Hannover, 30.06.2025

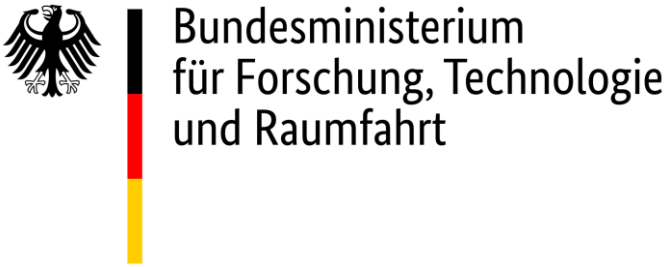
Laser Zentrum Hannover e.V.

Schlussbericht zum Projekt

„neoPEM - Neuartige Katalysatoranbindung durch definierte, mikroporöse Schichten in der PEM Elektrolyse mittels Laserpräzisionsbearbeitung“

Förderkennzeichen: 03SF0762B

Projektlaufzeit: 01.03.2024 – 31.12.2024



Kurzfassung

Ziel des Projekts Neo-PEM ist die erhebliche Steigerung der Effizienz in der PEM-Wasserelektrolyse durch den Einsatz von neuartigen mikroporösen Schichten (engl.: microporous layer (MPL)) aus Titan unter Verwendung hochmoderner Laser-Fertigungstechnologien bei gleichzeitiger Reduktion von Produktionskosten und des kritischen Katalysatormaterials. Grundlage hierfür sind die immer leistungsfähigeren ultrakurzgepulsten Lasersysteme, mit denen eine definierte Ablation nahezu aller Materialien möglich ist. Diese MPLs sollen zwischen der anodenseitigen porösen Transport Schicht (PTL) und der Katalysatorschicht eingebracht werden. Konkret soll damit die Kontaktierung der anodenseitigen Katalysatorschicht optimiert werden und dadurch die weitere Performancesteigerung und eine weitere Reduktion der Katalysatorbeladung (Iridium) ermöglicht werden. Dadurch können kritische Rohstoffe eingespart und Betriebs- und Investitionskosten signifikant gesenkt werden. Des Weiteren ermöglicht eine solche neuartige Schicht auch den Markteintritt weiterer Zulieferer für Elektrolysekomponenten, was für den Markthochlauf eine wichtige Unterstützung darstellt.

Neo-PEM befasst sich insbesondere mit der Verbesserung der Katalysatorkontaktierung mittels einer definiert perforierten MPL. Aktuell wird die Kontaktierung der Katalysatorschicht mittels makroporösen PTLs realisiert. Diese PTLs bestehen meist aus gesinterten Titan-Fäden/-Pulvern oder aus Titan-Streckgittern. Diese Titan-PTLs sind ein entscheidender Kostenpunkt und bisher kaum bis gar nicht für Elektrolyseanforderungen optimiert. Sie stammen aus der Filterindustrie, wo sie als Filtermedien bzw. Sperrschicht eingesetzt werden [AYE19, BAB17]. Des Weiteren ist Titan ein kritischer Rohstoff. In den letzten Jahren wurde die Relevanz dieser Komponente in Bezug auf die Leistungsfähigkeit sowie die Langlebigkeit und damit die Effizienz herausgestellt. Erste Ansätze zeigten bereits ein großes Optimierungspotenzial auf. So wurde die Struktur der metallischen PTLs (Porosität, Partikel- bzw. Faser- und Porendurchmesser) in relativ engen Grenzen variiert oder die Titanoxid-Oberfläche mit Schutzschichten auf Basis von Au, TiN, Pt, und IrOx beschichtet, oder chemisch über Ätzvorgänge verändert [BAB17, CAR13, FEN17, BYS18]. MPLs wurden allerdings bis jetzt nur spärlich untersucht [LET16]. Insbesondere die weitere Reduzierung der Katalysatorbeladung erfordert eine verbesserte Anbindung der Katalysatorschichten und eine Verbesserung durch die Beschichtung der PTL. Dies wäre mit definierten PTLs/MPLs deutlich einfacher. Diese Punkte sind Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, stehen allerdings weiterhin am Anfang, wobei grundlegende Zusammenhänge oft noch nicht vollkommen verstanden sind.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde nach der Festlegung der zu untersuchenden Materialien das Laserperforierverfahren für 10 µm dicke Folien aus Titan, Stahl und Niob entwickelt, die als Ausgangsmaterialien für die mikroporöse Schichten dienen. Dabei traten im Verlauf der Untersuchungen mehrere signifikante Herausforderungen auf. Zunächst war die Entwicklung einer geeigneten Handhabungstechnik für die dünnen und flexiblen Folien erforderlich, um diese während der Laserbearbeitung stabil und präzise zu positionieren. Darüber hinaus stellte sich die Laserbearbeitung von dünnen Metallfolien als besonders anspruchsvoll dar, da bei unzureichendem Wärmemanagement eine übermäßige Erwärmung der Folie auftreten kann. Diese führt zu einem Verzug des Materials, was nicht nur dazu führt, dass bestimmte Bereiche der Folie nicht perforiert werden, sondern auch ungewollte Welligkeiten entstehen, die die strukturelle Integrität der Folie beeinträchtigen. Solche Verformungen stellen ein Ausschusskriterium dar, die die weitere Verwendung der Folien in der PEM-Elektrolysezelle ausschließt.

Ein weiterer kritischer Aspekt bei der Entwicklung des Perforierprozesses war die Vermeidung der Oxidation des (Titan-)Materials während der Laserperforation. Die Bildung von Oxidschichten auf der Oberfläche der MPL würde die Perforation nicht nur optisch beeinträchtigen, sondern auch die Funktionalität der MPL in der PEM-Elektrolyse stark negativ beeinflussen, da eine oxidierte Titanoberfläche

die elektrochemischen Eigenschaften der Folie erheblich einschränkt. Aus diesem Grund wurden die Laserparameter und die Perforationsstrategie so gewählt, dass eine Oxidation verhindert und gleichzeitig eine effiziente Perforation gewährleistet ist.

Neben den genannten Herausforderungen stellte auch die Skalierung des Perforationsprozesses eine erhebliche Hürde dar. Obwohl im Rahmen dieses Projekts zunächst eine Mikrostruktur mit einer Fläche von lediglich 2 cm x 2 cm und einer Anzahl von 250.000 Löchern bei einem Lochdurchmesser von 20 µm und einem Abstand von 40 µm untersucht wurde, zeigte sich, dass bereits bei einer Reduzierung des Lochabstandes auf 20 µm die Lochanzahl exponentiell zunimmt. In einem solchen Szenario wären rund 1.000.000 Löcher erforderlich, was eine signifikante Steigerung der Prozessanforderungen mit sich bringt. Dies erforderte eine detaillierte Untersuchung und Anpassung der Laserprozessstrategien, um auch bei dieser erhöhten Lochdichte eine gleichbleibend hohe Qualität und Präzision der Perforationen sicherzustellen.

Alle identifizierten Herausforderungen wurden im Verlauf des Projekts erfolgreich durch eine Kombination aus gezielten Probenaufnahmen und der Entwicklung spezialisierter Laserprozessstrategien adressiert und erfolgreich umgesetzt. Die entwickelten Verfahren und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden detailliert beschrieben.

In der folgenden Abbildung sind zwei Versionen von MPLs zu sehen. Auf der linken Seite ist eine Raster-Elektronen-Mikroskop-Aufnahme einer 2,5 µm starken Folie mit Löchern von ca. 2 µm Durchmesser dargestellt. Die rechte Seite zeigt eine 10 µm starke Titanfolie mit Lochdurchmessern von ca. 20 µm, wobei eine für die Laserperforation typische konische Lochform gut erkennbar ist.

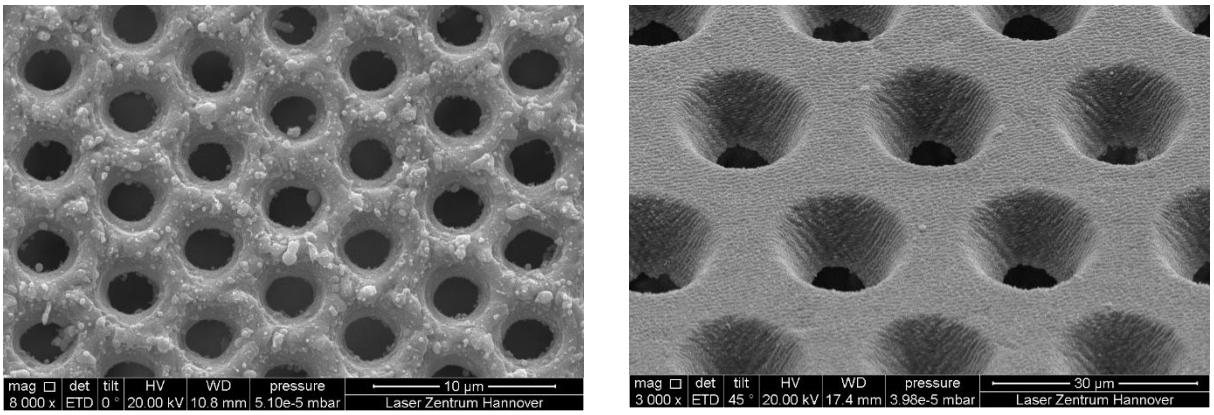


Abbildung 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen laserperforierter Titanfolien. Folie mit ca. 2,5 µm Stärke und Lochdurchmessern von etwa 2 µm (links). Folie mit ca. 10 µm Stärke und deutlich größeren Lochdurchmessern von rund 20 µm (rechts)s.

1. Beschreibung der Arbeitspakete, der durchgeführten Tätigkeiten im Vergleich zur Vorhabenbeschreibung und der Ergebnisse

Die Rolle des Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH) umfasst im Projekt neoPEM schwerpunktmäßig die Entwicklung eines laserbasierten Perforationsprozesses für Folienmaterialien, insbesondere aus Titan, Stahl und Niob, die als Ausgangsmaterialien für die mikroporösen Schichten (MPLs) dienen. Da Stahlfolie mit Abstand am günstigsten ist, wurden auch Versuche durchgeführt, diese kostengünstige Folie mit einem hochwertigen Material zu beschichten, um an der Oberfläche die gewünschten positiven Eigenschaften zu erzeugen. Nachdem die Vorbereitungen und Anpassungen für die ersten Perforationsversuche abgeschlossen sind (AP 1.1), werden in den folgenden Arbeitspaketen 1.2 und 1.3 verschiedene MPLs hergestellt und dem Projektpartner IfES für die Charakterisierungsuntersuchungen in

einer PEM-Elektrolysezelle übergeben. Abschließend wird der entwickelte Laserprozess durch verschiedene Skalierungsmaßnahmen weiter beschleunigt.

1.1. Grundlagen der behandelten Problemstellung

In diesem Abschnitt wird kurz auf die grundlegende Problemstellung bei laserbasierten Perforationsprozessen von dünnen Folienmaterialien eingegangen. Die Grundlagen und Funktionalität der MPL werden im Schlussbericht des Projektpartners aufgeführt.

Die Laser-Material-Wechselwirkungen sind hochkomplexe Prozesse, bei denen Photonen, Elektronen und Phononen miteinander interagieren, was zu unterschiedlichen Folgeprozessen führt. Die größte Herausforderung besteht darin, während des Perforationsprozesses eine Deformation des Materials zu vermeiden. In der folgenden Abbildung 2 ist eine laserperforierte Folie zu sehen, bei der eine Verformung stattgefunden hat, was zum einen zu Faltenbildung geführt hat und an gewissen Stellen die Perforation nicht mehr erfolgt ist. Sowohl die Faltenbildung als auch die fehlende Perforation sind Ausschlusskriterien, sodass diese Folien nicht mehr in PEM-Elektrolysezellen eingesetzt werden können.

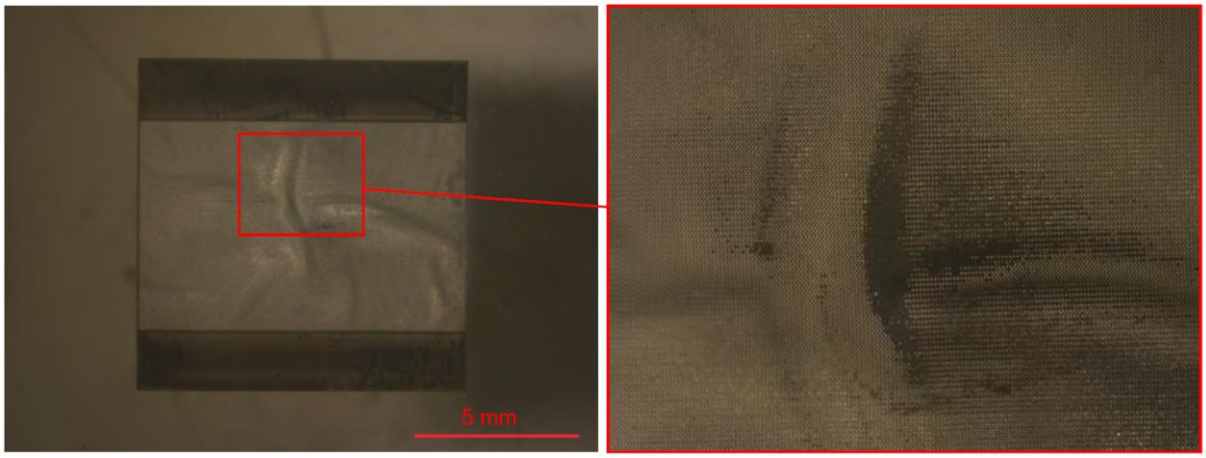


Abbildung 2: Mikroskopaufnahme einer laserperforierten Stahlfolie (links); Vergrößerung einer Falte inkl. eines nicht perforierten Bereichs (rechts).

Es gibt vier Hauptmechanismen, die während der Laserbearbeitung von Materialien zu Deformationen führen können. Der Temperaturgradientenmechanismus (TGM) tritt auf, wenn durch die Laserbearbeitung ein vertikaler Temperaturgradient entlang der Werkstückdicke entsteht, der das Material zum Laser hin verbiegt. Diese plastische Verformung bleibt nach dem Abkühlen bestehen [BAC20]. Der Knickmechanismus (BM) basiert auf einem Temperaturgradienten entlang der Scanlinie, was insbesondere bei dünnen Materialien zu einer Biegung des Werkstücks führt. Die Richtung der Biegung kann variieren, abhängig von den Eigenspannungen im Material. Beim Stauchmechanismus (UM) wird das Material durch eine geringe Laserscangeschwindigkeit und eine höhere Werkstücksteifigkeit in der Scanrichtung verdichtet, wodurch es entlang des Scanpfads lokal dicker wird, ohne dass eine Biegung außerhalb der Ebene auftritt [BAC20]. Schließlich ist das Laser-Peen-Forming (LPF) ein mechanischer Prozess, der auf der Erzeugung von plastischen Deformationen durch einen hochenergetischen Laserimpuls basiert [TES22]. Dieser Impuls erzeugt auf der Oberfläche des Werkstücks einen Druck, der durch die Ausdehnung eines expandierenden Plasmas hervorgerufen wird, wodurch die Geometrie des Materials verändert wird. Im Gegensatz zu den thermischen Mechanismen führt LPF zu plastischen Veränderungen ohne signifikante thermische Auswirkungen und verursacht eine Biegung des Materials durch den mechanischen Druck [LOP22]. Alle vier Mechanismen beruhen auf unterschiedlichen Wechselwirkungen zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück, was zu variierenden Deformationsarten führt.

Eine weitere wichtige Problemstellung ist, dass es bei der Laserbearbeitung von Titan in der Regel zur Bildung von Titanoxid auf der Oberfläche des Materials kommt. Dies geschieht aufgrund der hohen Temperaturen, die während des Laserprozesses erzeugt werden. Der Laserstrahl bringt genügend Energie ein, um das Titan zu erwärmen, wodurch eine Reaktion mit dem Sauerstoff in der Luft stattfindet. Diese Reaktion führt zur Bildung von Titanoxid (TiO_2), einer dichten, meist unerwünschten Oxidschicht. Diese Schicht kann die Oberfläche des Materials verändern und die gewünschten Eigenschaften beeinträchtigen, da sie die elektrochemische Reaktivität des Titans negativ beeinflusst und es für viele Anwendungen, wie etwa die PEM-Elektrolyse, unbrauchbar macht.

Die letzte Fragestellung, die in diesem Kontext behandelt wird, betrifft die Möglichkeit, neben Titan auch andere Materialien für die Herstellung von Mikroperforations-Laserstrukturen (MPLs) zu verwenden. Insbesondere stellt sich die Frage, ob Stahlfolien, die im Vergleich zu Titanfolien deutlich kostengünstiger sind, als Alternative zur Titanfolie in Betracht gezogen werden können. Diese Überlegung ist von praktischer und wirtschaftlicher Relevanz, da die Verwendung von Stahl als Ausgangsmaterial nicht nur potenziell die Produktionskosten senken könnte, sondern auch deutlich besser verfügbar ist.

1.2. Prozessentwicklung zur Perforation von Metallfolien

Um die oben erwähnten Effekte der Deformationsprozesse zu unterbinden, wurde sowohl ein Femtosekundenlasersystem für den laserinduzierten Perforationsprozess eingesetzt als auch eine geeignete Perforationsstrategie verwendet. Als Femtosekundenlaser kam ein Coherent Monaco 1035 zum Einsatz. Dieser ermöglicht aufgrund der extrem kurzen Pulsdauern im Bereich von etwa 350 Femtosekunden eine materialschonende Bearbeitung. Die ultrakurzen Pulse führen dazu, dass die Energieeinbringung in das Material so schnell erfolgt, dass die thermischen Effekte lokal und nahezu sofort abklingen, bevor sich die Wärme signifikant im Material ausbreiten kann. Dadurch wird die thermische Diffusion minimiert, was zu einer geringeren Wärmebeeinflussung des Werkstücks führt. Diese kurze Wechselwirkungszeit verhindert die Entstehung thermisch bedingter Effekte wie Wärmeschäden, Materialverzug oder unerwünschte Ausdehnungen. Trotz der ultrakurzen Laserpulse kann es dennoch vorkommen, dass es zu Faltenbildung und nicht perforierten Bereichen kommt (siehe Abbildung 1). Daher wurden die Laserparameter und die Scanstrategie so angepasst, dass diese Effekte nicht mehr auftreten. Abbildung 3 zeigt exemplarisch die bereits optimierte Scanstrategie. Dabei steht jeder Punkt für einen Puls. Der Abstand zwischen den Pulsen ergibt sich aus der Scangeschwindigkeit und der Repetitionsrate des Lasers:

Bei einem definierten Abtragsdurchmesser d und einer festgelegten Repetitionsrate f ergibt sich als resultierende Scangeschwindigkeit v:

$$v = d * f$$

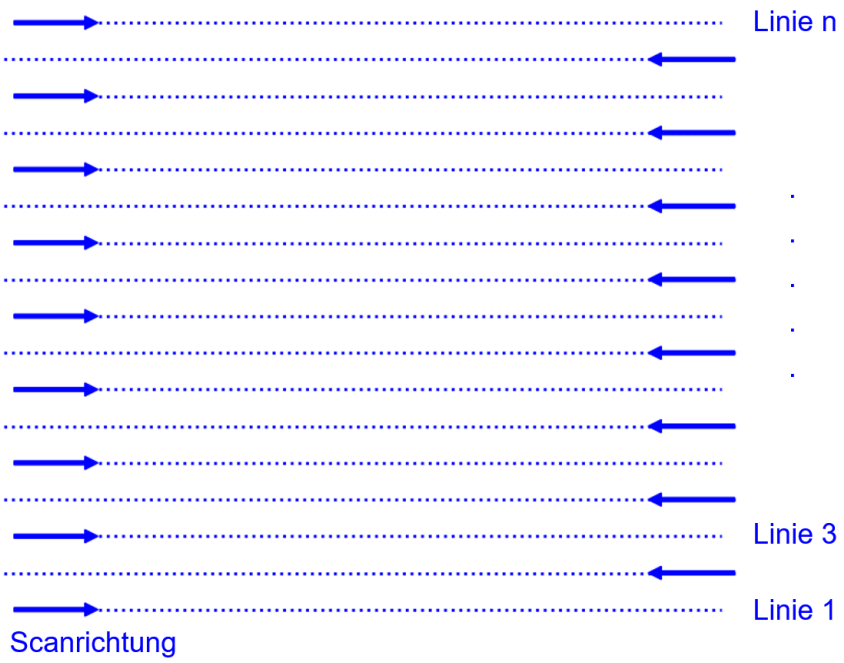


Abbildung 3: Optimierte Scanstrategie zur Perforation von Metallfolien.

Dadurch, dass die Linien mäanderförmig abgefahren werden und somit unnötig lange Sprungwege des Scanners vermieden werden, konnte die Prozesszeit bereits reduziert werden. Da jedoch für die Perforation einer 10 µm starken Titanfolie mehr als ein Laserpuls erforderlich ist, muss dieses Muster mehrfach abgefahren werden. Wie viele Überfahrten erforderlich sind, hängt maßgeblich von der verwendeten Fluenz ab.

In Abbildung 4 sind die Abtragsuntersuchungen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Fluenzwerten dargestellt, wobei der gemessene Strahlendurchmesser 14 µm betrug. Der Graph zeigt den quadratischen Lochdurchmesser D^2 in Abhängigkeit von der Fluenz ϕ_0 in einer logarithmischen Darstellung. Darüber hinaus wurden Fehlerbereiche integriert, um den Messfehler des Durchmessers besser zu identifizieren und somit die jeweilige Messreihe hinsichtlich ihrer Genauigkeit beurteilen zu können.

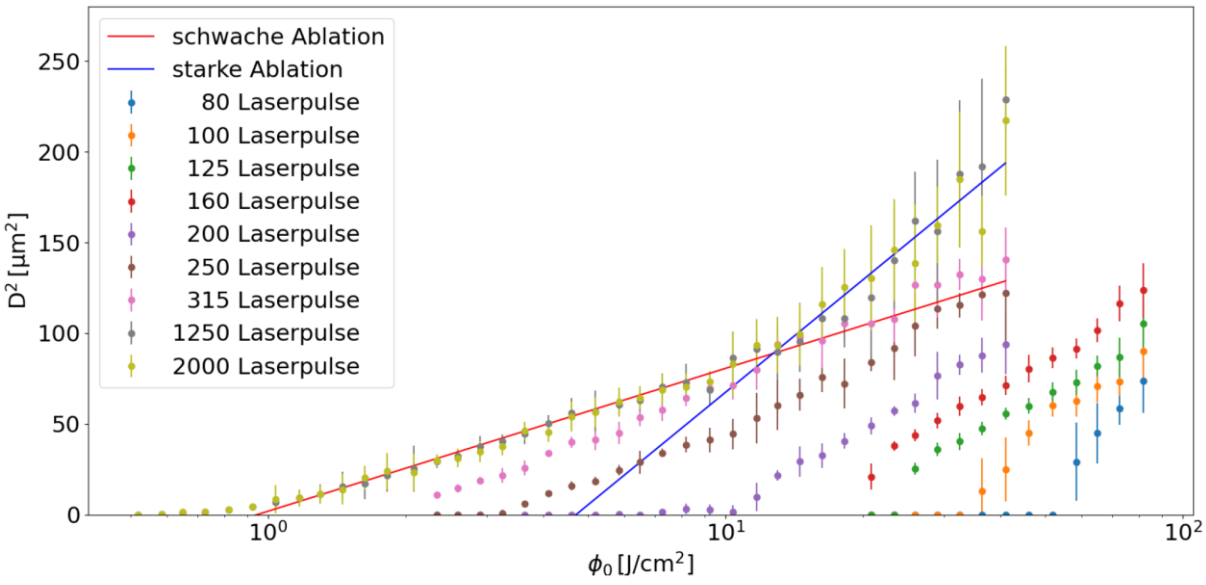


Abbildung 4: Entstandene Lochdurchmesser bei Variation der Pulsenergie und Anzahl der Laserpulse [ALB24].

In Abbildung 4 lässt sich für jede Anzahl von Pulsen bei Erhöhung der Pulsenergie eine Zunahme des Lochdurchmessers beobachten. Mit einer Erhöhung der Pulszahl erfolgt eine Verschiebung des Schnittpunkts mit der Achse der Fluenz in Richtung der D^2-Achse. Des Weiteren weisen alle Graphen die gleiche Form auf, sodass eine lineare Funktion zur Darstellung des ersten Teils geeignet ist. Ab einer Anzahl von 250 Pulsen pro Loch lassen sich zwei linear erscheinende Zusammenhänge erkennen. Der erste Zusammenhang stellt für 250 Pulse pro Loch die Lochdurchmesser von 0 - 10^1 J/cm^2 linear dar und der zweite ab 10^1 J/cm^2 einen linear ansteigenden Zusammenhang mit größerer Steigung. Am deutlichsten erkennbar sind die linear erscheinenden Zusammenhänge bei 2000 Pulsen, die in Abbildung 4 durch eine blaue und eine rote Funktion dargestellt sind. Mit abnehmender Pulsanzahl nimmt die Steigung der linearen Funktion der Lochdurchmesser zu, sodass sich die Lochdurchmesser bei geringer Pulsanzahl schneller als bei hoher Pulsanzahl vergrößern. Ab einer Pulsanzahl von 1000 verlaufen die Graphen nahezu identisch, sodass eine Änderung des gemessenen Lochdurchmessers bei dieser Pulsanzahl kaum zu erkennen ist. Der Schnittpunkt mit der x-Achse stellt dabei die Durchbohrschwelle dar. Für 2000 Pulse beträgt die Durchbohrschwelle 0,95 J/cm^2, für 200 Pulse 9,78 J/cm^2 und für 80 Pulse 46,5 J/cm^2 [ALB24].

Ab einer Anzahl von 250 Pulsen pro Loch kann das Abtragsverhalten mit zwei verschiedenen affinen logarithmischen Funktionen approximiert werden. Diese Art von Funktion kann einen linearen Zusammenhang bei logarithmischer Skalierung durch eine Funktion der Form a * log (x) + b darstellen. Diese linear erscheinenden Zusammenhänge entsprechen dem Modell der zwei Abtragsphasen. Die rote Regression repräsentiert die schwache Abtragsphase, während die blaue Regression die starke Abtragsphase darstellt.

Um eine Ablationseffizienz zu erzeugen, wird das abgetragene Volumen durch die Pulsenergie geteilt und in Abhängigkeit von der Fluenz dargestellt. Das abgetragene Volumen wird vereinfachend in Form eines Zylinders angenommen. Da der Eintrittslochdurchmesser und der Austrittslochdurchmesser sich unterscheiden, entsteht durch die Vereinfachung eine Ungenauigkeit, sodass der nachfolgende Graph als Näherungslösung betrachtet wird. Der Graph in Abbildung 5 stellt die Abtragseffizienzkurven dar, hierfür werden die entstandenen Lochdurchmesser in ein Volumen umgerechnet, durch die Pulsenergie und Anzahl der Pulse N geteilt und in Abhängigkeit von der Fluenz gesetzt.

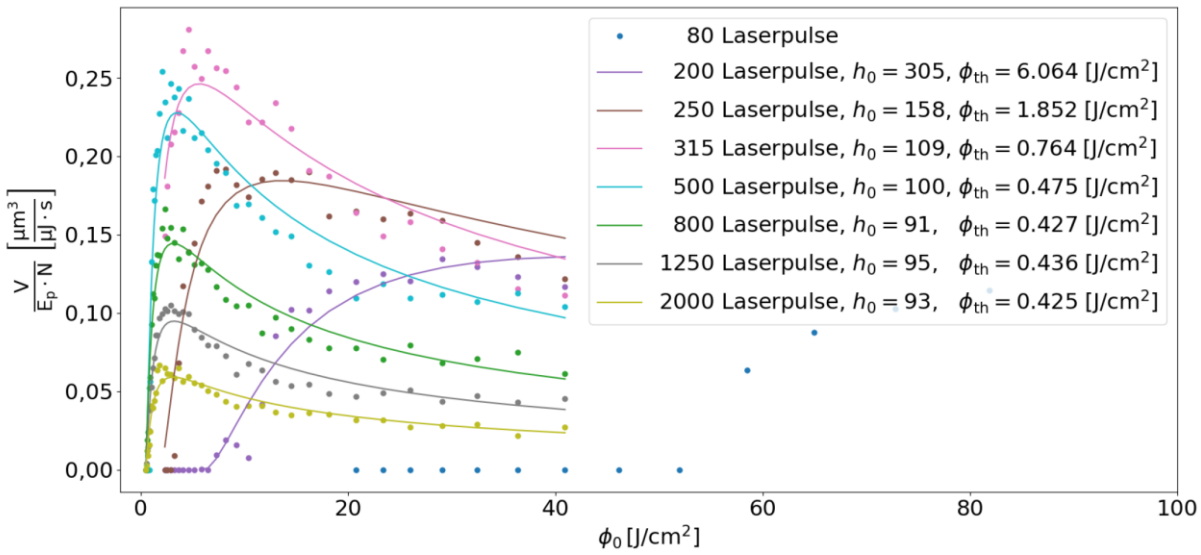


Abbildung 5: Effizienzplot nach Energie und Zeit in Abhängigkeit der Fluenz [ALB24].

Im Effizienzgraphen lassen sich die für diesen Graphen charakteristischen Maxima identifizieren. Das größte Maximum ist bei der Kurve mit 315 Pulsen pro Loch zu verzeichnen. Wenn die Anzahl der Pulse erhöht wird, bleibt die Form gleich, aber die Abtragseffizienz verschiebt sich um einen bestimmten Faktor und das Maximum ist weniger stark ausgeprägt. Mit abnehmender Pulsanzahl nimmt die Effizienz ab und das Maximum ist ab 200 Durchfahrten nicht mehr vorhanden. Die geringste Abtragseffizienz ist bei der Messreihe der 2000 Pulse zu verzeichnen. Die in Abbildung 5 dargestellten Maxima stellen die effizientesten Punkte bezüglich Abtragsvolumen, eingesetzter Pulsenergie und Zeit für die jeweilige Pulsanzahl dar. Daher stellen die in diesem Experiment gesuchten Arbeitspunkte für jede Pulszahlkurve den höchsten Punkt bzw. das globale Maximum dar. Die effektivsten Arbeitspunkte lassen sich bei einer Fluenz von 5,2 J/cm^2, 11,5 J/cm^2 und 35 J/cm^2 ablesen und entsprechen 315 Pulsen bei einer Pulsenergie von 4 µJ, 250 Pulsen bei einer Pulsenergie von 8,8 µJ und 200 Pulse bei einer Pulsenergie von 27 µJ [ALB24].

1.3. Herstellung von MPLs

In Abbildung 6 ist der für dieses Projekt entwickelte Aufbau zur Mikroperforation von Folienmaterialien dargestellt. Dieser umfasst neben einem klassischen Laserscanner eine Scannererweiterung (MSE-G2) der Firma Pulsar Photonics, die es ermöglicht, ein Mikroskopobjektiv in Kombination mit einem Laserscanner zu betreiben. Zwar ist das Scanfeld aufgrund der extrem geringen Brennweite begrenzt, jedoch kann der Vakuumtisch durch das darunterliegende Achssystem in xy-Richtung verschoben werden. Auf diese Weise können mehrere Scanfelder nebeneinander angeordnet werden, sodass die Größe von 2 cm x 2 cm trotz eines Scanfeldes von 500 µm x 500 µm erreicht werden kann. Zusätzlich umfasst die MSE-G2 eine Inline-Prozessbeobachtung sowie eine integrierte Beleuchtung. Auf der rechten Seite ist die für die MPL-Herstellung entwickelte Vakuumplatte zu sehen. Gut erkennbar ist die mittig eingebrachte Aussparung, die sicherstellt, dass nach der Perforation der Folie weder das darunterliegende Material geschädigt wird, noch sich Partikel unter der Folie absetzen können.

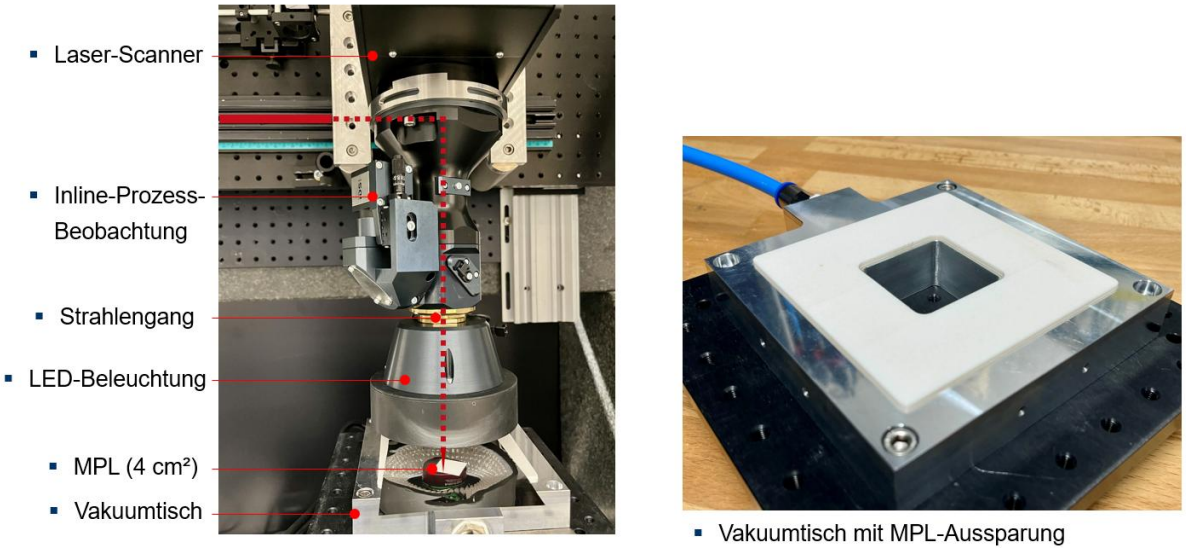


Abbildung 6: Aufbau für die Mikroperforation von Folienmaterialen (links); Sonderanfertigung eines Vakuumtischs mit integrierter Aussparung (rechts).

1.4. Prozessskalierung und -optimierung

Neben der angepassten Prozess- und Scanstrategie wurde ebenfalls ein diffraktives optisches Element (DOE) in das Bearbeitungs-Setup integriert. Da der Laser deutlich mehr Pulsenergie zur Verfügung hat als bei der Verwendung eines Singlespots erforderlich, stellt dies ein wirkungsvolles Verfahren dar, um die Perforationsrate zu erhöhen bzw. die Prozesszeit zu verkürzen. DOEs sind mikrostrukturierte optische Komponenten, die auf dem Prinzip der Lichtbeugung basieren und zur gezielten Modulation der Amplitude, Phase oder Ausbreitungsrichtung eines Lichtstrahls eingesetzt werden. Im Gegensatz zu klassischen, refraktiv oder reflektiv arbeitenden Optiken nutzen DOEs die Interferenz der gebeugten Wellenfronten, um definierte Intensitäts- oder Phasenverteilungen im Strahlverlauf zu erzeugen (vgl. Abb. 7). Dies wird durch das gezielte Einbringen von phasenmodulierenden Strukturen – etwa in Form von Rillen, Stufen oder Zonen mit variabler Tiefe oder Höhe – realisiert, die lokal definierte optische Weglängen erzeugen. Die Gestaltung dieser Mikrostrukturen erfolgt typischerweise über lithografische oder laserbasierte Herstellungsverfahren und ermöglicht eine hochpräzise Kontrolle über die resultierende Strahlformung. So kann der Rohstrahl in mehrere Teilstrahlen aufgespalten werden, sodass mehrere Foki entstehen. In dem vorliegenden Projekt wurde mit 9 Foki parallel gearbeitet. Die Prozesszeit skaliert linear mit der Anzahl der Foki, sodass sie ebenfalls um den Faktor 9 reduziert wurde.

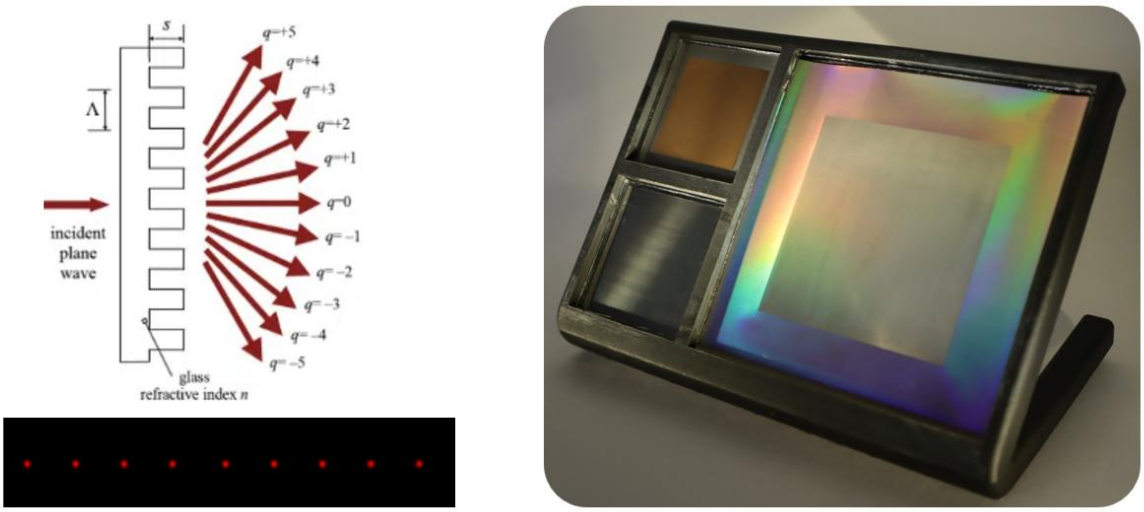


Abbildung 7: Links: Schematischer Aufbau und Funktionsprinzip eines diffraktiven optischen Elements. Rechts: Demonstrator zur Prozesskette der MPL-Herstellung: unten links das Ausgangsmaterial (10 µm Titanfolie), oben links eine goldbeschichtete mikroporöse Schicht (MPL), rechts eine auf 6 × 6 cm² skalierte MPL.

1.5. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts neoPEM wurde ein effizientes Verfahren zur laserinduzierten Perforation von Folienmaterialien zur Herstellung von mikroporösen Schichten entwickelt. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Optimierung des Laserperforationsprozesses für Titan-, Stahl- und Niobfolien gelegt, um eine präzise und kontrollierte Herstellung von mikroporösen Schichten (MPLs) zu ermöglichen. Zudem wurden Methoden zur Prozessskalierung entwickelt, um Mikrostrukturen effizient auf größeren Flächen anzuwenden und die Bearbeitungszeiten zu verkürzen. Abbildung 7 zeigt auf der rechten Seite einen Demonstrator mit unterschiedlichen Ausprägungen der MPLs. Unten links ist das Ausgangsmaterial zu sehen. Oben links ist eine goldbeschichtete MPL abgebildet. Auf der rechten Seite befindet sich eine auf 6 cm x 6 cm skalierte MPL, deren Rand nur eine laserinduzierte Nanostruktur aufweist, die ein typisches Leuchten zeigt.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sowie Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für das Laser Zentrum Hannover e.V. waren die wichtigsten Finanzierungspositionen Personalkosten in Höhe von 81.114,48 € und Investitionskosten sowie Reise- und Verbrauchsmaterialkosten von 43.500,00 € bzw. 26.000,00 €.

Die Personal- und Sachmittel wurden benötigt, um die beschriebenen Arbeiten an den Arbeitspaketen zu ermöglichen. Die Reisemittel, insbesondere für Messen und Fachtagungen, waren erforderlich, um die Projektergebnisse zu kommunizieren. Für die Folienmaterialien, die als Grundlage der MPLs dienen, opto-mechanischen Komponenten für die Anpassung des Lasersetups sowie die Beschichtungstargets für die Beschichtung der MPLs waren die Verbrauchsmaterialmittel vorgesehen.

3. Voraussichtlicher Nutzen und Einordnung in den Fortschritt im Stand der Technik auf dem Gebiet des Vorhabens

Das Mikroperforieren von Folienmaterialien bleibt ein hochaktuelles und vielversprechendes Forschungsfeld, das eine Vielzahl von industriellen und technologischen Anwendungsbereichen erschließt. Die Fortschritte in diesem Bereich ermöglichen es, nicht nur hochentwickelte und effizientere Komponenten für die Protonenaustauschmembran (PEM)-Elektrolyse zu produzieren, die für die nachhaltige Wasserstofferzeugung von zentraler Bedeutung sind, sondern bieten auch Chancen für den Einsatz in weiteren, bislang weniger berücksichtigten Bereichen. Ein solches Beispiel ist die Filtertechnik, in der mikrostrukturiertes Material potenziell neue, leistungsfähigere Lösungen für verschiedene Filtrationsprozesse bieten kann.

Darüber hinaus eröffnet die Forschung zur Mikroperforation weitere Anwendungsmöglichkeiten, die über den unmittelbaren Bereich der Wasserstofftechnologien hinausgehen. Einige der entwickelten Konzepte und Verfahren, wie die Prozessoptimierung, können in einer Vielzahl von Industriebranchen angewendet werden, insbesondere dort, wo es auf hochpräzise, skalierbare und effiziente Fertigungsmethoden ankommt. Ein entscheidender Aspekt, der auch in diesem Zusammenhang von Bedeutung ist, ist die Prozessskalierung sowie die Reduzierung der Verarbeitungszeiten. Besonders die Anwendung von Mikrostrukturen auf größeren Flächen stellt eine Herausforderung dar, die in vielen aktuellen Forschungsprojekten eine zentrale Rolle spielt. Hierdurch lassen sich nicht nur die Produktionskosten senken, sondern auch die Flexibilität und Skalierbarkeit von Fertigungsprozessen deutlich verbessern.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass dieses Projekt nicht nur einen bedeutenden Fortschritt im Bereich der nachhaltigen Wasserstofferzeugung durch die Weiterentwicklung der PEM-Elektrolyse erzielt hat, sondern auch die Grundlagen für viele weitere Anwendungen in angrenzenden Technologien und der Lasermaterialbearbeitung gelegt hat. Insbesondere die Erkenntnisse zur Prozessoptimierung und die Skalierbarkeit der Mikrostrukturierungsverfahren tragen dazu bei, den Stand der Technik in zahlreichen Bereichen weiter voranzutreiben und deren industrielle Umsetzung zu fördern.

4. Beiträge und Veröffentlichungen des LZH im Rahmen des Projekts

- Vortrag: „Wasserstofferzeugung mit Synergieeffekten und die Herausforderungen bei der Fachkräftegewinnung “, Wilhelmshaven, Germany.
- Poster: „Wasserstofferzeugung mit Synergieeffekten und die Herausforderungen bei der Fachkräftegewinnung “, Wilhelmshaven, Germany.
- Ausstellung eines Demonstrators auf der Hannover Messe 2025.

Literaturverzeichnis

[ALB24] Albrecht, M. H.; Bachelorarbeit, Leibniz Universität Hannover, 2024.

[AYE19] Ayers, K.; Danilovic, N.; Ouimet, R.; Carmo, M.; Pivovar, B.; Bornstein, M., Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng., 10 (2019) 219-239.

[BAB17] Babic, U. Suermann, M. Büchi, F.N. Gubler, L. Schmidt, T.J., J. Electrochem. Soc. 164 (2017) F387-F399.

[BAC20] Bachmann, A. L.; Dickey, M. D.; Lazarus, N. Quantum Beam Sci. 2020, 4 (4), 44.

[BYS18] Bystron, T.; Vesely, M.; Paidar, M.; Papakonstantinou, G.; Sundmacher, K.; Bensmann, B.; Hanke-Rauschenbach, R.; Bouzek, K., J. Appl. Electrochem. 48 (2018) 713-723.

[CAR13] Carmo, M.; Fritz, D. L.; Mergel, J.; Stolten, D., Int. J. Hydrogen Energy 38 (2013) 4901-4934.

[FEN17] Feng, Q.; Liu, G.; Wei, B.; Zhang, Z.; Li, H.; Wang, H., J. Power Sources 366 (2017) 33-55.

[LET16] Lettenmeier et al., J. Power Sources, Volume 311, (2016) Pages 153-158

[LOP22] López, J. M.; Munoz-Martin, D.; Moreno-Labella, J. J.; et al. Materials 2022, 15 (12), 4226.

[TES22] Tessmann, B. J.; Dissertation, Clemson University, 2022.