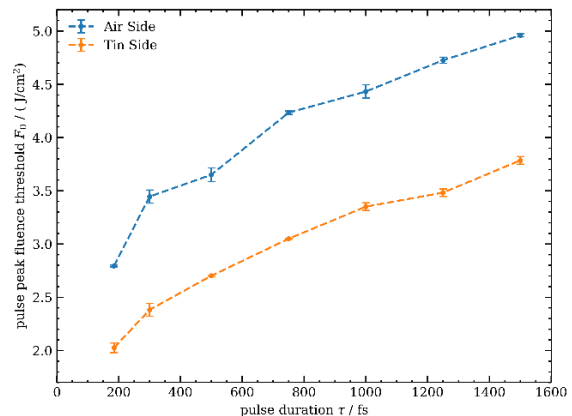


Abbildung 28 Schwellfluenz für den Glasabtrag als Funktion der Pulsdauer.

Zur Untersuchung der Abhängigkeiten der Laser-Glas-Wechselwirkung von Prozessparametern wurden die Schwellfluenzen des IR-Lasers für verschiedene Pulsdauern sowohl auf der Zinnseite als auch auf der Luftseite des Glases analysiert. Ein exemplarisches Ergebnis ist in Abbildung 27 dargestellt. Abbildung 28 zeigt die Schwellfluenz für den Abtrag in Abhängigkeit von der Pulsenenergie für die Zinnseite und die Luftseite des Glases. Dabei zeigt sich eine deutlich höhere Absorption des Lasers auf der Zinnseite.

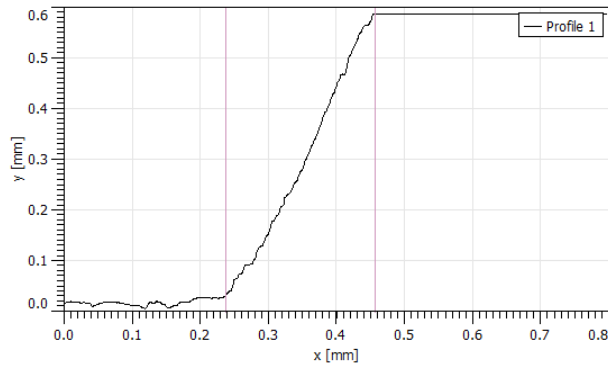


Abbildung 29 Höhenprofil einer durch IR-Laserablation erzeugten 3D Struktur in einer Glasprobe.

Weiter wurde untersucht, welche Wellenlängen für die weiteren Arbeiten zielführend sind. Versuche zeigten, dass die Lichteinkopplung von ultravioletter (UV) Strahlung in das Glas deutlich höher ist als die Einkopplung von infraroter (IR) Strahlung. Daher eignen sich UV Laser insbesondere für die Bearbeitungsschritte, bei welchen mit einzelnen Laserpulsen Strukturen in Mikrometergröße hergestellt werden sollen. Für die Nutzung von diffraktiven optischen Elementen für die Glasbearbeitung sind daher UV-Laserpulse den infraroten Lasern zu bevorzugen. Aufgrund des Kostenvorteils von IR-Lasern gegenüber von UV-Lasern, kombiniert mit ihrer höheren Leistung, sind diese Laser trotz dessen für Prozesse mit hohem Durchsatz relevant. Insbesondere bei hohen Pulswiederholungsraten ab etwa 1 MHz wird ein neues Abtragregime erreicht, bei welchem (vermutlich aufgrund thermischer Akkumulation und damit verbundener Lichtabsorption im Glas) ein Volumenabtrag möglich ist. In ersten Vorversuchen wurden auf diese Weise dreidimensionale Strukturen mit einer Tiefe von ungefähr 570  $\mu\text{m}$  und einem Flankenwinkel von etwa  $68^\circ$  erzeugt.

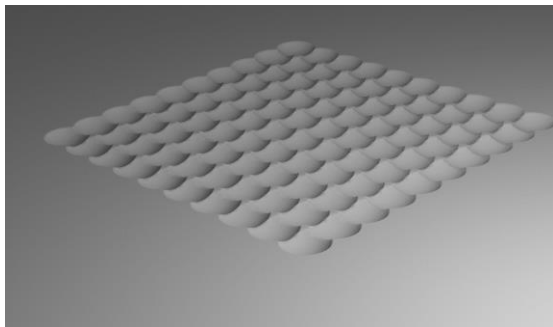


Abbildung 30 Computermodell der gewünschten Struktur

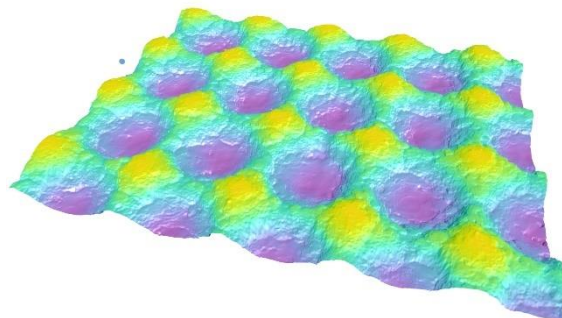


Abbildung 31 Konfokalmikroskop-Bild der gelaserten Glasoberfläche. Die Periode beträgt 75  $\mu\text{m}$ .

Es wurden Versuche durchgeführt, um eine periodische Oberflächenstruktur mittels direktem Laserabtrag zu erzeugen. Abbildung 30 zeigt ein Computermodell einer solchen Oberflächenstruktur. Diese Struktur wurde anschließend schichtweise mit einem UV-Laserprozess abgetragen. Ein 3D-Bild der so erzeugten Glasoberfläche ist in Abbildung 31 dargestellt. Obwohl diese Methode für die Herstellung beliebiger 3D-Strukturen geeignet ist, betragen die Prozesszeiten

etwa 1 Minute pro Quadratmillimeter. Daher ist dieser Ansatz für die Anwendung in der PV-Industrie nicht zielführend.

Der letzte Teilaspekt der Vorversuche befasst sich mit der Ausbildung von Farbzentren im Glas während der Laserprozessierung. Bei der Interaktion des Laserlichtes mit dem Glas entstehen Defekte in der molekularen Struktur des Glases, welche als eine Bräunung sichtbar werden. Abbildung 32 zeigt Querschnitte zweier Glasproben, bei welchen die Defekte deutlich erkennbar sind. Für die Anwendung der Laserbearbeitungsprozesse für Deckgläser für PV-Module ist es notwendig, die Lichtabsorption dieser Störstellen zu minimieren. Durch thermische Ausheilprozesse können diese Defekte zurückgebildet werden. Um dies zu untersuchen, wurden Versuche durchgeführt. In mehreren 4 mm dicken Glasproben wurde mittels infraroter Laserstrahlung eine hohe Defektdichte erzeugt, welche durch eine starke Verfärbung erkennbar ist. Eine dieser Proben wurde für 5 Minuten in einem Ofen bei 480°C erhitzt, wodurch das Glas wieder klar wurde. Eine spektrale Transmissionsmessungen vor, sowie nach dem thermischen Prozess ergab, dass durch das Aufheizen in etwa 98,8 % der initialen Transmission (gemittelt über das gesamte Spektrum) wieder hergestellt werden konnte. Es wird erwartet, dass die Effizienz dieses Prozesses durch eine weitere Optimierung noch gesteigert werden kann. Dieser erste Versuch zeigt jedoch bereits jetzt, dass thermisches Ausheilen der Defekte ein geeigneter Ansatz sein kann, um die Störstellen zurückzubilden und so die Laserbearbeitung von Gläsern für die PV-Anwendung zu ermöglichen.



Abbildung 32  
Seitenansicht zweier 4 mm dicken Glasproben vor (links), sowie nach dem thermischen Ausheilprozess (rechts). Die laserinduzierten Farbzentren sind vor dem Ausheilen als Bräunung deutlich sichtbar.

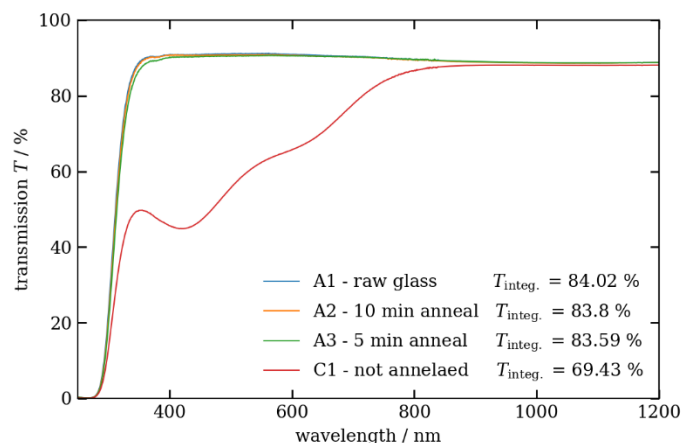


Abbildung 33 Transmissionsmessung von Glasproben mit Farbzentren, sowie thermisch ausgeheilten Proben.

### Entwicklung hybrider Laser-Ätzprozesse

In Kooperation mit den Industriepartnern wurde eine Versuchsreihe initiiert, welche die hybriden Prozesse aus nasschemischer Bearbeitung und Laserbearbeitung untersucht. Durch geeignete Laserprozesse sollen im Glas Modifikationen erzeugt werden, welche lokal die Ätzrate um einige Größenordnungen erhöhen können. Ziel dieser Experimentreihe ist es, die Selektivität sowie die Abtragrate der Ätzprozesse in Abhängigkeit der verwendeten Laserparameter zu bestimmen. Darüber hinaus wird untersucht, inwieweit Ätzprozesse die Oberflächen von laserstrukturierten Gläsern glätten können, um auf diesem Weg die in diesem Projekt erforderlichen optischen Eigenschaften zu erzielen. In enger Kooperation mit dem Projektpartner RENA, welcher einen großen Teil der Ätzprozesse umsetzte, wurde eine Vielzahl an Experimentreihen durchgeführt, um geeignete Laser- und Ätzparameter zu identifizieren und die resultierenden Oberflächen hinsichtlich ihrer Geometrie sowie ihrer optischen Eigenschaften zu charakterisieren.

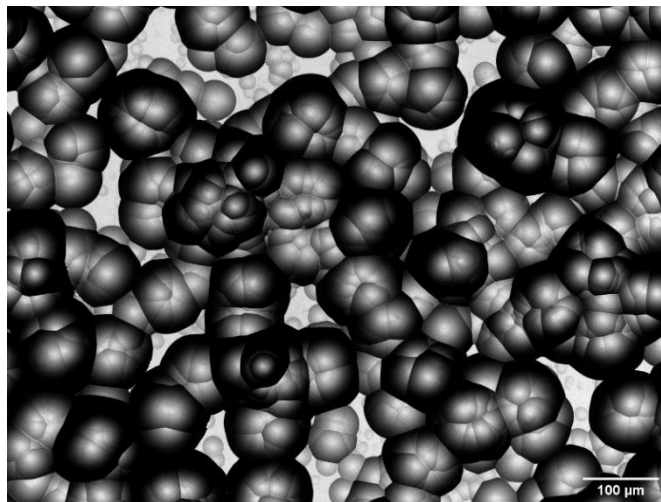


Abbildung 34 Mikroskopaufnahme der Oberfläche einer Probe, welche mittels eines hybriden Laser-Ätz-Prozesses strukturiert wurde. Die gewünschten scharfen Kanten der kugelförmigen Strukturen sind deutlich zu erkennen.

Das Ziel einer der Experimentreihen war es, das durch die Laserprozesse induzierte selektive Ätzen zu beobachten und die Ätzgeschwindigkeit für das verwendete Kalknatronglas zu bestimmen. Abbildung 34 zeigt eine Mikroskopaufnahme einer Oberflächenstruktur, die mittels dieses Prozesses erzeugt wurde. Hierbei wurde mittels eines infraroten Lasers (Amplitude Satsuma HP3,  $\lambda=1030$  nm) das gesamte Feld modifiziert, ohne durch den Laser einen Abtrag zu erzielen. Erst nach dem Ätzen bildet sich hier die Struktur aus. Darüber hinaus ist diese nur bei den Stellen zu beobachten, welche zuvor mittels des Lasers modifiziert wurden. Die resultierende Oberfläche weist eine Geometrie auf, die für das Projektziel, die Erzeugung von nicht-blenden Modulgläsern, zielführend erscheint. Der sphärische Abtrag hat einen Durchmesser von etwa  $100\ \mu\text{m}$  bei einer Tiefe von bis zu  $30\ \mu\text{m}$ . Dieses Verhältnis ist ausreichend, um die steilen Flanken zu erzeugen, welche in AP2 gefordert wurden. In dieser Experimentreihe wurde gezeigt:

- Bei diesem Prozess werden Oberflächendefekte im Glas erzeugt, welche im darauffolgenden Ätzprozess als Zentrum fürs chemische Ätzen dienen. An den Stellen der Glasprobe, welche nicht mittels Laserprozessen vorgeschädigt wurden, sind diese Strukturen nicht ausgeprägt.
- Dies kann ein Prozessansatz sein, um Oberflächenstrukturen mit scharfen Kanten an der Oberseite zu erzeugen

- Die horizontale Ätzrate von lasermodifiziertem Kalknatronglas beim Ätzen mittels einer Lösung (bestehend aus 50% HF, 37% HCl, H<sub>2</sub>O; im Mischungsverhältnis 1/1/2) konnte bestimmt werden. Hierfür wurden Mikroskopaufnahmen nach 5min, 10min, sowie 15min Ätzdauer aufgenommen. Aus der Messung der Durchmesser dieser Strukturen berechnet sich die Ätzrate zu (5.6 ± 0.6) µm/min.

Aus dieser Beobachtung entwickelt sich ein Laserprozess für die kontrollierte Erzeugung von periodischen Oberflächenmodifikationen im Glas mit steilen Flankenwinkeln. Bei diesem Prozess werden mittels des Lasers Bohrungen in die Glasoberfläche eingetragen. Diese Bohrungen werden in einem hexagonalen Gitter angeordnet. Bei einer Pulsfrequenz von 200 kHz, 500 Pulse pro Ätzzentrum sowie einer Gitterkonstanten von 200 µm dauert die Laserbearbeitung der 150x150 mm<sup>2</sup> Probe etwa 25 Minuten. Im anschließenden Ätzschritt werden diese Bohrungen ausgeweitet. Abbildung 35 zeigt das Ergebnis einer Simulation eines isotropen Ätzprozesses ausgehend von einer vorstrukturierten Oberfläche. Die verschiedenen Farben zeigen die Struktur mit zunehmender Ätztiefe. Aus dieser Überlegung zeigt sich, dass die genaue Geometrie der Laserstruktur kaum Einfluss auf das Endergebnis hat. Lediglich eine Strukturtiefe von ½ des horizontalen Strukturabstandes ist notwendig, um die hemisphärischen Abträge nach dem Ätzen zu erreichen.

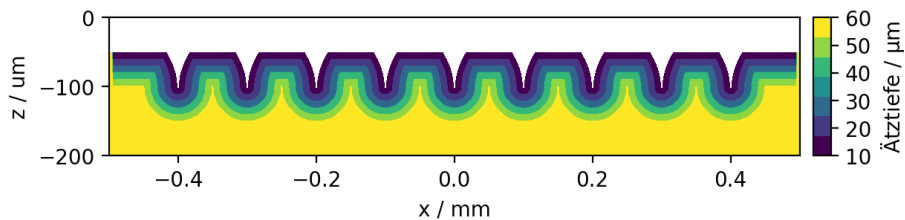


Abbildung 35 Simulation der Probenoberfläche bei isotropem Ätzverhalten. Gezeigt ist ein Querschnitt der Glasprobe. Die Struktur weitet sich mit zunehmender Ätztiefe (dargestellt durch unterschiedliche Farben) auf.

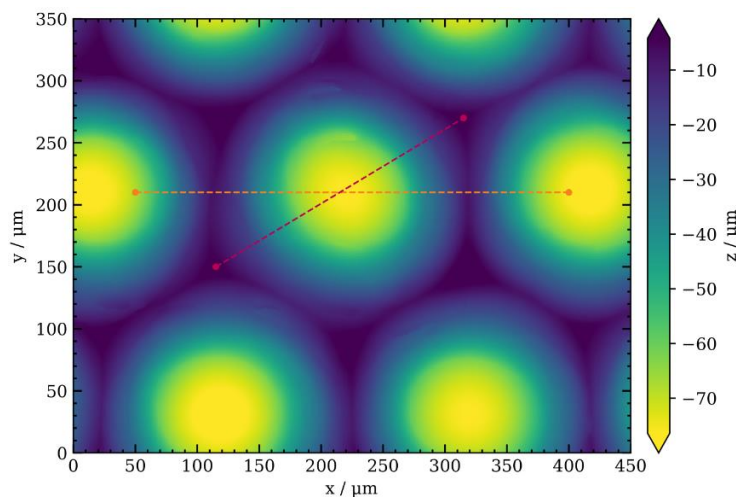


Abbildung 36 Konfokalmikroskopaufnahme der strukturierten Glasoberfläche. Mittels des Laserprozesses wurde ein hexagonales Gitter an Ätzzentren erzeugt, welche im Ätzprozess kugelförmig ausgeweitet wurde. Entlang der Linien wird das Höhenprofil in Abbildung 37 dargestellt.

Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass die resultierenden Punkte genau angeordnet werden können. Auf diese Weise wurde mit dem Laserprozess eine hexagonale Anordnung von Ätzzentren realisiert, die anschließend durch den chemischen Prozess aufgeweitet wurden. Ein Konfokalmikroskopbild der Oberflächenbeschaffenheit ist in Abbildung 36 dargestellt. Das Höhenprofil entlang der in rot eingezeichneten Linie zeigt die kugelförmigen Strukturen, die bei diesem Prozess entstehen. Diese Strukturen mit einem horizontalen Abstand von  $200\ \mu\text{m}$  weisen eine Tiefe von etwa  $70\ \mu\text{m}$  auf, wodurch sich eine Flankenwinkelverteilung mit einem Maximum bei mehr als  $40^\circ$  ergeben. Die Maximierung der Flankenwinkel ist das durch AP2 vorgegebene Ziel dieser Strukturierung.

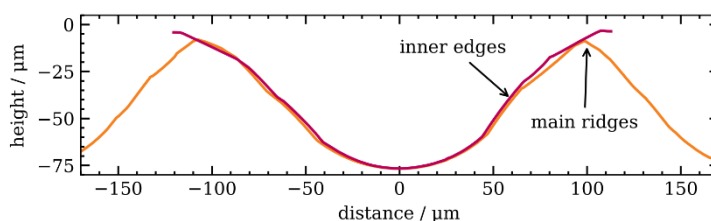


Abbildung 37 Höhenprofil entlang der roten und orangen Linie in der vorherigen Abbildung.

Diese Struktur wurde weiter optisch untersucht, sowie die ersten großflächigen Proben und Minimodule hergestellt. Ein Foto eines halbstrukturierten Deckglases, welches in einem Minimodul verbaut wurde, ist in Abbildung 38 gezeigt. Bei diesem wurde das Deckglas diagonal halbseitig strukturiert, um den Unterschied zwischen der strukturierten und nicht-strukturierten Oberfläche zu verdeutlichen. Bei dem Ätzen der größeren Proben stellte sich heraus, dass die Orientierung der Proben im Ätzbad einen wichtigen Einfluss auf das Ergebnis hat. Um die gewünschten Strukturen zu erreichen, ist es notwendig, die Probe mit der modifizierten Seite nach unten zu positionieren.



Abbildung 38 PV-Minimodul zur Anschauung. Das Deckglas ist halbseitig mit der HighFas-Struktur versehen. Hier ist die Reflexion unterdrückt und diffus.

In einem weiteren Ansatz wurden die Proben mit der Makrostruktur in einem weiteren Ätzschritt mit einer kleineren Sub-Mikrostruktur überlagert. Es ist möglich, dass eine Überlagerung beider Strukturen eine weitere Verbesserung der optischen Eigenschaften mit sich bringen kann. Um diese Hypothese zu untersuchen, wurden Proben hergestellt, bei welchen zunächst die Laser + Ätzen -Hybridstruktur erzeugt wird und ein anschließender rein chemischer Texturierungsprozess angewendet wird. Abbildung 39 zeigt eine Mikroskopaufnahme der Oberfläche. Beide Strukturen sind klar erkennbar.

Für die optische Charakterisierung der Proben wurde die direkt-hemisphärische Reflexion mittels eines UV/VIS Spektrometers (Perkin Elmer Lambda 950 UV/VIS NIR) gemessen. Dabei wurden die Proben rückseitig mit einer absorbierenden Beschichtung eingefärbt, um Reflexionen an der rückseitigen Grenzfläche zu vermeiden.

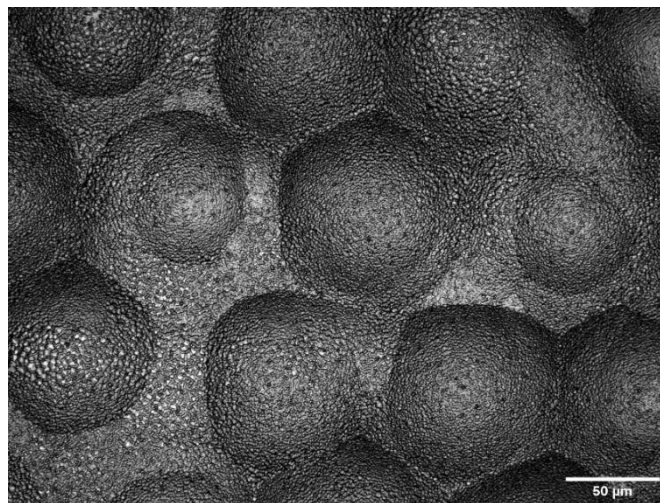


Abbildung 39 Mikroskopaufnahme einer Oberflächenstruktur mit zwei Strukturgrößen. Die größere, hexagonale Anordnung der hemisphärischen Abtragungen wurden mit dem Hybridprozess erreicht. Die feinere Struktur stammt aus einem nachfolgenden chemischen Texturier-Schritt.

Dieses Vorgehen simuliert die Verbindung des Deckglases mit der PV-Zelle, wie sie in dem Modul schlussendlich eingesetzt ist. Die Reflexionsspektren sind in Abbildung 40 dargestellt. Sie zeigen eine deutliche Reduktion der Reflexion aller strukturierten Proben gegenüber der unbehandelten Referenzprobe. Durch Integration der gemessenen Spektren über das AM1.5g Sonnenspektrum nach IEC60904 ergibt sich die integrierte Reflexion  $R_{\text{integ}}$ . Dieser Wert zeigt für die strukturierten Proben eine Reduktion der gewichteten, reflektierten Lichtintensität um mehr als 40%, gegenüber der Referenzprobe. Dies hat eine höhere Transmission und somit eine höhere Moduleffizienz zur Folge, und zeigt die Attraktivität der Strukturierung für die Anwendung in der Photovoltaik.

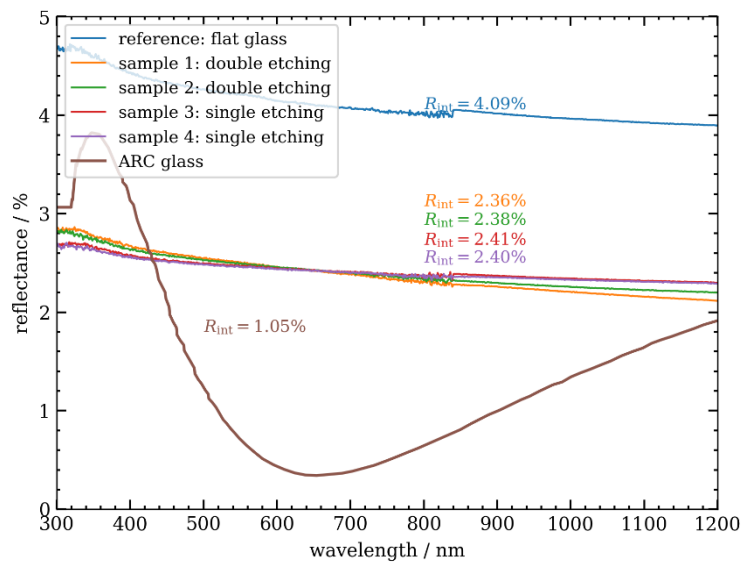


Abbildung 40 Reflexionsspektren der Strukturieren Proben, einer unstrukturierten Referenzprobe, sowie einem ARC Referenzglas.

Die Proben mit der multi-skaligen Struktur hingegen zeigen keine signifikante Änderung in der direkt-hemisphärischen Reflexion gegenüber den einfach geätzten Proben. Das Hauptaugenmerk des Forschungsprojektes liegt auf der Optimierung der optischen Eigenschaften. Wir erkennen darüber hinaus jedoch auch das Potenzial für eine vorteilhafte Veränderungen der mechanischen Eigenschaften der Glasoberfläche. Durch eine gezielte Anpassung der Oberflächenmikrostruktur können wir möglicherweise die Wechselwirkung zwischen Glas und Flüssigkeiten beeinflussen, was zu verbesserten Benetzungseigenschaften und einer geringeren Verschmutzung der Oberfläche führen kann. Diese erwünschten Effekte sind für die PV-Anwendungen von größter Bedeutung.

Das Hauptziel der laserstrukturierten und geätzten Textur besteht darin, blendende spekulare Reflexionen zu reduzieren, indem das reflektierte Licht über einen breiten Raumwinkel gestreut wird. Dies wird durch die BRDF (Bidirektional Reflectance Distribution Function) Messungen in Abbildung 41 veranschaulicht, die die Luminanz-Werte von unstrukturiertem und strukturiertem Glas unter direkter Sonneneinstrahlung vergleichen. Bei der unstrukturierten Probe zeigt sich eine scharfer Reflexionsspitze, während die strukturierte Probe eine signifikante Reduktion dieses Maximums aufweist und das Licht gleichmäßiger verteilt.

Die maximale BRDF der strukturierten Probe liegt vier Größenordnungen unter der BRDF der unstrukturierten Probe, was zu einer erheblichen Verringerung der Blendung führt. Während die Sonnenscheibe eine Luminanz von  $1,4 \times 10^9$  cd/m<sup>2</sup> aufweist, zeigt das unstrukturierte Glas einen Peak von  $2,9 \times 10^7$  cd/m<sup>2</sup>. Die Strukturierte Probe reduziert die Luminanz auf maximal  $1,6 \times 10^3$  cd/m<sup>2</sup>.

Im Vergleich dazu erreicht das ARC-Glas eine Luminanz von etwa  $10^6$  cd/m<sup>2</sup>, bietet jedoch nicht die gleiche Streuung des reflektierten Lichts über einen breiten Winkel und verfügt daher über unzureichende Anti-Blendungseigenschaften. Die akzeptable Luminanz hängt von verschiedenen Faktoren ab und ist nicht allgemein definierbar. Als Referenzwert gilt häufig eine maximale Luminanz von 20.000 cd/m<sup>2</sup> für Solarinstallationen an Flughäfen, wobei die Luminanz der strukturierten Probe zehnmal niedriger ist.

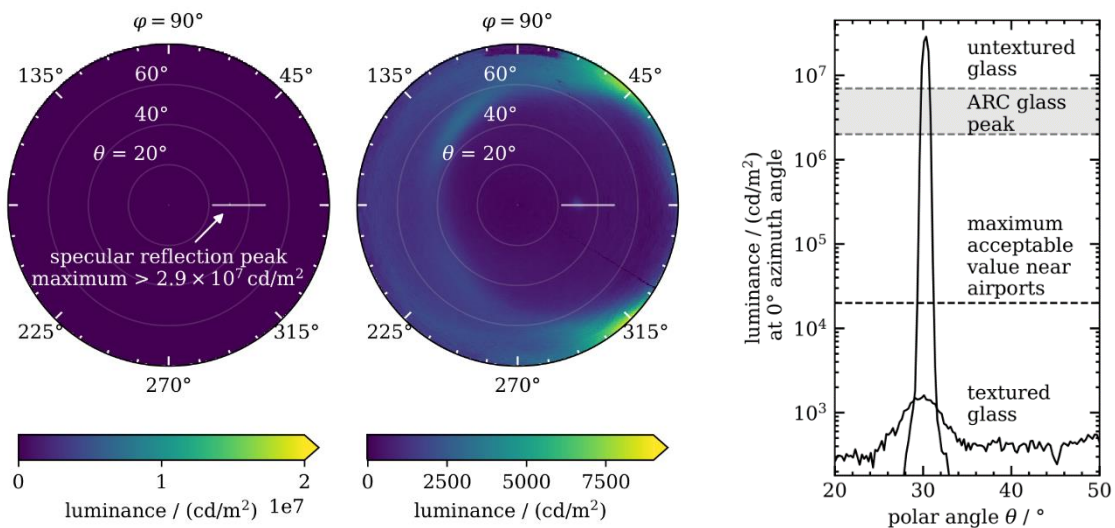


Abbildung 41 Messung der BRDF für planares Glas (links) und strukturiertes Glas (rechts) bei einem Einfallswinkel von  $30^\circ$ . Der rechte Plot zeigt das Linienprofil entlang der eingezeichneten Linien durch den Reflexionspeak.

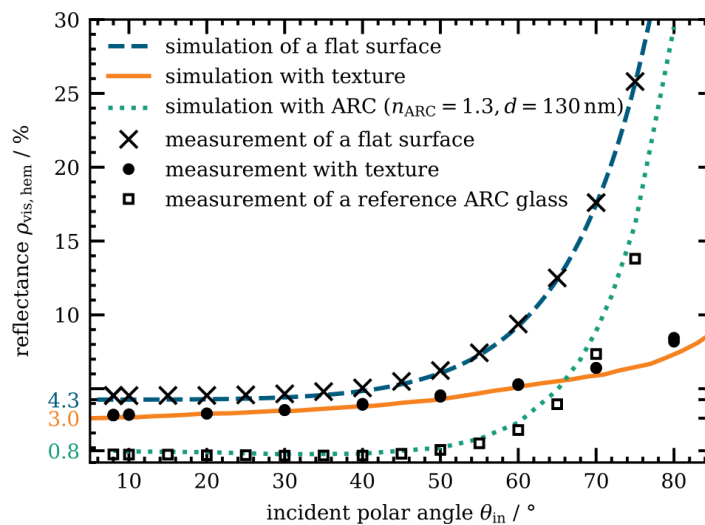


Abbildung 42 Direkt-hemisphärischer Reflexionsgrad der Glasoberfläche als Funktion des einfallenden Polarwinkels. Der Reflexionsgrad ist mit dem visuellen Spektrum gewichtet. Die gestrichelten, durchgezogenen und gepunkteten Linien zeigen die simulierte Reflexion.

Die Gesamtoberflächenreflexion unter einem bestimmten Einfallswinkel wird durch Integration der gemessenen BRDF über die Hemisphäre ermittelt. Der resultierende direkt-hemisphärische Reflexionsgrad  $\rho_{\text{vis, hem}}$  ist in Abbildung 42 als Funktion des Einfallswinkels dargestellt. Bei allen Einfallswinkeln zeigt die strukturierte Probe einen geringeren Reflexionsgrad als die flache Referenzprobe. Diese Verringerung ist besonders ausgeprägt bei hohen Einfallswinkeln über  $45^\circ$ . Bei BIPV-Systemen ist die Ausrichtung der Module oft von der Geometrie der Gebäudefassade be-

stimmt. Im Vergleich zu freistehenden PV-Systemen kann dies zu höheren Einfallswinkeln führen. Basierend auf diesen Ergebnissen wird ein erhöhter Modulwirkungsgrad für BIPV-Module mit diesem strukturierten Deckglas erwarten. Die Ergebnisse einer optischen Simulation für das planare Glas, das strukturierte Glas und ein Anti-Reflexionsschicht-beschichtetes Glas sind in der Grafik enthalten.

#### Entwicklung einer alternativen Prozessroute zur Beschleunigung der Strukturierung

Es wurde ein weiterer Ansatz zur Strukturierung untersucht. Dieser hat das Ziel, eine Oberflächentextur mit vergleichbaren optischen Eigenschaften zu erzielen, während die Prozesszeiten deutlich verringert werden sollen. Ziel ist es, einen Strukturierungsprozess zu erarbeiten, welcher mit industriell verfügbaren Anlagen einen Durchsatz von etwa 1 min/m<sup>2</sup> erreichen kann. Die grundlegende Konzeption besteht darin, eine kostengünstige Ätzmaske auf das Glas aufzutragen, die lokal mittels eines Laserprozesses im hexagonalen Gitter geöffnet wird. In einem anschließenden Ätzschritt wird das Glas bearbeitet, wobei die Ätzflüssigkeit das freigelegte Glas schneller abträgt als die Barrierschicht. Dies ermöglicht die Entstehung einer Struktur, die der vorherigen HighFas-Struktur ähnlich ist. Ein entscheidender Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass pro Laseröffnung bereits ein einzelner Laserpuls ausreicht. Bei einer Laserpulsfrequenz im Bereich von mehreren 10 MHz können somit Flächen von Quadratmetern innerhalb weniger Sekunden strukturiert werden. Eine zusätzliche Verkleinerung der Gitterkonstanten kann darüber hinaus die Ätzdauer weiter reduzieren.

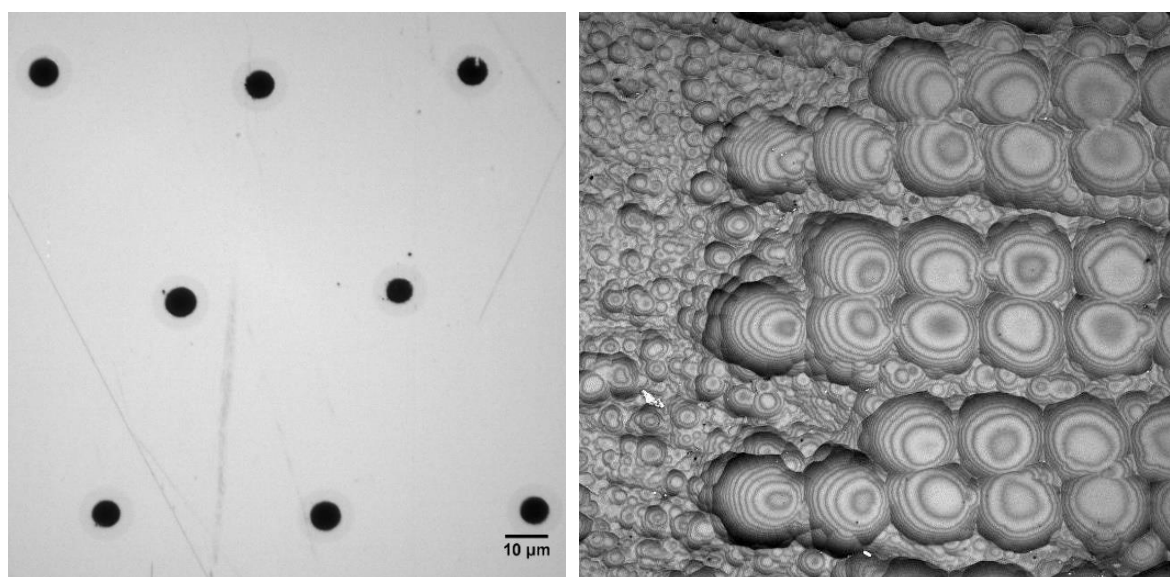


Abbildung 43 Mikroskopbild (links) der Laseröffnungen der Ätzmaske. Die Strukturen sind kleiner als der Laser-Strahldurchmesser. Mikroskopbild (rechts) der Probenoberfläche einer anderen Probe, welche mit dem Ätzbarrierenansatz strukturiert wurde

Ein erster Versuch dieses Ansatzes verdeutlichte, dass die Laserbearbeitung der Ätzbarriere durch einen vergleichsweise einfachen und schnellen Laserprozess realisierbar ist. Die initial verwendete Ätzbarriere bestand aus einer 100 nm dicken Schicht aus SnO (Zinnoxid). In diese wurden einzelne, zirkuläre Öffnungen mittels eines Laserprozesses abgetragen. Abbildung 43 (links) zeigt ein Mikroskopbild der laserstrukturierten Probe vor dem Ätzen. Die Abbildung verdeutlicht, dass die einzelnen Öffnungen einen Durchmesser von etwa 6,5 µm aufweisen, was deutlich unterhalb des Fokusbereichs des Laserstrahls von etwa 40 µm und damit unterhalb des Beugungslimits liegt. Diese Strukturen werden im nachfolgenden Ätzprozess aufgeweitet,

wodurch eine Strukturierung mit geringer Periode von weniger als 10  $\mu\text{m}$  und hohem Durchsatz denkbar ist.

Die Ätzbarrieren erwies sich jedoch als empfindlich gegenüber der Ätzflüssigkeit, was im nass-chemischen Prozessschritt zu ihrer Entfernung führte. Infolgedessen wies das Glas, selbst an den nicht-gelaserten Flächen, eine ungleichmäßige Strukturierung auf. Eine exemplarisches Mikroskopbild ist in Abbildung 43 (rechts) dargestellt.

Erfahrungswerte zeigen, dass Glasbeschichtungen existieren, welche Glas-Ätzprozesse über einige 10 Minuten standhalten können. Um diesen Prozessansatz weiter zu verfolgen, ist es notwendig, preiswerte Schichten zu entwickeln, welche den Ätzprozessen standhalten. Die Umsetzbarkeit der Strukturierung mittels Laserprozessen ist für diverse Beschichtungen gezeigt.

Theoretische Überlegungen ergeben folgenden Laserprozess: Ein 200W Lasersystem mit einer Frequenz von 40MHz wird mit einem Polygonscanner kombiniert. Um den Gewünschten Pulsabstand von 20 $\mu\text{m}$  zu erreichen, muss dieses Scansystem eine Liniengeschwindigkeit von 800m/s erreichen. Dieser Wert liegt im Rahmen der erreichbaren Geschwindigkeiten für kommerzielle Systeme. Diese Kombination ergibt eine Pulsenergie von etwa 5 $\mu\text{J}$  pro Puls. Diese Energie reicht für die Strukturierung vieler Schichten aus. Eine solche Anlage wäre in der Lage, einen Quadratmeter in unter 65s zu bearbeiten. Aufgrund der verringerten Strukturgröße von 20 $\mu\text{m}$  erwarten wir eine benötigte Ätzdauer von etwa 2-3min.

#### Glasstrukturierung mittels Interferenzoptiken

Im Rahmen des Projekts wurde eine Interferenzoptik, die in die Laseranlage integriert ist, evaluiert. Diese Optik ermöglicht die Aufspaltung des Laserstrahls in vier Teilstrahlen, die anschließend im Fokuspunkt überlagert werden. Hierbei entsteht ein Interferenzmuster, dessen Periode computergesteuert angepasst werden kann. Ziel der Untersuchung war es, die Eignung dieser Optik zur Erzeugung periodischer Oberflächenstrukturen auf Glasproben zu evaluieren. Dazu wurden systematische Versuchsreihen zur Strukturierung von Glas durchgeführt.

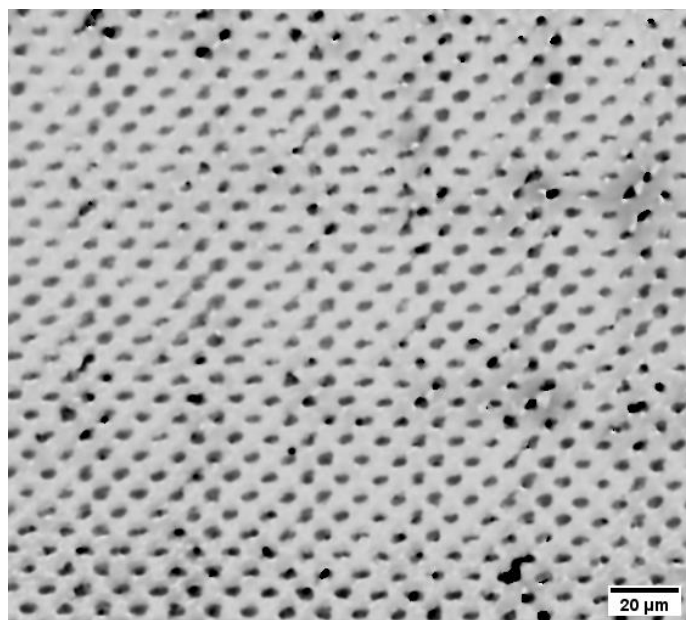


Abbildung 44 Mikroskopbild einer mit der Interferenzoptik strukturierten Glasprobe.

Abbildung 44 zeigt die Oberflächenstruktur einer texturierten Glasprobe, deren Periode etwa  $4\ \mu\text{m}$  beträgt. Das periodische Muster ist klar erkennbar, und das Zusammenfügen einzelner Laserschüsse erfolgt ohne deutliche Nahtstellen.

Bei der Glasbearbeitung stellt sich die Problematik, dass die Optik nur einer Fluenz von etwa  $2\ \text{J}/\text{cm}^2$  Stand halten kann. Da der Eingangsstrahl einen FWHM-Durchmesser von etwa  $1\ \text{mm}$  aufweisen soll, ist die nutzbare Pulsenergie limitiert. Dies führt dazu, dass die Fläche, die mit einem Laserschuss strukturiert werden kann, auf einen Durchmesser von etwa  $100\ \mu\text{m}$  beschränkt ist. Eine größere Fläche erfordert höhere Pulsenergien, die potenziell die Optik beschädigen können. Obwohl die Glasbearbeitung mit diesem Gerät umsetzbar ist, ergibt sich somit ein Durchsatzlimit. Daher wird der Ansatz der direkten Glasablation mittels dieser Optik nicht weiterverfolgt.

Im Gegensatz dazu erfordert die Strukturierung einer Ätzbarriere im zuvor beschriebenen Ansatz eine etwa zehnmal geringere Fluenz, wobei der genaue Wert von der verwendeten Schicht abhängt. Daher kann bei diesem Ansatz eine Interferenzoptik eine deutlich größere Fläche pro Laserschuss bearbeiten. In Verbindung mit dem Ätzbarrierenansatz erwarten wir deshalb, dass der Einsatz dieser Optik einen zeiteffizienten Laserprozess ermöglicht.

Dieser Ansatz wurde untersucht, indem ein beschichtetes Glas mit der DLIP-Optik strukturiert wurde. Es handelt sich um ein Glas aus Restbeständen, das mit einem transparenten leitfähigen Oxid (TCO) beschichtet ist. Abbildung 45 zeigt Mikroskopaufnahmen dieser strukturierten Probe.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden Berechnungen angestellt, um die erwartbaren Prozesszeiten zu ermitteln. Diese Berechnungen gehen davon aus, dass ein Laserschuss eine Fläche mit einem Durchmesser von  $100\ \mu\text{m}$  bearbeiten kann. Bei einem Lasersystem mit einer Pulsfrequenz von  $250\ \text{kHz}$  beträgt die Scannergeschwindigkeit  $25\ \text{m/s}$ . In Kombination mit einem Scansystem, das für die DLIP-Optik verfügbar ist, resultiert dies in einer Prozesszeit von  $9\ \text{Sekunden}$  für eine Probe mit den Abmessungen  $150 \times 150\ \text{mm}^2$ . Dementsprechend benötigt ein Quadratmeter etwa  $7\ \text{Minuten}$  Bearbeitungszeit.

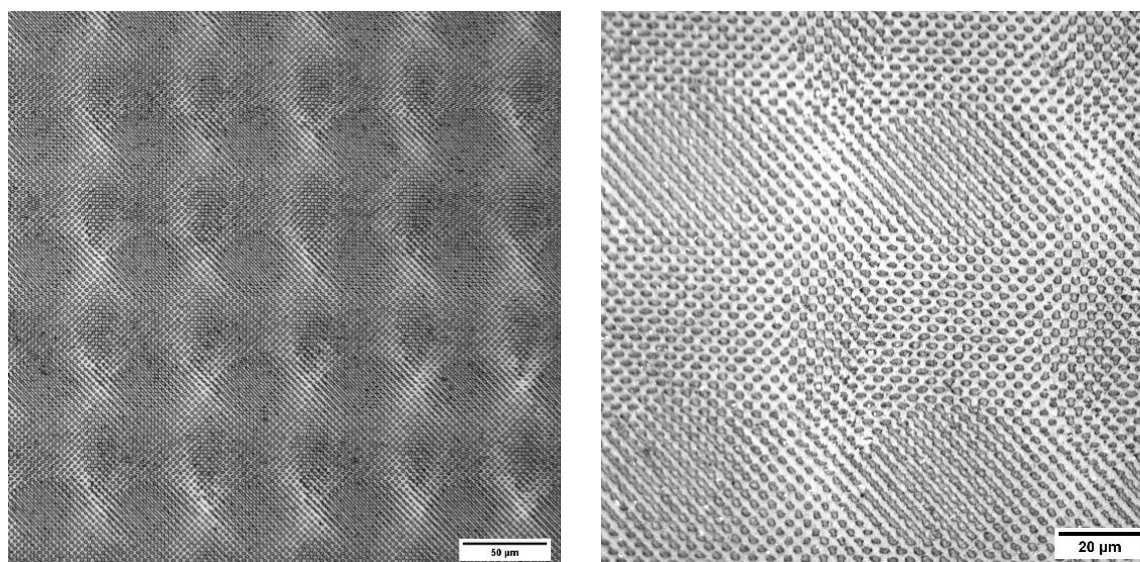
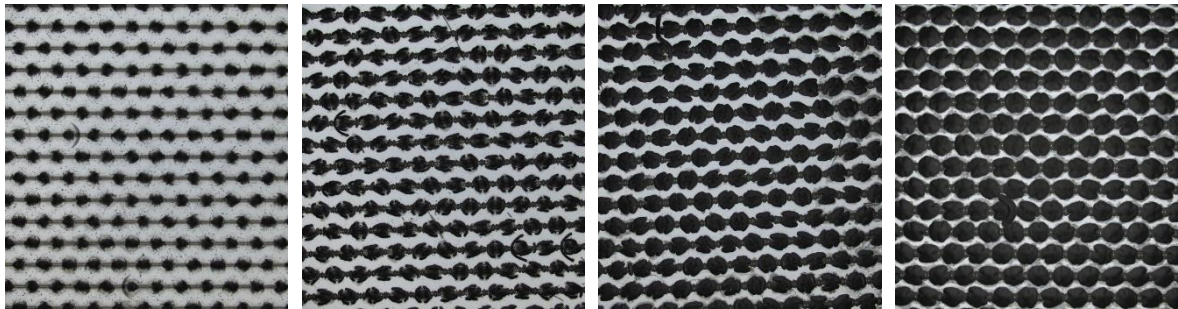


Abbildung 45 Mikroskopaufnahmen der mittels Interferenzoptik strukturierten TCO-Glasprobe.

## Nasschemische Ätzprozesse

### Vorversuche

Aufgabe des nasschemischen Ätzens war es, die mittels Laser vorstrukturierten Proben (hier: ohne Ätzbarrieren-Schicht) in die finale Geometrie zu überführen. Hierzu mussten die Laserkonturen aufgeweitet werden, um sich überlagernde Kavitäten zu erhalten, die das finale Honeycomb-Muster erzeugen. Hierfür ist ein homogener und isotroper Ätzprozess notwendig, der in alle Richtungen gleich schnell ätzt.

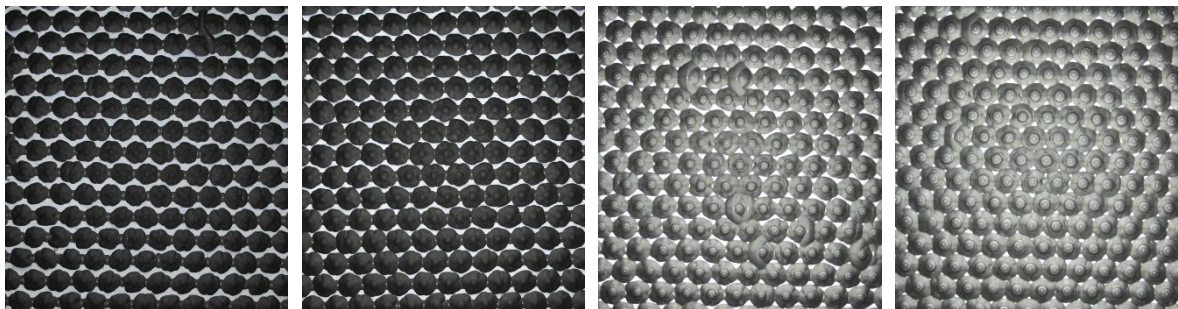


Nach Lasern

3 min

6 min

9 min



12 min

15 min

18 min

21 min

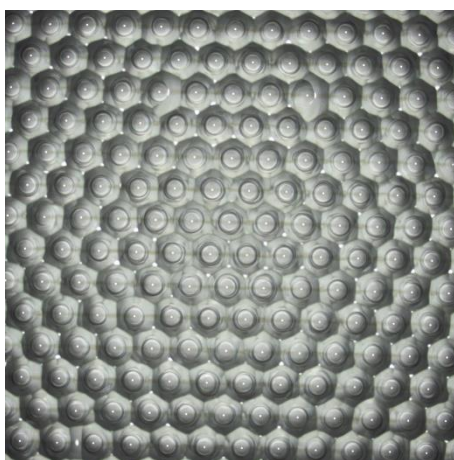


Abbildung 46: Oben: Gelaserte Glasproben in verschiedenen Ätzstadien. Links: Fertig geätzte Probe nach 25 min Ätzdauer.

Zur Identifikation einer geeignete Ätzlösung wurde ein zeitaufgelöster Ätzversuch mit gelaserten Gläsern durchgeführt, in welchem die Ätzdauer jeweils um 3 min erhöht wurde. Dadurch konnte der Ätzvorgang nachvollzogen werden. In Abbildung 46 sind die geätzten Gläser dargestellt. Als Ätzmedium wurde eine Mischung aus 50%iger Flusssäure, 37%iger Salzsäure und Wasser im Verhältnis 1:1:2 verwendet, die Ätzversuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Bereits unmittelbar nach dem Laserprozess ist eine durchgehende Linie (horizontal) sichtbar, offenbar wird in Schreibrichtung immer ein gewisser Grundabtrag erzielt. Im Verlauf des Äzens zeigt sich, dass in Schreibrichtung bereits nach 9 min eine Überlagerung der Ätzkavitäten auftritt, nach 18 min verbinden sich auch die „Zeilen“ der Ätzkavitäten miteinander. Erst nach 25 min kann ein vollständiges „Verschmelzen“ der Ätzkavitäten beobachtet werden. In Abbildung 47 ist für das beschriebene zugehörigen Experiment der Abtrag sowie die erzielten Durchmesser der Ätzkavitäten gezeigt. Da sich der Abtrag jeweils auf das Ätzintervall von 3 min bezieht, ist der leicht sinkende Abtrag als Rückgang der Ätzrate zu verstehen.

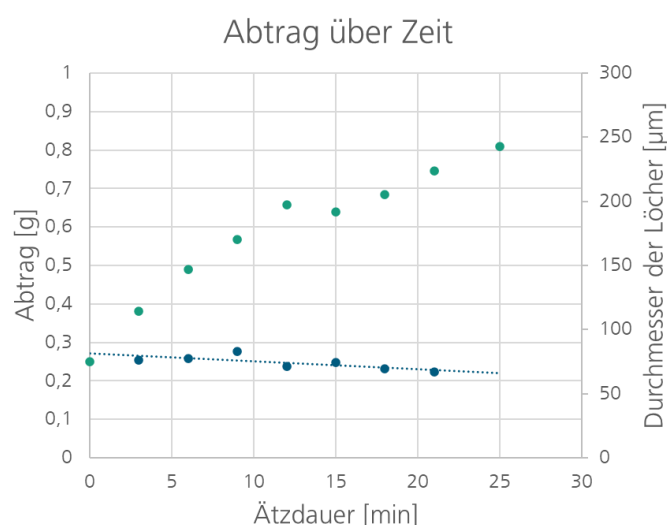


Abbildung 47: Abtrag (dunkelblau) und Durchmesser der geätzten Kavitäten (grün) über die Ätzdauer hinweg. Der Abtrag bezieht sich jeweils auf das Ätzintervall von 3 min.

Mit Hilfe von Ionenchromatographie-Analysen der Ätzlösung konnte auch die Zusammensetzung der Ätzlösung über den Ätzzeitraum hinweg beobachtet werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 48 gezeigt. Die Konzentrationen von Chlorid und Fluorid bleiben konstant, während sich Silizium in der Lösung anreichert. Hierbei ist anzumerken, dass sich die Flusssäure zwar während des Ätzprozesses verbraucht, in der Ionenchromatographie aber wieder als Fluorid dargestellt wird, da im alkalischen Eluenten die entstehende Hexafluorokieselsäure wiederum in Fluorid und Silikat zerfällt. Ein Gramm Silizium bindet 5,1 g Fluorid, bei einem Endwert von 8 g/l Silizium sind also von den gemessenen 130 g/l Fluorid 40 g/l dem Hexafluorosilikat zuzuordnen und nur noch 90 g/l als freie Flusssäure vorhanden.

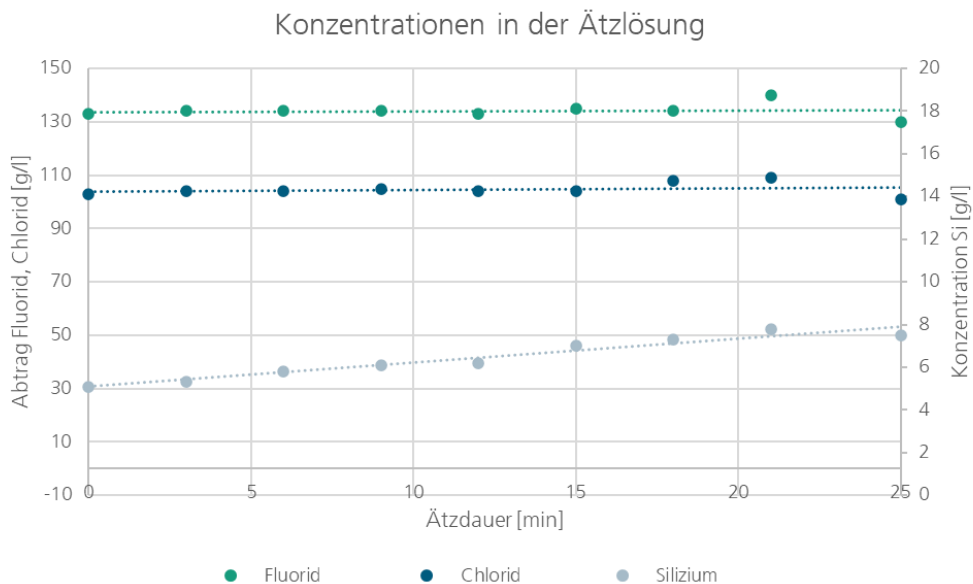
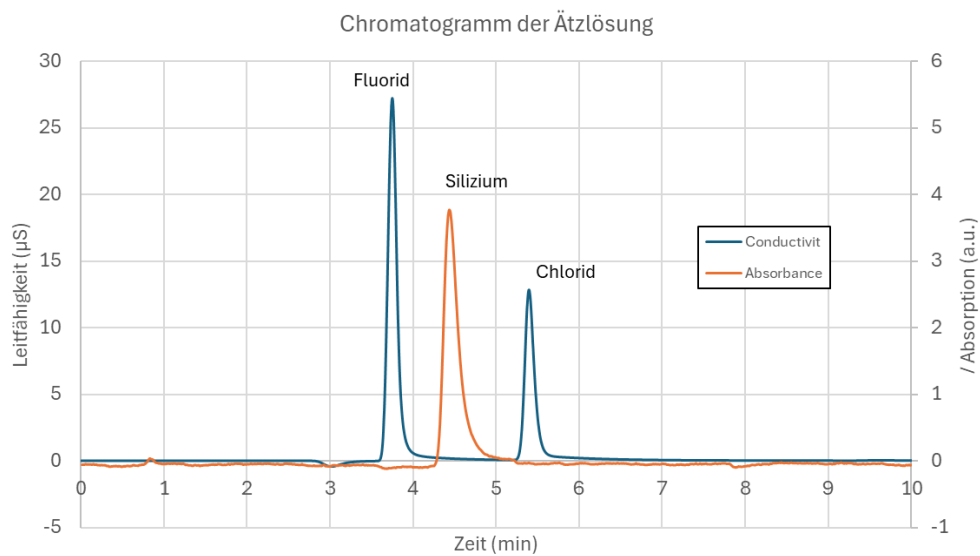


Abbildung 48: Oben: Beispielhaftes Chromatogramm der Ätzlösung. Unten: Chemische Analyse der Ätzlösung über die Ätzdauer von 25 min hinweg.

### Hochskalierung als Inline-Prozess

Das nasschemische Ätzen der Laser-strukturierten Gläser soll sukzessive auf industrielle Anlagen übertragen werden. Bislang wurden lediglich kleine Gläser im Format 5 x 5 cm<sup>2</sup> im Abzug bearbeitet. Ein erster Schritt zur Hochskalierung wurde im Berichtszeitraum unternommen, hierzu wurde ein statistischer Versuchsplan an einer einspurigen Inline-Anlage (Einspurtool) abgearbeitet (Abbildung 49). Das Einspurtool verfügt über einen Prozessbereich von 0,9 m Länge mit anschließendem Spüler und Trockner.

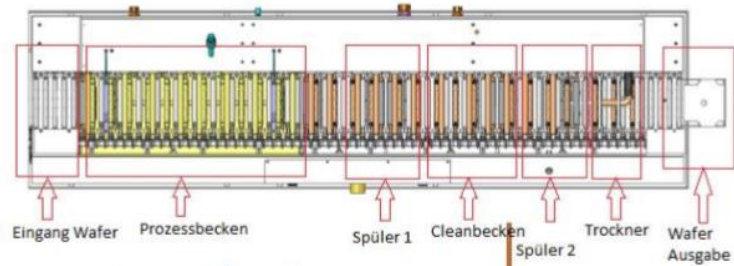


Abbildung 49 Laboranlage zum inline-Ätzen von Substraten. Der Aufbau umfasst eine Eingabe, ein Prozessbecken mit Spüler, ein Nachreinigungsbecken mit Spüler sowie Trockner und Ausgabe. Das Nachreinigungsbecken wurde in den berichteten Versuchen nicht verwendet.

Folgende Einstellungsvarianten wurden im Rahmen des Versuchsplans getestet:

- HF-Konzentration: Abweichend vom Standardrezept HF:HCl:H<sub>2</sub>O 1:1:2 wurde die HF-Konzentration mit 0,9 bzw. 1,1 Anteilen variiert
- HCl-Konzentration: Abweichend vom Standardrezept HF:HCl:H<sub>2</sub>O 1:1:2 wurde die HCl-Konzentration mit 0,9 bzw. 1,1 Anteilen variiert
- Temperatur: Die Anlage verfügt über eine Heizung, die Temperatur wurde auf 25°C und 40°C eingestellt
- Ausrichtung: Die zu ätzende Seite zeigt a) nach unten bzw. b) nach oben

Die Effekte sind in Abbildung 50 dargestellt. Wie zu erwarten, wirkt sich eine Konzentrationserhöhung für HCl und HF auf die Ätzrate positiv aus. Die Erhöhung der Ätzrate ist in diesem Fall proportional zur Konzentrationserhöhung, die Ätzrate steigt also linear mit der HF- und HCl-Konzentration. Einen wesentlich höheren Einfluss hat die Erhöhung der Temperatur auf 40°C, hier ist eine Steigerung der Ätzrate um ca. 70% zu beobachten. Der deutlich ausgeprägte Effekt ist jedoch die Orientierung der Gläser im Ätzprozess.

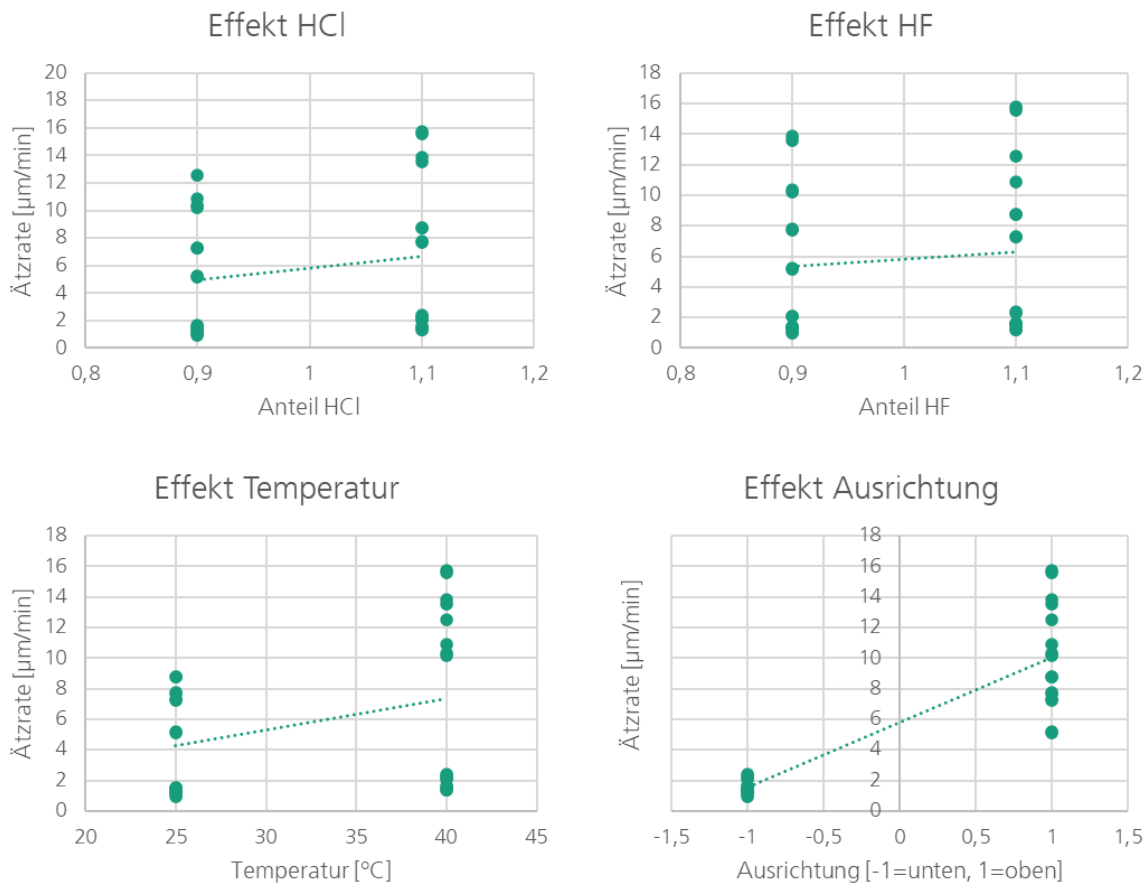


Abbildung 50 Effekte der Konzentrationen, Temperatur und Ausrichtung auf die Ätzrate der Gläser in der Inline-Laboranlage.

Diese Orientierung der Gläser hat einen hohen Einfluss auf den Stofftransport in der chemischen Reaktion. In Abbildung 51 ist die jeweilige Konfiguration schematisch dargestellt. Beim Ätzen von unten wird die Glasplatte von den strukturierten Transportrollen an der Unterseite benetzt. Dies bedingt einen geringen Stoffaustausch, an der Glasoberfläche ist nur ein Ätzfilm vorhanden, verbrauchtes Ätzmedium wird in dieser Konfiguration nicht schnell genug durch frisches Medium ersetzt. Diese Methode ist also nicht durch die Ätzrate, sondern durch die Zuführung frischen Mediums limitiert, was sich auch in der nur gering ausgeprägten Zunahme der Ätzrate mit steigender Temperatur äußert. Beim Ätzen von oben dagegen wird die Flüssigkeit über Schwallrohre von oben auf den Wafer geleitet, hierbei findet ein schneller Austausch des Mediums an der Glasoberfläche statt. In dieser Ätzraten-limitierten Reaktion sind die Effekte durch Konzentrations- und Temperaturerhöhung deutlich ausgeprägt. Lässt man die Proben mit Ausrichtung nach unten außer Acht, ist z.B. bei Erhöhung der Temperatur von 25 $^{\circ}\text{C}$  auf 40 $^{\circ}\text{C}$  nahezu eine Verdopplung der Ätzrate zu beobachten.

Eine Skalierung der Ätzprozesse scheint nach den vorliegenden Ergebnissen durchführbar, wichtig ist eine Anlagenkonfiguration, in der die Ätzrate nicht durch mangelhaften Medienaustausch limitiert wird. Bei erhöhter Temperatur und hohen Konzentrationen wird ein industrietauglicher Inline-Prozess als realistisch angesehen.

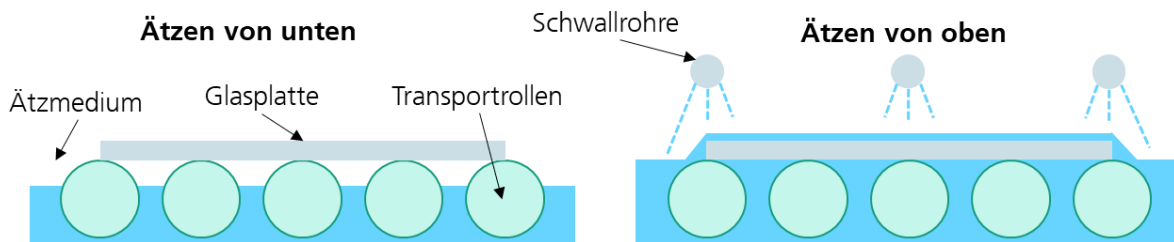
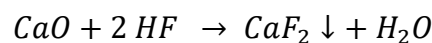
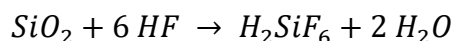


Abbildung 51: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Orientierungen der Glasplatten. Nähere Erläuterungen im Text.

### Ermittlung der Dosierparameter

Für eine Abschätzung der Prozesskosten ist nicht nur die Rezeptur für die Badbefüllung von Interesse, viel wichtiger sind die Dosierparameter im laufenden Betrieb, da diese die Chemikali-  
enverbräuche im Wesentlichen bestimmen. Für die Abschätzung der Dosierparameter wurden  
zunächst theoretische Vorüberlegungen angestellt:

Die Reaktionsgleichung beim Ätzen von Glas lässt sich im Wesentlichen wie folgt darstellen:



Das untersuchte Glas enthält zu ca. 75%  $\text{SiO}_2$  und zu ca. 10%  $\text{CaO}$ , hieraus kann der theoretische Verbrauch beim Ätzen von Glas berechnet werden:

	1 g Glas	1 m <sup>2</sup> Glas 85 µm
Verbrauch HF	1,57 g	322,6 g
CaF <sub>2</sub>	0,14 g	29,5 g
H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	1,8 g	382,5 g

Aus diesem Verbrauchswert wurden die theoretischen Dosierparameter für HF und HCl berechnet, unter der Annahme, dass die HF und HCl-Konzentration konstant bleiben müssen, diese betragen 0,9 l/m<sup>2</sup> HF und 0,45 l/m<sup>2</sup> HCl.

Im Experiment konnte gezeigt werden, dass diese Dosierparameter zu hoch ist, bei Einhaltung der theoretischen Dosierparameter (Abbildung 52, Gläser 1-8) steigt die Ätzrate zunächst an, ein Aussetzen der Dosierung (zwischen Glas 8 und 10) führt wieder zur ursprünglichen Ätzrate, weiteres Aussetzen senkt die Rate dann ab (Glas 11-13). Aus diesem Experiment lässt sich die Dosierparameter und somit der Verbrauch zu 0,47 l/m<sup>2</sup> HF und 0,24 l/m<sup>2</sup> HCl abschätzen. Die Hexafluorokieselsäurekonzentration ist im Experiment auf ca. 150 g/l angestiegen, trotzdem zeigte sich auf den Gläsern keine Änderung des Ätzverhaltens, sodass auch die Abschätzung gemacht

werden kann, dass  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ -Konzentrationen bis zu 150 g/l toleriert werden kann. Dies spielt dann bei der Implementierung des Feed-and-Bleed eine Rolle, also des kontinuierlichen Ersatzes verbrauchter Ätzlösung durch frisches Wasser sowie Chemikalien.

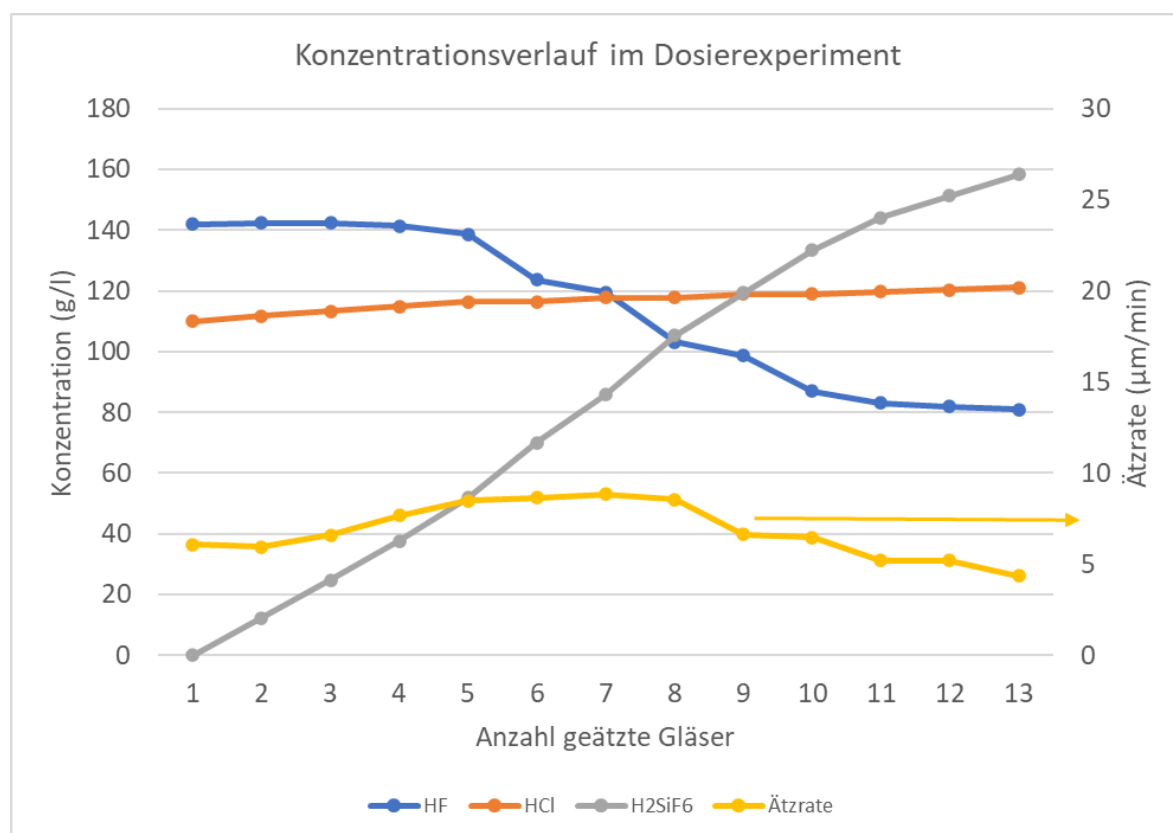
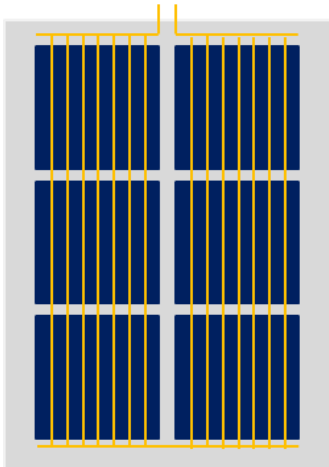


Abbildung 52: Konzentrationsverlauf für HF, HCl und  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  während eines Experiments zur Ermittlung der Dosierate für HF und HCl

Die Tatsache, dass für die Nachdosierung deutlich weniger Chemikalien verbraucht werden, als dies aus der Reaktionsgleichung folgen würde, ist einerseits sehr erfreulich, da sich der Verbrauch natürlich direkt auf die Kosten auswirkt. Andererseits erstaunt es aber auch, dass trotz sinkender HF-Konzentration die Ätzrate konstant bleibt. Dieser Effekt ist aber bereits von der Badpflege saurer Ätzbäder für Silizium bekannt, hierbei spielt die entstehende Hexafluorokieselsäure eine doppelte Rolle. Einerseits ist sie eine starke Säure und kann somit einen gewissen Verlust an Salzsäure ausgleichen, andererseits ist auch die Hexafluorokieselsäure in der Lage Glas zu ätzen, d.h. es ist anzunehmen, dass auch das Reaktionsprodukt einen Beitrag zur Ätzrate leistet.

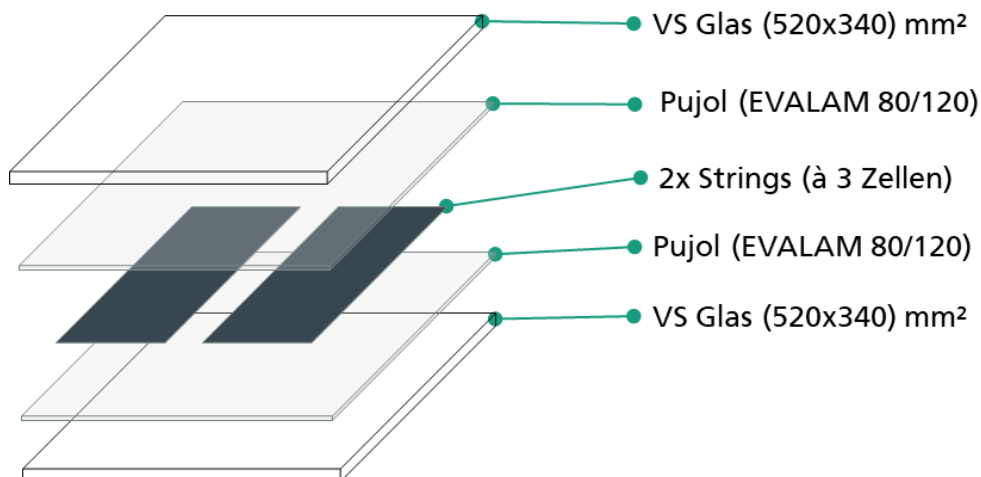
#### AP 4: Entwicklung von Glas-Glas-Lamellenmodulen mit entsprechender Lagerung

In Kooperation mit dem Projektpartner Flachglas Sachsen (FGS) wurden erste Konzepte für die Glas-Glas-Lamellenmodule entwickelt. Bei der Konzeptionierung der ersten Minimodule wurde besonders der Laminationsprozess bei FGS genauer betrachtet. Das gewählte Layout der hergestellten Module ist in Abbildung 53 dargestellt.



**Abbildung 53:** Skizzierte Darstellung des Aufbaus der ersten Minimodule.

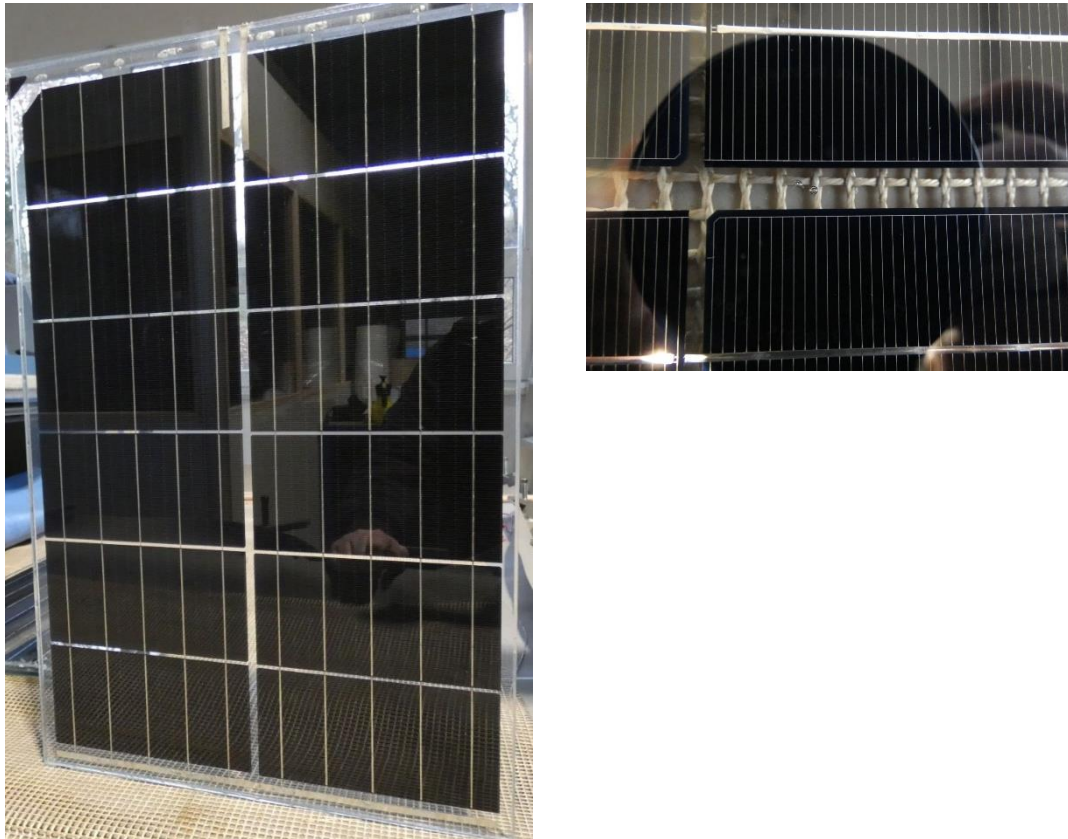
Die BOM (Bill-of-Materials) wurde für alle Module gleich ausgewählt und ist in Abbildung 54 dargestellt. Für die Glas-Glas-Module (Größe: 520x340 mm<sup>2</sup>, d = 4 mm) wurden zwei Strings mit jeweils sechs Halbzellen (G1, 158,75 mm) verwendet und diese in Reihe miteinander verschaltet.



**Abbildung 54:** Bill-of-Material der Minimodule.

Zur Einkapselung wurde eine EVA (Ethylen-Vinylacetat) -Folie von Pujol (EVALAM 80/120) mit einer Dicke von  $d = 380 \mu\text{m}$  verwendet. In verschiedenen Variationen wurde die EVA Folie 2-fach ( $760 \mu\text{m}$ ), 3-fach ( $1140 \mu\text{m}$ ) und 4-fach ( $1510 \mu\text{m}$ ) auf beiden Seiten der Solarzellenstrings verwendet. Das Layup der Module wurde manuell bei FGS durchgeführt. Hierbei wird im ersten

Schritt ohne Temperaturerhöhung der gewünschte Unterdruck für den späteren Prozess erzeugt. Nach dem Erreichen des Unterdrucks wird die Probe auf ca. 55°C aufgeheizt und nach 60 min. die Temperatur auf ca. 100°C erhöht; die Haltezeit beträgt hier 180 min. Anschließend beginnt die passive Abkühlphase, welche bis zu 5 Std. andauern kann. Erst nach Erreichen der Umgebungstemperatur wird der – über die gesamte Prozesszeit gehaltene – Unterdruck wieder abgebaut.



**Abbildung 55:** PV Modul mit 2xPujol Folie (links) und vergrößerte Darstellung bei Verwendung von 3xPujol (rechts) mit Bläschenbildung.

Bei der optischen Inspektion der Module wurde anfänglich eine unerwünschte Bläschenbildung beobachtet. Vorzugsweise trat dies im Bereich zwischen den Solarzellenstrings auf. Von allen Modulen wurden im Anschluss Elektrolumineszenz (EL) -Aufnahmen angefertigt. Eine Übersicht findet sich in Abbildung 56.

2xPujol EVA Folie

3xPujol EVA Folie

4xPujol EVA Folie



**Abbildung 56:** EL-Aufnahmen der unterschiedlichen PV-Module.

In Abbildung 56 (links, mittig) sind vereinzelt Defekte ersichtlich. Dennoch funktionierte der Prozess für die ausgewählte Materialkombination. Bei genauerer Betrachtung ist dennoch zu bedenken, dass der verwendete Prozess weder ein reiner Laminationsprozess noch ein Autoklavenprozess ist. Als kritisch könnte sich beispielsweise erweisen, dass die Evakuierung bei Umgebungstemperatur stattfindet. Dies bedeutet, dass die noch feste Einkapselungsfolie auf die Zellen und Zellverbinder drückt. Hierdurch können große Kräfte entstehen, welche letztendlich zum Bruch der Zellen führen kann. Zusätzlich ist zu beachten, dass aufgrund der Evakuierung ohne Aufheizen (und Aufschmelzen der Einkapselungsfolie) Luftzwischenräume (z.B. zwischen den Zellreihen) entstehen, welche durch das zeitversetzte Aufschmelzen der EVA Folie nicht mehr vollständig entfernt werden können. An dieser Stelle – auf Grundlage der ersten Ergebnisse – wäre zu überdenken, ob ein Laminationsprozess mit einer Aufheizphase schon beim Evakuieren näher untersucht werden sollte.

In Kooperation mit FGS wurden weitere Untersuchungen zur Lamination von Glas-Glas-Minimodulen durchgeführt. Hierfür wurden am ISE 40 Strings mit jeweils 6 Halbzellen (G1 Format, Kantenlänge: 158,75 mm) und 20 Strings mit jeweils zwei Halbzellen (G1) hergestellt. Hieraus entstehen bei FGS weitere Minimodule (Variante 1: Zwei Strings á 6 Halbzellen und Variante 2: Ein String mit zwei Halbzellen). Hierbei soll neben der Prozessoptimierung auch die Verwendung alternativer Folien im Vordergrund stehen.

Ein wichtiger Aspekt bei der erfolgreichen Umsetzung der Lamellenmodule ist die mechanische Anbindung der PV-Module an der Fassade. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass es bei auftretenden Windlasten zu einer starken Durchbiegung der Glas-Glas-Lamellenmodule kommen kann. Aus diesem Grunde wird eine FEM-Simulation durchgeführt.



Abbildung 57: 3D-Zeichnung (FGS) mit Verstrebung und Halterungen.

Anhand der vorliegenden 3D-Zeichnung wird die Durchbiegung mit/ ohne einer Verstrebung, unter Berücksichtigung der Norm DIN 18008, durchgeführt und das optimierte Profil zur Erhöhung der Festigkeit der Lamellenmodule ermittelt. In einer ersten Ausführung werden T-Profile (40x40x3 mm<sup>3</sup>) und zwei L-Profile (20x20x3 mm<sup>3</sup>) näher betrachtet.

Für die spätere Anwendung als Glas-Glas-Lamellenmodul wurden auch mögliche Verluste bei Verwendung unterschiedlich dicker Gläser betrachtet.

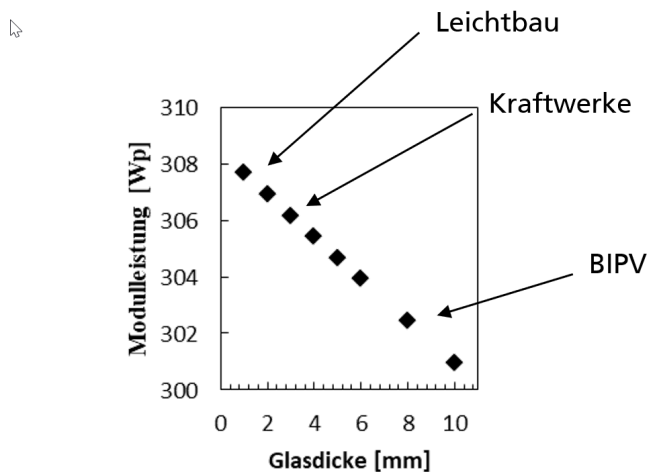


Abbildung 58: Modulleistung in Abhängigkeit der Glasdicke.

Bei der Verwendung von ca. 10 mm dickem Glas (im Vergleich zu 1 mm dickem Glas) sinkt die Modulleistung um ca. 2-3%, wie aus Abbildung 2 ersichtlich. Neben der erhöhten Absorption

aufgrund der steigenden Dicke des Glases ist zu berücksichtigen, dass mit steigender Masse des Glases die Modultemperatur ansteigt und hierdurch Verluste entstehen.

Zur weiteren Optimierung des Laminationsprozesses bei Flachglas Sachsen (FGS) wurden insg. 14 Strings mit je 11 Halbzellen (M6, PERC, bifazial) am ISE hergestellt und FGS für Laminationsversuche zur Verfügung gestellt. In gemeinsamer Absprache zwischen FGS und ISE wurden die nächsten Schritte zur Realisierung der Demonstratorwand bei FGS geplant.

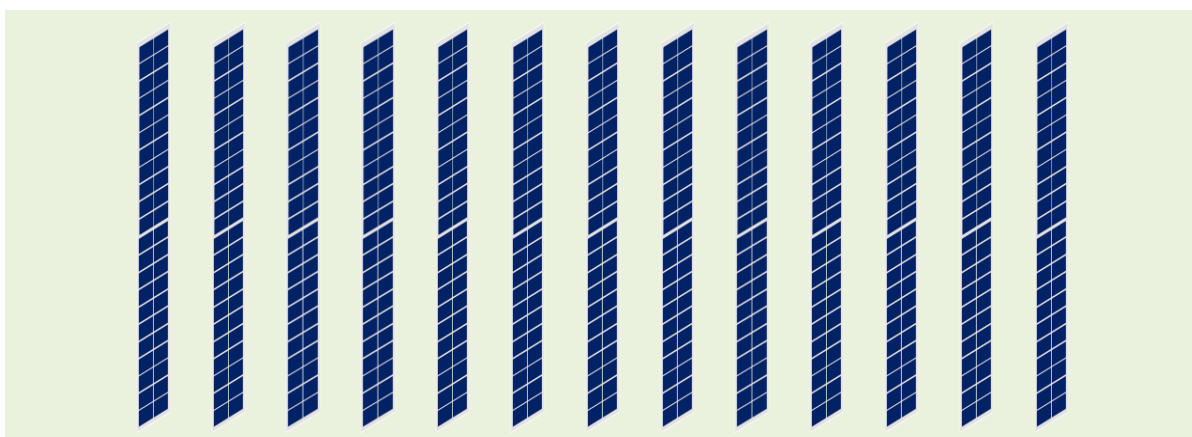


Abbildung 59: Schematische Darstellung der Glas-Glas-Lamellenmodule mit jeweils zwei Strings à 22 Halbzellen (M6, PERC, bifazial; opt. M6 HJT).

Hierzu wurde die Planung für 150 Module mit einer Glasgröße von  $2000 \times 400 \times 4 \text{ mm}^3$  durchgeführt. Am ISE werden hierfür 300 Strings (zwei Strings pro Modul) mit jeweils 22 Halbzellen (M6, PERC, bifazial; optional auch teilweise mit M6 HJT Halbzellen) hergestellt und FGS zur Verfügung gestellt. Im weiteren Projektverlauf werden Minimodule mit am ISE strukturierten Gläsern hergestellt und mit Standard PV-Modulen verglichen.

In gemeinsamer Absprache zwischen FGS und ISE wurde das Modullayout für die Lamellenmodule definiert (Abbildung 60).

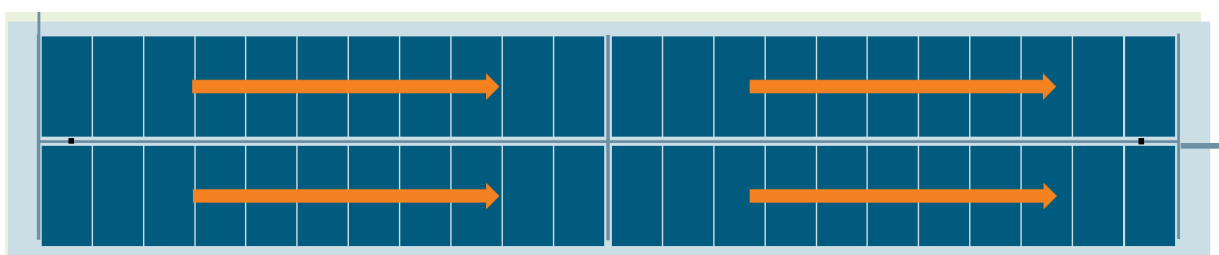


Abbildung 60: Schematische Darstellung der Glas-Glas-Lamellenmodule mit jeweils vier Strings à 11 Halbzellen (M6, PERC, bifazial; opt. M6 HJT) und zwei integrierten Dioden.

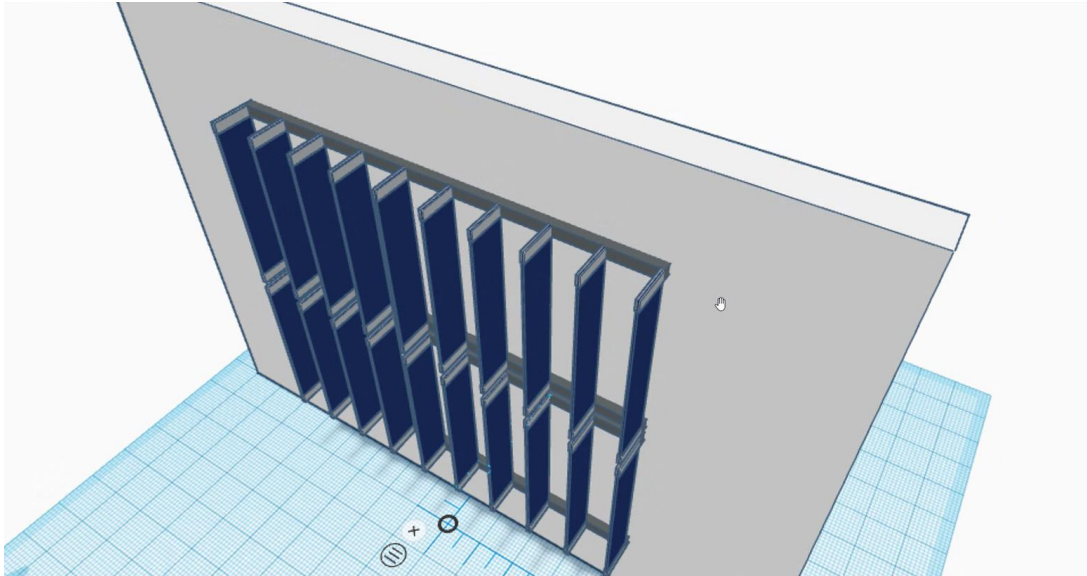


Abbildung 61: Schematische Darstellung der Glas-Glas-Lamellenmodule mit jeweils zwei Strings à 22 Halbzellen (M6, PERC, bifazial; opt. M6 HJT).

In der aktuellen Planung der Demonstratorwand sind 84 Module mit einer Glasgröße von 2000x400x4 mm<sup>3</sup> vorgesehen. Pro Modul ist hierbei eine Leistung von ca. 130W zu erwarten und ca. 10,9kW für das Gesamtsystem. Am ISE wurden hierfür 740 Strings (vier Strings pro Modul) mit jeweils 11 Halbzellen (M6, PERC, bifazial; optional auch teilweise mit M6 HJT Halbzellen) hergestellt und an FGS versandt. Im weiteren Projektverlauf werden Minimodule mit am ISE strukturierten Gläsern hergestellt und mit Standard PV-Modulen verglichen.

Es wurden Silicon-Heterojunction-Solarzellen mit 9 Busbars (9BB SHJ) hergestellt. Der Prozessfluss bei der Herstellung ist in Abbildung 62 dargestellt, bis zum SHJ-Präkursor wurden die Referenzprozess der SHJ-Baseline verwendet.

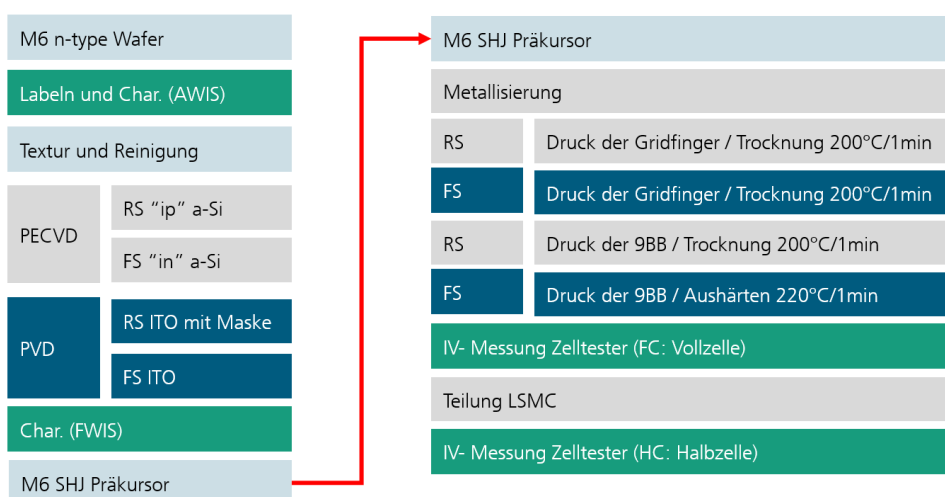


Abbildung 62: Übersicht Prozessfluss zur Herstellung der SHJ-Zellen

Für die Metallisierung wurde die Referenz-Niedertemperaturpaste (NTP) für die Gridfinger und eine BB-NTP mit optimierter Haftung nach Lötten verwendet. Nach Abschluss der Metallisierung und Aushärten der Proben wurden sie am Zelltester gemessen und im Anschluss mittels LSMC-Verfahren (Laser Scribe Mechanical Cleave) halbiert und erneut gemessen. Hier wurden parallel PERC-Halbzellen aus industrieller Fertigung charakterisiert. Die Halbzellen wurden auf Vorder- und Rückseite gemessen, da in den Fassaden beide Seiten einen relevanten Beitrag zum Stromertrag spielen werden.

Die Ergebnisse der IV-Messung (hier nur die Effizienz gezeigt) sind in Abbildung 63 dargestellt.

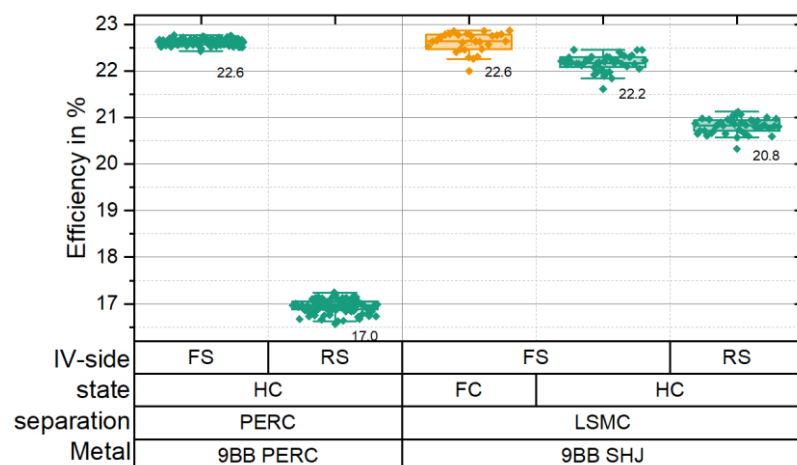


Abbildung 63: IV Ergebnis der industriellen PERC-Halbzellen sowie der SHJ Voll- und Halb-Zellen (FC/HC) aus dem Vorversuch.

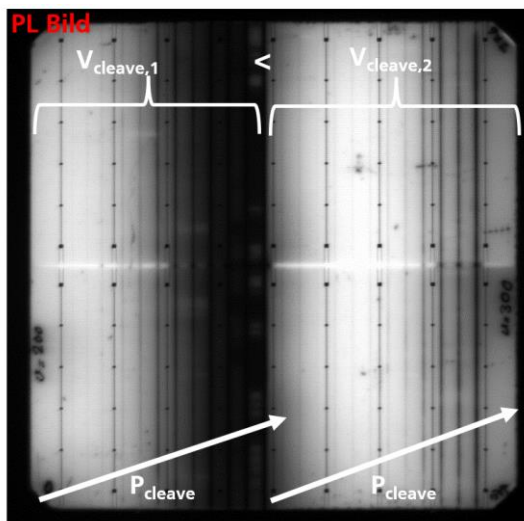
Die PERC Halbzellen liegen im Mittel auf einem sehr ähnlichen Niveau wie die SHJ-Zellen vor Teilung bei der Messung der Vorderseiten (front side: FS) Effizienz. Nach der Teilung mittels LSMC fiel die Effizienz der SHJ-Zellen um 0.4%. Damit liegt die Vorderseiten Effizienz der SHJ-Zellen bei der Zelltester Messung etwas unter der PERC-Referenz. Betrachtet man die Effizienz auf der Zell-Rückseite, so liegen die SHJ Halbzellen mit 20.8% Wirkungsgrad deutlich über der PERC-Referenz mit 17%. Die Bifazialität liegt somit für SHJ mit 93.6% deutlich über derjenigen 75.2% für PERC. Es besteht noch deutliches Optimierungspotential bei den SHJ-Zellen. Zum einen mussten noch PVD-Masken mit großer Edge-Exklusion (zur Isolation der Solarzellen Vorder- und Rückseite) genutzt werden und auch der Teilungsprozess mittels LSMC ist im Vergleich zu TLS (thermal laser separation) weniger schonend. Desweiteren kam kein Kantenpassivierungsschritt und auch kein Light-Soaking zum Einsatz.

Um SHJ-Zellen in ausreichender Stückzahl für einen signifikanten Teil der Demo-Fassade bereitzustellen, wurden industrielle SHJ-Präkursor (nach PVD-Beschichtung) beschafft und diese mittels Dual-Siebdruck auf Vorder- und Rückseite metallisiert. Die weiteren Prozessschritte wurden für die industriellen Präkursoren angepasst, da sich die Zellen aufgrund der geringen Wafer-Dicke von ca. 110 µm und dünnen Schichten als besonders empfindlich bei der Zellteilung mittels Laser und nachfolgendem Light-Soaking erwiesen haben. Die gesamte Prozesssequenz ist in Abbildung 64 dargestellt.

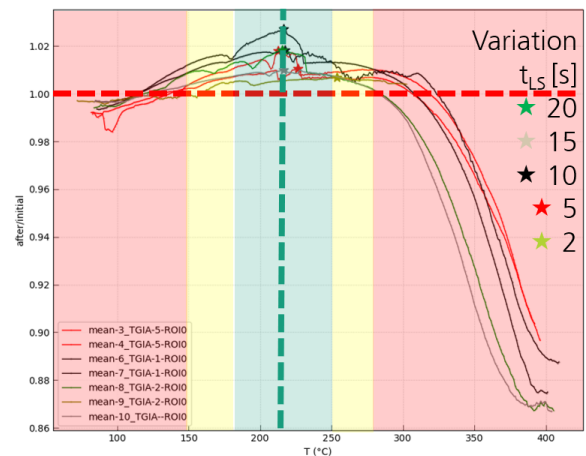
#440 M6 SHJ Präkursoren	
Metallisierung	
RS	Druck Gridfinger / Trocknung 200°C/1min
FS	Druck Gridfinger / Trocknung 200°C/1min
RS	Druck 9BB / Trocknung 200°C/1min
FS	Druck 9BB / Aushärten 220°C/1min
IV- Messung Zelltester (FC: Vollzelle)	
Teilung Thermal Laser Separation (TLS), Lightsoaking (LS)	
IV- Messung (HC: Halbzelle)	

Abbildung 64 Prozessfluss für die Herstellung von 9BB SHJ Halbzellen auf Basis von industriellen SHJ-Präkursoren.

Für die Zellteilung mittels Thermal Laser Separation (TLS) wurde die Laser Leistung für den „Scribe“ und „Cleave“ Prozess sowie die Verfahrensgeschwindigkeit für minimale Schädigung bei gleichzeitig zuverlässiger Zellteilung optimiert. Für das Light Soaking kam die TGIA-Methode (Temperature Gradient Image Analysis) [24] zum Einsatz um das optimale Prozessfenster hinsichtlich thermischen Budgets (Laser Leistung/Temperatur und Einwirkzeit) zu ermitteln. Beispielhaft sind in der folgenden Abbildung 65 Ergebnisse aus der TLS und LS-Optimierung dargestellt.



(a)



(b)

Abbildung 65 (a) Untersuchung der Schädigung mittels PL-Bild auf einer SHJ-Zelle mit einer lateralen Variation „Cleave“ Prozess: Verfahrensgeschwindigkeit  $v_{cleave}$  und Laserleistung  $P_{cleave}$ . (b) TGIA-Darstellung des PL-Signal Quotienten (nach zu vor LS-Prozess) in Abhängigkeit von Proben temperatur T und Einwirkzeit  $t_{LS}$ .

Auf Basis der Voruntersuchungen wurden Zellen mittels TLS-Prozess geteilt und anschließend mit einer Variation um das TGIA-Optimum mit dem RTP-Laser „Lightsoaking“ (LS) Prozess behandelt. Die Ergebnisse der Variation ist in der Abbildung 66 dargestellt. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Zell-Effizienz zunächst durch die Teilung (FC → HC) abnimmt, aber dann im nachfolgenden LS-Prozess wieder zunimmt. Die Kurzschlussstromdichte  $J_{sc}$  macht von Voll- zu Halbzelle einen Sprung der vermutlich durch die nicht angepasste Kalibrierung zu erklären ist, im nachfolgenden LS-Prozess ändert sich der Strom praktisch nicht. Die Leerlaufspannung  $V_{oc}$  sinkt zunächst um ca. 2 mV, dieser Verlust wird durch den LS-Prozess kompensiert. Auch der Füllfaktor FF sinkt durch die Zellteilung, und steigt dann im LS-Prozess wieder an. Am deutlichsten ist die Steigerung bei den Prozessen mit dem geringsten thermischen Budget, also 220°C 5s und 210°C 10s. Für die Prozessierung des Zell-Batches zur Modulintegration wird der 220°C 5s Prozess aufgrund der kürzeren Prozesszeit und des guten Ergebnisses ausgewählt.

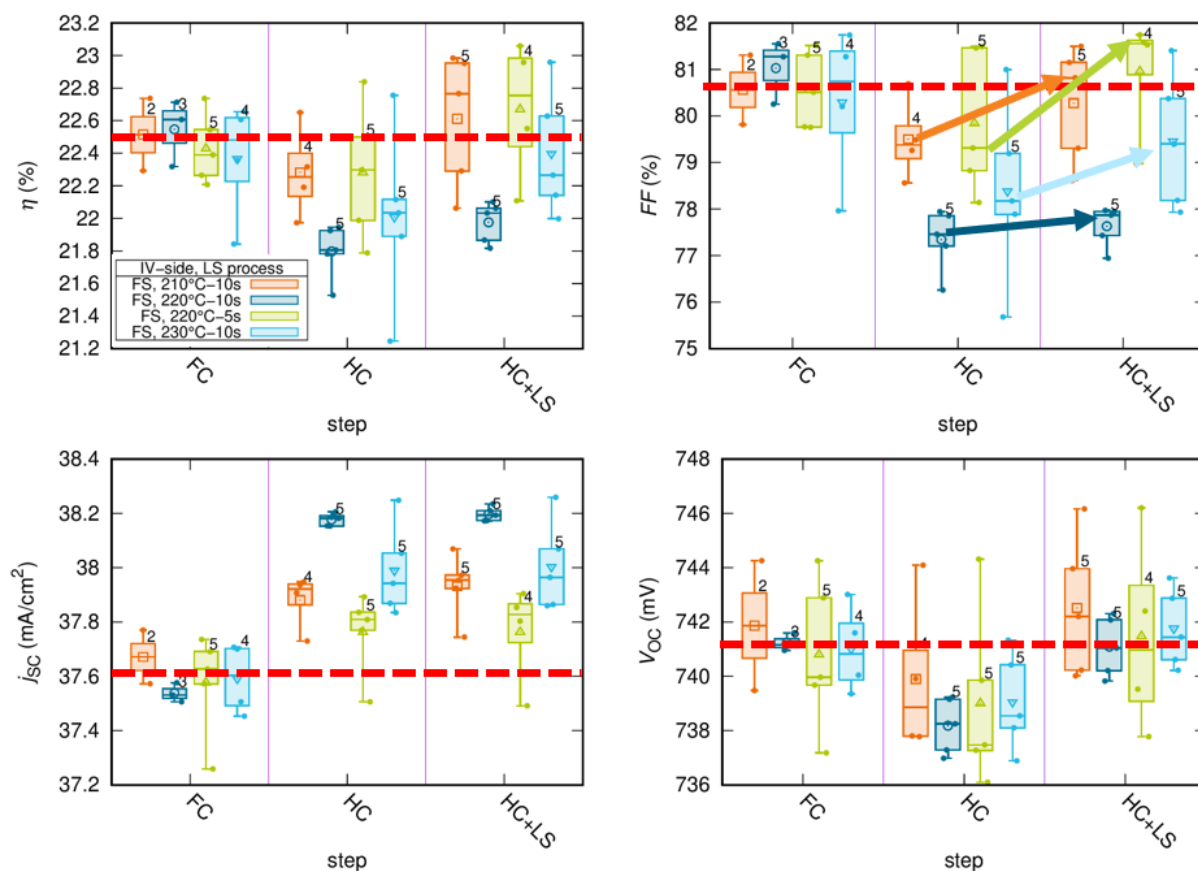


Abbildung 66 IV-Ergebnisse der Zellteilung (Vollzelle „FC“ zu Halbzelle „HC“) und anschließendem Light Soaking („HC+LS“). Variation des LS-Prozesses in Proben temperatur T und Einwirkzeit tLS.

Es wurden 200 Proben, der insgesamt 400 prozessierten Vollzellen (FC) für den Schneide- und LS-Prozess vorbereitet und mit dem angepassten Prozess für Teilung und Light-Soaking prozessiert. In Abbildung 67 sind die IV-Parameter und in Tabelle 4 die Mediane ausgewählter Parameter der Zellen abgebildet.

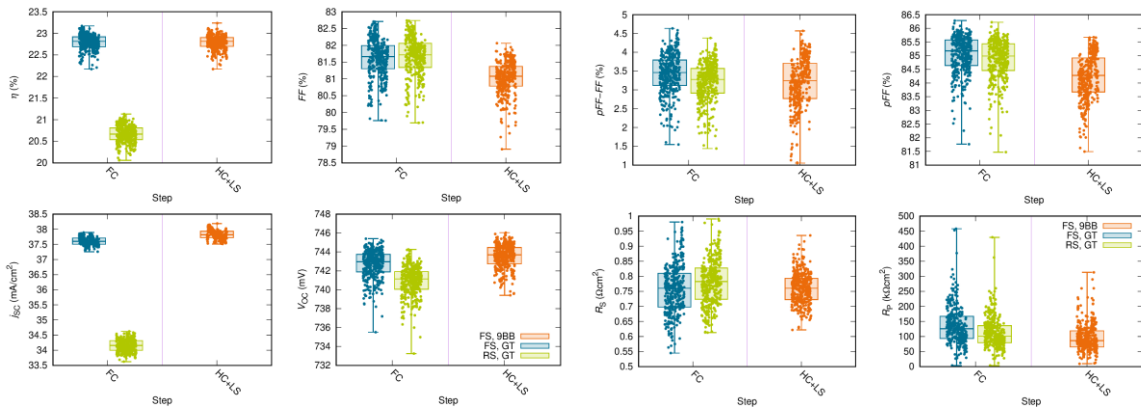


Abbildung 67 IV-Ergebnisse der Zellen zur Modulintegration vor der Teilung und nach Teilung und Light-Soaking.

Tabelle 4: Mediane der Zellparameter für ausgewählte IV-Parameter.

Step, IV	$\eta$	FF	Jsc	Voc	pFF-FF	pFF	$R_s$	$R_p$
Units	in %	in %	[mA/cm <sup>2</sup> ]	[mV]	in %	in %	[ $\Omega$ cm <sup>2</sup> ]	[ $\Omega$ cm <sup>2</sup> ]
FC, GT FS	22.81	81.67	37.60	743.0	3.46	85.17	0.760	126
FC, GT RS	20.67	81.72	34.16	741.1	3.28	84.99	0.782	101
HC+LS, 9BB FS	22.81	81.08	37.82	743.7	3.25	84.28	0.760	86
<b>Relative Parameters:</b>								
BFR FC	90.6%	100.1%	90.8%	99.8%	94.7%	99.8%	102.9%	80.0%
Separation change	0.0%	-0.7%	0.6%	0.1%	-6.2%	-1.1%	0.0%	-31.6%

Die Ergebnisse sind gegenüber dem Vortest leicht verbessert. Die Effizienz der Voll- und Halbzellen liegt mit 22.8% leicht über dem Level der PERC-Referenz. Die Bifazialität der SHJ-Zellen auf Basis des industriellen Präkursors liegt mit 90.6% 3 Prozentpunkte unter den ISE intern produzierten Zellen aber immer noch deutlich über dem Wert der PERC-Zellen (75.2%). Die Effizienzverluste durch die Teilung konnten durch den LS-Prozess in Summe kompensiert werden. Wobei sich die Verluste im FF (verminderter pFF) und Gewinne im Jsc ausgleichen. Im Anschluss wurden die Halbzellen in Effizienzklassen sortiert und zum Modulbau weitergeleitet.

Zusammenfassend zu den Solarzellen: es wurden SHJ-Halbzellen mit einem gegenüber der industriellen PERC-Referenz leicht verbesserter Effizienz und deutlich verbesserter Bifazialität hergestellt. Für die Einbettungsverluste im Modul werden für SHJ-Zellen Vorteile erwartet, da die SHJ-Zellen im kurzwelligen Bereich eine deutlich geringere spektrale Empfindlichkeit aufweisen.

Der Modulbau wurde mit den zuvor evaluierten Materialien durchgeführt. Durch die spezielle Anordnung im Demonstrator wurden Kontaktherausführungen an der Modulkante untersucht und im Modulbau verwendet. Hierzu musste zuerst ein Laminationsprozess entwickelt werden, da während der Lamination Luftpneinschlüsse auftraten. Schlussendlich wurden mehrere Lagen an Einkapselungsmaterial und eine bessere Fixierung der Kontaktherausführung verwendet, um die Luftpneinschlüsse zu minimieren.

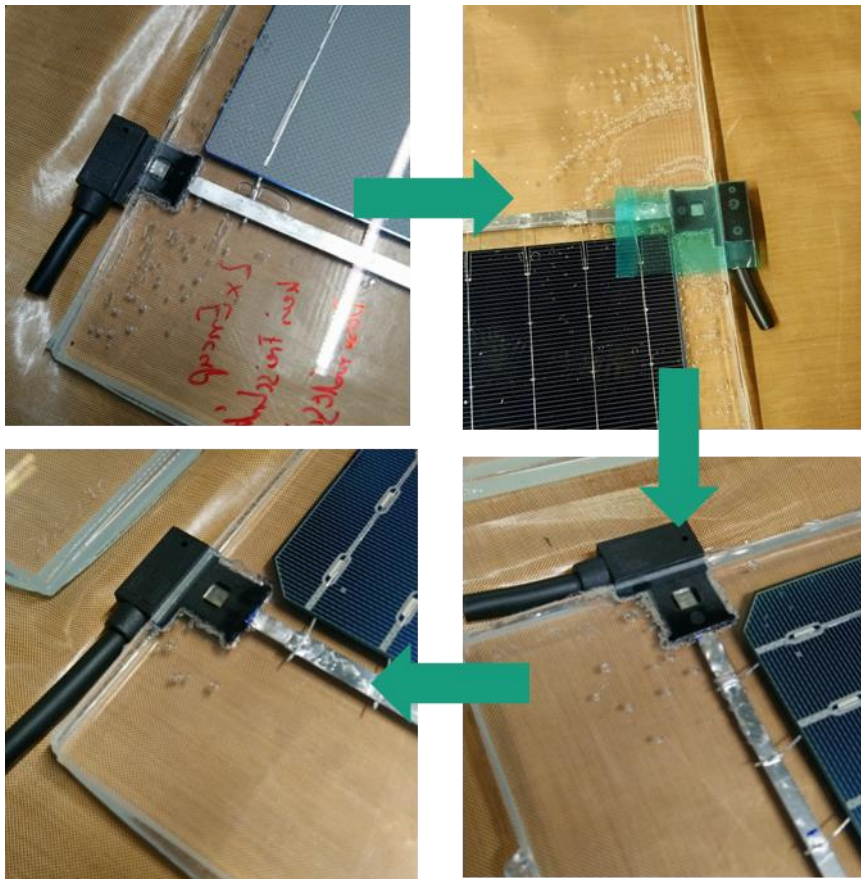


Abbildung 68 Herstellungsschritte zur Integration von seitlichen Modulverbindungs-Boxen.

Nach erfolgter Prozessentwicklung konnten mit den zur Verfügung gestellten Zellen die großformatigen Module gebaut werden. Je zwei Module wurden mit „Sevasa“ Glas hergestellt, zwei weitere mit „Lamberts“ Glas, die unterschiedliche Strukturierungen aufweisen. Die Glasvariation bezieht sich auf die Vorderseite. Auf der Rückseite wurde Weißglas ohne Strukturierung genutzt. Die Module haben die Maße 2000 mm x 400 mm und sind mit integrierten Dioden und Randanschlussdosen ausgestattet. Die Zellstrings bestehen aus je 11 am Fraunhofer ISE hergestellten SHJ Halbzellen im M6 Format. Die integrierte Diode ist im Bereich der letzten Zellreihe sowohl oben als auch unten im Modul verbaut. Abbildung 71 zeigt die vier installierten Module, links die Module mit „Sevasa“ Glas, rechts die beiden Module mit „Lamberts“ Glas.

## AP 5: Pilotinstallation und Vermessung

Am ISE und beim Projektpartner FGS wurden Outdoor-Testflächen im Rahmen von HighFas genutzt. Im Rahmen des Projekts wurde eine Pilotinstallation am Standort Sülzfeld des Projektpartners Flachglas Sachsen GmbH durchgeführt. Abbildung 69 zeigt ein Foto der entsprechenden Fassade vor der Modulintegration.



Abbildung 69 Foto der Fassade für die Pilotinstallation bei Flachglas Sachsen GmbH in Sülzfeld

Zur Vorbereitung der Fassaden-Integration wurden Betrachtungen basierend auf CAD durchgeführt und u.a. Windlasten berechnet und die vorteilhaftesten Designs ermittelt (siehe im vorhergehenden Abschnitt). Abbildung 70 zeigt ein Beispiel-Design.

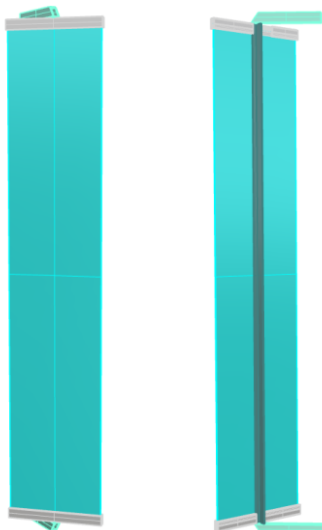


Abbildung 70 CAD-Model der Module mit bei Montage drehbarer Lagerung: Vorderseite des Moduls (links) und Rückseite des Moduls mit versteifendem T-Profil (rechts)

Die in AP4 hergestellten Module kamen beim Projektpartner Flachglas Sachsen wie geplant zum Einsatz an einer Fassade. Abbildung 71 zeigt einen Ausschnitt der Fassade nach der Installation. Für weitergehende Informationen zur Fassade wird auf den Abschlussbericht des Partners Flachglas Sachsen verwiesen.



Abbildung 71 Im Rahmen des Projekts beim Projektpartner Flachglas Sachsen an der Fassade installierte PV-Module.

Darüber hinaus wurden am ISE Minimodule hergestellt, die unterschiedlich strukturierte Glasoberflächen verwenden. Die Minimodule sind mit Gläsern des Formats 166 mm bestückt worden. Ziel war es den Einfluss der strukturierten im Vergleich zu einer unstrukturierten Glasoberfläche zu analysieren. Hierfür wurden 2 Halbzellen je Minimodul eingekapselt. In den Modulen wurden IBC Zellen verbaut, die an sich als monofazial gelten, aber wegen der durchgereichten Frontkontakte eine gewisse Bifazialität zeigen. Somit ließ sich die Rückseite trotz der geringen Glasgröße bewerten.

Die Minimodule waren 9 Monate auf einem Outdoor-Teststand am Fraunhofer ISE exponiert. Der Aufbau ist in Abbildung 72 zu sehen. Während dieser Zeit wurde alle 5 Minuten von jedem Modul eine I-V Kennlinie sowie Modultemperatur und Umgebungsparameter aufgezeichnet. Dazwischen wurden die Module im MPP betrieben, jedes an einer eigenen elektronischen Last, um einen realitätsnahen Betriebszustand zu ermöglichen.



Abbildung 72 Minimodule in Aufständerrung auf dem Dach des Fraunhofer ISE.

Exponiert wurden drei Typen von Minimodulen: Solche mit glatter Glas-Oberfläche auf Vorder- und Rückseite (Typ1, Referenz / GG), solche mit strukturierter Vorderseite und glatter Rückseite (Typ 2, SG) und solche mit beidseitig strukturierem Glas (Typ 3, SS). Auf dem Foto sind die milchig erscheinenden Gläser diejenigen mit einem strukturierem Frontglas. Die Typen wurden auf dem Rack so verteilt, dass keine systematischen Unterschiede aufgrund des Montageplatzes vorliegen.

Während des Expositionszeitraums wurden tägliche Funktions- sowie wöchentlich kleinere und sporadisch umfangreichere Qualitätsprüfungen an den Daten durchgeführt. Zum Ende hin fand die ausführliche Auswertung statt. Der Schwerpunkt lag dabei auf den optischen Unterschieden, insbesondere auch bei verschiedenen Einstrahlungswinkeln. Überprüft wurde zudem neben zahlreichen Plausibilitäts- und Qualitätsdiagrammen, dass sich die Module in den Parametern, die nicht variiert wurden, auch tatsächlich ähnlich verhalten bzw. störende Einflüsse korrekt gefiltert wurden. So beispielhaft zu sehen in Abbildung 73, wo der normalisierte und temperaturkorrigierte relative Wirkungsgrad über die Einstrahlung abgebildet ist.

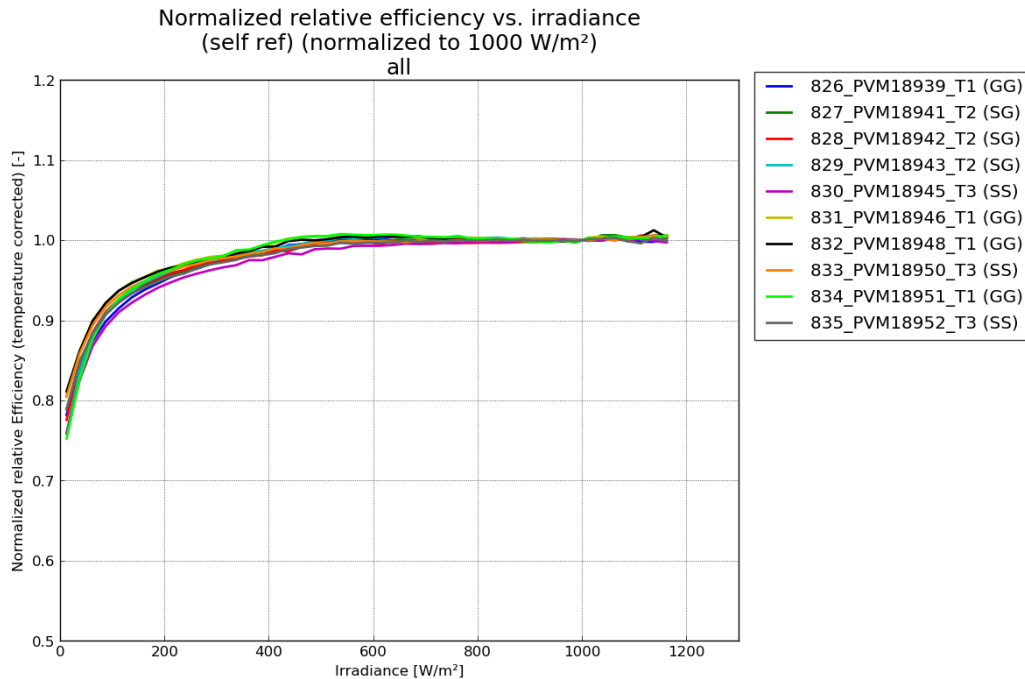


Abbildung 73 Relativer Wirkungsgrad über die Einstrahlung

Ein sehr interessantes Diagramm stellt die winkelabhängige Analyse dar (Abbildung 74). Hierfür wurden nur clear sky Bedingungen einbezogen. Aufgrund seiner linearen Korrelation mit der Einstrahlung bietet sich der Kurzschlussstrom ( $I_{sc}$ ) als Maß für die optischen Eigenschaften an. Dargestellt ist der Unterschied in  $I_{sc}$  zur Referenz (Typ 1) in Abhängigkeit des Einstrahlungswinkels. Man erkennt bei steilen Winkeln einen Vorteil der strukturierten Gläser von ca. 3...4,5%, wobei die Module mit glatter Rückseite eher um 3%, die mit beidseitig strukturierter Rückseite eher um 4% liegen. Bei sehr flachen Winkeln performt interessanterweise die glatte Rückseite leicht besser. Möglicherweise spielt da der verhältnismäßig zur aktiven Fläche recht große Rand eine Rolle, der über Totalreflexion an der Rückseite mehr Licht auf die Zelle lenken könnte. Ob dieses Detail bei Vollformatmodulen auch zu beobachten ist, ist daher ungewiss.

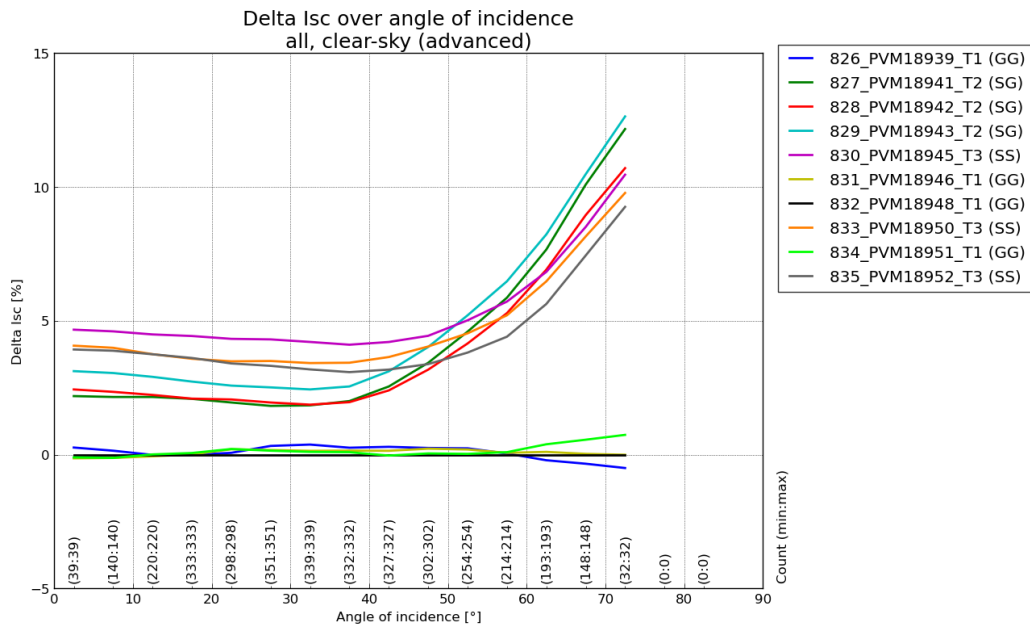


Abbildung 74 Delta Isc zur Referenz in Abhängigkeit des Einstrahlungswinkels

Weiterhin wurden noch diverse Parameter über die Zeit betrachtet, wovon Isc in Abbildung 75 zu sehen ist. Dargestellt sind 2-Tages-Mittelwerte bei Einstrahlungen ab 300 W/m<sup>2</sup> unter Einbeziehung aller Bewölkungssituationen. Die Lücken im Winter sind Zeiten, wo die 300 W/m<sup>2</sup> nicht häufig genug erreicht wurden. Generell sind die Messbedingungen und damit die Datenqualität im Winter weniger gut als im Sommer.

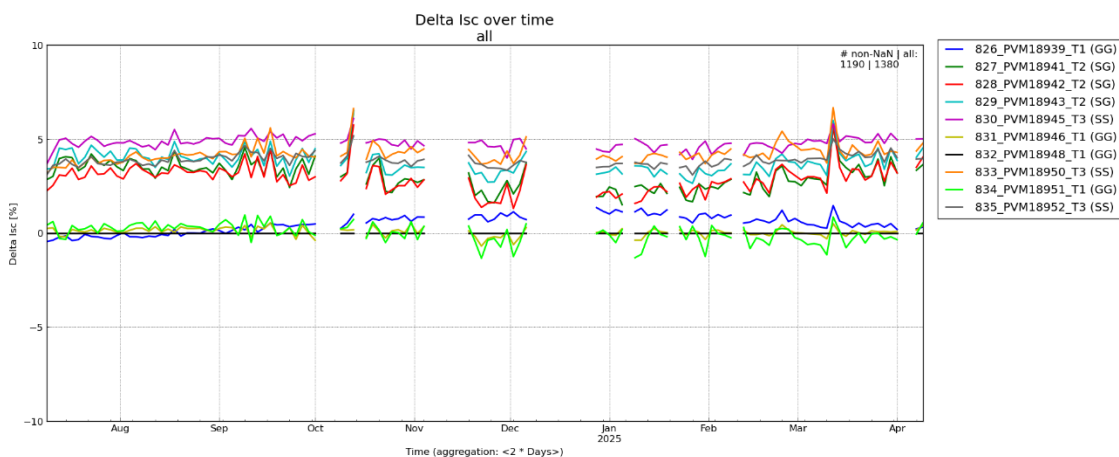


Abbildung 75 Delta ISc zur Referenz über die Zeit

Leider konnte aufgrund des Projektendes die Pollensaison im Frühjahr nur noch am Rande mitgenommen werden. Interessant wäre hier in einem zukünftigen Projekt eine systematische Untersuchung hinsichtlich Soiling.

Zusammenfassend aus dem Outdoorversuch lässt sich festhalten, dass unter Realbedingungen signifikant mehr Licht in die Module eingekoppelt wird. Wie hoch der Mehrertrag ausfällt, ist dann natürlich abhängig vom Standort und der Montagesituation, aber die Größenordnung von einigen Prozent ist erkennbar. Besonders bei Anlagen mit hohem Schräglichtanteil spielen die

strukturierten Module ihre Vorteile aus. Hinzu kommt zudem die reduzierte Blendung, die auf dem Teststand klar erkennbar war. Als Beispiel wird hier auf Abbildung 76 verwiesen.

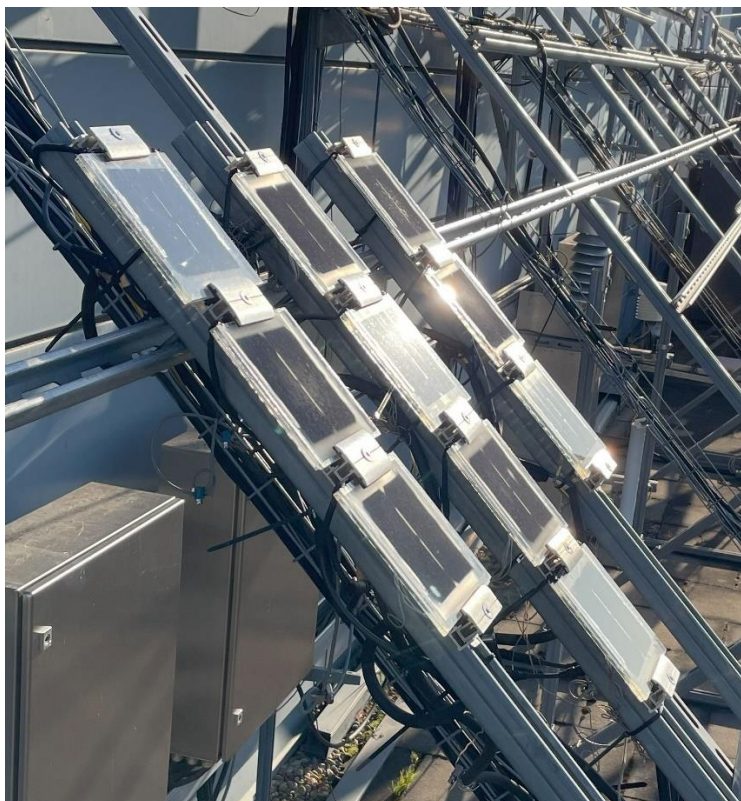


Abbildung 76 Mini-Module am Teststand unter Schräglicht-Bedingungen.

Hier zeigten sich die nicht-texturierten Glas-Vorderseiten als deutlich heller mit klarer Blend-Charakteristik unter dem Reflexionswinkel. Im Bild sind die dunkel erscheinenden Mini-Module mit texturierter Glas-Oberfläche ausgestattet. Hellere Module weisen unstrukturiertes Modulglas auf der Vorderseite auf. Insbesondere in der Mitte des Aufbaus ist eine sehr helle Reflexion des unstrukturierten Moduls erkennbar. Das rechts daneben befindliche Mini-Modul mit dunklem Erscheinungsbild zeigt einen lokalen deutlichen Reflex, der durch den Zellverbinder, der sich neben der Solarzelle befindet, hervorgerufen wird. Durch Antireflex-Maßnahmen auf der Zellverbinder-Oberfläche ließe sich dies in Zukunft vermeiden. Direkt neben diesem Reflexionspeak ist dieses Modul allerdings blendfrei.

Damit wurde der Nachweis im Outdoor-Versuch erbracht, dass die im Rahmen von HighFas erzeugten Glasoberflächen-Technologien sowohl eine starke Anti-Blend-Wirkung aufweisen als auch einen erhöhten Strom-Ertrag ermöglichen.

## 5 Verwertungsplan

Die wissenschaftlichen Ergebnisse und technologischen Entwicklungen aus dem HighFas-Projekt werden umfangreich verwertet. Neben den genannten Publikationen erfolgt die Verwertung in weiteren Projekten am Fraunhofer ISE bzw. durch den Transfer im Rahmen von Kooperationen mit Partnern aus der Industrie. Tabelle 5 fasst die Verwertung der wichtigsten Projektergebnisse zusammen.

Tabelle 5: Tabellarische Aufstellung der Verwertung der wichtigsten Projektergebnisse.

<i>Ergebnis</i>	<i>Verwertung</i>
AP1: Technisch-Wirtschaftliche Konzepte	Mathematische Modelle für die Konzeptionierung von PV-Anlagen und deren Komponenten, die im Rahmen von HighFas entwickelt werden konnten, ermöglichen nun eine genauere Vorhersage und Einschätzung ihres Kostenrahmens und welche Kosten als realisierbar eingeschätzt werden.
AP2: Optische Anforderungen	Der Erkenntnisgewinn aus den Analysen der optischen Anforderungen an Glasoberflächen trägt bei den Projektpartnern dazu bei, zukünftig besser an typische Situationen angepasste Produkte anbieten zu können. Hierbei lag ein Fokus auf nicht-idealen Einstrahlungs-Bedingungen, wie sie beispielsweise bei senkrechter Anordnung auftreten. Die Verwertung erfolgt sowohl wissenschaftlich in Folgeprojekten als auch ökonomisch im Rahmen der am Projekt beteiligten Firmen.
AP3: Entwicklung von Antireflex-Glasstrukturen mit hoher Transmission	Der Kompetenzgewinn kann für weitere Entwicklungsaufträge aus Industrie und Forschung eingesetzt werden. Die Projektpartner Manz und RENA haben die Möglichkeit, Produktionsanlagen für eine neue Generation von Glasprodukten nach Weiterführung der Entwicklungsarbeit anzubieten.
AP4: Entwicklung von Glas-Glas-Lamellenmodulen mit entsprechender Lagerung	Das erarbeitete Know-How wird für weiterführende Solarmodul- und Solarzellen-Forschungsprojekte verwendet, um ein optimales Zusammenspiel zwischen Zelle und Modul zu erreichen. Zusätzlich wird dadurch der Wieder-Aufbau der PV-Industrie in Europa gestärkt.
AP5: Pilotinstallation und Vermessung	Da zukünftig verstärkt PV-Module auch unter nicht-optimalen Bedingungen (senkrecht, Richtung Norden etc.) eingesetzt werden, wird die in HighFas gewonnene Kompetenz zur Charakterisierung von PV-Modulen unter unterschiedlichen Einstrahlungsrichtungen hilfreich sein in weiteren Forschungsprojekten und zur Einordnung und Optimierung von industriellen PV-Modulen.

## 6 Veröffentlichungen und Patentanmeldungen

Mit den Ergebnissen des Projektes wurden folgende Beiträge auf Konferenzen erbracht

- L. Bienkowski, M. Hofmann, M. Zimmer, J. Willmann, B. Bläsi, A. Brand, J.-F. Nekarda, B.-U. Sander, M. Schneider, C. Schmitt: „Laser Structuring and Wet Chemical Etching for Anti-Glare Properties of Photovoltaic Module Glass“, 3AV.1.10, 40<sup>th</sup> EUPVSEC, Lissabon, 2023.
- M. Hofmann, B. Bläsi, J. Willmann, L. Bienkowski, M. Zimmer, D. Reinwand, F. Ensslen, S. Riepe, S. Nold, A. Brand & T.E. Kuhn: „Anti-Glare Bifacial Module Designs with Structured Glass for Façade Application“, 40<sup>th</sup> EUPVSEC, Lissabon, 2023, DOI: 10.4229/EUPVSEC2023/3AV.1.34.
- J. Willmann, H. R. Wilson, B. Bueno Unzeta: „Bewertung des Blendungspotenzials verschiedener BIPV-Deckgläser: Untersuchung der Oberflächenstruktur“, 39. PV-Symposiums mit BIPV-Forum 2024
- Benedikt Bläsi, „Glass textures for photovoltaic modules – an overview,“ Proc. SPIE PC13014, Photonics for Solar Energy Systems X, PC1301405 (19 June 2024); <https://doi.org/10.1117/12.3021755>

Es erfolgten im Projekt keine unmittelbaren Schutzrechtsanmeldungen, es wurden jedoch die Voraussetzungen für die Verwertung von bestehenden Schutzrechten verbessert.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] LG Solar, [https://www.lg.com/de/business/solar/downloadbereich/datenblaetter/LG\\_Neon%20%20Bifacial%20J5/Neon%20%20Bifacial%20J5%20DE.pdf](https://www.lg.com/de/business/solar/downloadbereich/datenblaetter/LG_Neon%20%20Bifacial%20J5/Neon%20%20Bifacial%20J5%20DE.pdf), aufgerufen am 5.8.2020
- [2] MeyerBurger, [https://www.meyerburger.com/fileadmin/user\\_upload/product\\_downloads/Meyer-Burger-HJT-Factsheet-EN-201905.pdf](https://www.meyerburger.com/fileadmin/user_upload/product_downloads/Meyer-Burger-HJT-Factsheet-EN-201905.pdf), aufgerufen am 5.8.2020
- [3] ITRPV consortium, International Technology Roadman for Photovoltaic (ITRPV): Results 2019, 11th edition (2020)
- [4] <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wohnen/hochhaus-walkie-talkie-verursacht-braeude-und-wind-13727620.html>, aufgerufen am 15.12.2020
- [5] <https://www.faz.net/aktuell/feuilleton/blendend-neue-universitaetsbibliothek-in-freiburg-13866954.html>, aufgerufen am 15.12.2020
- [6] z.B. EN17037, EN14500 und EN14501
- [7] DIN EN ISO 52022-1:2018-01, Energieeffizienz von Gebäuden - Wärmetechnische, solare und tageslichtbezogene Eigenschaften von Bauteilen und Bauelementen - Teil 1: Vereinfachtes Berechnungsverfahren zur Ermittlung der solaren und tageslichtbezogenen Eigenschaften von Sonnenschutz in Kombination mit Verglasungen (ISO 52022-1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 52022-1:2017, <https://dx.doi.org/10.31030/2563575>
- [8] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI), Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen der, Beschluss der LAI vom 13.09.2012
- [9] J Wienold, , T Iwata, M Sarey Khanie, E Erell, E Kaftan, RG Rodriguez, JA Yamin Garreton, T Tzempelikos, I Konstantzos, J Christoffersen, TE Kuhn, C Pierson and M Andersen , Cross-validation and robustness of daylight glare metrics, *Lighting Res. Technol.* 2019; 1–31
- [10] Wienold,J., Kuhn, T.E., Christoffersen, J. ,Sarey Khanie, M., Andersen, M., COMPARISON OF LUMINANCE BASED METRICS IN DIFFERENT LIGHTING CONDITIONS, *Proceedings of the CIE 2017, Midterm Meeting, Jeju Island, Korea*
- [11] Wienold, J., Christoffersen, J.: Evaluation methods and development of a new glare protection model for daylight environments with the use of CCD cameras, *Energy and Buildings*, vol. 38 (2006), p. 743-757.
- [12] Wilson H. R., Bueno B., Eisenlohr J., Kuhn T. E., "Evaluating BIPV modules with respect to textural appearance, glare, colour and electricity yield", 35. PV-Symposium 01./02. September 2020
- [13] Nuijs, A. M.; Horikx, J. J. (1994): Diffraction and scattering at antiglare structures for display devices. In: *Applied optics* 33 (18), S. 4058–4068. DOI: 10.1364/AO.33.004058.
- [14] Boerner, V.; Abbott, S.; Bläsi, B.; Gombert, A.; Hoßfeld, W. (2003): 7.3: Holographic Antiglare and Antireflection Films for Flat Panel Displays. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 34 (1), S. 68–71. DOI: 10.1889/1.1832208.
- [15] Gombert, Andreas; Bläsi, Benedikt (2009): The moth-eye effect — From fundamentals to commercial exploitation. In: E. A. Favret und N. O. Fuentes (Hg.): *Functional properties of bio-inspired surfaces: Characterization and technological applications*. Singapore, London, New Jersey: World Scientific, S. 79–102.

- [16] Tucher, N., Eisenlohr, J., Kiefel, P., Höhn, O., Hauser, H., Peters, M., Müller, C., Goldschmidt, J.C., Bläsi, B. (2015) 3D optical simulation formalism OPTOS for textured silicon solar cells. *Opt. Express*, 23 (24), A1720.
- [17] z.B. von GMB (GMB Deflect) oder Saint-Gobain (Albarino).
- [18] Nold, S. (2020) *Techno-ökonomische Bewertung neuer Produktionstechnologien entlang der Photovoltaik-Wertschöpfungskette: Modell zur Analyse der Total Cost of Ownership von Photovoltaik-Technologien*, Fraunhofer Verlag, Stuttgart.
- [19] SEMI E35-0618 Guide to Calculate Cost of Ownership (COO) Metrics for Semiconductor Manufacturing Equipment, SEMI International Standards.
- [20] SEMI E10-0814E Specification for Definition and Measurement of Equipment Reliability, Availability, and Maintainability (RAM) and Utilization, SEMI International Standards.
- [21] Danbi Yoo, Peter Tillmann, Tobias Kraus, Johannes Sutter, Angelika Harter, Sergei Trofimov, Boris Naydenov, Klaus Jäger, Hubert Hauser, Christiane Becker 2023 Comparative Optical Analysis of Imprinted Nano-, Micro- and Biotextures on Solar Glasses for Increased Energy Yield, *Solar RRL* 7 (13), 2300071, <https://doi.org/10.1002/solr.202300071>
- [22] Hofmann, M., Stevens, L., Hör, P., Barth, P., Bläsi, B., Riepe, S., Kalthoff, S., Kafle, B., Zimmer, M., Mittag, M., Nold, S., Sen, I., Reck, J., Schröer, N., Clochard, L., Ihlow, S., Horch, C. (2023) Improvement Options for PV Modules by Glass Structuring, 40<sup>th</sup> EUPVSEC, Lissabon, DOI: 10.4229/EUPVSEC2023/3DO.18.3.
- [23] Wienold, J. (2009) *Daylight Glare in Offices*, Dissertation U Karlsruhe, DOI: 10.24406/publica-fhg-278601.
- [24] Order, S., Niewelt, T., Brand, A., Schneider J., and Nekarda, J., "Temperature Gradient Image Analysis to Optimize an Ultrafast Regeneration of Boron–Oxygen-Related Defects," in *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 11, no. 3, pp. 606-612, May 2021, doi: 10.1109/JPHOTOV.2021.3063659