

Schlussbericht

zur Bekanntmachung

Fördermaßnahme:

Anwendungsorientierte nichtnukleare FuE im
7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

Förderbereich:

Photovoltaik

Verbundname:

Entwicklung von Technologien und Prozessen zur
Laserstrukturierung von Schablonen und Sieben zur
Realisierung von Strukturbreiten kleiner 20µm

Akronym: LASER2Screen

Teilvorhaben:

LASER Bearbeitung folienbasierter Siebdruckträger

Projektlaufzeit:

02.2022 bis 04.2025

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit
Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung
unter dem Förderkennzeichen FKZ 03EE1100A gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt beim Autor.

Autoren: Klaus Froehner, Mike Becker

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Übersichtsangaben.....	3
2	Kurze Darstellung	3
2.1	Aufgabenstellung	3
2.2	Voraussetzungen	4
2.3	Planung und Ablauf.....	5
2.3.1	Meilensteine	5
2.3.2	Balkenplan	6
2.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	6
2.5	Zusammenarbeit mit den Projektpartnern.....	7
3	Eingehende Darstellung	8
3.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	8
3.1.1	Spezifikation der technologischen und prozesseitigen Anforderungen für die Laserstrukturierung von Metallfolien-Schablonen.....	8
3.1.2	AP 2.2: Entwicklung von Verfahren zur Realisierung sehr dünner Sperrschichten (10-30 µm) auf Basis laserstrukturierbarer Emulsionen	14
3.1.3	AP 2.3: Einzelschichtabscheidungen Evaluierung von Verbindungstechnologien zur dauerhaften Verbindung mit dem Trägermaterial (Metallfolie, Siebgewebe).....	20
3.1.4	AP 2.4: Auswahl und Evaluierung geeigneter Werkstoffe für Sperrschichten (Emulsionen, EPDM).....	24
3.1.5	AP 2.7: Entwicklung und Evaluation von Materialien zur funktionalen Beschichtung von Druckformen bzw. der Sperrschichten	24
3.1.6	AP 3.2: Evaluierung der optimalen Strahlquelle, Prozessbedingungen und Laser-Parameter zur Öffnung von Metallfolien-Schablonen	24
3.1.7	AP 3.3: Herstellung von laserstrukturierten Metallfolien-Schablonen und Vergleich mit konventionell hergestellten Referenz-Schablonen	24
3.1.8	AP 4.1: Spezifikation der technologischen und prozesseitigen Anforderungen von Schablonen mit flexibler Sperrschicht	25
3.1.9	AP 4.2: Evaluierung der optimalen Prozessbedingungen und Laser-Parameter zur selektiven Laser-Öffnung der flexiblen Sperrschicht	25
3.1.10	AP 4.3: Erarbeitung eines Prozesses zur kombinierten LASER Öffnung von Metallfolie und Sperrschicht in einem Schritt.....	25
3.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	26
3.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	26
3.4	Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse und fortgeschriebener Verwertungsplan	27
3.5	Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen.....	27
3.6	Geplante Veröffentlichung	28
4	Referenzen.....	28

1 Übersichtsangaben

Projektleitung:	Mike Becker
Zuwendungsempfänger:	NB Technologies GmbH
Förderkennzeichen:	03EE1100A
Thema:	Laserbearbeitung folienbasierter Siebdruckträger
Bewilligungszeitraum:	01.02.2022 bis 30.04.2025
Berichtszeitraum:	01.02.2022 bis 30.04.2025

2 Kurze Darstellung

2.1 Aufgabenstellung

Die Vorder- und Rückseitenmetallisierung von siliziumbasierten Solarzellen wird heutzutage zu über 98% [1] im Flachbett-Siebdruck- und Schablonendruckverfahren realisiert. Für die Metallisierung der prognostizierten Solarzellenproduktion von 128 GWp (Stand 2019) wurde ein Bedarf von über 1,5 Mio. Flachbett-Sieben jährlich angenommen. Die in den vergangenen 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-Siebe vor große Herausforderungen im Hinblick auf eine kostengünstige Produktion.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten 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 ergaben sich folgende konkreten Ziele für das Forschungsvorhabens:

- Entwicklung von laserstrukturierbaren Sperrschichten (Emulsion) für Siebe und Schablonen z.B. auf Basis von EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk), 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 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 flexible 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 LASER-Strukturierung von Sieben und Schablonen sollten 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 Voraussetzungen

Die Ausgangslage zu Beginn des Projekts im Jahre 2022 war im Bereich der Sieb- und Schablonendruck-Metallisierung für siliziumbasierte Solarzellen sehr dynamisch. Die klassische Herstellung von Sieben mittel UV-Belichtung einer Fotopolymer-Schicht (Kapillarfilm oder Emulsion) wurde durch eine weitreichende technologische Innovation der taiwanesischen Firma Brave C&H Supply Ltd innerhalb von wenigen Jahren nahezu komplett verdrängt. Diese Entwicklung umfasste die Herstellung von Sieben mit einer laserstrukturierbaren Polyimid (PI)-Folie als Maskenschicht, welche sowohl den Herstellungsprozess für Siebe deutlich vereinfachte als auch eine substantiell erhöhte Lebensdauer der Druckformen ermöglichte [4]. In Folge dieser Entwicklung wurden etablierte Siebhersteller sowohl in Asien als auch Europa innerhalb weniger Jahre nahezu komplett aus dem PV-Markt verdrängt. Das Know-How zur Herstellung und Strukturierung von Feinlinien-Druckformen für die PV-Industrie (Siebe und Schablonen) wurde in der Folge dieser Entwicklungen insbesondere in Asien weiterentwickelt und führte bis auf wenige Ausnahmen zu einer Einstellung der Produktion von PV-Sieben in Deutschland und anderen Teilen der Welt. Feinlinien-Siebe für die PV-Industrie werden seither nahezu ausschließlich im asiatischen Raum gefertigt und weiterentwickelt.

Das Schablonendruck-Verfahren als Alternative zum Siebdruck führte parallel seit vielen Jahrzehnten ein Schatten-Dasein. Dieses Verfahren wurde immer mal wieder als Alternative zum Siebdruck getestet, konnte jedoch nie signifikante Marktanteile gewinnen. Gründe hierfür waren die kostengünstigere Herstellung von Sieben auf Gewebebasis, eine deutlich geringere Lebensdauer von Schablonen (insbesondere im Vergleich zu PI-Sieben), höhere Kosten und drucktechnologische Nachteile

(Auslaufen der Kontaktfinger aufgrund mangelnder seitlicher Abdichtung der Druckkanäle bei reinen Metallfolien-Schablonen).

Im Rahmen des Projektvorhabens sollten innovative Ansätze der beteiligten Projektpartner für die Beschichtung, Strukturierung und Herstellung von Sieben und Schablonen entwickelt und evaluiert werden. Ziel war es dabei, die Marktposition deutscher Hersteller im Bereich der Druckformherstellung zu stärken und Chancen für einen Markteintritt bzw. Ausbau der bestehenden Marktposition im Bereich der PV-Industrie zu eröffnen. Gleichzeitig stärken die Ergebnisse des Projekts den Know-How-Aufbau zur eigenen Herstellung von wichtigen Komponenten in der Produktionskette und erhöhen damit die Unabhängigkeit von externen Lieferanten.

2.3 Planung und Ablauf

2.3.1 Meilensteine

	Beschreibung	Messbares Bewertungskriterium	
MS2-15	Verfahren zur Realisierung sehr dünner Sperrschichten (10-30 μm) sowie einer stabilen Verbindung auf Metallfolien demonstriert Spann- und Schweißanlage für die Verbindung von Folie und Gewebe in Druckrahmen $\geq 15''$ für flexible Folienformate aufgebaut	Keine Ablösung der Sperrschicht vom Trägermaterial nach 1000 Rakelübergängen erkennbar 15'' Rahmen mit in Trampolinguewebe eingeschweißtem Folienträger in mindestens 3 Varianten, hergestellt mit Spann- und Schweißanlage	Teile erreicht ¹⁾
MS3-6	Spezifikation der technologischen und prozessseitigen Anforderungen für laserstrukt. Metallfolien erstellt	Anforderungskatalog mit quantitativen Werten für relevante Materialeigenschaften erstellt	erreicht
MS3-33	Laserstrukturierte Metallfolien-Schablonen mit Kanalbreite $d \leq 20 \mu\text{m}$ demonstriert	Durchgängig geöffnete Kanäle in Metallfolien-Schablone mit einer Kanalbreite $d \leq 20 \mu\text{m}$ (Mittelwert über 25 Messpunkte) gezeigt	Bedingt erreicht ²⁾
MS3-33	Vergleichbare oder bessere Fingergeometrie im Vergleich zu Referenz-Schablonen gezeigt	Mittlere Kontaktfingerbreite nach Druck und Feuern um mind. 3 μm geringer im Vergleich zu Referenz-Schablone (Mittelwert über 25 Messungen)	bedingt erreicht ³⁾
MS4-15	Spezifikation der technologischen und prozessseitigen Anforderungen für die Laserstrukturierung von Metallfolien-Schablonen erstellt	Anforderungskatalog mit quantitativen Werten für relevante Materialeigenschaften erstellt	erreicht

Tab. 1 Meilensteine

- 1) Einschweißung von verschiedenen Formaten ist erreicht; die Stabilität der Sperrschicht wurde außerhalb des Projektes nachgewiesen
- 2) Innerhalb der Projektlaufzeit konnten keine vollständigen Solarzelllayouts als Foliensieb realisiert werden, sondern nur in Teilflächen mit Teststrukturen; innerhalb der Teststrukturen wurden die Anforderungen erfüllt
- 3) Testdrucke und Ergebnisauswertung wurden von Partnern durchgeführt

Silberverbrauchs führte. Der Siebdruckprozess sowie die relevanten Materialien (Siebe, Pasten) wurden deshalb intensiv weiterentwickelt, um den Druck feinerer Vorderseitenkontakte und damit eine substantielle Reduktion des Silberverbrauchs pro Zelle bzw. pro Wp zu ermöglichen. Der Schablonendruck als Alternative zum Siebdruckverfahren war seit Jahrzehnten bekannt, wurde jedoch aufgrund der bereits genannten Nachteile und Herausforderungen nur sporadisch für die Metallisierung eingesetzt. Die im Projekt adressierten Zielsetzungen kamen deshalb zur richtigen Zeit. Insbesondere das Thema Schablone hat während der Projektlaufzeit deutlich an Relevanz gewonnen.

2.5 Zusammenarbeit mit den Projektpartnern

Als Projektpartner waren die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgeführten Institute und Firmen beteiligt. Im Laufe des Projektes wurden die Ergebnisse einzelner Arbeitspakete und die Koordination weiterer Arbeiten auf regelmäßigen Projektreffen besprochen und inhaltlich abgestimmt. Außerdem gab es rege bilaterale Zusammenarbeit hinsichtlich Materialien, Mustern, Analysen und Geräten.

Nr.	Projektpartner	Rolle	Anschrift
1	NB Technologies GmbH	Antragsteller/ Verbundkoordinator	Fahrenheitstr. 1 28359 Bremen
2	Hans Frintrup GmbH	Projektpartner	Röhfeldstr. 20 53227 Bonn
3	Pulsar Photonics GmbH	Projektpartner	Kaiserstr. 100 52134 Herzogenrath
4	Fraunhofer ISE	Projektpartner	Heidenhofstr.2 79110 Freiburg
5	Kissel und Wolf GmbH	Assoziierter Partner	In den Ziegelwiesen 6 69128 Wiesloch
6	Anton Paar Germany GmbH	Assoziierter Partner	Hellmuth-Hirth-Strasse 6 73760 Ostfildern
7	Benecke-Kaliko AG Center for Functional Printing Technologie	Assoziierter Partner	Bötzing Str. 31, 79111 Freiburg im Breisgau

Tab. 3 Projektpartner

3 Eingehende Darstellung

3.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

3.1.1 Spezifikation der technologischen und prozesseitigen Anforderungen für die Laserstrukturierung von Metallfolien-Schablonen

Es wurde ein Konzept der manuellen Einspannung im Siebrahmen umgesetzt. Nachteil ist, dass zunächst ein Lochrahmen am Folienrand hergestellt werden muss, um eine Verbindung mit einem Trampolingtewebe herzustellen. Die geplante Spannanlage war hierfür im Projekt vorgesehen, aber noch nicht verfügbar, so dass eine manuelle Klebung erfolgen musste.

Es wurden verschiedene Möglichkeiten der Lochung für den Assembly-Rahmen erprobt. Eine Stanzung von Löchern wurde erprobt, führte aufgrund der geringen Dicke aber nicht zum Ziel der Edelstahlfolie. Es wurde schließlich das LASER-Verfahren favorisiert.

Hierfür wurde ein Layout für den Assembly-Rahmen erstellt. Die Außengeometrie der Siebfolie wird durch eine Trennlinie aus der Basisfolie erzeugt. Die Basisfolie wird beim Siebaufbau mit dem Trampolingtewebe im Rahmen verbunden im Bereich des Assembly-Rahmens. Überstehendes Material der Edelstahlbasisfolie wird an der Trennlinie getrennt.

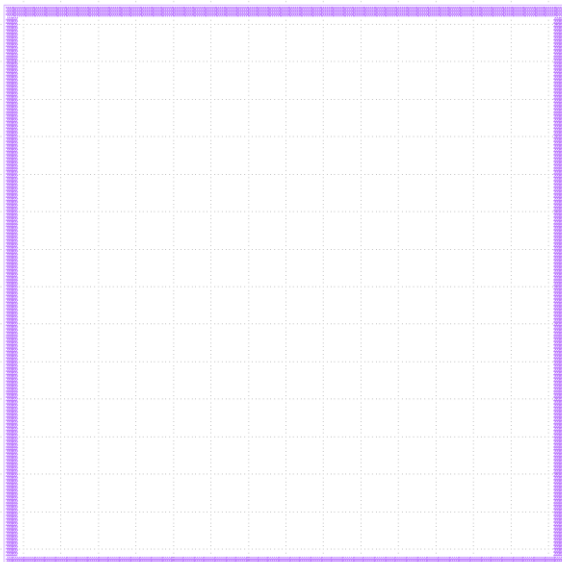


Abb. 1 Layout Assembly-Rahmen für LASER-Lochung für 300mm x 300m Folie

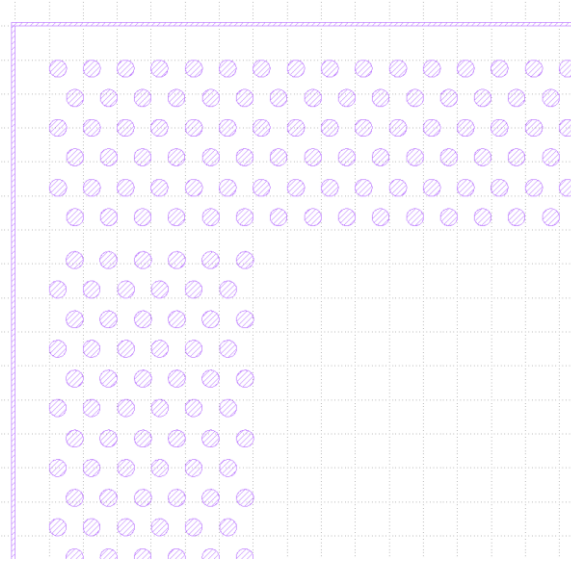


Abb. 2 Layout Assembly-Rahmen; für LASER-Lochung (Detailansicht)

Die Edelstahlfolien wurden schließlich bei einem externen Anbieter per LASER-Prozess mit dem obigen Layout gelocht. Erst nach einigen Iterationen wurde eine Lochung ohne Grat und Anbrennung erzielt.

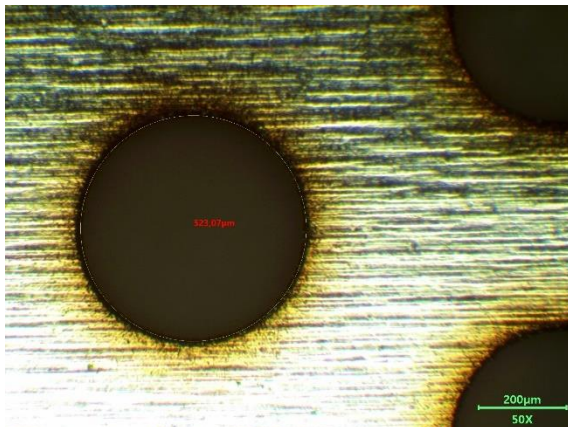


Abb. 3 Detailansicht einer LASER-Bohrung für den Assembly-Rahmen; Durchmesser etwa 50µm

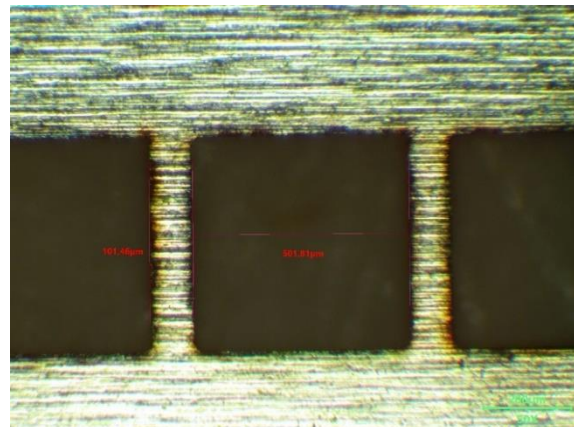


Abb. 4 Detailansicht der Trennlinienlochung; die Stege werden beim Trennen der Siebfolie aus der Basisfolie zerstört

Die Folien wurden dem Partner Frintrup für die Einspannung im Rahmen zur Verfügung gestellt. Die Rahmen wurden dann an den Partner ISE weitergeleitet.

Weitere Festlegungen bezogen sich auf die Frage, ob eine komplette Lochung der Folie (für Muster) durchgeführt werden kann oder die Lochung nur bereichsweise erfolgt. Im Ergebnis mit den Partnern werden Muster nur mit bereichsweiser Lochung erzeugt in den Bereichen der Sieböffnung, also des Layouts. Dies ist dem Ziel geschuldet, möglichst präzise Lochungen zu erzeugen, was nicht auf großflächigen Bereichen möglich ist.

Die Erstellung eines Pflichtenheftes wurde planmäßig abgeschlossen und projektbegleitend aktualisiert.

Ein Auszug zum Stand der wichtigsten Festlegungen findet sich in folgender Tabelle:

Folienmaterial	Edelstahl 1.4310
Folienmaterialstärke	20µm (später 12,7µm)
Folienmaterialbreite	300mm
Stabilität	2mm snap-off mit Rakel 4mm maximale Auslenkung im Belastungstest mit Punktbelastung (Kugelkopf) in der Mitte
Verzugsfreiheit	<10µm über gesamte Folienfläche
Folienlochung	bereichsweise
Lochdurchmesser	>20µm
Wiederholgenauigkeit Lochung	tbd
Konizität	tbd
Krater / Auswurf	nicht erlaubt

Tab. 4 festgelegte Materialparameter

Im Projekt wurden sowohl Titan als auch Edelstahl Materialien beschafft und sowohl für eigenen Versuche genutzt als auch den Projektpartnern zur Verfügung gestellt (Spezifikationen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.)

Weitere Materialrecherchen wurden durchgeführt. Die wichtigsten Parameter für die Materialauswahl sind die Zugfestigkeit und die Dehngrenze, bevor plastische Verformung beginnt. Weiterhin muss das Material mit LASER gut zu bearbeiten sein und als dünne Folie und in geforderter Breite kosteneffizient zu beziehen sein.

NBT bevorzugt Edelstahl 1.4310, welcher diese Bedingungen am besten erfüllt. Titan ist hinsichtlich der Festigkeiten unterlegen, auch wenn es sich in den ersten Versuchen gut verarbeiten ließ.

NBT hat Material der hochzugfeste Gewebesorten untersuchen und für die Eignung als Folienmaterial überprüft. Dabei wurde jedoch kein besseres Material identifiziert.

		Titan				Edelstahl	
Material		grade 1	grade 2	grade1	grade 2	1.4310 RM	1.4310 RM
Dicke	[μm]			6,6 μm	10 μm	12,7 μm	20,0 μm
Zugfestigkeit	Rm [N/mm ²] MPa	290-410	390-540	671		1489	1477
Dehngrenze	Rp0.2% [N/mm ²] Mpa	170-310	250-450	595		1202	1306
Preis	€/30cm			6,92	3,72	10,41	10,29

Tab. 5 Folienmaterialien

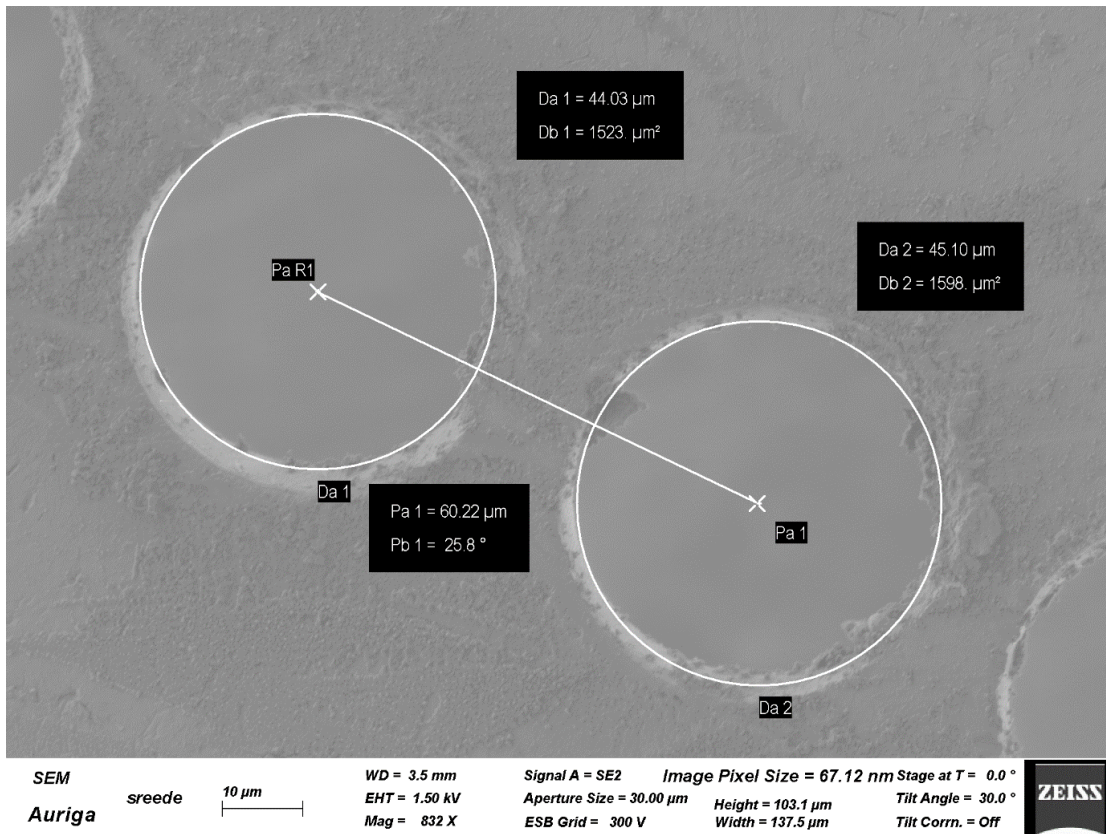


Abb. 5 REM-Bild LASER Lochung

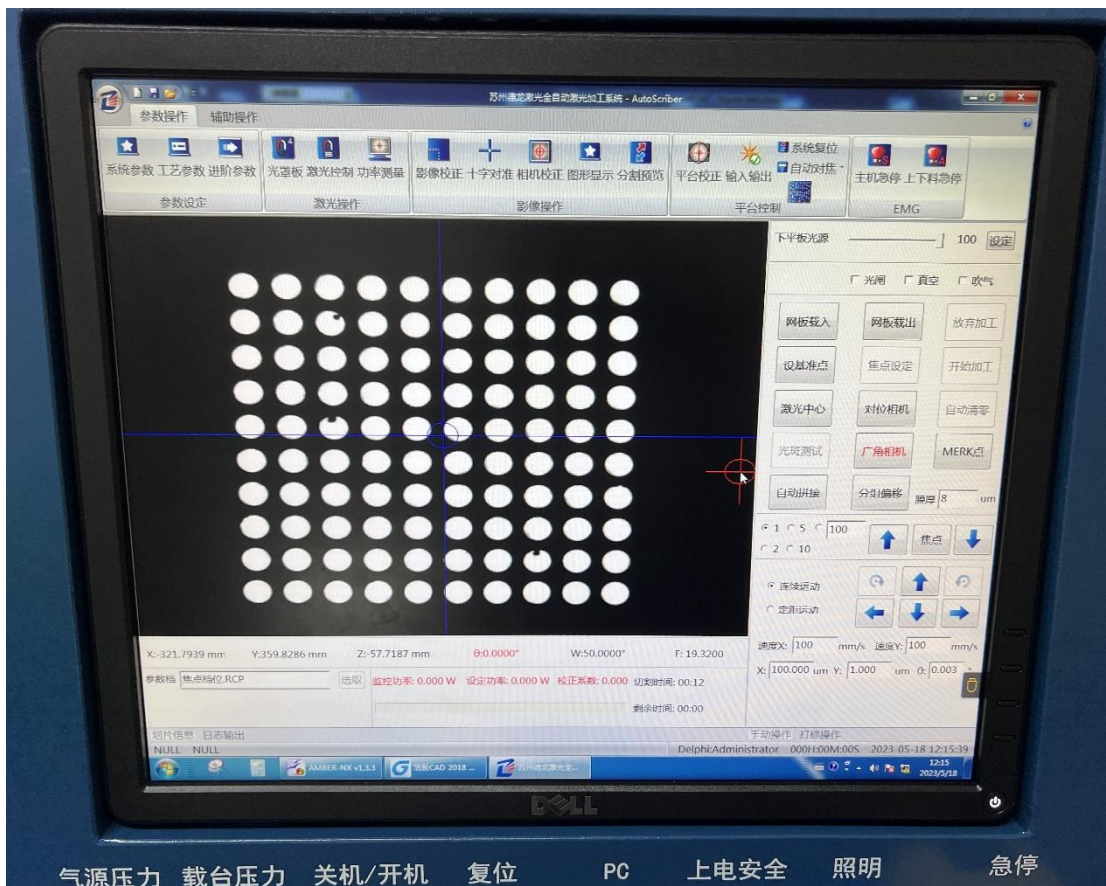


Abb. 6 Screenshot LASER-Lochung von Ti Folie (6µm dick) mit Delphi-Anlage



Abb. 7 CCD Aufnahme gelochte Linie in Titanfolie (6µm dick)



Abb. 8 Eingespannte Ti-Folienabschnitte

Die Muster und das Konzept wurden auf der Messe in Shanghai präsentiert und verschiedenen Interessenten vorgestellt.



Abb. 9 SNEC Messepräsentation

Zusammenfassend wurden die Ziele der Reise nach China erreicht. Es konnten erste Muster von gelochten Folien erzeugt werden. Die Ausstellung konnte genutzt werden, um das Konzept der individuelle gelochten Siebfolien dem Markt vorzustellen. Schließlich wurden wertvolle Erkenntnisse zu Trends und aktuellen Arbeiten gewonnen, die unmittelbar in die nächsten Arbeiten eingehen.

Die Marktbeobachtung brachte folgende Erkenntnisse:

LASER-Strukturierung ist in Produktion etabliert für folgende Anwendungen

- Strukturierung von Sperrschichten aus Polyimidfolie
- Nachträgliche Entfernung von Fäden in Sieböffnungen bei Geweben in 0°-Anordnung

Diese Anwendung ist inzwischen marktbeherrschend in China/Asien.

Die Folienstrukturierung/-lochung ist noch nicht etabliert.

Die Methode der Fadenkorrosion „thread corrosion“ wird bereits eingesetzt (siehe AP 2.2 und Abschnitt 4).

Die Lochung von Titanfolien war qualitativ vielversprechend. Die Bildung von Graten oder Auswürfen ließ sich weitgehend vermeiden. Jedoch zeigte sich, dass die Zugfestigkeit nicht ausreichend ist. Die Muster waren bei geringer Belastung bereits beschädigt worden. Titanfolien waren auch in größeren Stärken, z.B. 10µm verfügbar, jedoch wurde die Verwendung von Titan zurückgestellt zugunsten des 1.4310 Edelstahl. Dieser Edelstahl lässt sich ähnlich gut strukturieren und die Zugfestigkeit ist deutlich höher.

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

Es standen zunächst keine gelochten Folien für Versuche zum Elektropolieren zur Verfügung. Stattdessen ist zwischenzeitlich das Konzept, Gewebefäden durch Ätzung im Durchmesser zu reduzieren (thread corrosion), verfolgt worden. Idealerweise sollen nur Fäden in den Sperrschichtöffnungen selektiv behandelt werden, also nicht das gesamte Gewebe.

NBT plante, mit den Partnern zusammen, hierzu eine Patentanmeldung durchzuführen. Es wurde zunächst von Seiten des Fraunhofer ISE eine Patentrecherche durchgeführt. Diese ergab, dass eine Vorrichtung hierzu nicht mehr neu und somit nicht patentfähig ist. Dennoch ist das Verfahren in dieser Form noch nicht in Produktion etabliert, so dass der gewählte Ansatz gegebenenfalls noch schutzfähige Aspekte liefern würde. Die etablierten Verfahren zur Fadendünnung basieren auf rein chemischer Ätzung von Edelstahl. Der hier verfolgte Ansatz basiert auf elektrochemischem Abtrag. Die Neuerung ist, dass der Prozess nach Fertigstellung des Siebes erfolgen sollte, so dass nur im geöffneten Bereich die Fäden

verjüngt werden. Zudem sollten die Fäden durch den Polierschritt eine geringere Rauheit aufweisen, als die beim chemischen Ätzen möglich ist.

Es wurden zunächst an einem einfachen Laboraufbau mit Becherglas grundlegende Tests durchgeführt. Dabei waren die Ergebnisse beim elektrochemischen Polieren sehr vielversprechend. Deswegen wurde im Folgenden eine Anlage entworfen und aufgebaut, die es ermöglicht, komplette Siebe im gespannten Zustand im Substratbereich entsprechend zu bearbeiten.

Das Prinzip des Aufbaus basiert auf dem suncup[®]-Anlagentyp von NBT, bei dem die Prozesskammer als Fountain-Reaktor konfiguriert ist. Es wurden vorhandene Kammergeometrien verwendet und die Anlage für den Polierzweck umgebaut, so dass die Siebrahmen auf die Krone platziert werden können.

Das Rezept des Elektropolierbades basiert auf Phosphorsäure.

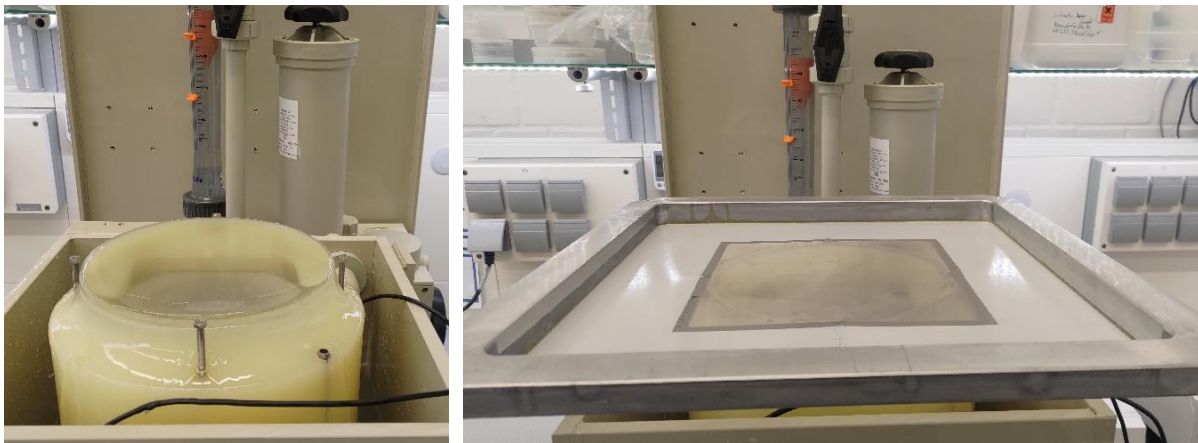


Abb. 10 (links) Anlage zum elektrochemischen Polieren mit suncup[®]-Prozesskammer; (rechts) Gewebesieb in Prozessposition

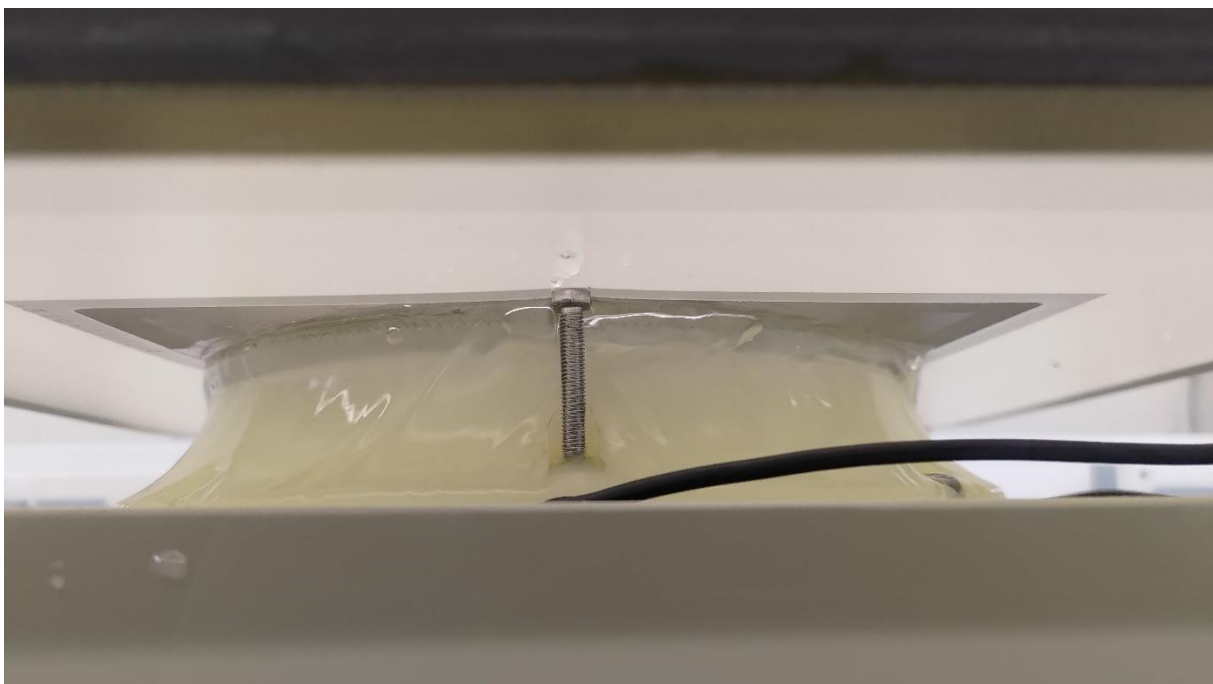


Abb. 11 Angeströmtes Sieb beim elektrochemischen Polieren (Ansicht von unten)

Es wurden verschiedene Versuche zur elektrochemischen Reduktion des Fadendurchmessers bei Edeltstahlgewebe durchgeführt werden. Dafür standen Siebe vom Projektpartner Fraunhofer ISE und von Frintrup NB SST zur Verfügung

Experiment	Material	Time [s]	Current [mA]	Result
# 1	V4A Blech (64 cm ²)	180	3200 (5 ADM)	wenig poliert
# 1a	V4A Blech (64 cm ²)	300	5000 (7,8 ADM)	deutlich poliert
# 2	Z177FL (14,75 cm ²)	150	1000 (6,8 ADM)	18µm => 15µm !!Emulsion löst sich!!
# 3	Stencil No.1 (4,1 cm ²)	130	300 (7,3 ADM)	13µm => 8µm ⚠PENG⚠
# 4	430-13#17-06 (10 cm ²)	90	650 (6,5 ADM)	13µm => 11µm
# 5	430-13#17-05 (10 cm ²)	135	650 (6,5 ADM)	13µm => 9µm ⚠PENG⚠

Tab. 6 Versuche zur elektrochemischen Reduktion des Fadendurchmessers

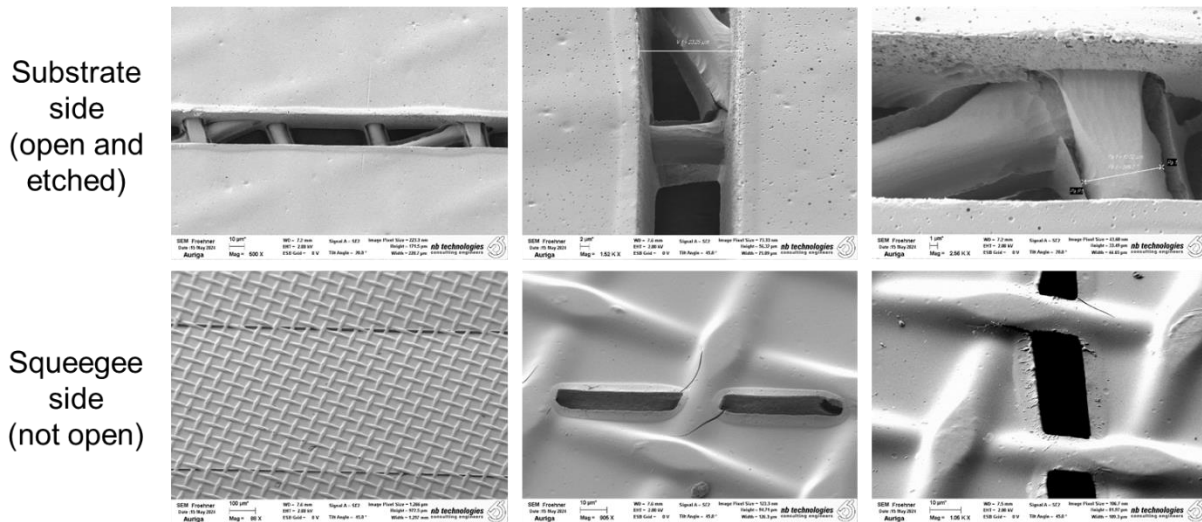


Abb. 12 Experiment #3 Stencil No.1 Ergebnis: 13 µm => 8 µm ⚠PENG⚠

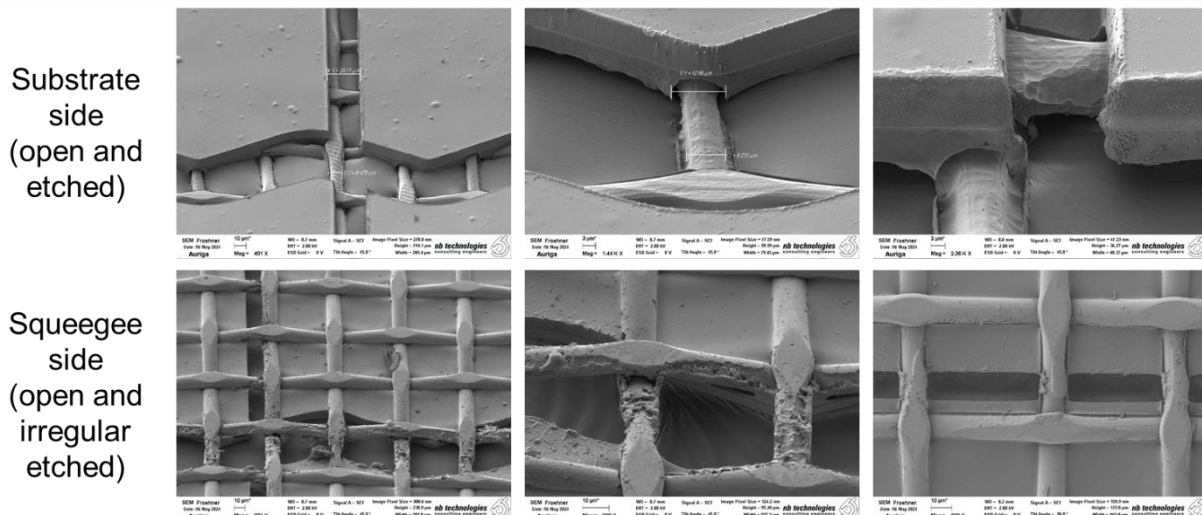


Abb. 13 Experiment #5 430-13#17-05 Ergebnis: 13 µm => 9 µm ⚠PENG⚠

Experiment	Material	Time [s]	Current [mA]	Result
# 11	SDSPC PLUS 46/13 I	180	4 (1 ADM)	12µm => 11µm
# 11a		90	4 (1 ADM)	10µm ⚠PENG⚠
#12	SDSPC PLUS 46/13 II	120	8 (2 ADM)	11,5µm => 9,5µm
#13	SDSPC PLUS 46/13 III	67	12 (3 ADM)	11µm => 10µm ⚠PENG⚠
#14	440-13 T_M10_12BB_P1_202_030_VF01.4_RF 240830-I	240	0,2 (2 ADM)	13µm => 10µm
#15	440-13 T_M10_12BB_P1_202_030_VF01.4_RF 240830-II	120	0,4 (4 ADM)	13µm => 10µm

Tab. 7 Versuche zur elektrochemischen Reduktion des Fadendurchmessers (II)

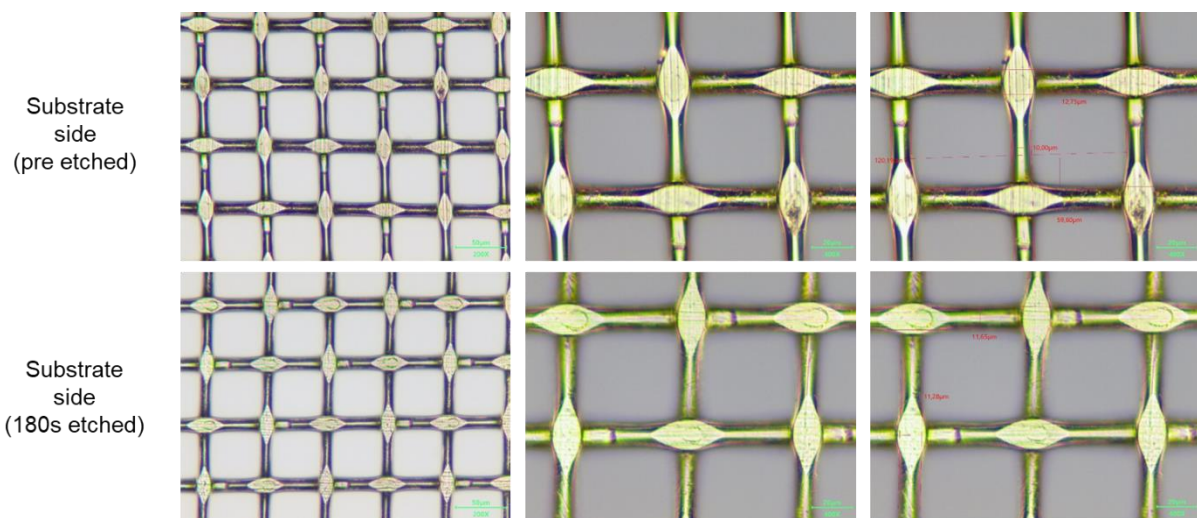


Abb. 14 Experiment #11 SDSPC Plus 46/13 I Ergebnis: 12 µm => 11 µm

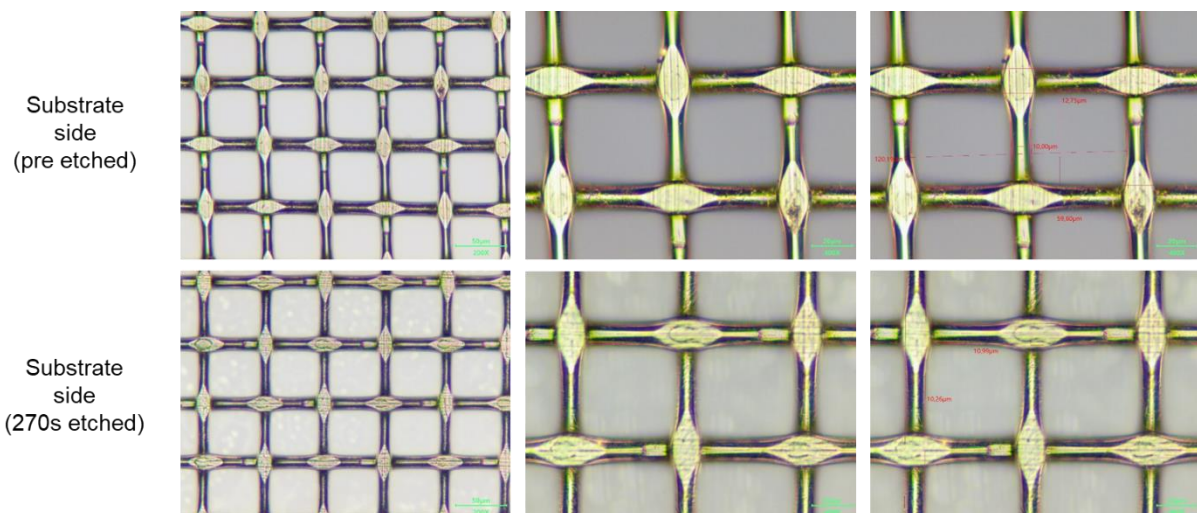


Abb. 15 Experiment #11a SDSPC Plus 46/13 I Ergebnis: 12 µm => 10 µm ⚠PENG⚠

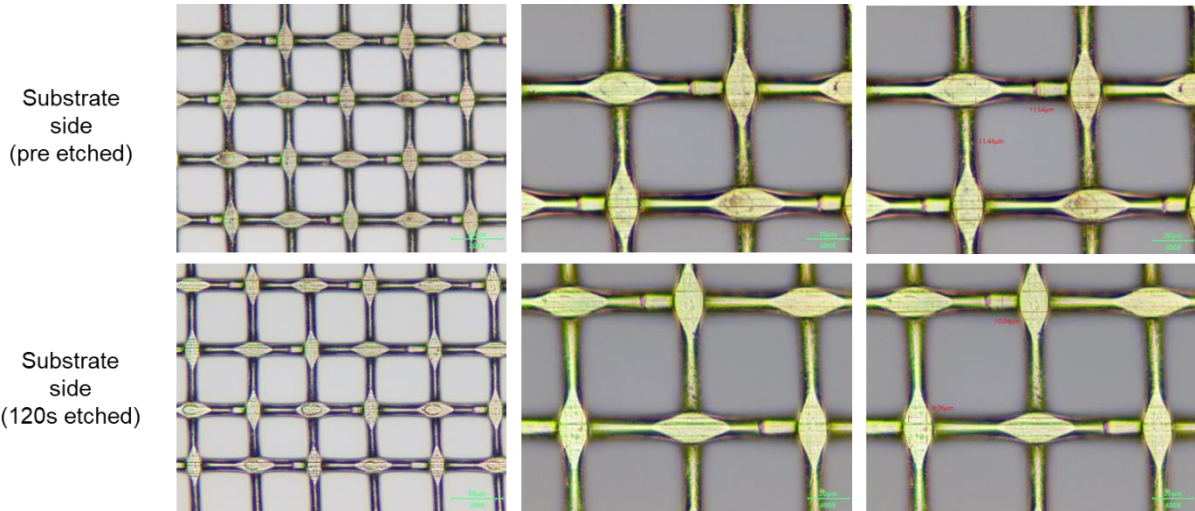


Abb. 16 Experiment #12 SDSPC Plus 46/13 II Ergebnis: 11,5 µm => 9,5 µm

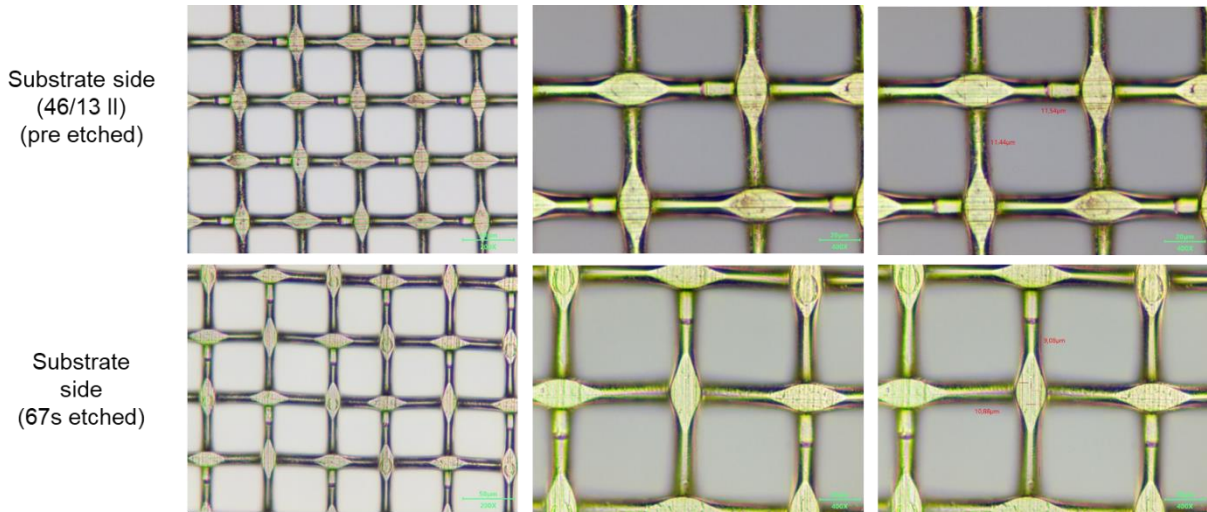


Abb. 17 Experiment #13 SDSPC Plus 46/13 III Ergebnis: 11 µm => 10 µm **⚠PENG⚠**

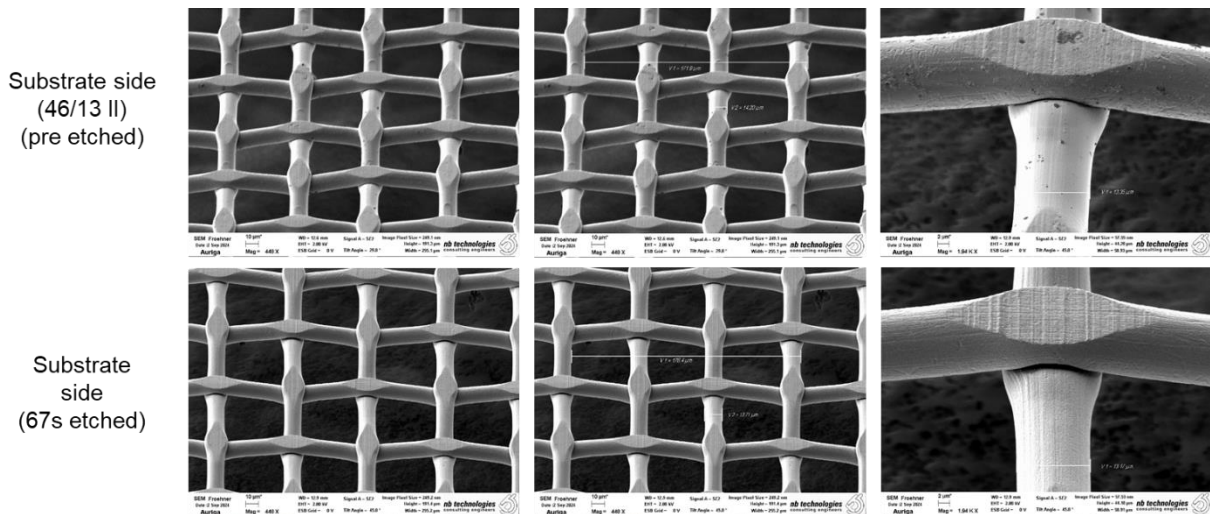


Abb. 18 Experiment #13 SDSPC Plus 46/13 III Ergebnis: 13 µm => 12 µm **⚠PENG⚠**

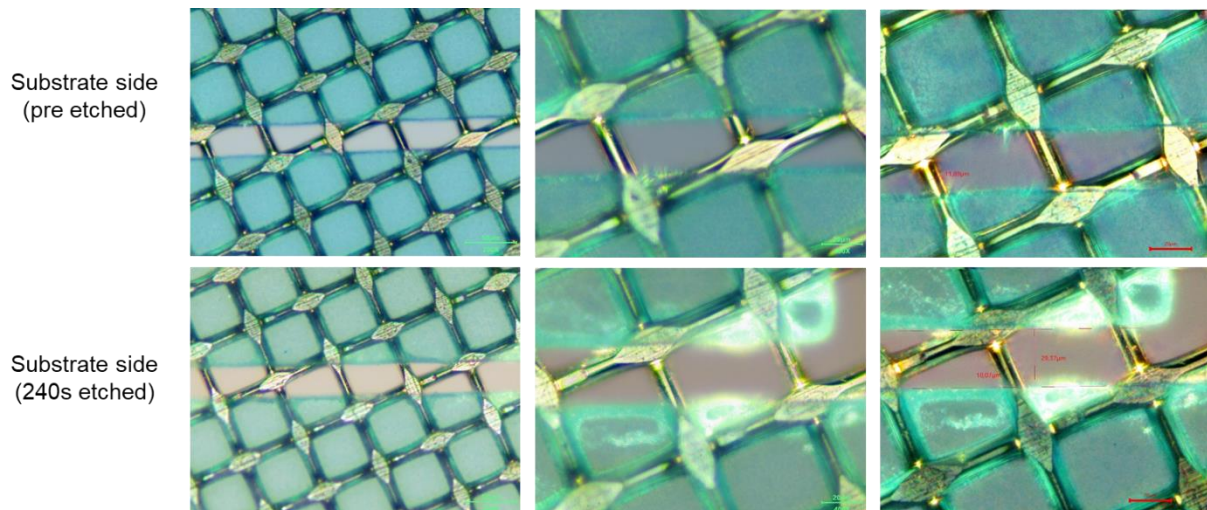


Abb. 19 Experiment #14 240830 I Ergebnis: 13 μm => 10 μm

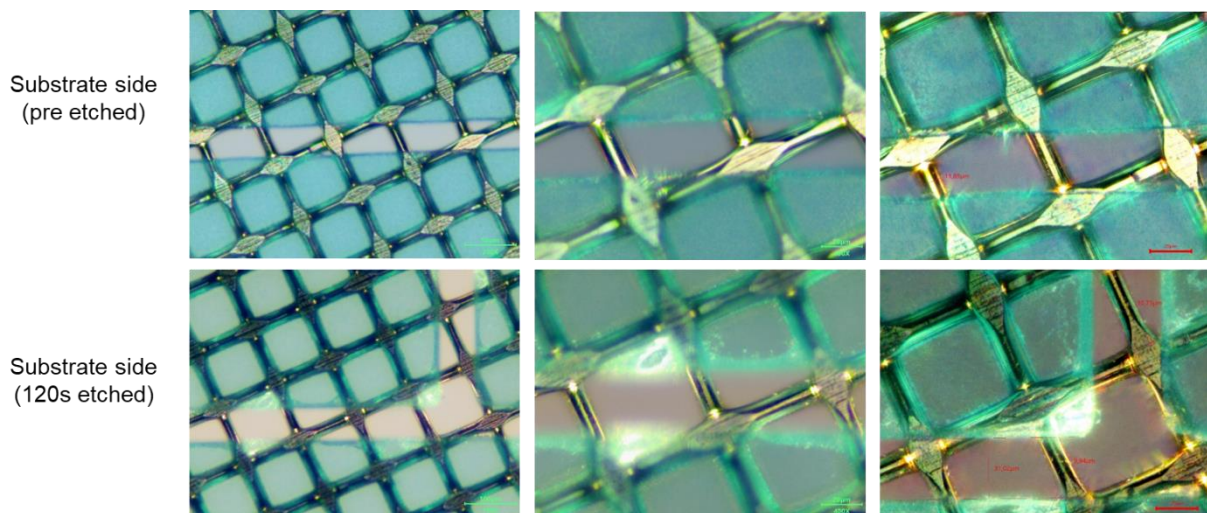


Abb. 20 Experiment #15 240830 II Ergebnis: 13 μm => 10 μm

Zusammenfassen erwiesen sich sowohl die wasserfeste Emulsion als auch die PI-Folie stabil im Polierbad, so dass weitere Experimente durchgeführt werden konnten. Die Ergebnisse zeigten eine Durchmesserreduzierung im Bereich von 1 μm bis 2 μm . Trotz der Fadenätzung blieben einige Siebe weiterhin für Drucktests funktional. Eine Herausforderung war, wenn in den offenen Bereichen keine Knoten vorhanden waren, da an kalandrierten Stellen das Material dünner ist und so eine schnellere Durchätzung erfolgte und das Sieb an diesen Stellen riss.

Fadenätzung mit 0°-Sieben ohne Knoten in den offenen Bereichen waren sehr vielversprechend.

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

Die Recherchen und Konzeptionierungen für die Umschweißanlage wurden vertieft. Eine Richtung beinhaltete die Nutzung einer kommerziellen Plattform, die für die Belange des Projektes umgebaut und erweitert werden sollte.

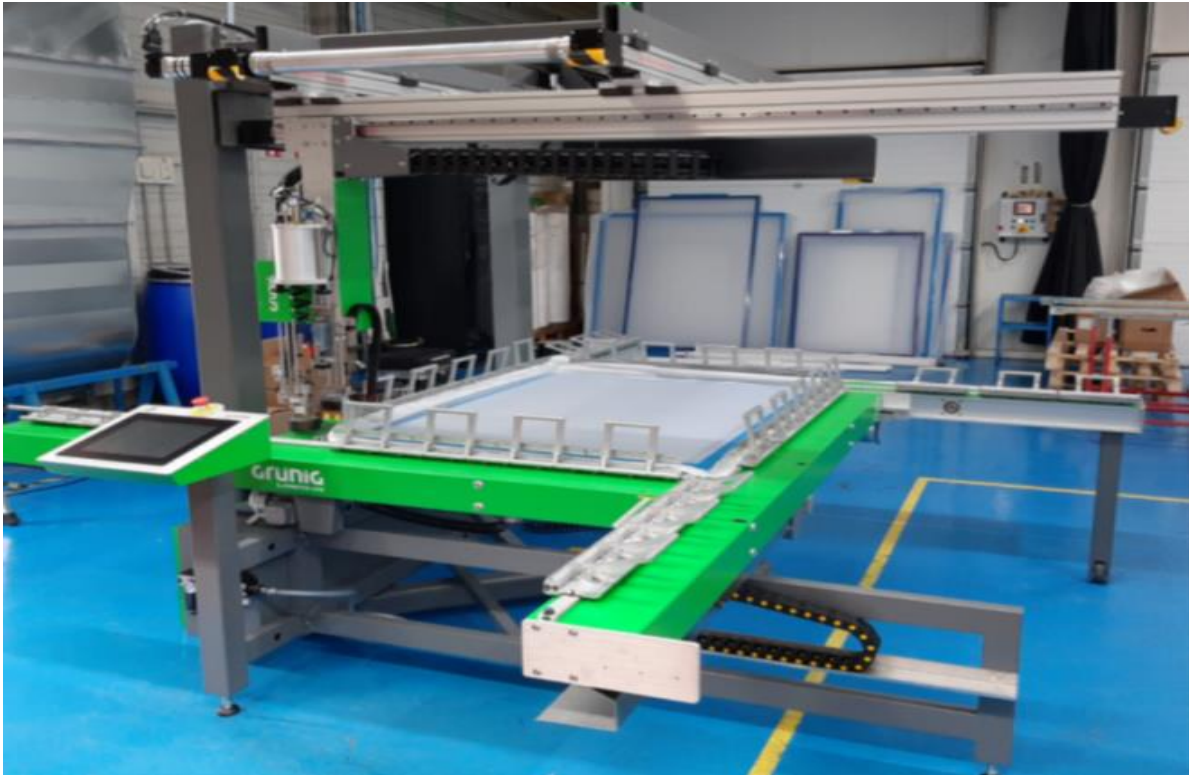


Abb. 21 Siebspannanlage der Firma Grünig

Die Kosten für die Plattform (Abb. 21) sprengten das Projektbudget, und die geforderte Präzision konnte nicht erfüllt werden.

Daher bestand die Aufgabe darin, die Funktionen mit Einzelkomponenten zu realisieren. Weitere Komponenten für die LASER-Bearbeitung wurden identifiziert.

HIGH-Z S-2100/T CNC FRÄSE



HIGH-Z S-2100/T KUGELGEWINDEANTRIEB 2100X1050MM

CNC Fräse Typ High-Z mit Kugelgewindetrieb für gesteigerte Präzision und Leistung auf großer Bearbeitungsfläche!

Der CNC-STEP Bestseller schlechthin: Die High-Z CNC Einheit der T-Serie für Ihre gewerblichen & industriellen Anwendungen mit 16mm Kugelrollspindeln und zusätzlichen Linearführungen der Firma HIWIN auf der X-Achse. Verwendbar überall dort, wo noch mehr Bearbeitungsfläche, Wiederhol-Genauigkeit (0,01mm) und High-Speed bei der Fertigung gefragt ist.

Ebenfalls perfekt als kleiner mobiler Plasmaschneider / Plasmaschneidanlage einsetzbar!



11.602,50 €

10.601,71 €

(Einführungsrabatt bis 30.06.2023)

(inkl. MwSt)

Abb. 22 Traverse mit Kugelgewindeantrieb

Darunter befanden sich Traversen für die Aufnahme des LASERs (Abb. 22), Lasersysteme mit Kugelkopf (Abb. 23) für die Verschweißung der Folie mit dem Gewebe.

Laserschweißen bei Losgröße 1

Bei kleinen Serien, wechselnden Layouts oder sogar individualisierten Geometrien in Losgröße 1 wird die fehlende Flexibilität ein Problem. Der Aufwand und Zeitverlust für ein Werkzeug werden problematisch. Als alternative Schweißtechnik bietet sich das Laserschweißen an. Es wird kein fixes Werkzeug benötigt, sondern mit einem Achssystem und CNC-Steuerung die Schweißkontur abgefahren. Dies benötigt je nach Geschwindigkeit zwar mehr Zeit als das Schweißen mit Hochfrequenz oder Heizelement, dafür kann die Kontur einfach gewechselt werden durch Laden anderer Daten in die Steuerung. Der fürs Schweißen notwendige Andruck muss auch nicht auf den ganzen Folienflächen gleichzeitig anliegen, sondern kann dynamisch an der Stelle aufgebracht werden, an der zu dieser Zeit auch geschweißt wird. Besonders geeignet dazu sind eine Glaskugel oder Glasrolle, die gleichzeitig den Laserstrahl auf die Schweißstelle fokussieren, dort lokal zusammendrücken und durch Abrollen auch gleichzeitig frei bewegt werden können.

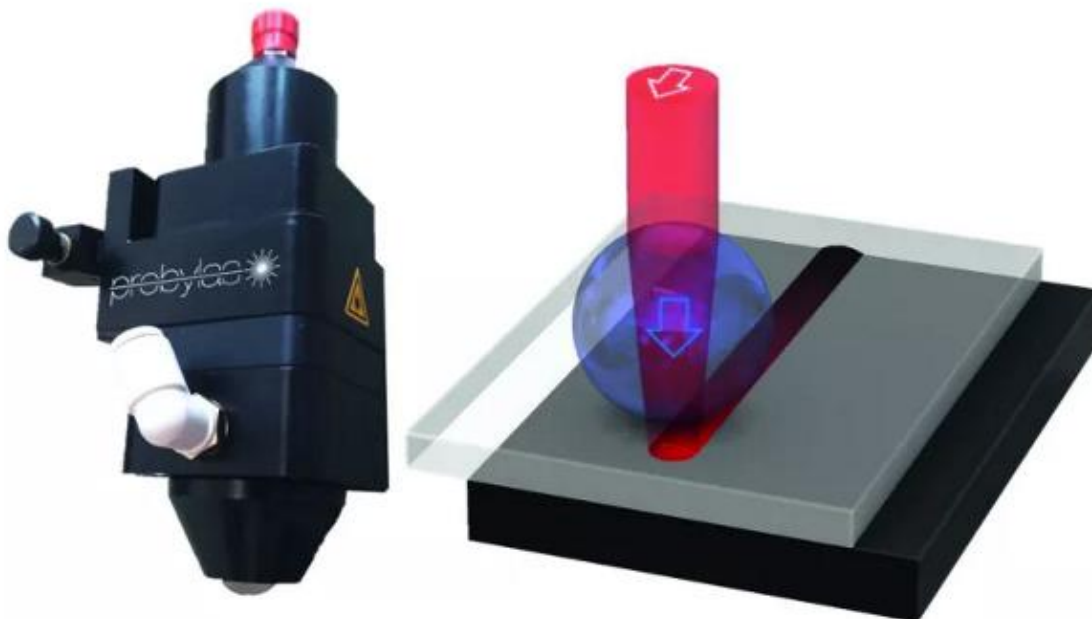


Abb. 23 Prinzip LASER verschweißen mit Glaskugel

Das Konzept wurde schließlich verworfen, es konnte eine effizientere Lösung etabliert werden.

Bei dem Verfahren wird die PE-Folie im benötigten Format vorstrukturiert, wobei die Fläche für die Metallfolie oder das Metallgewebe bis auf den Schweißrand ausgespart wird. Es können so PE-Lagen unterschiedlicher Formate mit einem Kunststoffschweißverfahren verarbeitet werden, ohne dass LASER-Prozesse oder ein formatspezifisches Schweißband notwendig sind. Die Verschmelzung des PE-

Zuschnittes mit dem Trampolinguewebe ersetzt die übliche Siebfüllung mit Siebfüller, so dass Arbeitsschritte eingespart wurden. Dieses Verfahren wurde in der Produktion etabliert.

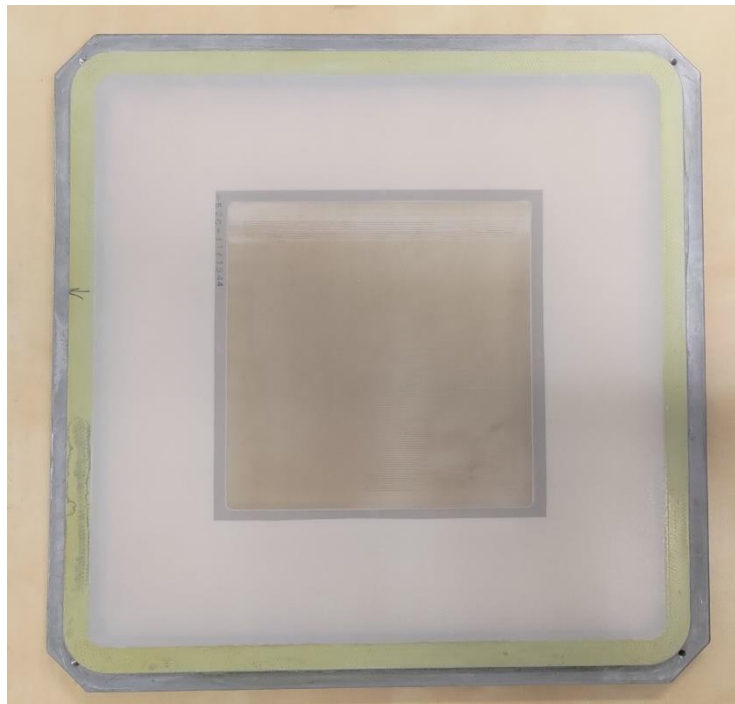


Abb. 24 PE eingeschweißtes Stahlgewebe im Siebrahmen

Die Anlagentechnik (Abb. 25) für die Verschweißung in flexiblen Formaten steht für Produktionszwecke zur Verfügung.

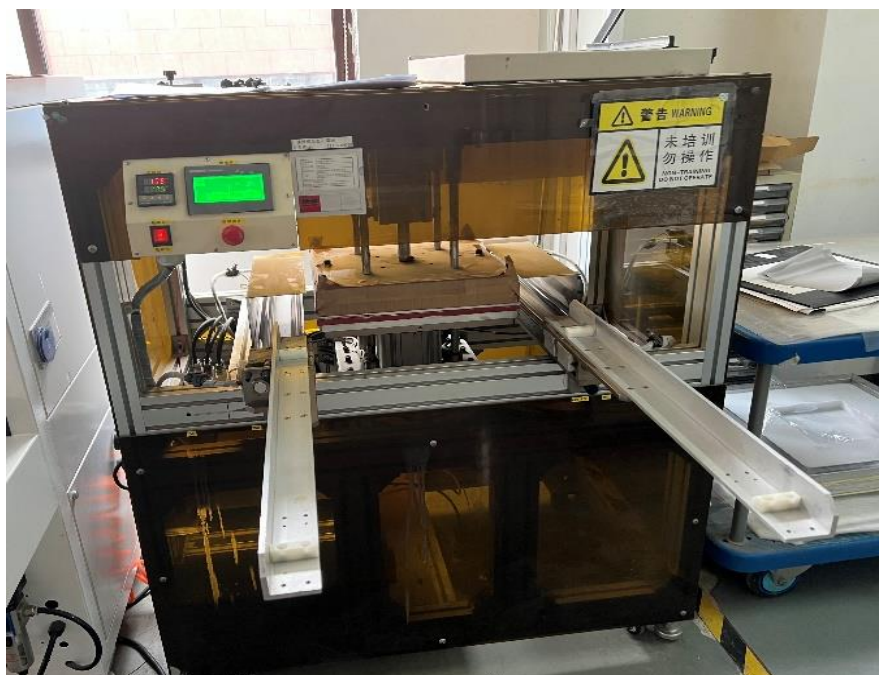


Abb. 25 Umschweißanlage bei Frintrup NB SST

Das Arbeitspaket 2.3 wurde somit in diesem Teilaspekt als abgeschlossen. Noch offen und blieb in dem Arbeitspaket das LASER-basierte Heraustrennen des Trampolingtewebes. Diese Arbeiten wurden nicht abgeschlossen.

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

NBT hat in verschiedenen Gesprächen und Anfragen beratend bei der Evaluierung und Auswahl von Werkstoffen beigetragen.

Bezüglich der Vorbehandlung von Folien hat sich NBT mit den Partnern Frintrup und KIWO ausgetauscht und die konkreten Anforderungen und Anwendungsfälle diskutiert. Zum ersten ging es um klassische Emulsionen, die mit der Folie verbunden werden sollten. Der Unterschied zu früheren Siebvarianten mit kompletter Lochung der Folie war hier, dass im Wesentlichen nur die Linienbereiche gelocht werden und so eine andere Haftfestigkeitssituation vorlag. Zum Zweiten sollten die in Produktion inzwischen üblichen Polyimidfolien verarbeitet werden können. Zum Dritten ging es um neue Sperrschichtmaterialien von KIWO und Partnern. Hier sollten chemische Zusätze, klebende Zwischenschichten oder Verfahren aus der Kapillarfilmanwendung zum Einsatz kommen. NBT hat den Partnern verschiedene Muster an Metallfolien für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Im nächsten Schritt standen dann die Beschichtungen im Zusammenhang mit LASER-gelochten Folien an. Bei Versuchen zur Polymerisierung des KIWO Materials hat sich die eingespannte Stahlfolie durch ungleichmäßigen Wärmeeintrag verzogen. Diese Problematik sollte durch eine Optimierung des Ausheizschrittes behoben werden.

3.1.5 AP 2.7: Entwicklung und Evaluation von Materialien zur funktionalen Beschichtung von Druckformen bzw. der Sperrschichten

Für die Verbesserung von Benetzungsverhalten und Pastenauslasses hat NBT Versuche mit Atmosphärenplasmaverfahren durchgeführt.

3.1.6 AP 3.2: Evaluierung der optimalen Strahlquelle, Prozessbedingungen und Laser-Parameter zur Öffnung von Metallfolien-Schablonen

NBT hat Folienmaterial (Titan und Edelstahlfolie) zur Verfügung gestellt, damit die Partner LASER-Prozesse untersuchen konnten.

NBT hatte sich zunächst weiter auf Edelstahl 1.4310 fokussiert. Das Material ist auch in Stärken von 12.5µm verfügbar, so dass in Abstimmung mit den Partnern diese Folienstärke untersucht werden sollte. Dünnere Folien versprechen leichtere Bearbeitung mittels LASER und bessere Druckergebnisse, jedoch war die Stabilität zu überprüfen.

3.1.7 AP 3.3: Herstellung von laserstrukturierten Metallfolien-Schablonen und Vergleich mit konventionell hergestellten Referenz-Schablonen

Im Mai 2023 hat NBT an der PVSEC Messe in Shanghai als Aussteller teilgenommen. Teilnehmer waren Mike Becker (NB Technologies GmbH) und Herbert Frintrup (Hans Frintrup GmbH). Die Reise und Teilnahme diente folgenden Zielen:

- Durchführung von LASER-Versuchen zur Lochung von Metallfolien für Siebdrucksiebe mit firmeneigenen LASER-Anlagen der Tochterfirma Frintrup NB SST in Kunshan
- Ausstellung von Ergebnissen auf der SNEC Exhibition in Shanghai
- Marktbeobachtung und Recherche zum Stand der Technik

In der Woche vor der Messe wurden die LASER-Versuche in der Produktion der Firma Frintrup NB SST durchgeführt. Hierfür wurden Ti-Folien mitgebracht, in Siebdruckrahmen gespannt und an LASER-Anlage bearbeitet. Frintrup NB SST verfügt über eine LASER-Anlage der Firma Delphi. Titanfolien wurden als neues potentiell einsatzfähiges Material identifiziert (siehe AP3.1). Die vorhandenen Titanfolien wiesen eine Dicke von nur 6µm auf, später wurden noch Folien mit höherer Dicke recherchiert, die allerdings nur in großen Stückzahlen kosteneffizient zu beziehen sind und vorerst nicht zum Einsatz kamen. Die ersten Versuche dienten der grundsätzlichen Machbarkeitsuntersuchung. Nach mehreren Iterationen zur LASER-Leistung, und weiteren Parametern konnten relevante Lochungen in Linienlänge und Matrizen erzeugt werden, bei denen die Lochränder ohne größere Auswürfe zu erzielen waren.

Mit dem Parametersatz wurden im Anschluss erste Musterfolien im Siebrahmen für die Ausstellung hergestellt, die allerdings nur einige Lochlinien aufwiesen. Für eine vollständige Realisierung einer Siebdruckfolien fehlten noch weitere Optimierungsschritte.

3.1.8 AP 4.1: Spezifikation der technologischen und prozessseitigen Anforderungen von Schablonen mit flexibler Sperrschicht

Das Arbeitspaket wurde abgeschlossen. Die Bedingungen und Variationen für Schablonen und Testmuster wurden identifiziert und mit den Partnern abgestimmt. Es wurden Edelstahlfolien in der Stärke von 12.5µm in 300mm ausgewählt. Siebrahmengröße soll 15“ sein. An Sperrschichten wurden untersucht Polyimidfolie (Produktionsstandard in Asien) und Emulsionen der Partner in Dicken von ca. 10µm.

3.1.9 AP 4.2: Evaluierung der optimalen Prozessbedingungen und Laser-Parameter zur selektiven Laser-Öffnung der flexiblen Sperrschicht

NBT hat Edelstahlfolien an Frintrup und KIWO bereitgestellt. Die Folien wurden in Siebrahmen gespannt und mit Sperrschicht beschichtet, damit die Partner LASER-Prozesse untersuchen konnten.

3.1.10 AP 4.3: Erarbeitung eines Prozesses zur kombinierten LASER Öffnung von Metallfolie und Sperrschicht in einem Schritt

NBT hat Edelstahlfolie an Frintrup und KIWO bereitgestellt. Die Folien wurden in Siebrahmen gespannt und mit Sperrschicht beschichtet, damit die Partner LASER-Prozesse untersuchen konnten.

Es wurde zudem ein Metallisierungskonzept, beispielsweise für Photovoltaikzellen, verfolgt bei dem die Edelstahlfolie für den ersten Druck deckungsgleich mit der

Sperrschicht strukturiert wird. Im zweiten Druck sollte dann die komplette Leiterbahn in der Sperrschicht selbstjustierend auf den ersten Druck positioniert werden.

Metallisierungskonzept (Querschnitt)

- Druck 1, **Metallfolie** deckungsgleich mit **Emulsion**



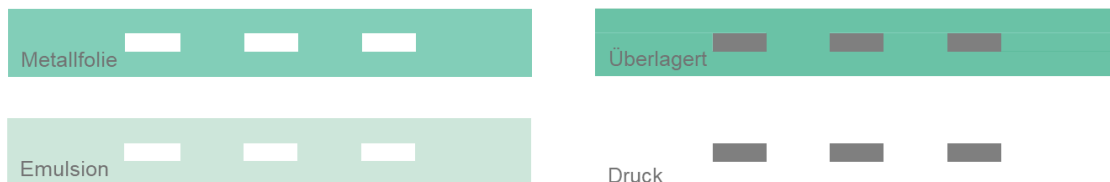
- Druck 2, **Metallfolie** mit **Emulsion** für kompletten Finger; Pastendruck nur durch Folienöffnung



Abb. 26 Metallisierungskonzept im Querschnitt

Metallisierungskonzept (Draufsicht)

- Druck 1, **Metallfolie** deckungsgleich mit **Emulsion**



- Druck 2, **Metallfolie** mit **Emulsion** für kompletten Finger; Pastendruck nur durch Folienöffnung

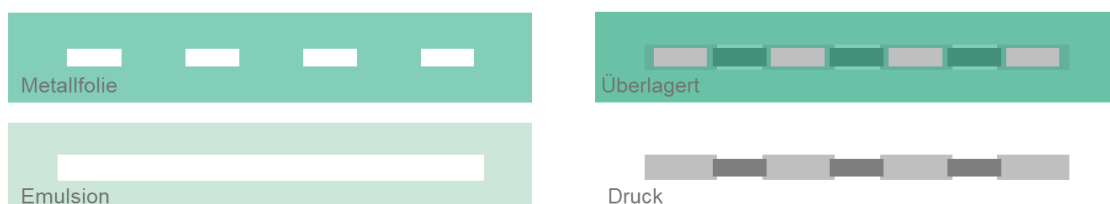


Abb. 27 Metallisierungskonzept in der Draufsicht

3.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Kosten bzw. Ausgaben entfielen zum größten Teil (97,8 %) auf die Position 0837 Personalkosten, 1,1 % der Ausgaben wurden für Material benötigt, 1,13 % für Reisen. Die Nachkalkulation hat ergeben, dass die Gesamtvorkalkulation um 1,4 % überschritten wurde.

3.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle durchgeführten Versuche und geleisteten Arbeiten sind im finanziellen Rahmen des Projektantrages geblieben.

Die kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um drei Monate war notwendig, um Verzögerungen bei der Verfügbarkeit der LASER-Anlage aufzuholen und Muster zu fertigen.

Daher bestätigen wir, dass alle Arbeiten und Aufwendungen der Zielerreichung dienen sowie notwendig und angemessen waren.

3.4 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse und fortgeschriebener Verwertungsplan

Die Ergebnisse des Vorhabens sind für NBT unter verschiedenen Aspekten von Nutzen.

Mit den erzielten Ergebnissen wird NBT in die Lage versetzt, Siebdrucksiebe auf Basis von Metallfolien wieder am Markt zu bewerben. Mit dem Konzept der LASER Strukturierung kann das Produkt aller Voraussicht nach wirtschaftlich und in ausreichender Menge für die Solarbranche hergestellt werden. Es sind allerdings noch weitere Entwicklungsschritte nötig, um den Durchsatz und die benötigten Mengen für Produktionsaufgaben darzustellen. Es konnten aber wesentliche technische Schritte erreicht werden, um Musterherstellungen für Kundenanwendungen umzusetzen.

Die technischen Ergebnisse hinsichtlich der Reduzierung der Strukturgröße sind so vielversprechend, dass NBT neue Vorhaben für andere Anwendungsgebiete verfolgen wird. Dies dient dann der Erweiterung des Produktportfolios. Insofern verspricht sich NBT in dieser Hinsicht eine Vorreiterrolle.

Innerhalb des Projektes wurden die Konzepte für die Fertigung von strukturierten Edelstahlfolien weiterentwickelt. Die Ergebnisse des Projektes sind wichtige Grundlage für die weitere Entwicklung von industrietauglichen Umsetzungen des Konzeptes und vielversprechenden Verwertungsmöglichkeiten.

Die neunten Konzepte und Ideen führen schließlich zu neuen Projektvorhaben. Ein Antrag für ein neues Fördervorhaben wurde bereits eingereicht.

Die Ergebnisse zum Elektropolieren von Edelstahl sind auch in anderen Feldern für NBT von Bedeutung. NBT ist spezialisiert auf Sonderprozesse bei Galvanik und Nassätzprozessen. Das Verfahren des Elektropolierens wird in aktuellen Kundenanwendungen bereits in Erwägung gezogen.

3.5 Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Abgesehen von den Arbeiten der Projektpartner sind NBT keine für das Projekt relevanten Fortschritte Dritter oder Schutzrechte, welche die Verwertung behindern würden, bekannt.

3.6 Geplante Veröffentlichung

Außerhalb dieses Abschlussberichtes wurden Ergebnisse des Projektes bisher wie folgt publiziert, bzw. eingereicht:

- A. Nair, J. Schneider, A. Lorenz, A. Brand, M. Linse, S. Upadhy, S. Shekar, N. Macharey, L. Moeller, H. Frintrup, A. Frintrup, S. Eichhorn, A. Künkele, S. Wagner, M. Becker, K. Froehner, J. Nekarda, F. Clement, Enhancing Solar Cell Metallization through Laser-Optimized Screen-Printing Technology, in: 12th Metallization and Interconnection Workshop, Chambéry, France, 2024.
- A.K. Nair, J. Schneider, A. Lorenz, A. Brand, M. Linse, S. Upadhy, S. Shekar, N. Macharey, L. Moeller, H. Frintrup, A. Frintrup, S. Eichhorn, A. Künkele, S. Wagner, M. Becker, K. Froehner, J. Nekarda, F. Clement, Evaluation of an innovative liquid barrier layer in laser-structured screens for enhanced solar cell metallization, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 290 (2025) 113732. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113732>.

4 Referenzen

- [1] ITRPV, "International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV)," 2019.
- [2] A. Lorenz, M. Linse, H. Frintrup, M. Jeitler, A. Mette, M. Lehner, R. Greutmann, H. Bocker, M. König, D. Erath, and 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)*, Brussels, Belgium, 2018, pp. 819–824.
- [3] J. C. Mankins, "Technology Readiness Level," White Paper, 1995. [Online] Available:
https://aiaa.kavi.com/apps/group_public/download.php/2212/TRLs_Mankins%20Paper_1995.pdf.
- [4] A. Gupta, F9900 Series from Brave C&H Gains Widespread Praise in Solar Industry for Successfully Revolutionizing Screen Printing Process. [Online] Available:
<https://www.eqmagpro.com/f9900-series-from-brave-ch-gains-widespread-praise-in-solar-industry-for-successfully-revolutionizing-screen-printing-process/>. Accessed on: May 29 2025.