

ABSCHLUSSBERICHT

Verbundforschungsvorhaben

„Bifaziale Zellen: Produktionsnahe Zellmesstechnik, Standards, Technologie und Potential - PLUS“

Akronym: **BiZePS-Plus**

Gemeinschaftsprojekt von:

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Koord.)
h.a.l.m. elektronik GmbH
Jonas&Redmann GmbH
Hevel Energy Group LLC (bis 03/2022)

Zuwendungsempfänger:

Fraunhofer ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

Förderkennzeichen:

03EE1064

Projektlaufzeit:

01.07.2020 – 31.12.2022

Projektleiter:

Dr. Stefan Rein

Berichterstattung:

Nico Wöhrle, Stefan Rein, Johannes Greulich,
Alexander Krieg, Tobias Kemmer, Michael Rauer,
Jochen Hohl-Ebinger

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie BMWK unter dem Förderkennzeichen 03EE1064 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt bei den Autoren.

Freiburg, Juli 2023

Kontakt Daten Projektleiter / Stellvertreter

Dr. Stefan Rein

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg
Tel.: 0761/4588-5271, Fax: 0761/4588-9250
E-Mail: stefan.rein@ise.fraunhofer.de

Dr. Nico Wöhrle

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg
Tel.: 0761/4588-2359, Fax: 0761/4588-9250
E-Mail: nico.woehrle@ise.fraunhofer.de

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung.....	5
2 Zielsetzung und Vorgehensweise	6
2.1 Zielsetzung	6
2.2 Projektstruktur / Vorgehensweise	7
2.3 Arbeitsprogramm.....	7
2.4 Zeitplan und Meilensteine	10
2.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn	12
2.5.1 Allgemeine Ausgangslage	12
2.5.2 Stand Kontaktierung für busbarlose Zellen	13
2.5.3 Stand bifaziale Schindelsolarzellen	14
2.5.4 Stand Inline-Messung der Spektralen Empfindlichkeit	15
2.5.5 Stand Hysterese-Korrektur	15
2.5.6 Stand Sortierverfahren.....	15
3 Ergebnisse	16
3.1 AP2 Inline-Messtechnik / Kalibrierverfahren für bifaziale Zellen.....	16
3.1.1 AP2.1 Kontaktierungen für beidseitig busbarlose Bifazialzellen	16
A. Optimierung der Kontaktierung zur Inline-Messung von busbarlosen Zellen....	16
B. Optim. der Kontaktierung zur kalibrierten Messung von busbarlosen Zellen	20
C. Verfahren zur quantitativen Bewertung von Kontaktierungen zur Messung busbarloser Zellen.....	21
D. Vergleichsmessungen GridTouch / ucp: FF-Korrektur und überlagerte Effekte	24
E. Langzeitstabilität ucp-Leisten	27
3.1.2 AP2.2 Automatisierung für die Messung von bifazialen Schindelzellen.....	30
A. Spezifikation der Automatisierung für Schindelzellen	30
B. Einsatzbereitschaft der Automatisierung für Schindelzellen	33
3.1.3 AP2.3 Analysemethodik für bifaziale Schindelzellen im Waferverbund	33
A. Kleines Experiment mit bifazialen Schindelzellen aus PVTEC-Labor	33
B. Großes Experiment mit monofazialen Schindelzellen aus Industrie	34
C. Modell auf Basis des kleinen Probensatzes	36
D. Modell auf Basis des großen monofazialen Probensatzes	38
3.1.4 AP2.4 Trennung von Vorder-/Rückseiten-Effekten in Bifazialzellen	42
A. Bereitstellung eines Probensatzes aus der laufenden Produktion	42
B. Verfahren zur Trennung von Rekomb.effekten basierend auf IV-Messungen ..	42
C. Verfahren zur Trennung von Rekomb.effekten basierend auf SR-Messungen.	43
D. Anwendung der entwickelten Verfahren auf den bereitgestellten Probensatz ..	43
3.1.5 AP2.5 Korrekturverfahren für IV-Messungen von hochkapazitiven Bifazialzellen	46
A. Bestehende Hysterese-Korrekturverfahren.....	46
B. Konzeptionierung eines neuen Hysterese-Korrekturverfahrens	47
C. Automatisierung und Optimierung an existierenden Zellen	48
D. Vergleich von Verfahren zur Bestimmung der Basisdotierung	50
E. Verifikation der Korrektur und der Basisdotierungs-Best. auf SHJ und PERC..	50
F. Optimierungen für sehr kurze Messdauern < 10 ms für SHJ Zellen.....	51

3.2 AP3 Sortierverfahren für Modulintegration	52
3.2.1 AP3.1 Inline-Analyse hochgradig bifazialer Zellen.....	52
A. Hocheffizienz-taugliche Wafermarkierung für den HEVEL-Zellnprozess	52
B. Fertigung der Solarzellen bei HEVEL.....	59
C. Analyse der Solarzellen am ISE	59
3.2.2 AP3.2 Sortiermethodik anhand bifazialer Zellmessungen	62
A. Vorarbeiten.....	62
B. Sortiermethodik	62
C. Experimentabbruch.....	64
4 Verwertungsplan	65
A. Messtechnik busbarlose Zellen	65
B. Messtechnik für Schindelzellen	65
C. Erweiterte IV-Analysetechnik.....	66
D. Sortierverfahren für bifaziale Zellen.....	66
5 Anhang.....	66
5.1 Literaturverzeichnis	66
5.2 Liste der Veröffentlichungen	67

1 Zusammenfassung

Motivation: Bifaziale Solarzellen und Module ermöglichen aufgrund der beidseitigen Sammlung des Lichts eine signifikante Steigerung des PV-Ertrags bei gleichem Ressourceneinsatz, was sich in einem Marktanteil bifazialer Zelltechnologien von aktuell 70% widerspiegelt, der die Erwartungen bei Antragstellung bei Weitem übertrifft. Zudem werden zur Kosteneinsparung Kontaktfingerbreiten kontinuierlich reduziert, was auch Abschattungsverluste reduziert, zur Vermeidung elektrischer Widerstandsverluste aber neue Kontaktlayouts erfordert. Busbarlose Zelltechnologien haben hierbei das größte Potential, weshalb bei Antragstellung ein Anstieg ihres Marktanteils auf 19% (bis 2025) erwartet wurde. Bifaziale Schindelsolarzellen und -module stellen eine weitere Option dar zum Erreichen größerer Erträge, höherer Bifazialitäten und gesteigerter Leistungsdichten. Die genannten Entwicklungen erfordern angepasste Messtechnik, die in der Lage ist, die mit den neuen Metallisierungslayouts schwerer kontaktierbaren und mit den neuen Zellformaten schwerer handhabbaren Solarzellen schnell, reproduzierbar und präzise sowie mit bestmöglichem Einblick in die Zellparameter zu vermessen und den bifazialen Mehrertrag zuverlässig zu quantifizieren. Hierzu sollte dieses Projekt beitragen.

Stand der Technik: Nach den Ergebnissen des BiZePS Basisprojektes ist eine IV-Messung mit simultaner beidseitiger Beleuchtung gegenüber der Kompensationsmethode mit angepasster einseitiger Beleuchtung vorzuziehen, da sie eine höhere Genauigkeit aufweist, prozessbedingte Schwankungen der Bifazialität erfasst und somit zur Zellsortierung und gezielten Prozessoptimierung auf Bifazialität genutzt werden kann. Eine erprobte Messeinheit für die kontaktleistengestützte, bifaziale Messung busbarloser Zellen war zu Projektbeginn nicht bekannt. Ebenso keine Hochdurchsatz-Messkonfiguration für Schindelsolarzellen und kein Messstandard für kalibrierte Messungen von busbarlosen Solarzellen.

Zielsetzung: Das Projekt hatte zum Ziel, neueste Messtechniken zur Leistungsmessung, modernste Auswertemethoden und innovative Verfahren zur Zellsortierung für beste Modulleistungen für stark bifaziale Solarzellen mit und ohne Busbars und geschindelt zu erforschen und im PVTEC (inline) und Kalibrierlabor (offline) des Fraunhofer ISE zu etablieren. Erreicht werden sollte dies mit der Firma h.a.l.m. elektronik GmbH als Spezialist für bifaziale IV-Messtechnik, der Firma HVEL Energy Group als Hersteller von bifazialen Zellen und Modulen sowie der Firma Jonas&Redmann Automationstechnik GmbH als Spezialist für automatisierte Zellmesstechnik, die alle drei als assoziierte Partner in das Projekt eingebunden waren.

Ergebnisse: Im Projekt wurde die Zellmesstechnik für aktuelle und zukünftige Zellkonzepte für den industriellen Einsatz weiterentwickelt mit folgenden Ergebnissen: (a) Da die Füllfaktor-Messung bei busbarlosen Zellen stark vom Layout der Kontaktierung abhängt, was die Vergleichbarkeit von Messergebnissen erschwerte, wurde ein analytisches Modell entwickelt, über das Messergebnisse unterschiedlicher Kontaktierungen in Abhängigkeit von der Anzahl und dem Abschattungsgrad der Kontaktelemente ineinander umgerechnet und somit vergleichbar gemacht werden können. (b) Zudem wurde ein von h.a.l.m. entwickeltes Kontaktleistensystem (ucp), das eine layout-unabhängige Kontaktierung busbarloser Zellen unter bifazialen Bedingungen ermöglicht, hinsichtlich Messgenauigkeit und Stabilität evaluiert und optimiert, mit etablierten Messkonfigurationen abgeglichen und im Inline- und Kalibriereinsatz getestet. (c) Für die vollautomatisierte Charakterisierung von Schindelzellen wurde ein vollständiges Handling- und Kontaktierkonzept entwickelt und im Inline-Zelltester am ISE umgesetzt und evaluiert. (d) Auf Grundlage von Schindelzellmessungen in statistisch relevantem Umfang, die die neue Messplattform erstmals ermöglichte, wurde ein erstes Machine-Learning-basiertes Verfahren entwickelt zur Vorhersage der Wirkungsgrade der Einzelschindeln aus Kennlinien- und Elektrolumineszenz-Messungen am Schindelzellenverbund (vor Vereinzelung), wodurch die Präzision der Einzelschindelmessung mit der Durchsatztauglichkeit der Vollzellenmessung kombiniert wird. (e) Angesichts starker Hysterese-Effekte bei Hocheffizienzmodulen sind schnelle und präzise Kennlinienmessungen eine Herausforderung, die im Projekt gemeistert wurde, indem Kennlinien durch die Etablierung nichtlinearer Spannungsrampen mit Ultrakurz-Sweeps in unter 10 ms artefaktfrei aufgenommen und über ein analytisches Verfahren zur Hysterese-

Korrektur korrigiert werden, bei gleichzeitiger automatisierter Bestimmung der Basisdotierung an der fertigen Zelle für eine umfassendere Zellcharakterisierung. (f) Um die entwickelten Messverfahren an einer Großcharge von 6400 industriell hergestellten Heterojunction-Solarzellen bei voller Datenzuordnung testen zu können, wurde ein schädigungsfreier Laserprozess zur Wafermarkierung mittels Data-Matrix-Code entwickelt und seine Tauglichkeit für Höchst-effizienzmodulen nachgewiesen. Die Anwendung verbesserter bifazialer Sortierverfahren ergab für diesen Industrieprozess keine Leistungsgewinne im Modul, was auf die hohe Stabilität des Prozesses zurückzuführen ist.

Schlussfolgerung: Mit den hier erzielten Entwicklungsergebnissen konnten relevante messtechnische und methodische Fragestellungen erfolgreich gelöst und eine fundierte Basis für weiterführende Messtechnik und Analyseprojekte gelegt werden. Da die entwickelten Methoden Zelltechnologien mit wachsenden Marktanteilen adressieren, ist das Potential für einen industriellen Einsatz hoch. Die Implementierung der Methoden am Inline-Zelltester des ISE verbessert die existierenden Analysemöglichkeiten der Technologieplattform PVTEC und stärkt ihre Wettbewerbsfähigkeit damit nachhaltig. Trotz der fehlenden Evidenz im hier analysierten Heterojunction-Industrieprozess sollte der Mehrwert der bifazialen Zellsortierung hinsichtlich erzielbarer Gewinne in der Modulleistung für andere Bifazial-Technologien und andere Fertigungslinien nochmals evaluiert werden, insbesondere vor dem Hintergrund der großen und weiter steigenden Marktanteile der Bifazialtechnologien. Die im Projekt entwickelten Verfahren bilden hierfür eine ausgezeichnete Ausgangsbasis.

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

2.1 Zielsetzung

Während bifaziale Solarzellenkonzepte den Markt bereits zu einem großen Teil erobert haben, stellt die zuverlässige Quantifizierung des Mehrertrages auf Zellebene insbesondere für bifaziale busbarlose und Schindel-Konzepte noch eine Hürde dar. Im Rahmen des Projekts BiZePS-PLUS sollten die im BiZePS Basisprojekt entwickelten, messtechnischen und algorithmischen Konzepte an Zellen mit höherer Bifazialität als bisher und neuartigen Metallisierungsstrukturen (bifaziale Heterojunction Solarzellen mit / ohne Busbars und bifaziale Schindel-Solarzellen) und damit höherer Sensitivität für Bifazialeffekte weiterentwickelt, zusätzliche messtechnische Herausforderungen dieser bifazialen Zellkonzepte gelöst und die bestehenden Bifazialmessplätze im Kalibrierlabor (Offline) und im PV-TEC (Inline) entsprechend erweitert werden. Die wissenschaftlich-technischen Arbeitsziele in den einzelnen Arbeitspaketen waren:

- (AP2.1) Optimierung einer Kontaktierung für busbarlose Bifazialzellen, die eine Messung mit simultaner Beleuchtung von beiden Seiten ermöglicht, hinsichtlich Abschattung, Punktbelastung und Zuverlässigkeit bei Feinliniensiebdruk.
- (AP2.1) Qualifizierung dieser Kontaktierung für den Einsatz im Kalibrierlabor und im Inline-Produktionsbetrieb hinsichtlich Messgenauigkeit, Homogenität, Reproduzierbarkeit, Robustheit und Variabilität.
- (AP2.2) Entwicklung und Qualifizierung einer Automatisierungslösung zur Inline-Charakterisierung von Schindel-Solarzellen.
- (AP2.3) Erforschung eines innovativen Hochdurchsatz-Verfahrens zur simultanen Inline-Charakterisierung mehrerer Schindel-Solarzellen im Waferverbund vor Vereinzelung der Zellen u.a. mittels bildgebender Messverfahren, einschließlich der Ableitung von Kriterien zur Aussortierung defektbehafteter Zellen.
- (AP2.4) Entwicklung eines Verfahrens zur Trennung von vorder- und rückseitigen Effekten in bifazialen Zellen unter Ausnutzung der in der Messsequenz durchgeführten I/V -Messung von der Vorder- und Rückseite und der spektralen Empfindlichkeitsmessung von der Vorderseite, um eine verbesserte Prozesskontrolle zu ermöglichen.

- (AP2.5) Qualifizierung eines beschleunigten Verfahrens der „Advanced Hysteresis“-Korrektur zur zuverlässigen und schnellen Vermessung von bifazialen Zellen mit hohen Leerlaufspannungen.
- (AP2.5) Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Bestimmung der Basisdotierung an der Zelle aus verfügbaren Messdaten des *IV*-Testers.
- (AP3.1) Anwendung der bestehenden und hier entwickelten Messtechnik für eine detaillierte Analyse von bifazialen Heterojunction-Solarzellen für die Prozessoptimierung und die Zellsortierung für die Modulverschaltung.
- (AP3.2) Weiterentwicklung eines Klassierverfahrens für bifaziale Zellen zur Bildung bifazialer Modul-Leistungsklassen (am Beispiel Heterojunction) und Demonstration des Mehrertrags auf Modulebene in statistisch relevantem Umfang.

2.2 Projektstruktur / Vorgehensweise

Das Projekt BiZePs-PLUS bestand aus vier Themenblöcken:

- **Messtechnik für busbarlose Zellen:** Unter Mitwirkung des assoziierten Projektpartners h.a.l.m. wurden Kontaktierkonfigurationen für die Solarzellenmessung entwickelt, getestet und erprobt, die eine Vermessung unter bifazialer Beleuchtung ermöglichen und unabhängig vom Metallisierungslayout (insb. für busbarlose Zellen) universell eingesetzt werden können.
- **Messtechnik für Schindenzellen:** Gemeinsam mit den assoziierten Projektpartnern Jonas & Redmann und h.a.l.m. wurde eine Automatisierungslösung entworfen und im Solarzellentester am PVTEC integriert, welche das Handling und die Messung von vereinzelter Schindenzellen vollautomatisiert ermöglicht.
- **Erweiterte IV-Analysetechnik:** Gemeinsam mit dem assoziierten Projektpartner h.a.l.m. wurde die Analyse der IV-Messkurven derartig vorangetrieben, dass bestehende Messgrößen genauer und schneller, sowie neue Messgrößen (u.a. der Basiswiderstand) aus der Messkurve ermittelt werden können. Zudem wurde ein Machine-Learning-basiertes Verfahren entwickelt, welches die Leistung einzelner Schindelsolarzellen aus *IV* und bildgebenden Messungen an der unvereinzelten Gesamtzelle vorhersagt. Dieser Projektteil baute wesentlich auf die Etablierung der neuen Messtechnik der beiden ersten Projektteile auf.
- **Sortierverfahren für bifaziale Zellen:** Gemeinsam mit den assoziierten Partnern HEVEL und h.a.l.m. wurde eine Sortiermethodik auf Basis einer beidseitigen Messung von bifazialen Solarzellen angestrebt, welche eine effizientere und genauere Sortierung von Solarzellen in Leistungsklassen ermöglicht. Hierfür wurde nach Entwicklung eines schädigungsarmen Markierungsprozesses von HEVEL Solar eine große industrielle Solarzellentranché produziert, welche am ISE daraufhin vermessen und analysiert wurde.

2.3 Arbeitsprogramm

Im hier durchgeführten Projekt wurden die im BiZePS-Basisprojekt entwickelten automatisierungs- und messtechnischen sowie algorithmischen Konzepte für Zellen mit höherer Bifazialität weiterentwickelt und zusätzliche messtechnische Herausforderungen gelöst.

Hierzu gliederte sich das Projekt in drei Arbeitspakete, deren inhaltliche Ausrichtung und Unterstruktur in Tabelle 1 dargestellt ist. Die Arbeiten im AP 2 „Inline-Messtechnik und Kalibrierverfahren“ knüpften dabei unmittelbar an die messtechnischen Arbeiten im AP 2 des BiZePS-Vorgängerprojektes an, während die Arbeiten im AP 3 „Sortierverfahren für Modulintegration“ die Arbeiten im ehemaligen AP 5 fortsetzten und erweiterten. Tabelle 1 gibt auch einen groben Überblick, an welchen Unterarbeitspaketen die drei assoziierten Projektpartner aktiv mitgearbeitet haben.

Tabelle 1: Struktur des Arbeitsplans mit Beteiligung der Projektpartner

AP	Beschreibung	Beteiligte Partner
1	Projektleitung	ISE
2	Inline-Messtechnik und Kalibrierverfahren für bifaziale Zellen	
2.1	Kontaktierungen für beidseitig busbarlose Bifazialzellen	ISE, halm, J&R, HEV
2.2	Automatisierung für die Messung von bifazialen Schindelzellen	ISE, J&R
2.3	Analysemethodik für bifaziale Schindelzellen im Wafervverbund	ISE, halm
2.4	Trennung von Vorder-/Rückseiten-Effekten in Bifazialzellen	ISE, halm, HEV
2.5	Korrekturverfahren für IV-Messungen von hochkapazitiven Bifazialzellen	ISE, halm
3	Sortierverfahren für Modulintegration	
3.1	Inline-Analyse hochgradig bifazialer Zellen	ISE, HEV
3.2	Sortiermethodik anhand bifazialer Zellmessungen	ISE, HEV, halm

Die Vorgehensweise ist im Folgenden grob entlang der Arbeitspakete beschrieben. In allen wesentlichen Punkten entsprach der Ablauf der geplanten Vorgehensweise.

AP 1 Projektkoordination

Koordination des Projektes, Kommunikation und Abstimmung mit den Partnern und Organisation der Projekttreffen, Projektberichterstattung und Projektcontrolling sowie Publikation der Ergebnisse und Begleitung der Standardisierung.

Abweichungen: Keine

AP 2 Inline-Messtechnik und Kalibrierverfahren für bifaziale Zellen

In diesem Arbeitspaket wurde der industrielle Zelltester am Fraunhofer ISE um die Funktionalität bifazialer IV-Messungen an busbarlosen bifazialen Solarzellen und bifazialen Schindel-Solarzellen erweitert. Insbesondere die Kontaktiereinheiten für busbarlose bifaziale Solarzellen, die eine beidseitige Beleuchtung der Zellen erlauben, und die Automatisierung für die IV-Messung vereinzelter Schindelsolarzellen wurden entwickelt, evaluiert und optimiert, um ideale Messbedingungen für die Analyse von Solarzellen bzgl. der Optimierung auf bifaziale Eigenschaften als auch für den industriellen Dauerbetrieb zu definieren. Darüber hinaus wurden an einem Labormessplatz vergleichende Untersuchungen durchgeführt, um Fortschritte bei der Etablierung eines neuen Kalibrierstandards für bifaziale busbarlose Zellen und bifaziale Schindelzellen direkt an die Inline-Messungen anzuschließen. Zur inhaltlichen Gliederung unterteilt sich AP2 in mehrere Teilpakete.

AP 2.1 Kontaktierungen für beidseitig busbarlose Bifazialzellen

In diesem AP wurden Kontaktierungslösungen zur Vermessung beidseitig busbarloser Solarzellen qualifiziert, verglichen und hinsichtlich optischer Abschattung, mechanischer Punktbelastung und Vierdrahtmessung optimiert. Zudem wurde eine Qualifizierung dieser Kontaktierung für den Einsatz im Kalibrierlabor und im Inline-Produktionsbetrieb hinsichtlich Messgenauigkeit, Homogenität, Reproduzierbarkeit, Robustheit und Variabilität vorgenommen.

Abweichungen: Keine

AP 2.2 Automatisierung für die Messung von bifazialen Schindelzellen

Bifaziale Schindelsolarzellen bis zum M6-Format können durch die Vollendung dieses Arbeitspakets nach Vereinzelung vollautomatisch im Zelltester des PVTEC charakterisiert und sortiert werden.

Abweichungen: Keine

AP 2.3 Analysemethodik für bifaziale Schindenzellen im Waferverbund

Erforschung eines innovativen Hochdurchsatz-Verfahrens zur simultanen Inline-Charakterisierung mehrerer Schindel-Solarzellen im Waferverbund vor Vereinzelung der Zellen u.a. mittels bildgebender Messverfahren, einschließlich der Ableitung von Kriterien zur Aussortierung defektbehafteter Zellen.

Abweichungen: Keine

AP 2.4 Trennung von Vorder-/Rückseiten-Effekten in Bifazialzellen

Zwei Verfahren zur Trennung, Quantifizierung und Analyse vorder- und rückseitiger Effekte in Bifazialzellen wurden evaluiert.

Abweichungen: Verfahren wurden zunächst separat entwickelt, in der Anwendung auf experimentelle Daten aber auch kombiniert eingesetzt sowie durch weitere geeignete Messgrößen wie der effektiven Lebensdauer ergänzt.

AP 2.5 Korrekturverfahren für IV-Messungen von hochkapazitiven Bifazialzellen

Verfahren zur Hysteresis-Korrektur der IV-Kennlinien bei schneller Messung von hochkapazitiven Solarzellen wurden qualifiziert und weiterentwickelt. Eine Methode zur Bestimmung der Basisdotierung wurde entwickelt.

Abweichungen: Keine

AP 3 Sortierverfahren für Modulintegration

Im BiZePS-Basisprojekt wurde der Nutzen einer maßgeschneiderten Sortiersystematik basierend auf bifazialen Leistungskriterien an aktuellen bifazialen *p*-PERC Industriezellen mit einer beschränkten Bifazialität von <70% in einem simulierten Großexperiment als „Proof-of-Concept“ gezeigt [1] und an einer kleinen Anzahl an Modulen experimentell validiert. In BiZePS-PLUS wurden die Sortierverfahren für bifaziale Solarzellen und bifaziale Module mit deutlich größerer Stückzahl bei einer Bifazialität von etwa 90% weiterentwickelt. Neben der Weiterentwicklung für höhere Bifazialitäten, wurden die Verfahren auch in statistisch relevantem Umfang erprobt, indem Solarzellen in größerer Stückzahl aus einer Produktion entnommen und am ISE einer detaillierten bifazialen Analyse und Sortierung unterzogen wurden und im Anschluss beim Hersteller zu Modulen hätten weiterverarbeitet werden sollen (siehe unten). Hier standen die große Statistik und die BIN-Klassen-Sortierung der Zellen im Vordergrund. Verwendet wurden bifaziale Heterojunction-Zellen und Module aus der Produktion von HEVEL Energy.

AP 3.1 Inline-Analyse hochgradig bifazialer Zellen

Bifaziale Heterojunction-Zellen mit einer Bifazialität von rund 90% wurden in mehreren Zyklen von HEVEL gefertigt und vom Fh-ISE mittels IV-Messung, inline-SR, EL und Druckbildinspektion charakterisiert und hinsichtlich ihrer Verluste analysiert. Der Mehrwert der Zellmessung unter bifazialer Beleuchtung u.a. für die Zellprozessoptimierung wurde untersucht. Ein schadungsarmer Wafermarkierungsprozess wurde entwickelt und seine Integrierbarkeit in den hocheffizienten und sensiblen HJT Solarzellenprozess untersucht.

Abweichungen: Keine

AP 3.2 Sortiermethodik anhand bifazialer Zellmessungen

Zur Steigerung der Modulleistung sollten fortschrittliche Sortierverfahren für hochgradig bifaziale Solarzellen entwickelt werden und experimentell in statistischem Umfang durch den Bau von Modulen mit nach unterschiedlichen Sortierkriterien ausgewählten Solarzellen-Sätzen validiert werden.

Abweichungen: Die Solarzellen wurden in geplantem Umfang und geplanter Güte produziert und analysiert. Aufgrund der wider Erwarten hohen Produktionshomogenität der Solarzellen ergab sich jedoch kein signifikanter Nutzen erweiterter Zellsortierung. Somit konnte kein verbessertes Sortierverfahren entwickelt werden. Zudem verhinderte der Ukraine-Konflikt eine weitere Kooperation mit dem russischen Projektpartner HEVEL, so dass auf die Fertigung und Analyse der PV-Module aus den hergestellten und sortierten Solarzellen verzichtet werden musste, was durch Modulsimulationen kompensiert wurde.

2.4 Zeitplan und Meilensteine

Der mit dem Arbeitsprogramm verbundene Ursprungszeitplan aus dem Antrag ist in Tabelle 2 dargestellt. Das Projekt war ursprünglich für eine Laufzeit von 30 Monaten ausgelegt und wurde um 6 Monate verlängert. Das Projekt wurde damit vom 01.07.20 bis zum 31.12.22 bearbeitet. Eine Übersicht der geplanten Teilziele und Meilensteine einschließlich des Erreichungsgrades zum Projektende findet sich in Tabelle 3. Die resultierenden Anpassungen des Zeitplans ergeben sich aus den Anpassungen der Zeitpunkte für die Meilensteinerreichung in Tabelle 3.

Tabelle 2: (Links) Arbeitsplan mit den verantwortlichen und beteiligten Projektpartnern. (Rechts) Im Antrag geplante zeitliche Abfolge der Arbeitspakete und Unterarbeitspakete (Verschiebungen im Projektverlauf und die Projektverlängerung sind nicht berücksichtigt, ergeben sich aber aus dem an den Projektverlauf angepassten zeitlichen Ablauf der Meilenstein-Erreichung).

AP	Beschreibung	Beteiligte Partner	Projektlaufzeit																							
			M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22	M23	M24
1	Projektleitung	ISE																								
2	Inline-Messtechnik und Kalibrierverfahren für bifaziale Zellen																									
2.1	Kontaktierungen für beidseitig busbarlose Bifazialzellen	ISE, halm, J&R, HEV																								
	- Konzeption neuer Leistungsgeometrien																									
	- Simulation der IV-Parameter in Abhängigkeit von Kontaktierung (insb. FF)																									
	- Qualifikation / Optimierung der Kontaktierungslösung für den Kalibriereinsatz																									
	- Qualifikation / Optimierung der Kontaktierungslösung für den Inlineeinsatz																									
2.2	Automatisierung für die Messung von bifazialen Schindenzellen	ISE, J&R																								
	- Konzeption und Spezifikation																									
	- Konstruktion und Baubegleitung																									
	- Inbetriebnahme, Test und Abnahme																									
	- Qualifizierung																									
2.3	Analysemethodik für bifaziale Schindenzellen im Waferverbund	ISE, halm																								
	- Herst. von Schindenzellen als Referenzproben (mit/ohne eingebrachte Defekte)																									
	- Inline-Charakterisierung der Schindenzellen im Waferverbund																									
	- Inline-Charakterisierung der vereinzelter Schindenzellen (Referenz-Char)																									
	- Entwicklung der Analysemethodik																									
2.4	Trennung von Vorder-/Rückseiten-Effekten in Bifazialzellen	ISE, halm, HEV																								
	- Herstellung / Auswahl von Referenzproben, Referenzcharakterisierung																									
	- Ansatz 1: IV-Messungen (front + rück)																									
	- Ansatz 2: IV-Messungen (front + rück) und SR-Messung (front)																									
2.5	Korrekturverfahren für IV-Messungen von hochkapaz. Bifazialzellen	ISE, halm																								
	- Vergleich der Messplätze und Hysteresekorrekturverfahren																									
	- Weiterentwicklung von Hysteresekorrekturverfahren von halm																									
	- Entwicklung Methode zur Bestimmung der Basisdotierung																									
	- Referenzcharakterisierung offline (auch CalLab)																									
3	Sortierverfahren für Modulintegration																									
3.1	Inline-Analyse hochgradig bifazialer Zellen	ISE, HEV																								
	- Vortest zur Integration einer Wafermarkierung in HJT Solarzellenprozess																									
	- Fertigung von HJT Solarzellen (in mehreren Zyklen)																									
	- Inline-Analyse mittels IV, SR, EL, Druck-Inspektion: Verluste / Verteilungen																									
3.2	Sortiermethodik anhand bifazialer Zellmessungen	ISE, HEV, halm																								
	- Weiterentw. der Bifazial-Sortierkriterien anhand von Simulationsmodellen																									
	- Sortierung der Zellen gem. ertragsoptim. Bifazial-Sortierkriterien (mit Statistik)																									
	- Fertigung der Demonstratormodule mit/ohne Bifazial-Sortierung (mit Statistik)																									
	- Leistungsvermessung der Module (mit Statistik)																									
	- Erweiterung Teststand für Ertragsmessung																									
	- Ertragsmessung an Einzelmodulen (Stichprobe)																									
	- Validierung der Binningstrategie																									

Tabelle 3: Teilzielübersicht des Projektantrags mit Kurzbeschreibung, Arbeitspaketzuordnung, verantwortlichem Partner sowie dem aktuellen Erreichungsgrad (farblich unterlegte Spalte). Aufgeführt sind die Teilziele, die unter der Verantwortung bzw. unter Beteiligung des Fraunhofer ISE bearbeitet werden, sowie einige wichtige Teilziele der Partner im Bereich der Methodenentwicklung, um einen vollständigeren Überblick über den Bearbeitungsstand des Gesamtprojektes zu geben. Bei stufenweise erreichten Teilzielen wurden Abstufungen eingeführt, die in der erweiterten Beschreibung des jeweiligen Teilziels definiert sind.

				Teilziel / Meilenstein												Meilenstein (verzögert)												Meilenstein (Ursprungsplan)												
AP	TZ Nr.	Beschreibung	Ver- antw.	2020				2021				2022				Verlängerung				Erreichter Status																				
				7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						
1		Projektleitung																																						
2		Inline-Messtechnik und Kalibrierverfahren für bifaziale Zellen																																						
2.1		Kontaktierungen für beidseitig busbarlose Bifazialzellen																																						
	TZ 2.1	Kontaktierungen für beidseitig busbarlose Bifazialzellen für den Kalibrier- und Inline-Einsatz konzeptioniert	ISE																													erreicht								
	TZ 2.2	Kontaktierungen für beidseitig busbarlose Bifazialzellen für den Kalibrier- und Inline-Einsatz optimiert	ISE																													erreicht								
2.2		Automatisierung für die Messung von bifazialen Schindelszellen																																						
	TZ 2.3	Automatisierung für Schindelsolarzellen spezifiziert	ISE																													erreicht								
	TZ 2.4	Automatisierung für Schindelsolarzellen fertiggestellt	JR																													erreicht								
	TZ 2.5	Automatisierung für Schindelsolarzellen integriert und einsatzbereit	JR, ISE																													erreicht								
	TZ 2.6	Automatisierung für Schindelsolarzellen evaluiert und optimiert	ISE, JR																													erreicht								
2.3		Analysemethodik für bifaziale Schindelszellen im Waferverbund																																						
	TZ 2.7	Referenzproben mit/ohne gezielt eingebrachte Defekte erstellt und charakterisiert Erweiterung HJB4: Stufe 1: Kleines Experiment mit bifazialen Schindelszellen Stufe 2: Großes Experiment mit monofazialen Schindelszellen	ISE																													erreicht (Stufe 2)								
	TZ 2.8	Analyseverfahren für bifaziale Schindelszellen im Waferverbund entwickelt Erweiterung HJB4: Stufe 1: Erstes Modell auf Basis des kleinen bifazialen Probensatzes Stufe 2: Modell auf Basis des großen monofazialen Probensatzes	ISE																													erreicht (Stufe 2)								
2.4		Trennung von Vorder-/Rückseiten-Effekten in Bifazialzellen																																						
	TZ 2.9	Bifaziale HJT-Solarzellen (mit/ohne Busbars) mit Defekten aus der laufenden Produktion aussortiert und am ISE bereitgestellt inkl. der verfügbaren Informationen zur Defektklassifikation	HEV																													erreicht								
	TZ 2.10	Verfahren zur Trennung von Vorder-/Rückseiten-Effekten in Bifazialzellen basierend auf IV-Messungen entwickelt	ISE																													erreicht								
	TZ 2.11	Verfahren zur Trennung von Vorder-/Rückseiten-Effekten in Bifazialzellen basierend auf IV- und SR-Messungen entwickelt	ISE																													erreicht								
2.5		Korrekturverfahren für IV-Messungen von hochkapazitiven Bifazialzellen																																						
	TZ 2.12	Hysteresekorrekturverfahren weiterentwickelt für Voc > 720 mV und Messzeit 2x10 ms Erweiterung HJB3: - Stufe 1: erreicht für Messzeiten 2x30 ms - Stufe 2: erreicht für Messzeiten 2x10 ms	halm																													erreicht (Stufe 2)								
	TZ 2.13	Verfahren zur Bestimmung der Basisdotierung evaluiert Erweiterung HJB3: - Stufe 1: evaluiert für Zellen mit Voc>700 mV - Stufe 2: evaluiert für Zellen mit Voc<700 mV	halm																													erreicht (Stufe 2)								
3		Sortierverfahren für Modulintegration																																						
3.1		Inline-Analyse hochgradig bifazialer Zellen																																						
	TZ 3.1	Integrierbarkeit einer Wafermarkierung in den SZ-Prozess getestet: 1. Positiv: Anwendung der Markierung auf Produktionswafer 2. Negativ: Anpassung der Binning-Strategie im AP 3.2 Erweiterung HJB1: - Stufe 1: Markierungsprozess entwickelt und am ISE getestet - Stufe 2: Markierungsprozess bei Hevel getestet	ISE, HEV																													erreicht (Stufe 2)								
	TZ 3.2	Hochgradig bifaziale HJT-Solarzellen gefertigt, in Zyklen ausgewählt und für Sortierung übergeben	HEV																													erreicht								
	TZ 3.3	Inline-Analyse abgeschlossen: Verluste und Verteilungen bestimmt	ISE																													erreicht								
3.2		Sortiermethodik anhand bifazialer Zellmessungen																																						
	TZ 3.4	Neue Sortierverfahren entwickelt für höheren Ertrag	ISE																													tw.								
	TZ 3.5	Zellen gemäß neu entwickelten Verfahren sortiert	ISE																													nicht erreichbar								
	TZ 3.6	Fertigung bifazialer Module abgeschlossen	HEV																													nicht erreichbar								
	TZ 3.7	Bifaziale Modulmessungen abgeschlossen	halm																													nicht erreichbar								
	TZ 3.8	Ertragsmessungen gestartet	ISE																													nicht erreichbar								
	TZ 3.9	Sortierkriterien anhand Leistungsmessung validiert	ISE																													nicht erreichbar								
	TZ 3.10	Sortierkriterien anhand Ertragsmessung validiert	ISE																													nicht erreichbar								

2.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

2.5.1 Allgemeine Ausgangslage

Da die weltweite Produktionskapazität für PV-Module zu Projektstart wie auch heute weiterhin kontinuierlich zunimmt und die globale Marktnachfrage von 100 GW [2] auch 2018 überstieg, war trotz des starken Preistrückgangs um über 40% von Anfang 2017 bis Ende 2018 weiterhin von einem starken Kostendruck in allen Teilen der PV-Wertschöpfungskette auszugehen [3]. Andererseits verdeutlichen der durch den Klimawandel wachsende Druck zur Dekarbonisierung der Wirtschaft in allen Sektoren und der Anstieg der Nachfrage in neuen Märkten wie Australien die Notwendigkeit eines weiteren massiven Ausbaus der regenerativen Energieerzeugung als Grundlage für die Umstellung der Sektoren Landwirtschaft, Industrie, Verkehr und Wohnen auf regenerative Energien. Trotz des aktuellen Kostendrucks herrscht daher zumindest mittel- bis langfristig ein hoher Investitionsbedarf, um den wachsenden Bedarf an klimafreundlicher Energieerzeugung in naher Zukunft decken zu können. Um diesen Anforderungen zu begegnen, müssen einerseits durch effizienteren Ressourceneinsatz die Stückkosten weiter gesenkt werden und andererseits die Zelleffizienz und Modulleistung ohne nennenswerten Anstieg der Prozesskosten erhöht werden.

Eine damals vielversprechende (heute vielfach umgesetzte) Möglichkeit, den Ertrag der photovoltaischen Energieerzeugung bei gleichem Ressourceneinsatz signifikant zu erhöhen und damit die spezifischen Stromgestehungskosten zu senken, stellen bifaziale Solarzellen (mit gitterförmiger statt vollflächiger Rückseitenmetallisierung) und bifaziale Module (mit transparenter Modulrückseite) dar, bei denen das Licht beidseitig eingesammelt wird. Entsprechend ging die Internationale Technologie-Roadmap für die Photovoltaik in der zum Zeitpunkt der Antragstellung aktuellen Version ITRPV-2018 davon aus, dass der weltweite Marktanteil bifazialer Zelltechnologien von 7% (2019) auf 30% (2025) ansteigen wird und der echt bifaziale Module von 4% (2019) auf 28% (2025) [3]. Tatsächlich wurden diese Erwartungen bei Weitem übertroffen, da der aktuelle Marktanteil bifazialer Zelltechnologien bereits bei 70% (2023) liegt und in den nächsten 10 Jahren zwischenzeitlich ein Anstieg auf über 90% (2033) erwartet wird [4].

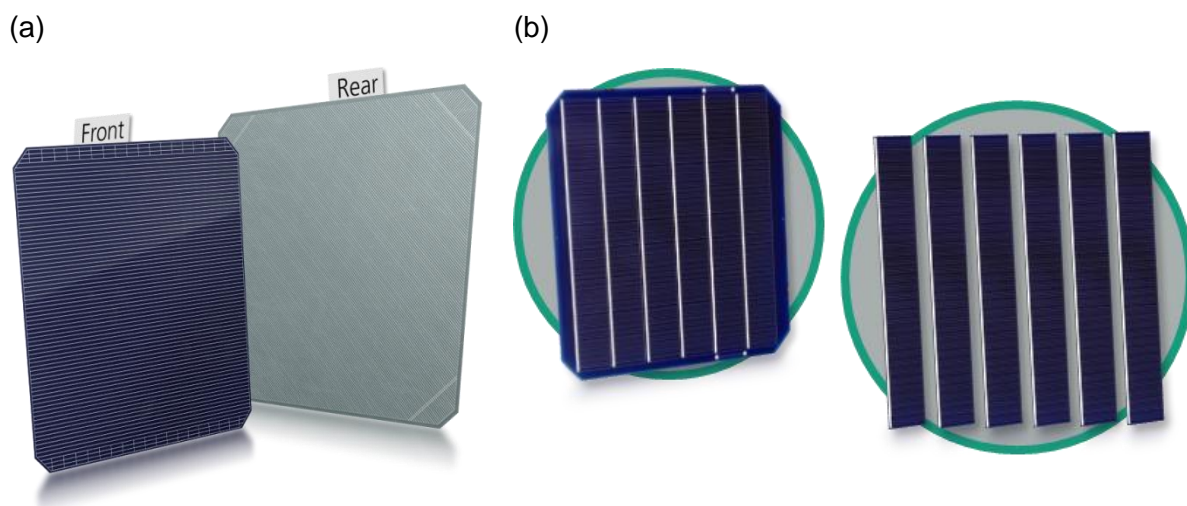


Abbildung 1: (a) Front- und Rückseite der bifazialen, busbarlosen HJT-Zellen von HEVEL (Vorlage von hevelsolar.com, Montage: Fh-ISE). (b) Sechs Schindel-Solarzellen im Waferverbund (links) und nach Vereinzelung (rechts).

Was die Materialstückkosten anlangt, sind – abgesehen vom Silizium selbst – die Silber- und Aluminium-Pasten für die Kontaktstrukturen auf Vorder- und Rückseite die kostspieligsten Materialien in der Silizium-Solarzellenfertigung. Zur Kosteneinsparung und zur Reduktion der Abschattungsverluste werden die Fingerbreiten daher kontinuierlich reduziert und sollten von 37 μm (2019) auf 25 μm (2025) sinken [3]. Um hierbei einen Anstieg der Leitungswiderstände zu vermeiden, muss die effektive Fingerlänge reduziert und daher die Anzahl der Verschaltungselemente je Zelle im Modul erhöht werden. Weitere Silberpaste kann durch Weglassen der Busbars eingespart werden, was auf Modulebene alternative Zellverbindungstechnologien wie die SmartWire [5] oder die Multi-Busbar [6] Verbindungstechnologie erfordert. Da busbarlose Zelltechnologien den geringsten Silberverbrauch erlauben, wurde erwartet, dass ihr weltweiter Marktanteil von 6% (2019) auf 25% (2025) anwächst [3]. Aufgrund der geringen Abschattungsverluste war und ist weiterhin davon auszugehen, dass der überwiegende Teil der busbarlosen Solarzellen auch bifazial sein wird, wie exemplarisch in Abbildung 1a gezeigt.

Um Käufern bifazialer Zellen mit und ohne Busbars und entsprechender Module eine transparente Grundlage und eine faire Wahlmöglichkeit zu geben, wird eine nachvollziehbare, reproduzierbare und genaue Preisgebung benötigt. Entscheidend dafür ist, dass der erwartete Mehrertrag auf Zellebene zuverlässig quantifiziert werden kann. Für den bifazial erweiterten *I/V*-Messstandard der IEC (Aktualisierung der IEC-Norm 60904-3, siehe auch die Technical Specification der IEC Nr. 60904-1-2) wurden hierbei zwei Ansätze diskutiert: (a) die Kompensationsmethode, bei der die Zelle einseitig von vorne mit $1000 + x \text{ W/m}^2$ beleuchtet wird, wobei die Zusatzintensität x gerade der Intensität entspricht, um den bei Rückseitenbeleuchtung mit 200 W/m^2 erzeugten Kurzschlussstrom zusätzlich zu erzeugen und (b) die Simultanmethode, bei der die Zelle simultan mit 1000 W/m^2 von der Vorderseite und 200 W/m^2 von der Rückseite beleuchtet wird. Ein detaillierter Vergleich dieser Ansätze im BiZePS-Basisprojekt zeigte [1], dass die Kompensationsmethode fehlerbehaftet ist, da sie einerseits eine einmalige Annahme für die Bifazialität (= Verhältnis von Rückseiten- zu Vorderseiten-Wirkungsgrad) des Zellkonzepts erfordert und damit blind für prozessbedingte Schwankungen der Bifazialität ist und andererseits bestehende Nichtlinearitäten der *I/V*-Kennlinie eines Zellkonzepts fehlerhaft extrapoliert. Aufgrund der höheren Genauigkeit ist die Simultanmethode vorzuziehen, zumal diese präziseren Daten dann auch für eine echt bifaziale Zellsortierung für die Modulverschaltung genutzt werden können, deren Grundform ebenfalls im BiZePS-Basisprojekt entwickelt wurde [7]. Obwohl beide Messmethoden in die IEC-Norm Einzug hielten, setzte sich die Variante mit Simultanbeleuchtung zu Projektbeginn in der Industrie zur Klassierung bifazialer Solarzellen zunehmend durch. Im BiZePS-PLUS Projekt wurde der im BiZePS-Basisprojekt entwickelten Inline-*I/V*-Messplatz mit simultaner Blitzbeleuchtung und der Offline-*I/V*-Messplatz mit simultaner Konstantbeleuchtung fortlaufend angepasst und umfassend qualifiziert.

2.5.2 Stand Kontaktierung für busbarlose Zellen

Monofaziale und simultan bifaziale Messungen standen durch die Arbeiten im BiZePS Basisprojekt für beidseitig kontaktierte Zellen mit Busbars mit hoher Präzision zur Verfügung. Wie oben bereits erläutert, geht die Entwicklung von Solarzellen und -modulen mit hohen Wirkungsgraden jedoch oft einher mit einer immer feiner werdenden, schwach leitfähigen Fingermetallisierung, die zur Vermeidung elektrischer Verluste bei der Modulverschaltung über eine größere Anzahl von Drähten verbunden werden anstelle der sonst üblichen drei bis sechs Busbars. Die Kontaktierung und Messung monofazialer und vor allem bifazialer Solarzellen ohne Busbarmetallisierung stellte jedoch eine Herausforderung dar. Es bestanden am Fraunhofer ISE bereits Messplätze zur Kontaktierung und Charakterisierung von Solarzellen ohne Busbars sowohl offline im CalLab (ISE-Konstruktion) als auch inline im PVTEC-Zelltester (PASAN-Produkt PCB-Touch [8], siehe Abbildung 2). Diese Kontaktiereinheiten, die zum Zeitpunkt des Projektstarts so oder vergleichbar von der Firma PASAN SA (Meyer Burger Gruppe) vertrieben wurden, greifen den Strom mit einem Drahtgeflecht von der Zellvorderseite ab und drücken die Zelle gleichzeitig auf einen soliden Untergrund, der leicht konvex gewölbt ist, um auf der Solarzellenvorderseite nach Möglichkeit alle Metallisierungsfinger kontaktieren zu können. Mit zunehmendem Metallisierungswiderstand und abnehmender Fingerbreite-/höhe wird

es zunehmend schwieriger busbarlose Solarzellen mit dem bestehenden Drahtaufbau homogen und gut zu kontaktieren und somit Wirkungsgrade verlässlich zu messen. Hinzu kommt, dass eine simultane bifaziale Beleuchtung der Zellen wegen des soliden, intransparenten Untergrunds, über den die Kontaktdrähte gespannt werden müssen, nicht möglich ist. Ferner birgt diese Kontaktierungsgeometrie in der Produktion ein erhöhtes Bruchrisiko durch auf der soliden Unterlage evtl. verbleibende Partikel.

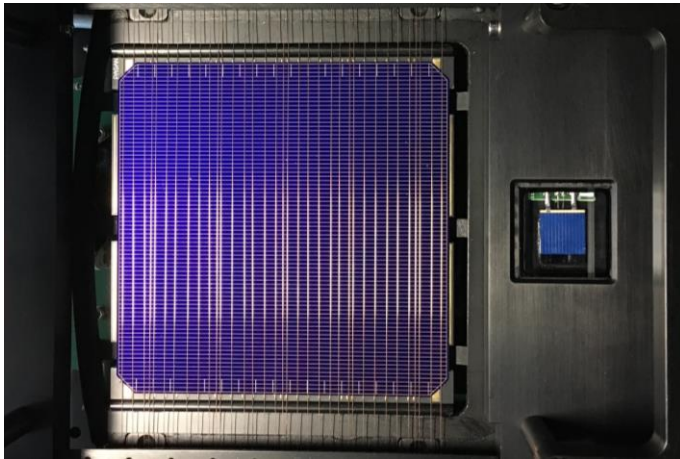


Abbildung 2: Foto der GridTouch-Kontaktiereinheit im PV-TEC Zelltester mit beidseitig busbarloser Solarzelle.

Weitere Kontaktiereinheiten, die nicht auf Drähten, sondern auf Leisten mit Federung basieren, wurden von KOPEL (Kyoshin Electric Co., Japan) [9] und h.a.l.m. elektronik [10] vorgestellt. Diese lassen auch bifaziale Beleuchtung und Messung zu, sind auf Grund ihrer nicht zu vernachlässigenden Breite und der resultierenden Abschattung sinnvoll auf etwa fünf bis sechs Leisten je Seite beschränkt, was je nach Metallisierung zu Artefakten in der CTM-Analyse führen kann.

2.5.3 Stand bifaziale Schindelsolarzellen

Typischerweise wird (Stand 2019) aus jedem Wafer eine Solarzelle im Format 156,75 mm x 156,75 mm gefertigt, inzwischen werden hauptsächlich größere Formate bis 210 mm x 210 mm prozessiert. Im Schindel-Konzept werden aus jedem Wafer mehrere Solarzellen, bspw. sechs etwa im Format 26 mm x 156 mm, durch Zerteilen des Wafers hergestellt, wie in Abbildung 1b gezeigt. Bei der Modulverschaltung werden diese Streifen-Solarzellen übereinander geschindelt, wobei der Sammelbus einer Zelle von der benachbarten Zelle überdeckt wird. Dadurch werden einerseits die Zellen in Reihe verschaltet und andererseits wird der Anteil der aktiven Zellfläche im Modul erhöht. Im Projekt PV-BAT 400 (BMW, FKZ 0324125) arbeitete das Fraunhofer ISE an bifazialen Schindel-Solarzellen und -modulen. Das automatisierte Handling dieser Zellstreifen ist mit diversen Herausforderungen (Zellformat, Bruch, große Stückzahl u.a.) verknüpft. In der Modulfertigung werden teilweise etwa Roboter eingesetzt oder die Zellen erst nach dem Aufbringen des leitfähigen Klebers bereits im Modulfertigungsprozess vereinzelt. Durch die Zerteilung der Wafer und Vereinzelung der Zellen erhöht sich die Stückzahl bspw. um den Faktor 6, wodurch der Durchsatz der Anlagen bzgl. Stückzahl nach Vereinzelung um eben diesen Faktor sinkt, was ein Problem darstellt. Auf Grund dessen wird die Vereinzelung bisher oft erst nach der *IV*-Messung durchgeführt. Für die *IV*-Messung an einzelnen Schindel-Solarzellen oder Halbzellen sind keine entsprechenden, kommerziell erhältlichen Automaten bekannt. Schindelsolarzellen sind 2019 und heute weiterhin weltweit Gegenstand intensiver Forschungen verschiedener Institute und Firmen.

2.5.4 Stand Inline-Messung der Spektralen Empfindlichkeit

Die Messung der Spektralen Empfindlichkeit erlaubt zusätzlich zur reinen I/V -Kennlinienmessung spezifischere Rückschlüsse auf die Eigenschaften verschiedener Solarzellenregionen (beleuchtete Oberfläche, Solarzellenvolumen und unbeleuchtete Oberfläche). Inline ist dieses Verfahren in auf das Essentielle reduzierter Form von h.a.l.m. elektronik GmbH kommerzialisiert und bei Fh-ISE implementiert worden. Dabei wird die Solarzelle mit blauen und infraroten LEDs bestrahlt und der jeweilige Kurzschlussstrom und die Beleuchtungsintensität gemessen. Auch bei bifazialen Solarzellen kann dieses Verfahren angewendet werden. Die bifaziale Beleuchtung dieser Solarzellen bei der oben genannten Simultanmethode bzw. die Möglichkeit, innerhalb eines Messzyklus zusätzlich nur Vorder- und nur Rückseite zu beleuchten, wurde zum Zeitpunkt des Projektstarts noch nicht verwendet, um spezifische Informationen über die genannten, verschiedenen Solarzellenregionen zu extrahieren, bietet aber auf Grund der stark unterschiedlichen Generationsprofile der Minoritätsladungsträger vergleichbares Potential für spezifischere Rückschlüsse.

2.5.5 Stand Hysteresis-Korrektur

Durch steigende Leerlaufspannungen der Solarzellen, insb. bei Heterojunction (HJT) Solarzellen, und höhere Taktraten in der Solarzellenfertigung haben in den vergangenen Jahren transiente Effekte bei der Inline-Charakterisierung große Aufmerksamkeit erlangt. Diese führen zu Hysteresis-Artefakten der I/V -Kennlinien, da die Ladungsträgerlebensdauer nahe der Größenordnung der Messdauern liegen kann. Um transiente Effekte bei der Messung zu vermeiden oder bei der Auswertung zu korrigieren, werden verschiedene Ansätze verfolgt. Einerseits kann die Messdauer durch längere Blitze erhöht werden, was jedoch den Durchsatz der Anlage senkt. Andererseits wurden insbesondere von h.a.l.m. elektronik GmbH Verfahren zur Hysteresis-Korrektur entwickelt, die bei Leerlaufspannungen von 730 mV kurze Messzeiten von 2×25 ms [11] erlauben, Stand 2019 bis zu 2×17 ms. Unklar war, wie die Verfahren für modernste Anforderungen (kürzere Messzeiten $< 2 \times 17$ ms, noch höhere Leerlaufspannungen) zu modifizieren sind. Das Verfahren von h.a.l.m. extrahiert über die Steady-State-Kennlinie hinaus bisher keine weiteren Größen wie die Basisdotierung. Eine Verknüpfung zwischen der Amplitude transienter Effekte und der Basisdotierung [12] sollte es aber möglich machen, diese Größe ebenfalls zu extrahieren.

2.5.6 Stand Sortierverfahren

Um Mismatch-Verluste zu minimieren, werden üblicherweise Solarzellen möglichst ähnlicher Leistungsdaten zu einem Modul verschaltet. Dabei sind bei bifazialen Solarzellen und –modulen aufgrund des beidseitigen Lichteinfangs die Vorder- und Rückseiten der Solarzellen relevant. Im BiZePS Basisprojekt wurden für bifaziale PERC-Solarzellen mit einer Bifazialität von bis zu 70% Sortierverfahren untersucht und entwickelt, die dies berücksichtigen [7]. Dabei hat sich gezeigt, dass bei Sortierung anhand von unter bifazialer Beleuchtung ermittelten Leistungsdaten mehrere scharfe Modulleistungsklassen entstehen, im Falle von monofazialer Beleuchtung dagegen nur eine gemeinsame, unscharfe Modulleistungsklasse. Eine wesentliche Steigerung der mittleren Modulleistung konnte damit nicht erreicht werden. Ob und wie sich das Vorgehen auf bifaziale Solarzellen mit deutlich höherer Bifazialität ($>90\%$) übertragen lässt, war bis dato unklar.

3 Ergebnisse

3.1 AP2 Inline-Messtechnik / Kalibrierverfahren für bifaziale Zellen

3.1.1 AP2.1 Kontaktierungen für beidseitig busbarlose Bifazialzellen

In diesem AP wurden Kontaktierungslösungen zur Vermessung beidseitig busbarloser Solarzellen qualifiziert, verglichen und hinsichtlich optischer Abschattung, mechanischer Punktbelastung und Vierdrahtmessung optimiert.

A. Optimierung der Kontaktierung zur Inline-Messung von busbarlosen Zellen

Zur Projektstart stand bereits ein Satz der neuen h.a.l.m. Kontaktleisten „universal contacting probes“ (ucp) für die Messung von busbarlosen Solarzellen zur Verfügung, so dass mit den Optimierungen sofort begonnen werden konnte. In der ausgelieferten Version waren die Federelemente der Leisten und der am unteren Ende verlötete Kontaktstreifen unbeschichtet (Abbildung 3 links). Um die Leisten in den Zelltester des PV-TEC integrieren zu können, wurden zunächst in der ISE-Werkstatt Halterungen im 3D Druckverfahren hergestellt. Aufgrund des hohen Anpressdrucks, der für eine optimale Kontaktierung benötigt wird, und der eingeschränkten Steifigkeit des U-förmig aufgeführten Kontaktrahmens, wurden Distanzstücke auf der linken Seite des oberen Messrahmens, an der sich die Führungsschienen befinden, angebracht. Im eingefederten Zustand üben die Kontaktleisten somit über die gesamte Länge den gleichen Druck auf die Zelle aus.

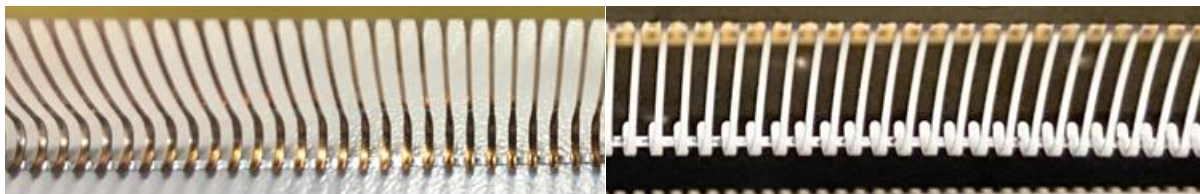


Abbildung 3: ucp-Kontaktleisten von h.a.l.m. (**links**) im Auslieferungszustand (ohne Silberbeschichtung) und (**rechts**) nach Silber-beschichtung.

Nach dem Einbau der Leisten wurde durch eine Höhenvariation der Kontaktrahmen die optimale (vertikale) Kontaktposition ermittelt und damit der optimale Anpressdruck. Die Werte der Einfederung beziehen sich auf die zelltesterinternen Positionen des rückseitigen Kontaktrahmens. Durch stärkeres Einfedern sinkt die Kurzschlussstromdichte J_{SC} der verwendeten Testzelle, da sich die Federelemente seitlich wegbiegen und die Zelle vermehrt verschatten. Bei Position 0,9 mm kommt es zu einem seitlichen Verrutschen der Zelle im Nestrahmen und der oberen Federelemente, was zu einem sprunghaften Absinken des J_{SC} führt. Der Füllfaktor steigt weiter, was darauf hindeutet, dass für einen optimalen Kontakt zur Zelle ein höherer Anpressdruck erforderlich wäre. Da ein Verrutschen der Zellen ausgeschlossen werden muss, wurde die Kontaktposition für die weiteren Versuche auf 0,8 mm festgelegt.

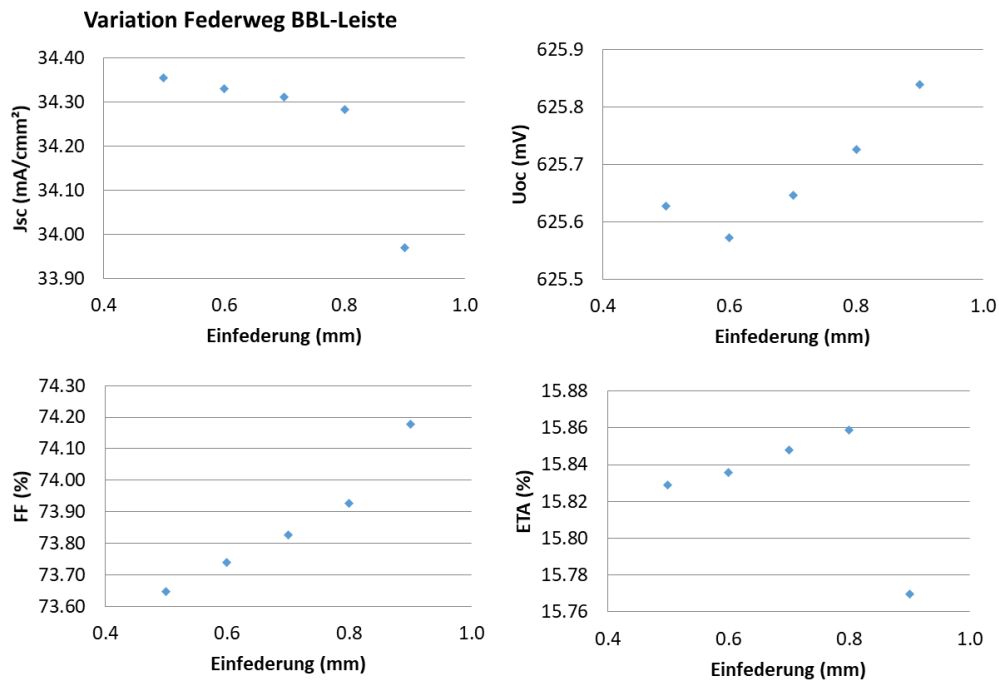


Abbildung 4: Variation des Kontaktposition im PV-TEC Zelltester im Auslieferungszustand der Leisten und deren Einfluss auf die gemessenen Leistungsparameter der Zelle. Die Kontaktierungsposition wurde auf 0,8 mm festgelegt.

Die Ermittlung der Wiederholgenauigkeit der wichtigsten Hellkennlinienparameter bei Rekontaktierung der Zellen wurde mit einer Gruppe von 10 busbarlosen Heterojunction (HJT) Solarzellen durchgeführt, die jeweils sieben Mal durch den Zelltester gefahren wurden. Aufgrund der Erfahrungen von h.a.l.m., die auf eine deutlich verlängerte Haltbarkeit der Kontaktleisten nach Versilbern hinweisen, wurden die vorhandenen Leisten am ISE ebenfalls versilbert. Da das Silber im Galvanikprozess auf den unteren Verbindungsschienen nicht haften blieb, wurde zunächst eine Nickelschicht abgeschieden und im zweiten Schritt das Silber. Die versilberten Leisten sind in Abbildung 3 rechts dargestellt.

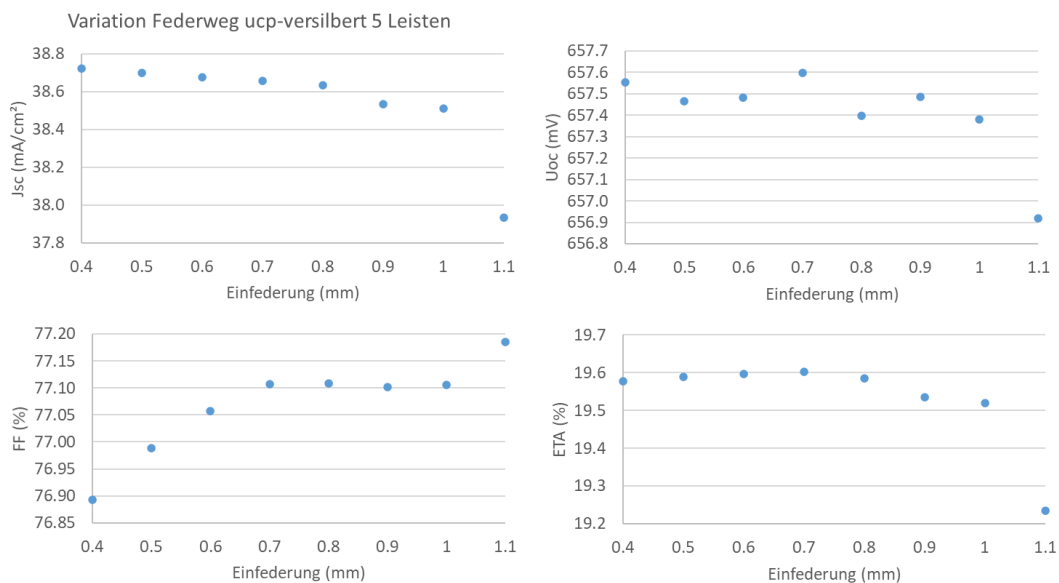


Abbildung 5: Variation des Kontaktposition im PV-TEC Zelltester nach Versilbern der Leisten und deren Einfluss auf die gemessenen Leistungsparameter der Zelle. Die Kontaktierungsposition wurde ebenfalls auf 0,8 mm festgelegt.

Die mit den versilberten Leisten durchgeführte Höhenvariation zeigt, anders als im Ausgangszustand, ab 0,7 mm Einfederung einen konstanten Füllfaktor (Abbildung 5). Das seitliche Wegrutschen der Leisten tritt etwas später bei 1,1 mm Einfederung auf. Dies ist auf die Reduzierung der verwendeten Kontaktleistenanzahl von sechs auf fünf Leisten zurückzuführen. Durch die Versilberung und die Reduktion der Kontaktleistenanzahl konnte somit der Arbeitsbereich vergrößert werden.

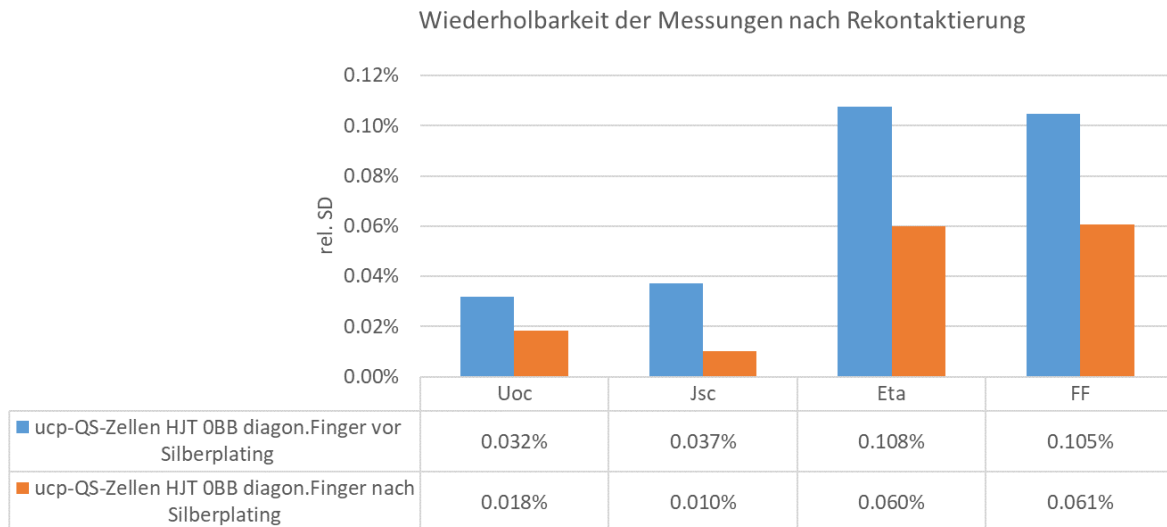


Abbildung 6: Die Wiederholbarkeit aller Hellkennlinienparameter verbessert sich deutlich nach Versilberung der Kontaktleisten, sichtbar in der Verringerung der Standardabweichung (SD) bei den orangenen Säulen.

Dies wirkt sich auch positiv auf die Messunsicherheiten aus, die mit denselben Zellen, die auch im Ausgangszustand verwendet wurden, ermittelt wurde (Abbildung 6). Die Messunsicherheit des Füllfaktors, der wesentlich zur Messunsicherheit des Wirkungsgrads beiträgt und stark von der Kontaktqualität abhängt, konnte durch die durchgeführten Maßnahmen um ca. 40% verbessert werden. Die Unsicherheiten bei der J_{SC} Bestimmung konnten sogar um das 3,7-fache verringert werden. Diese spricht für den weiteren Einsatz von fünf Messleisten, bei dem die Zellen durch den verringerten Druck weniger verrutschen.

Um die Wiederholbarkeit der Messergebnisse für die ucp-Kontaktierung besser einordnen zu können, wurde die Wiederholbarkeit für die gängigsten Solarzelltypen mit den am Zelltester verfügbaren Kontakteinheiten ermittelt (Abbildung 7). Jeder Zelltyp wurde sieben Mal durch den Zelltester gefahren und dabei je fünfmal gemessen. Verglichen mit den anderen Kontakteinheiten schneidet ucp bezüglich Wiederholbarkeit der Messungen am besten ab. Die relative Standardabweichung („rel. SD“) ist bei allen Zelltypen nur etwa halb so groß wie bei der Grid-Touch-Einheit, bei der 30 Kupferdrähte zur Kontaktierung der Zellen verwendet werden. Eine gefederte Aufhängung würde zu keiner wesentlichen Verbesserung der Messunsicherheit führen, da diese durch die verwendete Messelektronik limitiert ist (Abbildung 8).

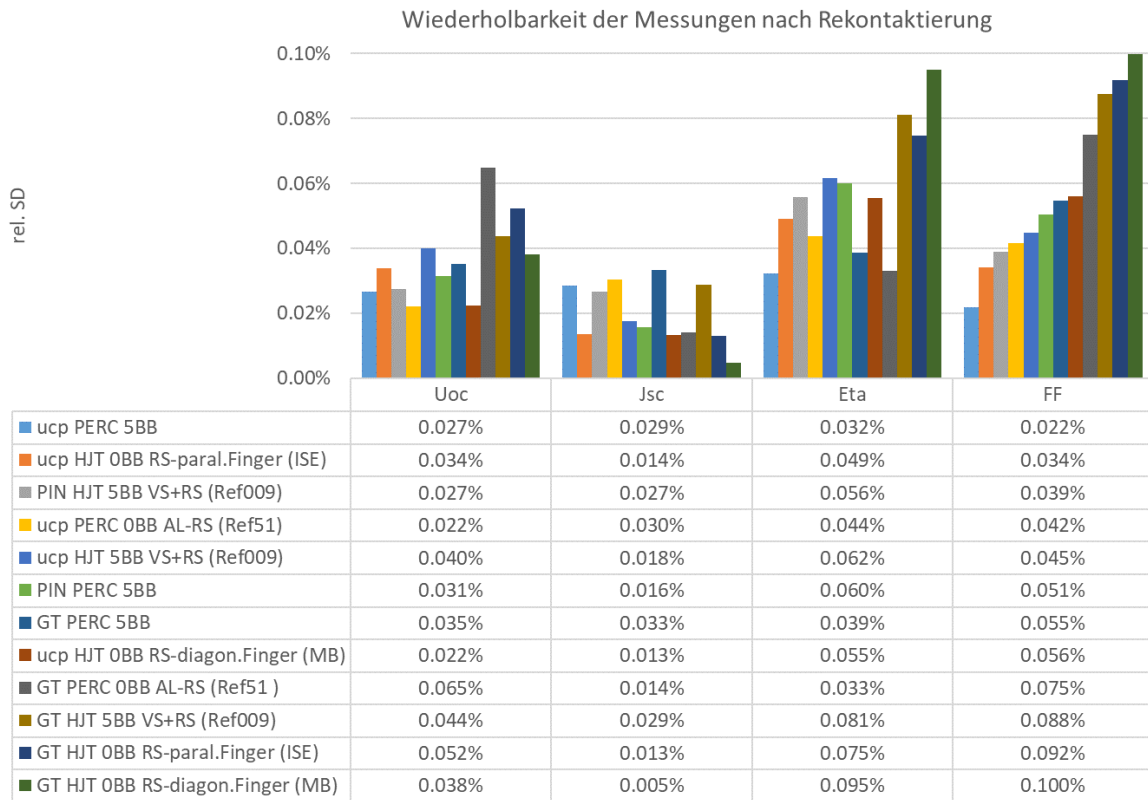


Abbildung 7: Die Wiederholbarkeit bei Rekontaktierung verschiedener Zelltypen gemessen mit den vorhandenen Kontaktierungen am PV-TEC Zelltester, aufsteigend sortiert nach Füllfaktor (FF). Untersuchte Kontakteinheiten: **ucp**: h.a.l.m. universal contact probes, **PIN**: klassische Kontaktleiste mit Federkontaktstiften, **GT**: GridTouch Kontaktierung mit 30 Kontaktdrähten. Untersuchte Zelltypen: **PERC-1** (5 Busbars VS/RS), **PERC-2** (0 Busbars VS, flächiger Alu-RS Kontakt), **HJT-1** (5 Busbars VS/RS), **HJT-2** (0 Busbars VS/RS, RS-Finger parallel zu VS-Fingern), **HJT-3** (0 Busbars VS/RS, RS-Finger diagonal zu VS-Fingern). Während die ucp und GT Kontaktierung an allen 5 Zelltypen getestet wurden, kam die PIN Kontaktierung nur an beiden Zelltypen mit Busbars (PERC-1 und HJT-1) zum Einsatz.

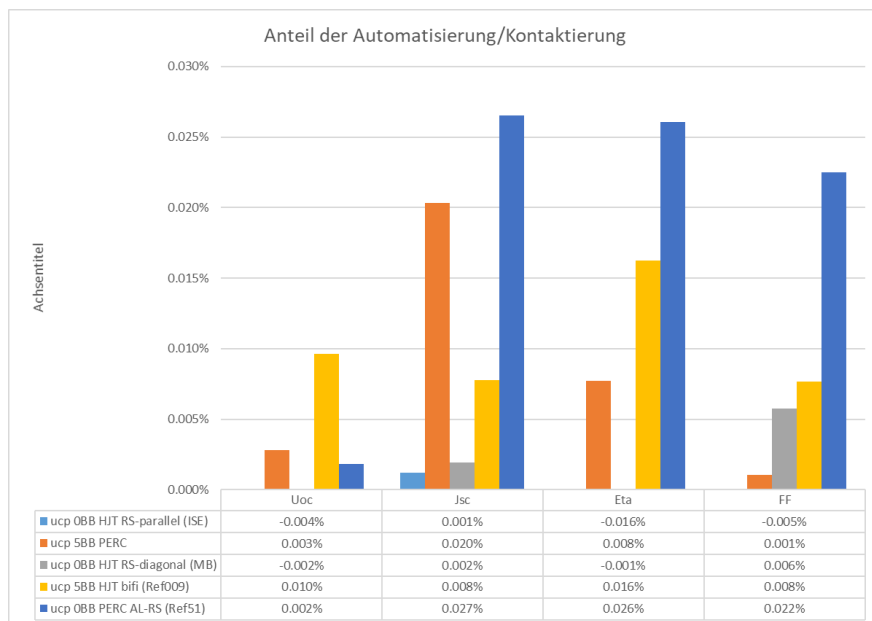


Abbildung 8: Die Anteile der Automatisierung (Ausrichtung der Zellen) und Kontaktierung wurde für die ucp Kontaktierung berechnet, indem die Messunsicherheit der Messung ohne Rekontaktierung von der Messunsicherheit mit Rekontaktierung abgezogen wurde. Untersuchte Zelltypen wie in Abbildung 7.

B. Optimierung der Kontaktierung zur kalibrierten Messung von busbarlosen Zellen

Zur Qualifizierung der von h.a.l.m. entwickelten Kontaktierungslösung auf dem kalibrierten manuellen Messplatz wurden die I-V-Kennlinien busbarloser Solarzellen mit unterschiedlichen Vorderseiten-Gridwiderständen gemessen. Zusätzlich wurden mit dem GridTouch-System Vergleichsmessungen durchgeführt. Die Messdaten sind in Abbildung 9 dargestellt.

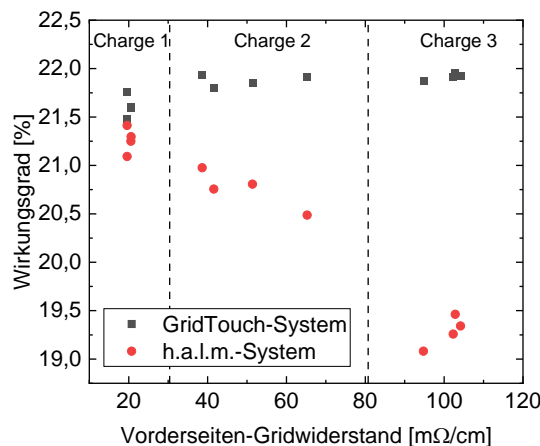


Abbildung 9: Wirkungsgrad busbarloser Solarzellen gemessen mit dem GridTouch- und dem h.a.l.m.-System als Funktion des Vorderseiten-Gridwiderstands. Da die Solarzellen dieses Versuchs aus unterschiedlichen Produktionschargen mit geringfügig unterschiedlichen Prozessparametern stammen, lassen sich die Messwerte zwischen den Chargen nicht direkt vergleichen. Der Vergleich der Messsysteme innerhalb einer Charge ist dagegen möglich und aufschlussreich.

Es ist klar ersichtlich, dass unterschiedliche Wirkungsgrade mit den beiden Systemen gemessen werden. Während der Unterschied für kleine Gridwiderstände gering ist, steigt er mit zunehmendem Gridwiderstand stark an.

Zur Klärung dieses Unterschieds wurden Simulationen der Strom- und Spannungsverteilung entlang der Gridfinger mithilfe eines Modells aus durch Widerstände verknüpften Dioden durchgeführt. Damit konnte gezeigt werden, dass im Wesentlichen die unterschiedliche Anzahl an Stromkontakten (30 Kontakte für das GridTouch- und 5 Kontakte für das h.a.l.m.-System) zum Wirkungsgradunterschied geführt hat. Während damit für das GridTouch-System der Serienwiderstand des Vorderseitengrids kaum zur Messung beiträgt, geht dieser Serienwiderstand in die Messung mit dem h.a.l.m.-System ein und korreliert mit dem Gridwiderstand, siehe Abbildung 10 (a). Weitere, allerdings deutlich geringere Effekte ergeben sich durch die Position des Spannungskontakts, der beim GridTouch-System zwischen zwei Stromkontakten angeordnet ist.

Zur weiteren Bewertung dieses Messunterschieds wurden Zelle-zu-Modul (englisch: cell-to-module (CTM))-Verlustrechnungen durchgeführt. Der CTM-Faktor gibt an, welchen Prozentsatz der ursprünglich gemessenen Zelleistung die Zellen nach der Modulverschaltung erbringen. Für das h.a.l.m.-System wurde dafür angenommen, dass die Zahl der Stromkontakte für die Zellmessung an die Kontaktanzahl der Modulverschaltung angepasst wird. Für das GridTouch-System wurden 30 Stromkontakte angenommen.

Abbildung 10 (b) zeigt die simulierten CTM-Faktoren. Es ist ersichtlich, dass die CTM-Faktoren des GridTouch-Systems signifikant von der Anzahl der Stromkontakte im Modul und vom Gridwiderstand abhängen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass der Serienwiderstand des Grids zwar nicht in die Zellmessung eingeht, die Modulleistung aber sehr wohl beeinflusst. Die CTM-Faktoren des h.a.l.m.-Systems dagegen hängen nur unwesentlich von der Anzahl der Stromkontakte und nicht vom Gridwiderstand ab, da dieser sowohl die Zellmessung als auch die Modulleistung beeinflusst.

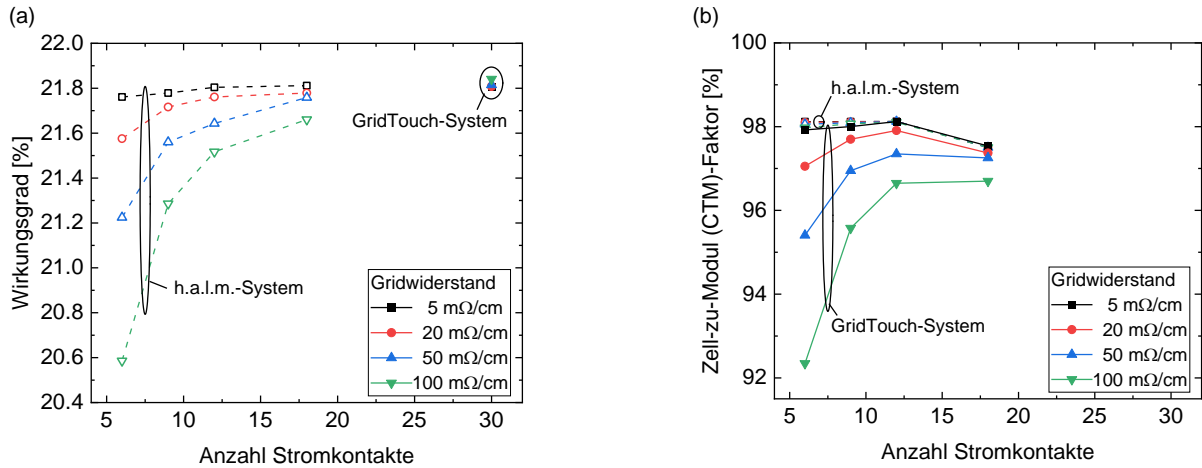


Abbildung 10: (a) Simulierter Wirkungsgrad der Zellmessung und (b) simulierter Zell-zu-Modul (englisch: cell-to-module (CTM))-Faktor als Funktion der Anzahl der Stromkontakte für unterschiedliche Vorderseitengridwiderstände. Geschlossene Symbole beschreiben das GridTouch-System, offene Symbole das h.a.l.m.-System.

Während Zellmessungen mit dem GridTouch-System folglich höchste Wirkungsgrade unter idealisierten Bedingungen ergeben, aber nur wenig Rückschlüsse auf die spätere Modulperformance zulassen, bilden Messungen mit dem h.a.l.m.-System realistische Bedingungen ab, die eine direktere Bewertung der Modulleistung ermöglichen. Das h.a.l.m.-Kontaktsystem bildet somit eine gute Basis zur Entwicklung von Sortierverfahren in AP 0. Alternativ wird im Folgenden ein Verfahren zur Umrechnung der IV-Messergebnisse auf beliebige Kontaktsysteme abgeleitet.

C. Verfahren zur quantitativen Bewertung von Kontaktierungen zur Messung busbar loser Zellen

Das h.a.l.m.-Kontaktleistensystem wird für busbarlose Solarzellen aktuell mit fünf Kontaktleisten eingesetzt. Als weiteres Messsystem steht das drahtbasierte GridTouch-System zur Verfügung, das über 30 Stromdrähte verfügt. Da sich durch die unterschiedliche Anzahl an Stromkontakten der Beitrag des Gridwiderstands zum Serienwiderstand der Solarzelle und damit der gemessene Füllfaktor ändert, war ein direkter Vergleich der beiden Messsysteme bisher nicht für alle Solarzellengrößen möglich.

Teil 1: Analytische Zusammenhänge

Um auch Füllfaktoren und damit Wirkungsgrade quantitativ vergleichen zu können, wurde deshalb ein analytischer Zusammenhang zwischen dem Füllfaktorunterschied zwischen zwei Messsystemen mit unterschiedlichen Kontaktanzahlen hergeleitet (eine ausführlichere Herleitung und Diskussion der Ergebnisse findet sich in der im Rahmen des Projekts entstandenen Publikation [13]):

$$\Delta FF = \frac{1}{12} \cdot \frac{I_{mpp}^2}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \cdot R_{grid} \cdot A_z^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{N_{cont,1}^2} - \frac{1}{N_{cont,2}^2} \right).$$

$N_{cont,1}$ und $N_{cont,2}$ beziehen sich hierbei auf die Kontaktanzahl der beiden zu vergleichenden Systeme, I_{mpp} und I_{sc} auf die Ströme am Punkt maximaler Leistung (MPP) beziehungsweise im Kurzschluss und V_{oc} auf die Spannung bei offenen Klemmen. A_z beschreibt die Zellfläche und R_{grid} den Gridwiderstand in Ω/cm . Es wird in der Herleitung angenommen, dass der Serienwiderstandsbeitrag des Gridwiderstands klein genug ist, sich nur auf die Spannung V_{mpp} am MPP und nicht auf I_{mpp} auszuwirken. Darüber hinaus wird angenommen, dass es keine Inhomogenitäten im Fingerwiderstand beispielsweise wegen Fingerunterbrechungen gibt und das Zellformat als vollquadratisch genähert.

Aufgrund der Breite der h.a.l.m.-Kontaktleisten von mehreren Millimetern, ist ein signifikanter Bereich der Solarzellenoberfläche abgeschattet. Bei der Kalibrierung des Messsystems mit einer Referenzzelle wird deswegen die Bestrahlungsstärke im beleuchteten Bereich erhöht, um die abgeschatteten Bereiche zu kompensieren. Dies führt dazu, dass der Strom der Solarzelle weiter abseits der Stromkontakte generiert wird und sich der kumulierte Stromfluss in den Gridfingern verändert, was den Serienwiderstand des Fingergrids erhöht. Um diesen Einfluss zu quantifizieren, wurde für den Serienwiderstand $R_{s,a}$ unter Abschattung ein analytischer Ausdruck hergeleitet (Details in [13]):

$$R_{s,a} = R_s \cdot \left(1 + \frac{2a \cdot N_{\text{cont}}}{A_z^{1/2}} \right).$$

Hierbei bezeichnet R_s den nicht-abgeschatteten Serienwiderstand, N_{cont} die Anzahl der Stromkontakte und a die Breite des abgeschatteten Bereichs.

Mithilfe der beiden analytischen Ausdrücke für den Einfluss der Kontaktleistenanzahl und -abschattung konnte ein Zusammenhang hergeleitet werden, mit der Messungen mit dem h.a.l.m.-System (Kontaktanzahl $N_{\text{cont},1}$ und Abschattungsbreite a_1) auf das drahtbasierte System (Kontaktanzahl $N_{\text{cont},2}$ und Abschattungsbreite a_2) umgerechnet werden können (Details in [13]):

$$\Delta FF = \frac{1}{12} \cdot \frac{I_{\text{mpp}}^2}{I_{\text{sc}} \cdot V_{\text{oc}}} \cdot R_{\text{grid}} \cdot A_z^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{N_{\text{cont},1}^2} \left(1 + \frac{2a_1 \cdot N_{\text{cont},1}}{A_z^{1/2}} \right) - \frac{1}{N_{\text{cont},2}^2} \left(1 + \frac{2a_2 \cdot N_{\text{cont},2}}{A_z^{1/2}} \right) \right).$$

Hierdurch lässt sich die Vergleichbarkeit des h.a.l.m.-Messsystems mit dem drahtbasierten GridTouch-System deutlich verbessern. Eine ausführlichere Herleitung der obigen Zusammenhänge und eine detailliertere Diskussion der Ergebnisse findet sich in der im Rahmen des Projekts entstandenen Publikation [13].

Teil 2: Bestimmung der Leistenabschattung

Voraussetzung für eine korrekte Umrechnung des Füllfaktors ist die Kenntnis der effektiven Abschattungsbreite a der verwendeten Leisten. Diese wurde in einem Versuch bestimmt, bei dem der Kurzschlussstrom einer Zelle zunächst unverschattet gemessen wurde. Der Stromabgriff erfolgte bei allen Messungen an Lötbandchen, die über den Rand der Zelle herausragten. Im Anschluss wurden die Zellen mit unterschiedlichen Kontaktierungen vermessen, die sich in der Anzahl und Form der Leisten unterschieden. Unter der Annahme, dass der Kurzschlussstrom proportional mit der abgeschatteten Fläche sinkt, wurde die effektive Abschattungsbreite berechnet. Die mit Abstand geringste Abschattung erzeugt mit 0,2 mm ein Draht der Grid Touch Kontaktierung. Alle 35 Drähte haben in etwa die gleiche Abschattung wie eine Kontaktierung mit 2 Leisten, die mit Pins bestückt sind. Bei den baugleichen Leisten „PIN Double“ (bestückt mit Paaren von Strom- (I) und Spannungs- (V) Pins) ist eine geringfügige Abnahme der effektiven Abschattungsbreite pro Leiste bei steigender Anzahl an parallelen Leisten zu erkennen, die auf eine verlustfreiere Messung des Kurzschlussstroms bei höherer Leistenanzahl zurückzuführen ist. Mit 3,5 mm effektiver Abschattungsbreite liegen die „PIN Triple“ Leisten (bestückt mit Tripeln aus I-V-I Pins) geringfügig unter den „PIN Double“ Leisten aufgrund einer getaperten Struktur. Die ucp-Leiste schattet mit 5,1 mm die Zelle am stärksten ab.

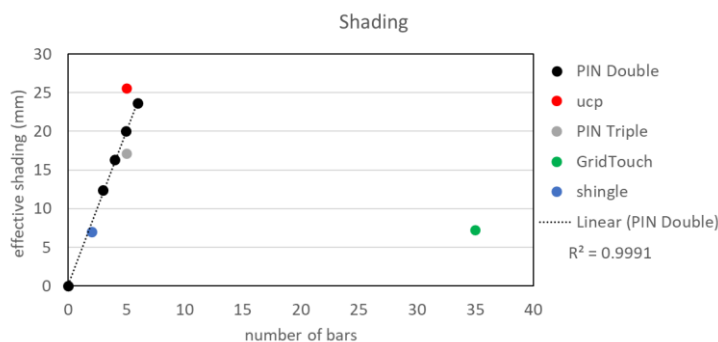


Abbildung 11: Effektive Abschattungsbreiten der gesamten Kontakteinheit (oben) und die der einzelnen Leisten (unten) für die im PV-TEC Zelltester häufig verwendeten Kontaktierungen.

Teil 3: Untersuchung des Abschattungseffekts mittels numerischer Simulation

Wie im vorigen Abschnitt erwähnt, führt die lokale Abschattung durch eine Leistenkontaktierung zu Abweichungen in der IV-Messung im Vergleich zur gewünschten abschattungsfreien IV-Kurve. Der Einfluss auf I_{sc} kann gut durch eine kalibrierte Anpassung der Bestrahlungsstärke kompensiert werden, was auch zu einer genauen V_{oc} Messung führt. Schwieriger ist die Bestimmung des Füllfaktors FF , welcher wie oben erläutert niedriger ist. Die hergeleitete analytische Formel zur Korrektur des Serienwiderstandes und des FF beinhaltet dabei einige idealisierte Annahmen der physikalischen Effekte.

Um die Gültigkeit der analytischen Formel zu testen, wurden numerische Simulationen mit Quokka3 durchgeführt. Hierzu wurde ein dediziertes Experiment nachsimuliert, bei dem die Abschattung durch Hinzunahme von Abschattungsstreifen neben den Kontaktleisten variiert wurden, für 2 Solarzellen mit relativ niedrigem und relativ hohem Gridwiderstand.

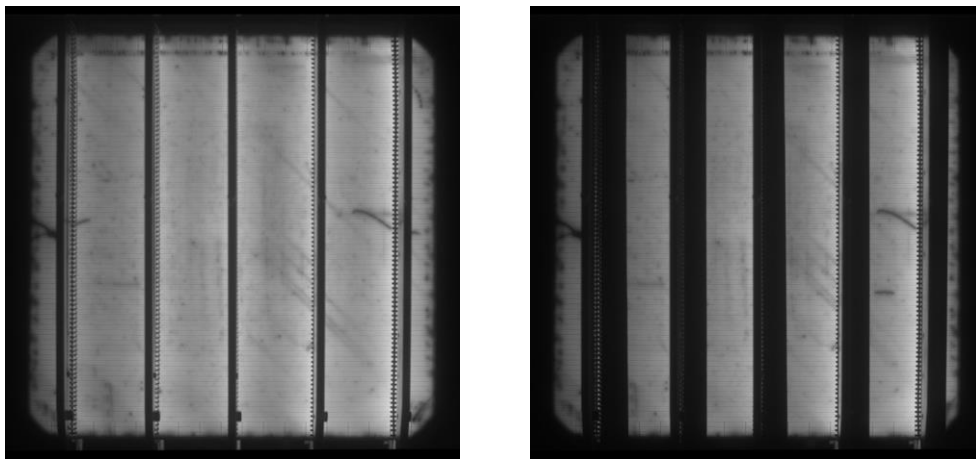


Abbildung 12: EL-Bild von Zelle C01 kontaktiert mit (*links*) ucp-Leisten und (*rechts*) zusätzlich aufgelegten 10 mm breiten schwarzen Streifen.

Zunächst wurde das numerische Modell der untersuchten Zellen an die Messung mit dem GridTouch System kalibriert, bei welchem angenommen wird, dass der Gridwiderstand und Abschattungseffekte eine vernachlässigbare Rolle spielen, so dass diese Messung als Referenzmessung genutzt werden kann. Anschließend wurden in der Simulation die lokale Kontaktierung und Abschattung durch die Leisten abgebildet, wobei auch die Asymmetrie der Abschattung wie im Experiment berücksichtigt wurde, siehe (Abbildung 12). Der Widerstand der Finger wurde in der Simulation jeweils so eingestellt, dass der Gridwiderstand der GridRes-Messung für beide Zelltypen entspricht.

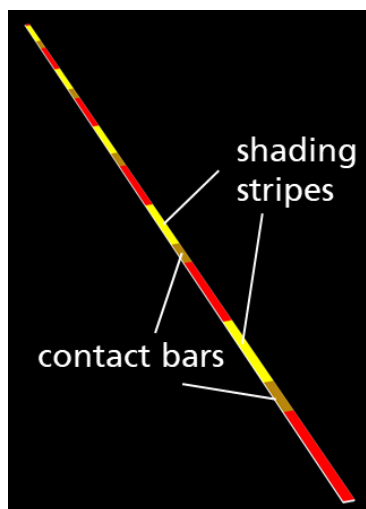


Abbildung 13: Übersicht der 3D Simulationsdomäne in Quokka3, welche die gesamte Zellbreite und einen Fingerpitch umfasst (rot = nicht abgeschattete Zellfläche, kupfer = Kontaktleisten, gelb = Abschattungsstreifen). Nicht zu sehen aufgrund der Größenunterschiede sind die schmalen Finger entlang der langen Kante.

Der Vergleich zwischen Simulation und Experiment sowie der analytischen Formel sind in Abbildung 14 zusammengefasst, wo der FF-Unterschied zur GridTouch-Messung als Referenz dargestellt ist. Man erkennt, dass die Simulation das Experiment innerhalb der vermuteten Ungenauigkeiten gut beschreibt, was zeigt, dass die wesentlichen Effekte bei der abgeschatteten Messung in der Simulation korrekt enthalten sind. Die analytische Formel passt für die Zelle mit geringem Grid-Widerstand ebenfalls sehr gut, für die Zelle mit hohem Grid-Widerstand sind jedoch Abweichungen erkennbar.

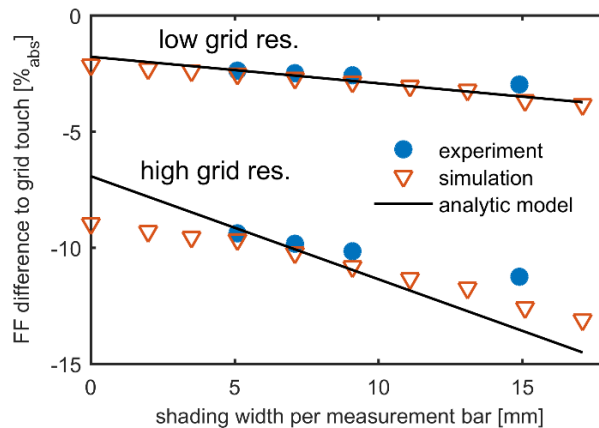


Abbildung 14: FF Unterschied zwischen Messung mit GridTouch und mit Kontaktleisten für eine Zelle mit niedrigem und hohem Grid Widerstand; Vergleich von Experiment, Simulation und der analytischen Formel aus dem vorherigen Abschnitt („Teil 1“).

Es wurden daraufhin auch weitere Simulationen mit anderen Zelldesigns (PERC) und Variation einiger relevanter Eigenschaften durchgeführt und im Detail analysiert. Es stellte sich heraus, dass die analytische Formel auf der einen Seite zwar sehr genau den Effekt des geänderten Serienwiderstands der Finger beschreibt, auf der anderen Seite können jedoch weitere durch die Abschattung verursachten Effekte den FF ebenfalls signifikant beeinflussen, was die Genauigkeit der analytischen Korrektur stark reduzieren kann. In der Regel scheint die analytische Formel eine nützliche Korrektur zu bieten, so auch im obigen Fall, was jedoch für jedes Zelldesign zunächst verifiziert werden sollte. Anhand der detaillierten Simulationsergebnisse konnte keine verbesserte allgemein anwendbare Korrektur abgeleitet werden. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass der FF-Verlust linear von der Abschattungsbreite abhängt, was eine empirische Korrektur durch Variation der Abschattung prinzipiell möglich macht.

D. Vergleichsmessungen GridTouch und ucp: FF-Korrektur und überlagerte Effekte

Ein Vergleich der ucp-Kontaktierung (5 Leisten) mit der GridTouch-Kontaktierung (30 Drähte) erfolgte zunächst bei einer Solarzellencharge mit 225 Solarzellen, bei der die Anzahl der Finger und damit auch der Gridwiderstand systematisch variiert wurde. Der mittlere Grid-Widerstand zwischen den Kontaktleisten wurde während der Kontaktierung mittels ucp bestimmt. Erwartungsgemäß steigt die Differenz der gemessenen Füllfaktoren mit steigendem Gridwiderstand (Abbildung 6). Wird die Umrechnung des ucp-FF auf den GridTouch-Wert unter Nichtberücksichtigung der Verschattung durch die Kontaktleisten (grau) durchgeführt, sind bei höheren Gridwiderständen noch Abweichungen > 1%(rel.) vorhanden. Durch die Berücksichtigung der Verschattung liegen die Abweichungen über den gesamten Gridwiderstandsbereich unter 0,5%.

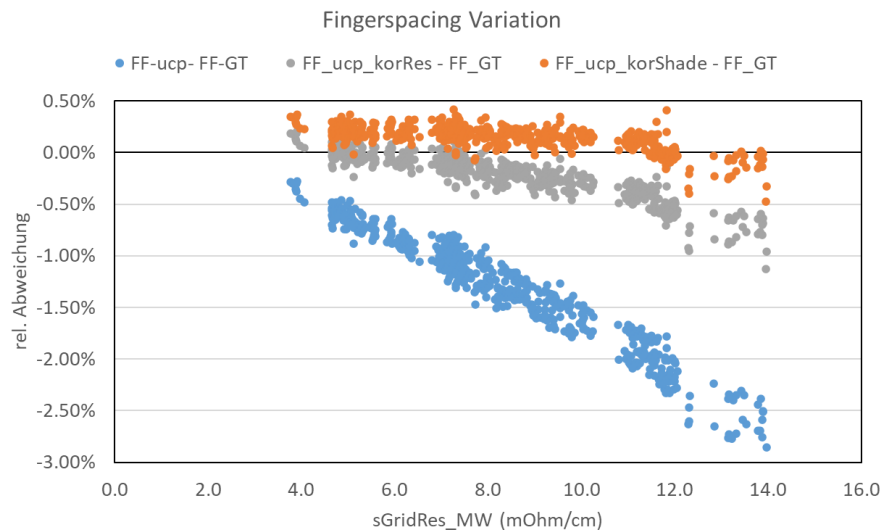


Abbildung 15: Relative Abweichungen des mit den ucp-Leisten gemessenen Füllfaktors FF vom mit der GridTouch-Einheit gemessenen Füllfaktor. (Blau) ucp Messung, (grau) ucp-Messung mit Widerstandskorrektur, (orange) ucp-Messung mit Widerstands- und Verschattungskorrektur.

Ein weiterer Vergleich ist an einer HJT-Solarzellencharge durchgeführt worden, bei der die Fingerbreiten variiert wurden durch eine Variation der Sieböffnungen im Siebdruck zwischen 21 und 50 μm . Zusätzlich wurden bei einigen Prozessgruppen die Finger doppelt gedruckt, was in dieser Charge im Vergleich zur weiter oben beschriebenen Charge zu einer deutlich größeren Variation des Gridwiderstands führte (Abbildung 16). Der sinkende FF bei steigenden Gridwiderständen bei Messungen mit den ucp-Leisten ist auch in dieser Charge zu beobachten (blau). Nach Umrechnung der ucp-Füllfaktoren unter Berücksichtigung der Gridwiderstände und Verschattung (grau) stimmen diese bis zu einem sGridRes von 35 mOhm/cm sehr gut mit den mit der GridTouch-Einheit gemessenen Füllfaktoren (orange) überein. Bei höheren Gridwiderständen steigt der Unterschied zwischen den korrigierten ucp-Werten und den GridTouch-Werten auf ca. 4% (abs.). Die Ursache hierfür sind die auf den Solarzellen entstandenen Fingerunterbrechungen (Abbildung 17), die bei der Umrechnung der ucp-Werte nicht berücksichtigt werden.

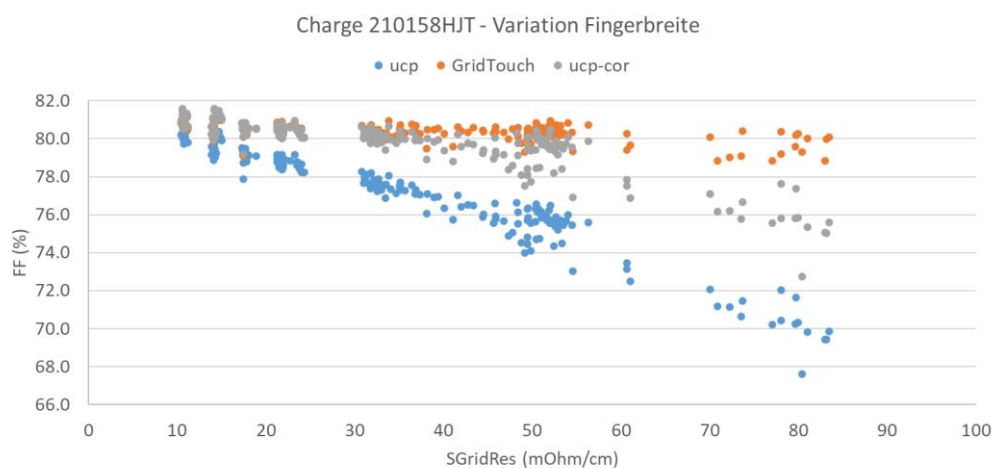


Abbildung 16: Füllfaktoren in Abhängigkeit des Gridwiderstands. (Blau) ucp Messung, (orange) Grid-Touch-Messung, (grau) ucp-Messung mit Widerstands- und Verschattungskorrektur.

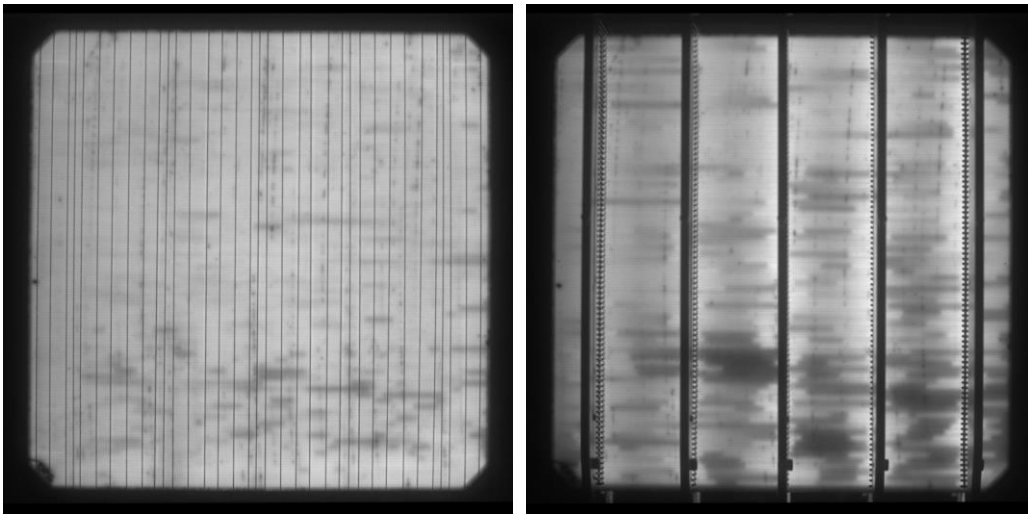


Abbildung 17: EL-Bilder von Zelle 240 mit einem $sGridRes$ von 50,8 $m\Omega/cm$ (links) mit der Grid-Touch und (rechts) mit den ucp-Leisten kontaktiert. Die Bereiche mit Fingerunterbrechungen wirken deutlich dunkler bei der Leistenkontaktierung.

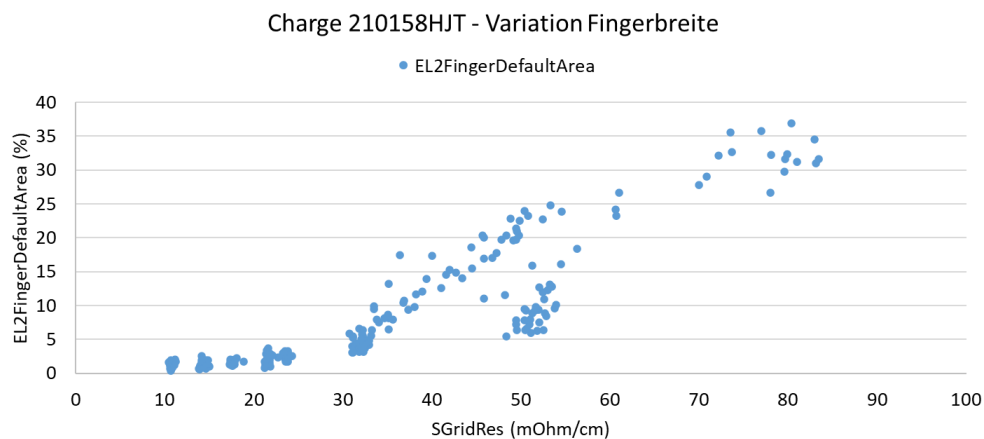


Abbildung 18: Der Parameter „EL2FingerDefaultArea“ bezeichnet die relative Fläche der im EL-Bild erkannten Fingerunterbrechungen. Ab einem Gridwiderstand von 30 $m\Omega/cm$ steigt die Zellfläche, die von Fingerunterbrechungen betroffen ist, deutlich an.

Die Fingerunterbrechungen auf den Zellen können mit Hilfe der aufgenommenen EL-Bilder genauer analysiert werden. Der aus den EL-Bildern gewonnene Kennwert „EL2FingerDefault-Area“, der den relativen Flächenanteil beschreibt, der von Fingerunterbrechungen betroffen ist, steigt ab einem Gridwiderstand von 30 $m\Omega/cm$ deutlich an (Abbildung 18). Werden für den Füllfaktorvergleich nur noch Zellen betrachtet, bei denen die von Fingerunterbrechungen beeinflussten Bereiche kleiner 10% sind, stimmen die umgerechneten Füllfaktoren sehr gut mit denen der GridTouch Messung überein (Abbildung 19). Es ist aber auch ersichtlich, dass mittels Siebdruck keine Zellen mit Gridwiderständen größer 55 $m\Omega/cm$ hergestellt werden konnten, die nahezu frei von Fingerunterbrechungen sind. Festzuhalten ist, dass eine Umrechnung der Füllfaktoren gemessen mit der GridTouch und den ucp-Kontaktleisten von siebgedruckten Solarzellen, die nahezu frei von Fingerunterbrechungen sind, möglich ist. Grundsätzlich ließen sich die Füllfaktoren der ucp-Messung auch in andere Kontaktierungskonfigurationen umrechnen. Damit wäre eine genauere Cell-to-Module Verlustanalyse möglich, sofern die Zellen nicht mit der gleichen Anzahl an Kontaktleisten gemessen werden, wie sie später im Modul verschaltet werden.

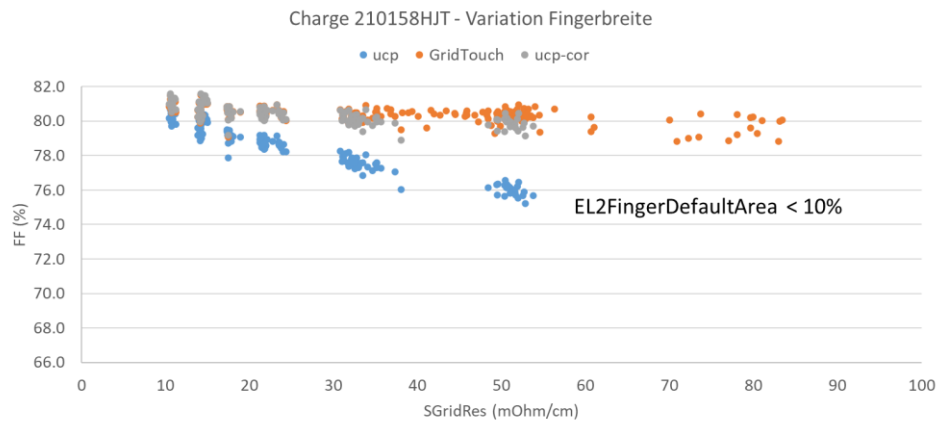


Abbildung 19: Werden nur noch Zellen für den Füllfaktorvergleich betrachtet, bei denen die von Fingerunterbrechungen beeinflussten Bereiche kleiner 10% sind, stimmen die aus den ucp-Messungen umgerechneten Füllfaktoren gut mit den Füllfaktoren der GridTouch Messung überein.

E. Langzeitstabilität ucp-Leisten

Wie in Abschnitt A gezeigt werden konnte, verfügt die ucp-Kontaktierung über eine mit den Standardleisten vergleichbar gute Reproduzierbarkeit der IV-Kennwerte bei der Rekontaktierung verschiedenster Solarzellentypen. Im Zeitraum 03-06/2021 wurden in unterschiedlichen Zeitabständen IV-Messungen an einem definierten Satz QS-Zellen durchgeführt. Die Zellen wurden zum einen mit den ucp-Leisten und zum Vergleich mit der GridTouch-Einheit kontaktiert.

Während bei den GridTouch Messungen keine nennenswerten Abweichungen auftraten und die Abweichungen innerhalb der festgelegten Grenzen blieben (Abbildung 20), sind deutliche Schwankungen in der FF-Messung bei Verwendung der ucp-Leisten zu erkennen (Abbildung 21), was sich auch auf im Serienwiderstand widerspiegelt und auf Wirkungsgrad ETA auswirkt. Direkt vor Beginn der Messreihe wurde eine Charge mit ca. 500 Zellen gemessen. Im Anschluss wurde die Kontaktierung im Schrank aufbewahrt und nur für die Langzeitmessungen verwendet, bei denen ein sinkender FF beobachtet wurde. Die nächste größere Messung von 650 Zellen fand am 22.6.2021 statt. Die QS-Messung zwei Tage später zeigt einen deutlichen Anstieg des Füllfaktors. In der Folge sanken die im Rahmen der QS-Messungen gemessenen Füllfaktoren wieder deutlich ab.

Da die Leisten mit Silber beschichtet sind, liegt die Vermutung nahe, dass durch die Lagerung im Schrank die Leisten oxidieren und sich durch Reaktion mit Schwefelwasserstoff, der in kleinsten Mengen auch in der Luft enthalten ist, Silbersulfid an der Oberfläche der Leisten bildet und damit der Kontaktwiderstand zur Zelle steigt. Im Rahmen umfangreicherer Messkampagnen scheint die isolierende Oxid/Sulfid-Schicht mechanisch abgetragen zu werden, was den Kontaktwiderstand verbessert und damit den anschließend beobachteten Füllanstieg erklärt. Die am ISE beschichteten Leisten wurden daher ausgetauscht und durch ucp-Leisten ersetzt, die vom Hersteller h.a.l.m. mit Silber beschichtet worden sind.

Im Januar 2022 wurden die Untersuchungen der Langzeitstabilität mit fabrikneuen ucp-Leisten fortgesetzt, wobei sich herausstellte, dass die Reproduzierbarkeit der Messungen im Vergleich zur GridTouch und zu Messleisten, die mit Pins bestückt sind, deutlich abfällt. Für die Untersuchungen wurde wieder der Satz QS-Zellen wie zuvor verwendet, der in regelmäßigen Abständen mit exakt denselben Einstellungen des Messgerätes vermessen wurde. Bei den Messungen im Zeitraum 01-02/2022 zeigte sich, dass der Messwert ContactRes, der Widerstand zwischen Spannungs- und Stromkontakten der Kontaktleisten, deutlich schwankt. Bei steigendem Widerstand ist ein Absinken des Füllfaktors erkennbar (Abbildung 22). Da der Spannungsabgriff direkt an der Oberkante der Leiste erfolgt, konnte eine Oxidation der Leiste in diesem Fall ausgeschlossen werden.

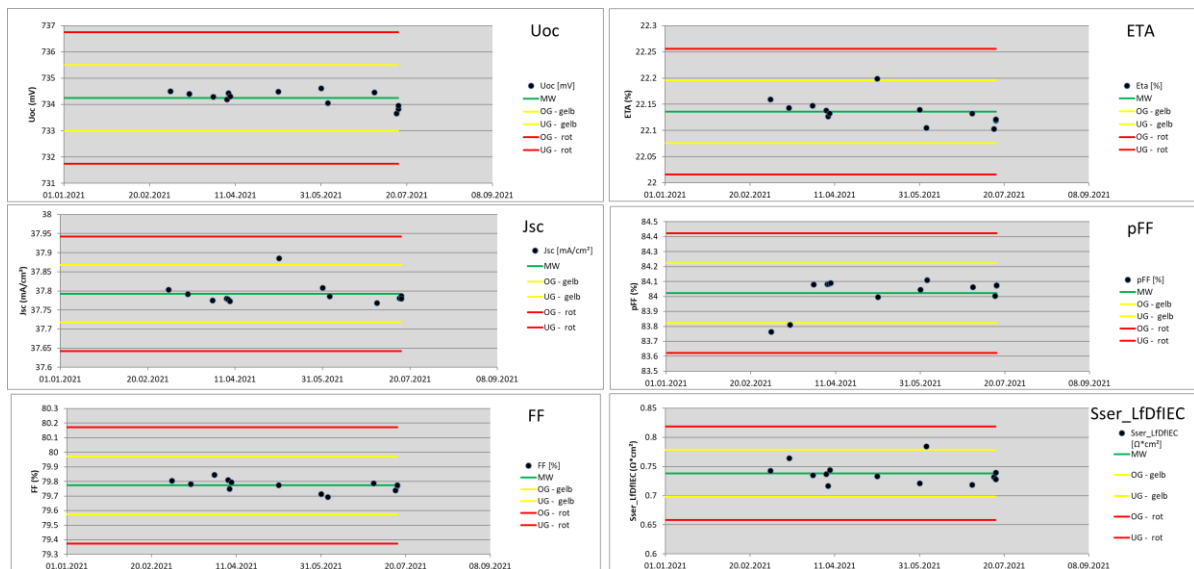


Abbildung 20: IV-Kennwerte der busbarlosen QS-Zelle HJT0033 kontaktiert mit der GridTouch. Über den Messzeitraum sind keine auffälligen Abweichungen aufgetreten.

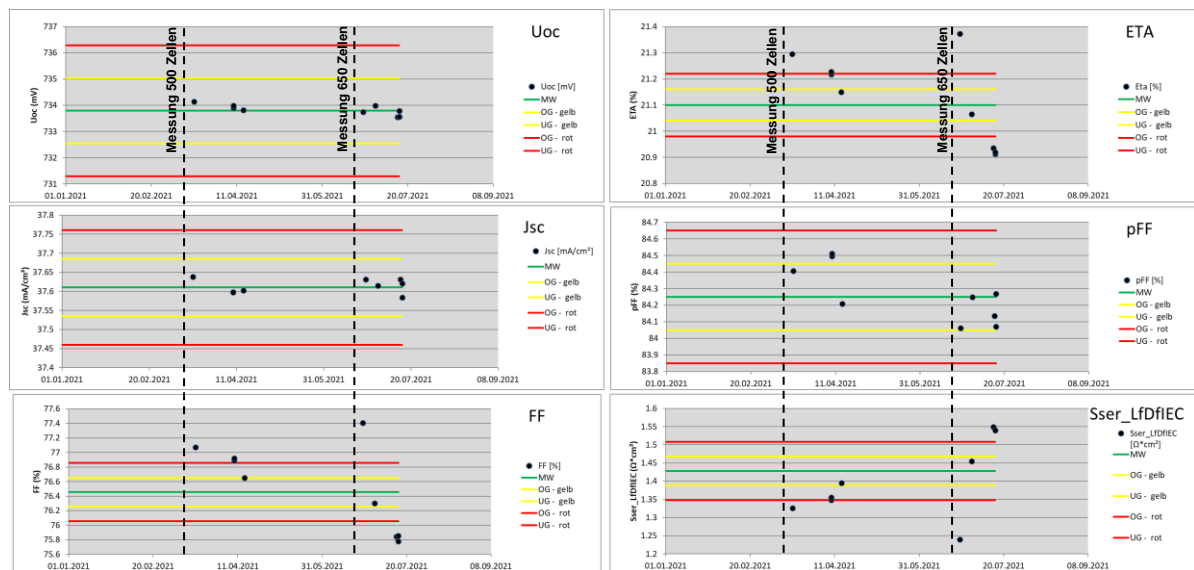


Abbildung 21: IV-Kennwerte der busbarlosen QS-Zelle HJT0033 kontaktiert mit den ucp-Leisten. Die Schwankungen im FF und Serienwiderstand sind auf einen schwankenden Kontaktwiderstand zwischen Zelle und Kontaktleiste zurückzuführen.

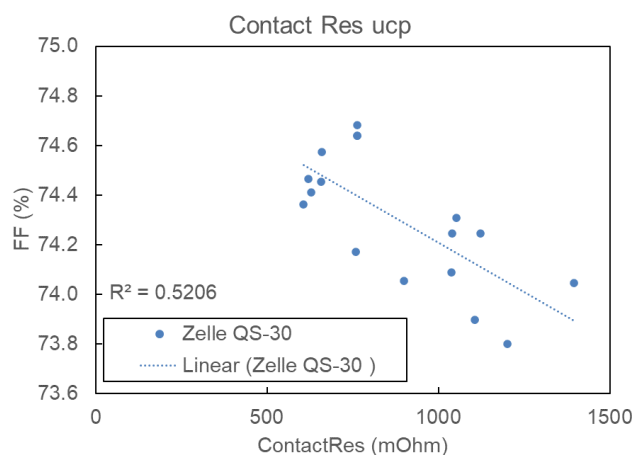


Abbildung 22: An Zelle QS-30 lässt sich exemplarisch zeigen, dass mit steigendem ContactRes (zwischen den Strom- und Spannungskontakten der ucp-Leisten) der gemessene Füllfaktor der Zelle sinkt.

Als Ursache für die Schwankungen des ContactRes konnte die Verbindungsbuchse zwischen Kontaktleisten und Messkabel identifiziert werden. Die Messungen nach Reduzierung des Übergangswiderstands am Stecker zeigen eine deutlich geringere Streuung des Füllfaktors aller untersuchter Zellen. Exemplarisch sind die Verläufe des Füllfaktors und des Wirkungsgrades von Zelle QS-30 in Abbildung 23 dargestellt.

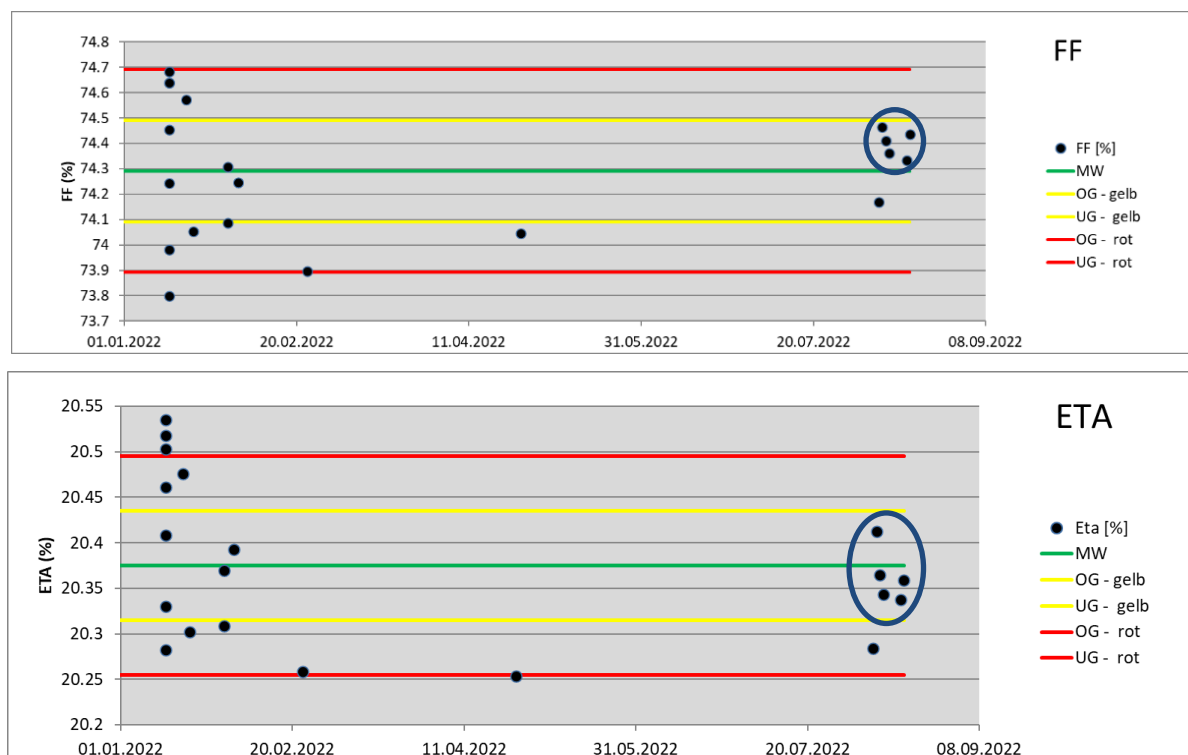


Abbildung 23: (Oben) Füllfaktoren FF und (unten) Wirkungsgrade der busbarlosen QS-Zelle 30 zwischen Januar und August 2022 bei Kontaktierung mit ucp-Leisten von h.a.l.m. Grün eingekreist Messungen mit geringerer Streuung nach Erneuerung der Verbindungsbuchse zwischen Kontaktleisten und Messkabel und damit Reduktion der Übergangswiderstände.

Im Vergleich zur ucp-Kontaktierung ist in Abbildung 24 für derselben Zelle QS-30 der zeitliche Verlauf der Füllfaktormessungen mit der GridTouch-Kontaktierung dargestellt. Die Messschwankungen der letzten 5 Messungen liegen bei beiden Kontaktierungen mit einer doppelten Standardabweichung von $\pm 0,13\%$ (rel.) gleichauf. Zukünftig ist daher besonders darauf zu achten, dass der gemessene ContactRes unter 500 mOhm liegt, um mit den ucp-Leisten eine korrekte FF-Messung zu gewährleisten. Deutlich geringere Messschwankungen über einen Zeitraum von 8 Monaten ergeben sich bei IV-Messung, bei denen die Solarzellen mit einer Pin-Kontaktierung kontaktiert werden, wie anhand der Zelle QS-03, einer PERC Zelle mit fünf Busbars, in Abbildung 25 gezeigt wird.

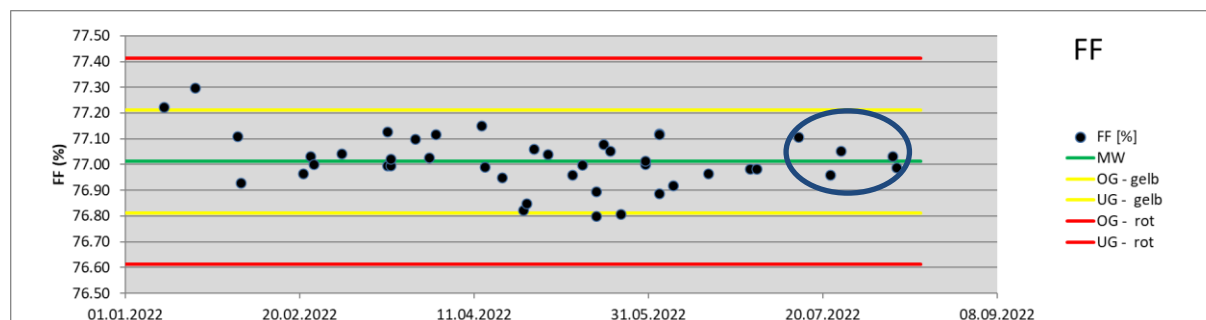


Abbildung 24: Füllfaktoren FF der busbarlosen QS-Zelle 30 zwischen Januar und August 2022 bei Kontaktierung mit der GridTouch Kontaktierung (Drahtkontaktierung).

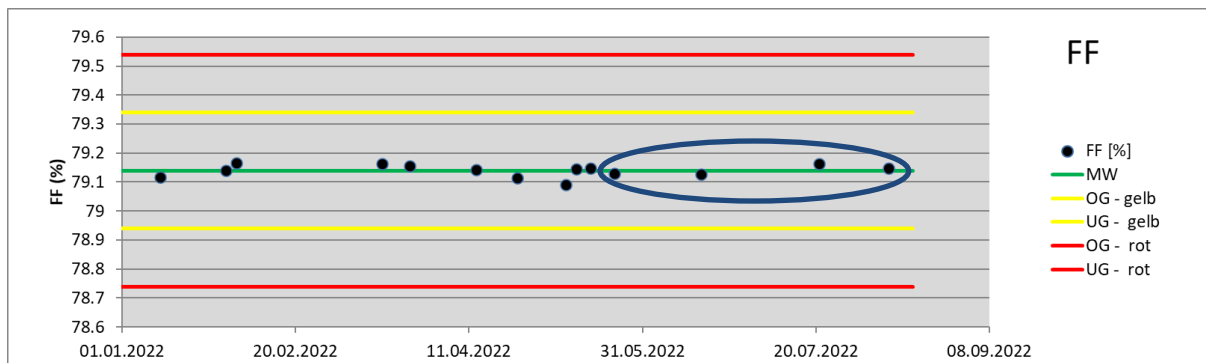


Abbildung 25: Füllfaktoren FF der 5Busbar QS-Zelle 03 zwischen Januar und August 2022 bei Kontaktierung mit der Pin-Kontaktierung.

In Tabelle 4 sind die doppelten Standardabweichungen, die ein Maß für die Reproduzierbarkeit der Messungen darstellen, für die drei untersuchten Kontaktierungen angegeben.

Tabelle 4: Reproduzierbarkeit der Füllfaktor und Wirkungsgrad Messungen bei Verwendung unterschiedlicher Kontaktierungen für zwei Messzeiträume (doppelte Standardabweichung).

2*rel. SD	Jahr 2022		Letzten 5 Messungen am finalen Messaufbau	
	FF	ETA	FF	ETA
Kontaktierung				
ucp	± 0.67 %rel.	± 0.83 %rel.	± 0.13 %rel.	± 0.26 %rel.
GridTouch	± 0.25 %rel.	± 0.35 %rel.	± 0.13 %rel.	± 0.23 %rel.
Pin	± 0.05 %rel.	± 0.17 %rel.	± 0.03 %rel.	± 0.13 %rel.

Die Pin-Kontaktierung erreicht zwar im Vergleich die beste Langzeitstabilität, trotzdem stehen mit den ucp-Leisten und der GridTouch-Einheit zu Projektende zwei geeignete Kontaktierungen zur Verfügung, um busbarlose Zellen hinreichend reproduzierbar zu messen. Bei Zellen mit 20% Wirkungsgrad und einer typischen BIN-Klassenbreite von 0,5%abs. entspricht die ermittelte Reproduzierbarkeit einem Zehntel der BIN-Klassenbreite.

Die ucp-Kontaktleisten bieten zudem im Vergleich zur GridTouch-Einheit den Vorteil, busbarlose Solarzellen bifazial zu messen zu können.

Mithilfe einer entwickelten analytischen Formel, die den Einfluss der Kontaktleistenanzahl und -abschattung berücksichtigt, können Messwerte, die mit der GridTouch-Einheit und den ucp-Leisten ermittelt werden, für Zellen mit wenigen Fingerunterbrechungen, verglichen werden. Damit sind nun genauere Zell-zu-Modul Verlustanalysen in Abhängigkeit von der Kontaktgeometrie bei der Zellmessung und dem späteren Verschaltungskonzept im Modul möglich.

3.1.2 AP2.2 Automatisierung für die Messung von bifazialen Schindelszellen

A. Spezifikation der Automatisierung für Schindelszellen

Um bifaziale Schindelsolarzellen automatisiert charakterisieren zu können, wurde der Solarzellentester im PV-TEC erweitert. Dazu wurde neben dem Rundschalttisch des Automaten eine Beladeeinheit installiert, mit der der Rundschalttisch aus einer formatverstellbaren Box (für unterschiedliche Schindelformate) heraus mit Schindel-Solarzellen beladen werden kann (Abbildung 29, links). Diese Beladestation umfasst neben der zentralen Magazinentnahme, die sowohl für Schindelszellen als auch für Vollzellen in den Formaten M0 bis M6 genutzt werden kann, zwei zusätzliche Systeme zur Waferidentifikation (Abbildung 26), die eine Identifikation von oben und von unten ermöglichen, so dass das existierende Konzept der Waferverfolgung innerhalb der Anlage auch bei Materialzufuhr aus dem Magazin vollständig zur Verfügung steht und Messdaten zuverlässig einzelnen Solarzellen zugeordnet werden können.

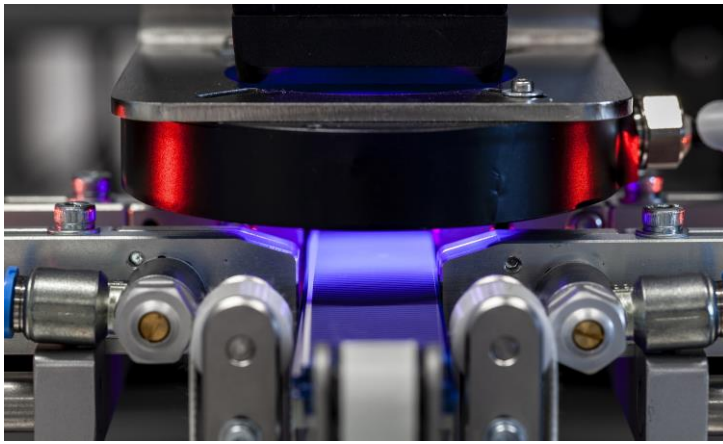


Abbildung 26: Schindenzellen (längs in die Bildebene hinein) im Entnahmemagazin unter dem Codereader während der Identifikation eines Data Matrix Codes, der sich hier auf der Oberseite der Zelle befindet. Der Codereader zum Auslesen der WaferIDs ist an der Transportachse befestigt und steht auf Leseposition.

Eine wesentliche Herausforderung stellte die Beladung des Rundscharlttischs dar, da hier gleichzeitig (i) ein hinreichend hoher Durchsatz, (ii) eine hohe Ausrichtgenauigkeit der Zellstreifen für die spätere Kontaktierung sowie (iii) eine minimale mechanische Belastung der Zellstreifen zu gewährleisten sind. Da Fügevorgänge in Kavitäten-Nester mit schmalem umlaufendem Rand, wie sie bisher für die Schindenzellenmessung bei manueller Beladung eingesetzt werden, wegen der geringen Toleranzen schwer zu automatisieren sind, wurden für die Zellhalterung im Rundscharlttisch neue Vakuumaufnahmen entwickelt (Abbildung 27). Hierbei wurde die Abschattung der Zellrückseite minimiert, um bifaziale Schindenzellen auch echt bifazial vermessen zu können.

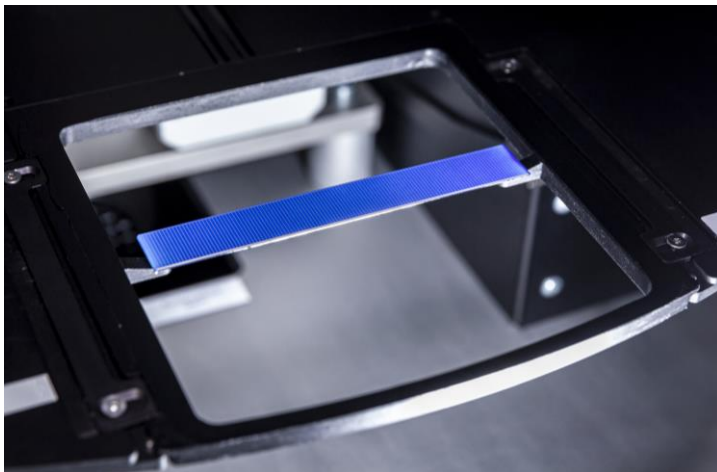


Abbildung 27: Automatisierbare Zellhalterung für Schindenzellen im Rundscharlttisch des PV-TEC Zelltesters, die eine echt bifaziale Messung der Schindenzellen ermöglicht.

Durch Rotation des Rundscharlttischs (Abbildung 28) werden die Zellen von der „9 Uhr“ Beladeposition zur Messposition auf „6 Uhr“ (Strom-Spannungs-Charakteristik, Elektrolumineszenz-Imaging, Thermographie-Imaging, Spektrale Empfindlichkeit) gebracht und dort charakterisiert. Durch eine weitere 90°-Rotation des Rundscharlttischs werden die Solarzellen in die freie „3 Uhr“-Position und dann in die „12 Uhr“-Position gebracht, wo die Charakterisierung mittels Photolumineszenz-Imaging erfolgt. Anschließend werden sie durch eine vierte 90°-Rotation wieder auf die „9 Uhr“-Position gebracht, wo sie entnommen und über ein bereits bestehendes Handling in drei Ablageboxen abgelegt werden. Diese Boxablage wurde für Schindenzellen zu einer vollwertigen Sortierstation ausgebaut, indem (a) die bestehenden Ablageboxen in jeweils 3 Fächer unterteilt wurden, so dass insgesamt 5 Sortierklassen und eine Ablagebox zur Verfügung stehen, (b) das Greifersystem so erweitert wurde, dass die einzelnen Fächer gezielt angefahren werden können und (c) eine Sortieralgorithmik zur Verarbeitung der bifazial erhobenen Messdaten implementiert wurde (Abbildung 29).

Das Automatisierungskonzept wurde im Rahmen des Projekts von Fraunhofer ISE und J&R entwickelt und in einer technischen Spezifikation fixiert. Die Konstruktion und Fertigung bei J&R wurden vom Fraunhofer ISE eng begleitet.

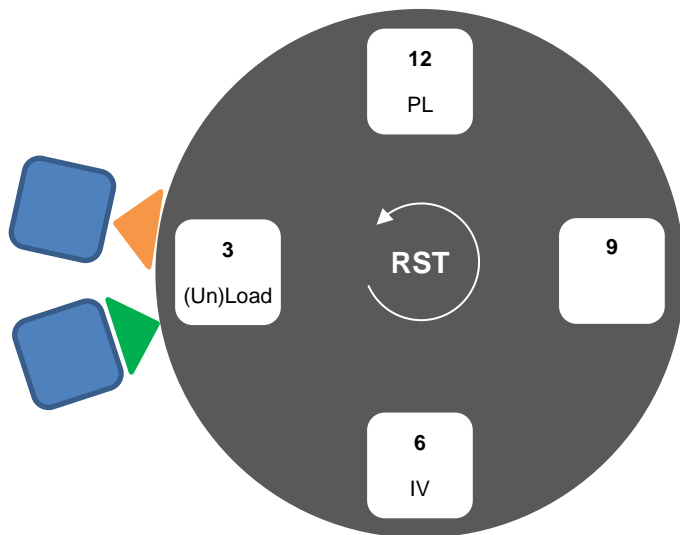


Abbildung 28: Schemaskizze des Rundschalttischs (RST) mit den Nestern auf 3, 6, 9 und 12 Uhr.

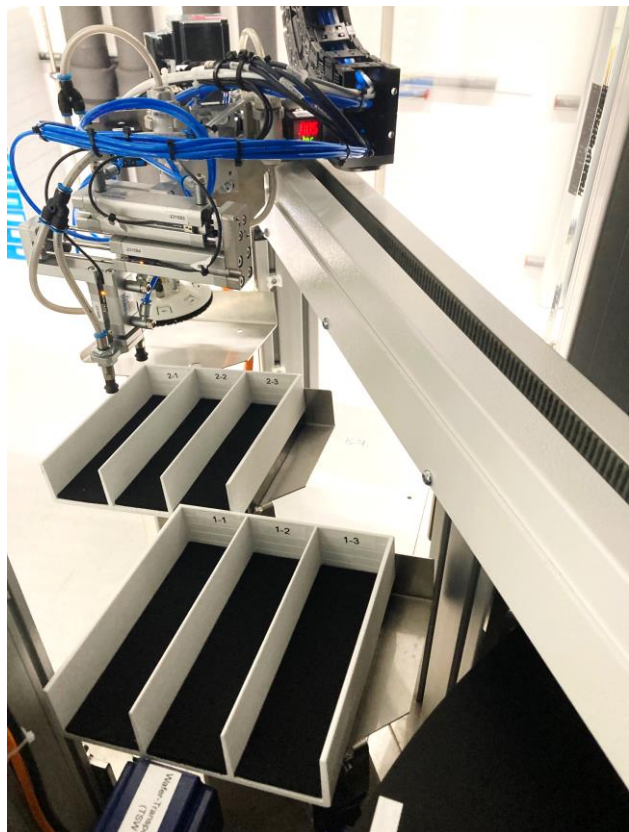


Abbildung 29: (Links) Schindelzellen während der Entnahme aus dem Magazin. Rechts und links des Zellstapels befinden sich die Anblasdüsen, die eine Vereinzelung der Zellen im Magazin ermöglichen. (Rechts) Ablageachse und Ablageboxen für die Sortierung von Schindelzellen in 6 BIN-Klassen.

B. Einsatzbereitschaft der Automatisierung für Schindenzellen

Die Schindelautomatisierung im Zelltester wurde im Januar 2021 in Betrieb genommen, so dass ab diesem Zeitpunkt automatisierte Messungen und eine Sortierung von Schindenzellen in 6 BIN-Klassen erfolgen konnten. Nach erfolgreichem Testbetrieb wurde die Automatisierung am 23.03.2021 abgenommen. Neben mehreren tausend Schindenzellen, die für die Modulherstellung nach Effizienz sortiert wurden, wurden während der Projektlaufzeit auch Voll- und Halbzellen im M2, M4 und M6 Format erfolgreich mit der neuen Magazinentnahme am Zelltester verarbeitet.

Mit der Schindelautomatisierung stand damit für die in UAP 2.3 erforderlichen Vergleichsmessungen von Schindenzellen vor/nach Vereinzelung ein performantes System zur Verfügung. Die automatisierte Boxentladung für Voll- und Schindenzellen beschleunigte zudem die in AP 3 in großem statistischem Umfang erforderlichen Messungen an Zellen aus der Fertigung bei HEVEL Energy erheblich, was dazu beitrug, die entstandenen Verzögerungen bei der Wafermarkierung zu reduzieren.

3.1.3 AP2.3 Analysemethodik für bifaziale Schindenzellen im Waferverbund

Zur Entwicklung von Analyseverfahren für Schindelsolarzellen im Waferverbund müssen die Schindelsolarzellen vor und nach der Vereinzelung mit den gängigen Methoden (IV und EL) vermessen werden, um so einen Datensatz für das Training empirischer Modelle zu erzeugen. Systematische Veränderungen der Proben durch den Vereinzelungsschritt werden hierbei automatisch im Modell erfasst. Die wichtigste Veränderung besteht in der Vergrößerung der Randbereiche und der Erzeugung unpassivierter Kanten, die je nach verwendetem Laserprozess für die Zellteilung unterschiedlich stark rekombinieren können. Genau diese systematischen (prozessbedingten) Effekte sollen u.a. durch das Modell erfasst werden.

Zusätzlich kann es aber auch zu überlagerten ungewollten Veränderungen der Probe kommen. Da sich die Proben während der laserbasierten Zellteilung in der unmittelbaren Umgebung um den Laserschnitt kurzzeitig über 200°C erwärmen, kann es im Falle von Schindenzellen auf bordotierten Wafern im Randbereich zu einer Deaktivierung des regenerierten Zustands des metastabilen Bor-Sauerstoff-Defekts kommen und in der Folge zur Degradation der Ladungsträgerlebensdauer im Volumen des Randbereichs, was in den EL-Bildern am Rand zu reduzierten Signalintensitäten führt (schwarze Streifen) und die globalen Leistungsdaten der Schindenzellstreifen reduziert. Die Überlagerung derartiger metastabiler Materialeffekte erschwert die Entwicklung empirischer Vorhersagemodelle für den Wirkungsgrad der Einzelschindeln erheblich und führt zu systematischen Fehlern.

Erste im Rahmen des Projektes durchgeführte Versuche waren von dieser Problematik betroffen. Überlagerte Effekte durch metastabile Materialdefekte können vermieden werden, indem Gallium-dotiertes Wafermaterial verwendet wird. Im Rahmen des Projekts wurden zur Bearbeitung des Teilziels TZ 2.7 daher zwei ergänzende Experimente auf Ga-dotiertem Wafermaterial durchgeführt: (a) ein kleineres Experiment mit bifazialen Schindelsolarzellen aus dem PVTEC-Labor (siehe Abschnitt 3.1.3 A/C) und (b) ein großes Experiment mit monofazialen Schindelsolarzellen aus einer Industrielinie (siehe Abschnitt 3.1.3 B/D).

A. Kleines Experiment mit bifazialen Schindenzellen aus PVTEC-Labor

Für das kleine Experiment wurde im PVTEC ein Probensatz aus 70 Host-Wafern mit je 5 bifazialen PERC-Schindel-Solarzellen hergestellt und vor und nach der Vereinzelung vermessen. Durch die Verwendung von Ga-dotierten Wafern können Degradationseffekte ausgeschlossen werden (siehe Vorspann). Im Rahmen von TZ 2.8 wurde ein empirisches Modell zur Charakterisierung der Schindenzellen auf Basis globaler und orts aufgelöster Messungen am Host-Wafer entwickelt. Hierzu wurden an den Host-Zellen vor Vereinzelung folgende Messungen durchgeführt: Strom-Spannungs-Kennlinie (IV), Elektro-Lumineszenz-Imaging (EL),

Thermographie-Imaging (TG), Photolumineszenz-Imaging (PL). Da bei den Messungen alle Einzelschindeln simultan kontaktiert werden, entsprechen die gemessenen I/V -Werte Mittelwerten über alle Einzelschindeln. Nach der Vermessung wurden die Hostzellen mittels Laservereinzelung („Laser Scribe and Cleave“, LSC) in Schindeln separiert und die einzelnen Schindeln mittels der in diesem Projekt entwickelten Schindel-Automatisierung erneut vermessen. An den vereinzelter Schindelzellen wurde als zentraler Input für die Modellbildung die I/V -Kennlinie gemessen.

Die Zuordnung der einzelnen Schindelzellen zum abstammenden Host und damit die Zuordnung der Messdaten vor/nach Vereinzelung erfolgte über eine Markierung der Einzelschindeln, die vor dem Zellprozess auf dem Hostwafer mittels Laser aufgebracht wurde.

B. Großes Experiment mit monofazialen Schindelzellen aus Industrie

Experimentelle Randbedingungen: Da die Güte von Machine-Learning-Modellen immer auch von der Größe des zugrundeliegenden Trainingsdatensatzes abhängt, wurde im Rahmen der Projektverlängerung (mit freigewordenen Mitteln aus AP 3) beim taiwanesischen Solarzellenhersteller „EEPV“ die Fertigung von 1000 Schindel-Hostzellen in der Wafergröße M6 (166 mm Kantenlänge) beauftragt. Auch hier wurde Gallium-dotiertes p-Typ Silizium als Basismaterial verwendet, um überlagerte Degradationseffekte durch metastabile Materialdefekte beim Messen und Vereinzeln der Proben ausschließen zu können. Die Charge basiert auf einem monofazialen Zelldesign, da nur dieses von EEPV angeboten wurde, was jedoch keine Einschränkungen für das Experimentziel bedeutet. Das monofaziale 6-Schindel-Design der Hostwafer ist in Abbildung 30 dargestellt. Angesichts der 6-Schindelzellen pro Hostwafer umfasste der finale Probensatz 6000 Schindelzellen. Nach Absprache mit dem Hersteller sollte der Probensatz Zellen verschiedener Leistungsklassen beinhalten, die die volle Produktionsstreuung widerspiegeln, und bewusst auch Zellen mit Produktionsdefekten, um anhand dieser Zellen einen umfassenden Datensatz zur Entwicklung eines robusten Vorhersagemodells für die vereinzelter Schindel-Solarzellen erzeugen zu können.

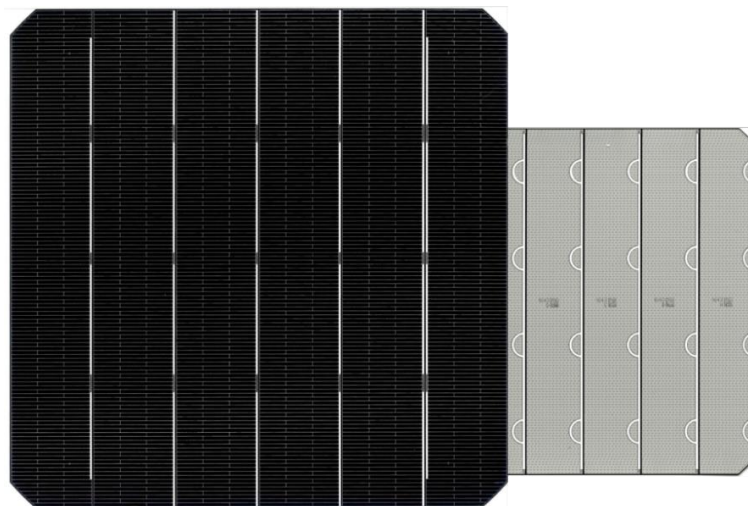


Abbildung 30: EEPV-Hostzellen von der Vorder- und Rückseite. Die hellen Busbars sind die seitliche Begrenzung (spätere Schnittkante) der sechs Einzelschindeln. Auf der Rückseite (rechts) erkennt man mittig die am ISE nachträglich applizierte Inkjet-Beschriftung.

Hierzu wurden an den Hostzellen vor Vereinzelung wiederum die folgenden Messungen durchgeführt: Strom-Spannungs-Kennlinie (I/V), Elektro-Lumineszenz-Imaging (EL), Thermographie-Imaging (TG) und Photolumineszenz-Imaging (PL). Danach wurden die Hostzellen mittels Laservereinzelung („Laser Scribe and Cleave“, LSC) in Schindeln separiert, um schließlich an den vereinzelter Schindelzellen mittels der entwickelten Schindelzellen-Automatisierung eine I/V -Kennlinien-Messung durchzuführen und damit die Zielwerte für Training und Test des Modells zu bestimmen.

Angepasste Wafermarkierung an der fertigen Zelle: Angesichts des großen Probenumfangs musste auch hier eine zuverlässige und automatisierbare Zuordnung der Einzelschindeln zu den Hostwafern gewährleistet werden. Da in diesem Fall (im Gegensatz zum Vorexperiment) aufgrund der Zellfertigung in Taiwan vor dem Zellprozess keine Lasermarkierungen auf die Rohwafer aufgebracht werden konnten, musste die Markierung nachträglich an den fertigen Zellen erfolgen. Hierzu wurde versucht, per industriellem Inkjet-Drucker („Jet3up“, Firma Leibinger) einen Data-Matrix-Code (DMC) und einen mit dem Auge lesbaren alphanumerischen Code auf die metallisierte Zellrückseite zu drucken. Da die Metall-Mikrostruktur dazu tendiert, Flüssigkeiten aufzusaugen, diffundierte auch die Tinte zunächst so schnell in das Material ein, dass der Code nicht sichtbar war. Durch eine Erwärmung der Solarzelle auf 60°C während der Beschriftung über eine beheizte Platte gelang schließlich eine permanente Beschriftung in einem Schreibdurchgang. Durch die erhöhte Wafertemperatur verdampft in diesem Fall das Lösungsmittel der Tinte schneller als die Tinte ins Metall einziehen kann, so dass die Farbpigmente auf der Oberfläche verbleiben. Das finale Erscheinungsbild des Codes ist in Abbildung 30 dargestellt. Die 6 Schindeln eines Hosts erhielten so jeweils dieselbe Nummer mit nachgestelltem Buchstaben A bis F. Der so aufgebrachte DMC erzielt am Codereader des Zelltester-Automaten eine hervorragende Leserate von an die 100%.

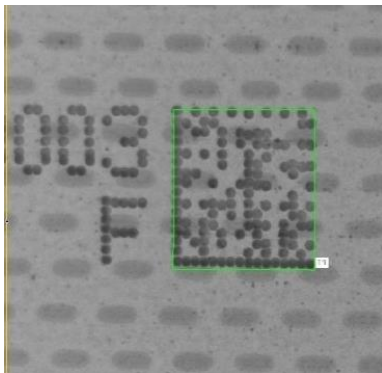


Abbildung 31: Mittels Inkjet-Druck aufgebrachter Data-Matrix-Code (Größe 4x4 mm²) und alphanumerischer Code auf einer metallisierten Schindel-Rückseite. Die grüne Kontur indiziert die erfolgte Erkennung durch den Code-Reader. Der Code enthält Chargen-ID + Wafer-ID + Schindel-ID („220401ISE0003F“)

Effizienzverteilung der Charge: Abbildung 32 zeigt die aus den IV-Messungen ermittelte Verteilung der Zelleffizienzen für die Hostzellen vor der Vereinzelung (links) und die Einzelschindeln nach der Vereinzelung (rechts). Die Zellcharge bestand aus 836 Hostzellen, wovon der Hersteller 617 Zellen als „gut“ und 219 Zellen aufgrund verschiedener Defekte als „schlecht“ klassifizierte. Auftretende Defekte waren hierbei Punktdefekte, Farbabweichungen, Mikrorisse, niedrige Effizienz und weitere. Wie beim Hersteller angefragt, spiegelte die Charge damit einerseits eine realistische Effizienzverteilung einer industriellen Solarzellenproduktion wider und enthielt andererseits auch „unbekannte“ Ausschussware und eignet sich somit sehr gut für Modellentwicklung.

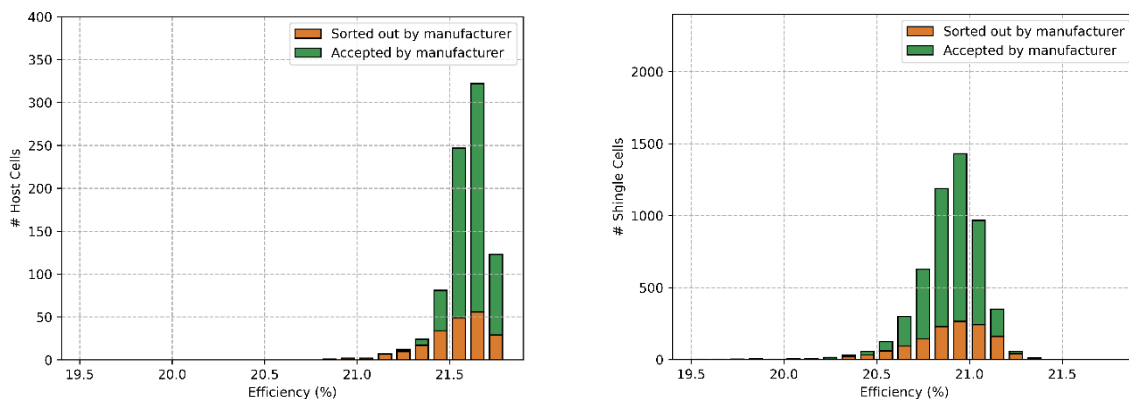


Abbildung 32: Effizienzverteilung der EEPV-Hostzell-Charge: (links) Messungen am den unvereinzelten Hostzellen, (rechts) Messung an den vereinzelten Schindelzellen. Die von EEPV klassifizierte „Schlecht“-Zellen sind braun hervorgehoben.

Die Effizienz-Histogramme zeigen die erwartete leicht schiefe Gauß-Verteilung einer Produktionsstreuung. Die von EEPV klassifizierten „Schlecht“-Zellen folgen in den oberen Effizienzklassen der Verteilung der Gut-Zellen, was zeigt, dass sich die hier detektierten Defekte, wie Farbfehler oder Hotspots, nicht unmittelbar auf die Effizienz auswirken. In den unteren Effizienzklassen ($\eta < 21,4\%$ für Hosts und $\eta < 20,6\%$ für Schindeln) stellen dann die Schlecht-Zellen die Mehrheit, da sich hier die Defekte sammeln, die die Effizienz beeinträchtigen (z.B. Kontaktfehler, Kratzer, Risse, etc.).

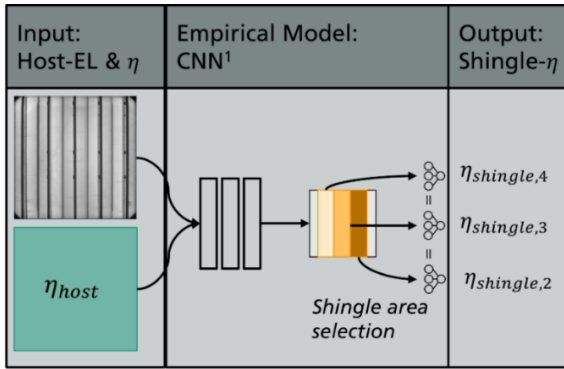
Die Verteilung der Schindelzellen ist gegenüber der Verteilung der Hostzellen um $\Delta\eta = 0,7\%_{\text{abs}}$ zu niedrigeren Effizienzen verschoben. Auch dieser Effekt ist erwartet durch den Einfluss der Kantenrekombination an der Schnittkante. Die y-Achse des Schindelzellen-Histogramms ist mit einem Faktor 6 äquivalent zu den Host-Zellen skaliert (da sechs Schindeln einen Host bilden). Hierdurch sieht man, dass die Effizienzverteilung der Schindelzellen etwas flacher und breiter verläuft als die der Hostzellen. Dies kommt daher, dass sich die in der Hostzelle gemittelte Effizienz der sechs enthaltenen Schindeln nun ausdifferenziert. D.h. jeder einzelne Balken der Host-Effizienz erfährt eine Zusatzstreuung.

Diese Überblicksbetrachtung zeigt bereits folgendes: Erstens lässt sich die Effizienzmessung der Hostzellen nicht unmittelbar auf die Schindelmessung übertragen, so dass eine solche Annahme (z.B. für eine Produktionslinie) einen Klassifikationsfehler erzeugt. Um dies zu verhindern und dennoch mit der zeitsparenden Messung der Hostzelle auszukommen, wurde im Projekt ein Modell entwickelt, um die Effizienz der Schindelzelle aus der Host-Messung mit hoher Güte abzuleiten. Zweitens erweitern die in dieser Charge enthaltenen „aussortierten“ Zellen das Effizienzspektrum nicht um pathologisch niedrige Effizienzen, sondern erhöhen lediglich den Anteil der Zellen mit (a) „normal“ niedrigen Effizienzen (gem. der Produktionsstreuung) und (b) anderweitigen (möglicherweise lokalen) Defekten.

Mit dem hier entwickelten und nachfolgend beschriebenen Vorhersagemodell lässt sich verhindern, dass ganze Host-Wafer mit lokalen Defekten in den Ausschuss geraten. Stattdessen können die defekten Schindeln einzeln identifiziert und nachfolgend aussortiert werden.

C. Modell auf Basis des kleinen Probensatzes

In Abbildung 33 ist der schematische Aufbau des empirischen Modells dargestellt. Als Eingabedaten für das empirische Modell werden die Elektrolumineszenz (EL) Bilder und die gemittelten Wirkungsgrade η_{host} der Hostzellen verwendet. Zur Verarbeitung von Daten bilden der Messverfahren haben sich in der aktuellen Forschung sogenannte Convolutional Neural Networks (CNNs = Faltungsnetzwerke) etabliert, weswegen dieses Vorgehen für die Schindelcharakterisierung adaptiert worden ist. Innerhalb des Netzwerks wird die räumliche Auflösung der Messbilder reduziert, während sich die Semantik im Sinne der Zielgrößen, in diesem Fall der Wirkungsgrade η_{shingle} der einzelnen Schindelzellen, erhöht. Um aus einer EL-Messung drei Wirkungsgrade $\eta_{\text{shingle},2}$, $\eta_{\text{shingle},3}$ und $\eta_{\text{shingle},4}$ ableiten zu können, wurde die EL-Informationen an den jeweiligen Positionen der Schindelzellen im empirischen Modell kondensiert und separat für die Vorhersage verwendet. Sowohl Host-EL, η_{host} als auch alle η_{shingle} wurden mit Hilfe einer Leistenkontaktierung vermessen, sodass Varianzen durch Messtechnik, vor/nach Vereinzelung geringgehalten werden können.



¹Convolutional neural network

Abbildung 33: Schematischer Aufbau zur Charakterisierung von Schindelzellen basierend auf Messungen am Host-Wafer.

Das empirische Modell kann durch den beschriebenen Ansatz die Schindelzellen bereits mit guter Güte charakterisieren. In einer ersten Untersuchung wurde das Modell auf 70 Hostzellen und damit 210 innere Schindelzellen (3 je Host-Zelle) angewandt. Da die äußeren beiden Schindeln jedes Hosts aufgrund des Pseudosquare-Formats der Wafer eine etwas andere Geometrie haben, wurden diese im ersten Schritt der Modellvalidierung nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse wurden mit einer 5-fachen Kreuzvalidierung des Modells gesichert. In Abbildung 34a ist der durch das Modell ermittelte Wirkungsgrad über dem gemessenen Wirkungsgrad der Schindelzellen aufgetragen. Es ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen, die sich in einem mittleren absoluten Fehler von $0.07\%_{abs}$ bzw. einem mittleren relativen Fehler von 0.35% bezüglich der gemessenen Schindel-Wirkungsgrade widerspiegelt.

Die Binning-Qualität, welche durch das empirische Modell erreichbar ist, wurde im Vergleich zu den Schindelmessungen untersucht. In Abbildung 34b sind zusätzlich zum Wirkungsgrad die angenommenen Binningklassen mit einer Breite von 0.2% als Kästen eingetragen. Alle blauen Punkte innerhalb der eingezeichneten Kästen würden bei Verwendung der vorhergesagten Schindelzellen-Wirkungsgrade in die gleiche Binklasse eingeordnet werden wie bei Verwendung der gemessenen Werte. Es ist zu erkennen, dass dies für die Mehrzahl der Schindeln zutrifft, sodass eine Genauigkeit von 74.8% erreicht werden kann. Zu beachten ist hierbei, dass das bisherige Modell nur die Wirkungsgrade der Mittelschindelzellen vorhersagt und nicht die der Randschindeln, bei denen andere Abweichungen vom global gemittelten Wirkungsgrad des Host-Wafers zu erwarten sind aufgrund der Tatsache, dass die Randschindeln im Gegensatz zu den Mittelschindeln nur eine unpassivierte Kante besitzen und eine abweichende Zellfläche aufweisen.

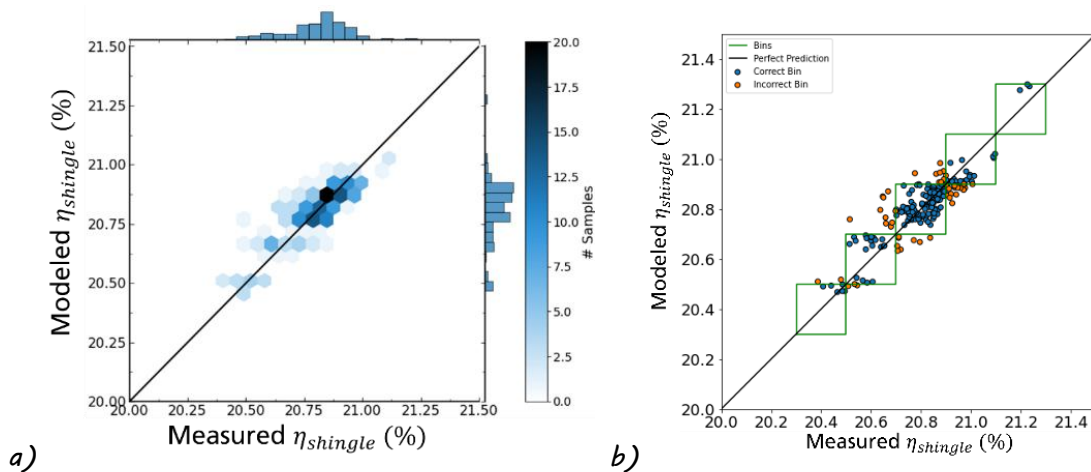


Abbildung 34: (a) Gegenüberstellung der gemessenen Wirkungsgrade der Schindelzellen (nur Mittelschindelzellen) und der abgeleiteten Wirkungsgrade der Schindelzellen basierend auf gemittelten Host-IV-Werten und Host-EL-Bildern. (b) Gegenüberstellung des Binnings basierend auf dem empirischen Modell.

Schließlich wurde noch untersucht, inwiefern die unterschiedliche Art, die Effizienz der Schindeln zu ermitteln und die Schindeln folglich in verschiedene Leistungsklassen zu sortieren, Auswirkung auf die theoretisch erreichte Modulleistung hat.

Hierzu wurde mit der Simulationssoftware „SmartCalc IV“ mit den Effizienzdaten der Schindeln Module simuliert. Hierbei wurde die Zellanzahl aus statistischen Gründen um den Faktor 50 erhöht und eine 60-Zell-Äquivalent Modulgröße gewählt. Der Cell-to-Module-Faktor wurde mit einem für Schindelmodule typischen Wert von 99,5% angenommen.

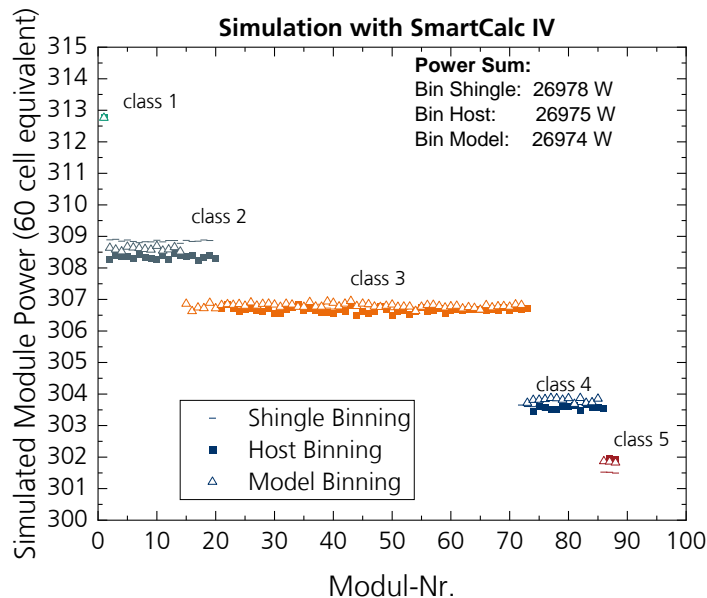


Abbildung 35: Simulierte Schindelmodule auf Basis der Klassierung nach gemessenen Host-Effizienz, der gemessenen Schindel-Effizienz und der Modellierten Schindel-Effizienz.

Die Modulleistung weicht für diesen (kleinen) Datensatz in allen 3 Sortiervarianten nicht mehr als 0,7 W voneinander ab. Die Referenz ist dabei das „Shingle Binning“, d.h. die echte Einzelmessung der Schindeln. Die Sortierung nach der reinen Host-Messung und die Sortierung nach dem entwickelten Modell sind im Rahmen von zu erwartenden Messfehlern identisch, was darauf hindeutet, dass der Datensatz keine Zellen mit lokalen Defekten enthalten hat. Einziger Unterschied ist die Besetzung der einzelnen Klassen, die sich in Summe aber ausgleicht (siehe „Power Sum“).

D. Modell auf Basis des großen monofazialen Probensatzes

Für den in Abschnitt 2.3B beschriebenen Datensatz wurde das Modell aus Abschnitt 2.3 C weiterentwickelt, indem der Umfang der Eingangs- und Ausgangsparameter vergrößert wurde. Das Modell ist in Abbildung 36 dargestellt. Als Host-Eingangsdaten werden Elektrolumineszenz- (EL), Thermographie- (TG), Photolumineszenzmessungen (PL) sowie die Host-IV-Werte verwendet. Diese werden von einem convolutional neural network (CNN) verarbeitet, so dass die in der Mitte zu sehenden Merkmalskarten entstehen. Hellere Bereiche stehen für höhere Aktivierung. Es ist zu erkennen, dass die Aktivierung der ersten Merkmalskarte gerade bei den im EL-Bild zu sehenden Defekten erhöht ist. Anschließend werden die zu den sechs Schindeln gehörenden Bereiche aus den Merkmalskarten extrahiert (Shingle Average Pooling) und kleinen separaten Modellen übergeben, welche die jeweiligen Qualitätsgrößen letztendlich vorhersagen sollen. Zu den untersuchten Ausgangsgrößen zählen (i) IV-Parameter wie die Effizienz η und der Füllfaktor FF , außerdem (ii) die Binklassen sowie (iii) die IV-Kurven der Schindeln. Die Ergebnisse der Vorhersage der genannten Ausgangsgrößen werden im Folgenden näher betrachtet.

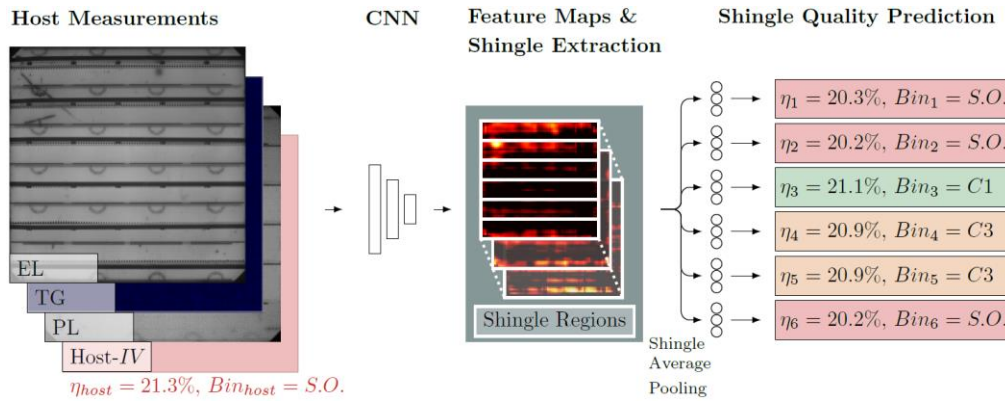


Abbildung 36: Darstellung des empirischen Modells zur Berechnung von Qualitätsgrößen von sechs Schindelzellen basierend auf orts aufgelösten Hostmessungen.

IV-Parameter Resultate: Die Effizienz und der Füllfaktor der Schindelzellen kann mit hoher Genauigkeit durch das empirische Modell basierend auf Hostmessungen abgeleitet werden. In Abbildung 37 sind (a) die Effizienz η sowie (b) der Füllfaktor FF abgeleitet durch das empirische Modell (y-Achse) über den tatsächlich an den vereinzelt Schindelzellen gemessenen Größen (x-Achse) dargestellt. Idealerweise würden alle Punkte auf der schwarzen Diagonalen liegen. Wie zu erkennen ist, sind die Werte eng um die Diagonale verteilt. Die Effizienz und der Füllfaktor können mit einem mittleren absoluten Fehler von 0.07 %_{abs} bzw. 0.21 %_{abs} und Pearson-Korrelationsfaktoren von 83 % bzw. 82 % berechnet werden.

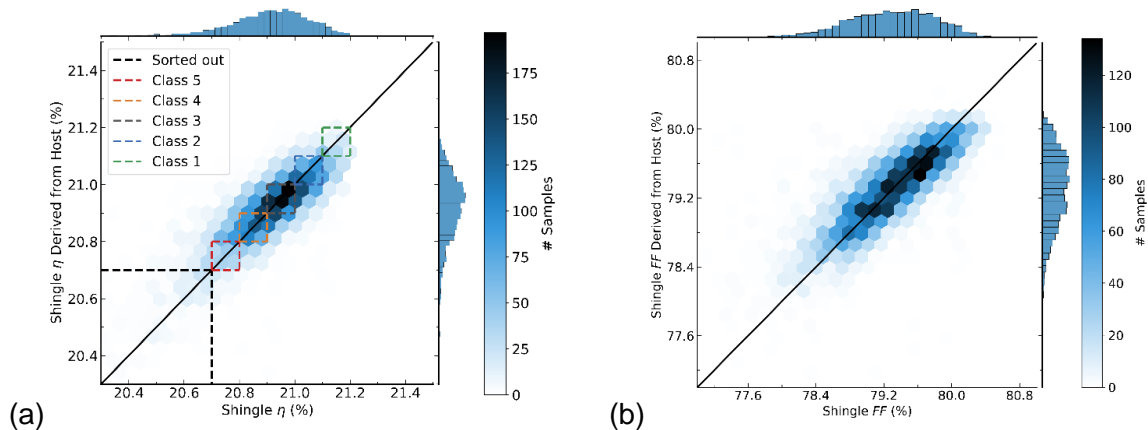


Abbildung 37: Gemessene (x-Achse) und aus den Host-Messungen (y-Achse) berechnete Werte für (a) den Wirkungsgrad und (b) den Füllfaktor.

Binning Resultate: Das empirische Modell ermöglicht eine bessere Sortierung der Schindelzellen verglichen mit der Referenzmethode. Wie in Abbildung 37(a) als gestrichelte Boxen visualisiert, wurden fünf Binklassen basierend auf der Effizienz mit einer Breite von 0.1 %_{abs} definiert. Zusätzlich werden alle Zellen mit einem geringeren Wirkungsgrad als 20.7 % als aussortiert gewertet. Als Referenzmethode zum Sortieren wurde die mittlere Differenz zwischen Host-Wirkungsgrad und Schindelwirkungsgrad von der Host-Effizienz subtrahiert, was den aktuellen Industriestandard repräsentiert. Anschließend wurden alle sechs Schindeln entsprechend dieser Effizienz sortiert. Insgesamt konnte die Sortiergenauigkeit durch das empirische Modell um 13.6 %_{abs} erhöht werden. Für jede einzelne Binklasse sind die Ergebnisse in Abbildung 38 zu sehen. Auf der y-Achse ist der jeweilige relative Anteil an Schindelzellen aufgetragen. Für jede Binklasse gehören die jeweils linken Balken zum Referenzverfahren und die rechten Balken zum bildbasierten Modell. Die korrekt klassifizierten Schindelzellen sind in grün dargestellt, während die übrigen Farben anzeigen, was die nach Schindelzellmessung eigentlich korrekte Binklasse wäre. Wie zu erkennen ist, erhöht sich für jede der betrachteten Binklassen die Sortiergenauigkeit. Es ist darüber hinaus zu sehen, dass etwa 12 % mehr Schindelzellen durch das bildbasierte Modell korrekt aussortiert werden.

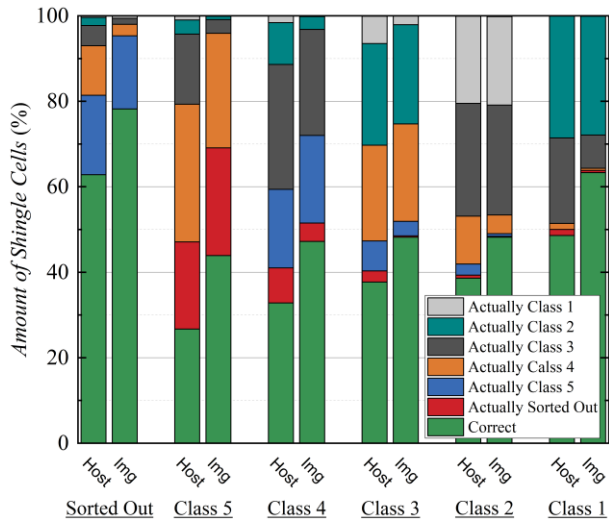


Abbildung 38: Binning-Genauigkeiten der Referenzmethode auf Basis der gemittelten Host-Messung (linke Balken) und des empirische Modells zur Einzelschindelvorsage (rechte Balken).

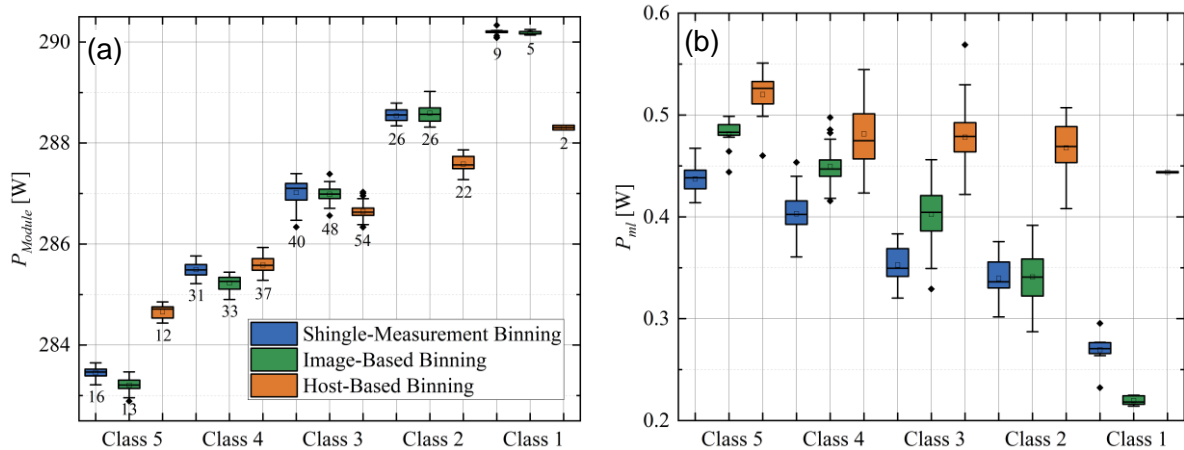


Abbildung 39: (a) Ausgangsleistung und (b) Mismatch-Verluste der Module basierend auf Modulsimulationen.

In Modulsimulationen wurde das Binning basierend auf Schindelzellmessungen (als Referenz), dem bildbasierten Ansatz und dem bisherigen Host-IV-basierten Ansatz miteinander verglichen. In Abbildung 39 (a) sind die Ausgangsleistungen der simulierten Module P_{Module} als Boxplot für die einzelnen Klassen und Sortieransätze dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Ansätze der Schindelmessungen (blau) und des bildbasierten Ansatzes (grün) pro Binklasse ähnlich verhalten. Anhand der unter den Boxen zu sehenden Zahlen, der Anzahl von simulierten Modulen dieser Klasse, ist auch zu erkennen, dass ähnlich viele Module der jeweiligen Klasse gebaut würden. Im Gegensatz dazu ist die Leistungsverteilung des rein Host-IV-basierten Ansatzes über die Klassen enger, sodass die Leistungsunterschiede zwischen den Klassen geringer sind. Auch hat die beste Klasse etwa 2 W weniger Leistung als durch die beiden anderen Ansätze.

Auch bezüglich der Mismatch-Verluste zeigen das schindelmessbasierte und das bildbasierte Binning ein ähnliches Verhalten. In Abbildung 39 (b) sind die Mismatch-Verluste P_{ml} über den Klassen aufgetragen. Mismatch-Verluste entstehen durch die Unähnlichkeit der in einem Modul verbauten Zellen, werden also durch ein besseres Binning reduziert. Es ist zu erkennen, dass diese für die Schindelmessungen (blau) und den bildbasierten Ansatz (grün) geringer sind verglichen mit dem hostbasierten Ansatz (orange). Auch ist zu sehen, dass die Mismatch-Verluste beim hostbasierten Ansatz etwa konstant bleiben für alle betrachteten Klassen, während sie bei den anderen beiden Ansätzen mit zunehmender Leistung der Klassen geringer werden.

IV-Kurven Resultate: Das Netzwerk kann die IV-Kurven jeder der 6 Schindeln pro Host-Zelle akkurat vorhersagen. Abbildung 40 zeigt die gemessenen (gestrichelt) und durch das Modell berechneten (durchgezogen) JV-Kurven für zwei Beispielschindeln. In (d) ist das EL Bild der zugehörigen Hostzelle zu sehen. Die betrachteten Schindeln A und B sind in orange bzw. grün hervorgehoben. Schindelzelle A ist eine Randzelle und hat einen dunklen Bereich am rechten Rand, was ihre Qualität reduziert, während Schindel B homogen scheint und defektfrei aussieht. In (a) sind die gesamten JV-Kurven zu sehen, während in (b-c) vergrößert die Regionen des Kurzschlussstroms J_{sc} und der Leerlaufspannung V_{oc} dargestellt sind. Insgesamt stimmen die gemessenen und vorhergesagten JV-Kurven gut überein. Für die Region um J_{sc} in (b) werden die Messungen leicht unterschätzt. Im Bereich um V_{oc} in (c) stimmen die Kurven für Schindelzelle A überein. Für Schindelzelle B wird die Kurve leicht unterschätzt mit einem Fehler von etwa 0.5 mV. Der für die Schindelzelle vorhergesagte V_{oc} Wert liegt dennoch näher am tatsächlich gemessenen Wert als dem aus der Host-JV-Kurve ermittelten Wert, welche in blau dargestellt ist. Entsprechendes gilt für die JV-Kurven in diesem Bereich.

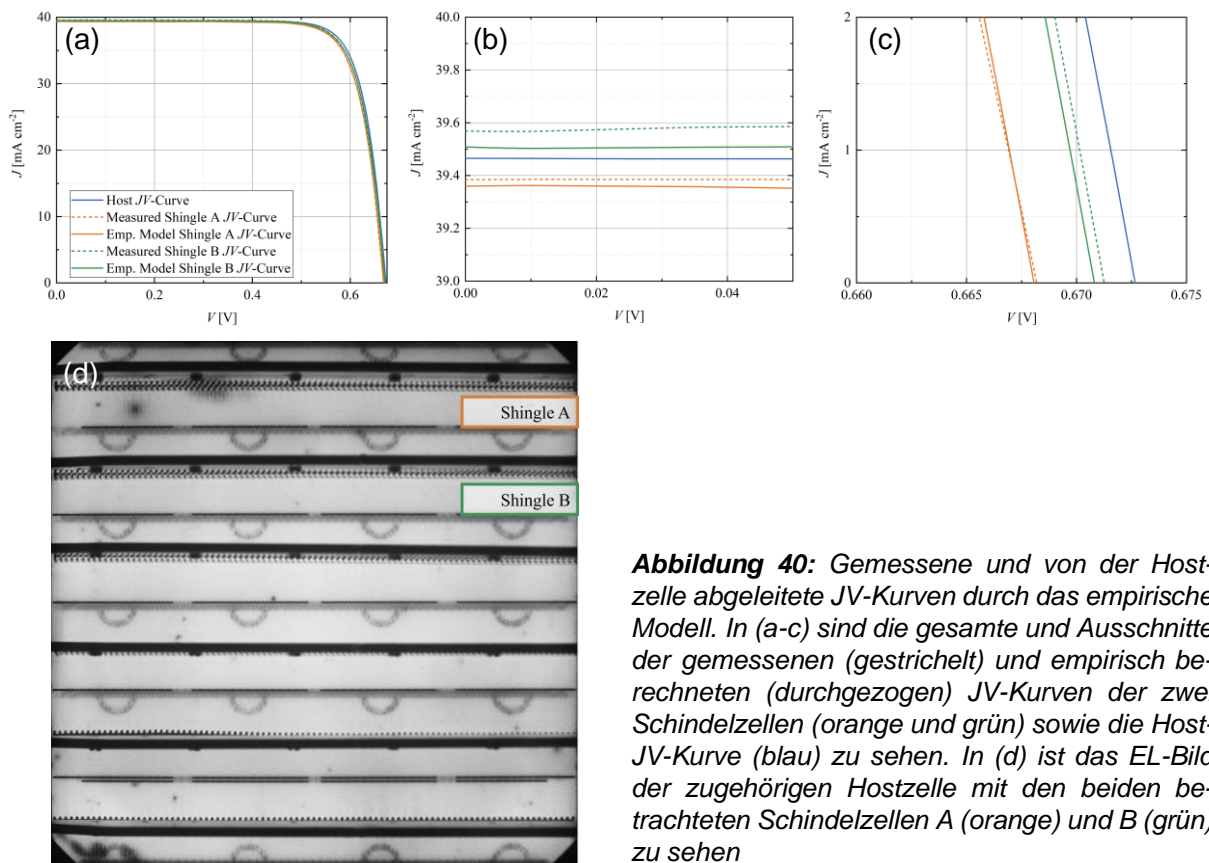


Abbildung 40: Gemessene und von der Hostzelle abgeleitete JV-Kurven durch das empirische Modell. In (a-c) sind die gesamte und Ausschnitte der gemessenen (gestrichelt) und empirisch berechneten (durchgezogen) JV-Kurven der zwei Schindelzellen (orange und grün) sowie die Host-JV-Kurve (blau) zu sehen. In (d) ist das EL-Bild der zugehörigen Hostzelle mit den beiden betrachteten Schindelzellen A (orange) und B (grün) zu sehen

Fazit: Das empirische Modell ist geeignet, um aus Hostmessungen die Qualität der Schindeln mit hoher Genauigkeit zu ermitteln, was interessant für Forschung und Industrie ist. Die Genauigkeit der Wirkungsgradvorhersage befindet sich beispielsweise nahe der Messunsicherheit eines industrieüblichen IV-Testers. Das sorgt dafür, dass die Sortiergenauigkeit um ~13% erhöht werden kann, was Mismatch-Verluste im Modul reduziert. Zudem steigt der Anteil der korrekterweise aussortierten Schindelzellen um ~12%, was darauf hindeutet, dass weniger Defekt-/Ausschuss-Zellen in die Module eingebaut werden und die Materialausbeute erhöht wird, indem weniger „Gut“ Schindeln unnötig aussortiert werden. Die bisher erzielten Ergebnisse werden auf der EU-PVSEC 2023 in einem Vortrag vorgestellt und in Progress in Photovoltaics veröffentlicht [14]. Das Paper befindet sich gerade im Peer-Review-Prozess.

Ausblick: Aufbauend auf diesen vielversprechenden Ergebnissen, sollte im Rahmen von Nachfolgeprojekten u.a. (i) die Robustheit des Verfahrens hinsichtlich der Defektzellen-Identifikation untersucht (einschließlich Sicherheitsbewertung), (ii) die möglichen Materialeinsparung quantifiziert, (iii) induzierte Zusatzfehler bei der Vereinzelung durch Hinzunahme einer schnellen Schindel-PL-Messung abgefangen und (iv) Sortiermimiken nach Vereinzelung entwickelt werden. Neben diesen weitergehenden Validierungen und Optimierungen des Verfahrens zur Steigerung des TRL sollte es (a) für höhereffizientere Zellkonzepte (wie z.B. TOPCon, HJT, Tandem) und (b) für Schindelzellen mit Kantenpassivierung weiterentwickelt werden. Angesichts des Potentials und der zunehmenden Bedeutung der Schindelkonzepte allesamt lohnende Fragestellungen.

3.1.4 AP2.4 Trennung von Vorder-/Rückseiten-Effekten in Bifazialzellen

A. Bereitstellung eines Probensatzes aus der laufenden Produktion

Für die messtechnischen Entwicklungen zur Trennung von Vorder-/Rückseiten-Effekten in Bifazialzellen wurde von HEVEL ein Probensatz von ca. 110 aussortieren und nach Defektart klassifizierten Ausschusszellen am ISE bereitgestellt und am ISE umfassend charakterisiert. Zusätzlich wurden auch die Zellen aus dem umfangreichen Probensatz für das AP 3 für die Analysen verwendet, die nicht als defekt klassifiziert waren.

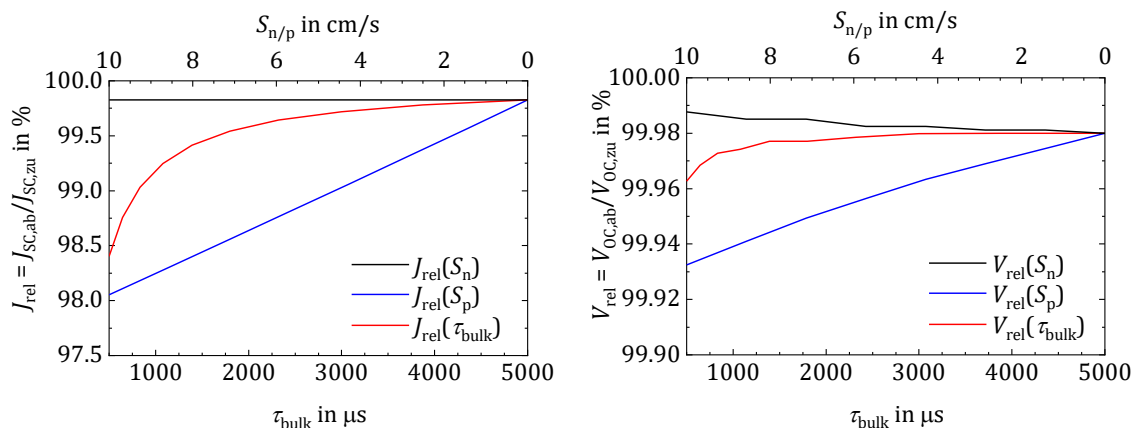
B. Verfahren zur Trennung von Rekombinationseffekten basierend auf *IV*-Messungen

Auf Basis von PC1D wurden Simulationen mit einer Variation von Vorder-, Rückseiten-Rekombinationsgeschwindigkeit und Bulk-Lebensdauer durchgeführt. Dabei wurde eine Beleuchtung von der Vorder- und Rückseite berücksichtigt. Die Auswirkungen der Variation der Rekombinationsparameter auf verschiedene Beobachtungsparameter der *IV*-Kennlinie (J_{SC} , V_{OC} , FF , P_{max}) und deren Verhältnis zwischen Vorder- und Rückseitenbeleuchtung, z.B.

$$J_{rel} = J_{SC,abgewandt} / J_{SC,zugewandt}$$

wurden untersucht (Abbildung 7). Die simulierten Daten (z.B. J_{rel}) wurden mittels empirischer Funktionen modelliert.

Indem für zwei Beobachtungsparameter die Verhältnisse betrachtet werden (z.B. J_{rel} und V_{rel}), kann ein Gleichungssystem bestimmt werden, mit dem die Rekombinationsparameter S_p und τ_{bulk} der Simulation rekonstruiert werden können. Da die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit S_n auf der Emitterseite in den Simulationen nur einen geringen Einfluss auf die Beobachtungsparameter aufweist, ist eine Rekonstruktion schwierig, in der Theorie aber über einen dritten Beobachtungsparameter möglich.



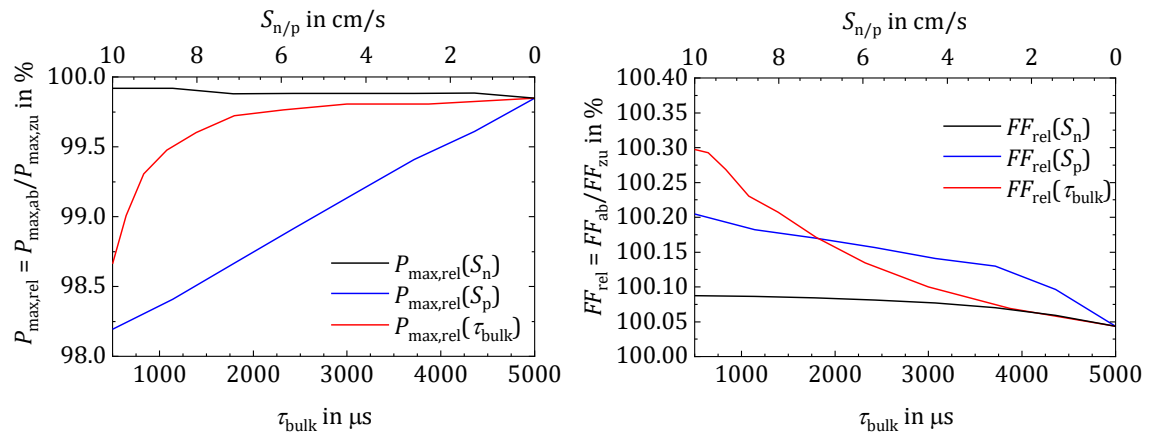


Abbildung 41: Verhältnis der Beobachtungsgrößen J_{sc} , V_{oc} , FF und P_{max} zwischen Vorder- und Rückseitenbeleuchtung unter Variation der drei Rekombinationsparameter S_n (Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit), S_p (Vorderseitenrekombinationsgeschwindigkeit) und τ_{bulk} (Volumenlebensdauer), wobei immer nur ein Parameter variiert wurde und die jeweils anderen auf folgenden Werten fixiert wurden: $S_n = 0$ cm/s, $S_p = 0$ cm/s, $\tau_{bulk} = 5000$ μs .

C. Verfahren zur Trennung von Rekombinationseffekten basierend auf SR-Messungen

Über die bifaziale Messung hinaus, bietet auch die interne Quanteneffizienz (IQE) zusätzliche Informationen über die Bauelemente. Um die IQE zu berechnen, müssen die spektrale Empfindlichkeit (engl. spectral response, SR) und die Reflektivität gemessen werden. Mittels analytischer Gleichungen wurde die IQE berechnet und die daraus resultierenden Gleichungen zu semi-empirischen Modellen vereinfacht. Abbildung 41 zeigt die IQE bei den Wellenlängen 390 nm und 950 nm in Abhängigkeit von den Rekombinationsparametern S_p und τ_{bulk} .

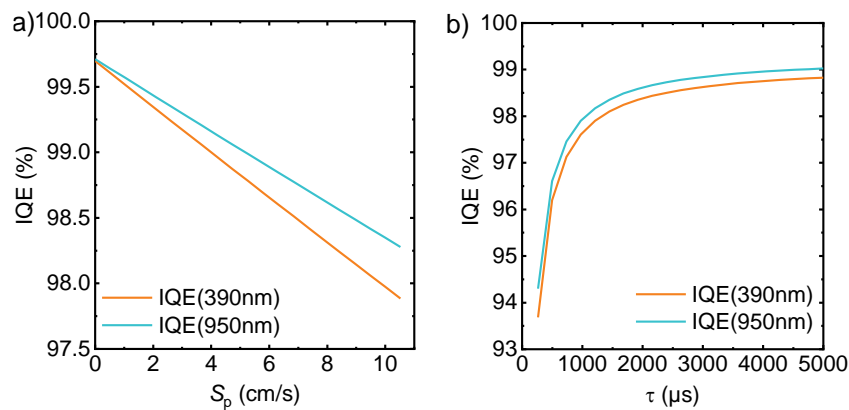


Abbildung 42: Simulierte Abhängigkeit der internen Quanteneffizienz IQE bei 390 nm und 950 nm von (a) der vorderseiten Oberflächenrekombination S_p und (b) der Volumenlebensdauer τ_{bulk} . Bei beiden Abbildungen wurde der jeweils andere Wert als optimal angenommen.

D. Anwendung der entwickelten Verfahren auf den bereitgestellten Probensatz

Die Anwendung der entwickelten Ansätze in der Praxis stießen auf mehrere Hindernisse. Zum einen liegen die Beobachtungsparameter alle bei nahe 100%, da die absoluten Unterschiede sehr gering sind. Damit liegen diese teilweise im Bereich der Messunsicherheit, was eine präzise Auswertung stark erschwerte. Zum anderen hängen die (semi-)empirischen Formeln zusätzlich von weiteren Zellparametern, wie der Dicke oder der Dotierung, ab. Hierdurch wird eine Anpassung der Modelle für jede individuelle Zelle oder zumindest Produktionsreihe notwendig.

Die Modelle basierend auf Vorder- und Rückseiten-Beleuchtung zur Trennung von Rekombinationseffekten wurden auf die von HEVEL bereitgestellte Charge von HJT-Zellen angewandt. Hierbei wurden die als Ausschuss-Zellen deklarierten Zellen gesondert behandelt. Abbildung 42 zeigt für unterschiedliche Beobachtungsparameter die Verteilungen der Quotienten der Werte bei vorderseitiger und rückseitiger Beleuchtung unter STC-Bedingungen, z.B. für den Kurzschlussstrom $J_{rel} = J_{SC,abgewandt}/J_{SC,zugewandt}$.

Hierbei zeigen sich bereits zwei Probleme, die sich bei der Messung gegenüber der Theorie und den simulierten Zellen ergeben. Zum einen weisen die guten Zellen (Klasse 1 und 11) und die schlechten Zellen (Ausschuss) Verteilungen auf, die sich in großen Bereichen überschneiden. Zum anderen sind die experimentellen Werte für J_{rel} größer als eins, was nicht den theoretischen Vorhersagen für eine ideale Solarzelle mit dem pn-Übergang auf der Rückseite entspricht. Dies liegt vermutlich begründet in unterschiedlichen Reflektivitäten und Metallisierungen auf Vorder- und Rückseite, die sich mit zusätzlichen Messungen ebenfalls in die Gleichungen integrieren ließen. Die Messung der Reflektivität auf der Zellrückseite ist jedoch keine Standardmessung.

Um einen minimalen Messaufwand zu gewährleisten, kann daher alternativ auch eine manuelle Skalierung der Ergebnisse erfolgen, sodass für alle Werte gilt $J_{rel} < 1$. Da diese Reskalierung jedoch nicht auf tatsächlich gemessenen Werten beruht, geht hierdurch die Exaktheit der Ergebnisse verloren. Es lassen sich jedoch weiterhin Trends in bestehenden Daten beobachten. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die berechneten Werte für S_p und τ_{bulk} nach wie vor die gleiche Einheit besitzen, aber um unbekannte Faktoren gestreckt und verschoben sind.

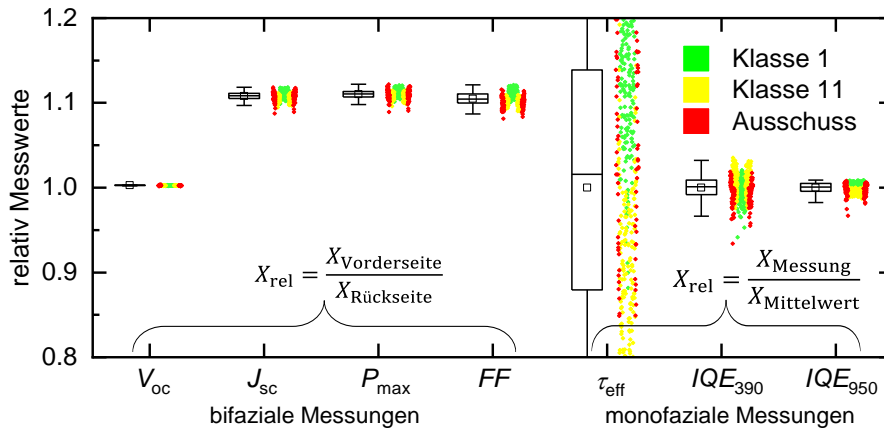


Abbildung 43: Verteilung möglicher Beobachtungsparameter zur Trennung von Rekombinationseffekten innerhalb einer Stichprobe aus drei Klassen der umfangreichen HEVEL-Charge. τ_{eff} wurde anhand der Hysterese der IV-Kennlinien bestimmt.

Neben den bereits erwähnten Leistungskennzahlen J_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF sowie der IQE bei 390 nm und 950 nm wurde für die weitere Auswertung zusätzlich die effektive Lebensdauer τ_{eff} herangezogen. Diese wird anhand der Hysterese bestimmt (Vahlman et al. 2018), die in AP2.5 behandelt wird, und ist von ähnlicher Genauigkeit wie Messungen anhand des Abklingens der Leerlaufspannung (Open-Circuit Voltage Decay, OCVD). Für die effektive Lebensdauer wird die vereinfachte Formel

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + 2 \frac{S}{d} \quad (1)$$

angenommen, wobei d die Dicke der Zelle ist. Die Gleichung unterscheidet dabei nicht zwischen Vorderseiten- und Rückseitenrekombination. Da jedoch während der Modellierung festgestellt wurde, dass die Rekombination auf der Zellrückseite (i.e. auf der Seite des pn-Übergangs) für den hier betrachteten Zelltyp von vernachlässigbarer Bedeutung ist, ist dies eine vertretbare Vereinfachung. Für J_{rel} wird folgende Modellgleichung zugrunde gelegt, die den Verlauf für S_p und τ_{bulk} aus Abbildung 41 im gesamten Parameterraum gut beschreibt:

$$J_{\text{rel}} = m S_p + \frac{b}{\tau_{\text{bulk}}} + c \quad (2)$$

Bei m , b und c handelt es sich dabei um Modellparameter, die ihrerseits von der Zelldicke abhängen. Durch Auflösen der ersten Gleichung nach τ_{bulk} und Einsetzen in die zweite Gleichung lässt sich somit für die Oberflächenrekombination S folgende Gleichung in Abhängigkeit von τ_{eff} und J_{rel} finden:

$$S(\tau_{\text{eff}}, J_{\text{rel}}) = \frac{d}{d m - 2 b} \left(J_{\text{rel}} - c - \frac{b}{\tau_{\text{eff}}} \right) \quad (3)$$

Dieser Wert für S kann anschließend wiederum in der ersten Gleichung eingesetzt werden, um die Volumenlebensdauer zu berechnen.

Aufgrund der Abhängigkeiten vom reskalierten Wert von J_{rel} ist zu bedenken, dass die berechneten Werte nicht mit den tatsächlichen, physikalischen Eigenschaften der Zelle identisch sind. Trends bleiben jedoch erhalten. Abbildung 44 zeigt die Verteilung der Stichprobe aus der Charge von HEVEL bestehend aus zwei Leistungsklassen (Symbolrand grün und gelb) und den Ausschusszellen (Symbolrand rot) im S - τ -Raum anhand der hier beschriebenen Gleichungen. Ein analoges Vorgehen ist auch mit weiteren Parameterkombinationen möglich.

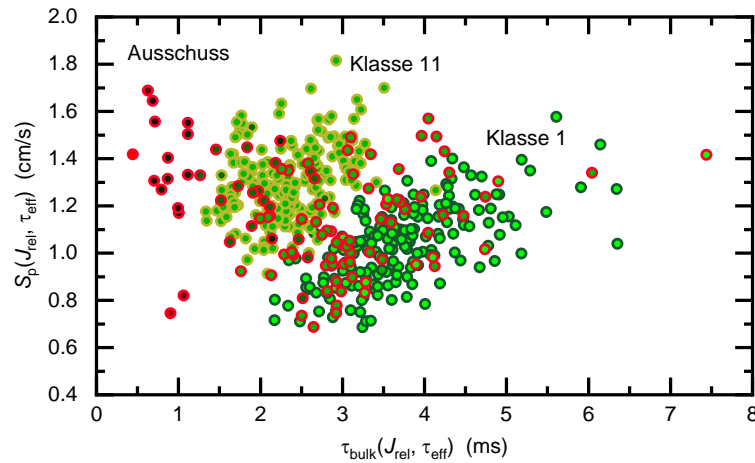


Abbildung 44: Separation von Oberflächenrekombination (Vorderseite) und Volumenlebensdauer mittels J_{rel} und τ_{eff} anhand einer Stichprobe der HEVEL-Charge. Die Ränder der Punkte sind nach Leistungsklasse der Zelle gefärbt (1: grün, 11: gelb, Ausschuss: rot). Die graduelle Füllfarbe der Symbole spiegelt die maximale Ausgangsleistung wider [von Rot (= sehr niedrig) über Schwarz (=niedrig) und Dunkelgrün (= mittel) nach Hellgrün (= hoch)].

Die beiden in der Stichprobe vorhandenen Klassen 1 (grüner Rand) und 11 (gelber Rand) lassen sich gut voneinander trennen. Die Ausschusszellen hingegen sind deutlich über beide Gruppen verteilt. Auffallend ist lediglich die Gruppe mit sehr niedriger Lebensdauer, welche mit außergewöhnlich niedrigem V_{oc} assoziiert werden kann. Viele Defekt-Klassifizierungen (z.B. Dunkle Stellen im EL oder PL Bild) lassen sich nicht direkt über eine schlechte Oberfläche oder eine schlechte Volumenlebensdauer erklären.

Die Verteilung der IQE bei den beiden Wellenlängen ist ebenfalls in Abbildung 43 (rechts) gezeigt. Die Werte wurden dabei jeweils auf den Mittelwert der gesamten Stichprobe normiert. Anhand der Messungen bieten sich verschiedene Ansätze. Es können wie bei den bifazialen Messungen Differenzen und Verhältnisse von Messungen bei 390 nm und 950 nm betrachtet werden. Da die erwarteten Unterschiede jedoch sehr klein ausfallen, ist hier aufgrund von Messunsicherheiten wenig Informationsgehalt zu erwarten. Hinzu kommt, dass die erwarteten Werte für $IQE(390 \text{ nm})$ erheblich von den gemessenen Werten abweichen (Erwartet ~99%, gemessen ~74%). Dies liegt vermutlich an zusätzlichen parasitären Effekten, die in den analytischen Gleichungen nicht berücksichtigt wurden. Entsprechend scheint es sinnvoller, nur die IQE bei 950 nm zu betrachten und mit anderen Messungen (J_{rel} , τ_{eff}) zu verknüpfen.

Die Verknüpfung von $\text{IQE}(950\text{nm})$ mit der effektiven Lebensdauer τ_{eff} ist in Abbildung 45 gezeigt. Erneut sind die Gruppen gut unterscheidbar zu erkennen. Die auffallend andere Skalierung der Achsen liegt an der bereits erwähnten Reskalierung, die bei J_{rel} notwendig war. Im Vergleich zu Abbildung 44 zeigt sich mittels der IQE auch eine zusätzliche Gruppe von Ausschusszellen separiert von den übrigen Ausschusszellen, die eine hohe Ausgangsleistung (ähnlich zu Klasse 1 oder 11) aufweist und aus anderen Gründen ausgesondert wurde.

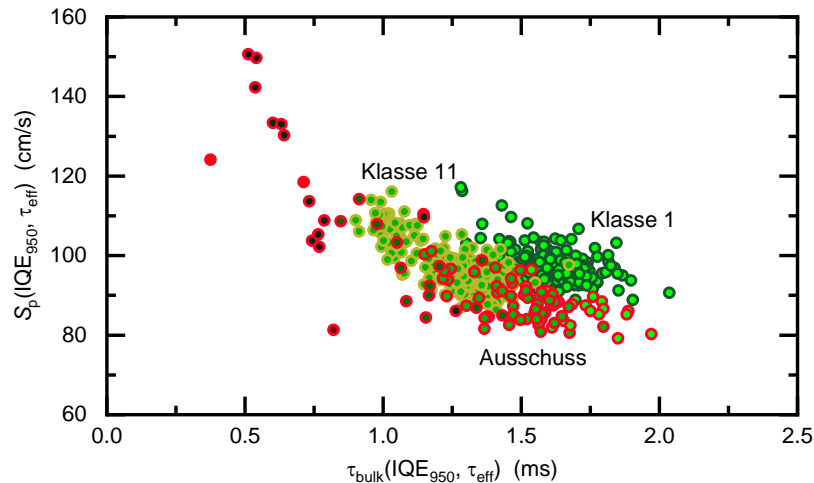


Abbildung 45: Separation von Oberflächenrekombination (Vorderseite) und Volumenlebensdauer mittels $\text{IQE}(950\text{ nm})$ und τ_{eff} anhand einer Stichprobe der HEVEL-Charge. Die Ränder der Punkte sind nach Leistungsklasse der Zelle (1: grün, 11: gelb, Ausschuss: rot). Die graduelle Füllfarbe der Symbole spiegelt die maximale Ausgangsleistung wider [von Rot (= sehr niedrig) über Schwarz (=niedrig) und Dunkelgrün (= mittel) nach Hellgrün (= hoch)].

Es lässt sich also sowohl mit bifazialen Messungen als auch mit der Messung der spektralen Empfindlichkeit eine teilweise Trennung von Rekombinationseffekten in Oberflächenrekombination und Volumenrekombination erzielen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass keine exakten Werte bestimmt wurden, jedoch Trends innerhalb einer Charge sichtbar gemacht werden konnten. Hinsichtlich einer noch klareren Trennung der Rekombinationseinflüsse an den Oberflächen und im Volumen, besteht weiterer Forschungsbedarf, um bei vorhandenen Defekten eine bessere Zuordnung zu einer möglichen Ursache machen zu können.

3.1.5 AP2.5 Korrekturverfahren für IV-Messungen von hochkapazitiven Bifazialzellen

A. Bestehende Hysterese-Korrekturverfahren

Zunächst wurde der aktuelle Stand der Literatur recherchiert, der hier zusammengefasst wird. 2014 haben Klaus Ramspeck *et al.* ein Verfahren vorgestellt, das nur auf gemessenen Kennliniendaten basiert, bei dem insbesondere induktive Effekte in den Kabeln zwischen Solarzelle und Messgerät berücksichtigt werden [11]. Dabei werden jedoch keine Details über das Verfahren preisgegeben. Sinton *et al.* beschreiben ein Verfahren, mit dem die Hysterese-Effekte korrigiert werden, indem die korrigierte IV -Kennlinie aus den von Kurzschluss zu Leerlauf und umgekehrt gemessenen Hellkennlinien berechnet wird [15]. Das Verfahren setzt die Kenntnis des Serienwiderstands voraus. Für dieses Verfahren besteht kein Patentschutz, es ist frei verfügbares Wissen. Weitere Ansätze brauchen mehr als einen Blitz und angepasste „Dragon-Back“-Spannungsprofile. Kerr *et al.* beschreiben ein Verfahren [16], mit dem kapazitive Artefakte in $\text{suns}V_{\text{oc}}$ -Kennlinien [17] korrigiert werden, wobei die Waferdicke und Basisdotierung bekannt sein müssen. Ein Patent von Ronald Sinton (US 2014 033319 AA [12], erteilt in USA, sonst nirgendwo angemeldet) beschreibt ein Verfahren, um aus transienten IV -Messungen die Basisdotierung zu bestimmen. Es verlangt unter anderem eine variierende Lichtintensität, während die Zelle im Kurzschluss gehalten wird. Während der Projektlaufzeit wurde von

Ramspeck *et al.* ein Verfahren zur Bestimmung der Basisdotierung vorgestellt [18], das auf der korrigierten IV -Kennlinie und der von Kurzschluss zu Leerlauf gemessenen IV -Kennlinie basiert. Aus der Stromdifferenz der beiden Kennlinien und der jeweiligen Spannung wird die Basisdotierung berechnet. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die so bestimmte Basisdotierung entlang der Kennlinie scheinbar variiert, jedoch in einem ausreichend großen Spannungsbereich konstant ist, wo die Basisdotierung letztlich ausgelesen wird.

B. Konzeptionierung eines neuen Hysterese-Korrekturverfahrens

Basierend auf den genannten Publikationen wurde ein Verfahren ersonnen, das Hysterese-Effekte korrigiert und die Basisdotierung bestimmt. Es wird hier kurz skizziert, Details wurden publiziert in [19]. Zunächst werden die Strom-Spannungskennlinien $j(V)$ unter Beleuchtung von Kurzschluss zum Leerlauf und umgekehrt sowie die Kennlinien im Dunkeln von 0 bis 0.8 V und umgekehrt gemessen. Alle Kennlinien werden um etwaige Effekte auf Grund der Induktivität L in den Leitungen korrigiert:

$$V \rightarrow V_{ss} = V + \frac{dj}{dt} \cdot L$$

Eine Abschätzung der Induktivität erfolgt unabhängig vom Serienwiderstand für jede Zelle individuell anhand der Leerlaufspannungen der gemessenen Kennlinien gemäß:

$$L = \frac{V_{OC,SC \rightarrow OC} - V_{OC,OC \rightarrow SC}}{\left. \frac{dj}{dt} \right|_{OC,OC \rightarrow SC} - \left. \frac{dj}{dt} \right|_{OC,SC \rightarrow OC}}$$

Dann wird der Serienwiderstand aus dem Vergleich von Hell- und Dunkelkennlinie wie üblich für den Punkt maximaler Leistung (mpp) berechnet, wobei die von 0 bis 0.8 V gemessenen Kennlinien verwendet werden:

$$R_s = \frac{V_{dark}(j = j_{sc} - j_{mpp}) - V_{mpp}}{j_{sc}}$$

Zusätzlich kann eine zusätzliche Korrektur des Serienwiderstandes (Dicker 2003) verwendet werden, für eine genauere Bestimmung. Mit dem Serienwiderstand wird von den gemessenen Spannungen auf die Spannungen am pn-Übergang umgerechnet:

$$V_{pn} = V_{ss} + j \cdot R_s$$

Die Hellkennlinien aus Strom und Spannung am pn-Übergang $j(V_{pn})$ werden mit einem Schätzwert für die Basisdotierung N_b nach Kerr et al. (Sinton und Cuevas 2000) in einer generalisierten Stromdichte um Hysterese-Effekte korrigiert:

$$j \rightarrow j_{ss} = j + \frac{q \cdot d \cdot n_i^2 \cdot \exp\left(\frac{V_{pn}}{V_t}\right)}{V_t \cdot \sqrt{N_b^2 + 4 n_i^2 \cdot \exp\left(\frac{V_{pn}}{V_t}\right)}} \cdot \frac{dV_{pn}}{dt}$$

Die tatsächliche Basisdotierung wird so ermittelt, dass beide Hellkennlinien, die von Leerlauf zum Kurzschluss und die umgekehrt gemessene, identisch sein müssen.

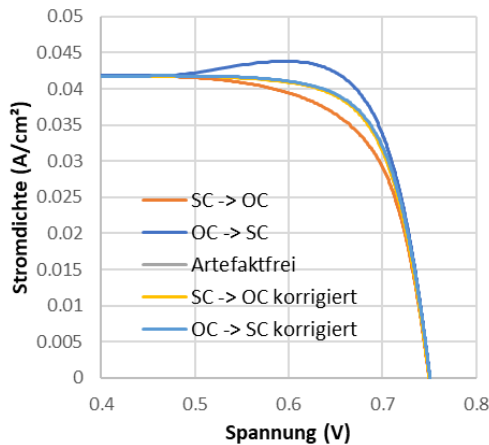


Abbildung 46: Ausschnitt aus den simulierten IV-Kennlinien einer fiktiven Heterojunction-Solarzelle. Die Rohdaten, wie sie in 40 ms gemessen wurden, sind für beide Messrichtungen (Kurzschluss nach Leerlauf = „SC -> OC“ und umgekehrt) dargestellt. Ebenso die quasistatisch und somit artefaktfrei gemessene Kennlinie. Die mit dem hier skizzierten Verfahren korrigierten IV-Kennlinien decken sich miteinander und mit der artefaktfreien Kennlinie.

Dieses Verfahren wurde im Berichtszeitraum anhand von mit PC1Dmod simulierten Messdaten einer fiktiven Heterojunction-Solarzelle zunächst manuell erprobt. Die korrigierten IV-Kennlinien decken sich miteinander und mit der artefaktfrei gemessenen IV-Kennlinie, wie Abbildung 46 dargestellt. Der hier verwendete Serienwiderstand und die Basisdotierung stimmen identisch mit den in PC1Dmod angenommenen Werten überein.

Im nächsten Schritt wurde das Verfahren auf eine reale Messung manuell angewendet. Dazu wurden am h.a.l.m.-System am Fh-ISE die Kennlinien einer Heterojunction-Zelle von HEVEL vermessen und analysiert. Die Anpassung der Induktivität $L = 3 \mu\text{H}$ erfolgte hier noch manuell im Bereich oberhalb von 700 mV, die Basisdotierung wurden mittels Kapazitäts-Spannungsmessungen ermittelt, der Serienwiderstand wurde aus den IV-Kennlinien ermittelt. Wie in Abbildung 47 dargestellt, ergibt sich damit eine sehr gute Übereinstimmung der korrigierten Kennlinien miteinander. Dies zeigt, dass das Verfahren prinzipiell funktioniert.

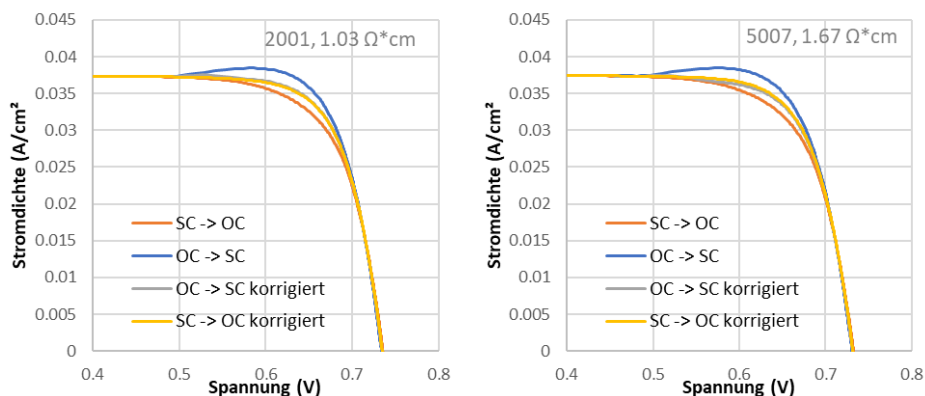


Abbildung 47: Ausschnitte aus den IV-Kennlinien zweier Heterojunction-Solarzellen von HEVEL mit Basiswiderständen von etwa 1.0 und 1.7 Ωcm . Die Rohdaten, wie sie in 40 ms gemessen wurden, sind für beide Messrichtungen (Kurzschluss nach Leerlauf = „SC -> OC“ und umgekehrt) dargestellt. Die mit dem hier skizzierten Verfahren korrigierten IV-Kennlinien decken sich nahezu miteinander.

C. Automatisierung und Optimierung an existierenden Zellen

Die Extraktion der Basisdotierung durch Angleichung der hysteresee-behafteten Hellkennlinien wurde in Python automatisiert und anhand einer Testcharge von 29 Heterojunction-Zellen optimiert.

Die Angleichung der beiden Hellkennlinien erfolgt durch Minimierung der Differenzfunktion $j_{\text{Diff}} = j_{\text{OC} \rightarrow \text{SC}} - j_{\text{SC} \rightarrow \text{OC}} = 0$. Da in der Generalisierung des Stromes neben der Basisdotierung auch die Zelldicke als Parameter auftritt, wurde zunächst eine Anpassung mit zwei freien Parametern angedacht. Die damit berechneten Basisdotierungen sind in Abbildung 48 links in schwarz gegen die Referenzwerte aus CV-Messungen aufgetragen.

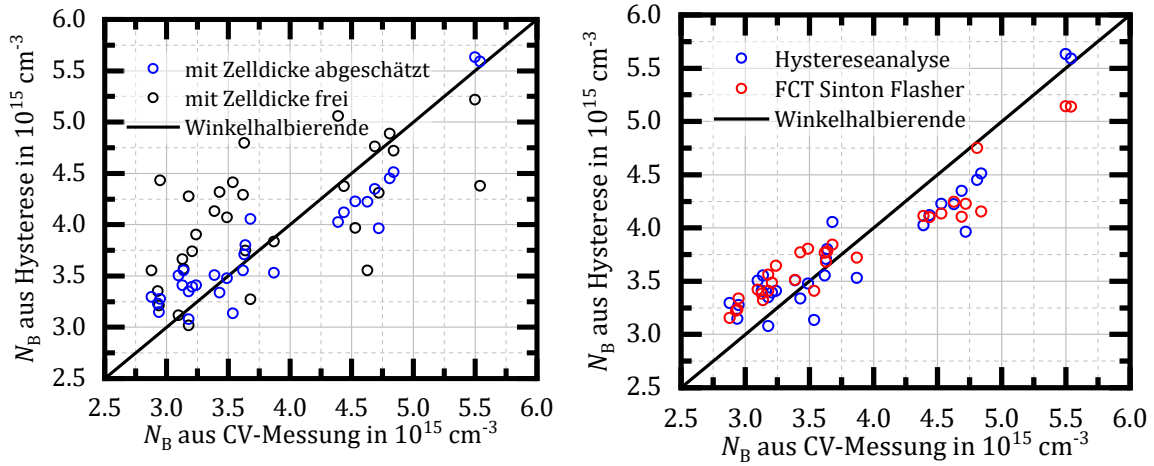


Abbildung 48: Basisdotierung N_B aus Hysterese-Analysen im Vergleich zu CV-Messungen (Winkelhalbierende). **Links:** Bestimmung der Basisdotierung mit Zelldicke als freiem Optimierungsparameter (schwarz) bzw. mittels anhand der Messdaten abgeschätzter Zelldicke (blau). **Rechts:** Vergleich der Basisdotierung aus der Hystereseanalyse mit abgeschätzter Zelldicke (blau, siehe Datensatz links) mit offline Vergleichsmessungen an einem Sinton FCT Flasher (rot).

Die erhebliche Streuung der Basisdotierung konnte auf die Kovarianz mit der Zelldicke zurückgeführt werden. Um dies zu umgehen, wird zunächst analytisch anhand von zwei Messpunkten (V_k, j_k) ein Schätzwert für die Zelldicke d bestimmt:

$$d = 2 \frac{V_t}{q} \sqrt{\frac{n_{i1}^2 \cdot \exp\left(\frac{V_1}{V_t}\right) - n_{i2}^2 \cdot \exp\left(\frac{V_2}{V_t}\right)}{\frac{\Delta \dot{V}_1^2}{\Delta j_1^2} n_{i1}^4 \cdot \exp\left(2\frac{V_1}{V_t}\right) - \frac{\Delta \dot{V}_2^2}{\Delta j_2^2} n_{i2}^4 \cdot \exp\left(2\frac{V_2}{V_t}\right)}}$$

Auf die gleiche Weise wird auch ein Ausgangswert für die Basisdotierung abgeschätzt, auf dessen Basis anschließend die Optimierung stattfindet:

$$N_B = 2n_{i1}n_{i2} \sqrt{\frac{\exp\left(\frac{V_1}{V_t}\right) \frac{\Delta \dot{V}_2^2}{\Delta j_2^2} n_{i2}^2 \cdot \exp\left(2\frac{V_2}{V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_2}{V_t}\right) \frac{\Delta \dot{V}_1^2}{\Delta j_1^2} n_{i1}^2 \cdot \exp\left(2\frac{V_1}{V_t}\right)}{\frac{\Delta \dot{V}_1^2}{\Delta j_1^2} n_{i1}^4 \cdot \exp\left(2\frac{V_1}{V_t}\right) - \frac{\Delta \dot{V}_2^2}{\Delta j_2^2} n_{i2}^4 \cdot \exp\left(2\frac{V_2}{V_t}\right)}}$$

Die nach der Abschätzung durch die Optimierung bestimmten Werte für die Basisdotierung sind in Abbildung 8 links in blau dargestellt und weisen mit einem mittleren Fehler von $3.08 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ eine deutlich geringere Abweichung von den Referenzwerten auf als ohne vorherige Abschätzung ($6.65 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$). Als geeignete Stellen für die Abschätzung konnten die Spannungen V_{mpp} und $V_{\text{mpp}} - 40 \text{ mV}$ identifiziert werden.

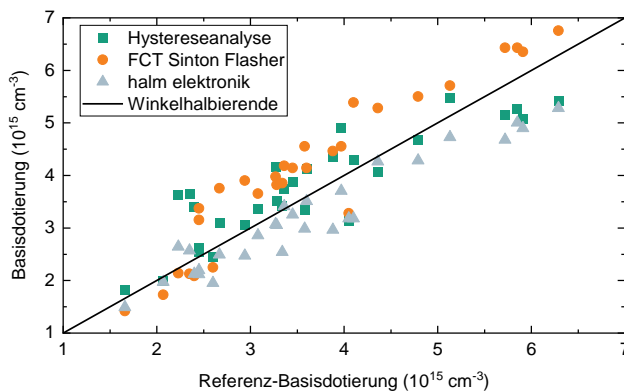


Abbildung 49: Verschiedene Methoden zur Bestimmung der Basisdotierung anhand von IV-Daten im Vergleich. Aufgetragen ist die Basisdotierung gegenüber dem Wert aus einer Kapazitäts-Spannungs (CV) Messung, die als Referenz dient (schwarze Linie, Winkelhalbierende).

Die Streuung der Messwerte nach diesem Verfahren ist vergleichbar mit denen des offline FCT Sinton Flasher (Abbildung 48, rechts). Die mittlere Abweichung der FCT Messwerte von den CV-Messwerten liegt bei $3.27 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Die Bestimmung der Basisdotierung aus der Hysterese ist also von ähnlicher Qualität wie die in kommerziell erhältlichen offline Messgeräten.

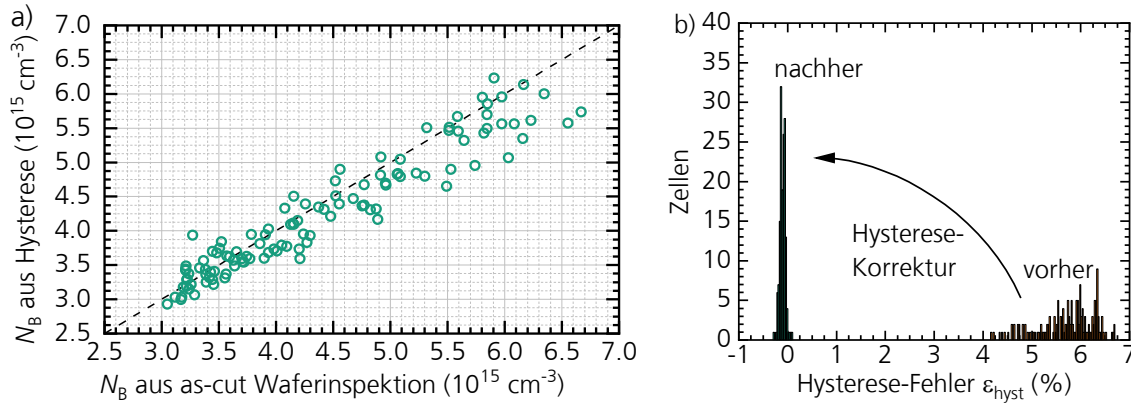


Abbildung 50: a) Vergleich der Basisdotierung N_B einer HJT-Charge mit mehr als 100 Solarzellen. Die anhand der Hystereseanalyse bestimmten Werte für die Basisdotierung (blaue Kreise) sind gegen die in der as-cut Waferinspektion ermittelten Werte (schwarze Gerade) aufgetragen. b) Reduktion des Hysteresefehlers durch Hysterese-Korrekturverfahren.

D. Vergleich von Verfahren zur Bestimmung der Basisdotierung

In einer Tests-Charge bestehend aus 29 bifazialen Heterojunction Solarzellen wurde die entwickelte Methode einem weiteren Vergleich mit kommerziell verfügbaren Systemen unterzogen. Hierfür wurde ein Sinton Flasher FCT 450 und die softwareseitig vorhandene Auswertung von halm Elektronik, die ebenfalls auf einer Hystereseanalyse basiert, verwendet. Die Resultate sind in Abbildung 49 dargestellt. Als Referenz werden Daten aus Kapazität-Spannungs (CV) Messungen verwendet.

Alle verglichenen Methoden weisen eine ähnliche Streuung um die Referenzwerte auf. Die mittlere quadratische Abweichung vom Referenzwert liegt bei $6.12 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (hier vorgestellte Hystereseanalyse [19]), $6.84 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (Verfahren im FCT 450 [20]) und $5.60 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (Verfahren von h.a.l.m. elektronik [18]). Die vorgestellte Methode zur Bestimmung der Basisdotierung ist also vergleichbar mit kommerziell verfügbaren Methoden, die teilweise parallel zum Projekt entwickelt wurden.

E. Verifikation der Korrektur und der Basisdotierungs-Best. auf SHJ und PERC

Zur weiteren Validierung des Verfahrens wurde eine Charge von mehr als 110 Heterojunction-Zellen verwendet, die zuvor nicht in der Optimierung eingesetzt wurde. Die Wafer wurden mit jeweils 40 ms pro Messrichtung gemessen. Die ermittelten Basisdotierungen (blau) sind in Abbildung 50a gegen Werte aus der as-cut Waferinspektion (schwarze Gerade) aufgetragen. Unser Verfahren schätzt die Basisdotierung etwas niedriger ein, weist jedoch eine gute Korrelation mit den experimentell bekannten Werten auf, was die Zuverlässigkeit und die Robustheit der Hystereseanalyse bestätigt. Die Qualität der Hysterese-Korrektur wird anhand der des Hysterese-Fehlers bestimmt:

$$\varepsilon_{\text{hyst}} = \frac{P_{\text{max,bw}} - P_{\text{max,fw}}}{P_{\text{max,bw}} + P_{\text{max,fw}}}$$

Abbildung 50b zeigt, dass durch das Korrekturverfahren, der Hysterese-Fehler von ca. 6% auf $<0.25\%$ reduziert werden konnte.

Zusätzlich zu SHJ Zellen wurde das entwickelte Verfahren auch auf PERC Zellen mit $V_{oc} < 700$ mV angewendet. Hierbei ergibt sich zunächst die Schwierigkeit, dass bei 40 ms Messdauer, kaum Hysterese zu beobachten ist, wodurch keine Korrektur notwendig ist, damit aber auch keine Bestimmung der Basisdotierung. Gleichzeitig ist es durch die geringe Hysterese-Anfälligkeit jedoch möglich, die Messdauer dramatisch zu reduzieren. Bei 6 ms pro Sweep (an der Grenze des Messsystems) können Hysterese-Effekte beobachtet und mit dem vorgestellten Verfahren erfolgreich korrigiert werden (Abbildung 51a). Eine Bestimmung der Basisdotierung erwies sich jedoch als schwieriger, da Basisdotierung und Dicke der PERC-Zelle nicht unabhängig bestimmbar zu sein scheinen. Für Chargen oder Produktionslinien besteht jedoch die Möglichkeit, eine vorher bestimmte Dicke als festen Wert anzunehmen. Dadurch verbleibt die Basisdotierung als einziger freier Parameter und kann zuverlässig bestimmt werden (Abbildung 51b).

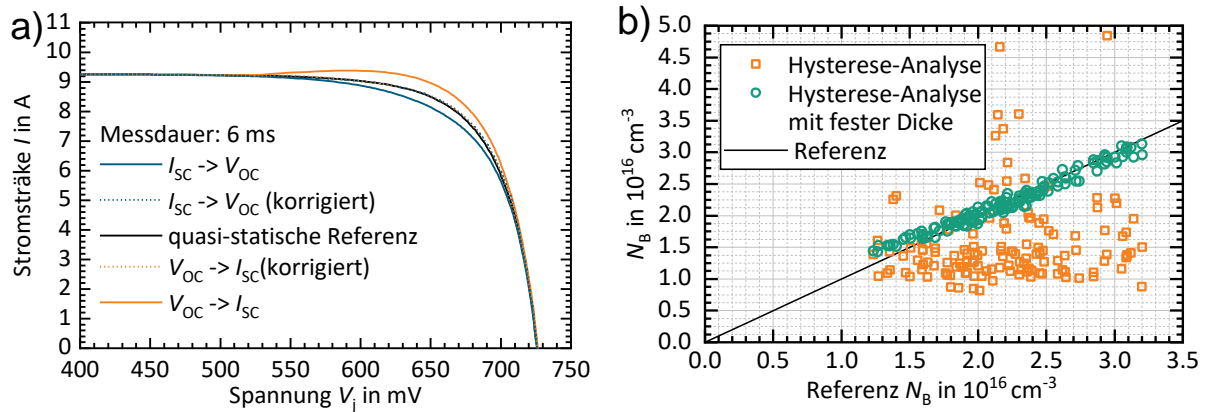


Abbildung 51: Hysterese-Effekte und deren Korrektur bei PERC Zellen ($V_{oc} < 700$ mV). **(a)** Hysterese-Effekte bei 6 ms Messdauer. Die korrigierten Kurven stimmen untereinander und mit der Referenz überein. **(b)** Bestimmung der Basisdotierung aus der Hysterese. Dicke und Basisdotierung können nicht unabhängig voneinander bestimmt werden, was zu einer großen Streuung führt (orangene Symbole). Durch die Annahme einer festen Dicke für eine Charge, kann die Basisdotierung zuverlässig bestimmt werden (grüne Symbole).

F. Optimierungen für sehr kurze Messdauern unterhalb von 10 ms für SHJ Zellen

Eine Reduktion der Messzeit bei SHJ Zellen mit $V_{oc} > 720$ mV zeigte zunächst keine prinzipiellen Probleme. Bis ca. 20 ms pro Messrichtung funktionieren sowohl die Korrektur der Hysterese als auch die Bestimmung der Basisdotierung zuverlässig. Abbildung 52a zeigt den Hysteresefehler ε_{hyst} in Abhängigkeit von der Messzeit für die ursprünglich verwendete lineare Lastrampe. Unterhalb von 20 ms ist ein starker Anstieg des Fehlers zu beobachten. Dies lässt sich durch zusätzliche Artefakte erklären, die in diesem Bereich auftreten, z.B. den Zusammenbruch der Messkapazität. Auch die Bestimmung der Basisdotierung wurde hierdurch erschwert, was zu größeren Fehlern in der Abschätzung führte.

Um dies zu umgehen, wurde eine nichtlineare Lastrampe eingeführt. Dabei wird die Spannung im Bereich der maximalen Leistung langsamer durchgefahren und im Bereich des Kurzschlussstromes und nahe der Leerlaufspannung schneller. Dadurch kann wertvolle Messzeit auf die empfindlichen Bereiche der IV-Kennlinie fokussiert werden. Gleichzeitig setzt dies jedoch eine grobe Kenntnis der Position von V_{mpp} voraus, weshalb eine eigene angepasste Lastlampe für verschiedene Zellkonzepte notwendig wird. Unter Verwendung der angepassten Lastlampe, ist der Hysterese-Fehler bereits ohne Korrektur geringer. Insgesamt konnte mit der nichtlinearen Lastrampe eine zuverlässige Hysterese-Korrektur (Abbildung 52b) bis zu einer Messzeit von 8 ms pro Richtung erzielt werden.

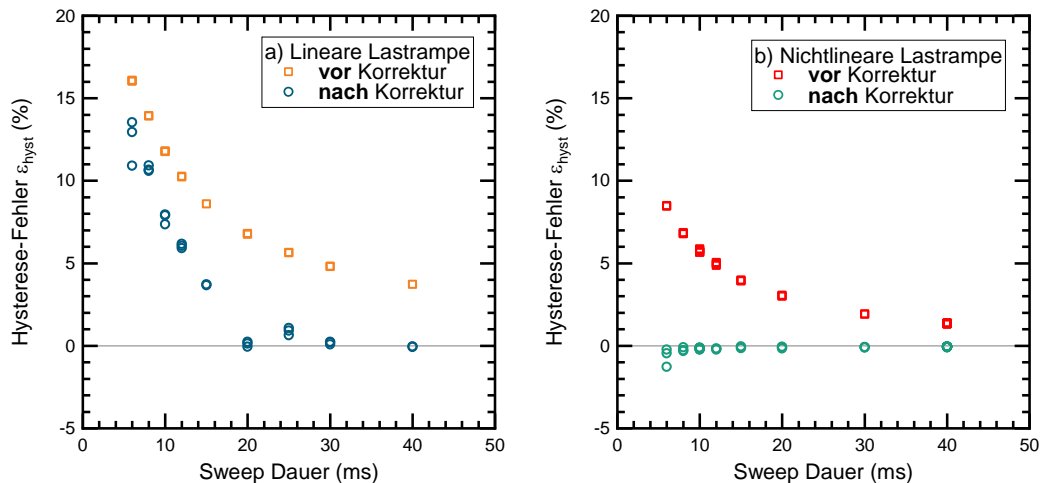


Abbildung 52: Einfluss der Messdauer auf die Hysteresekorrektur. **a) Lineare Lastrampe:** Unterhalb von 20 ms Messzeit pro Mess-Sweep kann die Hysterese nur noch unvollständig korrigiert werden und der Hysteresefehler bleibt weitgehend bestehen. **b) Nichtlineare Lastrampe:** Bereits vor Korrektur ist der Hysteresefehler stark reduziert. Die Hysteresekorrektur zeigt bis 8 ms eine hervorragende Korrektur. Bei 6 ms wird die Kennlinie etwas überkorrigiert.

3.2 AP3 Sortiervverfahren für Modulintegration

3.2.1 AP3.1 Inline-Analyse hochgradig bifazialer Zellen

A. Hocheffizienz-taugliche Wafermarkierung für den Solarzellenprozess von HEVEL

Eine Voraussetzung zur Sortierung der Solarzellen am ISE ist die Markierung der Zellen mit einer WaferID. Nach der Integration eines neuen Beschriftungslasers in den Wafereingangstester AWIS am ISE Anfang 2020 wurde der Lasermarkierungsprozess noch nicht hinreichend genau hinsichtlich seiner Prozessfähigkeit überprüft, weshalb der zu Projektbeginn verfügbare Markierungsprozess für den Einsatz in höchsteffizienten Heterojunction Solarzellen als unzureichend eingestuft werden musste.

Teil 1: Vorentwicklung des Codes

Folgende Kriterien müssen der Code und der zugrundeliegende Laserprozess erfüllen:

1. Lesbarkeit: Code in allen Prozessstadien lesbar
=> Code nicht zu flach, richtiges Aspektverhältnis Tiefe/Durchmesser der Codeelemente
2. Ablaufspuren: dürfen nach nasschemischen Prozessen nicht vorhanden sein
=> Laserprozess mit wenig Auswurf am Rand der Codeelemente
3. Schädigung: keine bis geringe Sichtbarkeit der Codes im PL-/EL-Bild
=> Laserprozess mit richtiger Laserfrequenz
4. Überdruckbarkeit: keine Fingerunterbrechungen nach Metallisierungsprozess
=> Code nicht zu tief

Nach umfangreichen Laserparametervariationen, bei denen über 200 verschiedene Codes am ISE untersucht wurden, konnten mehrere Laserparametersätze identifiziert werden, die den bis dato verwendeten Markierungsprozess in allen Bereichen übertreffen. In Abbildung 53 bis Abbildung 56 sind exemplarisch die Ergebnisse der Prozessentwicklung dargestellt.

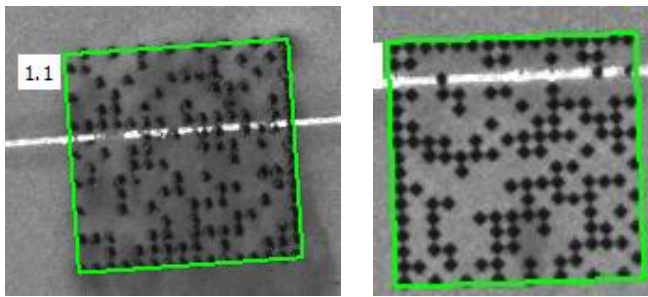


Abbildung 53: Erscheinungsbild (**links**) des alten Codes und (**rechts**) des neuen Codes „B8-P60-f50“ im Codereader des Zelltesters. Der neue Code weist ein deutlich homogeneres Erscheinungsbild und einen höheren Kontrast auf.

	Direkt nach Markierung	Nach alkalischer Textur
Code mit viel Auswurf		
Code mit wenig Auswurf		

Abbildung 54: (**Links**) Mikroskop Aufnahmen direkt nach Markierung (oben) eines ungeeigneten Codes mit viel Auswurf am Rand und (unten) eines geeigneten Codes mit wenig Auswurf. (**Rechts**) Form des jeweiligen Codes nach alkalischem Texturprozess mit (oben) ungleichmäßigen Konturen und (unten) quadratischer Form.

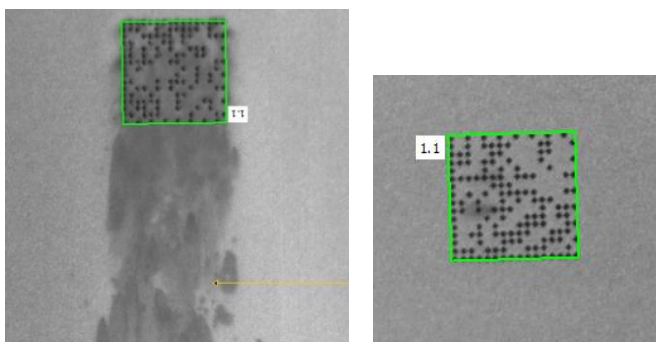


Abbildung 55: (**Links**) Der bisher verwendete Code zeigt starke Ablaufspuren nach dem (nicht optimalen) Texturprozess. (**Rechts**) Demgegenüber ist der neue Code B8-P60-f50 nahezu frei von Ablaufspuren.

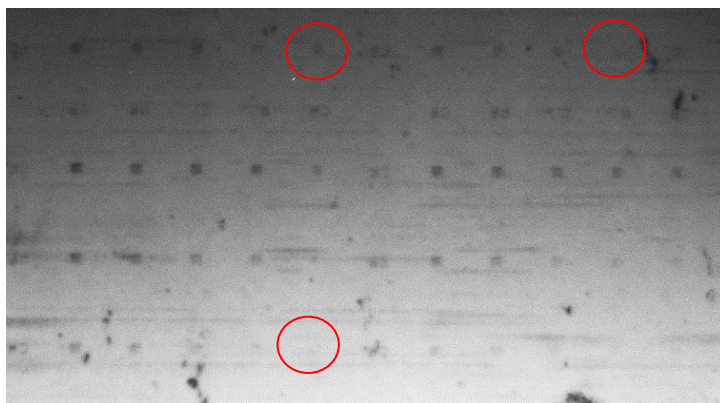


Abbildung 56: PL-Aufnahme eines Testwafers mit matrixartig angeordneten Codes einer systematischen Laserparametervariation nach Textur und Oberflächenpassivierung. Codes mit geringem Laserschaden weisen kaum Rekombination auf und sind damit im PL-Bild nur schwach sichtbar trotz guter optischer Sichtbarkeit im Codereader. Markiert sind Codes mit geringer Schädigung, die für weitere Untersuchungen bei HEVEL ausgewählt wurden.

Teil 2: Qualifizierung aussichtsreicher Code-Varianten auf Solarzellen

Um beim Lesen der Codes Redundanz zu gewährleisten, werden standardmäßig zwei DMC-Codes auf den Wafer aufgebracht. Da die Auswirkungen von zwei Codes auf einem Wafer im Vergleich zum statistischen Rauschen gering sind, wurden bei den Tests auch Wafer mit 100 und 400 Codes hergestellt, um den Einfluss der unterschiedlichen Laserprozesse auf den Solarzellenprozess bei HEVEL und die Leistungsdaten der hocheffizienten HJT-Solarzellen systematisch untersuchen zu können.

Insgesamt erfolgte die Qualifikation der Laserprozesse in zwei Stufen:

- **Stufe 1:** Vorqualifikation eines breiteren Spektrums an Laserprozessen hinsichtlich
 - Geometrie der Codestruktur (Strukturvermessung mittels Konfokalmikroskopie)
 - Lesbarkeit der Codestruktur (Lesetests mit Codereader in untersch. Prozessstadien)
 - Materialschädigung durch die Codestruktur (qualitative Photolumineszenz-Untersuchungen an bei HEVEL hergestellten Lebensdauerproben).
- **Stufe 2:** Finale Qualifikation der besten Laserprozesse aus den Voruntersuchungen in Stufe 1 anhand von IV und EL-Messungen an bei HEVEL hergestellten Solarzellen mit einer Variation der Codedichte, um eine quantitative Abschätzung der laserbedingten Materialschädigung zu ermöglichen.

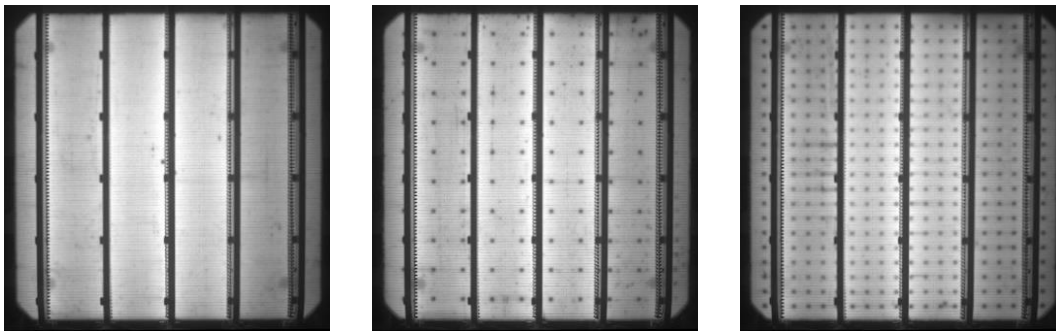


Abbildung 57: Elektrolumineszenzaufnahmen der verschiedenen Wafergruppen.

links: 2 DMC **mitte:** 10x10 DMC, **rechts:** 20x20 DMC

Variiert wurden im Rahmen der Vorqualifikation (Stufe 1) sowohl der Modus zur Erzeugung der einzelnen Codeelemente (Ringstrukturen erzeugt mit teilweise überlappenden Pulsen, Punktstrukturen erzeugt mit ortsfestem Mehrpulsprozess) als auch die zentralen Laserparameter (Leistung und Frequenz). Insgesamt schnitten die Prozesse mit punktförmigen Codeelementen („Burst“ Prozess) im Vortest besser ab als die Prozesse mit ringförmigen Codeelementen und zeigten gleichmäßigere Strukturen und geringere Laserschädigung. Dies liegt vermutlich daran, dass beim Mehrpulsprozess das abgetragene Material verdampft und kaum umgeschmolzen wird.

Da im Rahmen der Vorqualifikation (Stufe 1) für die Mehrpulsprozesse zwei verschiedene Laserparametersätze als besonders vielversprechend identifiziert wurden („Burst 4“, „Burst 6“), wurden für deren finale Qualifikation sechs Gruppen gebildet, die außer Gruppe 1 jeweils die Lasermuster aus Abbildung 57 enthielten:

- | | |
|-----------------------------------------------------------|---------------------|
| 1. Unmarkierte Referenzgruppe | |
| 2. „Alte“ Laserparameter | (2, 100, 400 Codes) |
| 3. Burst 4 | (2, 100, 400 Codes) |
| 4. Burst 6 | (2, 100, 400 Codes) |
| 5. Burst 6 auf Waferrückseite | (2, 100, 400 Codes) |
| 6. Burst 6 mit zusätzlicher alphanumerischer Beschriftung | (2, 100, 400 Codes) |

Insgesamt bestand das Experiment damit aus 16 Prozessgruppen mit jeweils 10 Wafern.

Da der Markierungsprozess für den Solarzellenprozess bei HEVEL qualifiziert werden sollte, wurde das gesamte Experiment auf von HEVEL Solar bereitgestellten as-cut Wafern (im M2+

Waferformat) durchgeführt, die nach der Lasermarkierung am ISE bei HEVEL Solar (Stufe 1) zu Lebensdauerproben mit beidseitiger a-Si Passivierung bzw. (Stufe 2) zu bifazialen HJT-Solarzellen verarbeitet wurden, wobei der Standard-Industrieprozess angewendet wurde.

Zurück am ISE wurden die Solarzellen IV-Tests (inkl. SunsVoc-Messung) unterzogen und so der Wirkungsgrad (η), die Leerlaufspannung (V_{OC}), die Kurzschlussstromdichte (j_{SC}), der Füllfaktor (FF), der Pseudo-Füllfaktor (pFF) und der ideale Füllfaktor (FF_0) ermittelt. Die DMC-Erfassung (Lesetests) wurde mit einer "Sensopart Visor V20" Inline-DMC-Kamera durchgeführt.

Lesbarkeit der Codes:

Die Versuche zur automatischen Lesbarkeit der Codes wurden immer an dem/den Code(s) in der Wafermitte durchgeführt. Die Gruppen mit zwei Mitten-Codes wurden getrennt von den 100er- und 400er-Codes ausgewertet, da letztere Gruppen nur einen Mitten-Code und somit keine Redundanz aufwiesen. Die Gruppe "Rückseitencode" wurde hier nicht berücksichtigt.¹ Die Ergebnisse der Lesetests sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Lesetests der Codes an den bei HEVEL hergestellten SHJ-Solarzellen (Qualifikat. Stufe 2)

Gruppe	Erfolgreiches Auslesen beim ersten Versuch (2 mittige Codes)	Erfolgreiches Auslesen beim ersten Versuch (1 mittiger Code)
Alter DMC	10 / 10	-
Burst 4	9 / 10	16 / 20
Burst 6	19 / 20	29 / 35

Die Lesetests zeigen, dass sich die Lesbarkeit der neuen Codes gegenüber der alten Variante kaum verändert hat und weiterhin sehr gut ist. Außerdem zeigt sich die Bedeutung des Redundanzcodes, durch den die Zahl der erfolglosen Leseversuche beim ersten Versuch um einen Faktor vier reduziert wird. Der Grund hierfür ist folgender: Um keine Anpassungen des Drucklayouts vornehmen zu müssen, wird das DMC-Layout (d.h. die Absolutpositionen der beiden DMCs auf dem Wafer) so auf den Fingerabstand des Drucklayouts abgestimmt wird, dass mindestens einer der beiden Codes von höchstens einem Metallisierungsfinger überdrückt wird und idealerweise einer der beiden Codes zwischen den Fingern liegt. Beim Überdrücken mit einem dünnen Finger reicht die inhärente Redundanz der Codestruktur zur Rekonstruktion der enthaltenen Information aus, beim Überdrücken mit zwei Fingern jedoch in der Regel nicht (bzw. nur, wenn die Finger sehr dünn sind). Das angepasste 2-DMC-Layout stellt daher schon durch die Codepositionierung trotz des unvermeidlichen Überdrückens der Codes eine gute Lesbarkeit sicher, was bei den beiden Layouts mit einem mittigen Code nicht gewährleistet ist und somit die schlechteren Leseraten erklärt.

Im Vorgriff auf das finale Experiment an 6400 Wafern sei hier bereits erwähnt, dass die Leseraten mit dem 2-DMC-Layout, das gemäß des obigen Kriteriums auf das Drucklayout von HEVEL abgestimmt wurde, und den Codestrukturen, die mit dem final ausgewählten „Burst-6“ Prozess erzeugt wurden, bei nahezu 100% lagen, was die Eignung des entwickelten Prozesses unterstreicht.

Schädigungsergebnisse:

Die folgenden Grafiken zeigt die Leistungsparameter der Solarzellen in Abhängigkeit von der Anzahl der Lasermarkierungen (2, 100, 400 Codes) und der Art der Lasermarkierung. Die hellblaue Gruppe in der linken Spalte ist die Referenzgruppe ohne jeden Markierungsprozess. Der ehemalige Standard-DMC am Fraunhofer ISE wird als „alter DMC“ bezeichnet. Die besten

¹ Die automatisierte Ansaugung der Wafer verursachte Vibrationen an der hinteren DMC-Kameraposition, die zu unscharfen Bildern führten. Es war nicht möglich, dieses Problem direkt zu beheben.

Kandidaten aus dem Vortest, „Burst 4“ und „Burst 6“, sind als nächstes eingezeichnet, gefolgt von Burst 6 auf der Rückseite („Burst 6 R“) und Burst 6 mit einem zusätzlichen alphanumerischen Code („Burst 6 #“).

Werden nur zwei Code-Instanzen gelasert (linke Box jeder Farbe), führt keines der Laserrezepte zu einem Effizienzverlust von $\Delta\eta > 0,05\%$, was im Vergleich zu den gruppeninternen Schwankungen von $\Delta\eta \approx 0,2\%$ unbedeutend ist. Bei einer größeren Anzahl von Codes treten größere Unterschiede zwischen den Laserrezepten auf. Der „alte DMC“ verursacht eindeutig den größten Verlust mit $\Delta\eta \approx 0,6\%$ für 100 Codes und $\Delta\eta \approx 2,1\%$ für 400 Codes. Der am wenigsten schädliche Code scheint „Burst 6“ zu sein, der selbst bei 400 Codes nur zu einem Verlust um $\Delta\eta \approx 0,3\%$ führt, gefolgt von „Burst 6 #“ mit dem zusätzlichen alphanumerischen Code ($\Delta\eta \approx 0,4\%$ bei 400 Codes). „Burst 4“ folgt auf dem nächsten Platz gefolgt von „Burst 6 R“, der sich auf der Zellrückseite befindet und damit auf der Seite mit Emmitter.

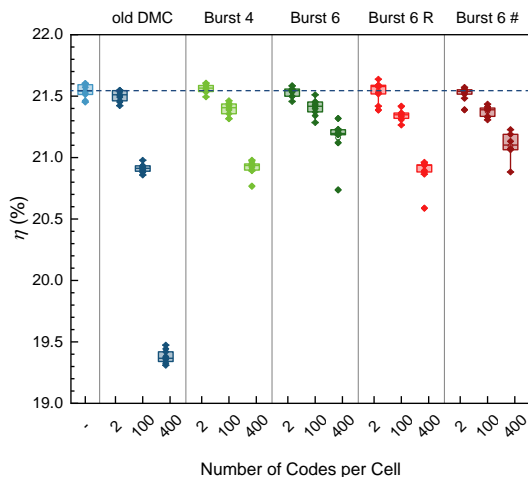


Abbildung 58: Effizienz-Ergebnisse für verschiedene Arten von DMC-Lasermarkierungen in Abhängigkeit von der Anzahl an Codes auf der Zelle. Die Gruppengröße je Box beträgt 7-10 Solarzellen.

Die anderen, im Folgenden gezeigten, Strom-Spannungs-Parameter geben mehr Aufschluss über die Art der durch die Laserbeschriftung entstandenen Schäden.

Bei der Betrachtung von V_{OC} (Abbildung 59) wird deutlich, dass die V_{OC} -Effekte die zuvor gezeigten Effizienzverluste dominieren. Die qualitativen Trends sind identisch. Bei lediglich zwei Code-Instanzen auf der Solarzelle führt keine der Laserbehandlungen zu einer wirksamen Schädigung der Zelle. Das am wenigsten schädigende Rezept bei größerer Anzahl von Codes ist „Burst 6“ (dunkelgrün).

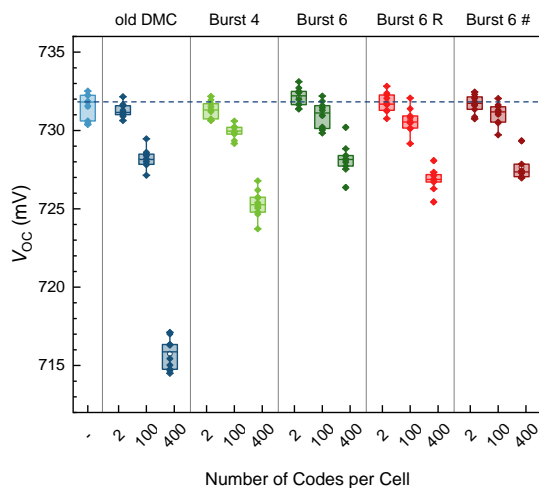


Abbildung 59: V_{OC} -Ergebnisse für verschiedene Arten von DMC-Lasermarkierungen in Abhängigkeit von der Anzahl an Codes auf der Zelle. Die Gruppengröße je Box beträgt 7-10 Solarzellen.

Als interessanter Effekt zeigen die j_{SC} -Plots (Abbildung 60), dass Veränderung der Oberfläche durch mehrere DMC-Codes auch die Zelloptik beeinträchtigt. Ein Beweis dafür ist der fehlende Effekt bei der roten Gruppe „Burst 6 R“, da sich der Code hier auf der Zellrückseite befindet.

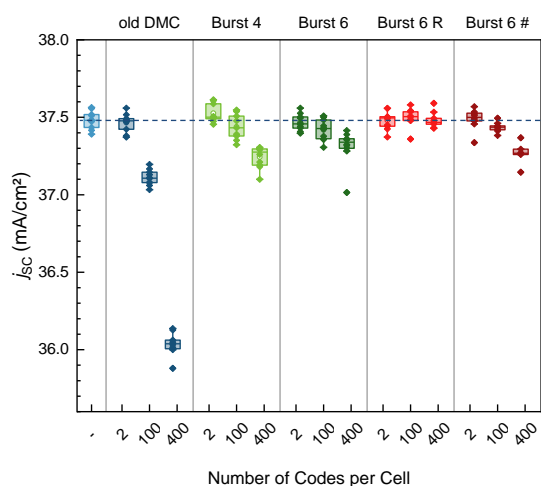


Abbildung 60: j_{sc} -Ergebnisse für verschiedene Arten von DMC-Lasermarkierungen in Abhängigkeit von der Anzahl an Codes auf der Zelle. Die Gruppengröße je Box beträgt 7-10 Solarzellen.

Beim FF -Einfluss (Abbildung 61) der verschiedenen Markierungen ist jedoch das Gegenteil der Fall. Während das „alte DMC“ immer noch das schädlichste aller Rezepte ist, rangiert das rückseitige „Burst 6 R“ (hellrot) hier an zweitschlechtester Stelle. Hier ist die wahrscheinlichste Ursache, dass Bereiche mit Laserschaden in der Raumladungszone des auf der Rückseite liegenden Emitters liegen.

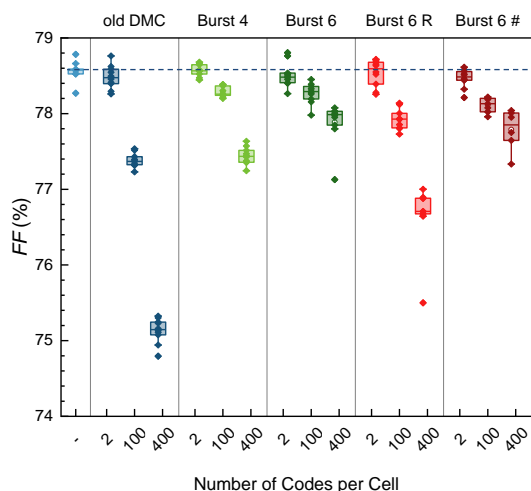


Abbildung 61: FF -Ergebnisse für verschiedene Arten von DMC-Lasermarkierungen in Abhängigkeit von der Anzahl an Codes auf der Zelle. Die Gruppengröße je Box beträgt 7-10 Solarzellen.

Die Ursachen für Füllfaktorverluste lassen sich durch eine Betrachtung der Differenzen unterschiedlich bestimmter Füllfaktoren ermitteln. Tatsächlich stellt man fest, dass sich die durch die Lasermarkierung ausgelösten Füllfaktorverluste fast vollständig durch einen Anstieg der Füllfaktordifferenz $FF_0 - pFF$ erklären lassen, die für jeden der Laserprozesse mit zunehmender Anzahl der Lasercodes beobachtet wird (Abbildung 62) und Rekombinationsverluste in der Raumladungszone widerspiegelt. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Eindringtiefe des hier verwendeten Infrarot-Lasers mit 1064 nm Wellenlänge so groß ist, dass für alle betrachteten Laserprozesse auch bei Anwendung auf der Wafervorderseite die rückseitige Raumladungszone erreicht wird und dort zu einem Anstieg der Rekombination führt. Dieser ist für den „alten DMC“ Prozess (dunkelblau) am größten und für den „Burst 6“ Prozess (dunkelgrün) am geringsten. Vergleicht man die vorderseitige (dunkelgrün) und rückseitige (rot) Anwendung des „Burst 6“ Prozesses, so stellt man fest, dass $FF_0 - pFF$ Anstieg bei rückseitiger Anwendung stärker ausgeprägt ist, was sich unmittelbar mit einer stärkeren Beeinträchtigung der bei diesem Zelltyp auf der Rückseite liegenden Raumladungszone erklären lässt. Die Tatsache, dass der rückseitig angewendete „Burst 6 R“ Prozess (rot) aber deutlich weniger Rekombinationsverluste auslöst als der vorderseitig angewendete „alte DMC“ Prozess (dunkelblau), verdeutlicht, dass der hier entwickelte Markierungsprozess bereits eine gute Qualität aufweist. Weitere Optimierungen erfordern den Einsatz alternativer Laserquellen mit geringerer Eindringtiefe (z.B. grüne Laser).

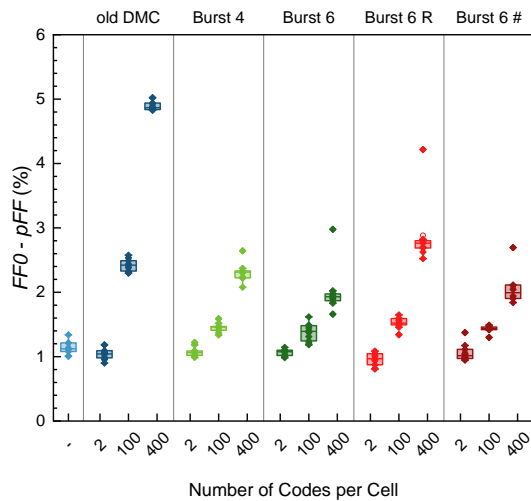


Abbildung 62: FF0-pFF Ergebnisse, die Rekombinationsverluste in der Raumladungszone widerspiegeln, für verschiedene Arten von DMC-Lasermarkierungen in Abhängigkeit von der Anzahl an Codes auf der Zelle. Die Gruppengröße je Box beträgt 7-10 Solarzellen.

Das pFF-FF-Diagramm, das Serienwiderstands-ähnliche Verluste anzeigt, ist im Vergleich zu den Effekten in der Raumladungszone eher indifferent zwischen den Gruppen. Die geringe Auswirkung von Laserschäden auf den Serienwiderstand entspricht den Erwartungen.

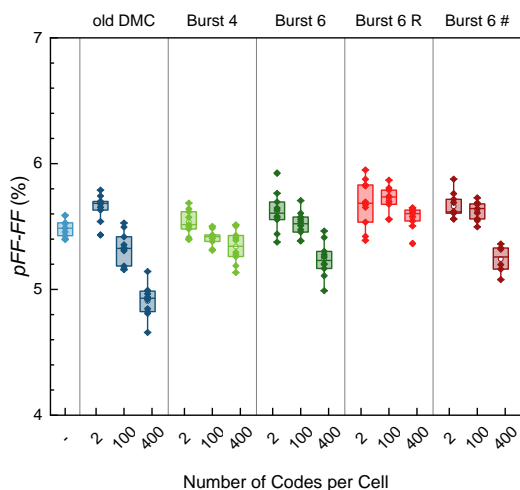


Abbildung 63: pFF-FF Ergebnisse, die Serienwiderstandsverluste widerspiegeln, für verschiedene Arten von DMC-Lasermarkierungen in Abhängigkeit von der Anzahl an Codes auf der Zelle. Die Gruppengröße je Box beträgt 7-10 Solarzellen.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Shunt-Widerstand (Durchbruch-Widerstand), um zu überprüfen, inwieweit Lasermarkierung Einfluss auf die Ausbildung von Shunts in der Solarzelle hat. Werte unter $10.000 \Omega\text{cm}^2$ werden als kritisch für eine Solarzelle angesehen. Die Messungen zeigen keine Werte unter $150.000 \Omega\text{cm}^2$, so dass auch bei 400 Lasermarkierungen auf keiner der Probe ein Risiko für induzierte Shunts besteht.

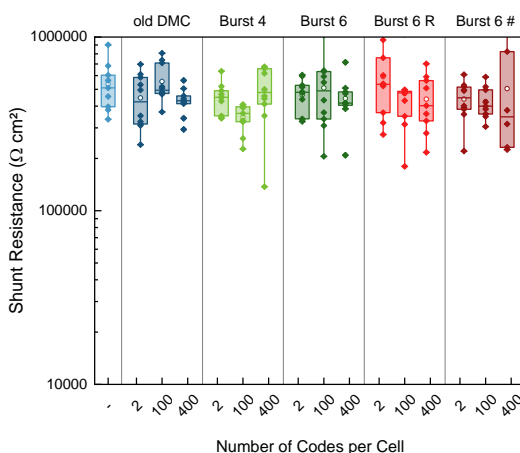


Abbildung 64: Shunt-Widerstands-Ergebnisse für verschiedene Arten von DMC-Lasermarkierungen in Abhängigkeit von der Anzahl an Codes auf der Zelle. Die Gruppengröße je Box beträgt 7-10 Solarzellen.

Abschließend kann also festgestellt werden, dass sich der neu entwickelte Code mit den Laserparametern „Burst 6“ deutlich schädigungsärmer als der bisher verwendete „alte DMC“ verhält. Dies ist bei zwei gelaserten Codes je Zelle noch nicht als relevant anzusehen, wohl aber bei wachsender Flächenbedeckung. Im Hinblick auf einen „Sicherheitspuffer“ für zukünftige Entwicklungen und womöglich noch sensitivere Solarzellenkonzepte und insbesondere auch für Entwicklungsprojekte wie dieses, bei dem jegliche Beeinflussung der Zellparameter durch die Markierung ausgeschlossen werden muss, ist der neue DMC-Prozess ein großer Fortschritt und für die hier vorliegenden Projektanforderungen ausreichend. Weitere Optimierungen erfordern den Einsatz alternativer Laserquellen mit geringerer Eindringtiefe, was in Folgestudien außerhalb dieses Projektes weiter untersucht werden sollte, z.B. im Hinblick auf Schindelsolarzellen-Prozesse, bei denen das Verhältnis von Markierungsfläche zu aktiver Zellfläche stark ansteigt.

B. Fertigung der Solarzellen bei HEVEL

Mit Abschluss der Qualifizierung des verbesserten Markierungsprozesses wurde die Solarzellencharge des Hauptversuchs gestartet, indem 7000 Wafer des bei HEVEL verwendeten Standardmaterials unter Verwendung des weiterentwickelten Markierungsprozesses mit DMC-Codes versehen wurden (Layout mit 2 DMC Nahe der Wafermitte) und die markierten Wafer für die weitere Solarzellenprozessierung zu HEVEL geschickt wurden. Um sicherzustellen, dass die Charge die bei HEVEL auftretenden Produktionsschwankungen möglichst gut abbildet, sollten die Wafer in mehreren Tranchen prozessiert werden, verteilt über mehrere Tage.

Im Sommer 2021 wurden seitens HEVEL 7000 mit DMC markierten Wafer zu HJT-Solarzellen prozessiert. Etwa 600 dieser Zellen gingen verloren, da die kleine Markierung in der laufenden Produktion teils schwer identifizierbar ist und daher einige Zellen von den Operatoren übersehen wurden.

Die Wafer wurden in drei verschiedenen Produktionstagen untergebracht, so dass eine gewisse Produktionsschwankung abgebildet werden konnte. Von den verbliebenen 6400 Zellen wurden 400 Zellen aufgrund geringer Zell-Leistung seitens HEVEL in die Ausschussklasse („Class 5 / LOW“) sortiert, so dass 6000 Zellen in den eigentlichen Leistungsklassen verblieben.

C. Analyse der Solarzellen am ISE

Wie geplant, wurde zunächst ein repräsentatives Drittel der Zellgruppe (zzgl. der LOW-Klasse) am ISE charakterisiert, um einen Überblick über die Leistungsverteilung zu gewinnen. In diesem Zuge wurde auch die Klassensortierung bei HEVEL mit der Leistungsmessung am ISE verglichen.

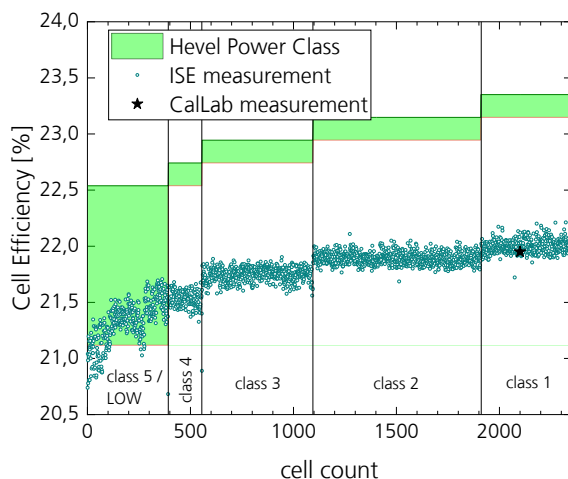


Abbildung 65: Wirkungsgrade der ersten 2000 HEVEL-Zellen (+ 400 LOW-Class Zellen) gemessen am Zelltester des Fraunhofer ISE im Vergleich zur nominalen Leistungsklasse, die bei HEVEL bestimmt wurde (grüne Korridore).

Die festgestellte Diskrepanz in Form der durchweg höheren Leistungsergebnisse der HEVEL-Messlinie konnte teilweise durch die verwendete Kalibrierung erklärt werden. Durch die eingeschränkt erhobenen Messdaten seitens HEVEL konnte die vollständige Ursache nicht geklärt werden. Nichtsdestotrotz ist eine gute Übereinstimmung der Klassenaufteilung festzustellen. Lediglich durch die Messunsicherheit kommt es teilweise zu Überschneidungen der Klassen untereinander. Dies war ein erwarteter Effekt.

Eine wesentliche Zielsetzung der Analyse der Messdaten war der Vergleich der Effizienz bei Vorderseitenbeleuchtung mit der Effizienz bei Rückseitenbeleuchtung der Solarzellen. Sollte die Effizienz der Rückseite eine abweichende Charakteristik aufweisen als bei Vorderseitenbeleuchtung, müsste man dies in die Klassierung der Solarzellen einfließen lassen.

Die Auswertung der ersten 2000 Solarzellen ergab eine hohe Korrelation zwischen Vorder- und Rückseiteneffizienz aller Zellen. Die maximale Abweichung beträgt lediglich $\Delta\eta_{\max} = 0,4\%_{\text{abs}}$, die mittlere Abweichung nur $\Delta\eta_{\text{median}} = 0,017\%_{\text{abs}}$. Mit einem Messfehler von $\sigma = \pm 0,4\%_{\text{abs}}$ ist dies zunächst zu gering, um von einer gesonderten Rückseitencharakteristik zu sprechen.

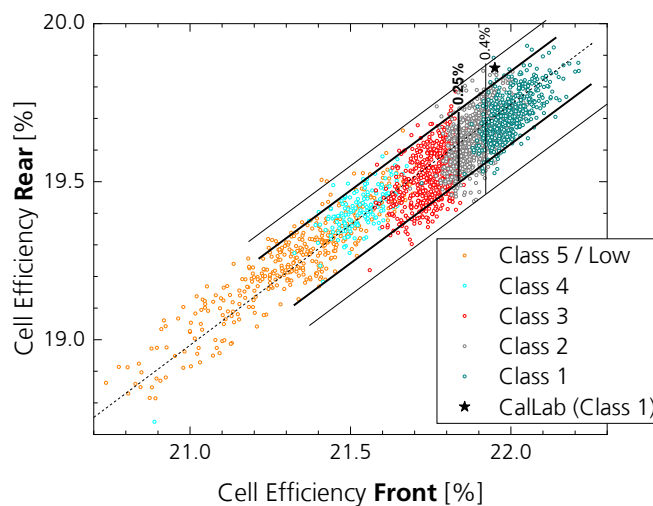


Abbildung 66: ISE-Messung der ersten 2000 HEVEL-Zellen (+ 400 LOW-Class), Korrelation von Vorderseiteneffizienz (x-Achse) und Rückseiteneffizienz (y-Achse).

Um dieses Resultat zu überprüfen, wurden daher abweichend vom ursprünglichen Plan zunächst die restlichen 4000 Solarzellen vermessen, ohne zuvor eine Sortierstrategie festzulegen. Die folgende Auswertung der vollständigen Zellcharge ergab die gleiche Effizienzverteilung und Korrelation zwischen Vorder- und Rückseiteneffizienz.

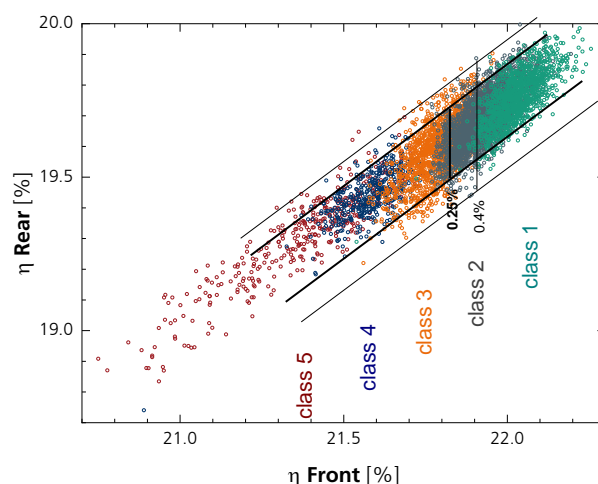


Abbildung 67: ISE-Messung aller 6400 HEVEL-Zellen, Korrelation von Vorderseiteneffizienz (x-Achse) und Rückseiteneffizienz (y-Achse).

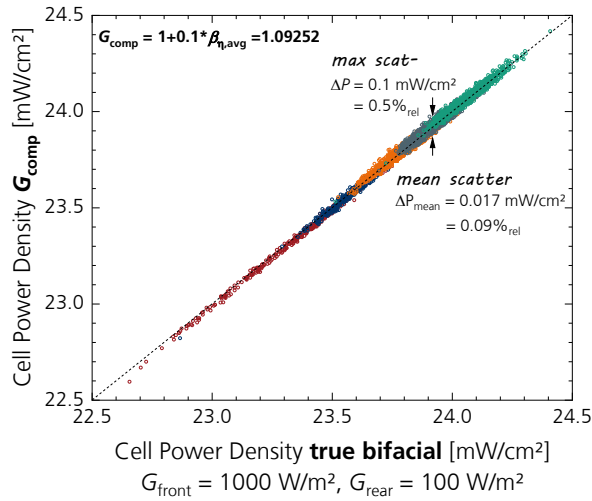


Abbildung 68: ISE-Messung aller 6400 HEVEL-Zellen, Korrelation einer echt bifazialen Zellmessung mit 10% Einstrahlung von der Zellrückseite (x-Achse) und einer Zellmessung bei rein vorderseitiger Beleuchtung mit überhöhter Intensität, d.h. einer kompensierten Vorderseitenmessung (y-Achse).

Die entscheidende Frage war nun, ob eine Einbeziehung der Zellrückseite in die Messung einen informativen Mehrwert gegenüber der reinen (konventionellen) Vorderseitenmessung bietet. Hierzu wurde die echt-bifaziale Messung mit Einstrahlung $G_{\text{front}} + G_{\text{rear}} = 1000 + 100 \text{ W/m}^2$ gegenüber einer Messung mit virtuell überhöhter („kompensierter“) Vorderseitenbeleuchtung $G_{\text{comp}} = 1092,5 \text{ W/m}^2$ korreliert. Der Wert G_{comp} entspricht der vorderseitigen Beleuchtungsintensität, die entsprechend der mittleren Bifazialität der Zellen benötigt wird, um die zusätzliche rückseitige Beleuchtungsintensität von 100 W/m^2 zu substituieren.

Abbildung 68 zeigt, dass die kompensierte Vorderseitenmessung nahezu die gleiche Leistungsinformation erbringt, wie die aufwendigere bifaziale Messung. Die dies verdeutlichenden geringen Abweichungen von der Diagonalen (stellvertretend für eine perfekte Korrelation) liegen lediglich in der Größenordnung der Messunsicherheit.

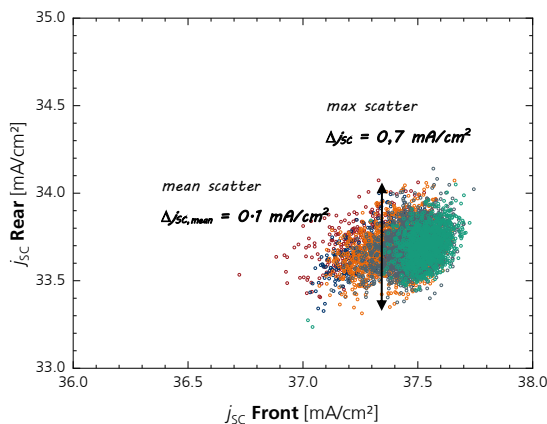
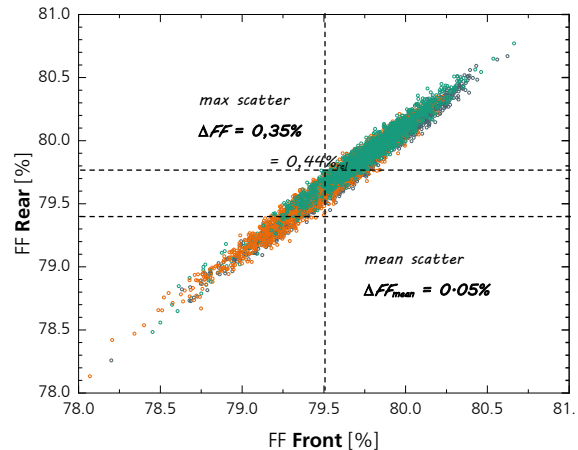
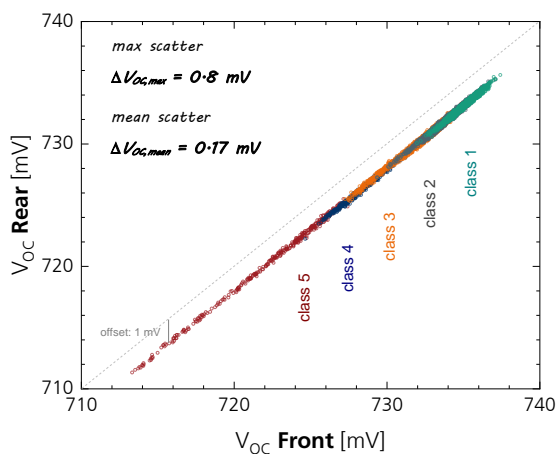


Abbildung 69: Aufschlüsselung der vorderseitigen und rückseitigen Effizienz (Abbildung 12) in die einzelnen IV-Parameter V_{OC} , FF und j_{SC} . Auch hier wieder als Korrelation von Vorderseitenparameter (x-Achse) und Rückseitenparameter (y-Achse).

Abbildung 69 zeigt die Korrelation der Vorder- und Rückseitenmessung aufgeschlüsselt für die einzelnen IV-Parameter V_{OC} , FF und j_{SC} , was Rückschlüsse auf die Ursachen für die in Abbildung 68 festgestellte hohe Übereinstimmung der echt bifazial und kompensiert gemessenen bifazialen Zelleistung ermöglicht:

Eine perfekte Korrelation ist zwischen vorder- und rückseitiger V_{OC} Messung zu beobachten. Der FF weist bei vorder- und rückseitiger Messung ebenfalls eine sehr gute Korrelation auf. Ursache für die etwas stärkeren Schwankungen des FF können entweder Produktionsschwankungen oder aber Messunsicherheiten der Kontaktierung (siehe „AP 2.1 Kontaktierungen für beidseitig busbarlose Bifazialzellen“) sein, da diese Schwankungen mit maximal 0,35%_{abs.} (0,44%_{rel.}) bzw. im Mittel 0,05%_{abs.} (0,04%_{rel.}) noch im Bereich der Messunsicherheit liegen. Für j_{SC} besteht keine Korrelation zwischen Vorderseite und Rückseite (Punktwolke). Die Schwankungen (Durchmesser der Punktwolke) sind allerdings mit maximal 0,7 mA/cm² (2,1%_{rel.}) sehr gering und vermutlich auf eine typische (aber eben kleine) Produktionsvariation der Zelloberfläche zurückzuführen, die sich auf die Lichteinkopplung auswirken. Die Variationen der Zelleistung (Breite des markierten Korridors) in Abbildung 68 gehen in Summe rund hälftig jeweils auf den FF und den j_{SC} zurück.

Im Ergebnis sind aus den IV-Parametern keine signifikanten Produktionsabweichungen oder Defekte insbesondere auf der Zellrückseite zu erkennen. Folglich ergibt sich durch explizite Messung der Zellrückseite im Falle *dieser* Zellcharge keine Mehrerkenntnis, aus der man eine Anpassung der Zellsortierung ableiten könnte.

Dies hatte Änderungen für die Teilziele zur Entwicklung der erweiterten Sortiermethodik (TZ 3.4, 3.5 und 3.8) zur Folge (siehe folgender Abschnitt).

3.2.2 AP3.2 Sortiermethodik anhand bifazialer Zellmessungen

A. Vorarbeiten

Die Entwicklung der Zellsortierregeln für die Modulverschaltung sitzt an der Schnittstelle zwischen Zellentwicklung und Modulentwicklung. Um einen größeren Nutzen für ein späteres Produkt zu erzeugen, wurde entschieden, die Entwicklung des Sortieralgorithmus gleich zu Projektbeginn in die Software „SmartCalc.CTM“ [21] (www.cell-to-module.com) einzubinden. Während BiZePS-PLUS in der Zellforschung angesiedelt ist, wird SmartCalc.CTM durch die Modulforschungsgruppe des ISE entwickelt und ermöglicht bereits eine vollständige Leistungssimulation und „cell-to-module“ Verlustanalyse für eine vorzugebende Solarzelle. Um Produktionsschwankungen in der Modulsimulation abbilden zu können, müssen sich für die Leistungsparameter der zu einem Modul konfigurierten Einzelzellen entweder tabellarisch die individuellen Messwerte oder statistische Kenngrößen der experimentell ermittelten Verteilungen der Einzelparameter einlesen lassen. Entsprechende Erweiterungen wurden an dem Simulationstool vorgenommen.

Die Synergie dieses Weges ist, dass nach Ableitung der Sortierregeln direkt eine potente Leistungsvorhersage für die Module inklusive aller weiteren Verlustkanäle angeschlossen wird (optische Verluste Modulglas, Zellverbinder-Widerstände, Temperatureinflüsse, etc.). Diese ist individuell anpassbar auf Modultopologie und verwendete Materialien des jeweiligen Herstellers. Daher liefert diese eine deutlich genauere Leistungsvorhersage für die Kunden, als es die reine Sortierung auf Zellebene kann.

B. Sortiermethodik

Wie oben erläutert, war die industrielle Zellcharge trotz Auswahl der Zellen über mehrere Produktionstage hinsichtlich Abweichungen zwischen Vorderseiten- und Rückseitenqualität derart gleichförmig, dass die Ermittlung der rückseitigen Zelleffizienz keinen nennenswerten zusätzlichen Informationswert brachte. Die vorderseitige Effizienz genügte in diesem Fall wider Erwarten zur Charakterisierung der bifazialen Solarzellenleistung.

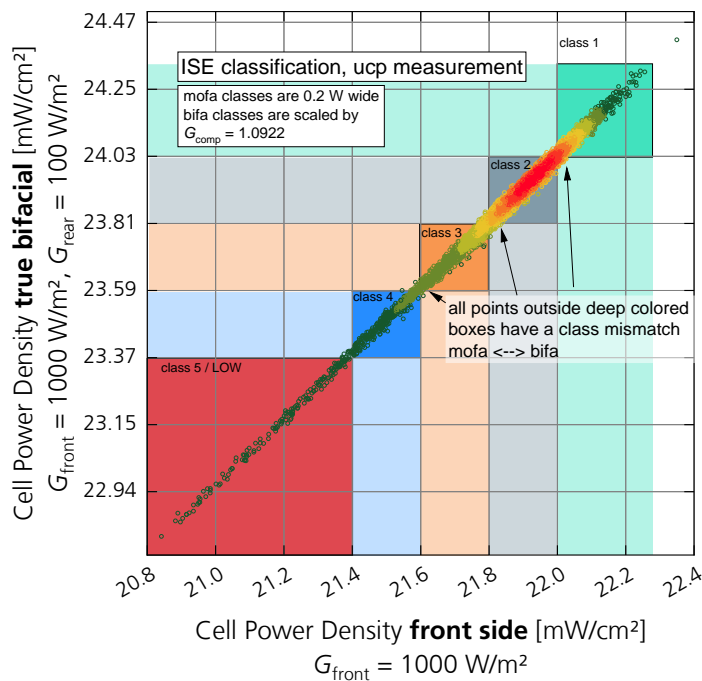


Abbildung 70: ISE-Messung aller 6400 HEVEL-Zellen, Korrelation einer echt bifazialen Zellmessung mit 10% Einstrahlung von der Zellrückseite (x-Achse) und einer Zellmessung bei rein vorderseitiger Beleuchtung mit überhöhter Intensität, d.h. einer kompensierten Vorderseitenmessung (y-Achse). Die Punktdichte ist mit einer Farbskala hervorgehoben (grün = niedrig, rot = hoch). Hintergrundeinfärbung der Klassenzuordnung sowohl für die monofaziale Achse (x) als auch die bifaziale Achse (y).

Da sich die im Projekt hergestellte und analysierte Industriecharge damit nicht für den Test neuer (bifazialer) Sortierkriterien eignete, wurde von einer tatsächliche Neusortierung der Zellen (am ISE) in Verbindung mit einer großangelegten Modulfertigung auf Basis unterschiedlich vorsortierter Zellen (bei HEVEL) aus wissenschaftlichen Gründen Abstand genommen, was Änderungen in den Teilzielen im AP 3 erforderlich machte (vgl. Abschnitt 2.4).

Stattdessen wurde mit dem entwickelten Simulationsmodul in „SmartCalc IV“ eine Modellierung vorgenommen, um dieses Ergebnis noch einmal zu bestätigen und damit abzusichern. Hierbei wurde einmal die monofaziale und einmal die bifaziale Klassierung der Zellen verwendet, wie in Abbildung 70 gezeigt. Monofaziale Klassen haben dabei eine Breite von 0,2% (bzw. mW/cm²), bifaziale Klassen haben eine um den Faktor $G_{\text{comp}} = 1,09252$ erhöhte Klassenbreite von 0,2185 mW/cm².

Aus Abbildung 70 ist ersichtlich, dass Punkte, die innerhalb der voll-farbig hinterlegten Quadrate liegen, dieselbe mono- wie bifaziale Klasse haben. Nur Punkte, die in den teiltransparenten Kästchen liegen, zeigen eine Umklassierung durch die bifaziale Messung auf und würden somit durch die bifaziale Klassierung in eine andere Modulkategorie einsortiert. Angesichts der unerwartet hohen Korrelation der beiden Messungen ist der Anteil dieser Zellen sehr gering.

Abbildung 71 zeigt die sich aus der Modulsimulation² ergebenden Modulleistungen für monofaziale (volle Symbole) und bifaziale Zellsortierung (offene Symbole). Wie vermutet, ergibt sich kein signifikanter Unterschied bei der bifazialen Sortierung aufgrund der hohen Korrelation zwischen monofazialer und bifazialer Leistung, wie weiter oben bereits erläutert wurde. Von einer Signifikanz könnte man frühestens bei systematischen Differenzen der Modulleistungen größer 1 W sprechen.

² Das Simulationsmodell bildet die Schwankungen der Zellproduktion vollständig ab, da diese als Messwerte in die simulierten Modulleistungen einfließen. Nicht enthalten sind dagegen vorhandene Schwankungen aus dem Prozess der Modulverschaltung (Leitungswiderstände der Zellverbinder, Optik des Modulglases, Lötfehler, Toleranz bei den Anschlussdosen).

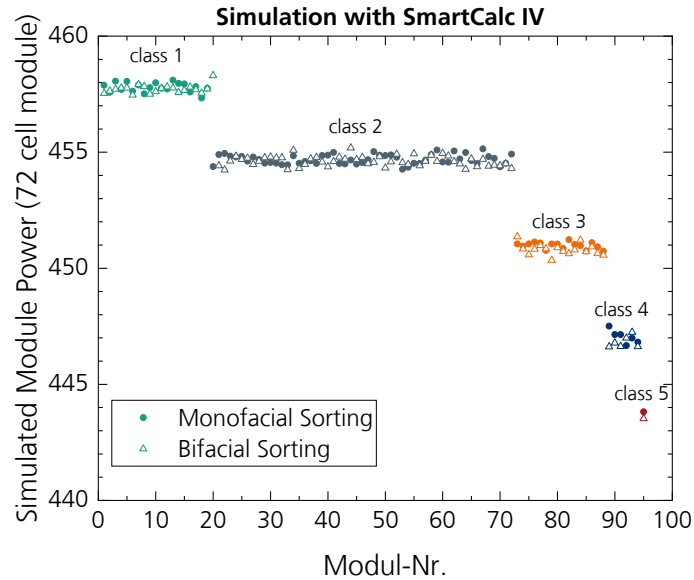


Abbildung 71: Simulationsvergleich unter Annahme bifazialer Beleuchtung ($1000 + 200 \text{ W/m}^2$) zwischen der Sortierung nach monofazialen Leistungskriterien und bifazialen Leistungskriterien. Die Moduleleistungen monofazialer Zellsortierung weichen nicht von denjenigen bifazialer Zellsortierung ab.

C. Experimentabbruch

Die politischen Geschehnisse um den Ukraine-Krieg verhinderten bedauerlicherweise eine weitere Zusammenarbeit mit dem Projektpartner HEVEL, so dass der Modulbau (an dessen Stelle die Modulsimulation aus Abbildung 71 trat) auch aus organisatorischer Sicht nicht durchgeführt werden konnte. Inhaltlich war dies insofern verschmerzbar, als nach der umfassenden Analyse der HEVEL-Zellcharge auf Zellebene bereits klar war, dass aufgrund der hohen Leistungshomogenität der Solarzellen eine neue Sortiermethodik keine Zusatzgewinne bringen würde. Dennoch hätte ein Modulbau in reduzierter Form Erkenntnisse bringen können, z.B. welche zusätzlichen Auswirkungen die Modulverschaltung auf die Leistungsverluste haben, was aber nicht im Fokus dieses Projektes lag. Nach Veränderung der politischen Randbedingungen wurde daher in Abstimmung mit dem Projektträger entschieden, die freigeordneten Ressourcen für das erweiterte Experiment zur Performance-Vorhersage an Schindelsolarzellen zu nutzen.

4 Verwertungsplan

Gemäß der aktuellen ITRPV-2023 [4] war die Marktentwicklung der Technologien, für die im Rahmen dieses Projektes Messtechnik entwickelt wurde, etwas bis deutlich dynamischer als zum Zeitpunkt der Projektbeantragung gemäß der damals aktuellen ITRPV-2018 [3]. Bei den busbarlosen bzw. Multibusbar-Zellkonzepten haben sich die erwarteten Marktanteile für 2025 leicht erhöht von damals 19% auf heute 25% (für Zellen im M10-Format) bzw. 19% (für größere Zellformate). Ebenso bei den Schindelzellen, wo die erwarteten Marktanteile für 2025 von damals knapp 4% auf heute 5% gestiegen sind. Demgegenüber wird bei den bifazialen Zellkonzepten der damals für 2025 erwartete Marktanteil von 30% bereits heute mit 70% bei Weitem übertroffen. Damit haben sich die weltweiten Absatzmärkte für die hier entwickelten Messtechnologien gegenüber der Antragstellung tendenziell verbessert. Angesichts des im Zuge der Energiekrise erwarteten Wiederaufbaus der PV-Produktion in Deutschland und Europa und der Notwendigkeit in diesen Produktionen neueste Zelltechnologien umzusetzen, werden auch in Europa in den nächsten Jahren zunehmende Verwertungschancen für die hier erzielten Entwicklungsergebnisse erwartet.

Generell erweitert die Implementierung der im Rahmen des Projekts entwickelten Verfahren am Inline-Zelltester des PVTEC die existierenden Analysemöglichkeiten und trägt damit zu einer nachhaltigen Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Technologieplattform bei, von der alle am PVTEC laufenden Technologieprojekte profitieren. Zudem wird hierdurch die Basis für weiterführende Messtechnik- und Analyseprojekte mit Industriepartnern (Messtechnikanbieter, Zell- und Modulhersteller) geschaffen. Die erwarteten Verwertungsmöglichkeiten für das im Einzelnen erarbeitete Know How sind nachfolgend für die unterschiedlichen Teilbereiche aufgeschlüsselt:

A. Messtechnik busbarlose Zellen

Durch den Auf- und Ausbau von Expertise bei der Messung busbarloser Solarzellen können Messbedingungen gezielter ausgewählt, unpassende Messbedingungen vermieden und Messergebnisse unterschiedlicher Kontaktierungen über ein analytisches Modell ineinander umgerechnet werden. Dies reduziert Messunsicherheiten im Inline-Messbereich, wovon die komplette Solarzellentwicklung am Fraunhofer ISE profitiert. Des Weiteren werden auch Messunsicherheiten im Kalibrierlabor verkleinert, was ein verbessertes Produktportfolio zur Folge hat.

B. Messtechnik für Schindelzellen

Mit der Schindelautomatisierung steht am Fraunhofer ISE erstmals ein performantes System zur Inline-Charakterisierung von Schindelzellen in großer Stückzahl zur Verfügung. Die automatisierte Boxentladung, die sowohl für Voll- als auch für Schindelzellen ausgelegt ist, beschleunigt zudem Messungen von Zellen, die in Boxen angeliefert werden, erheblich. Die Möglichkeiten der schnellen Messung großer Zellmengen wird in zukünftigen Projekten von Nutzen sein.

Das entwickelte Modell zur Vorhersage der Einzelschindel-Effizienz aus globalen und bildgebenden Messungen am Hostzell-Verbund kombiniert die Vorzüge der Hostzell-Messung (hoher Durchsatz) und der Einzelschindel-Messung (hohe Präzision) und hat damit hohes industrielles Adaptionspotenzial, nicht nur für Schindelzellen, sondern auch für Halb- und Drittelzellenformate. Zur Steigerung des TRL muss das Verfahren im nächsten Schritt hinsichtlich einiger konkreter Fragestellungen weitergehend validiert und optimiert werden und für höhereffiziente Zellkonzepte sowie Schindelzellen mit Kantenpassivierung weiterentwickelt werden.

C. Erweiterte IV-Analysetechnik

Hier ergaben sich vor allem zwei vielversprechende Lösungen: Zum einen die Ermittlung der Basisdotierung aus der IV-Messung, die somit ohne zusätzlichen Messaufwand nur durch analytische Berechnung gewonnen wird. Zum anderen die Hysteresekorrektur bei ultrakurzen Messzeiten (8 ms), die durch die stetig besser werdenden Zellen bei immer kürzeren Messzeiten im industriellen Einsatz essenziell werden wird.

D. Sortierverfahren für bifaziale Zellen

Im Fall des hier betrachteten industriellen HJT-Solarzellenprozesses ergab sich aufgrund der hohen Stabilität des Rückseiteneigenschaften keine Indikation, dass sich durch eine bifazial erweiterte Sortierung nach zusätzlichen Kriterien wie etwa der Rückseiteneffizienz (Rückseitenmessung) Leistungsgewinne im Modul erzielen lassen. Von einer Verwertung dieser Ergebnisse im Sinne einer Adaption von Sortierkriterien ist daher gegenwärtig nicht auszugehen. Sollten aber im Zuge weiterer Effizienzsteigerungen oder für andere bifaziale Zellkonzepte (z.B. TOPCon) die Schwankungen der rückseitigen Zellperformance und damit die Streuung der Korrelation zwischen Vorder- und Rückseiten-Messung in Zukunft zunehmen, kann die Fragestellung von Leistungsgewinnen durch eine echt bifaziale Zellsortierung wieder relevant werden und auf Basis der Projekterkenntnisse effizient bearbeitet werden.

Weitere Teilaspekte des Verwertungsplans finden sich im Erfolgskontrollbericht.

5 Anhang

5.1 Literaturverzeichnis

- [1] A. Krieg, J. Greulich, K. Ramspeck, D. Dzafic, N. Wöhrle, M. Rauer and S. Rein, "IV-Measurements of Bifacial Solar Cells in an Inline Solar Simulator with Double-Side Illumination," in *35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Brussels, Belgium, 2018.
- [2] S. Philipps and W. Warmuth, "Photovoltaics Report," Freiburg im Breisgau, Nov. 2019. [Online] Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>.
- [3] ITRPV, "International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV): 2017 Results," 2018.
- [4] ITRPV, "International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV): 2023 Results," VDMA, 2023.
- [5] A. Schneider, L. Rubin, and G. Rubin, "Solar cell efficiency improvement by new metallization techniques: The day4 electrode concept," in *4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion Hawaii*, Hawaii, 2006, pp. 1095–1098.
- [6] S. Braun, G. Hahn, R. Nissler, C. Pönisch, and D. Habermann, "Multi-busbar Solar Cells and Modules: High Efficiencies and Low Silver Consumption," *Energy Proced.*, vol. 38, pp. 334–339, 2013.
- [7] A. Alapont Sabater, N. Wöhrle, J. M. Greulich, S. Rein, and K. Ramspeck, "Impact of bifacial illumination and sorting criteria of bifacial solar cells on module power," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1999, p. 20004, 2018.
- [8] N. Bassi, C. Clerc, Y. Pelet, J. Hiller, V. Fakhfour, C. Droz, M. Despeisse, J. Levrat, A. Faes, D. Bätzner, and P. Papet, "Grid^{TOUCH}: Innovative solution for accurate IV measurement of busbarless cells in production and Laboratory Environments," in *29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, The Netherlands, 2014, pp. 1180–1185.
- [9] K. Kamatani, Y. Fujita, Y. Takeda, K. Shibamoto, H. Kojima, Y. Nakamichi, and K. Iwamoto, "Development of New Probe Bar for c-Si PV Cells with Unique Electrode Design such as Busbar-less, Multi Busbar and Complicated Busbar," in *36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Marseille, France, 2019, pp. 388–391.
- [10] K. Ramspeck, P. Waleska, S. Schenk, M. Alt, R. Jakob, and M. Meixner, "Contacting New Solar Cell Metallization Layouts and Contact Quality Surveillance in Solar Cell Production," in *36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Marseille, France, 2019, pp. 447–450.
- [11] K. Ramspeck, S. Schenk, L. Komp, A. Metz, and M. Meixner, "Accurate Efficiency Measurements on Very High Efficiency Silicon Solar Cells Using Pulsed Light Sources," in *29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, The Netherlands, 2014, pp. 1253–1256.

- [12] Ronald A. Sinton, Michael K. Forsyth, Adrienne L. Blum, James S. Swirhun, "CHARACTERIZATION OF SUBSTRATE DOPING AND SERIES RESISTANCE DURING SOLAR CELL EFFICIENCY MEASUREMENT," US 2014/0333319 A1, USA.
- [13] M. Rauer, A. Krieg, A. Fell, S. Pingel, N. Wöhrle, J. M. Greulich, S. Rein, M. C. Schubert, and J. Hohl-Ebinger, "Assessing current-voltage measurements of busbarless solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 248, p. 111988, 2022.
- [14] P. Kunze, M. Demant, A. Krieg, A. Tummalieh, N. Wöhrle, and S. Rein, "Shingle Cell IV Characterization Based on Spatially Resolved Host Cell Measurements," in *40th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Lisbon, 2023, to be published.
- [15] R. A. Sinton, H. W. Wiltterdink, and A. L. Blum, "Assessing Transient Measurement Errors for High-Efficiency Silicon Solar Cells and Modules," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 7, no. 6, pp. 1591–1595, 2017.
- [16] M. J. Kerr, A. Cuevas, and R. A. Sinton, "Generalized analysis of quasi-steady-state and transient decay open circuit voltage measurements," *J. Appl. Phys.*, vol. 91, no. 1, p. 399, 2002.
- [17] R. A. Sinton and A. Cuevas, "A quasi-steady-state open-circuit voltage method for solar cell characterization," in *16th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Glasgow, UK, 2000, pp. 1152–1155.
- [18] K. Ramspeck, L. Komp, S. Dauwe, K. Bothe, D. Hinken, M. Wolf, and M. Meixner, "Determination of base doping concentration of silicon solar cells from light IV-curves," in *11th International Conference on Silicon Photovoltaics*, Online, 2021, to be published.
- [19] T. Kemmer, J. M. Greulich, A. Krieg, and S. Rein, "Current-voltage characteristics of silicon solar cells: Determination of base doping concentration and hysteresis correction," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 248, p. 111953, 2022.
- [20] Ronald A. Sinton, Michael K. Forsyth, Adrienne L. Blum, James S. Swirhun, "Characterization of substrate doping and series resistance during solar cell efficiency measurement," US 2014/0333319 A1, USA 14/274,551, Nov 13, 2014.
- [21] M. Mittag, "Systematic PV-module optimization with the cell-to-module (CTM) analysis software "Smart-Calc.CTM", " *Photovoltaics International*, vol. 36, pp. 97–104, 2017.

5.2 Liste der Veröffentlichungen

Im Rahmen des BiZePS-Plus Projektes sind folgende Veröffentlichungen entstanden:

- M. Rauer, A. Krieg, A. Pfreundt, M. Mittag, and S. Pingel, „*The challenge of measuring busbarless solar cells and the impact on cell-to-module losses*“, *Photovoltaics International*, vol. 45, pp. 8–18, 2020.
- M. Rauer, A. Krieg, A. Fell, N. Wöhrle, J. Greulich, S. Rein, J. Hohl-Ebinger, „*Assessing Current-Voltage Measurements of Busbarless Solar Cells*“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 248, pp. 111988, 2022 (Vortrag SiliconPV-2022)
- T. Kemmer, J. Greulich, A. Krieg, S. Rein, „*Current-voltage characteristics of silicon solar cells: Determination of base doping concentration and hysteresis correction*“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 248, pp. 111953–62, 2022 (Vortrag SiliconPV-2022)
- P. Kunze, M. Demant, A. Krieg, A. Tummalieh, N. Wöhrle, S. Rein, „*Shingle Cell IV Characterization Based on Spatially Resolved Host Cell Measurements*“, *Progress in Photovoltaics 2023 + EUPVSEC 2023 (Lissabon)*, to be published
- A. Krieg, K. Ramspeck, N. Wöhrle, P. Kunze, M. Rauer, J. Greulich, S. Rein, „*IV-Measurements of Shingle Solar Cells*“, *Proc. EUPVSEC-2023 (Lissabon)*, to be published.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Bifaziale Zellen: Produktionsnahe Zellmesstechnik, Standards, Technologie und Potential - PLUS (Akronym: BiZePS-Plus)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Stefan Rein, Nico Wöhrle, Johannes Greulich, Alexander Krieg, Andreas Fell, Tobias Kemmer, Michael Rauer, Jochen Hohl-Ebinger	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2022
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme (ISE) Heidenhofstrasse 2 D-79110 Freiburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03EE1064
	11. Seitenzahl 67
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 21
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 71
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung <p>Bifaziale Solarzellen/Module ermöglichen aufgrund der beidseitigen Sammlung des Lichts eine signifikante Steigerung des PV-Ertrags bei gleichem Ressourceneinsatz, was sich in einem Marktanteil bifazialer Zelltechnologien von aktuell 70% widerspiegelt, der die Erwartungen bei Antragstellung bei Weitem übertrifft. Zudem werden zur Kosteneinsparung Kontaktfingerbreiten kontinuierlich reduziert, was auch Abschattungsverluste reduziert, zur Vermeidung elektrischer Widerstandsverluste aber neue Kontaktlayouts erfordert. Busbarlose Zelltechnologien haben hierbei das größte Potential. Eine weitere Option zum Erreichen größerer Erträge, höherer Bifazialitäten und gesteigerter Leistungsdichten sind bifaziale Schindelsolarzellen. Die genannten Entwicklungen erfordern angepasste Messtechnik, die in der Lage ist, die mit den neuen Metallisierungslayouts schwerer kontaktierbaren und mit den neuen Zellformaten schwerer handhabbaren Solarzellen schnell, reproduzierbar und präzise sowie mit bestmöglichem Einblick in die Zellparameter zu vermessen und den bifazialen Mehrertrag zuverlässig zu quantifizieren.</p> <p>Das Projekt hatte daher zum Ziel, neueste Messtechniken zur Leistungsmessung, modernste Auswertemethoden und innovative Verfahren zur Zellsortierung für beste Moduleleistungen für stark bifaziale Solarzellen mit/ohne Busbars und geschindelt zu erforschen und im PVTEC (inline) und Kalibrierlabor (offline) des Fraunhofer ISE zu etablieren.</p> <p>Hierbei wurden die folgenden Ergebnisse erzielt: (a) Da die Füllfaktor-Messung bei busbarlosen Zellen stark vom Layout der Kontaktierung abhängt, was die Vergleichbarkeit von Messergebnissen erschwerte, wurde ein analytisches Modell entwickelt, über das Messergebnisse unterschiedlicher Kontaktierungen in Abhängigkeit von der Anzahl und dem Abschattungsgrad der Kontaktelemente ineinander umgerechnet und somit vergleichbar gemacht werden können. (b) Zudem wurde ein von h.a.l.m. entwickeltes Kontaktelementsystem (ucp), das eine layout-unabhängige Kontaktierung busbarloser Zellen unter bifazialen Bedingungen ermöglicht, hinsichtlich Messgenauigkeit und Stabilität evaluiert und optimiert, mit etablierten Messkonfigurationen abgeglichen und im Inline- und Kalibriereinsatz getestet. (c) Für die vollautomatisierte Charakterisierung von Schindelsolarzellen wurde ein vollständiges Handling- und Kontaktierkonzept entwickelt und im Inline-Zelltester des ISE implementiert. (d) Auf Grundlage von Schindelsolarzellenmessungen in statistisch relevantem Umfang, die die neue Messplattform erstmals ermöglichte, wurde ein erstes Machine-Learning-basiertes Verfahren entwickelt zur Vorhersage der Einzelschindel-Performance aus Kennlinien- und Elektrolumineszenz-Messungen am Schindelsolarzellenverbund (vor Vereinzelung), wodurch die Präzision der Einzelschindelmessung mit der Durchsatztauglichkeit der Vollzellenmessung kombiniert wird. (e) Angesichts starker Hysterese-Effekte bei Hocheffizienzzellen sind schnelle und präzise Kennlinienmessungen eine Herausforderung, die im Projekt gemeistert wurde, indem Kennlinien durch die Etablierung nichtlinearer Spannungsrampen mit Ultrakurz-Sweeps in unter 10 ms artefaktfrei aufgenommen und über ein analytisches Verfahren zur Hysterese-Korrektur korrigiert werden, bei gleichzeitiger automatisierter Bestimmung der Basisdotierung für eine umfassendere Zellcharakterisierung. (f) Um die entwickelten Messverfahren an einer Großcharge von 6400 industriell hergestellten Hetero-Junction-Solarzellen bei voller Datenzuordnung testen zu können, wurde ein schädigungsfreier Laserprozess zur Wafermarkierung mittels Data-Matrix-Code entwickelt und seine Tauglichkeit für Höchsteffizienzzellen nachgewiesen. Die Anwendung verbesserter bifazialer Sortierverfahren ergab für diesen Industrieprozess keine Leistungsgewinne im Modul, was auf die hohe Stabilität des Prozesses zurückzuführen ist. Für andere Bifazial-Technologien und Fertigungslinien sollte der Mehrwert der bifazialen Zellsortierung noch evaluiert werden.</p>	
19. Schlagwörter Photovoltaik, Silizium, Solarzellen, Heterojunction, Bifazial, Busbarlos, Schindelsolarzellen, Charakterisierung, Qualitätskontrolle, Inline-Messtechnik, Kennlinienmessung, Lastrampen, Kontaktierung, Hysterese, Hysterese-Korrektur, Sortierung, Sortierkriterien, Maschinelles Lernen, KI, Performance-Vorhersage, Lasermarkierung, Waferidentifikation	
20. Verlag geplant	21. Preis geplant