

BUSSARD

Schlussbericht

Förderkennzeichen: 03EE1071A

Danksagung

Das Forschungsprojekt BUSSARD wurde in der Zeit vom 01.02.2021 bis zum 31.01.2024 durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 03EE1071A betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, wofür wir uns herzlich bedanken.

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, (Deutschland) HighLine Technology GmbH (Deutschland), Sächsische Walzengravur GmbH (Deutschland), Continental Ag (Deutschland), Karlstadt Universität (Schweden), PV NanoCell Ltd. (Israel), Sticky Solar Power (Schweden) und Tempres (Niederlande) durchgeführt.

Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung der Arbeiten und Ergebnisse des Verbundpartners Fraunhofer ISE im Teilprojekt 03EE1071A. Für die Arbeiten in den angeschlossenen Teilprojekten werden separate Abschlussberichte von Seiten der oben genannten Verbundpartner eingereicht.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BUSSARD

Busbarless solar cells with passivated contacts for next generation module integration

Dr. Andreas Lorenz

**Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
in Freiburg**

Förderkennzeichen: 03EE1071A
Berichtszeitraum: 01.02.2021 – 31.01.2024

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

Inhalt

1. Ausgangssituation des Vorhabens	5
1.1 Aufgabenstellung.....	5
1.2 Voraussetzungen	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	7
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens	8
2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse	8
2.1.1 AP 0 Projektkoordination	8
2.1.1 AP 1 Industrielle Oberflächenpassivierung mittels ALD	8
2.1.2 AP 2 TOPCon-Solarzellenprozess.....	12
2.1.3 AP 3 Feinlinien-Metallisierungsprozess.....	14
2.1.4 AP 4 Busbarlose Modulintegration und Modulcharakterisierung	26
References.....	31

1. Ausgangssituation des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Die durchschnittliche Steigerung des Wirkungsgrades von Solarzellen η in der Massenproduktion liegt bei ca. 0,6%_{abs}/Jahr. Ein vielversprechendes Zellkonzept für hohe Wirkungsgrade bei gleichzeitig einfacher Integration in bestehende Fertigungslinien für die Massenproduktion von Si-Solarzellen ist das sogenannte TOPCon (engl.: tunnel oxide passivating contact) -Konzept.[1] Zu Beginn des Projektes erreichten industrielle TOPCon-Solarzellen mit siebbedruckter Metallisierung Wirkungsgrade von 22 % bis 23 %, in labornaher Umgebung wurden bereits Werte von $\eta > 24$ % erreicht. In Verbindung mit einem busbarlosen Metallisierungs- und Verschaltungsansatz handelt es sich um einen sehr vielversprechendes Zellkonzept für die nächste Generation der Solarzellen- und Modultechnologie.

Mit dieser Thematik befasst sich das Projekt Bussard, in welchem Hochdurchsatzverfahren und kosteneffiziente Produktionsanlagen für moderne, höchsteffiziente Zellkonzepte entwickelt werden. Im Rahmen des Projekts Bussard sollen mithilfe innovativer ALD (engl.: atomic layer deposition) -Prozesse zur Verbesserung der Oberflächenpassivierung und der Entwicklung neuartiger Feinliniendruckprozesse für die Vorderseitenmetallisierung großflächige TOPCon-Solarzellen mit Wirkungsgraden bis zu 24 % realisiert werden. Weiterhin werden im Rahmen des Projekts die Verschaltung busbarloser TOPCon-Solarzellen zu großflächigen Modulen mithilfe der „Tape Solution“-Technologie des Projekt-partners Sticky Solar Power evaluiert und realisiert.

Die im Rahmen des Projekts demonstrierten hocheffizienten Solarzellen und Module mit ausgezeichneter Leistung werden es ermöglichen, die Energieausbeute in der Photovoltaik (PV) zu erhöhen und somit dazu beitragen, die nivellierten Kosten für PV-Strom und die Kosten für schlüsselfertige Systeme in Europa weiter zu senken. Der Produktionsdurchsatz der Fertigungsprozesse, die im Rahmen des Bussard-Projekts adressiert werden, sollte dabei mindestens so hoch sein wie in der Produktion. Unter der Annahme einer Effizienzsteigerung und / oder einer Senkung der Produktionskosten (z.B. weniger Silberverbrauch) werden daher die Gesamtbetriebskosten (engl: total cost of ownership (TCO)) sowie die nivellierten Stromkosten (engl.: levelized cost of energy (LCoE)) deutlich gesenkt. Eine Reduktion von 5-10 % relativ zum Industrie-Standard ist realistisch.

Im Rahmen des Projekts wird die gesamte Wertschöpfungskette von der Zell- bis zur Modulfertigung adressiert.

1.2 Voraussetzungen

Der Projektstart fiel in die Zeit der Covid-Pandemie und war dadurch zunächst teilweise erheblich beeinträchtigt. Dies betraf zum einen die Projekttreffen, z.B. musste der Kick-Off für BUSSARD online stattfinden, zum anderen aber auch die experimentellen Arbeiten. Letztere fanden teilweise unter dem Einfluss der damals noch geltenden landesweiten Restriktionen statt und wurden dadurch geringfügig erschwert. Dennoch gingen die Arbeiten in BUSSARD von Beginn an zügig voran, da an die Pandemie angepasste Meeting-Strukturen bereits etabliert waren und auch der Umgang mit Restriktionen nicht mehr neu war. Rückblickend können die Voraussetzungen für das Projekt also insgesamt als gut bewertet werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Folgende Arbeitspakete (AP) wurden im Projekt BUSSARD bearbeitet:

- AP 0: Projektkoordination (**Fraunhofer ISE**)
- AP 1: Industrielle Oberflächenpassivierung (**Tempress**, ISE)
- AP 2: TOPCon Solarzellenprozessierung (**ISE**)
- AP 3: Feinlinien-Metallisierung (**ISE**, SWG, Continental, PV NanoCell, HighLine)
- AP 4: Verschaltung und Modulintegration von busbarlosen Solarzellen (**Sticky Solar Power**, ISE, Uni Karlstadt)
- AP 5: Kostenkalkulation (**ISE**)

Der erstgenannte Partner leitet jeweils das Arbeitspaket. Der Fokus der Arbeiten am Fraunhofer ISE lag auf

den AP 3 und 4. Eine Liste der Meilensteine in der Verantwortung des Fraunhofer ISE wird in TAB1 gezeigt.

Tabelle 1 Liste der Meilensteine in der Verantwortung des Fraunhofer ISE.

AP	Meilenstein (MS)		Verantwortlich	Monat
1	MS 1.1	Industrielle Al ₂ O ₃ Passivierung von p ⁺ -Emitttern demonstriert mit Sättigungsstromdichte von 20 fA/cm ² (130 Ω/sq, texturiert nach SiN _x -Beschichtung + Kontaktfeuern) bei einem Durchsatz von 5000 wph	Tempress/ ISE	24
2	MS 2.1	Großflächige TOPCon-Solarzellen mit Spitzenwirkungsgraden von über 24% demonstriert mit in AP1 und AP3 entwickelten Prozesstechnologien	ISE	30
3	MS 3.4	Indirekter Feinlinien-Tiefdruck (<20µm Fingerbreite, ausreichend niedriger spezifischer Fingerwiderstand), erfolgreich demonstriert auf busbarlosen Si-TOPCon Solarzellen	ISE	30
	MS 3.6	Multi-Düsen-Dispensing (<20µm Fingerbreite, ausreichend niedriger spezifischer Fingerwiderstand) erfolgreich an busbarlosen Si TOPCon Solarzellen demonstriert	ISE	24
	MS 3.8	FlexTrail-Druck (<20µm Fingerbreite, ausreichend niedriger spezifischer Fingerwiderstand) erfolgreich auf busbarlosen Si TOPCon-Solarzellen demonstriert	ISE	30
4	MS 4.1	Modulintegration mit busbarlosen Solarzellen aus WP 2/3 erfolgreich demonstriert (Vollformat Modul mit "Tape Solution" Verschaltung hergestellt)	ISE	24
	MS 4.2	Klimakammerergebnisse aus dem Temperaturzyklustest zu „Tape Solution“ liegen vor und zeigen einen Leistungsverlust von <5% nach 200 Zyklen	ISE	24
	MS 4.3	Vergleich verschiedener Verschaltungsverfahren für busbarlose Solarzellen mit der "Tape-Lösung" hinsichtlich CTS Analyse und IV-Daten liegt vor	ISE	36
	MS 4.5	Modulintegration mit busbarlosen Solarzellen erfolgreich demonstriert (Module in voller Größe, "Tape Solution"-Ansatz)	ISE	30
5	MS 5.1	Techno-ökonomisches Modell für busbarlose Solarzellen / Modelle etabliert. Reduktion auf Zellproduktionskosten (COO) 5-10% relativ auf Basis der entwickelten Technologien in Bussard nachgewiesen.	ISE	36

Der Zeitplan wird durch ein Balkendiagramm (Gantt) in Abbildung 1 aufgezeigt.

Zeitplan und Meilensteine wurden im Wesentlichen eingehalten. Allerdings waren die Arbeiten vor allem in den AP 3 und 4 deutlich als ursprünglich vorgesehen, weshalb für diese AP deutlich mehr Ressourcen als ursprünglich geplant eingesetzt werden mussten. Aufgrund der begrenzten Ressourcen sowie der nicht ausreichenden Datenlage für eine realistische COO-Kalkulation konnten die Arbeiten in AP 5 daher nicht wie geplant durchgeführt werden.

WP	WP Title	Project Partners (bold: WP-leader)	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
0	Project coordination (ISE)	ISE												
0.1	Project coordination	ISE												
1	Industrial surface passivation by ALD	Tempress												
1.1	Al ₂ O ₃ passivation of p+-emitters	Tempress, ISE												
1.2	Investigation of new ALD materia	ISE, Tempress												
2	TOPCon solar cell process	ISE												
2.1	TOPCon solar cell processing	ISE												
3	Fine line metallization	ISE												
3.1	Indirect gravure printing	SWG, Conti, PV NanoCell, ISE												
3.2	Multi-nozzle dispensing	HighLine, PV Nanocell, ISE												
3.3	Flextrail printing	ISE, PV NanoCell												
3.4	Ink development	PV NanoCell												
3.5	Ink production scale-up	PV NanoCell, ISE												
4	Busbar-less cell interconnection and module fabrication	Sticky Solar Power												
4.1	Busbarless module integration / tape solution	Sticky Solar Power, ISE												
4.2	Reference process	ISE												
4.3	Characterization	Uni Karstadt, Sticky Solar Power												
6	Cost calculation	ISE												
5.1	Cost calculation	All Partners												

Abbildung 1: Zeitplan für das Projekt BUSSARD nach Arbeitspaketen gegliedert.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Zum Zeitpunkt des Projektstarts war die Al₂O₃-Schicht der Industriestandard für die Rückseitenpassivierung von p-type PERC-Solarzellen. Eine Hauptanwendung von Al₂O₃-Schichten in zukünftigen Produktionslinien für n-Typ-Solarzellen (z.B. TOPCon) ist die Passivierung des vorderseitigen p+-dotierten Emitters auf texturierten Oberflächen. Al₂O₃-Schichten ermöglichen generell eine sehr geringe Oberflächen-Rekombination auf p-dotierten Siliziumoberflächen, sowohl auf (100) als auch auf (111) Kristallebenen. Da die Schichten darüber hinaus auch für höher Dotierungen im Bereich $N_{p,s} = 10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ sehr gute Passivierung ermöglichen, ist Al₂O₃ sehr gut geeignet um Bor-Dotierte Emitter auf texturierten Oberflächen zu passivieren. Speziell der ALD-Prozess ist für texturierte Oberflächen eine vielversprechende Technologie, um hohe Anforderungen an die Passivierungsqualität zu erfüllen, ohne Kompromisse beim Durchsatz einzugehen. Auf Basis dessen wurden im Rahmen des Projekts BUSSARD der Herstellungsprozess für großflächige TOPCon-Solarzellen weiterentwickelt.

Neben der hohen Passivierungsqualität ist eine optimierte Metallisierung notwendig, um höchste Wirkungsgrade von TOPCon-Solarzellen zu erreichen. Insbesondere an das Vorderseitenkontaktgitter werden hohe Anforderungen gestellt im Hinblick auf Kontaktgeometrie, niedrige laterale Widerstände und Kontaktwiderstände sowie optimierte Finger- und Busbaranzahl. Zum Projektstart stellte der Siebdruck der industrielle Standard zur Metallisierung von (TOPCon-)Solarzellen dar. Weiter wurden Vorderseitenkontaktgitter mit Busbars realisiert. Im Projekt wurden alternative Metallisierungstechniken evaluiert mit dem Ziel der Kontaktbreitenreduktion bei hinreichender elektrischer Charakteristik. Bezüglich des Metallisierungslayouts wurde auf busbarlose Designs fokussiert.

Busbarlose Metallisierungslayouts stellen die Verschaltungstechnik und Modulintegration vor besondere Herausforderungen, da das typische Löte, welches zu Projektstart den Standard darstellte, nicht ohne Weiteres anwendbar ist. Daher wurden in diesem Projekt leitfähiges Kleben, die Tape Solution sowie SWCT (engl.: smart wire connection technology) für TOPCon entwickelt.[2]

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeit im Projekt BUSSARD wurden in sehr enger Abstimmung und intensiver Kooperation mit den jeweils beteiligten Partnern geplant und durchgeführt. In den AP 1 und 2 gab es eine intensive Kooperation des Fraunhofer ISE mit dem Projektpartner Tempress mit dem Ziel der ALD-Prozessentwicklung und TOPCon-Solarzellenoptimierung. Im AP 3 gab es eine enge Zusammenarbeit mit gemeinsamen Labortagen, zahlreichen Besprechungen und Abstimmungsrunden zum Thema indirekter Tiefdruck mit Continental, SWG, PV NanoCell und dem Fraunhofer ISE. Zum Thema FlexTrail stand das Fraunhofer ISE mit PV NanoCell in engem Kontakt. Das Dispensieren wurde von HighLine zusammen mit dem Fraunhofer ISE für TOPCon gemeinsam entwickelt. Auch hier wurde von PV Nano Cell unterstützt. Im AP 4 kooperierten vor allem Sticky Solar Power mit dem Fraunhofer ISE. Die Karstadt Universität wurde ebenfalls mit einbezogen.

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

2.1.1 AP 0 Projektkoordination

In BUSSARD fanden insgesamt drei Projekttreffen statt, zu denen alle Partner eingeladen wurden. Eines davon wurden online abgehalten. Das Kick-Off Treffen fand am 20.05.2021 statt, das Abschlusstreffen am 25.01.2024. Im Rahmen der Projekt- und Arbeitstreffen wurde regelmäßig der Erfüllungsstand von Meilensteinen geprüft sowie weitere Aktivitäten und anstehende Berichte und Publikationen besprochen. Zwischen den Projekttreffen fanden zahlreiche bi- und trilaterale Treffen zwischen den Partnern statt, meist per Videokonferenz. Das Fraunhofer ISE pflegte vor allem mit Continental, PV Nano Cell, Highline und SWG einen regen Austausch, da die Arbeitspakete dies erforderten.

Das Projektteam des Fraunhofer ISE hat sich darüber hinaus intern im Rhythmus von zwei bis vier Wochen abgestimmt. Dazu kamen zahlreiche bi- und trilaterale Treffen nach Bedarf.

2.1.1 AP 1 Industrielle Oberflächenpassivierung mittels ALD

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht [PM]	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
MS 1.1	Industrielle Al_2O_3 Passivierung von p^+ -Emitttern demonstriert mit Sättigungsstromdichte von 20 fA/cm^2 ($130 \text{ } \Omega/\text{sq}$, texturiert nach SiN_x -Beschichtung + Kontaktfeuern) bei einem Durchsatz von 5000 wph	PM 28	Der Meilenstein konnte im Hinblick auf die erreichte Sättigungsstromdichte erreicht bzw. unterschritten werden (13 fA/cm^2). Das Ziel im Hinblick auf den Durchsatz konnte bisher noch nicht demonstriert werden, da die Anlage noch nicht auf Durchsatz optimiert wurde. Es wird jedoch erwartet, dass dieser Durchsatz erzielbar ist.

AP 1.1 Al_2O_3 Passivierung von p^+ -Emitttern

In diesem Unterarbeitspaket wurde zur Durchführung von ALD an einer Bestandsanlage – einem Fünf-Stock-Rohröfen des Firma TEMPRESS – ein Anlagen-Upgrade durchgeführt. Ziel war es, diese Anlage für die Herstellung von Passivierungsschichten zu ertüchtigen. In Abbildung 2 ist das neue Gaskabinett, über welches die Prozessmedien für die ALD Prozesse bereitgestellt werden, zu sehen. Einhergehend mit den Hardwarearbeiten findet parallel dazu die infrastrukturelle Erweiterung und Anbindung des Upgrades an das Labornetz des PVTEC-Frontend Labors des Fraunhofer ISE statt, in welchem das Rohröfensystem steht. Im Anschluss daran wurde die Prozessinbetriebnahme durchgeführt.



Abbildung 2: Foto des neuen Gaskabinetts für die Bereitstellung der Medien für die ALD Prozesse.

Die Entwicklung des Verfahrens der Atomlagenabscheidung begann mit der Kontrolle des Schichtwachstums. Bei ALD-Prozessen ist das Wachstum der Schicht bei jedem Zyklus begrenzt, daher gibt es keine Wachstumsrate, sondern ein Wachstum pro Zyklus (gpc). Jedes Material zeichnet sich durch ein spezifisches Wachstum pro Zyklus aus, für Al_2O_3 beträgt es etwa 0,1 nm pro Zyklus. Im Gegensatz zu CVD- (engl.: chemical vapor deposition) Verfahren werden die Gasvorläufer separat in die Kammer injiziert und reagieren nacheinander an der Wafer-Oberfläche. Das sehr große Volumen der Kammer, die für dieses Projekt verwendet wird, stellt eine Herausforderung für den ALD-Prozess dar, da das Gas zwischen den Zyklen eingeschlossen werden kann. Die Kontrolle der Schichthomogenität und des gpc ermöglicht es zu beurteilen, ob der CVD-Teil des Wachstumsprozesses begrenzt ist. Das Wachstum pro Zyklus, die Homogenität der Schichtdicke und der Brechungsindex können mit einem Ellipsometer gemessen werden. Abbildung 3: Ellipsometrische Messung Beispiel einer ALD Al_2O_3 -Schicht. Abbildung 3 ist ein Beispiel für eine ellipsometrische Messung, die auf einem mit ALD Al_2O_3 beschichteten Wafer durchgeführt wurde.

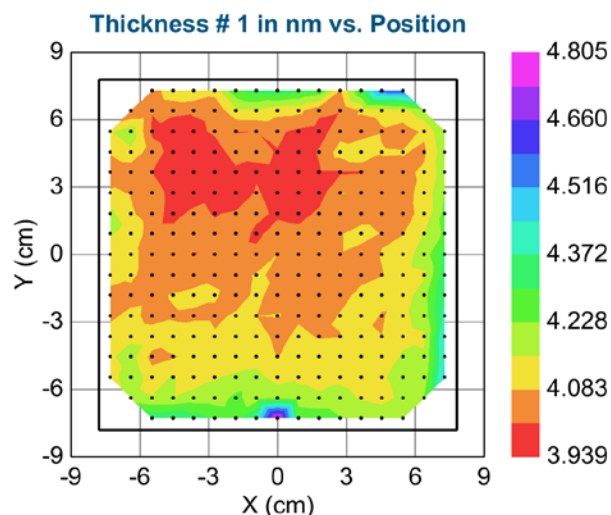


Abbildung 3: Ellipsometrische Messung Beispiel einer ALD Al_2O_3 -Schicht.

Im Projekt erreichten wir ein Wachstum pro Zyklus von 0,1 nm und einen Brechungsindex von 1,64. Beides sind typische Werte für Al_2O_3 . Die Dickenhomogenität auf dem Wafer liegt unter 2,5 % und auf dem Boot bei etwa 2,3 %. Dieses Ergebnis zeigt, dass der CVD-Teil der Abscheidung sehr begrenzt ist.

Bei der Oberflächenpassivierung des Emitters bestand die Herausforderung darin, dass die Oberfläche strukturiert ist und diese Textur die Bildung von Blasen (Gasblasen an der Grenzfläche zwischen den Si-

Schichten) nach dem Kontaktfeuerungsprozess fördert. Die Bildung von Blasen führt zu einem optischen und passiven Versagen der beschichteten Schicht. In Abbildung 2 ist die Emitter-Sättigungsstromdichte für drei Al_2O_3 -Schichtdicken aufgetragen. Bei dicken Al_2O_3 -Schichten (6 nm) wird nach dem Brennen eine Blasenbildung beobachtet, bei geringer Al_2O_3 -Schichtdicke (2 nm) steigt die Emittersättigungsstromdichte j_{0e} . Bei 4 nm Al_2O_3 -Schichtdicke werden niedrige j_{0e} erreicht, ohne dass Blasenbildung auftritt.

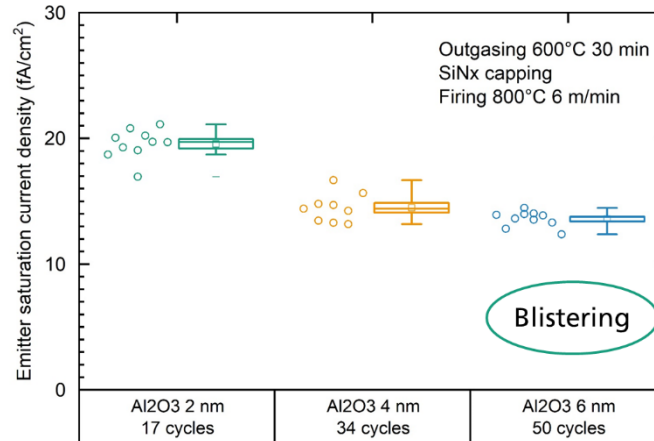


Abbildung 4: Emitter Sättigungsstromdichte für drei verschiedene Al_2O_3 Schichtdicken.

Es wurden zwei weiteren Experimente durchgeführt, um die Inbetriebnahme der ALD- AlO_x abzuschließen. In einem ersten Experiment wurde zunächst ein Parametersatz für Abscheidung und Ausgasen der Schicht evaluiert, sowie verschiedene Ansätze zur Einbindung in den Solarzellenprozess. In einem zweiten Experiment wurde der Parameterraum für die Abscheidung und das notwendige Ausgasen der Schicht in einem thermischen Schritt erweitert, mit dem Ziel, die Rekombination an der Oberfläche weiter zu senken. Abbildung 5 zeigt die nach SiN_x -Deckschicht-Abscheidung und Feuerschrittaktivierung bestimmte Rekombinationsstromdichte J_{0e} der mit der neu in Betrieb genommenen ALD-Abscheideanlage und der PECVD (engl.: plasma enhanced chemical vapor deposition). Die Ergebnisse zeigen deutlich die Vorteile der ALD-Technologie, mit einer Verringerung der Rekombinationsstromdichte von etwa 23 fA/cm² auf 13 fA/cm², was einer Verringerung um mehr als 40% entspricht. Dies ist insbesondere unter dem Gesichtspunkt relevant, dass der Großteil der Rekombinationsverluste an der Vorderseite auftritt und die passivierte Oberfläche hier etwa 94 bis 95% der Gesamtfläche stellt. Auch wenn in einem Folgeexperiment, siehe nachfolgend, nicht die gleiche Verringerung erzielt werden konnte, sondern nur Werte im Bereich 18 bis 20 fA/cm², so stellt auch dies eine deutliche Verbesserung gegenüber dem bisherigen Standard dar.

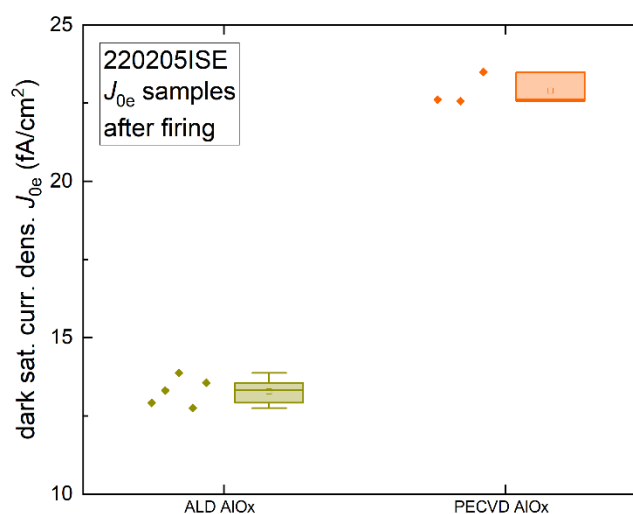


Abbildung 5: Rekombinationsstromdichte J_{0e} für die nicht-kontaktierte, passivierte Solarzellenvorderseite für zwei verschiedene Abscheidemethoden der AlO_x -Schicht.

Im zweiten Experiment wurden die Parameter für Abscheidetemperatur und thermische Nachbehandlung, im Folgenden als Ausgasen bezeichnet, noch einmal genauer untersucht, um ausgehend von ALD-Prozess im ersten Experiment (Gruppe 9) auch im Vergleich zum bisherigen PECVD Standard (Gruppe 11) die Passivierungsqualität weiter zu erhöhen. Für dieses Experiment wurden ausschließlich symmetrische Proben hergestellt, die die Vorderseite der Solarzelle abbilden, analog zu den in Abbildung 5 gezeigten Ergebnissen. Ein Teil der Ergebnisse dieses Experiments, hier im Speziellen die bei einer Injektionsdichte von 10^{15} cm^{-3} gemessene effektive Lebensdauer der Minoritätsladungsträger, ist in Abbildung 6 dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass weder Gruppe 11 noch Gruppe 9 hier die höchsten Werte aufweisen. Stattdessen zeigen insbesondere Gruppen 1, 2 und 6, bei denen die Temperaturen für Abscheidung und Ausgasen gegenüber Gruppe 9 verringert wurden, deutlich höhere Lebensdauern (τ_{eff}), bei gleichzeitig geringer Schwankung innerhalb der Gruppe. Das Feintuning der Prozessparameter liefert hiermit eine weitere Verbesserung der Passivierungsqualität, so dass das Potential der Technologie besser gehoben werden kann. Diese Ergebnisse flossen in die TOPCon-Solarzellenherstellung ein.

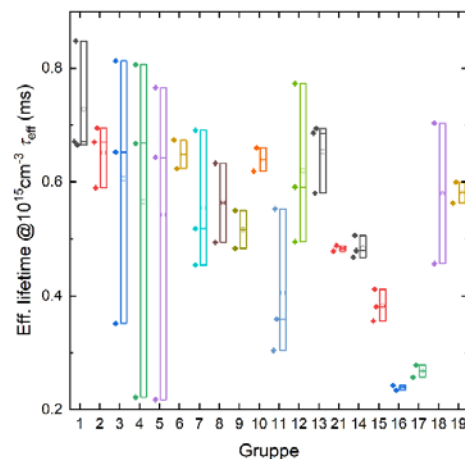


Abbildung 6: Bei einer Injektionsdichte von 10^{15} cm^{-3} gemessene effektive Lebensdauer symmetrischer J_{0e} -Proben, gemessen mittels QSSPC nach Kontaktfeuern.

Im Rahmen des Projekts Bussard wurden keine weiteren Experimente durchgeführt, um die Passivierung von Boremittern zu optimieren. Jedoch wurden die bisherigen Experimente in anderen Forschungsvorhaben weitergeführt, mit dem gleichen Ziel, die Rekombinationsstromdichte J_{0e} an der Vorderseite der Solarzelle zu senken. Neben der alleinigen Betrachtung der Prozessparameter der ALD wurde hier auch ein Fokus auf die nachfolgenden Prozessschritte „Ausgasen“ und „PECVD-SiN_x-Abscheidung“ gelegt, da diese, abhängig von den ALD-Parametern, mit der AlO_x-Schicht wechselwirken. In diesen Experimenten konnte J_{0e} weiter gesenkt werden, so dass für den bisherigen Diffusions-Standardprozess mit einem Schichtwiderstand von etwa 114 Ohm/sq. Nun ein Wert von 17 bis 18 fA/cm² ermittelt wird, siehe Abbildung 7. Darüber hinaus gehend ist in nachfolgender Grafik auch zu sehen, dass eine Erhöhung des Schichtwiderstandes der Bordiffusion als Folge der verringerten Auger-Rekombination j_{0e} noch weiter sinkt. Der **Meilenstein MS 1.1** gilt somit von technischer Seite her als erfüllt, wobei der geforderte Durchsatz hier noch nicht erreicht wurde, da der Prozess bisher nicht auf Durchsatz hin optimiert wurde.

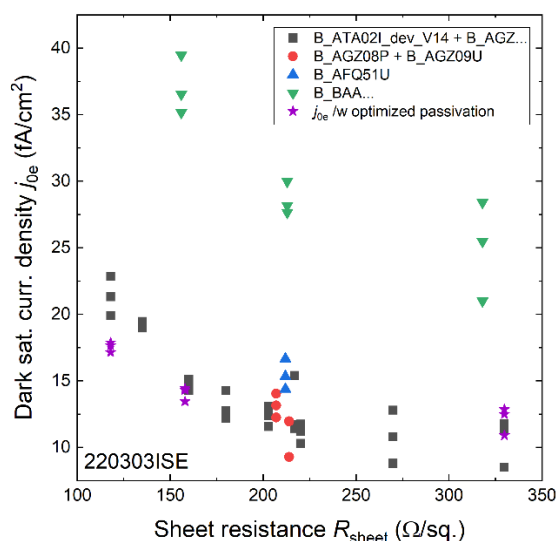


Abbildung 7: Passivierung von neuartigen Boremittlern mittels ALD- $\text{AlO}_x/\text{SiN}_x$, sowie weiterentwickelten Einzelprozessen zur Passivierung (lila Sterne). Werte bestimmt an symmetrischen Proben aus QSSPC-Messungen, nach Kontaktfeuern.

2.1.2 AP 2 TOPCon-Solarzellenprozess

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht [PM]	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
MS 2.1	Großflächige TOPCon-Solarzellen mit Spitzenwirkungsgraden von über 24% demonstriert mit in AP1 und AP3 entwickelten Prozesstechnologien	28	Der Meilenstein konnte vollständig erreicht werden. Es wurde ein maximaler Wirkungsgrad von 24,2 % demonstriert.

Da zur Evaluierung der verschiedenen Metallisierungs- und Modulfertigungsverfahren in AP 3 und 4 große Mengen an vorprozessierten Wafern benötigt werden, wurden schon früh im Projekt geeignete Teststrukturen definiert und mit der Herstellung solcher Proben begonnen. Je nach angestrebter Anwendung und abhängig von der Zielsetzung eines Experiments ist es nicht immer notwendig, die Tests auf Zell-Präkursoren durchzuführen, welche in der Herstellung zeitaufwändig und damit auch teuer sind. Stattdessen kann es sinnvoll sein, den Aufbau der Teststruktur zu vereinfachen.

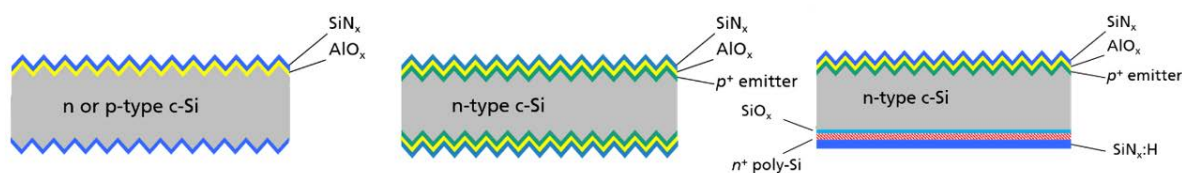


Abbildung 8: Schematische Darstellung von Querschnitten dreier Teststrukturen. Links asymmetrisch ohne Emitter, Mitte symmetrisch mit Emitter, rechts Zellvorläufer.

In der Abbildung 8 sind drei Querschnitte von Teststrukturen gezeigt. Die linke Teststruktur dient in AP 3 zur ersten Evaluierung des Druckverfahrens, zur Einstellung von Prozessparametern und zur Bestimmung der sich damit zu realisierenden Größen wie Fingerbreiten oder -leitfähigkeiten. Versehen mit einem busbarlosen Kontaktgitter wurde sie auch für das Einfahren von Verschaltungsprozessen in AP 4 verwendet. Die mittlere Teststruktur eignet sich aufgrund des symmetrischen Aufbaus und des Vorhandenseins eines Emitters zur Bestimmung von Kontaktrekombination und -widerständen in AP 3.

Die rechte Struktur dient zur Herstellung von Solarzellen, an der dann der finale Test der Metallisierung bestanden werden muss.

Im Berichtszeitraum wurden Teststrukturen wie in Abbildung 8 links und Mitte gezeigt im Umfang von jeweils 960 Wafern hergestellt und dem Backend zur Metallisierung übergeben. Die Herstellung der letzten Teststruktur findet im nächsten Berichtszeitraum statt.

Im Rahmen des in AP 1 gezeigten ersten Experiments erfolgte neben der Herstellung von Lebensdauerproben ebenfalls die Herstellung von TOPCon-Solarzellen, unter Verwendung des außerhalb des Projekts entwickelten Standardprozesses. Die Solarzellen wurden aus kommerziell erhältlichen n-dotierten Siliciumwafern mit Kantenlänge 156,75 mm hergestellt, und weisen den Emitter auf der Solarzellen-vorderseite auf. Die TOPCon-Schicht wurde mittels Gasphasenabscheidung bei reduziertem Druck (LPCVD) auf eine in-situ in Sauerstoff gewachsene SiO_x -Tunneloxidschicht abgeschieden, die Dotierung der Schicht erfolgte während der Abscheidung. In dem Experiment wurden 8 Gruppen prozessiert, wobei in den ersten 4 Gruppen die Abscheidung der AlO_x -Schicht mittels ALD zum Einsatz kam, und in den restlichen 4 Gruppen mittels PECVD. In den ALD-Gruppen wurde unter anderem untersucht, wie sich die Ergebnisse unterscheiden, wenn die Proben bei der ALD-Abscheidung alleine in einem Slot des Quarzboots stehen (single slot) bzw. zwei Proben in einem Slot, mit der nicht zu beschichteten Rückseite nach innen (back-to-back, btb). Da die AlO_x -Schicht nur auf der Vorderseite der Solarzelle zwingend gewünscht ist, ermöglicht dies effektiv eine Verdopplung des Durchsatzes der Anlage (1200 anstatt 600 Wafer pro run).

Die Ergebnisse der Zelltestermessung sind in Abbildung 9 gezeigt. Selbst mit dem noch nicht verbesserten Prozess lässt sich unter Verwendung des ALD-Prozesses (aquamarin und hellgrün) eine gegenüber dem PECVD-Referenzprozess (dunkelgrün) deutliche Steigerung des Wirkungsgrades feststellen. Diese resultiert aus einer Erhöhung der Leerlaufspannung V_{oc} und des Füllfaktors FF (konkret des pseudo-Füllfaktors). Die Steigerung des Wirkungsgrades liegt in der Größenordnung 0.2 bis 0.3 %_{abs}, also grob 1%_{rel}. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn die Positionierung der Proben beim ALD-Prozess in single-slot-Konfiguration erfolgt. Aus der Literatur ist bekannt, dass auf TOPCon-Schichten abgeschiedene AlO_x -Schichten die Wasserstoffbereitstellung beim Kontaktfeuern verbessern können, was im Vergleich zur btb-Positionierung ein Grund für das erhöhte V_{oc} sein könnte. Eine andere mögliche Erklärung ist eine durch die AlO_x -Schicht auf der Rückseite verringerte Kontaktausbildung. Die genaue Ursache ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht festgestellt worden. Wohingegen in Produktion ein möglichst hoher Durchsatz bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad gewünscht ist, was für eine Prozessierung in btb-Konfiguration spricht, ist dies für Forschungsinstitute weniger wichtig. Zudem ist auch bei btb-Platzierung der Proben die Abscheidung nicht wirklich einseitig, es gibt einen nicht zu vernachlässigenden Umgriff auf die innenliegenden Seiten. Aus Homogenitätsgründen wird deshalb festgelegt, die Proben in Zukunft in single-slop-Positionierung zu prozessieren.

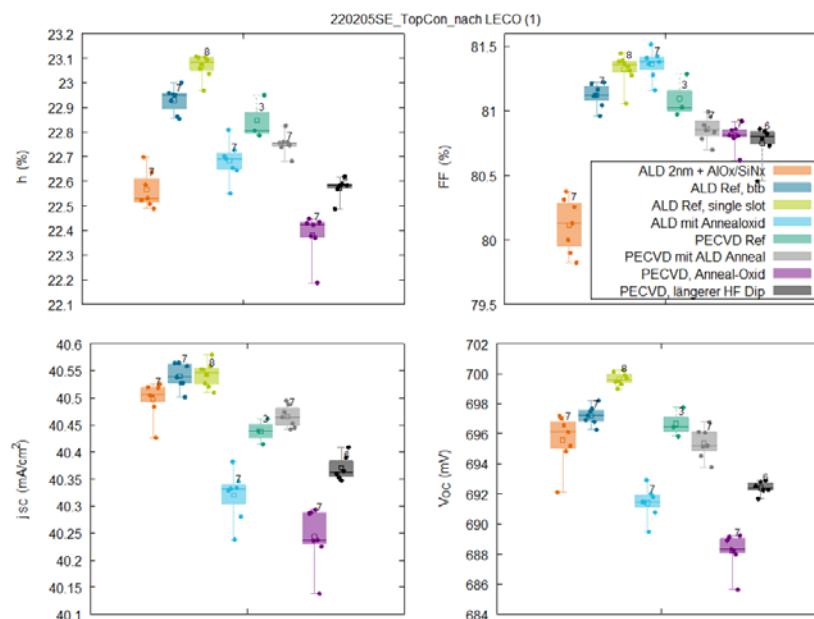


Abbildung 9: Ergebnisse der Solarzellenmessung an einem industriellen Zelltester, nach Kontaktoptimierung (LECO). Die Fläche der Solarzellen beträgt 244 cm².

Basierend auf Ergebnissen dieses Experiments erfolgt am Fraunhofer ISE eine Umstellung der Standardprozessequenz. Die Abscheidung der AlO_x -Schicht wird in Zukunft standardmäßig mittels ALD erfolgen.

In einem weiteren Folgeexperiment außerhalb des Forschungsvorhabens BUSSARD wurden die im zweiten Experiment aus AP 1 identifizierten verbesserten Prozessparameter eingesetzt und ebenfalls Solarzellen hergestellt. Dabei kamen zusätzlich neue Metallisierungssiebe und -pasten zum Einsatz. In diesem Experiment konnte der Wirkungsgrad der hergestellten Solarzellen noch einmal weiter gesteigert werden, auf nun 23.5 %. Die verbesserten Parameter für ALD und Ausgasen wurden dabei noch einmal bestätigt. Außerdem wurden 400 Solarzellen-Präkursoren bis einschließlich Oberflächenpassivierung hergestellt für anschließende Metallisierung mittels Flachbett-Siebdruck und die Modulintegration in AP 4.

Des Weiteren wurde außerhalb des Projekts der Basisprozess für die Solarzellenherstellung weiter optimiert, unter Anderem unter Einbeziehung der im AP 1 aufgeführten Teilverbesserungen für die Solarzellenvorderseite. Dies resultiert in einem neuen internen Solarzellenrekord für großflächige TOPCon-Solarzellen (M2-Format) mit Siebdruck-Kontaktierung von 24.2 %, siehe Tabelle 2. **Meilenstein MS 2.1** kann damit als erfüllt angesehen werden.

Tabelle 2: IV-Parameter der besten Zelle. Kalibrierte Messung im Fraunhofer ISE Callab PVCells, 30 Stromdrähte, rückseitig ganzflächig kontaktiert, goldener Messchuck. Vorder- und Rückseitenwiderstand der Kontaktgrids (ohne Busbar) vernachlässigt.

Messung	Fläche (cm ²)	Eta (%)	V_{oc} (mV)	j_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)
Callab	244.5	24.2	714.4	41.4	81.7

2.1.3 AP 3 Feinlinien-Metallisierungsprozess

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
MS 3.4	Indirekter Feinlinien-Tiefdruck (<20µm Fingerbreite, ausreichend niedriger spezifischer Fingerwiderstand), erfolgreich demonstriert auf busbarlosen Si-TOPCon Solarzellen	07/2023	Der Meilenstein wurde fristgerecht teilweise erfüllt. Da keine TOPCon-kompatible Fluide zur Verfügung standen, wurden die Arbeiten auf SHJ-Proben durchgeführt. Fingerbreiten < 20 µm konnten nicht reproduzierbar erzeugt werden.
MS 3.6	Multi-Düsen-Dispensing (<20µm Fingerbreite, ausreichend niedriger spezifischer Fingerwiderstand) erfolgreich an busbarlosen Si TOPCon Solarzellen demonstriert	01/2024	Der Meilenstein wurde mit Verzögerung aufgrund von Pastenalterung und Problemen im Lieferprozess erfüllt. Es konnten erfolgreich TOPCon-Proben mit konkurrenzfähigen elektrischen Kennwerten und einer mittleren Kernfingerbreite von 19,8 µm auf Zellniveau demonstriert werden.
MS 3.8	FlexTrail-Druck (<20µm Fingerbreite, ausreichend niedriger spezifischer Fingerwiderstand) erfolgreich auf	12/2022	Der Meilenstein wurde mehrere Monate vor der Frist teilweise erfüllt. Da keine TOPCon-kompatible Fluide zur Verfügung standen, wurden die

	busbarlosen Si TOPCon-Solarzellen demonstriert		Arbeiten auf SHJ-Proben durchgeführt.
--	--	--	---------------------------------------

AP 3.1 Indirekter Tiefdruckprozess

In den ersten Monaten des Projektes fanden zahlreiche intensive Abstimmungen zwischen den Projektpartnern Continental, SWG, PV NanoCell und Fraunhofer ISE statt. Dabei wurden verschiedene Möglichkeiten zur Realisierung der Anlagenplattform evaluiert. Schließlich wurde die Anlage Challenger 173 im ContiTech-Labor bei Continental als Basis definiert und nötige Umbaumaßnahmen festgelegt. Abbildung 10 zeigt den Aufbau für den indirekten Tiefdruck schematisch.

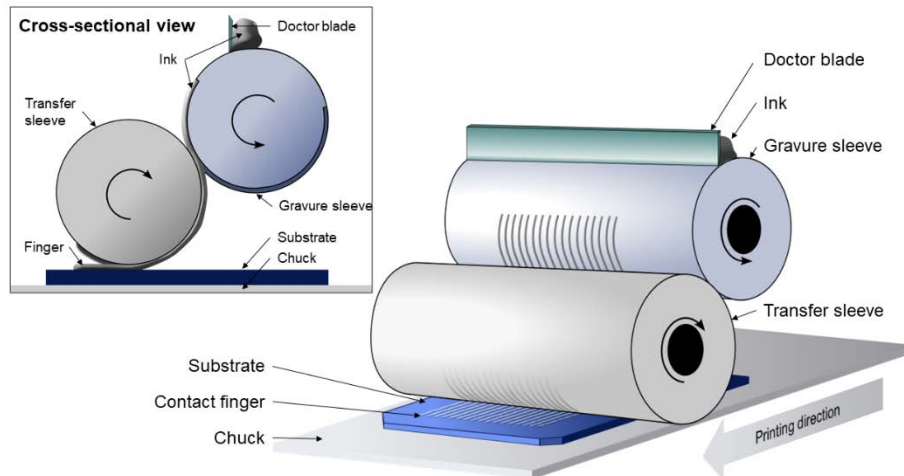


Abbildung 10: Schematische Zeichnung des Versuchsaufbaus für den indirekten Tiefdruck.

Weiter wurden umfangreiche Recherchen betrieben, um geeignete Fluide für erste Druckversuche zu identifizieren. Neben verschiedenen (verdünnbaren) Siebdruck-Hochtemperaturpasten für TOPCon-Zellen-Vorderseiten und -Rückseiten wurden maßgeschneiderte Fluide des Projektpartners *PV Nano Cell* verwendet.

Insgesamt wurden drei umfangreiche Experimentkomplexe mit zahlreichen Variationen durchgeführt. Diese waren zum Beispiel:

- 10 verschiedene gedruckte Fluide
- 3 Verschiedene Teststrukturen
- 5 Gravur- und 5 Transfersleeve-Varianten
- Verschiedene Rakel
- TOPCon und SHJ Substrate
- Druckparameter, hier vor allem: Rakelwinkel, Druckgeschwindigkeit, Zahl der Einfärbungen des Transfersleeves

Mangels Verfügbarkeit von TOPCon-kompatiblen Fluiden wurden nur wenige Versuche mit verdünnten TOPCon-Siebdruckpasten (andere Hersteller) gemacht. Die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines solchen Fingers, realisiert mit einer TOPCon-Vorderseitenpaste, in Abbildung 11 zeigt, dass die Fingerhöhe sehr inhomogen ist. Stellenweise sind die Finger weit überdurchschnittlich hoch. Die Ursache für diese Fingergeometrie konnte im Projekt nicht geklärt werden.

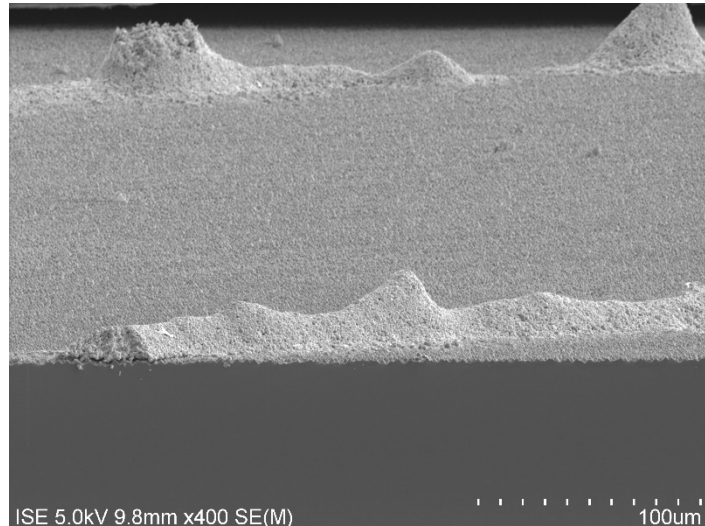


Abbildung 11: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme zweier mittels indirekten Tiefdrucks realisierter Kontaktfinger in der schrägen Aufsicht. Für den Druck wurde eine verdünnte TOPCon-Vorderseitenpaste verwendet.

Im Folgenden wird auf das zentrale Experiment in diesem Unterarbeitspaket fokussiert. Es zielt auf die Vorderseitenmetallisierung von SHJ-Solarzellen ab. Die hier vorgestellten Prozesse sind das Ergebnis der Entwicklungen in BUSSARD.

Versuchsbeschreibung

Industrielle SHJ-Präkursoren mit 156,75 mm Kantenlänge (pseudo-quadratisch) und einem Durchmesser von 210 mm (M2-Format) dienten als Ausgangsmaterial für die experimentellen Arbeiten, deren Prozessablauf in Abbildung 12 skizziert ist. Zunächst wurde die implizite Leerlaufspannung iV_{oc} aller Wafer mit Hilfe von Lebensdauermessungen bestimmt. Anschließend wurden die Wafer in Gruppe 1 und Gruppe 2 verteilt, so dass beide Gruppen durch ähnliche mittlere iV_{oc} -Werte gekennzeichnet waren.

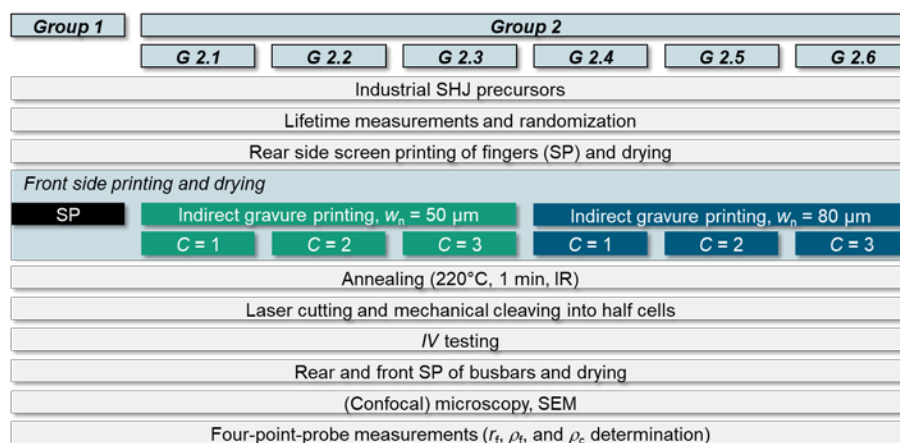


Abbildung 12: Grafische Darstellung des experimentellen Prozessablaufs. Die Untergruppen der Gruppe 2 folgen der Variation von w_n (Sollfingerbreite) und C (Anzahl der Einfärbezyklen des Transfersleeves).

Die rückseitige Metallisierung aller Proben wurde im Siebdruckverfahren mit einer Sollfingerbreite von $w_n = 24 \mu m$ bedruckt. Dieses Metallgrid besteht aus 196 Fingern ohne Busbars.

Die Proben der Gruppe 1 erhielten ein siebbedrucktes busbarloses Metallgrid auf der Vorderseite. Das Layout ist in zwei gleiche Teile unterteilt, die jeweils 60 Finger (äquidistant, Fingerabstand $p_f = 1,3 \text{ mm}$) $w_n = 20 \mu m$ aufweisen. Die Fingerlänge l_f beträgt 155 mm. Die gleiche kommerzielle Paste auf Silberbasis wurde für den Siebdruck auf der Vorder- und Rückseite verwendet. Durch das Wiegen der Proben direkt vor und nach dem Druck auf der Vorderseite wurde der Nasspasten-Auftrag bestimmt. Nach beiden Druckschritten erfolgte je eine kurze Trocknung bei 200 °C für 1 min in einem Inline-Förderbandofen.

Proben der Gruppe 2 wurden auf der Vorderseite im indirekten Tiefdruck metallisiert. Für den Druck in Gruppe 2 wurde die halbautomatische Maschinenplattform Schläfli Challenger 173 verwendet, auf der alle notwendigen Komponenten wie Zylinder, Sleeves und Rakelmesser montiert waren. Die Druckgeschwindigkeit wurde zu 10 m min^{-1} gewählt.

Der Tiefdrucksleeve wurde von der Sächsischen Walzengravur (SWG) GmbH gefertigt. Er besteht aus einem Nickel/Kupfer-Materialstapel mit einer Wandstärke von $0,5 \text{ mm}$. Die Bildelemente wurden mittels Laserbearbeitung in die Oberfläche der Hülse eingraviert. Es wurde eine nominale Gravurtiefe von $60 \text{ }\mu\text{m}$ realisiert. Anschließend wurde die Oberfläche elektropoliert und mit Chrom überzogen. Das gravierte Layout ist in zwei Teile unterteilt, die jeweils 53 Finger aufweisen. Der Fingerabstand ist derselbe wie auf der Vorderseite der Proben der Gruppe 1. Die Fingerlänge l_f beträgt 146 mm , was sich in Bezug zu Gruppe 1 etwas unterscheidet.

Da sich das Layout nicht bis zu den Waferändern erstreckte, gab es im indirekten Tiefdruck Spielraum für die manuelle Ausrichtung auf dem Drucktisch. Dies ging auf Kosten der exakten Vergleichbarkeit von Sieb- und Tiefdruck. Die beiden Hälften des gravierten Vorderseitengitters unterscheiden sich durch die Tiefdruckbreite, die auf der einen Hälfte $50 \text{ }\mu\text{m}$ und auf der anderen $80 \text{ }\mu\text{m}$ beträgt. Entsprechend der Tiefdruckbreitenvariation wurde Gruppe 2 in die Gruppen 2.1, 2.2 und 2.3 ($50 \text{ }\mu\text{m}$ Tiefdruckbreite) und 2.4, 2.5 und 2.6 ($80 \text{ }\mu\text{m}$ Tiefdruckbreite) unterteilt. Die zusätzliche Differenzierung geht einher mit einer Variation der Einfärbezyklen des Transferzylinders C von eins bis drei. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass das Substrat stets nur einmal bedruckt wurde.

Der in dieser Arbeit verwendete Transferzylinder wurde aus Ethylen-Propylen-Dien-Monomer (EPDM) mit einer Härte von 80 Shore A hergestellt. Er wurde von Continental Surface Solutions hergestellt und von SWG laserstrukturiert.

Unmittelbar nach dem Druck wurden die Proben der Gruppe 2 für 5 min auf einer Heizplatte bei einer eingestellten Temperatur von $200 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet. Nach dem Drucken und Trocknen wurden alle Solarzellen der Gruppe 1 und 2 bei $220 \text{ }^\circ\text{C}$ für 1 min in einem Inline-Förderbandofen getempert. Anschließend wurden sie mittels Laserritzen und mechanischem Brechen (Englisch: laser scribing and mechanical cleaving (LSMC)) in Halbzellen getrennt. Auf den LSMC-Schritt folgten I/V-Messungen unter Standard-Testbedingungen (STC) mit einem industriellen Zelltester. Es wurde eine GridTouch-Kontaktierungseinheit mit 30 Drähten für die Strom- und fünf für die Spannungsmessung verwendet. Zur weiteren Charakterisierung wurden anschließend fünf Busbars (äquidistant, Busbarabstand $p_{bb} = 31,2 \text{ mm}$) auf beiden Seiten der Halbzellen (Proben der Gruppe 1 und 2) im Siebdruckverfahren gedruckt (Rückseite zuerst, dann Vorderseite). Nach jedem Druckschritt wurden die Proben in einem Durchlaufofen für $1,5 \text{ min}$ bei $200 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet. Die (konfokale) Mikroskopie wurde viermal pro Probe durchgeführt. Jede Messung wurde in der Mitte innerhalb eines Busbarpaares durchgeführt. Die Mikroskopbilder wurden mit Hilfe von Software automatisch bzgl. Fingerbreite w_f , Fingerhöhe h_f und Fingerquerschnittsfläche A_f ausgewertet.

Mithilfe des Zelltesters, diesmal ausgestattet mit einer Kontaktierungseinheit bestehend aus fünf Leisten, wurden die elektrischen Widerstände zwischen benachbarten Busbarpaaren gemessen. Basierend auf den vier Messungen pro Probe wurde ein mittlerer Busbar-zu-Busbar-Widerstand R_{bb} bestimmt und der Fingerwiderstand r_f eines einzelnen Fingers berechnet. Dabei wurde eine Parallelschaltung aller Finger zwischen den Busbars angenommen. Der Einfluss der Solarzellenwafer auf die Messung und mögliche Fingerunterbrechungen wurden vernachlässigt und r_f berechnet.

$$r_f = R_{bb} \cdot n_{\text{finger}} \cdot p_{bb}^{-1} \quad (1)$$

Mittels der r_f und A_f Daten wurde der spezifische Fingerwiderstand berechnet.

$$\rho_f = r_f \cdot A_f \quad (2)$$

Für zufällig ausgewählte Proben der Gruppen 1 und 2 wurden jeweils vier Streifen mittig zwischen Busbars mittels LSMC vereinzelt. Die Streifenbreite wurde zu 10 mm gewählt und die Streifenlänge entspricht der Länge der Halbzelle. Das Laserritzen wurde rechtwinklig zur Fingerrichtung durchgeführt.

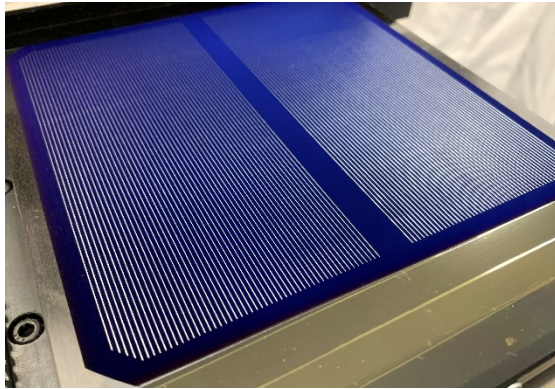
Auf der Vorderseite jedes Streifens wurde der Kontaktwiderstand ρ_c an zwei verschiedenen Positionen bestimmt. Zu diesem Zweck wurde die Transferlängenmethode (TLM) angewendet.

Aus ausgewählten Halbzellen wurden quadratische Proben mit 10 mm Kantenlänge mittels LSMC ausgeschnitten. Ausgewählte Bereiche des Probenrandes wurden mittels Ionenpolieren präpariert, so dass Fingerquerschnittsbereiche mithilfe von REM analysiert werden konnten.

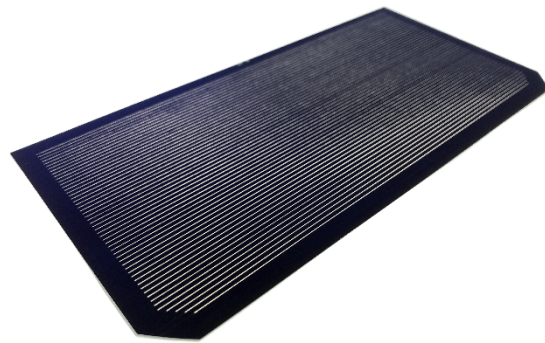
Untersuchung der Geometrie von Metallkontakten gedruckt mit indirektem Tiefdruck

Wie in der Versuchsbeschreibung erwähnt, wurde das Vorderseitengrid im Tiefdruckverfahren auf vollformatige SHJ-Wafer gedruckt, das Layout enthält aber zwei gleich dimensionierte Teile für das anschließende Schneiden der Proben in Halbzellen. Abbildung 13 zeigt Fotos sowohl einer SHJ-Vollzelle direkt nach dem Druck als auch einer SHJ-Halbzelle nach dem Schneiden. Die visuelle Inspektion zeigt, dass das Druckbild vollständig auf dem Wafer realisiert worden ist und der Ausdruck homogen ist.

Da die Wafer zum Drucken manuell auf den Drucktisch gelegt wurden, erstreckt sich das Layout nicht bis zu den Waferkanten und es wurde bewusst ein Abstand von 5 mm zu jeder Kante einer Halbzelle gelassen, um mögliche Ausrichtungstoleranzen zu bewältigen. Wie unten ausgeführt wird, ist dies nachteilig für die Leistung der Solarzelle, verhindert aber das Überdrucken der Zellränder und damit potenzielle Kurzschlüsse in der Zelle. Eine präzise Positionierung wäre möglich, wenn der Drucker mit einem entsprechenden Kamerasystem ausgestattet wäre.



(a)



(b)

Abbildung 13: Foto einer SHJ-Vollzelle nach indirektem Tiefdruck der Frontmetallisierung (a) und einer SHJ-Halbzelle nach dem Schneiden (b).

Um zu hohe optische und ohmsche Verluste in der Solarzelle zu vermeiden, müssen Metallelektroden einige geometrische Kriterien erfüllen. Deshalb wird im Folgenden die tiefgedruckte Metallisierung auf Mikroebene analysiert. Abbildung 14 (a) und (b) stellen die Fingerbreite w_f bzw. die Fingerhöhe h_f von Sieb- und Tiefdruckkontakten dar. Die w_f - und h_f -Daten werden als Funktionen der nominalen Fingerbreite w_n dargestellt, die der Sieböffnung oder der Breite der Gravuren entspricht. Darüber hinaus werden die w_f - und h_f -Daten beim indirekten Tiefdruck für unterschiedliche Einfärbezyklen C differenziert.

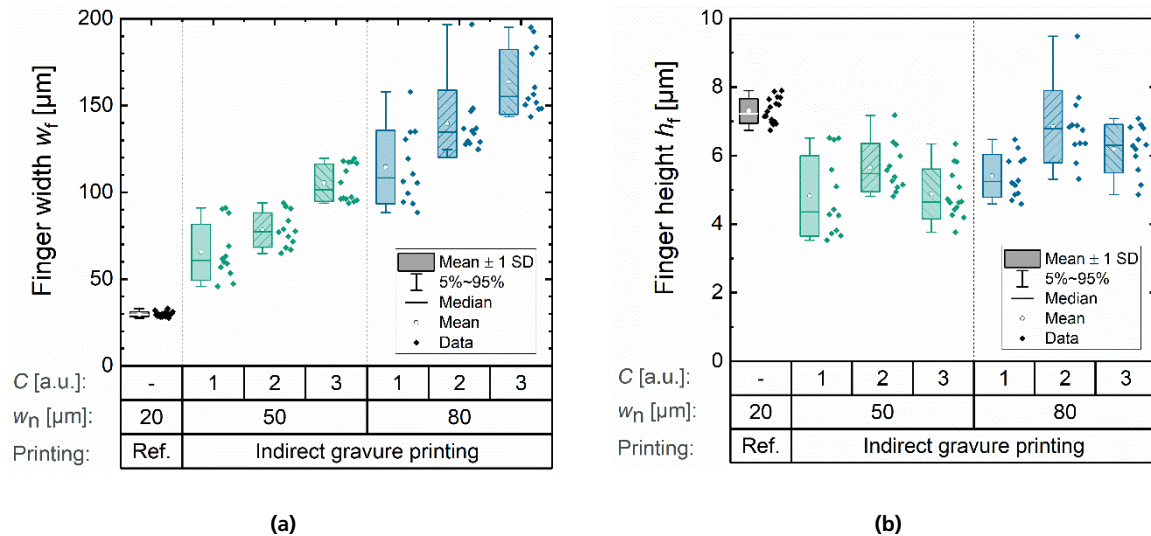


Abbildung 14: Fingerbreite w_f (a) und Fingerhöhe h_f (b) von siebgedruckten (Ref.) und tiefgedruckten Metallkontakten, die auf SHJ-Solarzellen gedruckt und mittels konfokaler Mikroskopie charakterisiert wurden. Die Daten werden in Abhängigkeit von der eingestellten Fingerbreite w_n und der Anzahl der Einfärbezyklen C des Transfersleevs dargestellt. C ist auf den indirekten Tiefdruck, nicht aber auf den Siebdruck anwendbar.

Für $w_n = 20 \mu\text{m}$ erreichen siebgedruckte Finger in dieser Arbeit $w_f = (30 \pm 2) \mu\text{m}$. w_f von tiefgedruckten Metallkontakten hängt sowohl von w_n als auch von C ab: Je kleiner w_f und C , desto schmaler die Kontakte. Im indirekten Tiefdruck werden kleinste Fingerbreiten für $w_n = 50 \mu\text{m}$ und $C = 1$ erreicht. Diese betragen in diesem Fall im Mittel $w_f = (65 \pm 16) \mu\text{m}$. Im Vergleich zum Siebdruck variiert die Breite der gemessenen Fingersegmente bei tiefgedruckten Kontakten stärker, was sich in der höheren Standardabweichung von w_f ausdrückt. Es wird angenommen, dass dies sowohl auf Schwankungen der Substratdicke als auch auf mögliche nicht-optimale Ausrichtungen der Tiefdruck- und Transferzylinderachsen zurückzuführen ist.

Während w_f von tiefgedruckten Kontaktfingern stark von w_n und C abhängig ist, ist dies für h_f nicht der Fall. Es zeigen sich keine signifikanten Unterschiede für alle betrachteten Tiefdruckverfahren. Für $w_n = 50 \mu\text{m}$ und $C = 1$ gilt $h_f = (5 \pm 1) \mu\text{m}$, was etwas weniger ist als das, was Siebdruckkontakte erreichen, nämlich $h_f = (7,3 \pm 0,4) \mu\text{m}$. Die Idee der C -Erhöhung war es, die Menge der auf das Substrat aufgetragenen Tinte zu erhöhen und damit h_f zu erhöhen. Tatsächlich erhöht sich die Menge der gedruckten Flüssigkeit für die C -Steigerung von 1 auf 3, aber die Metallkontakte werden breiter statt höher. Dies ist ein unerwünschter Effekt, da breitere Kontakte zu höheren optischen Verlusten der Solarzelle führen. Darüber hinaus macht $C > 1$ den Druckprozess aufwändiger und reduziert das Durchsatzpotenzial des Prozesses.

Obwohl die Geometrie von tiefgedruckten Metallkontakten noch Verbesserungspotenzial zeigt, demonstrieren die in Abbildung 15 gezeigten Rasterelektronenmikroskop- (REM) Aufnahmen, dass in dieser Arbeit Kontaktfinger hergestellt wurden, die für die Anwendung in Solarzellen geeignet sind. Es wird sowohl die Mikrostruktur eines siebgedruckten Referenzkontakts (Abbildung 15 (a) und (c)) als auch eines tiefgedruckten Kontakts (Abbildung 15 (b) und (d)) gezeigt. Die Draufsicht unter einem Winkel auf einen tiefgedruckten Kontakt ($w_n = 50 \mu\text{m}$, $C = 1$) demonstriert eine vollständige Bedeckung des Substrats mit Silber entlang des Fingers, eine signifikante Fingerhöhe und eine Fingerbreite von $60 \mu\text{m}$ an der Querschnittsfläche. Einen detaillierteren Blick auf die Mikrostrukturen der Finger bietet Abbildung 15 (c) und (d). Während die Siebdruckpaste Silberpartikel beinhaltet, die im Durchmesser stark variieren, ist die Partikelgröße der für den indirekten Tiefdruck verwendeten Tinte relativ homogen verteilt. An der Schnittstelle zwischen Kontaktfinger und Substrat sind für beide betrachteten Kontakttypen keine Hohlräume und Lücken sichtbar, was eine Voraussetzung für einen niedrigen elektrischen Übergangswiderstand ist. Die Verwendung kleinerer Partikel wie im Fall der Tinte für indirekten Tiefdruck scheint sogar die Anzahl der mechanischen Kontakte zwischen Silberpartikeln und der Indiumzinnoxid (englisch: indium tin oxide (ITO))-Schicht, der obersten Schicht des Substrats, zu erhöhen. Darüber hinaus ist aus der Literatur bekannt, dass eine Reduzierung des Partikeldurchmessers zu einem verstärkten Sintern führen kann. Tatsächlich scheint die Mikrostruktur des im indirekten Tiefdruck hergestellten Kontakts auf

Nanosilberbasis kompakter zu sein und es sind weniger Hohlräume sichtbar als beim Siebdruckkontakt mit größeren Partikeln.

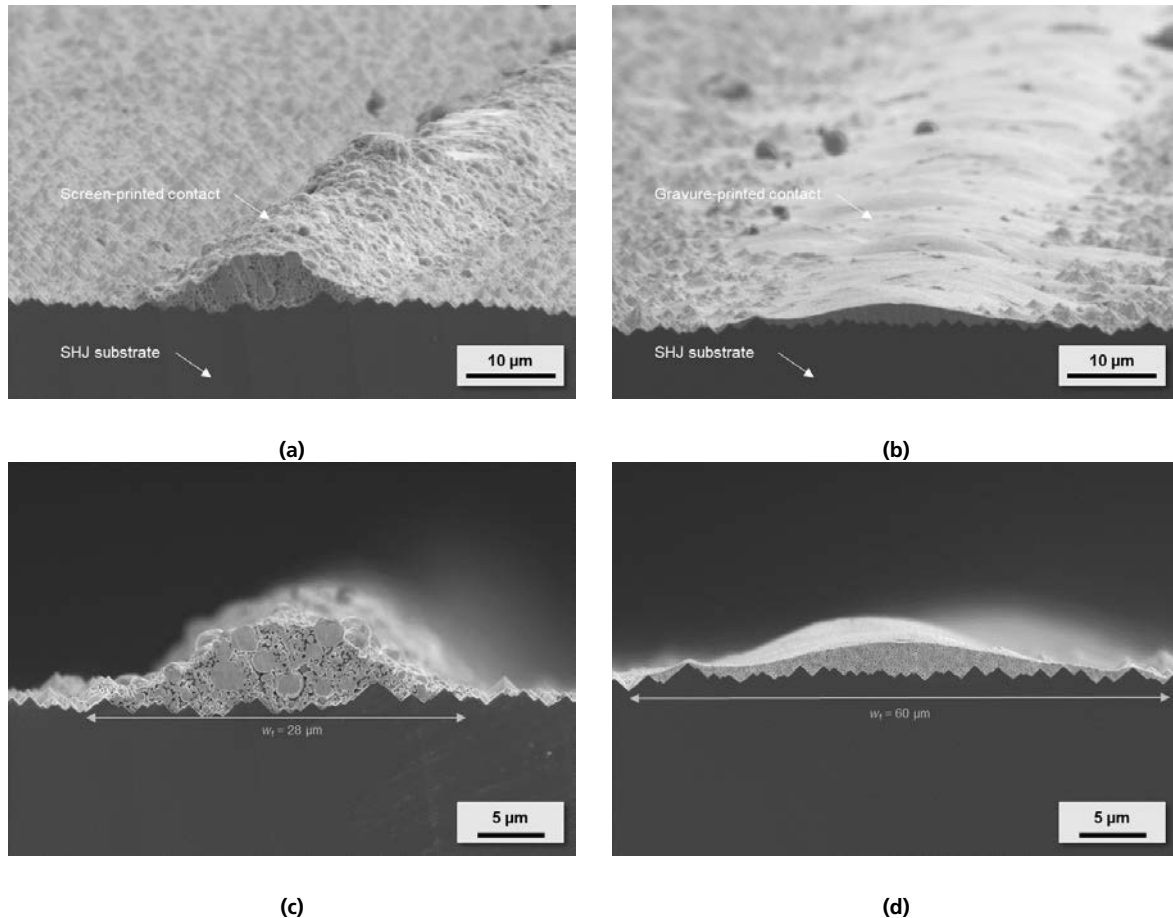


Abbildung 15: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen eines siebgedruckten Metallkontakts in (a) und (c) und eines Kontaktfingers, der im indirekten Tiefdruck hergestellt wurde ($w_n = 50 \mu\text{m}$, $C = 1$), dargestellt in (b) und (d). Beide Finger wurden auf die Vorderseite von texturierten SHJ-Solarzellen gedruckt, die eine ITO-Schicht als oberste Schicht aufweisen. Die Rasterelektronenmikroskopie wurde nach dem Tempersschritt durchgeführt.

Untersuchung der elektrischen Eigenschaften von Metallkontakten gedruckt mit indirektem Tiefdruck
 Abbildung 16 (a) zeigt die Daten zum Fingerwiderstand r_f . r_f ist der laterale elektrische Widerstand entlang des Fingers, auch Linienwiderstand genannt, der auf 1 cm Kontaktlänge normiert ist. Wie in der Versuchsbeschreibung erklärt, wird er aus Widerstandsmessungen zwischen benachbarten Busbars gewonnen (siehe Gleichung (1) in der Versuchsbeschreibung). Es wird davon ausgegangen, dass alle Finger zwischen den Busbarpaaren zu gleichen Teilen zum Ladungsträgertransport beitragen und mögliche Fingerunterbrechungen bei der r_f -Berechnung ignoriert werden können. Es sei an dieser Stelle gesagt, dass aus Mikroskopaufnahmen (hier nicht gezeigt), folgt dass Fingerunterbrechungen beim indirekten Tiefdruck wahrscheinlicher sind als beim Siebdruck. Daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass r_f (und damit auch der spezifische Fingerwiderstand ρ_f) beim indirekten Tiefdruck überschätzt wird.

Siebdruckkontakte erreichen in dieser Arbeit $r_f = (9,0 \pm 0,7) \Omega \text{ cm}^{-1}$. Nach Verwendung der gleichen Temperbedingungen erreichen tiefgedruckte Kontakte Fingerwiderstände zwischen $r_f = (15,9 \pm 4,9) \Omega \text{ cm}^{-1}$ ($w_n = 50 \mu\text{m}$ und $C = 1$) und $r_f = (3,0 \pm 1,4) \Omega \text{ cm}^{-1}$ ($w_n = 80 \mu\text{m}$ und $C = 3$). Diese Werte sind ausreichend niedrig für busbarlose Zellen, die mit Multi-Draht-Ansätzen verschaltet werden. Für den indirekten Tiefdruck gilt in dieser Arbeit: Je niedriger w_n und C , d.h. je schmaler die Kontakte (siehe vorheriger Abschnitt), desto höher r_f . Der Grund ist die reduzierte durchschnittliche Querschnittsfläche der Metallkontakte.

Für den direkten Vergleich der lateralen elektrischen Leitfähigkeit von Kontakten, die mit Siebdruck und indirektem Tiefdruck realisiert werden, dient der spezifische Fingerwiderstand ρ_f . Dieser Parameter ist gemäß der Theorie unabhängig von der Fingerlänge und der Fingerquerschnittsfläche (siehe Gleichung (2) in der Versuchsbeschreibung). Nach dem gleichen Temperprozess erreichen Siebdruckkontakte $\rho_f = (9,9 \pm 0,2) \mu\Omega \text{ cm}$ und die tiefgedruckten Kontakte $\rho_f = (18,0 \pm 5,5) \mu\Omega \text{ cm}$. Da ρ_f aus Fingergoemetrie-Daten gewonnen wird, kann ρ_f auch überschätzt sein, insbesondere beim indirekten Tiefdruck, wie zu Beginn dieses Abschnitts beschrieben. Darüber hinaus wird angenommen, dass die größere geometrische Inhomogenität von Metallkontakten, die im indirekten Tiefdruck gedruckt werden (siehe oben), die größere Standardabweichung verursacht. Dennoch besteht ein signifikanter ρ_f -Unterschied von $(8,1 \pm 5,8) \mu\Omega \text{ cm}$ zum Nachteil des indirekten Tiefdrucks.

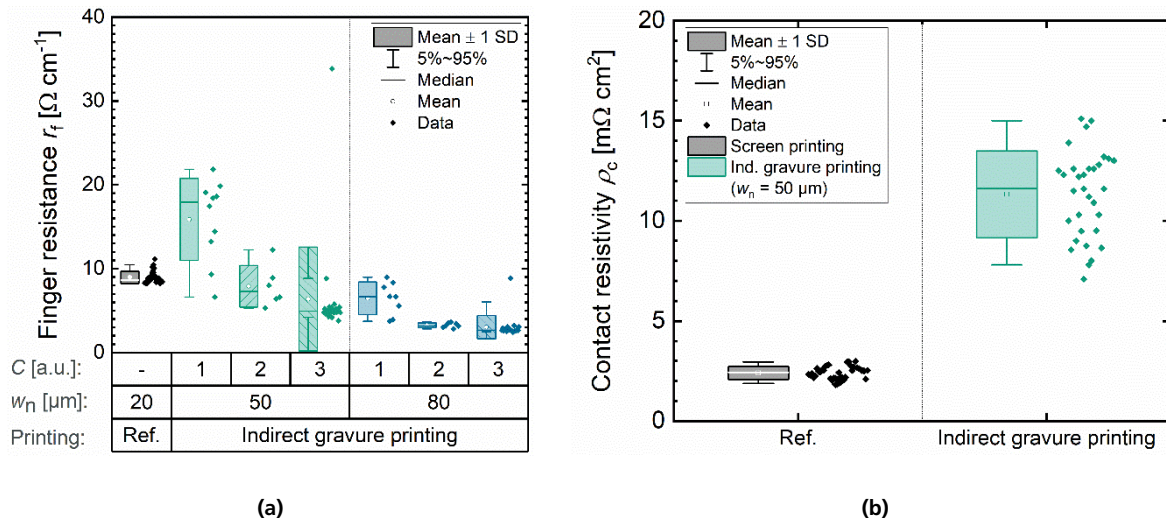


Abbildung 16: Fingerwiderstand, d.h. Widerstand entlang des Fingers, normiert auf 1 cm Kontaktlänge, von Sieb- (Ref.) und tiefgedruckten Kontakten, unterschieden durch w_n und C in (a). (b) zeigt ρ_c -Daten zum Kontaktwiderstand sowohl für Sieb- als auch für Tiefdruckkontakte.

Abbildung 16 (b) zeigt die Daten zum spezifischen Kontaktwiderstand ρ_c . Es ist zu beachten, dass die hier dargestellten Werte für ρ_c auf den Vorderseiten von SHJ-Proben mit Rückseitenemitter-Konfiguration ermittelt wurden. Dies bedeutet, dass die absoluten Werte von ρ_c durch die 1D-Transferlängenmethode überschätzt werden, da die undotierten und n-Typ amorphen Siliziumschichten und die n-Typ Basis zusammen mit der ITO als eine effektive Schicht behandelt werden. Darüber hinaus wird der Kontaktwiderstand zwischen Metallfinger/ITO und der Kontaktwiderstand zwischen den anderen genannten Schichten als ein kumulierter Widerstand behandelt. Obwohl ρ_c an den Metallfinger/ITO-Kontakten überschätzt wird, hat dies keinen Einfluss auf vergleichende Aussagen mit Bezug auf die beiden Drucktechniken. Tatsächlich erreicht die Siebdruckpaste $\rho_c = (2,4 \pm 0,3) \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$, während ρ_c für die tiefgedruckte Tinte fünfmal höher ist, nämlich $\rho_c = (11,3 \pm 2,2) \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$.

Solarzellenergebnisse

Als Zwischenresümee zu den beiden vorherigen Abschnitten kann gesagt werden, dass nach bestem Wissen der Autoren dieses Berichts bisher keine schmalere Metallkontakte veröffentlicht wurden, die mit indirektem Tiefdruck auf texturierten, vollformatigen Solarzellen auf Siliziumbasis realisiert wurden. Darüber hinaus eignet sich ihre elektrische Charakteristik für die Integration in Solarzellen, sofern ein geeignetes Metallisierungslayout und eine entsprechende Verschaltungsmethode gewählt werden. Dies wird in diesem Abschnitt demonstriert, indem die Ergebnisse von Solarzellen vorgestellt und diskutiert werden.

IV-Daten von SHJ-Solarzellen mit Sieb- und Tiefdruck-Vorderseitenmetallisierung sind in Abbildung 17 dargestellt. Die Leerlaufspannung V_{oc} wird im Folgenden nicht diskutiert, da sie für alle betrachteten Gruppen auf einem ähnlichen Niveau liegt. Abweichungen vom Mittelwert lassen sich nicht auf den Einsatz unterschiedlicher Druckverfahren, sondern auf Materialschwankungen zurückführen. Der durchschnittliche V_{oc} aller in dieser Arbeit betrachteten Solarzellen beträgt $V_{oc} = (721,9 \pm 3,6) \text{ mV}$.

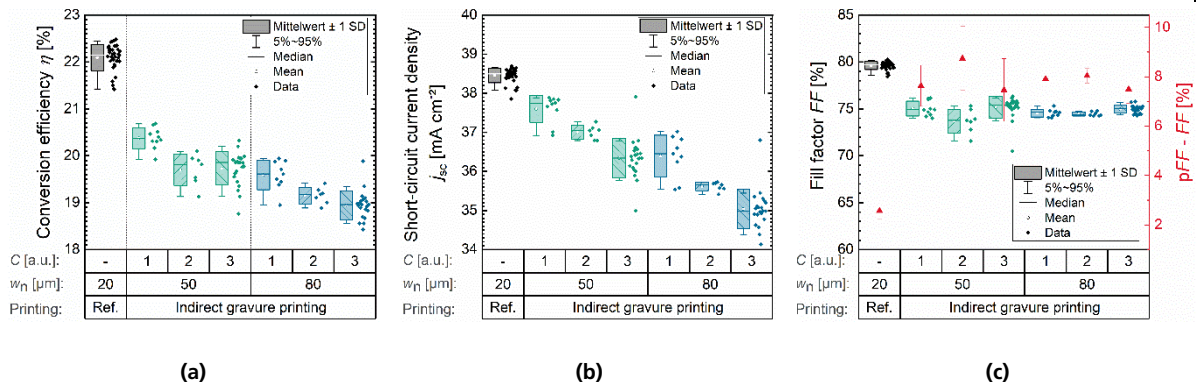


Abbildung 17: IV-Daten von busbarlosen SHJ-Halbzellen mit Sieb- (Ref.) und Tiefdruck-Frontmetallisierung. Alle Zellen sind mit einer Siebdruck-Rückseitenmetallisierung versehen. Dementsprechend sind die Unterschiede zwischen den Gruppen das Ergebnis von Variationen der Vorderseitenmetallisierung. Sieb- und tiefgedruckte Vorderseitenmetallisierungslayouts unterscheiden sich geringfügig in Fingeranzahl und Fingerlänge, wie sich aus der Versuchsbeschreibung ableiten lässt. Die Fehler, die zu pFF-FF gehören, stellen Standardabweichungen dar.

Das Potenzial dieser SHJ-Halbzellen in Bezug auf ihren Wirkungsgrad η wird anhand der siebgedruckten Referenzgruppe demonstriert. Sie erreicht $\eta = (22,1 \pm 0,3) \%$. Die effizienteste Gruppe von tiefgedruckten Zellen erreicht $\eta = (20,4 \pm 0,2) \%$. Obwohl dies $(1,7 \pm 0,5) \%_{\text{abs}}$ verglichen mit der Referenzgruppe ist, handelt es sich nach bestem Wissen der Autoren um die effizientesten SHJ-Solarzellen mit tiefgedruckter Metallisierung, über die bisher berichtet wurde. Ohne Optimierung in Bezug auf Durchsatz beträgt die diesem Prozess entsprechende Zykluszeit $0,9 \text{ s cell}^{-1}$. Zykluszeiten von bis zu $0,5 \text{ s Zelle}^{-1}$ wären möglich, wenn eine entsprechende Geräteplattform im industriellen Maßstab verwendet werden würde.

Sowohl Scanbilder als auch Elektrolumineszenz-Bilder (EL), der jeweils effizientesten Sieb- und Tiefdruckzellen, werden in Abbildung 18 gezeigt. Die beste Solarzelle mit tiefgedrucktem Vorderseitengrid erreicht $20,7 \%$ im Wirkungsgrad. Im Vergleich zur besten siebgedruckten Solarzelle weist sie mehr Inhomogenitäten im Elektrolumineszenz- (EL) Bild auf. Dies deutet auf eine größere Inhomogenität des Ladungsträgertransports durch die Metallkontakte hin, was sicherlich auf weniger homogen gedruckte Kontaktfinger zurückzuführen ist (siehe oben). Die reduzierte EL-Intensität an den Rändern der Solarzelle in Abbildung 18 (b) sind das Ergebnis des Vorderseitenkontaktlayouts, das sich nicht bis zum Rand der Solarzelle ausdehnt. In diesen Bereichen sind die Widerstandsverluste besonders hoch.

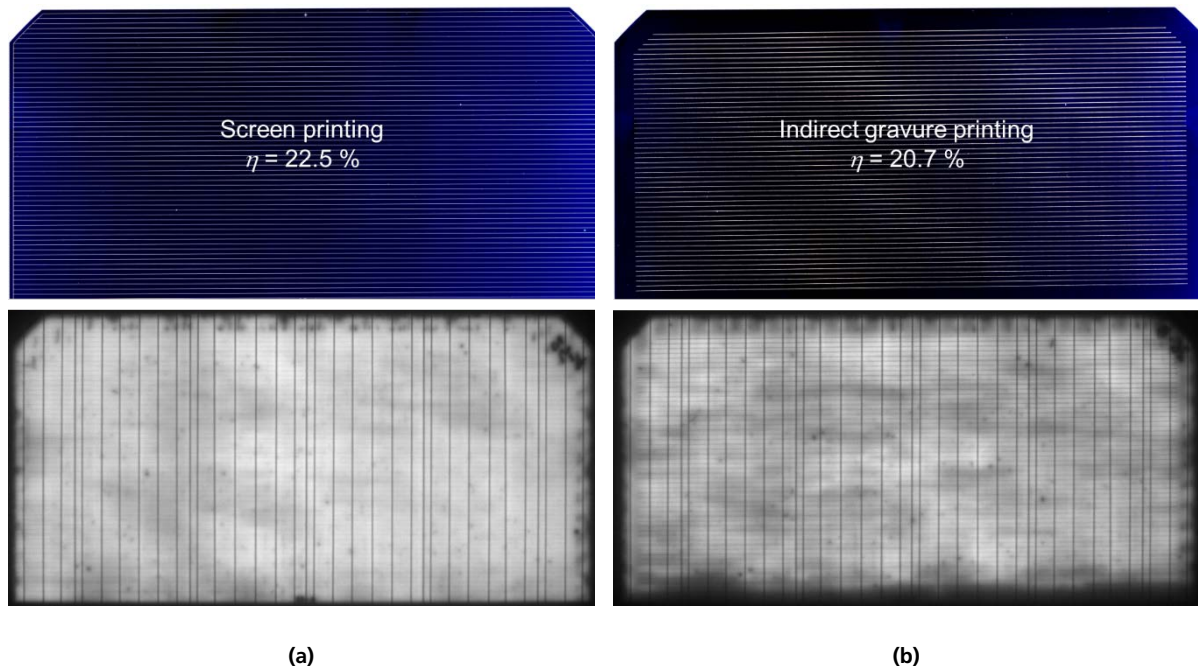


Abbildung 18: Scanbilder und Elektrolumineszenz-bilder (EL) der effizientesten Sieb- (a) und tiefgedruckten Zelle (b), die in dieser Arbeit hergestellt wurden.

Höhere ohmsche Verluste, ausgedrückt durch die Differenz von Pseudo-Füllfaktor und Füllfaktor $pFF - FF$, führen zu niedrigeren FF -Werten der tiefgedruckten Zellen, wie Abbildung 17 (c) zeigt. Dies ist ein Grund für den Unterschied der beiden Drucktechniken bzgl. η . Der Ursprung der ohmschen Verluste liegt in Unterschieden im Layout, r_f und ρ_c . Die r_f -Unterschiede spielen hier jedoch eine untergeordnete Rolle, da sie größtenteils durch den IV -Messaufbau mit insgesamt 35 Drähten zur Kontaktierung ausgeglichen werden (siehe Versuchsbeschreibung).

Neben den ohmschen Verlusten ist die Verschattung für die beobachteten η -Unterschiede in Abbildung 17 (a) verantwortlich. Dies kann aus den Daten der Kurzschlussstromdichte j_{sc} abgeleitet werden, die in Abbildung 17 (b) dargestellt wird. Der j_{sc} -Wert von Zellen mit Siebdruck-Vorderseitenmetallisierung ist höher als von Zellen mit tiefgedruckten Kontaktgittern. Bei den tiefgedruckten Kontaktgittern führen niedrigere Werte für w_n und C zu höheren j_{sc} Werten. Der Grund dafür ist, dass bei niedrigeren Werten für w_n und C w_f reduziert wird (siehe Abbildung 17 (a)). Dies führt zu weniger verschattungsbedingten Verlusten in der Solarzelle, einem höheren j_{sc} und damit zu höheren Werten für η .

Mit dieser Versuchsreihe sind die Arbeiten zum indirekten Tiefdruck im Projekt BUSSARD abgeschlossen. Der **Meilenstein MS 3.4** wurde teilweise erfüllt. Es konnten zwar funktionale Solarzellen mit passivierenden Kontakten hergestellt werden, jedoch musste aufgrund der Nicht-Verfügbarkeit von TOPCon-kompatiblen Fluiden für indirekten Tiefdruck auf SHJ-Proben zurückgegriffen werden. Weiter wurden keine Strukturbreiten von $20 \mu\text{m}$ und weniger auf reproduzierbare Weise erreicht.

AP 3.2 Multi-Düsen Dispensprozess

In diesem Arbeitspaket wurden die Machbarkeit der Metallisierung von TOPCon-Solarzellen mit der Dispenstechnologie untersucht.

Für die Charge mit scharfen Zellen wird folgender Experimentplan definiert (Abbildung 19). 3 Dispensgruppen mit Temperaturvariation bei Feuerung zwischen 770°C und 790°C werden 3 Referenzgruppen im Siebdruck mit gleicher Temperaturvariation gegenübergestellt. Dabei wird das Augenmerk auf die Vorderseite gelegt. Im Dispensprozess kommt die Paste C, kaskadisch vorfiltriert bei mit Nylonfiltern mit Porengrößen $20 \mu\text{m}$ und $11 \mu\text{m}$, zum Einsatz; beim Siebdruck eine Iteration aus der B-Pastenserie. Die Rückseite wird für alle Gruppen gleichermaßen mit siebgedruckt. Vor der

Charakterisierung am Zelltester werden die Zellen mit dem LECO-Prozess (Laser Enhanced Contact Optimization) behandelt.

Dispensing			Siebdruck		
Gr. 1	Gr. 2	Gr. 3	Gr. 4	Gr. 5	Gr. 6
Rückseite: Siebdruck (gleiche Paste)					
196 F (24 μm), 12 pBB (60 μm) Drying 1 min @ 250° C					
Vorderseite: Dispensing (Paste C)			Vordcseite: Siebdruck (Paste B)		
150 F (22 μm), no BB Drying 1 min @ 200° C			121 F (24 μm), no BB Drying 1 min @ 200° C		
Feuerofen: v = 6m/min Post firing anneal 30 s @ 500° C					
770° C	790° C	810° C	770° C	790° C	810° C
Charakterisierung					
IV Messungen Konfokalmikroskopie					

Abbildung 19: Versuchsplan der Zellcharge – Dispensing und Siebdruck auf TOPCon im Vergleich

Im Dispensprozess wird mit dem Labordruckkopf „Gecko“ gearbeitet, ausgestattet mit 15 parallelen Düsen mit einem Durchmesser von 22 μm . Prozessdruck und Geschwindigkeit werden je nach Stabilität des Druckprozesses und des Pastenfüllstands im Reservoir variiert zwischen 3-4,3 bar Einstelldruck und 300-450 mm/s Verfahrensgeschwindigkeit. Der Abstand zwischen Düse und Substrat beträgt 300 μm . Die optische Charakterisierung am Konfokalmikroskop ergibt geringere Abschattungsbreiten von $w_{\text{shading,DIS}} = 23,5 \pm 1,9 \mu\text{m}$ im Dispensieren im Vergleich zu $w_{\text{shading,SD}} = 26,5 \pm 1,1 \mu\text{m}$ im Siebdruck bei im Mittel vergleichbaren Kernfingerbreiten von $w_{\text{core,DIS}} = 19,8 \pm 1,7 \mu\text{m}$ bzw. $w_{\text{core,SD}} = 19,8 \pm 0,7 \mu\text{m}$. Paste C hat demnach vorteilhafte Benetzungseigenschaften auf dem TOPCon-Material mit einem Benetzungskoeffizienten von $\zeta = 0,84$ gegenüber Paste B mit $\zeta = 0,75$. Das Dispensieren zeigt in beiden Fällen größere Abweichungen, die auf die Parameteranpassungen während des Drucks zurückzuführen sein dürften. Das Potential eines optimierten, stabilen Dispensprozesses kann an den geringsten erzielten Breiten im Vergleich zum Siebdruck abgeschätzt werden. Sie belaufen sich auf $w_{\text{shading,DIS,min}} = 19,41 \mu\text{m}$ im Vergleich zu $w_{\text{shading,SD,min}} = 24,7 \mu\text{m}$ und $w_{\text{core,DIS,min}} = 16,6 \mu\text{m}$ im Vergleich zu $w_{\text{core,SD,min}} = 18,3 \mu\text{m}$ (Abbildung 20).

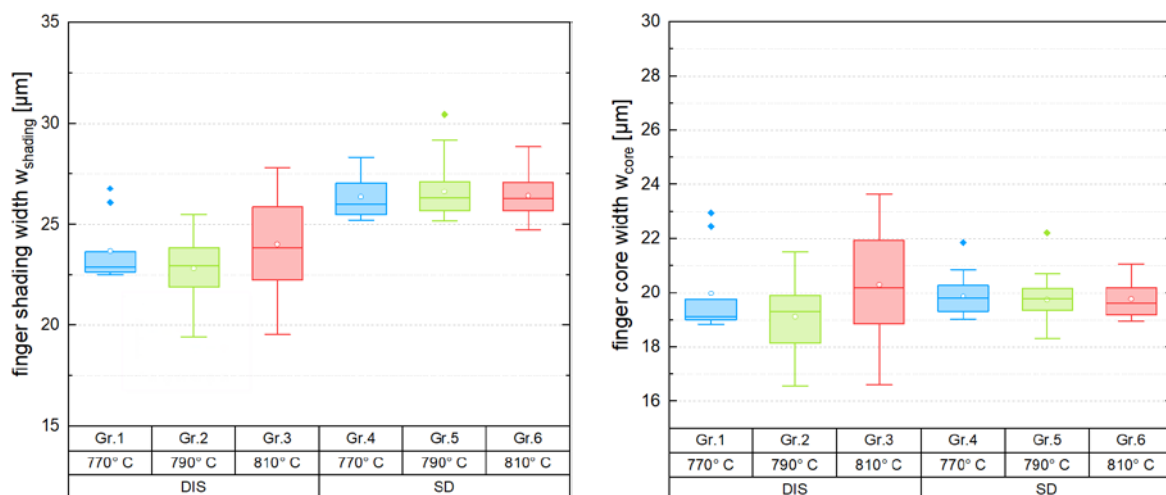


Abbildung 20: Abschattungs- und Kernfingerbreiten der Dispensgruppen 1-3 und der Siebdruckgruppen 4-6 auf TOPCon, Feuerungstemperaturen von 770° C bis 810° C

Die Fingerhöhen im Dispensieren sind mit $h_{f,DIS} = 13,5 \pm 0,9 \mu\text{m}$ geringfügig höher als $h_{f,SD} = 13,1 \pm 0,6 \mu\text{m}$ im Siebdruck. Dies kann entweder an der Pastenrheologie oder an den nicht vorhandenen Netzabdrücken in den Siebdruckfingern liegen. Darüber erklärt sich auch das deutlich bessere elektrische Aspektverhältnis von $AR_{el,DIS} = 0,39 \pm 0,04$ gegenüber zu $AR_{el,SD} = 0,28 \pm 0,02$ (Abbildung 21).

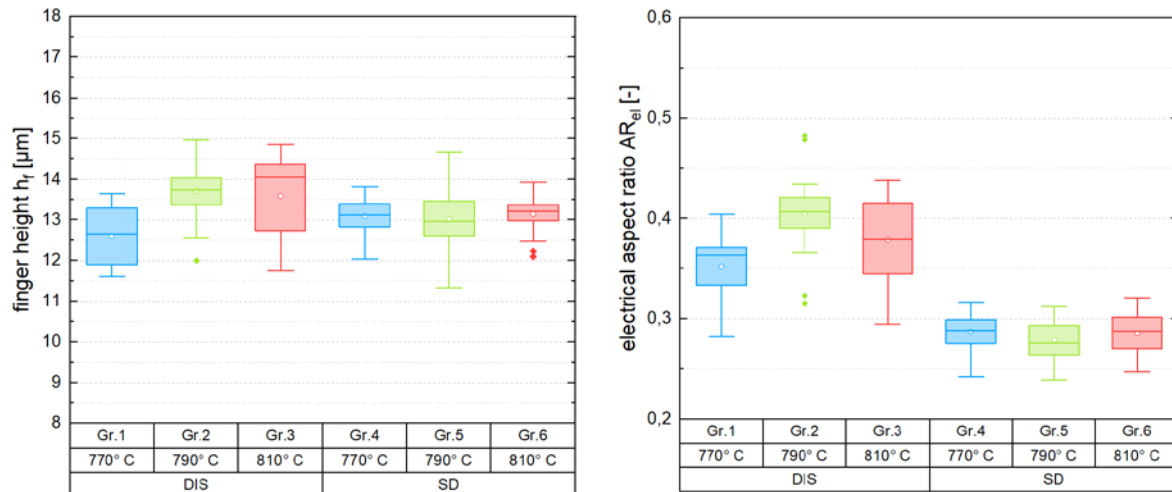
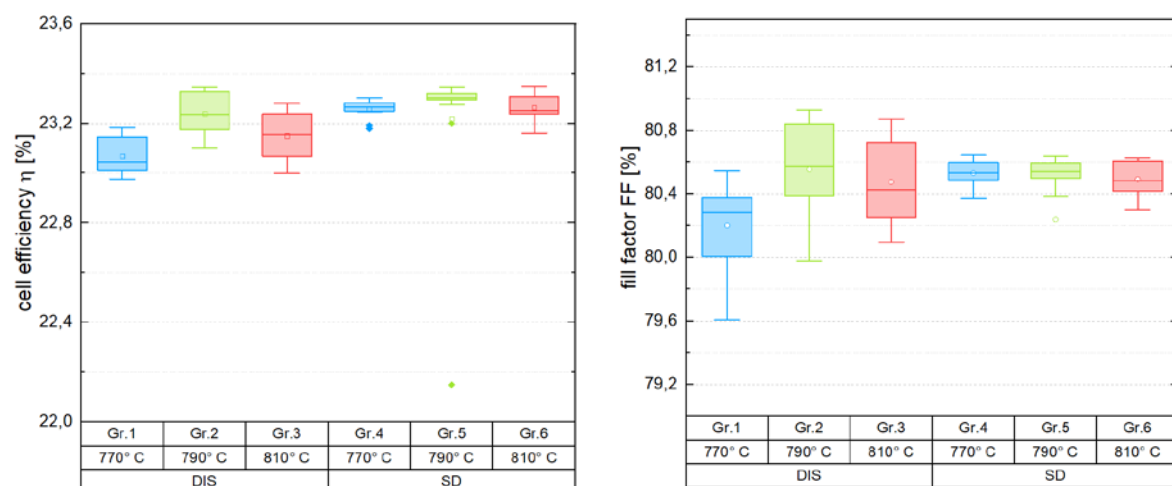


Abbildung 21: Fingerhöhe und elektrisches Aspektverhältnis der Dispensgruppen 1-3 und der Siebdruckgruppen 4-6 auf TOPCon, Feuerungstemperaturen von 770° C bis 810° C

Am Zelltestester können die in Abbildung 22 dargestellten IV-Kennwerte gemessen werden. Es ergeben sich Zelleffizienzen von $\eta_{DIS} = 23,15 \pm 0,11$ % für die Dispensgruppen und $\eta_{SD} = 23,27 \pm 0,05$ %. Die Topzellen liegen für beide Technologien gleichauf bei $\eta_{DIS,max} = 23,35$ % = $\eta_{SD,max}$. Die Füllfaktoren liegen im Mittel bei $FF_{DIS} = 80,4 \pm 0,3$ % und $FF_{SD} = 80,5 \pm 0,1$ %. Bezüglich der Temperaturvariation zeigen die Dispensgruppen und die Referenz dieselben Tendenzen. Für beide Pasten B und C scheint sich die mittlere Feuerungsstufe von 790° C vorteilhaft auf die IV-Kennwerte auszuwirken. Die Abweichungen im Dispensieren sind deutlich größer aufgrund der Instabilität des Drucksetups mit dem Labordruckkopf, welches bei einzelnen Zellen zu mehreren Fingerunterbrechungen führt. Bei 100 % Druckqualität zeigt das Dispensieren mit $FF_{DIS,max} = 80,93$ % aufgrund der homogenen Kontaktfinger und deren Einfluss auf den Fingerwiderstand einen Vorteil von 0,28 Prozentpunkten gegenüber dem Maximum der SD-Referenz. Die Leerlaufspannung ist im Siebdruck mit $V_{OC,SD} = 708 \pm 1$ mV geringfügig höher als im Dispensieren mit $V_{OC,DIS} = 707 \pm 1$ mV. Auch hier zeigen sich die temperaturbedingten Tendenzen um das Optimum bei 790° C. Der Kurzschlussstrom liegt für beide Pasten und Technologien auf demselben Niveau ($J_{SC,DIS} = 40,75 \pm 0,07$ mA/cm² und $J_{SC,SD} = 40,81 \pm 0,04$ mA/cm²), wobei er für Paste C im Dispensieren für höhere Temperaturen leicht abfällt.



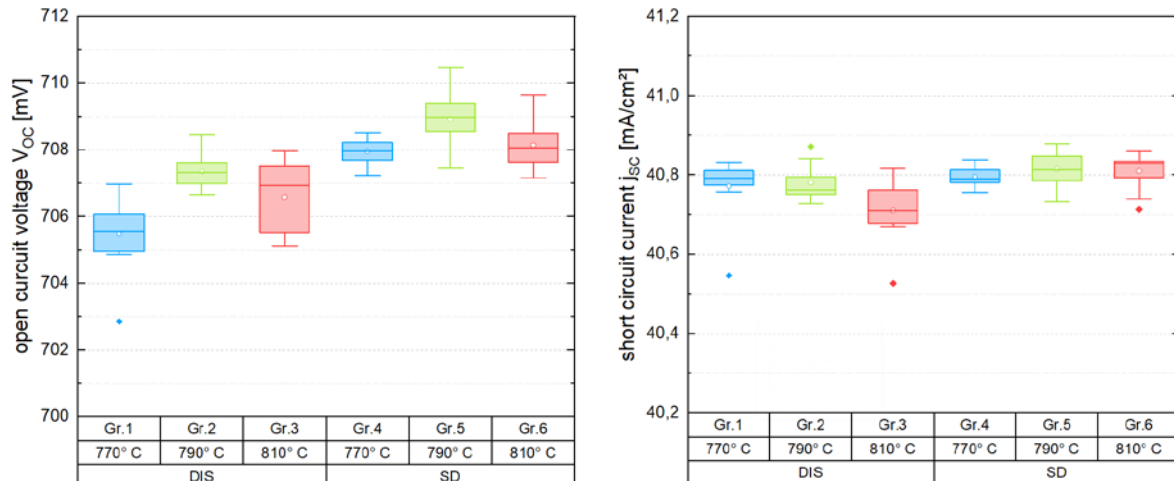


Abbildung 22: IV-Kennwerte (Hellkennlinie) der Dispensgruppen 1-3 und der Siebdruckgruppen 4-6 auf TOPCon, Feuerungstemperaturen von 770° C bis 810° C

Bei Betrachtung der Widerstandsmessungen fällt auf, dass eine geringere Temperatur zu kleineren Serienwiderständen führt und sich im Siebdruck auch der Shunt erhöht, wobei gleichzeitig die Streuung der Messwerte zunimmt. In jedem Fall können für das Dispensieren konkurrenzfähige Werte gezeigt werden. Die Shunts liegen im Mittel alle über $50 \text{ k}\Omega \text{ cm}^2$ und die Serienwiderstände unter $1 \text{ }\Omega \text{ cm}^2$. In Verbindung mit der erzielten mittleren Kernfingerbreite von $19,8 \text{ }\mu\text{m}$ konnte somit **Meilenstein 3.6** erreicht werden.

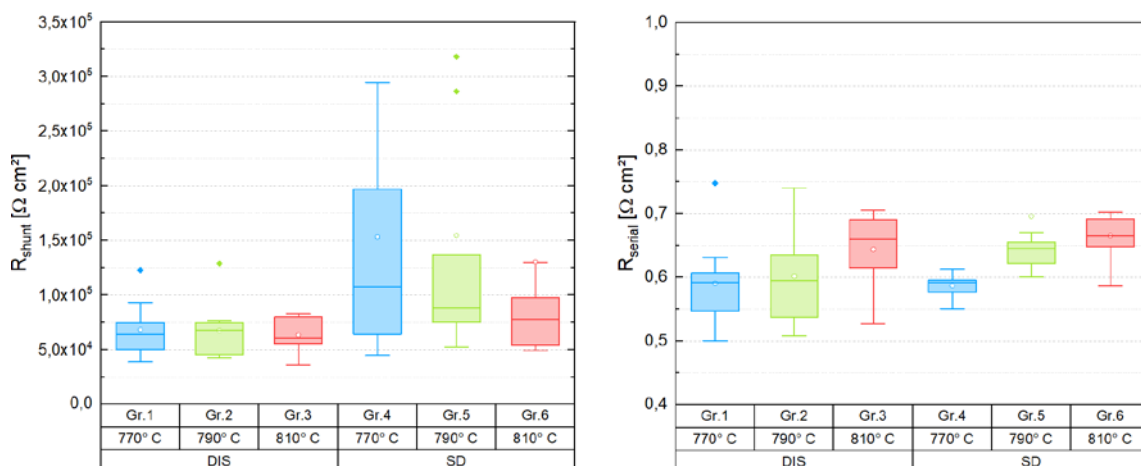


Abbildung 23: Shunts und Serienwiderstände der Dispensgruppen 1-3 und der Siebdruckgruppen 4-6 auf TOPCon, Feuerungstemperaturen von 770° C bis 810° C

Im Rahmen dieses Experiments war es möglich, erstmals dispensierte TOPCon-Kontakte auf Zellniveau zu demonstrieren und die Konkurrenzfähigkeit zum Siebdruck zu beweisen, obwohl hier ein experimentelles Laborsetup mit einer industriell automatisierten Siebdrucklinie verglichen wurde. Eine Angleichung des Fingerpitches im Dispensieren zum SD (vgl. Fingeranzahlen in Abbildung 19) würde zu einer weiteren Reduktion des Pastenmassenauftrags und der Abschattung der Zelle führen bei weiterhin ausreichender Stromsammelfunktion (Annahme aus Grid-Simulation). Dadurch würde der Wirkungsgrad weiter verbessert werden können und den Siebdruck potentiell überholen.

2.1.4 AP 4 Busbarlose Modulintegration und Modulcharakterisierung

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
MS 4.1	Modulintegration mit busbarlosen Solarzellen aus WP 2/3 erfolgreich demonstriert (Vollformat Modul mit "Tape Solution" Verschaltung hergestellt)	2. Jahrhälfte 2022	Planmäßig erreicht
MS 4.2	Klimakammerergebnisse aus dem Temperaturzyklustest zu „Tape Solution“ liegen vor und zeigen einen Leistungsverlust von <5% nach 200 Zyklen	2. Jahrhälfte 2023	Teilweise erreicht mit einem Verzug
MS 4.3	Vergleich verschiedener Verschaltungsverfahren für busbarlose Solarzellen mit der "Tape-Lösung" hinsichtlich CTS Analyse und IV-Daten liegt vor	2. Jahrhälfte 2023	Planmäßig erreicht
MS 4.4	Modulintegration mit busbarlosen Solarzellen erfolgreich demonstriert (Module in voller Größe, "Tape Solution"-Ansatz)	2. Jahrhälfte 2022	Planmäßig erreicht

AP 4.1 Busbarlose Modulintegration basierend auf „Tape Solution“

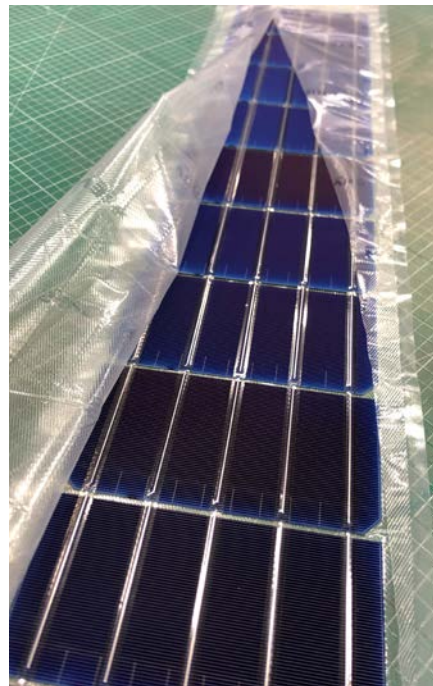
In der ersten Phase des Projektes wurde ein Konzept von der neuartigen und verbesserten Verschaltung am Tape Stringer gemeinsam mit *Sticky Solar Power* entwickelt. Umrüstung der Anlage von Vollzelle auf Halbzelle wurden von *Sticky Solar Power* durchgeführt. Parallel dazu lief eine Marktrecherche bezüglich Materialien (Runddraht und Folie), die bestmöglich mit dem Prozess kompatibel sind.

Um die Möglichkeit zu schaffen, schon frühzeitig, parallel zu den Entwicklungen in AP2 und AP3, in AP 4 die Prozesse zu entwickeln und anzupassen, wurden die ersten Experimente mit Siebdruck-Dummies durchgeführt. Diese sind elektrisch nicht funktionierende Präkursoren ohne Emitter (siehe Abbildung 24 links), welche aber gleich texturiert und mit dem gleichen Metallisierungslayout versehen sind wie die Ziel-Zellen (TOPCon).

Die weiteren Aktivitäten waren auf die Überprüfung von der Kompatibilität von der Verschaltung und Lamination sowie Materialien fokussiert. Dafür wurden am Fraunhofer ISE hergestellte Dummy Zellen (elektrisch inaktive Wafer mit der busbarlosen Siebdruck Metallisierung) bei Sticky Solar Power mittels Tape Solution verschaltet und an Fraunhofer ISE für die weitere Verarbeitung verschickt. Durch die neue Verpackung, die die Strings unter gleichmäßigem Druck während des Transportes hält, war die Haftung von dem Klebeband auf den Zellen ausreichend, um Modulbau zu realisieren.



(a)

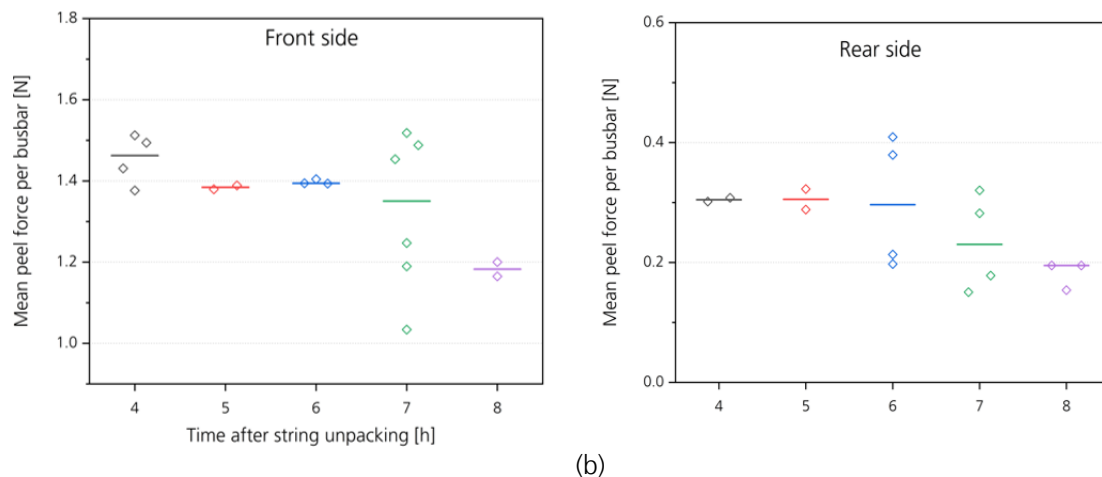


(b)

Abbildung 24: Strings verschaltet mittels Tape Solution unmittelbar nach dem Transport.

Analog zum bereits berichteten in ZB01/2022 Versuch mit Dummy Modul mit SWCT Verschaltung, wurde das Dummy Tape Solution Modul (Abbildung 24 a) in Glas-Backsheet Konfiguration mit POE Einkapselungsmaterial und weißer Rückseitenfolie laminiert. Das Modul zeigte keine Lamination verursachte Gas Inklusionen, Zellbruch oder andere Defekte. Die Verbinder fixierende Polymerfolie ist im Modul kaum sichtbar, was sich auf Lichtdurchlässigkeit positiv auswirken lassen soll. Allgemein wurde das Laminationsprozess als mit Tape Solution kompatibel bewertet.

Mechanische Stabilität der Strings. Die neuartige Verpackung von Tape Solution Strings (s. Bericht 2/2022) ermöglicht es, die Strings über einen längeren Zeitraum zu lagern so wie sicher verschicken. Um die mechanische Stabilität von den Strings ohne Vakuumverpackung abzuschätzen, wurden die Abzugskräfte nach jeweils 4, 5, 6, 7 und 8 Stunden nach dem Auspacken gemessen. Die Messungen wurden mit einem Standardverfahren durchgeführt unter 90° Abzugswinkel. Die detektierten Kräfte bilden die Haftung von Polymertape auf der Zelloberfläche ab und nicht die Haftung des Drahtes, weil das tatsächliche Lötprozess während der Lamination im nächsten Schritt stattfindet. Allgemein, die Haftung auf der vorderen Seite (Abb. 41a) ist besser als auf der Rückseite (Abb. 41b). Die Abzugskraft lässt in beiden Fällen nach der Lagerung nach. Allerdings, dadurch dass die Haftung auf der Vorderen Seite stark ist ($> 1.4 \text{ N}$ sofort nach dem Auspacken), ist die graduelle Reduktion bis zu $\sim 1.2 \text{ N}$ nach 8 Stunden unverpackte Lagerung nicht kritisch. Im Gegenteil, Rückseitenhaftung von $\sim 0.3 \text{ N}$ kann zu erschwerterem Handling führen. Vor allem ab 7 Stunden unverpackte Lagerung lässt die mechanische Stabilität nach und führt zu Abzugskraftverlust. Die Strings mit Tape Solution Verschaltungstechnologie sollen innerhalb 5 Stunden nach der Produktion oder Auspacken in die Lamine verarbeitet werden.



(a)

(b)

Abbildung 25: Durchschnittliche Abzugskraft pro Busbar nach dem Auspacken von Tape Solution Strings. Ein Datenpunkt – Mittelwert von einem Busbar.

Haftkraft zwischen der Polymerfolie und der Zelloberfläche unterscheidet sich von ~1.1 N zwischen der Vorder- und Rückseite. Ein Grund dafür kann der Metallisierungsdesign sein, wo auf der Rückseite der Zelle mehr Finger gedrückt werden, was die Interaktionsoberfläche deutlich rauer macht. Ein anderer Grund für die unterschiedliche Stabilität wurde mittels Digitalmikroskopie festgestellt. Die Breite des Tapes ist für Vorder- und Rückseite gleich, obwohl die Verbinderbreiten sich stark unterscheiden – 0.5 mm × 0.25 mm vorne und 1.5 mm × 0.2 mm hinten. Auf der vorderen Seite, wo die Verbinder deutlich schmaler sind, ist die Interaktionsoberfläche zwischen dem Tape und der Zelle größer, was zu einer besseren Haftung führt.

CTS Analyse. Im Berichtszeitraum wurden Tape Solution, SWCT und ECA Verschaltungstechnologien mit einem Simulationseinsatz mittels am Fraunhofer ISE entwickeltem Tool „SmartCalc“ verglichen (57). Als I-V Input Parameter für die Zelle wurde die im AP2 optimierte TOPCon Zelle genommen mit dem busbarlosen Metallisierungsdesign aus AP3, der auf der Zelle mittels Siebdrucks angebracht wurde. Die meisten Unterschiede zwischen den Verschaltungstechnologien wurden in k7, k8 und k10 ausgedruckt. Die 1 mm breite Verbinder bei ECA verursachen am meisten die Verschattung von der fotoaktiven Zelloberfläche (k7). Faktor k8 zeigt wie der Kurzschlussstrom der Zelle sich nach der Verschaltung und Einkapselung (ohne Betracht vom Glas) ändert. Hier weisen ECA und Tape Solution deutlich höhere Werte als SWCT Verschaltung. Faktor k10 betrachtet die effektive Breite des Verbinders, was in dem Fall SWCT durch die vorteilhafte Runddrähte hervorhebt. Die strukturierte versilberte Flachdrähte, die für ECA Verschaltung angewendet werden, demonstrieren auch eine deutliche Verbesserung der Modulleistung.

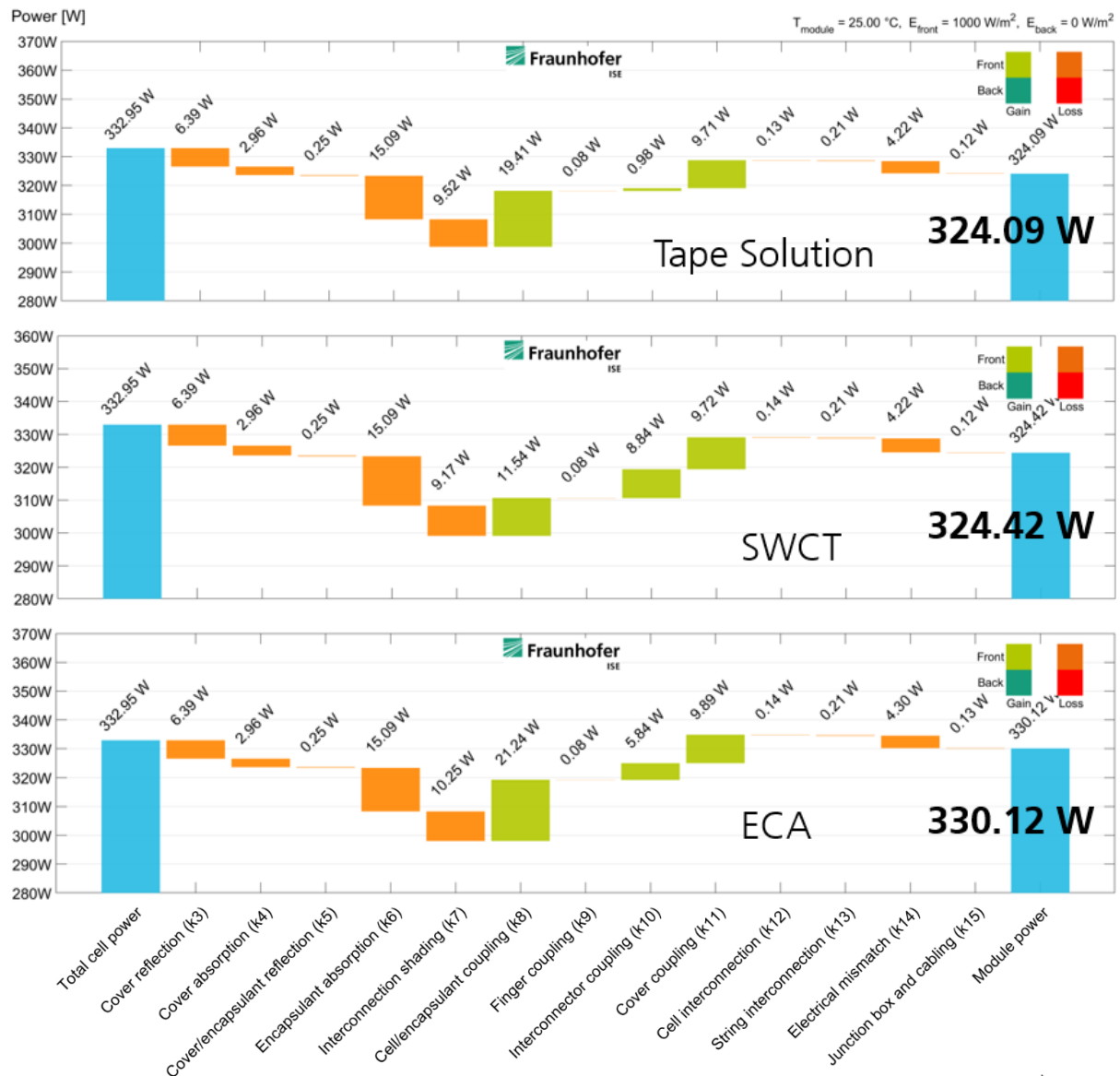


Abbildung 26: Cell-to-module Analyse für Tape Solution, SWCT und ECA Verschaltungstechnologien in Kombination mit busbarlosen TOPCon Zellen aus AP2/3.

Resultierende Modulleistungswerte von der Simulation können mit den Werten der I-V Messung von TOPCon Vollformatmodulen verglichen werden. Die Simulation scheint die Werte zu unterschätzen, die Tendenz zwischen Tape Solution und ECA wird aber beibehalten. Um die weitere Aussagen über die Übereinstimmung der Simulation mit den realen Modulwerten sind die Ergebnisse des SWCT Moduls nötig.

Tabelle TBA. Vergleich zwischen den Modulleistungswerten zwischen der Simulation und gebauten Vollformatmodulen mit TOPCon Zellen aus AP2/3.

	Simulation	Modulmessung
Tape Solution	324.1 W	332.9 W
SWCT	324.4 W	nicht vorhanden
ECA	330.1 W	340.0 W

References

- [1] F. Feldmann, M. Bivour, C. Reichel, M. Hermle, and S. W. Glunz, "Passivated rear contacts for high-efficiency n-type Si solar cells providing high interface passivation quality and excellent transport characteristics," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 120, pp. 270–274, 2014.
- [2] A. Faes, M. Despeisse, J. Levrat, J. Champlaud, N. Badel, M. Kiaee, T. Söderström, Y. Yao, R. Grischke, M. Gragert, J. Ufheil, P. Papet, B. Strahm, B. Cattaneo, J. Cattin, Y. Baumgartner, A. Hessler-Wyser, and C. Ballif, "SmartWire Solar Cell Interconnection Technology," (eng), 2014.
- [3] J. Schube, M. Jahn, S. Pingel, A. de Rose, A. Lorenz, R. Keding, and F. Clement, "FlexTrail Printing as Direct Metallization with Low Silver Consumption for Silicon Heterojunction Solar Cells: Evaluation of Solar Cell and Module Performance," *Energy Tech*, vol. 10, no. 12, p. 2200702, 2022.