

Abschlussbericht



BUSSARD



Zuwendungsempfänger: ContiTech -Surface Solutions / Benecke-Kaliko AG	Förderkennzeichen: 03EE1071D
---	---

Ausführende Stelle:
Center for Functional Printing Technologies / Freiburg

Vorhabenbezeichnung:
Verbundvorhaben BUSSARD – Busbarlose Solarzellen mit passivierten Kontakten für Modulintegration der nächsten Generation.
Teilvorhaben: Entwicklung eines indirekten Tiefdruckverfahrens für busbarlose Solarzellen.

Laufzeit des Vorhabens:
01.02.2021 – 31.01.2024

Berichtszeitraum:
01.02.2021 – 31.01.2024

Projektleiter Continental Surface Solutions / Benecke Kaliko AG
Stéphane Toguem Fokoua / Dr. Janosch Kneer

- Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren -
Gez. Dr. Janosch Kneer

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1. Ausgangssituation und Motivation	3
2. Vorhabensplan und -durchführung	4
3. Zusammenarbeit im Konsortium	6
4. Ergebnisse.....	6
4.1. Anforderungsentwicklung & Adaption Druckmaschine.....	7
4.2. Charakterisierung von Drucktücher und Druckformen	8
4.3. Druckversuche und Tintenevaluation	10
4.5. Fazit der experimentellen Tätigkeiten.....	20
5. Notwendigkeit der Förderung und Ideen für Anschluss	20
6. Relevante Ergebnisse von dritter Seite.....	21
7. Veröffentlichungen & Verbreitung.....	21
8. Anlagen.....	22

1. Ausgangssituation und Motivation

Ein vielversprechendes Konzept für hohe Wirkungsgrade beziehungsweise eine stetige Erhöhung sowie eine einfache Integration in bestehende Produktionslinien ist das sogenannte TOPCon (tunnel oxide passivating contact). Zu Projektbeginn erreichten industrielle TOPCon-Solarzellen mit siebbedruckter Metallisierung Wirkungsgrade von 22 % bis 23 %; in Laborumgebungen wurden sogar Werte von über 24 % erzielt. In Kombination mit einem busbarlosen Metallisierungsansatz ist dies ein sehr vielversprechendes Konzept für die nächste Generation der Solarzellentechnologie.

Das Projekt Bussard befasst sich mit der Entwicklung von Hochdurchsatzverfahren und kosteneffizienten Produktionsanlagen für moderne, hocheffiziente Zellkonzepte. Ziel des Projekts ist es, mithilfe innovativer ALD-Prozesse (atomic layer deposition) zur Verbesserung der Oberflächenpassivierung und neuartiger Feinliniendruckprozesse großflächige TOPCon-Solarzellen mit Wirkungsgraden bis zu 24 % zu realisieren. Außerdem wird die busbarlose Verschaltung dieser Solarzellen zu großflächigen Modulen mit der „Tape Solution“-Technologie des Partners Sticky Solar Power entwickelt und umgesetzt.

Die im Projekt demonstrierten hocheffizienten Solarzellen und Module sollen die Energieausbeute in der Photovoltaik erhöhen und somit die Kosten für PV in Europa senken. Der Produktionsdurchsatz soll mindestens dem aktuellen Industriestandard entsprechen. Durch Effizienzsteigerungen und/oder Kostensenkungen (z.B. weniger Silberverbrauch) werden die Gesamtbetriebskosten (TCO) und die nivellierten Stromkosten (LCoE) deutlich reduziert. Eine Reduktion von 5-10 % im Vergleich zum Industriestandard ist realistisch.

Dazu deckt das Projekt die gesamte Wertschöpfungskette von der Zell- bis zur Modulfertigung ab.

2. Zusammenfassung

Im Rahmen des Continental-Teilprojekts zur Entwicklung eines indirekten Tiefdruckverfahrens für busbarlose Solarzellen wurden signifikante Fortschritte erzielt. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die Entwicklung eines indirekten Tiefdruckverfahrens, das in mehrere zentrale Arbeitspakete unterteilt war: Anpassung der Druckmaschine, Entwicklung und Qualifizierung von Drucktüchern, Evaluation verschiedener Tinten sowie die Charakterisierung der morphologischen und elektrischen Eigenschaften.

Zunächst wurden die Druckmaschine Challenger 173 angepasst, um den spezifischen Anforderungen des Projekts gerecht zu werden. Wichtige Anpassungen umfassten den Einbau eines Vakuumhalters, Software-Updates zur Verbesserung der Steuerung, den Einbau eines Transferzylinders und den Ersatz der standardmäßigen Rasterwalze durch einen Gravurzylinder. Parallel dazu wurden verschiedene Tinten getestet, darunter Hochtemperatur-Siebdruckpasten und speziell angepasste Tinten des Projektpartners PV Nano Cell.

Ein zentraler Fortschritt war die Qualifizierung geeigneter Drucktücher. Diese wurden hinsichtlich ihrer Oberflächencharakteristik, wie Härte und Oberflächenenergie, umfassend untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse führten zur Auswahl und Beschaffung von Transferzylindern, die für die weiteren Druckversuche eingesetzt wurden.

Die Druckversuche zeigten, dass das indirekte Tiefdruckverfahren in der Lage ist, konkurrenzfähige Ergebnisse im Vergleich zum etablierten Siebdruck zu erzielen. Erste Versuche mit verschiedenen Drucktuch- und Tintenvarianten zeigten jedoch Herausforderungen wie unzureichenden Farbübertrag und inhomogene Druckbilder. Durch den Einsatz vollumfänglicher Druckzylinder (Sleeves) konnten diese Probleme weitgehend behoben werden. Es wurde festgestellt, dass der Rakelwinkel einen signifikanten Einfluss auf die Druckqualität hat, wobei höhere Winkel zu besseren Ergebnissen führten.

Trotz dieser Fortschritte traten Effekte wie „viscous fingering“ auf, die weiter untersucht wurden. Funktionale Solarzellen, die mit dem indirekten Tiefdruckverfahren hergestellt wurden, zeigten vielversprechende elektrische Eigenschaften. Die Mikrostrukturen der tiefgedruckten Kontakte wiesen eine homogene Partikelverteilung auf, was zu einer verbesserten elektrischen Leitfähigkeit führen könnte.

Zusammengefasst konnte das indirekte Tiefdruckverfahren erfolgreich weiterentwickelt werden, um konkurrenzfähige Solarzellenkontakte herzustellen. Es besteht jedoch noch Optimierungspotenzial, insbesondere bei der Erzielung von Linienbreiten unter 20 μm .

3. Vorhabensplan und -durchführung

Rahmenbedingungen - Besonderheiten

Das Projektvorhaben begann zum 01.02.2021. Projektstart und etwa das 1/3 der Projektlaufzeit fielen somit in die Zeit der Corona-Pandemie, was einige bekannte Beeinträchtigungen und Beschränkungen bedeutete. Meetings konnten nur online abgehalten werden und die Möglichkeiten von experimentellen Durchführungen im Labor waren limitiert.

Trotz der erschwerten Umstände konnte von Beginn an eine gute Koordination und ein effektiver Austausch erreicht werden. Die anfallenden Arbeiten wurden aufgrund der Rahmenbedingungen besonders detailliert geplant und eingetaktet. Der Gesamtfortschritt im Projekt erlitt nur kleinere Abweichungen mit phasenweisen Verzögerungen von ca 3 Monaten und wurde in Summe nicht signifikant gestört. Entsprechend der zunächst vorherrschenden Ausgangslage eine tolle koordinative Leistung des Konsortialverbunds.

Ablauf des Vorhabens

Die Arbeitspakete des Projekts BUSSARD untergliederten sich wie folgt:

- 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)

Gemäß des Continental Teilvorhabens Entwicklung eines indirekten Tiefdruckverfahrens für busbarlose Solarzellen lagen die Kerntätigkeiten seitens Continental in AP3, zugehörig dazu war Meilenstein 3.2:

AP	Meilenstein (MS)	Verantwortlich	Monat
MS 3.2	Flexibile Druckform optimiert für die Pastenübertragung von Feinlinienkontakten (<20µm Fingerbreite) auf Si-Solarzellen entwickelt	Continental	18

Wie bereits geschildert konnte der Zeitplan und damit auch der geplante Termin des Meilensteins weitestgehend gehalten werden. Allerdings waren die Tätigkeiten in AP3 (sowie AP4) umfangreicher als geplant und erwartet und nahmen mehr Ressourcen in Anspruch als kalkuliert, sowohl seitens Continental als auch der Partner. Ausgleichend dazu konnten die unterstützenden Aufgaben in AP 5 nicht wie geplant durchgeführt werden.

4. Zusammenarbeit im Konsortium

Die Arbeit im Projekt BUSSARD wurde in sehr enger Abstimmung und intensiver Zusammenarbeit mit den beteiligten Partnern geplant und umgesetzt. Im zentralen Arbeitspaket 3 (AP 3) gab es eine enge Kooperation, die durch gemeinsame Labortage, zahlreiche Besprechungen und regelmäßige Abstimmungsrunden gekennzeichnet war. Diese enge Zusammenarbeit ermöglichte es, wertvolles KnowHow zu bündeln, sich gemeinsam in der Lösungsfindung zu befeuern und somit bedeutende Fortschritte im Bereich des indirekten Tiefdrucks zu erzielen.

Die Partner Continental, SWG, PV NanoCell und das Fraunhofer ISE brachten ihr umfassendes Know-how ein, wodurch innovative Lösungen und erfolgreiche Projektergebnisse, trotz der in Abschnitt 1 genannten erschwerten Bedingungen aufgrund der Corona-Beschränkungen, realisiert werden konnten.

5. Ergebnisse

Im Folgenden wird über die Arbeiten und Ergebnisse, welche unter das Continental Teilprojektvorhaben Entwicklung eines indirekten Tiefdruckverfahrens für busbarlose Solarzellen fallen, berichtet. Für eine umfassende Ergebnisdokumentation sei an dieser Stelle auf den Abschlussbericht von Konsortialpartner Fraunhofer ISE verwiesen.

Die Arbeiten fallen somit weitgehend in das zugehörige AP3 Feinlinien-Metallisierungsverfahren. Grundsätzlich lassen sich die Arbeiten und Ergebnisse in folgenden Teilaspekte gliedern, welche kausal ineinandergreifen und waren dort wiederum zentral der Entwicklung

- Anforderungsentwicklung und Adaption Druckmaschine
- Drucktuchentwicklung und -qualifizierung
- Prozessevaluation verschiedener Tinten
- Charakterisierung der morphologischen und elektrischen Eigenschaften

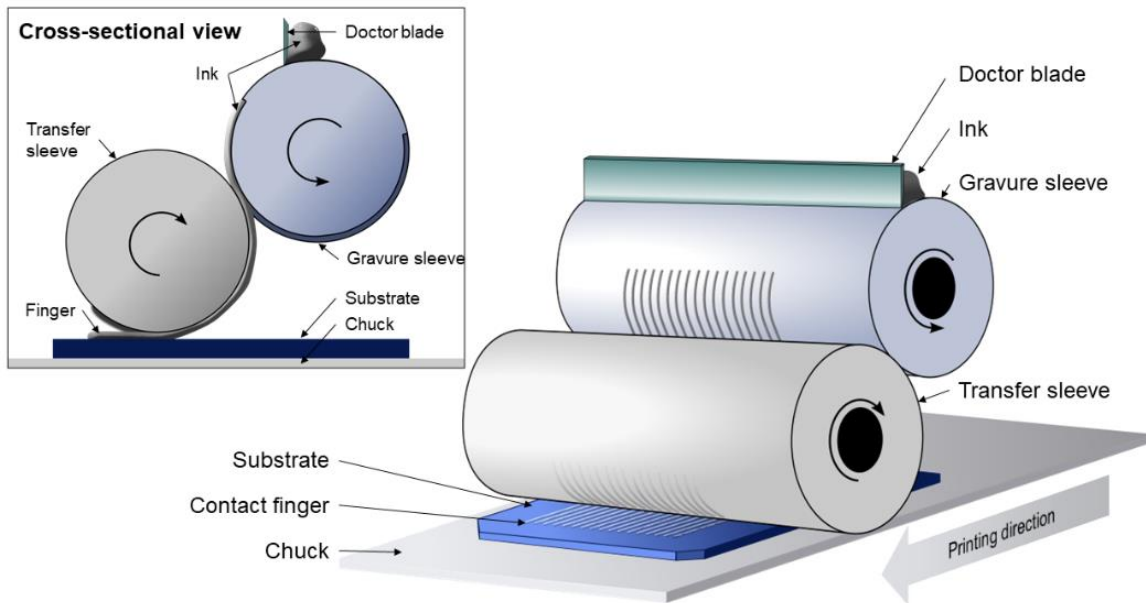


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für den indirekten Tiefdruck. (Quelle: Konsortialpartner Fraunhofer ISE)

5.1. Anforderungsentwicklung & Adaption Druckmaschine

Zu Beginn gab es einige Anforderungen und Adaptionen, auch aufgrund des Einstiegs der Fa SWG ins Konsortium. SWG als Partner, welcher die Druckzylinder zur Verfügung stellt, hat andere Produktspezifikationen als der ursprüngliche Partner, daher waren intensive Abstimmungen und Adaptionen notwendig. Verschiedenen Realisierung- bzw Lösungsmöglichkeiten wurden evaluiert. Letztlich konnte festgelegt werden, dass die Versuche auf unserer Rotationsdruckmaschine Challenger 173 (Fa Schläfli) durchgeführt werden.

Um die Challenger 173 für die Versuche und Aufgaben im Projekt BUSSARD optimal nutzen zu können, wurden in den Gesprächen einige Anpassungen und bauliche Maßnahmen identifiziert und entsprechende Lösungskonzepte definiert. Zu den wichtigsten Maßnahmen gehörten

- Integration und Inbetriebnahme eines Vakuumhalters für die Drucksubstrate („Chuck“)
- Software- bzw. Firmware-Updates für präzisere und flexiblere Gerätesteuerung
- Einbau eines Transferzylinders für verschiedene Drucktuchvarianten anstelle der standardmäßigen Flexodruckform
- Ersetzen der standardmäßigen Rasterwalze durch einen Gravurzylinder

Mit diesen Aufgaben wurde begonnen, bzw. die Maßnahmen wurden in die Wege geleitet. Die zum Einsatz vorgesehene Gravurwalze wurde von SWG hergestellt und bereitgestellt. Die technischen Daten und die notwendige Dimensionierung wurden ebenfalls im Rahmen der Abstimmungsrunden festgelegt.

Parallel dazu wurden zahlreiche den Anforderung des Druckprozess gerecht werdende Tinten und Testfluide gescreent um in die Prozessentwicklung einzusteigen. Es wurden verschiedene Hochtemperatur-Siebdruckpasten in verschiedenen Verdünnungsmöglichkeiten selektiert sowie eigens spezifisch angepasste Tinten des Projektpartners PV Nano Cell.

5.2. Charakterisierung von Drucktücher und Druckformen

Ein zentrales Arbeitspaket und damit wichtiger Beitrag von Continental zum Projektvorhaben BUSSARD war die Selektion geeigneter Transfermaterialien für den indirekten Tiefdruckprozess.

Drucktücher

Dies beinhaltet zunächst die Qualifizierung und die Untersuchung der signifikanten Eigenschaften von sogenannten Drucktüchern, insbesondere Merkmale der Oberflächencharakteristik wie Härte und Oberflächenenergie.

Tabelle 1 fasst die zugehörige Untersuchungsreihe und die ermittelten Parameter zusammen.

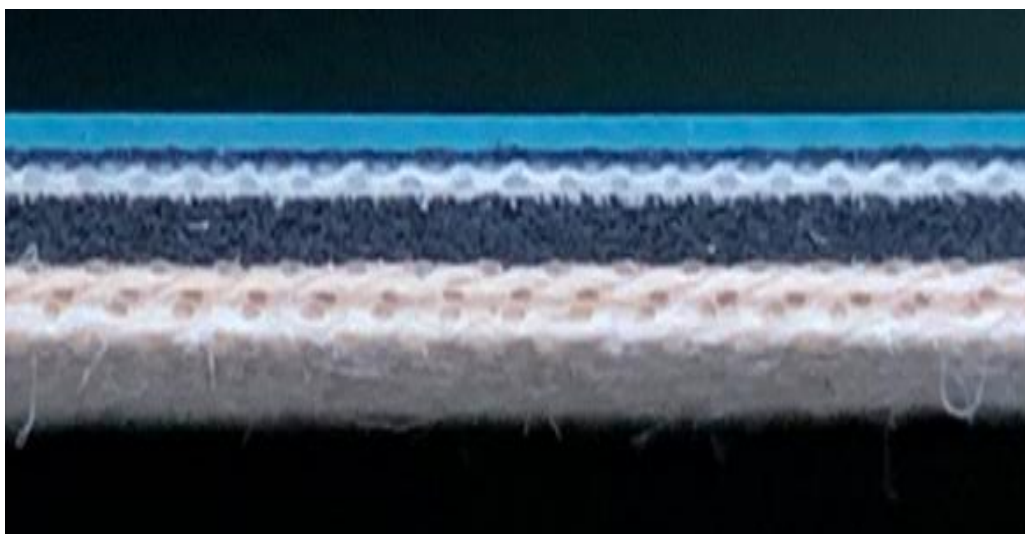


Abbildung 2: Detailansicht eines Drucktuchquerschnitts (dynacoat)

Tabelle 1: Drucktuchvarianten und signifikante Parameter

Name	Surface Material	Thickness [mm]	Compressibility [mm]	Surface	Surface tension [mN/m]	Hardness
Crystal	EPDM	1,96	0,187	microground	11,23	48° Shore A
Evolution TR	EPDM	1,96	0,200	ground	12,15	54° Shore A
Xenon UV	EPDM	1,96	0,200	microground	15,16	60° Shore A
Prisma HC	EPDM	1,96	0,220	microground	17,43	55° Shore A
Dynacoat Green	EPDM	1,96	0,130	microground	17,48	47° Shore A
Litho HC	EPDM	1,96	0,227	microground	19,91	63° Shore A
UV Black	EPDM	1,96	0,187	microground	21,59	60° Shore A
Entropia TR2	EPDM	1,96	0,200	fineground	23,05	63° Shore A
Duo Plus	EPDM	1,96	0,220	microground	29,08	59° Shore A
Ebony +	EPDM	1,96	0,220	microground	29,82	55° Shore A
Onyx	EPDM	1,96	0,200	microground	31,63	56° Shore A

Druckformen

Aus den qualifizierten Drucktüchern wurde im Spättern signifikante Kennwerte für die Auswahl von vollumfänglichen Transferzylindern („Sleeves“) abgeleitet. Die Transferzylinder wurden konfiguriert und beschafft und bezüglich ihrer relevanten Oberflächeneigenschaften charakterisiert. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der zur Auswahl stehenden Transferzylinder. Diese Transferzylinder wurden im Folgenden für die Druckversuche und Tintenqualifizierung eingesetzt.

Tabelle 2: Übersicht der Druckzylinder (Sleeve)

	Sleeve 50		Sleeve 65		Sleeve 85	
	Wert	StAbw [mN/m]	Wert	StAbw [mN/m]	Wert	StAbw [mN/m]
Freie Oberflächenenergie	16,72	2,38	17,18	2,74	20,43	0,69
Dispersiv	16,65	2,21	17,13	2,55	20,41	0,64
Polar	0	0,18	0,05	0,19	0,02	0,06

5.3. Druckversuche und Tintenevaluation

Aus den in der Anforderungsentwicklung erzielten Überlegungen ließen sich bereits einige relevante Parameter festmachen, welche dann ergänzt mit den Drucksleevecharakteristika und weiteren Parametern insgesamt einen großen Versuchsraum aufspannen. Im Folgenden die Auflistung aller identifizierten relevanten Einflussgrößen bzw Parameter:

- 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

Einige Komponenten, insbesondere die TOPCon Solarzellen waren limitiert in der Verfügbarkeit, weshalb hier dosierte Experimente unter sorgfältiger Vorauswahl und Eingrenzung der Parameter durchgeführt wurden.

Druckversuche auf Druckmaschine Challenger173

Im Folgenden sind die Details der Durchführung der Druckversuche, die gemachten Beobachtungen und erste abgeleitete Maßnahmen beschrieben. Für eine detaillierte Beschreibung und Bewertung der Versuchsergebnisse verweisen wir auf den Bericht des Partners Fraunhofer ISE.

Versuche mit Drucktüchern

In den ersten Druckversuche-Kampagnen wurden die zuvor qualifizierten Drucktücher verwendet. Die Drucktücher werden mit feinspezifizierten Tapes auf den Trägerkern aufgebracht, die Drucktücher sind typischerweise, so auch hier, so dimensioniert, dass sie den Trägerkern zu $\frac{3}{4}$ des Umfangs umfassen, wie Abbildung 3, links zeigt. Abbildung 3 rechts zeigt den Transferzylinder gemeinsam mit dem Druckzylinder gerüstet auf der Druckmaschine.

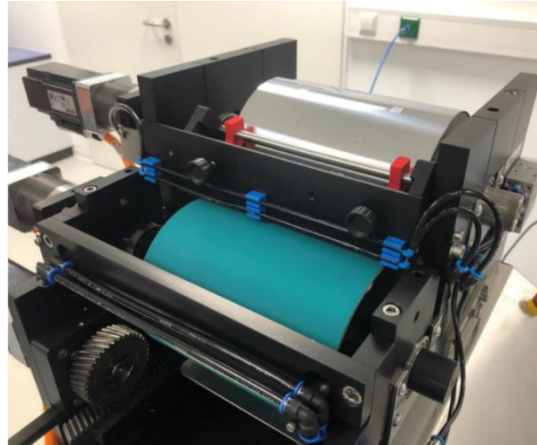
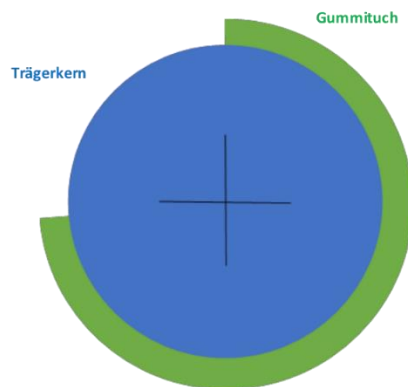


Abbildung 3: (links) Schema des Drucktuch-Mountings, (rechts) Transferzylinder mit Drucktuchvariante #1 sowie Druckzylinder gerüstet auf Challenger173

Es wurden insgesamt Versuche mit zwei Drucktuchvarianten, vier funktionellen Tinten und mehreren Druckparametereinstellungen durchgeführt. Neben Solarzellen-Dummies wurde PET als Testssubstrat zum Einfahren der Maschine verwendet. Abbildung 4 zeigt eine Zusammenstellung der Variationen und Abbildung 5 einige Impressionen der Versuche.

■ Gravure	■ Fluids
■ With bars	■ PVNC Sicrys I85DB-H103
■ Without bars	■ PVNC Sicrys I81DB-H101
■ Printing blanket	■ PVNC Sicrys P75DB-1
■ Dynacot (green, 47 Shore)	■ Heraeus SOL 9390A
■ Ebony (black, lower surface energy, 55 Shore)	■ Substrates
■ Doctor blade	■ (PET)
■ Softer doctor blade	■ PERC Dummies
■ Harder doctor blade	■ Annealing
■ Speed	■ Hotplate, 200°C, ~5 min
■ Einfärbegeschwindigkeit 20m/min	

Abbildung 4: Übersicht der Versuchs(parameter)variationen

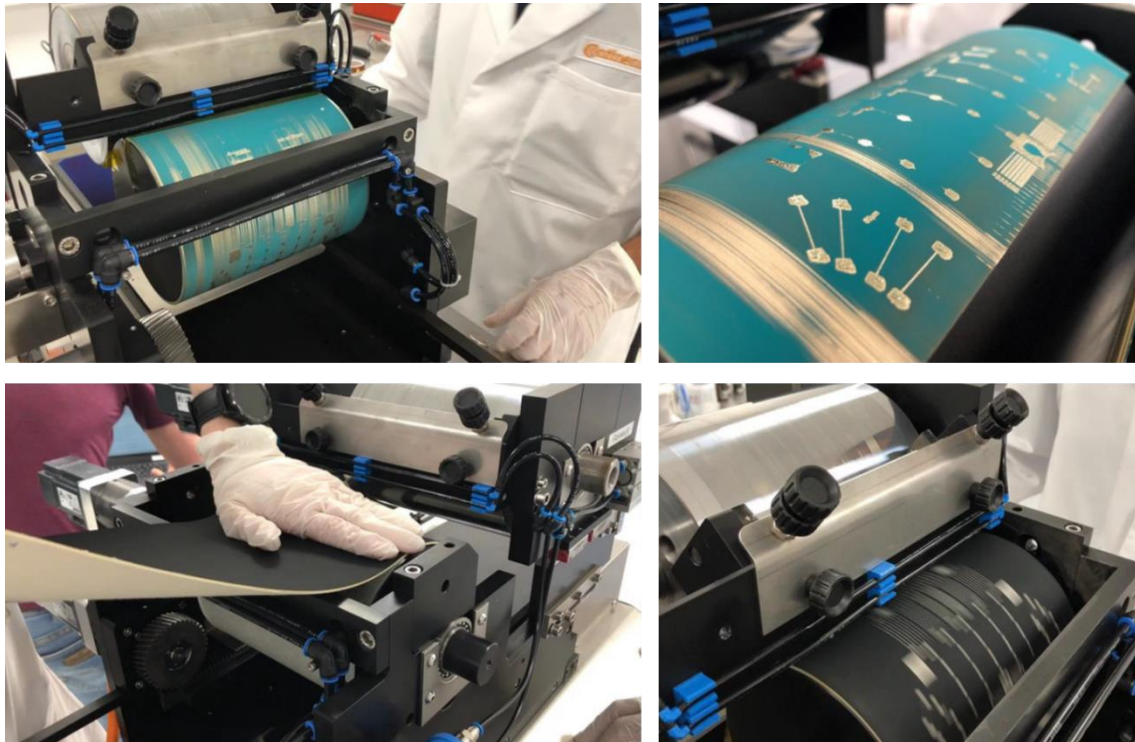


Abbildung 5: (ol) Übertrag des Druckbilds auf Drucktuchvariante #1 (Bild unter Rotation). (or) Beispiel nichtidealer Farbübertrag an Druckformrändern. (ul) Wechsel auf Drucktuchvariante #8. (ur) (unter Rotation) Übertrag des Druckbildes

Die erste Versuchsreihe wurde mit Drucktuchvariante #1 durchgeführt, gefolgt von einer weiteren Reihe mit Drucktuchvariante #8. PET-Substrate wurden verwendet, um die Maschine einzufahren und die Zustellhöhe zu ermitteln, bevor auf Dummy-Solarzellen gewechselt wurde.

Zusätzlich zu den gelisteten Parametervariationen wurden Samples mit unterschiedlicher Anzahl an Bedruckungen hergestellt und verglichen. Es stellte sich heraus, dass bei einigen Testmotiven eine Einfachbedruckung zu wenig Farbübertrag lieferte und kein vollständiges Druckbild erreicht werden konnte. Abbildung 6 illustriert beispielhaft den Vergleich der Druckbilder nach zunehmender Bedruckungsanzahl. Eine detaillierte Analyse der Druckergebnisse ist im Abschlussbericht des Fraunhofer ISE enthalten.

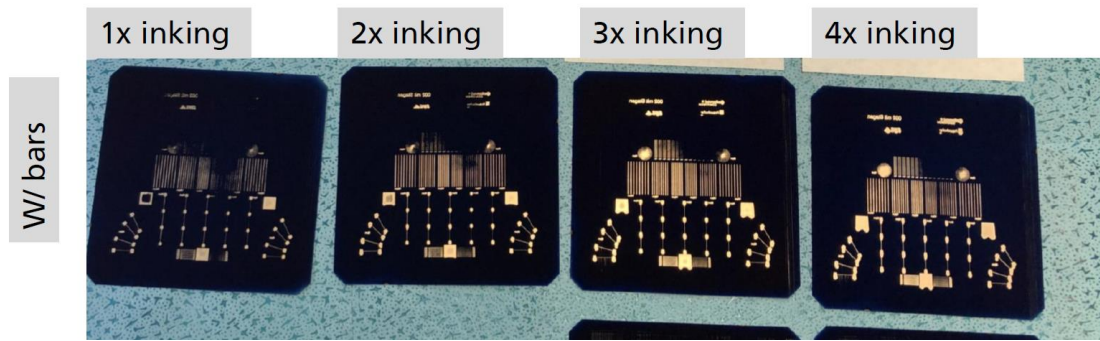


Abbildung 6: Vergleich der Druckbilder bei unterschiedlicher Anzahl Bedruckungszyklen

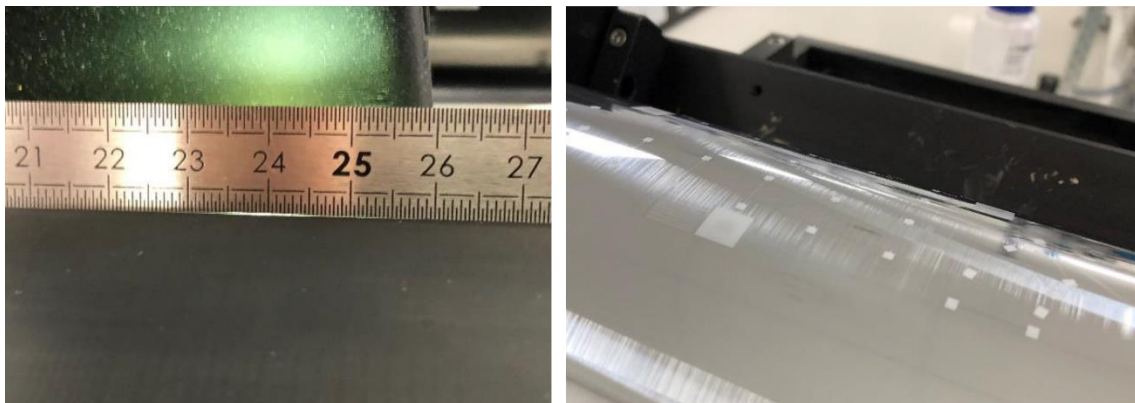


Abbildung 7: (links) Identifizierte, ungenügende Planarität in Drucktuchvariante #8, Ursache für inhomogenen Farbübertrag. (rechts) beobachtete Riefenbildung am Druckzylinder, Ursache Gegenstand weiterer Untersuchungen

Bei den Versuchen wurden verschiedene unerwünschte Effekte und Nichtidealitäten beobachtet. Abbildung 7 zeigt zwei signifikante Beobachtungen: Links ist zu sehen, dass die eingesetzte Drucktuchvariante #8 stellenweise keine gute Planarität aufwies, was zu inhomogenem Farbübertrag und ungleichmäßigen Druckbildern führte. Rechts wird dargestellt, dass sich im Verlauf der Druckversuche Riefen auf dem Druckzylinder gebildet haben, deren Ursache noch untersucht wird.

Die teilweise schlechte Planarität der Drucktücher ließ auch für weitere Druckversuche nur unzureichende Ergebnisse erwarten. Um diesen Fehlereinfluss zu beseitigen, wurde seitens der Konsortialpartner beschlossen, den Tinten-Transfer mittels eines vollumfänglichen Druckzylinders („Sleeve“) zu realisieren, der auf den bereits selektierten Materialien der Drucktücher basiert. Solche Transfer-Sleeves wurden entsprechend ausgelegt, hergestellt und beschafft.

Als eine mögliche Ursache der Riefenbildung wurden Mikropartikel aus der funktionellen Silbertinte vermutet, was ebenfalls weiter untersucht wurde im Rahmen der Versuche mit Drucksleeves.

Versuche mit Drucksleeves

In der folgenden Druckversuche Reihen wurde auf Transfer-Sleeves gewechselt. Diese wurde mittels Luftdruck auf den Trägerkern aufgestülpt (s. Abbildung 8). Aus den qualifizierten Drucktüchern konnten signifikante Kennwerte für die Auswahl von vollumfänglichen Transferzylindern ("Sleeves") abgeleitet werden. Die Transferzylinder wurden konfiguriert, beschafft und hinsichtlich ihrer relevanten Oberflächeneigenschaften charakterisiert.

Es wurden im Berichtszeitraum Versuche mit zwei Druckzylindern (mit und ohne Steg), einem vollumfänglichen Druckzylinder („Sleeve“), drei verschiedene Tinten und mehrere Druckparametereinstellung durchgeführt. Abbildung 9 fasst die relevantesten Variationsparameter zusammen.

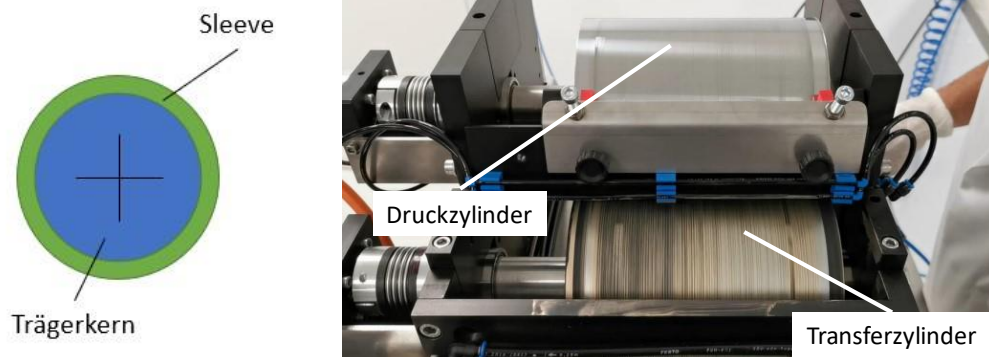


Abbildung 8: Schema des vollumfänglichen Druckzylinder („Sleeve“) auf dem Trägerkern (links) und Transferzylinder mit aufgezogenem Sleeve sowie Druckzylinder gerüstet auf Challenger 173

Hardware	Material
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Machine <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schläfli Challenger 173 („Explorer“) ▪ Gravure sleeve(s) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sleeve ID 004 → with bars (lowered) (30 / 60 µm depth) ▪ Sleeve ID xxx → without bars (30 / 60 µm depth) ▪ Transfer sleeve(s) <ul style="list-style-type: none"> ▪ 109/124.257/134.410/0170/EE8HS1/F/1 ▪ 85° SH A ▪ Free surface energy: (20.4 ± 0.7) mN/m ▪ Doctor blade <ul style="list-style-type: none"> ▪ MDC Longlife (...24816) ▪ 25.0x0.2/0.1x1.3mm ▪ Non-defined pressure/manual pressure adjustment ▪ Angle variation (see documentation below) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Substrates <ul style="list-style-type: none"> ▪ TOPCon dummies w/o emitter (from batch 210159ISE) ▪ TOPCon dummies w/ emitter (from batch 210160ISE) ▪ Fluids <ul style="list-style-type: none"> ▪ PVN I81TMPC-B120 (optional) ▪ PVN I81DB-H101 ← Printed, 6, 10 <ul style="list-style-type: none"> ➢ For comparison with batch 210236PSM ▪ PVN I85DB-H103 ← Printed, 6, 10 <ul style="list-style-type: none"> ➢ Promising in flexo printing ▪ PVN I85DM-B121 (optional) ← Printed, 6, 10 <ul style="list-style-type: none"> ➢ For solvent comparison ▪ Heraeus SOL 9390A (NT00-2311) <ul style="list-style-type: none"> ▪ “Old” TOPCon FS screen printing paste ▪ Thinning necessary

Abbildung 9: Übersicht der Versuchsvariationen, -komponenten und -parameter

Einfluss Rakel

Der Einfluss des Rakelwinkels auf das Druckbild wurde bei gleichbleibenden Druckparametern dokumentiert, wie in Abbildung 10 veranschaulicht. Dabei wurden ein Druckzylinder („Sleeve 004“) mit Steg (Tiefe: 60 µm), eine Druckgeschwindigkeit von 20 m/min und zwei Einfärbungen verwendet. Eine Verbesserung der Druckbildqualität mit zunehmendem Rakelwinkel war erkennbar, jedoch war maschinenseitig eine Grenze bei 60° Rakelwinkel gesetzt. Die besten Ergebnisse wurden mit dem „Sleeve 004“ mit Steg und einem Rakelwinkel von 53,7° erzielt.

Die Versuche wurden anhand der Beobachtungen positiv bewertet, und die Ergebnisse waren weiterhin vielversprechend. Verschiedene unerwünschte Effekte und Nichtidealitäten in den Komponenten oder Materialien wurden festgestellt. Die gedruckten Linien wiesen eine Struktur auf, die in der Literatur als „viscous fingering effects“ bekannt ist (siehe Abbildung 11). Es wurde vermutet, dass diese durch die Farbspaltung zwischen Druck- und Transferzylinder verursacht werden.

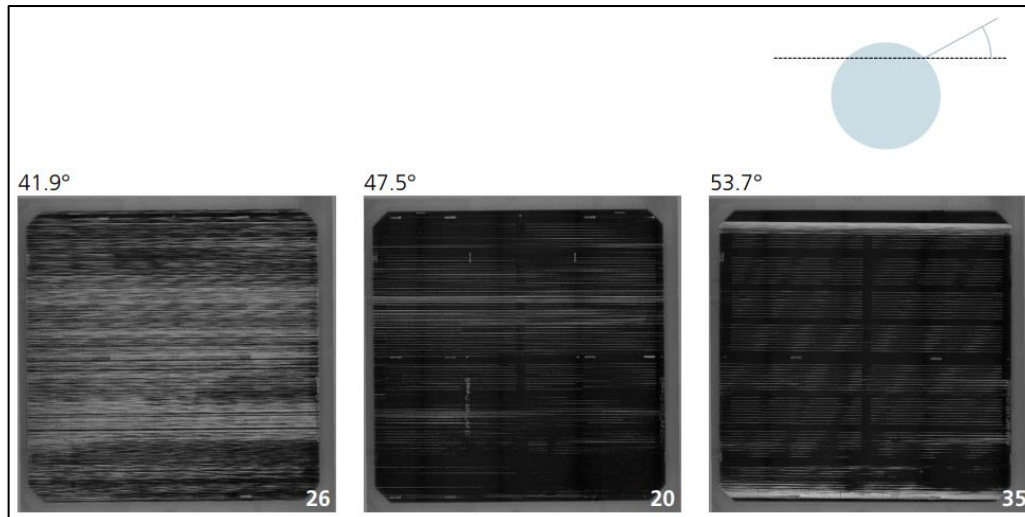


Abbildung 10: Einfluss des Rakelwinkels auf das Druckbild

In vorherigen Untersuchungen wurde auf die mangelnde Planarität der eingesetzten Drucktücher aufmerksam gemacht. Die ergriffene Maßnahme, der Einsatz von vollumfänglichen Druckzylindern („Sleeves“), führte zwar zur Reduktion des unerwünschten Effekts, zeigte jedoch noch Optimierungspotenzial und war daher weiterhin Gegenstand aktueller Untersuchungen.

Um das Optimierungspotenzial der Planarität der Druckzylinder („Sleeves“) auszuschöpfen, wurden weitere interne Abstimmungen geplant. Zudem sollte untersucht werden, ob die beobachteten unerwünschten „viscous fingering effects“ zwischen Druck- und Transferzylinder oder zwischen Transferzylinder und Substrat entstehen. Untersuchungen zur Ermittlung der Einflussparameter auf die Farbspaltung waren ebenfalls geplant, um diese Effekte zu reduzieren. Die geplanten Untersuchungen umfassten Versuche mit angepassten Tinten sowie Möglichkeiten zur Änderung bzw. Anpassung der Oberflächenrauheit und Oberflächenenergie der Druckzylinder. Darüber hinaus gab es Überlegungen zum Einsatz eines Flexodruckverfahrens und entsprechende Vortests. Im Folgenden werden die Details der Durchführung der Druckversuche, die gemachten Beobachtungen und die ersten abgeleiteten Maßnahmen beschrieben.

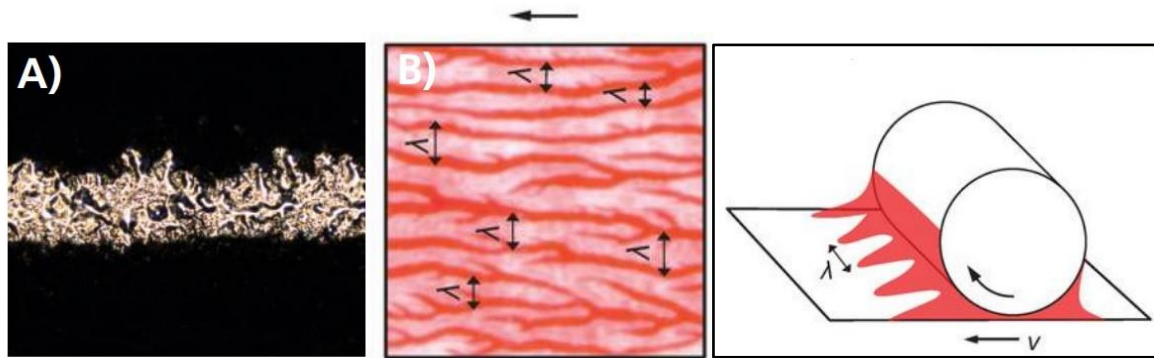


Abbildung 11: a) gedruckte Linie (Busbar) (b) "Viscous fingering effects"

Durchführung konkretisierter Druckversuche

Es wurden Versuche mit einem Druckzylinder, zwei vollumfänglichen Transferzylindern (strukturiert und nicht strukturiert mit einer Oberflächenenergie von $20,43 \pm 0,69$ mN/m und Härte 80 Shore A verwendet, vgl Tabelle 2), verschiedenen Tinten und mehreren Druckparametereinstellungen durchgeführt. Erkenntnisse aus vorangegangenen Versuchen, wie der Einfluss des Rakelwinkels auf die Qualität des Druckbilds, wurden umgesetzt. Die vorläufig besten Ergebnisse wurden mit den folgenden Parametern erzielt:

- Tinte: I86DB-106A
- Druckzylinder: 90 μ m Gravur-Tiefe
- Transferzylinder: strukturierter Transferzylinder (Sleeve)
- Zelle: busbarlose Halbzellenanordnung für manuelle Ausrichtung

Nach Einstellung der Druckparameter wurde der Transferzylinder eingefärbt (siehe Abbildung 12), anschließend wurden die Leiterbahnen auf das Substrat übertragen. Und die Samples im Ofen bei 200°C getrocknet.

Abbildung 13 zeigt das Ergebnis einer gedruckten Solarzelle mit dem indirekten Tiefdruckverfahren. Die Versuche ließen sich anhand der direkten Laborbeobachtungen als positiv bewerten, Detailanalysen und -charakterisierung durchgeführt. In den Versuchsreihen wurden verschiedene Effekte und Nichtidealitäten in den Materialien festgestellt, die jedoch keinen direkten Einfluss auf die Qualität des Druckbilds hatten.

Die gedruckten Zellen wurden nach den Versuchen zur Charakterisierung an das Fraunhofer ISE übergeben. Dort werden sie ex situ und in situ charakterisiert.

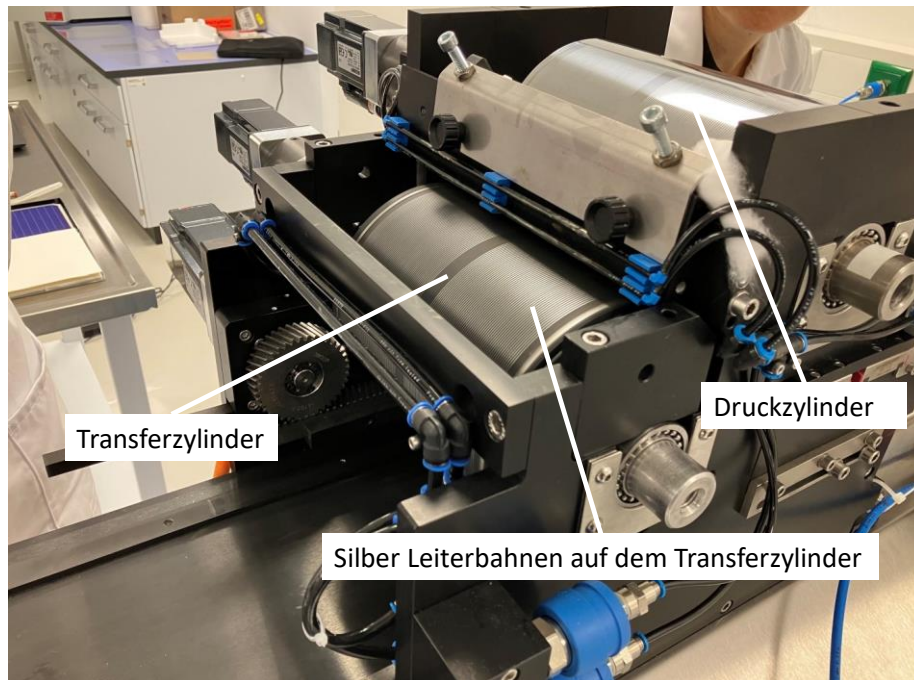


Abbildung 12: Einförmung des Transferzylinder auf Challenger 173

5.4. Charakterisierung der morphologischen und elektrischen Eigenschaften

Es konnten im Rahmen von BUSSARD funktionale Solarzellen mittels indirektem Tiefdruck hergestellt werden, welche Potential besitzen verbesserte Eigenschaften als etablierte Siebdruckvarianten zu ermöglichen. Strukturbreiten liegen noch etwas über dem Standardverfahren aber besonders die Mikrostruktur der Tinten lässt bei den elektrischen Eigenschaften großes Potential für überlegene Performance aufzeigen.

Beispielhaft sei hierzu eine REM Analyse Abbildung 14 beschrieben: Die Rasterelektronenmikroskop- (REM) Aufnahmen zeigen, dass in dieser Arbeit geeignete Kontaktfinger für Solarzellen hergestellt wurden. Abbildung 14 veranschaulicht sowohl die Mikrostruktur eines siebgedruckten Referenzkontakts (a, c) als auch eines tiefgedruckten Kontakts (b, d). Die Draufsicht auf einen tiefgedruckten Kontakt ($w_n = 50 \mu\text{m}$, $C = 1$) zeigt eine vollständige Bedeckung des Substrats mit Silber, eine signifikante Fingerhöhe und eine Fingerbreite von $60 \mu\text{m}$.

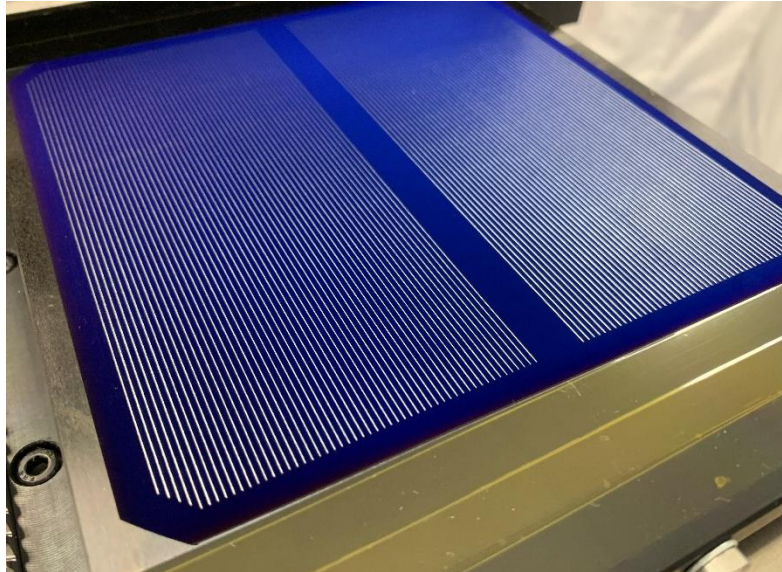


Abbildung 13: bedruckte Silicon Hetero Junction (SHJ) Vollzelle

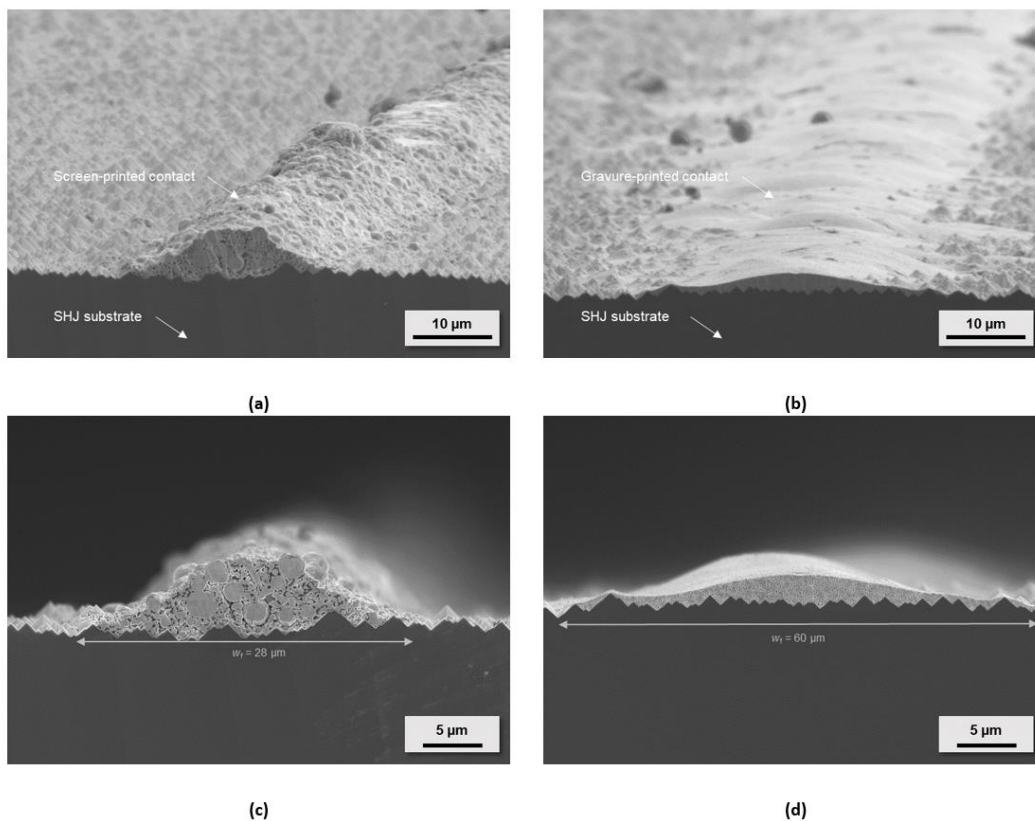


Abbildung 14: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen eines siebgedruckten Metallkontakts in (a) und (c) und einem Metallkontakt hergestellt mittels indirektem Siebdruck (b, d)

Die Mikrostrukturen der Finger in Abbildung 14 (c) und (d) zeigen, dass die Siebdruckpaste Silberpartikel mit variierenden Durchmessern enthält, während die Tinte für den indirekten Tiefdruck homogene Partikelgrößen aufweist, vorteilhaft für die elektrische Leitfähigkeit. An der Schnittstelle zwischen Kontaktfinger und Substrat sind bei beiden Kontakttypen keine Hohlräume sichtbar, was einen niedrigen elektrischen Übergangswiderstand ermöglicht.

Kleinere Partikel in der Tinte für den indirekten Tiefdruck erhöhen die mechanischen Kontakte zwischen den Silberpartikeln und der Indiumzinnoxid (ITO)-Schicht, was zu verbessertem Sintern führen kann.

Für eine holistische, statistische und detaillierte Analyse, Beschreibung und Bewertung der Versuchsergebnisse wird im Weiteren auf den Bericht des Partners Fraunhofer ISE verwiesen.

5.5. Fazit der experimentellen Tätigkeiten

Die Druckversuchsreihen zum indirekten Tiefdruck konnten zeigen, dass konkurrenzfähige Ergebnisse im Vergleich mit dem etablierten Siebdruck erreicht werden konnten. Der Meilenstein 3.2 wurde nicht vollständig erreicht, da der indirekte Feinliniendruck mit geeigneten entwickelten Druckformen demonstriert wurde, Linienbreiten $<20 \mu\text{m}$ dabei jedoch nicht reproduzierbar hergestellt werden konnten.

6. Notwendigkeit der Förderung und Ideen für Anschluss

Die im Projekt BUSSARD untersuchten Technologien und Ansätze haben sowohl technologisch, konzeptionell als auch wirtschaftlich ein sehr hohes Potenzial. Diese Fortschritte sind entscheidend, um weiterhin Kostenreduktionen in der Photovoltaik zu erreichen und die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Teilnehmer am globalen PV-Markt zu gewährleisten. Insbesondere der im Projekt entwickelte indirekte Tiefdruck zur Metallisierung von Solarzellen mit passivierenden Kontakten birgt enormes Potenzial auch für zukünftige Anwendungen außerhalb der PV.

Die grundlegende Natur von Forschungsarbeiten, verbunden mit den Entwicklungsrisiken, machte eine Förderung des Projektes durch Dritte notwendig. Die hohe Übereinstimmung der Inhalte und Ziele des Vorhabens mit dem Energieforschungsprogramm der Bundesregierung rechtfertigte die Unterstützung durch öffentliche Mittel. Das Projekt BUSSARD konnte nur damit eine solide Basis für zukünftige Innovationen und die Adaption des indirekten Tiefdrucks auf neue Anwendungen und Produktgruppen schaffen. Einmal mehr eine Demonstration,

dass öffentliche Förderung signifikant zu technologischen Fortschritten führen kann.

Continental steht im Austausch mit dem Fraunhofer ISE, um die Möglichkeiten zur gemeinsamen Weiterentwicklung des indirekten Tiefdruckverfahrens zu evaluieren. Beide Parteien betrachten den Tiefdruck als vielversprechend, auch weit über Anwendung in der PV-Technologie hinaus. Großes Potential wird beim Einsatz der Herstellung von funktionale Folien und die Leiterplattentechnik gesehen. Das Projekt BUSSARD hat eine hervorragende Grundlage für die weitere Prozessoptimierung und die Anpassung auf andere Anwendungen und Produktgruppen geschaffen. Die hohe Expertise im Bereich elastomerer Werkstoffe und Oberflächen wird in einem potenziellen Folgeprojekt erneut eine wichtige Basis für Innovationen sein.

7. Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Eine Auflistung mehrerer relevanter Ergebnisse von Dritten mit Fokus auf Metallisierungsverfahren ist im Abschlussbericht des Fraunhofer ISE genannt. Es sei hiervon eine Veröffentlichung hervorgehoben, die sich mit einem Transferdruckverfahren befasst:

[Optimization of capillary suspension silver pastes for enhanced metallization in silicon solar Cells: A comparative analysis of Screen-Printing and pattern transfer printing – ScienceDirect](#)

Die hohe wissenschaftliche Aktivität in diesem Technologiefeld unterstreicht nochmals die hohe Relevanz des Projekts und der Förderung. Ein Vergleich mit den Ergebnissen in der gelisteten Literatur unterstreicht dabei die hohe Relevanz, Qualität und Signifikanz der Ergebnisse von BUSSARD

8. Veröffentlichungen & Verbreitung

Die Ergebnisse im Projekt BUSSARD wurden bisher wie folgt publiziert, bzw. eingereicht:

J. Schube et al., FlexTrail Printing as Direct Metallization with Low Silver Consumption for Silicon Heterojunction Solar Cells: Evaluation of Solar Cell and Module Performance, Energy Technology (2022).

J. Schube et al., High-Throughput Indirect Gravure Printing Applied to Low-Temperature Metallization of Silicon-Based High-Efficiency Solar Cells, Energy Technology (2023).

A. Lorenz et al., Project "BUSSARD" – A Holistic Development of High-Efficiency Solar Cells Covering Innovative Front-End, Metallization and Interconnection Approaches, EPJ Photovoltaics (submitted 2024)

Weiter sind im aktuellen Kalenderjahr noch folgende beiden Publikationen geplant:

A. Lorenz et al., Project "BUSSARD" – A Holistic Development of High-Efficiency Solar Cells Covering Innovative Front-End, Metallization and Interconnection Approaches, EUPVSEC 2024 (accepted as oral presentation)

J. Schube et al., 12th Metallization and Interconnection workshop 2024, (abstract submitted).

9. Anlagen

Berichtsblatt