

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht zum Teilvorhaben des Forschungsvorhabens

Laser2Screen - Entwicklung von Techno- logien und Prozessen zur Laserstrukturierung von Schablonen und Sieben zur Realisierung von Strukturbreiten kleiner 20µm; Teilvorhaben: Laserstrukturierte Gewebe- Siebdruckschablonen

Förderkennzeichen: 03EE1100D

Projektlaufzeit: 01.02.2022 – 30.04.2025

Verfasser:

Herbert Frintrup

Bonn, 31.07.2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

INHALT

1. Zusammenfassung	4
2. Zielsetzung und Vorgehensweise	5
2.1 Motivation und Gesamtziel des Verbundes	5
2.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Verbundes	6
3. Planung und Ablauf.....	8
3.1 Arbeitsinhalte	8
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn.....	9
4.1 Stand von Wissenschaft und Technik.....	9
4.2 Neuheit und Attraktivität des Lösungsansatzes	12
5. Zusammenarbeit mit Dritten	13
6. Ergebnisse	13
AP 0 Projektkoordination	13
AP 1.4 Simulation und Auslegung des optimalen Designs für laserstrukturierte Siebe und Schablonen	13
AP 1.5 Erarbeitung von Konzepten zur Auslegung und Herstellung laserstrukturierter Schablonen und Siebe	14
AP 2.1 Spezifikation der relevanten Materialeigenschaften im Hinblick auf Laserstrukturierung, Druckeigenschaften und Lebensdauer	15
AP 2.2 Entwicklung von Verfahren zur Realisierung sehr dünner Sperrschichten (10-30 µm) auf Basis laserstrukturierbarer Emulsionen	16
AP 2.3 Evaluierung von Verbindungstechnologien zur dauerhaften Verbindung mit dem Trägermaterial (Metallfolie, Siebgewebe).....	16
AP 2.4 Auswahl und Evaluierung geeigneter Werkstoffe für Sperrschichten (Emulsionen, EPDM)	17
AP 2.5 Herstellung und Evaluierung von Druckformen mit laserstrukturierter Sperrschicht ...	17
AP 2.7 Entwicklung und Evaluation von Materialien zur funktionalen Beschichtung von Druckformen bzw der Speerschichten	18
AP 5.1 Selektion der technologischen und prozessseitigen Anforderungen für Flachbettsiebe mit flexibler Sperrschicht	18
AP 5.2 Herstellung von Sieben unter Verwendung der in AP2 entwickelten Materialien und Verbindungstechnologien	19
AP 5.3 Evaluierung der optimalen Prozessbedingungen und Laser-Parameter zur selektiven Laser-Öffnung der flexiblen Sperrschicht	20
AP 5.4 Herstellung von laserstrukturierten Sieben sowie Vergleich mit konventionellen Referenz-Sieben	21
AP 7.1 Evaluierung und Optimierung der entwickelten laserstrukturierten Schablonen und Siebe.....	22
AP 7.2: Herstellung und Evaluierung von Si-Solarzellen mit laserstrukt. Schablonen-/Siebtechnologien, Vergleich mit Referenz-Zellen	22

7.	Fortgeschriebener Verwertungsplan.....	23
7.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	23
7.2	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten	23
7.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	23
	Literaturverzeichnis.....	24
	Liste der Veröffentlichungen	24

1. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projekts wurden hochmoderne Siebdruckformen für den Druck von Solarzellen hergestellt. Dafür wurden die aktuellsten am Markt erhältlichen Edelstahlgewebe mit Fadendurchmessern von lediglich 11 µm verwendet um Druckformen herzustellen, die den hohen Ansprüchen der Anwender in der Solarindustrie zum Drucken feinsten Linien genügen. Die Druckformen wurden nicht mehr mit konventionellen UV-empfindlichen Schichten, wie sie schon lange als Standard für Siebdruckformen verwendet werden, beschichtet sondern mit neuartigen laserstrukturierbaren Lacken. Eigenschaften und Applikation der Schichten wurden ausgiebig untersucht.

Auf der im Rahmen des Projekts aufgebauten Laseranlage am Fraunhofer ISE konnten auf diese Weise Siebdruckformen mit Druckkanalöffnungen von deutlich unter 20 µm hergestellt werden. Dies übertrifft am Markt erhältliche Siebdruckformen mitunter deutlich. Die mit diesen Druckformen hergestellten Zellen weisen Finger von ca. 20 µm auf, was zu einem deutlich geringeren Verbrauch an Silberpaste führt. Das Druckergebnis erweist sich dabei qualitativ ebenbürtig mit vergleichbaren kommerziellen Druckformen

Ebenfalls wurde im Rahmen des Projekts das Aufbringen von laserstrukturierbaren Schichten auf Edelstahlfolien und die anschließende Strukturierung der Folien mittels Laser untersucht. Ziel ist die Verwendung dieser Edelstahlfolien als Druckform für die Solarindustrie.

2. ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE

2.1 Motivation und Gesamtziel des Verbundes

Die Vorder- und Rückseitenmetallisierung von Silicium-Solarzellen wird heutzutage zu über 98% [1] im Flachbett-Siebdruck- und Schablonendruckverfahren realisiert. Für die Metallisierung der prognostizierten Solarzellen-Produktion von 128 GWp im Jahre 2019 kann ein Bedarf von über 1,5 Mio. Flachbett-Sieben angenommen werden. Die in den letzten Jahren stark gestiegenen technologischen Anforderungen an Flachbett-Siebe führen bei konventioneller Herstellung mittels UV-Belichtung zu großen technologischen Herausforderungen und entsprechend hohen Kosten für Feinlinien-Siebe. Insbesondere der zunehmende Einsatz von Sieben mit Feingewebe (z.B. 430 - 520 Drähte/inch) und 0°-Winkelung (sogenannte „Knotless“- bzw. „Super-Screen“-Siebe [2]) stellt die Lieferanten konventionell hergestellter Flachbett-Sieben vor große Herausforderungen im Hinblick auf eine kostengünstige Produktion.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen deshalb innovative Ansätze zur Strukturierung von Sieben und Schablonen mittels Laserverfahren entwickelt werden. Der Einsatz von Lasertechnologien in Verbindung mit einer entsprechenden Materialentwicklung bietet dabei sowohl das Potential einer signifikanten Kostensenkung als auch technologische Vorteile im Hinblick auf die Qualität der resultierenden Feinlinien-Siebe. Daraus ergeben sich folgende konkreten Ziele für das Forschungsvorhabens:

Entwicklung von laserstrukturierbaren Sperrschichten (Emulsion) für Siebe und Schablonen, welche hinsichtlich der rheologischen Wechselwirkung mit industriellen Metallpasten optimale Eigenschaften aufweisen. Ziel ist die Optimierung des Pastentransfers durch den Emulsionskanal bei immer kleiner werdenden Kanalöffnungsbreiten und ein verbessertes Auslöseverhalten (Reduzierung der auftretenden Scherkräfte) beim Siebabsprung.

- Optimierung der Druckkanalgeometrie im Rahmen einer Prozesssimulation. Als Eingangsparameter dienen hier experimentell erfasste rheologische Parameter der Pasten in Wechselwirkung mit den im Projekt adressierten Oberflächen der Siebe und Schablonen
- Entwicklung von Laserprozessen zur Strukturierung von gewebebasierten Sieben und Schablonen mit und ohne flexibler Sperrschicht
- Entwicklung geeigneter Software-Lösungen für eine Demonstrator-Anlage zur Laserstrukturierung von Sieben und Schablonen
- Evaluierung der entwickelten Technologien und Vergleich mit konventionell hergestellten Sieben und Schablonen
- Marktstudie zu relevanten Anwendungsfeldern (innerhalb und außerhalb der PV) sowie techno-ökonomische Bewertung

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Prozesse, Materialien und Anlagentechnologie zur Laserstrukturierung von Sieben und Schablonen sollen im Ergebnis einen Technology Readiness Level (TRL) nach Mankins [3] von mindestens 6 aufweisen („Prototype Demonstration in Relevant Environment“). In technologischer Hinsicht soll die Realisierung von gedruckten Kontaktfingern mit einer Breite $w_f < 20 \mu\text{m}$ demonstriert werden und in ökonomischer Hinsicht ein Kostenvorteil von mindestens 20 % im Vergleich zu konventionell hergestellten Flachbett-Sieben.

2.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Verbundes

Die Entwicklung von Verfahren, Anlagentechnologie und geeigneten Materialien zur Realisierung einer Laserstrukturierung von Schablonen und Sieben stellt eine große technologische Herausforderung dar. Um dieses ambitionierte Projektziel zu erreichen besteht folglich ein großer F&E Bedarf, welcher mit diesem Forschungsvorhaben adressiert wird. Im Folgenden werden die konkreten technologischen Herausforderungen detailliert erläutert.

Teilvorhaben 1: Evaluierung und Simulation der relevanten Parameter für laserstrukturierte Druckformen

Die Basis für die Konzeptionierung und Entwicklung von Prozessen und Anlagen zur Laserstrukturierung von Druckformen (Schablone, Sieb) ist ein genaues Verständnis der relevanten Einflussparameter. Die Abhängigkeit des Pastentransfers von bestimmten geometrischen und materialseitigen Eigenschaften der Druckform muss deshalb mithilfe geeigneter Charakterisierungsmethoden und Simulationsmodellen untersucht und die relevanten Zielparameter festgelegt werden. Hierzu sollen rheologische Messmethoden entwickelt werden, mit denen der Pastentransfer im Druckprozess im Detail studiert werden kann, um die Materialentwicklung für die zu entwickelnden Druckformmaterialien zu unterstützen.

Teilvorhaben 2: Materialentwicklung für laserstrukturierbare Sperrschichten

Für den konventionellen Siebdruck werden heutzutage polymerbasierte Sperrschichten (Emulsion) eingesetzt, welche in ihren Eigenschaften einerseits für die UV-Belichtung und Öffnung feinsten Strukturen, andererseits im Hinblick auf ein gutes Druckverhalten und eine lange Lebensdauer im Produktionsprozess optimiert sind. Im Rahmen des Forschungsvorhabens müssen neue Materialien für die Sperrschicht entwickelt werden, welche sich zum Einen gut mittels Laserverfahren strukturieren lassen und zum Anderen ein vergleichbar gutes oder sogar besseres Verhalten im Hinblick auf die Druckeigenschaften und die Lebensdauer im Prozess aufweisen. Weiterhin müssen Lösungen entwickelt werden, um die Sperrschicht auf die Trägerstruktur der Druckform (Metallfolie oder Siebgewebe) aufzubringen und dabei die erforderlichen mechanischen und qualitativen Eigenschaften zu erfüllen. Ein sehr vielversprechender Werkstoff für die Herstellung einer entsprechenden Deckschicht ist EPDM-Gummi (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk). Dieses Material besitzt sowohl im Hinblick auf mechanische als auch drucktechnische Anforderungen sehr vorteilhafte Eigenschaften (siehe Abb. 6) und lässt sich sehr gut mittels Laser strukturieren.

Teilvorhaben 3: Entwicklung von Laserprozessen für die Strukturierung von Schablonen und Sieben

Die Strukturierung von Metall-Folien für Schablonen bzw. der flexiblen Sperrschicht (Emulsion) erfordert die Auswahl einer geeigneten Strahlquellen und Laser-Parametern. Ziel ist es dabei, die Strukturen mit einer mindestens vergleichbaren Qualität zu konventionell strukturierten Schablonen/Sperrschichten zu realisieren. Hierfür müssen zunächst die Zielparameter im Hinblick auf Geometrie und Oberflächeneigenschaften der geöffneten Bereiche sowie der zu strukturierenden Materialien (Metallfolie, Sperrschicht) definiert werden. Anschließend muss im Rahmen von Versuchsreihen evaluiert werden, mit welcher Strahlquelle und welchen Laserparametern sich dies in Abhängigkeit vom zu strukturierenden Material optimal erreichen lassen kann.

Teilvorhaben 4: Evaluierung einer Anlage zur Laserstrukturierung von Sieben/Schablonen sowie Entwicklung geeigneter Software-Lösungen

Ein zentrales Ziel im Rahmen des Forschungsvorhabens ist die Evaluierung einer Demonstrator-Anlage des Projektpartners Pulsar für die Laser-Strukturierung von Sieben und Schablonen. Dabei stellt die Ausrichtung und Fixierung der zu strukturierenden Druckform während des Laserprozesses eine besondere Herausforderung dar. Die zu strukturierende Ebene muss für den Laser-Strukturierungsprozess exakt positioniert und die Planarität mit einer sehr geringen Toleranz sichergestellt werden. Die Anlage muss so konzipiert werden, dass Siebe und Schablonen in den relevanten Formaten manuell eingelegt und während des Prozesses mit der erforderlichen Präzision fixiert und ausgerichtet werden können. Weiterhin muss eine geeignete Strahlquelle ausgewählt und die Strahlführung für eine effiziente und qualitativ zufriedenstellende Strukturierung der Druckformen realisiert werden. Dabei sind neben qualitativen Aspekten der Strukturierung auch wirtschaftliche Gesichtspunkte (Zeitbedarf pro Sieb/Schablone) zu berücksichtigen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden seitens des Projektpartners Pulsar geeignete Software-Lösungen zur Steuerung der Anlage und der Prozesse entwickelt.

Teilvorhaben 5: Evaluierung der laserstrukturierten Druckformen für die Solarzellen-Metallisierung

Die mittels Laser strukturierten Schablonen- und Siebdruckformen müssen im Hinblick auf Druckergebnis (Qualität der Feinlinien-Metallisierung), Lebensdauer und Handling im Prozess gleichwertige oder bessere Ergebnisse im Vergleich zu konventionell hergestellten Druckformen aufweisen. Die mittels Laser strukturierten Druckformen müssen deshalb im Druckprozess evaluiert und mit geeigneten Referenzen (konventionelle Siebe/Schablonen) verglichen werden. Dies muss im Rahmen von Versuchsreihen zur Metallisierung von aktuellen Solarzellen wie z.B. PERC (Passivated Emitter and Rear Contact)-Solarzellen untersucht und verglichen werden. Ziel ist es dabei, die Kontaktfinger mit einer Breite $< 20 \mu\text{m}$ mit ausreichender Kontaktfingerhöhe und einer möglichst guten Homogenität zu realisieren.

3. PLANUNG UND ABLAUF

In diesem Abschnitt werden die Arbeitspakete des Projektes und ihre einzelnen Meilensteine (MS) aufgeschlüsselt, wie sie zu Beginn des Projektes definiert wurden. Im Laufe des Berichtes wird mehrmals Bezug auf diesen Abschnitt genommen, um die Erfüllung der einzelnen Meilensteine zu belegen. Des Weiteren wird auf den technischen Stand eingegangen – zu Projektbeginn und die Entwicklungen Dritter im Laufe des Projektes.

3.1 Arbeitsinhalte

AP 0 - Allgemeine Projektkoordination und -administration während der gesamten Projektlaufzeit

Neben der Steuerung und Überwachung des Projektverlaufs und der termingerechten Erbringung der geplanten Meilensteine und Ergebnisse, beinhaltet das Arbeitspaket auch die Erstellung und Sicherstellung der termingerechten Lieferung entsprechender Unterlagen und Projektberichte sowie die Kommunikation mit dem Projektträger und den Verbundprojektpartnern.

AP 1 - Verständnis und Optimierung des Transfers von hochgefüllten Suspensionen durch laserstrukturierte Schablonen und Siebe

Die Entwicklungsarbeiten in AP1 adressieren grundlegende Untersuchungen zur Optimierung der geometrischen und materialseitigen Eigenschaften von Sieb- und Schablonendruckformen.

AP 2 – Entwicklung von laserstrukturierbaren flexiblen Sperrschichten (Emulsion) für Schablonen und Siebe

Die Entwicklungsarbeiten in AP2 beinhalten die Entwicklung geeigneter Materialien sowie die Evaluierung von Herstellungs- und Verbindungstechnologien für flexible Sperrschichten.

AP 5 - Entwicklung von Prozessen zur Herstellung und Laserstrukturierung von Flachbett-Sieben auf Basis von Geweben

Fokus von AP5 ist die Evaluierung und Anwendung der Laserstrukturierung für gewebebasierte Siebe. Dies beinhaltet die Herstellung und Strukturierung entsprechender Siebe sowie die Evaluierung im Druckprozess.

AP 7 - Evaluierung von Material- und Druckeigenschaften laserstrukturierter Schablonen und Siebe

Im Rahmen von AP7 sollen die entwickelten Verfahren zur Laserstrukturierung von Schablonen und Sieben evaluiert und die Ergebnisse mit geeigneten Referenzen verglichen werden. Schwerpunkt ist dabei die Metallisierung von Silicium-Solarzellen.

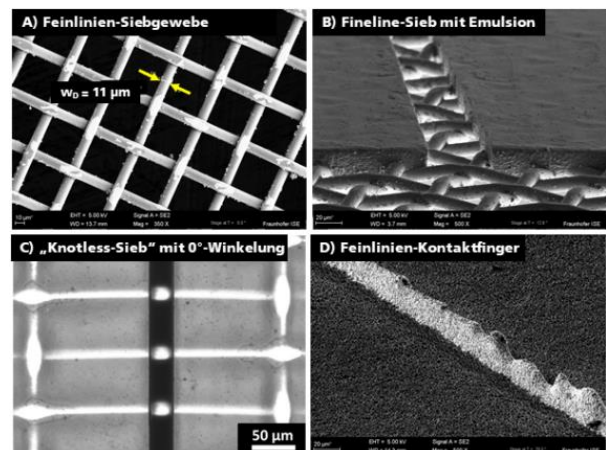
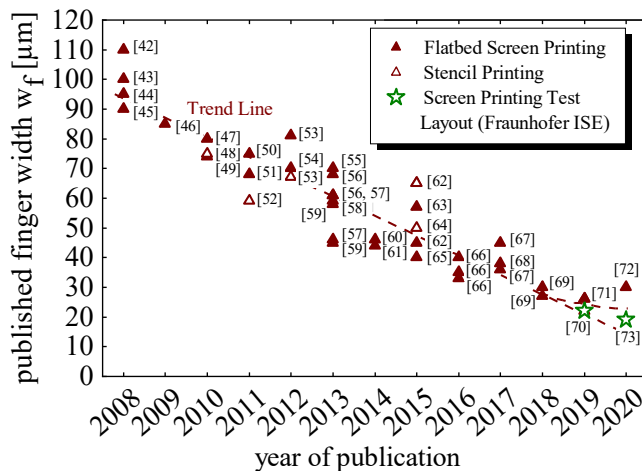
4. WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND ZU PROJEKTBEGINN

4.1 Stand von Wissenschaft und Technik

Metallisierung im Flachbettsiebdruck

Über 95 % aller weltweit produzierten Solarzellen basieren derzeit auf mono- oder multi-kristallinem Silicium (Si) [1]. Für das Jahr 2019 wird im Bereich der Si-Photovoltaik ein Zuwachs von 128 GWp prognostiziert [4], in den folgenden Jahren wird ein weiterer Zuwachs der weltweit installierten PV-Kapazität erwartet.

Si-Solarzellen weisen auf der Vorder- und Rückseite metallische Elektroden auf, um die erzeugten Ladungsträger abzuführen. Für die Metallisierung der Vorder- und Rückseite wird mit einem Marktanteil von ca. 98 % [1] nahezu ausschließlich das Flachbett-Siebdruckverfahren eingesetzt. Bei der Metallisierung werden metallhaltige Silber (Ag)- oder Aluminium (Al)-Pasten mit einer Rakel durch ein strukturiertes, partiell durch eine Emulsionsschicht maskiertes Siebgewebe oder alternativ durch eine strukturierte Metallschablone auf den Wafer übertragen.



Entwicklung der Kontaktfingerbreite im Siebdruck anhand publizierter Ergebnisse.

REM-Aufnahmen Feingewebe (A), Fineline-Sieb mit Emulsion (B), „Knotless-Sieb“ mit Kanal für Kontaktfinger (C) und gedruckter Fineline-Kontaktfinger (D)

Insbesondere die Vorderseitenmetallisierung ist dabei sehr anspruchsvoll, da ein Kontaktgitter mit 100-120 möglichst schmalen, jedoch gleichzeitig ausreichend leitfähigen und unterbrechungsfreien Kontaktfingern gedruckt werden muss. Da eine schmale Fingerbreite w_f im Hinblick auf eine geringe Abschattung der aktiven Zellfläche vorteilhaft ist, besteht von industrieller Seite ein großes Interesse an einer Reduktion der gedruckten Kontaktfingerbreite. Intensive Forschungsaktivitäten sowie eine Weiterentwicklung von Sieben, Pasten und Maschinenteknologie haben in den letzten Jahren zu einer drastischen Reduktion der Fingerbreite auf aktuell ca. 30-40 μm in der industriellen Massenproduktion geführt.

Eine weitere Reduktion der Fingerbreite ist zur Steigerung der Konversionseffizienz der Solarzelle sehr wünschenswert, aber in technologischer Hinsicht äußerst anspruchsvoll. Feinlinien-Kontakte unter einer Fingerbreite von 30 μm können praktisch nur mit Feinstgeweben mit sehr hoher Mesh-Zahl (z.B. 430 – 520 Drähte/inch) und spezieller Gewebe-Konfiguration (z.B. sogenannte „Knotless-Siebe“ mit 0°-Gewebewinkelung) realisiert werden [2]. Die Herstellung dieser Spezialsiebe ist jedoch aufwändig und mit entsprechend hohen Kosten bzw. Ausschuss verbunden.

Der überwiegende Anteil an Flachbett-Sieben wird in einem manuellen Verfahren unter Verwendung einer UV-härtenden Emulsionsschicht hergestellt. Dabei wird zunächst die Emulsionsschicht als Flüssig-Emulsion oder Kapillarfilm auf das vorgespannte und im Rahmen verklebte Siebgewebe aufgebracht. Anschließend wird die UV-reaktive Emulsionsschicht mit einem Schwarzweiß-Film selektiv belichtet. Die nicht-belichteten Bereiche werden schließlich mit Wasser ausgewaschen. Aufgrund der vielen manuellen Schritte ist dieser Prozess zum einen kostenintensiv und relativ fehleranfällig, zum anderen im Hinblick auf die Nachhaltigkeit ungünstig, da pro Sieb eine signifikante Menge an Wasser verbraucht wird, welches anschließend aufwändig entsorgt bzw. aufbereitet werden muss. Die Realisierung von feinsten Öffnungen (z.B. Kontaktfinger-Kanälen) mit hoher Qualität ist zudem für Fingerbreiten $< 30 \mu\text{m}$ sehr anspruchsvoll und nur mit hohem Aufwand und viel Expertise realisierbar.

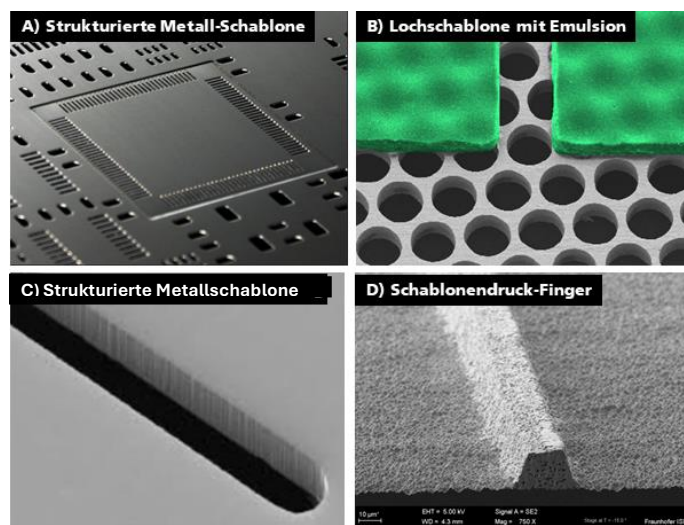
Metallisierung im Schablonendruck

Der sogenannte Schablonendruck (Stencil Printing) wird seit Jahrzehnten für verschiedene Anwendungen im technischen Druck und seit Mitte der 1990er-Jahre für die Metallisierung von Solarzellen als Alternative zum Siebdruck eingesetzt [5,6]. Die Druckform besteht dabei aus einer strukturierten Metallfolie (z.B. Edelstahl oder Nickel), die ggf. noch mit einer Emulsionsschicht beschichtet sein kann. Die Übertragung der Paste findet mit Hilfe von Metallrakeln statt. Die Strukturierung der Metallfolie kann durch nasschemische Verfahren, Electroforming oder Laser stattfinden. Für die Metallisierung von Solarzellen mit feinen Kontaktstrukturen haben Schablonen im Vergleich zum gewebebasierten Siebdruck gewisse Vorteile im Hinblick auf die Qualität der gedruckten Kontaktfinger.

Im Gegensatz klassischen, gewebebasierten Siebdruck sind die geöffneten Bereiche einer Schablone komplett oder größtenteils offen, so dass die Paste ungehindert übertragen werden kann. Beim klassischen Siebdruckverfahren wird die Geometrie der gedruckten Strukturen hingegen durch die Drähte im Siebkanal beeinflusst, was in der Regel zu einer regelmäßigen Schwankung entlang der Strukturen führen (sogenannte „Mesh Marks“). Im Schablonendruck realisierte Kontakte weisen daher in der Regel eine sehr homogene Form ohne nennenswerte Schwankungen auf. Werden lediglich Metallfolien-Schablonen verwendet, kann die mangelnde

Abdichtung zwischen Schablone und Waferoberfläche allerdings zu einem seitlichen Ausbluten der Paste am Rand der Kontaktfinger führen. Ideal ist deshalb der Einsatz einer Metallschablone mit einer zusätzlichen flexiblen Emulsionsschicht, welche eine optimale seitliche Abdichtung der Kanalkanten gewährleistet. Bisher können mit Schablonen jedoch keine Fingerbreiten kleiner 30µm realisiert werden. Ein weiterer Nachteil von klassischen Schablonen ist die Tatsache, dass Kontaktfinger und Busbars stets in zwei Druckschritten bzw. mit getrennten Druckformen realisiert werden müssen, da diese Strukturen im 90°-Winkel zueinander angeordnet sind und daher nicht in einer gemeinsamen Schablonen-Druckform vereint werden können.

Einen Sonderfall stellen metallbasierte Lochschablonen mit Emulsion dar, die von der Firma NB Technologies mit Patenten (CN, TW, DE, US) geschützt sind und unter der Bezeichnung sunstence® uni® vertrieben werden. Die Lochfolie erfüllt dabei die Funktion des Siebgewebes, weist jedoch einen hohen Öffnungsgrad und ein besseres Pasten-

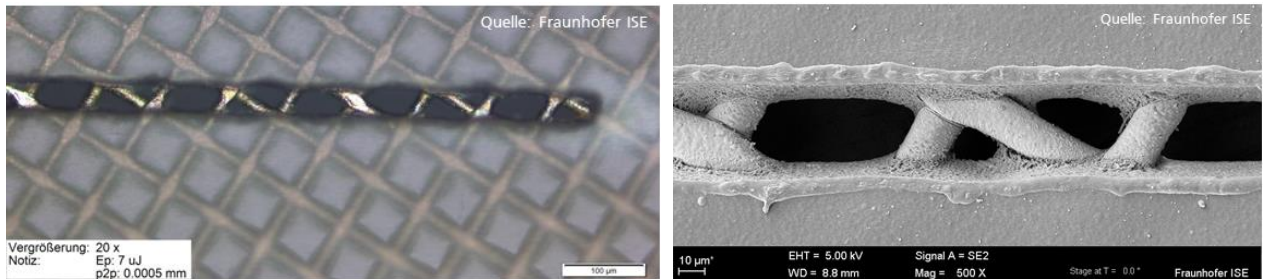


Metall-Schablone für Lotpaste (A), Lochschablone mit Emulsion (B), Detailaufnahme einer strukturierten Metallschablone (C), gedruckter Kontaktfinger im Schablonendruck (D)

Transferverhalten auf. Die wichtigste Eigenschaft ist dabei die Verzugsfreiheit, so dass Multidruckanwendung mit hoher Anforderung an Justagepräzision adressiert werden. Die Strukturierung wird über eine vollflächig aufgebrachte und mittels UV-Belichtung/Entwicklung selektiv geöffnete Emulsionssicht realisiert, die gleichzeitig zu einer guten Abdichtung der Kanalkanten führt. Die Herstellung dieser Druckformen ist jedoch aufgrund des aufwändigen Strukturierungsprozesses der Lochfolie (nasschemischer Prozess) sehr teuer.

4.2 Neuheit und Attraktivität des Lösungsansatzes

Der zentrale Fokus des Forschungsvorhabens ist der Einsatz von Lasertechnologien für die Strukturierung der Sieb- bzw. Schablonendruckform. Für die Anwendung im Bereich Schablone soll zum einen die Metallfolie selbst, zum anderen die flexible Sperrschicht (Emulsion) mit Laserverfahren direkt geöffnet werden. Idealerweise soll die Öffnung beider Schichten in einem Laser-Strukturierungsprozess realisiert werden. Für gewebebasierte Siebe soll die flexible Sperrschicht direkt im Sieb geöffnet werden, ohne das Drahtgewebe selbst zu beeinflussen. Eine erste Machbarkeitsstudie zur Laseröffnung der Emulsion eines konventionell hergestellten Siebes am Fraunhofer ISE zeigte vielversprechende Ergebnisse (s. Abb. 5).



Mikroskop- und REM-Aufnahme im Rahmen der Machbarkeitsstudie zur Laseröffnung einer konventionell hergestellten Emulsionsschicht auf einem Flachbett-Sieb (Quelle: FhG ISE).

Der Einsatz von Laserverfahren zur Öffnung der Metallfolie bzw. der flexiblen Sperrschicht bietet dabei verschiedene Vorteile im Vergleich zum klassischen Prozess (UV-Belichtung und Auswaschen):

- Signifikante Reduktion der Fertigungszeit und damit der Fertigungskosten pro Sieb für gewebebasierte Flachbett-Siebe, da die Prozessschritte Filmherstellung, Belichtung, Auswaschen und Trocknen durch die Laser-Direktstrukturierung ersetzt werden können
- Wegfall des aufwändigen Alignierungsprozesses der Sieböffnungen (Finger-Kanäle) zum Gewebe für 0°-Gewebe (Knotless-Siebe) durch hochpräzise kamerabasierte Laserführung entlang der gewünschten Position im Gewebe
- Wegfall des Auswaschprozesses, d.h. Einsparung der Kosten für Wasser, Abwasserentsorgung und erforderliche Infrastruktur sowie Verbesserung der Nachhaltigkeit im Hinblick auf Wasser- und Energieverbrauch
- Deutliche Kostenreduktion bei der Herstellung von Metallfolien-Schablonen, da die sehr aufwändige nasschemische Strukturierung (z.B. Lochfolie) durch die Laser-Strukturierung ersetzt werden kann
- Potenzial zur weiteren Kostensenkung durch Strukturierung von Metallfolien-Schablonen mit flexibler Sperrschicht (Emulsion) in einem Laser-Prozessschritt
- Optimierung der geometrischen Form der Druckkanäle mittels Laser basierend auf den Ergebnissen von Strömungssimulationen und damit Potenzial zur Verbesserung der gedruckten Strukturen insbesondere für die Feinlinien-Metallisierung.

5. ZUSAMMENARBEIT MIT DRITTEN

Das Projekt wurde im Konsortium mit Partnern mit sich gegenseitig ergänzenden Kompetenzen und Aufgaben durchgeführt, die entsprechende Synergien erschließen, ohne die das Erreichen des Gesamtziels des Vorhabens so nicht möglich gewesen wäre. Eine Kooperation mit Dritten ist innerhalb des Projekts war nicht vorgesehen.

6. ERGEBNISSE

AP 0 Projektkoordination

Im Berichtszeitraum wurden mehrere Arbeitstreffen mit den Projektpartnern per Videokonferenz durchgeführt, um sich über den Stand der Arbeiten auszutauschen. Im Dezember 2024 trafen sich die Projektpartner noch einmal am Fraunhofer ISE zum voraussichtlich letzten Arbeitstreffen des Projektes. Vorherige Treffen fanden am Fraunhofer Institut und in den Räumlichkeiten des Projektpartners KIWO statt. Bei dem letzten Treffen der Projektpartner ergab sich für alle Projektpartner die Gelegenheit die im Rahmen des Projekts am Fraunhofer Insitut für Solare Energiesysteme neu aufgebaute Laseranlage des Projektpartners Pulsar zum ersten Mal zu besichtigen und vorgeführt zu bekommen.

AP 1.4 Simulation und Auslegung des optimalen Designs für laserstrukturierte Siebe und Schablonen

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden die gewünschten Parameter für die im Rahmen des Projektes herzustellenden Schablonen diskutiert und vereinbart. Die Anforderungen an Siebdruckschablonen für die Metallisierung wurden durch Vergleich mit am Markt verfügbaren Schablonen ermittelt und intensiv mit den Projektpartnern diskutiert.

Derzeit wird für die Frontmetallisierung von Solarzellen ein Metallgewebe des Typs SD 430/13 (430 Fäden pro Zoll, 13 µm Fadendurchmesser) eingesetzt. Dieses Gewebe wird auf 17 µm kalandriert. Dieser Gewebetyp soll auch weiterhin für Schablonen im Projekt verwendet werden. Die feinsten auf dem Markt erhältlichen Gewebe werden mit einer Fadenstärke von 11 µm gewebt. Im Projektverlauf wurde verstärkt auf Gewebe mit 11 µm Fadenstärke gesetzt, um die tatsächlichen Anforderungen der Anwenderindustrie im Projekt besser abbilden zu können.

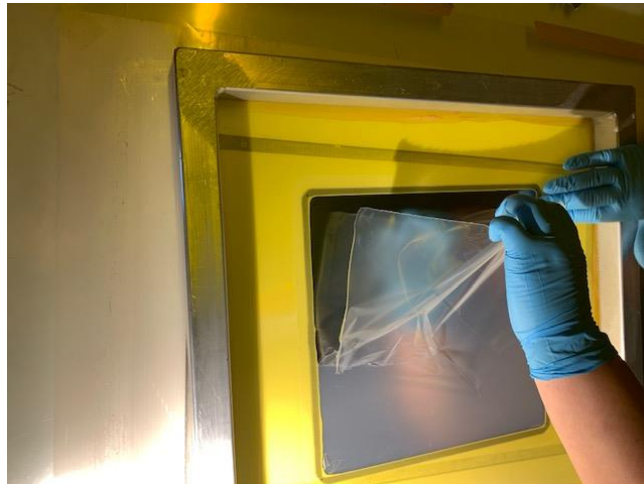
Die Belichtung der im Siebdruck verwendeten Emulsionen erfolgt heute konventionell mit UV-Licht oder mittels Laserbelichtung. Auch laserstrukturierte Druckformen, d.h. mittels

Laser geöffnete Siebe, sind zunehmend auf dem Markt, vor allem in Asien. Diese Siebe verwenden in der Regel eine Polyimidfolie als Barrierschicht, die mittels Schmelzkleber aufgebracht wird.

Die im Projekt verwendeten neuartigen Schichten (Laserlacke) unterscheiden sich chemisch und in der Anwendung von konventionellen Siebdruckschichten und werden anders verarbeitet.

AP 1.5 Erarbeitung von Konzepten zur Auslegung und Herstellung laserstrukturierter Schablonen und Siebe

Der Projektpartner NB Technologies stellt Edelstahlfolien mit einer Dicke von ca. 12 µm für die Schablonenherstellung zur Verfügung. Diese Folien haben sich letztlich als vielversprechend erwiesen und werden als Ansatz zur Herstellung laserstrukturierter Schablonen weiterverfolgt. Im Rahmen des Projektes wurden unter anderem Versuche mit weiteren Edelstahlfolien (Edelstahl 1.4310, 20 µm Dicke) und neuartigen, sehr dünnen Titanfolien (6 µm Dicke) durchgeführt. Die Versuche mit diesen Edelstahlfolien und Titanfolien wurden im Laufe des Projektes nicht mehr durchgeführt, da diese Folien sich als ungeeignet erwiesen. Die Dickeren Edelstahlfolien zeigten gegenüber den dünneren Folien deutliche Nachteile bei der Öffnung mittels Laserstrahl. Die Titanfolien ließen sich gar nicht zielführend mittels Laser bearbeiten. Außerdem konnten diese Folien im Rahmen des Projekts auch nicht in der letztendlich in der Anwendung benötigten Größe zur Verfügung gestellt werden. Dünne Titanfolien konnten vom Projektpartner NB Technologies lediglich als schmale Bandware zur Verfügung gestellt werden.

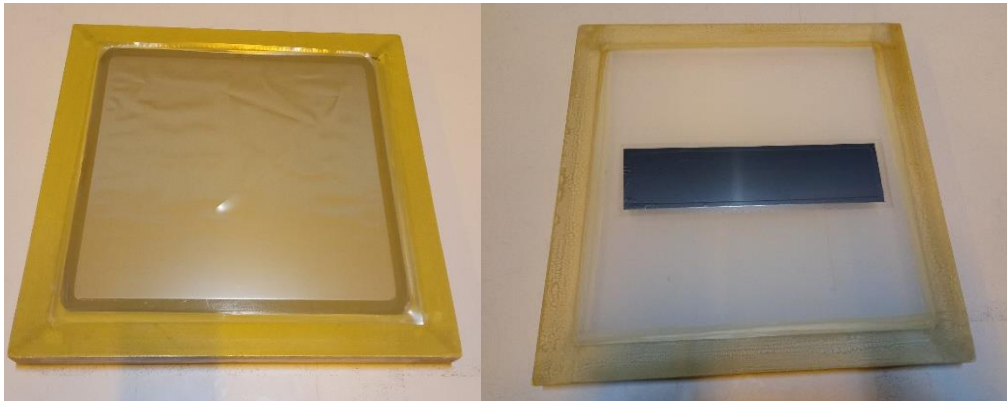


Die Abbildung zeigt die in auf einen Rahmen gespanntes Polyestergewebe (gelb) eingeschweißte, bearbeitete Metallfolie des Projektpartners NBT. Sie wird von der beim Einschweißen verwendeten Folie befreit. Diese Siebe werden Fraunhofer ISE für direkte Lasertests an der Metallfolie und beschichtet mit laserstrukturierbarer Schicht von Kissel und Wolf zur Verfügung gestellt.

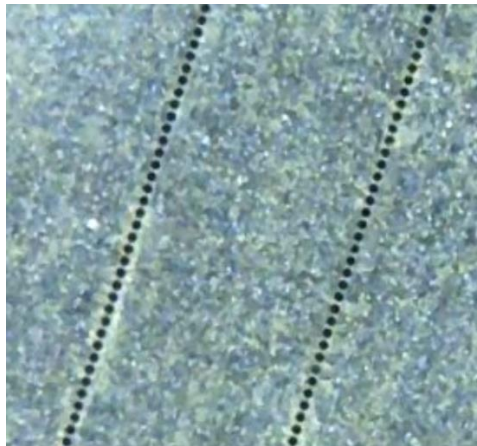
Die Firma Hans Frintrup GmbH hat ein Verfahren zum Aufbringen der Edelstahlfolien auf Drucksubstrat entwickelt und erfolgreich etabliert. Die Öffnung der Folien mittels Laser auf der

neu installierten Anlage am Fraunhofer ISE und die Funktionalisierung der Folien mit einer Barrierschicht wurden im Rahmen des Projekt umfassend untersucht.

Für Versuche zur Laserstrukturierbarkeit der Emulsion von Kissel und Wolf auf konventionellen Sieben wurden für das Fraunhofer ISE Solarsiebe mit SD+ 67/25 Edstahlgewebe hergestellt (siehe Abb. 2). Dieses Gewebe boten für erste Versuche einen erheblichen Kostenvorteil gegenüber dem für spätere Siebe geplanten, sehr feinen 30/13- und 520/11-Edelstahl-Geweben, die heute in der Anwendung eine immer größere Bedeutung erfahren.



*Links: Konventionelles Solarsieb mit SD+ 67/25 Edstahlgewebe für die Beschichtung mit Emulsion.
Rechts: Titanfolie aufgeklebt auf gespanntes Polyestergewebe.*



Mit Laser geöffnete Punkte auf einer Stahlfolie sind Form von Linien angeordnet.

AP 2.1 Spezifikation der relevanten Materialeigenschaften im Hinblick auf Laserstrukturierung, Druckeigenschaften und Lebensdauer

Zusammen mit den Partnern im Projekt wurden die relevanten Eigenschaften der einzusetzenden Materialien abgestimmt.

AP 2.2 Entwicklung von Verfahren zur Realisierung sehr dünner Sperrschichten (10-30 µm) auf Basis laserstrukturierbarer Emulsionen

Siebdruckträger sowohl mit 12 µm Edelstahlfolie als auch mit hochfeinen Siebdruck-Edelstahlgeweben 430/13 und 480/11 wurden den Projektpartnern von der Hans Frintrup GmbH zum Öffnen feiner Druckkanäle mittels Laser zur Verfügung gestellt.

Der in Zusammenarbeit mit Kissel und Wolf ausgewählte Laserlack wurde hinsichtlich seiner Aufbringung als Barrierschicht sowohl auf den ultrafeinen Edelstahlgeweben vom Typ (430/13) und (520/11) als auch auf den vom Projektpartner NB zur Verfügung gestellten dünnen Edelstahlfolien untersucht und die Aufbringungsverfahren in enger Zusammenarbeit mit Kissel und Wolf optimiert.

Nachdem die Mitarbeiter des Fraunhofer ISE Dickschichtschwankungen des Laserlacks als problematisch für den nachfolgenden Laserprozess beim gleichzeitigen Öffnen von Schicht und Edelstahlfolie identifiziert hatten, konnte der Auftrag des Laserlacks auf die Folien durch innovative Methoden entscheidend verbessert werden. Dickenschwankungen auf den Folien können so minimiert werden.

Die Methode, die zur Applikation der Schichten auf Edelstahlfolien sehr gut geeignet ist, ist nicht ohne weiteres auf die Edelstahlgewebe für Siebdruckformen übertragbar. Bei diesen treten die Öffnungsprobleme der Schicht durch den Laser jedoch nicht in dem gleichen Maße auf, wie bei Edelstahlfolien, da die Schicht in der offenen Masche der Siebe problemlos geöffnet werden kann.

Auch die Verfahren zur Polymerisation des auf die Folie aufgetragenen Laserlacks konnten weiter optimiert werden. Dies gilt sowohl für die Polymerisation im Labormaßstab als auch für die Herstellung von Druckformen in einer Produktionsumgebung. So konnte das Auftreten einer welligen Verformung der Folien durch die Wärmeeinwirkung bei der Polymerisation minimiert werden.

Lediglich die Oberfläche der polymerisierten Schichten weist in der elektronenmikroskopischen Betrachtung noch Unebenheiten auf, die jedoch auf das Druckbild der mit der Siebdruckform gedruckten Finger keinen negativen Einfluss zeigt.

AP 2.3 Evaluierung von Verbindungstechnologien zur dauerhaften Verbindung mit dem Trägermaterial (Metallfolie, Siebgewebe)

Versuche zur Beschichtung von Siebdruckgeweben mit laserstrukturierbaren Lacken wurden erfolgreich durchgeführt. Der Laserlack kann direkt als Schicht oder als Folie aufgetragen werden, wobei der Auftrag als Folie bessere Rz-Werte auf der Sieb- und Rakelseite ergibt. Insgesamt zeigen die laserstrukturierbaren Lacke eine deutlich bessere Kontrolle über die EOM der Schicht im Vergleich zu kommerziell erhältlichen PI-Folien.

Zusätzlich wurden Edelstahlfolien mit den neuen Laserlacken beschichtet, um diese für Laserparameter-tests zur Verfügung zu haben. Die Verbindung zwischen der Schicht und den Stahlfolien ist durch eine einfache Beschichtung der Folien analog zur Beschichtung konventioneller Siebdruckschichten möglich. Das Aufbringen der Schicht auf die Folien

verspricht eine bessere Abdichtung der Druckform auf dem Bedruckstoff. Dadurch können feinere Drucke erzielt werden als bei Folien ohne Lackauftrag.

Ein ungleichmäßiger Lackaufbau auf dem Bedruckstoff kann den Laseröffnungsprozess negativ beeinflussen. Kommerziell erhältliche PI-Folien weisen bereits eine sehr gute Dickenhomogenität auf. Diese Qualität muss und kann auch der Laserlack erreichen, wenn er mit im Siebdruck etablierten Methoden auf das Gewebe aufgebracht wird.

Für Metallfolien konnte eine Methode entwickelt werden, die einen sehr gleichmäßigen Lackauftrag ermöglicht.

AP 2.4 Auswahl und Evaluierung geeigneter Werkstoffe für Sperrschichten (Emulsionen, EPDM)

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde entschieden, dass weitere Tests hauptsächlich mit den Laserlacken des assoziierten Partners Kiwo durchgeführt werden sollten. Dieser ähnelt in seinen Eigenschaften den schon am Markt verfügbaren Alternativen für laserstrukturierbare Materialien (Hotmelt PI Folien) und bietet hervorragende Möglichkeiten zur Verarbeitung. PI Folien sind hochbeständig gegen die im Druckprozess eingesetzten Chemikalien und stabil bezüglich der mechanischen Belastungen. Ein Einsatz der PI Folien ermöglicht höhere Standzeiten der Druckformen als konventionell hergestellte Siebe.

Mit diesem Material beschichtete Siebe und Folien wurden den Partnern von uns zur Verfügung gestellt. Die Entwicklung einer Folie aus dem Material soll in Zukunft noch untersucht werden. Das Material lässt sich auch hervorragend als Kombination aus Folie und Lack verarbeiten. Bei Kombination von PI und Lack erhält man eine im Projekt sogenannte „hybrid barrier layer“. Hiervon verspricht man sich eine höhere Druckqualität und somit einen effizienteren Druckprozess.

AP 2.5 Herstellung und Evaluierung von Druckformen mit laserstrukturierter Sperrschicht

Druckformen für Versuche zur Einstellung der Laserparameter können entsprechend den Wünschen der Projektpartner hergestellt werden.

Druckformen für den Siebdruck aus mit Laserlack beschichtetem hochfeinem Gewebe zeigen aufgrund der höheren Flexibilität der Schicht Vorteile im Hinblick auf die seitliche Abdichtung beim Druck feiner Linien gegenüber den Stahlschablonen.

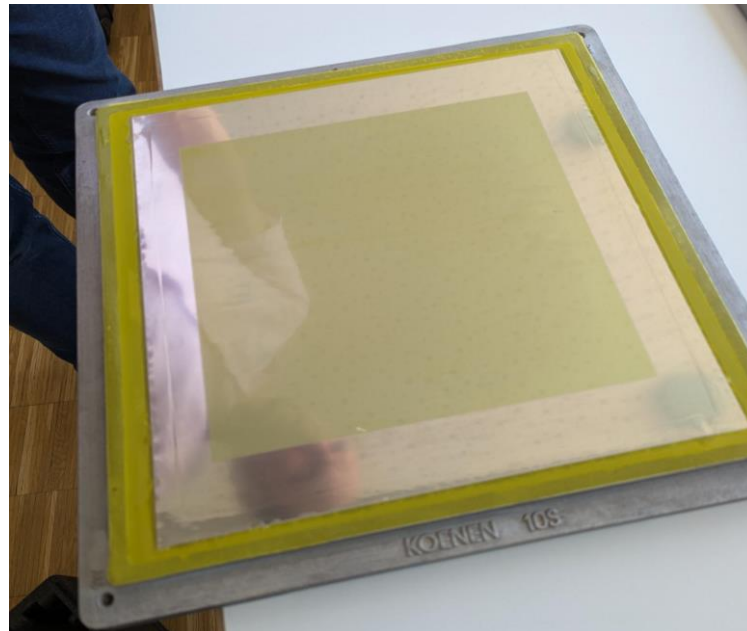
Druckformen mit Edelstahlfolien lassen sich mit einem laserstrukturierbarem Lack beschichten inkl. anschließender Polymerisierung des Lacks auf der Edelstahlfolie.

Die Öffnung der Schichten mittels Laserprozess ist bis in den Bereich kleinster Öffnungen von 20 µm und kleiner möglich.

AP 2.7 Entwicklung und Evaluation von Materialien zur funktionalen Beschichtung von Druckformen bzw der Speerschichten

Der Laserlack der Kissel und Wolf GmbH wird für die im Projekt verwendeten Druckformen verwendet und in der Anwendung immer weiter optimiert. Bezüglich der Möglichkeiten zur Laseröffnung zeigt dieses Material hervorragende Eigenschaften sowohl in den eigenen Versuchen der Hans Frintrup GmbH, den Versuchen am Fraunhofer ISE und bei Pulsar Photonics. Getestet wurden auch Kombinationen aus kommerziell erhältlichen Folien und dem neuen Laserlack.

Kommerziell erhältliche Hotmelt-Polyimid Folien, die heute schon zur Herstellung laserstrukturierbarer Druckformen in Gebrauch sind, stellen den Benchmark für den Laserlack dar, der im Rahmen des Projekts verwendet wird.



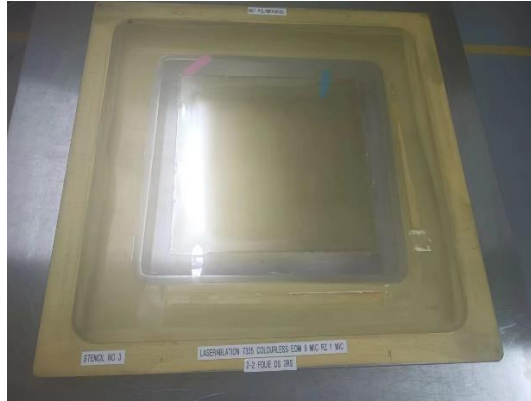
Druckschablone aus einer Edelstahlfolie die mit dem laserstrukturierbaren Lack beschichtet wurde. Der Lack ist in der Mitte der Folie als gelbes Viereck auf der metallischen Folie zu erkennen.

AP 5.1 Selektion der technologischen und prozesseitigen Anforderungen für Flachbettsiebe mit flexibler Sperrschicht

Die Spezifikation der Anforderungen für die Laserstrukturierung von Flachbettsieben mit der im Projekt erprobten flexiblen Sperrschicht wurden mit den Projektpartnern abgestimmt.

AP 5.2 Herstellung von Sieben unter Verwendung der in AP2 entwickelten Materialien und Verbindungstechnologien

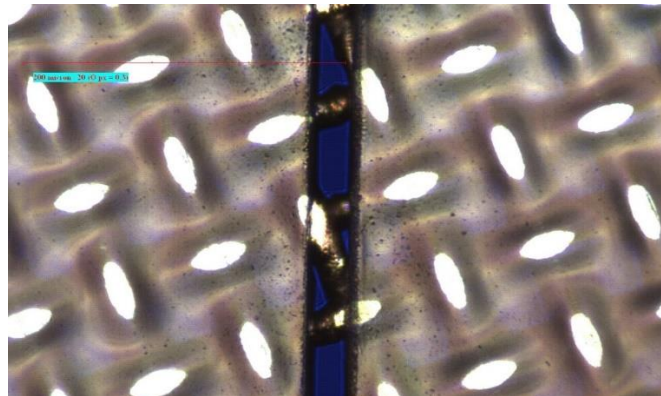
Siebe mit feinsten Edelstahlfäden mit 13 μm und 11 μm Fadendurchmesser können hergestellt und mit dem laserstrukturierbaren Lack beschichtet werden. Diese Siebe können am Fraunhofer ISE auf der neuen Laseranlage geöffnet und mit einem Zelllayout versehen werden.



Hochmoderne Siebdruckform für den Siebdruck von Solarzellen mit einem laserstrukturierbaren Lack auf Edelstahlgewebe mit 13 μm Fäden. Die Siebdruckform ist noch nicht mit einem Laser geöffnet worden.

AP 5.3 Evaluierung der optimalen Prozessbedingungen und Laser-Parameter zur selektiven Laser-Öffnung der flexiblen Sperrschicht

Auf der in Betrieb genommenen Laseranlage des Projektpartners Pulsar am Fraunhofer ISE können die optimalen Prozessbedingungen und Laserparameter zur selektiven Laseröffnung der Schichten auf Siebdruckformen und Edelstahlschablonen getestet werden. Hierzu stehen viele Erfahrungen aus Vorversuchen des Fraunhofer ISE und der Hans Frintrup GmbH zur Verfügung.



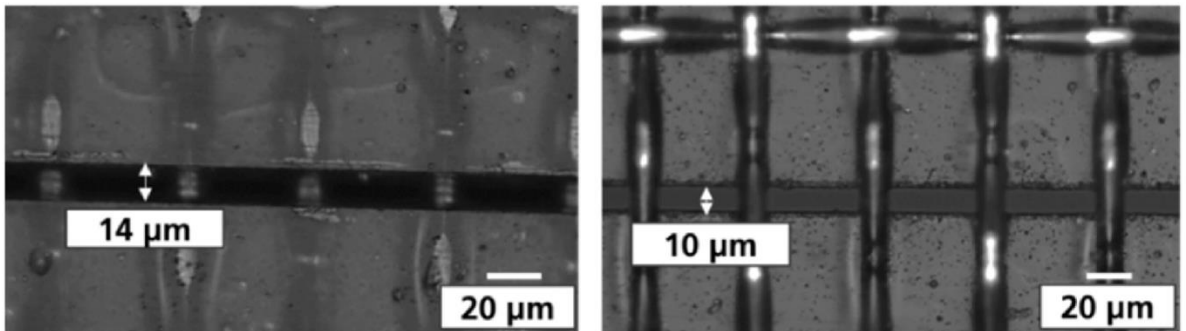
Mittels Laser geöffnete Schicht auf einer Testschablone aus Edelmetallgewebe mit 13 μm Fadenstärke. Die Öffnung in der Schicht beträgt ca. 30 μm .

Tatsächlich konnten auf der neuen Anlage schnell vielversprechende Ergebnisse erzielt werden.

AP 5.4 Herstellung von laserstrukturierten Sieben sowie Vergleich mit konventionellen Referenz-Sieben

Die Hans Frintrup GmbH hat mittlerweile umfangreiche Erfahrungen in der Herstellung laserstrukturierter Siebe sammeln können.

Auch im Rahmen des Projekts können mit der in Betrieb genommenen Laseranlage am Fraunhofer ISE nun laserstrukturierte Siebe hergestellt werden. Im Projekt wurden erfolgreich Siebe mit modernsten hochfeinen Geweben (520/11) mit 11 μm Edelstahlädern hergestellt. Die Siebe waren mit PI und dem neuen, im Projekt erprobten Lack beschichtet. Erste Versuche zeigten, dass Öffnungsbreiten kleiner 20 μm hierbei erreicht werden können. Kleinere Öffnungen sollten mit der Anlage ohne weiteres möglich sein. Eine Öffnung von lediglich 15 μm wird angestrebt, um im Druck Linien von 20 μm oder kleiner zu erreichen. Öffnungen mit unter 15 μm konnten schon erreicht werden.



Knotenfreie Öffnungen in der beschichteten Siebdruckform mit einer Öffnung von weniger als 15 μm . Die Öffnung zeigt noch einen deutlichen Taper Effekt. Links: 14 μm Öffnung auf der Druckseite der Druckform. Rechts: 10 μm Öffnung auf der Rakelseite der Druckform.[8]

Die Laserstrukturierung eines Siebes dauert nur etwa 10 Minuten auf der im Rahmen des Projekts errichteten Anlage.

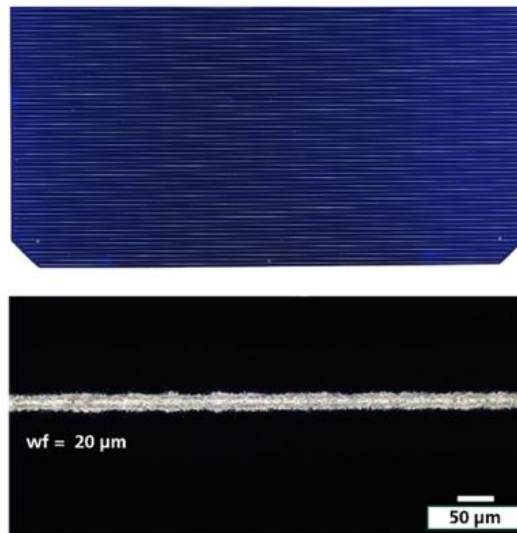
AP 7.1 Evaluierung und Optimierung der entwickelten laserstrukturierten Schablonen und Siebe

Das hybride Sperrschichtmaterial bietet eine vielversprechende Alternative zur herkömmlichen PI-Schicht. Es ermöglicht flexible Anpassungen im Herstellungsprozess und zeigt vergleichbare Druckergebnisse. Die Studie legt den Grundstein für weitere Optimierungen, um Fingerbreiten unter $15\ \mu\text{m}$ zu erreichen und den Silberverbrauch weiter zu senken.

AP 7.2: Herstellung und Evaluierung von Si-Solarzellen mit laserstrukt. Schablonen-/Siebtechnologien, Vergleich mit Referenz-Zellen

Si-Solarzellen wurden im Rahmen des Projekts hergestellt und Testdrucke durchgeführt. Die Laserstrukturierung des Prototypsiefs war erfolgreich und dauerte nur etwa 10 Minuten.

Die Öffnungen im Sieb zeigen weiterhin einen Taper Effekt, der bei mit einem Laser geöffneten Schichten auch schon in den vorarbeiten zu diesem Projekt beobachtet werden konnte. Die Öffnungen bleiben somit leicht konisch. Taper Effekt bedeutet, dass die Druckform auf der Druckseite eine größere Öffnung besitzt als auf der Rakelseite der Druckform. Auf der Druckseite tritt der Strahl beim Öffnen der Schicht ein und auf der Rakelseite tritt der Strahl wieder aus. Ein nennenswerter Einfluss dieses Taper Effekts auf die Form der gedruckten Silber Finger konnte jedoch nicht festgestellt werden. Gedruckte Finger lagen bei ca. $21\text{-}23\ \mu\text{m}$. Der Silberauftrag betrug etwa $9\ \text{mg}$ pro Zelle – ein niedriger Wert, der zur Ressourcenschonung beiträgt.



Oben: Mit Siebdruckformen aus dem Projekt gedruckte Solarzellen. Unten: mikroskopische Aufnahme eines gedruckten Silberfingers mit einer Weite von ca. $20\ \mu\text{m}$ [8].

Die Druckqualität der im Rahmen des Projekts hergestellten Druckformen war bei den gedruckten Zellen gut und vergleichbar mit Referenzzellen die mit kommerziellen Sieben gedruckt wurden.

7. FORTGESCHRIEBENER VERWERTUNGSPLAN

7.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Für die Hans Frintrup GmbH besteht die Möglichkeit durch den Einsatz kostengünstiger Verfahren zur Laserstrukturierung von Sieben substantielle Marktanteile im Bereich der PV-Siebe gewinnen. Weiterhin ist ein Ausbau von Marktanteilen bzw. die Erschließung neuer Märkte für Hochpräzisions-Siebe möglich. Diese positiven Effekte führen zu einem Vorteil auf dem Markt und einem höheren Umsatz.

Durch die Gewinnung zusätzlicher Marktanteile sowie die Erschließung neuer Märkte können Arbeitsplätze gesichert und Kompetenzen aufgebaut werden, welche auch nach der Projektlaufzeit für weitere Industriekunden sowie für Produkte und Märkte über die Photovoltaik hinaus interessant sind. Dies verbessert die Wettbewerbssituation.

Es besteht die Chance, signifikante Marktanteile bei der Fertigung von Sieben und Schablonen, welche in den vergangenen Jahren nach China abgewandert sind, wieder nach Deutschland zurückzuholen.

Durch den breiteren Einsatz der Laserstrukturierung besteht die Möglichkeit konventionelle und die Umwelt belastendere chemische Prozessschritte abzulösen und so, neben der Kostenreduktion, einen Betrag für nachhaltigeres Wirtschaften zu leisten.

7.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Mit der Entwicklung der neuen Herstellungstechnologie mittels neuer Sperrschichten und Laserstrukturierung wird neues Wissen geschaffen. Die Hans Frintrup GmbH kann dadurch zukunftsweisende, konkurrenzfähige Produkte am Markt anbieten. Erst durch diese Erweiterung kann die Hans Frintrup GmbH an der Marktentwicklung teilnehmen. Die Aktive Einbringung der Aktivitäten und Vertiefung der Beziehung zur Forschungs- und Marktteilnehmern fördert künftige Vorhaben, Projekte und hilft am Puls der Zeit zu bleiben.

7.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Hans Frintrup GmbH plant die Forschungsergebnisse im In- und Ausland auf Messen im Bereich Photovoltaik und gedruckte Elektronik zu präsentieren. Das Projekt befähigt Frintrup mit den Ergebnissen Siebdruckschablonen für Demonstrationen herzustellen. Weltweit gibt es sowohl im technischen als auch im grafischen Druck zahlreiche Endverwender von Schablonen und Sieben, die an einer Anwendung der entwickelten Technologien Interesse haben könnten. Diese potenziellen Verwerter werden in Abstimmung mit dem Projektkonsortium nach Ende des Projekts kontaktiert.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] ITRPV, International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), 10th ed. (2019).
- [2] A. Lorenz, M. Linse, H. Frintrup, M. Jeitler, A. Mette, M. Lehner, R. Greutmann, H. Brocker, M. König, D. Erath, F. Clement, Screen Printed Thick Film Metallization of Silicon Solar Cells - Recent Developments and Future Perspectives, in: Proc. of the 35th Photovoltaic Solar Energy Conference (EUPVSEC). 24-28 September, Brussels, Belgium, pp. 819–824 (2018).
- [3] J.C. Mankins, Technology Readiness Level (1995).
- [4] PV Magazine, Global cumulative PV capacity may reach 1.3 TW in 2023, SolarPower Europe says, (2019). <https://www.pv-magazine.com/2019/05/14/global-cumulative-pv-capacity-may-reach-1-3-tw-in-2023-solarpower-europe-says/> [accessed 21 August 2019].
- [5] H.H.C. de Moor, Fine-Line Screen Printing For Silicon Solar Cells, in: 6th workshop on the Role of Impurities and Defects in Silicon Device Processing, Snowmass, Colorado, pp. 154–170 (1996).
- [6] H.H.C. de Moor, J. Hoornstra, A.W. Weeber, A.R. Burgers, W.C. Sinke, Printing High and Fine Metal Lines using Stencils, in: Proceedings of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference (EPSEC). 30th June - 4th July, Barcelona, pp. 404–407 (1997).
- [7] Solar Power Europe, Global Market Outlook for Solar Power 2019 - 2023 (2019).
- [8] Aathira Krishnadas Nair et al., Evaluation of an innovative liquid barrier layer in laser-structured screens for enhanced solar cell metallization, in: Solar Energy Materials and Solar Cells, 290, 113732

LISTE DER VERÖFFENTLICHUNGEN

Aathira Krishnadas Nair et al., Evaluation of an innovative liquid barrier layer in laser-structured screens for enhanced solar cell metallization, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 290, 15 September 2025, 113732

<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113732>