

Abschlussbericht - Verbundprojekt: »CoBiP«

| | |
|---|------------------------------------|
| | Förderkennzeichen: 03ETB020 |
| Vorhabenbezeichnung: | |
| Verbundprojekt: »CoBiP« - Kontinuierliche Rolle-zu-Rolle R2R Fertigung von metallischen Bipolarplatten BPP für Brennstoffzellen | |
| Laufzeit des Vorhabens: 1/20 – 06/23 | |

1. Kurze Darstellung des CoBiP Projektvorhabens

Die Endlichkeit der fossilen Ressourcen unserer Erde, aber auch das notwendige Bemühen die immerwährend steigenden Schadstoffemissionen zu reduzieren, stellt eine große Herausforderung der Zukunftssicherung unseres Planeten dar. Gleichzeitig existieren tiefgreifende Probleme in vielen Gebieten der Welt aufgrund von exponentiell wachsendem Verkehrsaufkommen und der dadurch an Bedeutung gewinnenden Umweltverschmutzung. Um der gewünschten Stückzahl von alternativen Energiewandlern in umweltschonender Weise nachzukommen, sollen mithilfe alternativer Ansätze, wie der Brennstoffzelle, regenerative Ressourcen wie Wasserstoff, die bei Energieüberschuss synthetisiert und z.B. in Druckbehältern gespeichert werden können, direkt und mit sehr hohem Wirkungsgrad in elektrische Energie umgesetzt werden. Oftmals wird diesbezüglich die Brennstoffzellentechnik in ihren vielen Einsatzgebieten als die Schlüsseltechnologie der Energiewende (Elektromobilität - Energiewende im Verkehr) gehandelt. Durch vergleichbar kurze Tankzeiten (3-5 min) und die in bestimmten Anwendungsfällen höheren Reichweiten gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen steigert die Brennstoffzellentechnik die Attraktivität der umweltschonenden Mobilität enorm. Der wichtigste Aspekt ist jedoch die Verwendung von rein erneuerbaren Ressourcen wie Wasserstoff, die in Zentren grüner Energien bei Überschuss durch Elektrolyseverfahren synthetisiert werden können. Hiermit liefert die Brennstoffzelle eine Antwort auf die Mobilitätsfrage der Zukunft, die durch den Einsatz von größtenteils recyclebaren Materialien eine sehr gute Umweltbilanz vorweisen kann. Durch diese erheblichen Vorteile gegenüber herkömmlichen Fahrzeugantrieben ist die Relevanz der Produktion von Brennstoffzellen und ihren Komponenten ebenfalls ein Schlüsselthema geworden. Gegen eine großtechnische Umsetzung und breite Marktdurchdringung dieser Technologie sprechen jedoch die hohen Produktionskosten und die mit den derzeitigen Produktionsmethoden geringen Fertigungskapazitäten von Hauptbestandteilen einer Zelle. Ein essenzieller Bestandteil und Kostenträger der Brennstoffzelle, der die zuvor genannten Problematiken in der Produktion aufzeigt, wird durch die BPP dargestellt, wobei diese bis zu 30 % und damit einen entscheidenden Teil der Gesamtkosten einer Zelle ausmachen kann. In PEM-Brennstoffzellen werden Wasserstoff und Sauerstoff räumlich getrennt über elektrochemische Reaktionen zu Wasser unter Abgabe von elektrischer Energie und Wärme synthetisiert. Neben der Membran-Elektroden-Einheit MEA ist die BPP die zentrale Komponente der Wiederholeinheit eines Brennstoffzellenstacks. Die derzeitigen, favorisierten Produktionsschritte einer Platte aber erlauben insgesamt kein kosteneffizientes Gesamtkonzept bei zusätzlichem Einsatz von teuren Materialien und langwierigen, batchweisen mit langen Transportwegen verbundenen Prozessen zum Umformen und Beschichten. Deshalb hat das Projekt CoBiP zum Ziel, eine innovative Gesamtlösung von Walzpräge-, Laserschweiß- und -schneid-, sowie Beschichtungsprozessen für das Fertigen von qualitativ hochwertigen BPP zu schaffen. Durch die automatisierte und kontinuierliche R2R Konzeptionierung der Fertigungskette wird eine adaptierbare, autonome Lösung und eine erhebliche Effizienz- und Qualitätssteigerung der zugehörigen Wertschöpfungskette ermöglicht. Die Idee des CoBiP-Konsortiums liefert zudem einen Beitrag zu einer erfolgreichen Umsetzung der Brennstoffzellentechnologie, indem eine wirtschaftliche und kompakte, produktionstechnische Betrachtung der gesamten Fertigungsstrecke hocheffizienter BPP unter Verwertungsszenarien im Automobilkontext geschaffen wird. Mit R2R- oder Rolle-zu-Platte-Verfahren können flexible Materialien durch kontinuierliches Handhaben mehrerer Prozessschritte verarbeitet werden, so dass eine Möglichkeit geboten wird, den vom Markt und der Energiewende geforderten Stückzahlen nachzukommen. Über die Betrachtung einzelner Fertigungsprozesse und der Spezifikation der R2R-Module ist eine Prototypenfertigung mit einer Demonstratorlinie geplant, bis hin zu funktionalen Tests und Rückkopplung der Evaluationsergebnisse der Prozesse durch Prüfung eines Endanwenders in Verkehrsszenarien. Das elegante Verknüpfen von Fertigungsprozessen liefert dementsprechend entscheidende Möglichkeiten, die Schlüsseltechnologie der Brennstoffzelle in ihren bisherigen Produktionsproblemen erheblich zu verbessern und durch eine Zusammenführung der Prozesse zukünftig eine beschleunigte, weitestgehend materialunabhängige und

innovative Realisierung von verschiedensten BPP-Designs für Brennstoffzellen zu schaffen (Edelstahl, Titan, Aluminium). Gleichzeitig kann die Brennstoffzellentechnologie durch eine Reduktion der Kosten und Fertigungszeit einen erheblichen wirtschaftlichen Vorteil realisieren. So wird neben marktwirtschaftlicher Relevanz für die Brennstofftechnologie eine Innovation in der Produktion von alternativen Antrieben geschaffen, um zukünftige intelligente und umweltfreundliche Lösungen für die Mobilität, erhebliche Beiträge zum Klimaschutz sowie Ressourceneffizienz zu schaffen und die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Partner zu steigern.

Als fundamentaler Ansatz wird eine neuartige Adaption des modularen R2R Systems angestrebt, um metallische Folien unter 200 μm Dicke unter Einhaltung von Aspektverhältnissen mikrogeometrisch umzuformen. Die typischen Dimensionen der BPP-Designs fordern Kanäle von unter 1 mm Breite und 0,5 mm Höhe mit Einlassumformungen für die Zuführung von Gas, um die reaktiven Gase effizient zu verteilen. Die in diesem Projekt gefertigten BPP zielen auf Spezifikationen unter 0,4 kg/kW Plattengewicht bei einer elektrischen Leitfähigkeit von über 100 S/cm und einer Biegefestigkeit von mindestens 25 MPa ab. Die Module der R2R-Prozesskette lassen sich unterteilen in den Walzprägeprozess bzw. der Umformung der metallischen Werkstoffe, dem Laserschweiß- und Laserschneidprozess und dem Beschichtungsprozess gefolgt von dem späteren Auslösen. Als fundamentale Vorarbeit kann die simulationsgestützte Auswahl eines Designs in Verknüpfung mit einer strukturmechanischen Simulation zur Überprüfung der Umformbarkeit und die darauffolgende Strukturierung der Walzen adressiert werden. Dies beschreibt einen Prozessblock, der als Gesamtheit der Fertigung vorgelagert ist und die Iterationsschleifen bei Beauftragungen eines Anwenders drastisch verkürzt. Die Interaktion durch die Verknüpfung der verschiedenen Prozesse erfordert eine gemeinsame Forschungsarbeit, in der das Endprodukt massentauglich, aber qualitätsgenau gefertigt werden kann. Für kontinuierliche Prozesse im Massenmarkt ist eine etablierte technologische Lösung das R2R Verfahren. Hier werden über den Einsatz von Walzenmodulen verschiedenste Prozesse und Technologien kontinuierlich verknüpft und so eine zusammenhängende Fertigungskette geschaffen. So wird das in diesem Forschungsvorhaben entwickelte R2R System benutzt, um mittels eines Auf- und Abrollprozesses ein beispielsweise aus Edelstahl 316SS (1.4404) bestehendes Coil der Breite bis zu 300 mm durch die Module zu verfahren. Über die Auf- und Abrollwalzen wird die Bahnspannung in dem Modul gesteuert, so dass die Mikro-Umformung mit dem Kalandersystem bestmöglich ablaufen kann. Für eine geeignete Walzenstruktur wird am Forschungszentrum Jülich in Simulationen eine Struktur der BPP ausgelegt. Hierbei wird mittels einer strukturmechanischen Simulation am Fraunhofer IPT geprüft, ob die Umsetzbarkeit der Formen in einem Kalandersystem gegeben ist (Prüfprozess). Zusätzlich werden mögliche Prozessparameter für die Durchführung der späteren Fertigung gesammelt und in einem Design-Clearance Dokument festgelegt. Die Mikro-Umformung der metallischen Folien wird über ein Kalandersystem der Matthews International GmbH in diesem Forschungsvorhaben durchgeführt. Die metallische Folie wird anschließend durch Umformwalzen, die über Strukturierungsverfahren das Positiv bzw. Negativ des BPP-Designs tragen, in einem Prägeprozess strukturgenau umgeformt. In diesem Umformschritt werden die präzise gefertigten Hartmetallwalzen mit definierter Kraft aufeinandergepresst und präzise gesteuert. In einem nächsten Schritt werden die umgeformten Plattenhälften in einem R2R-Modul zuerst lasergeschweißt und die geforderten Konturen anschließend lasergeschnitten. Für das R2R-Modul ist der Einsatz faserbasierter Laserstrahlquellen vorgesehen. Beim Laserstrahlschweißen wird durch gezielte Einbringung von Strahlungsenergie in die Auflageflächen der Plattenhälften Material lokal aufgeschmolzen und zu einem Werkstoffverbund konsolidiert. Durch die Kombination aus Bandvorschub und hochdynamischen Strahlableitungssystemen kann eine kontinuierliche Fertigung der BPP hinsichtlich des Schweißprozesses realisiert werden. Hierbei sind insbesondere die Kernaspekte Bestrahlungsstrategie, Synchronisierung der unterschiedlichen Vorschubbewegungen und die Prozessentwicklung zu betrachten. Die Anforderungen nach einer gasdichten Fügeverbindung stellen große Herausforderungen an die Auslegung der Spanntechnik dar, welche ebenfalls an einen kontinuierlichen Produktionsverlauf angepasst sein muss. Die frühzeitige Identifizierung von Fehlteilen durch eine Prozessüberwachung während des laserbasierten Fügeprozesses kann weitere wertschöpfende Prozessschritte an eigentlich defekten Bauteilen vermeiden und damit zur Kostensenkung beitragen. Durch das integrierte Laserschneidwerkzeug werden die erforderlichen Ausschnitte und bis auf Mikrostege auch die Umfangskontur der BPP eingebracht. Im Bereich der integrierten Kühlkanäle wird durch Anpassen der Prozessparameter dafür gesorgt, dass die doppelwandige Anordnung mit einem Spalt, der um ein Mehrfaches größer als die Materialdicke ist, Grat- und Partikelfrei geschnitten wird. Durch eine innovative Leistungsmodulation wird zudem dafür gesorgt, dass trotz variierender Bahngeschwindigkeiten und Bauteilgeometrien die Laserschweiß- und -

schneidprozesse den jeweils optimalen Arbeitspunkt einhalten und dabei eine Konturgenauigkeit im Bereich von $\pm 50 \mu\text{m}$ sicherstellen. Für das Laserschweißen ist ein zusätzliches Spannmodul in der R2R Fertigungskette vorgesehen, mit dem ein Nullspalt zwischen den Coils bzw. umgeformten BPP-Hälften erzeugt werden kann. In dem Beschichtungsmodul der Precors GmbH GmbH, das grundsätzlich aus technischer Perspektive in diese Fertigungskette integrierbar ist, wird die BPP mit einer nanometerdicken, kohlenstoffbasierten Schicht versehen. Die Wahl des Schichtmaterials und der Prozessparameter hängen in großem Maße von dem verwendeten metallischen Werkstoff und seiner Geometrie ab, welche es über Versuchsreihen in diesem Vorhaben zu bestimmen gilt. In Prozessparameterstudien werden über Versuchsreihen zur Oberflächenaktivierung, zu Nachbehandlungsmethoden und dem Benetzungsverhalten die Qualität der BPP gesichert. Das Benetzungsverhalten und der damit in Zusammenhang stehende Wasserhaushalt haben großen Einfluss auf den Zellbetrieb wegen der möglicherweise veränderten Zuführung der Reaktionsgase. Da die Beschichtung dem Laserschweißen und -schneiden nachgelagert ist, können in diesem Projekt die Beschichtungsversuchsreihen an die Precors GmbH GmbH ausgelagert bzw. iterativ durchgeführt werden. Im Anschluss an die Inbetriebnahme und Optimierung des Steuerungs- und Regelungskonzepts der Fertigungskette am Fraunhofer IPT werden funktionale Tests nachgelagert. Die Tests erfolgen in einem Teststand, der im Rahmen dieses Projektes beschafft und in die vorhandene Laborinfrastruktur des Forschungszentrums Jülich integriert wird. Neben der elektrischen Leistungsfähigkeit der Short-Stacks mit metallischen BPP liegen Aspekte wie das Wasser- und Wärmemanagement sowie die Langzeitstabilität im Fokus der Untersuchungen.

Der derzeitige Stand der Technik ermöglicht keine marktwirtschaftliche Produktion dieser geforderten Stückzahlen. Anforderungen und Spezifikationen, die BPP hinsichtlich ihrer Betriebssicherheit unter zu gewährleistende Lebenszyklen erfüllen müssen, stellen die Entwickler und Produzenten vor erhebliche Herausforderungen. Die Design- und Materialwahl bedingt die metallverarbeitende Umformtechnik und determiniert so die benötigten Beschichtungseigenschaften. Das letztendliche Problem ist es eine Fertigungsstrecke zu entwerfen, die durch die kontinuierliche Herstellung und die Wahl von geeigneten Herstellverfahren zeitsparend und kosteneffizient BPP fertigen kann. Derzeit existiert keine kontinuierliche, schnell adaptierbare Betrachtung der Prozesskette von der Designauslegung über die modulare Anpassung der Fertigungsstrecke bis hin zum letzten Zusammenfügen der BPP zu einer funktionalen Einheit. Hinsichtlich dieser Anforderungen ist das Hauptziel des Vorhabens von CoBiP, eine kontinuierliche Fertigungsstrecke im R2R Format durch das modulare Verknüpfen verschiedenster Fertigungstechnologien und -prozesse zu schaffen, um die Fertigungskette für BPP schnell, effizient und in wenigen Iterationen adaptierbar zu gestalten. Durch den modularen Aufbau der Fertigungsstrecke ermöglicht dieser Ansatz:

- Eine skalierbare, kontinuierliche Fertigung von innovativen BPP-Designs unter Kosteneffizienz und Zeitersparnispunkten
- Beschleunigte Auslegungs- und Fertigungsprozesse von der Idee bis zum Produkt für Brennstoffzellen verschiedenster Einsatzgebiete
- Signifikante Kosten- und Risikoreduktion in der BPP-Entwicklung

Durch die Umsetzung der vom CoBiP-Konsortium definierten Ziele werden die nachfolgenden Innovationen umgesetzt:

- Die simulationsgestützte Auswahl von BPP-Designs kann durch wenige Anpassungen der modularen Fertigungskette und des geeigneten Materials direkt in eine skalierbare Massenproduktion von BPP für die Verwendung in verschiedensten Brennstoffzellen umgesetzt werden.

Innovation: Minimierung von Iterationsschleifen und erhöhte Prozesseffizienz zur kontinuierlichen Fertigung von BPP, erhöhte Produktionsmenge in kürzerer Zeit bei Reduktion von Kosten, qualitätseffiziente, adaptierbare BPP-Design durch geeignete Materialwahl.

- Neuartige Fertigungsstrecke mit Steuerungs- und Regelungskonzept für die metallische Folienverarbeitung im Mikrometerbereich.

Innovation: Erhöhen der Präzision und Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit in der Umformung von metallischen Folien oder Blechen durch neue Konzepte bzw. standardisierte Verfahren in der Maschinensteuerung und -regelung.

- Präzises, kontinuierliches Mikro-Umformen von metallischen Folien oder Blechen im R2R Prozess für die Hochskalierung der Produktion bei gleichzeitiger Erschließung neuer Märkte.

Innovation: Die Mikro-Umformung und reproduzierbare Fertigung bei hohen Aspektverhältnissen von metallischen Materialien in kontinuierlicher Weise bei beschleunigter Produktion

- Fertigungskonforme Auslegung von BPP-Design durch Feedbackloops innerhalb der modularen Anpassung der einzelnen R2R Module.

Innovation: BPP werden in direkter Absprache und Rückmeldung mit Beteiligten der Fertigungskette ausgelegt, so dass zeitsparend entwickelt und umgesetzt werden kann.

- Entwicklung und Integration eines R2R Laserschweiß- und Laserschneidmoduls. Hier werden zwei Prozesse der Lasertechnik in einem R2R Modul vernetzt.

Innovation: Entwicklung eines Laserbearbeitungsmoduls zum kontinuierlichen und gasdichten Schweißen und Schneiden für die Verarbeitung doppelwandiger Metallbänder mit internen Hohlstrukturen

- Berücksichtigung von skalierbaren und wirtschaftlich effizienten Beschichtungsprozessen zur Erhöhung der Leistungsdichte und Langzeitstabilität von Brennstoffzellen.

Innovation: Integration einer neuartigen Beschichtungstechnologie ohne Verwendung von teuren und seltenen Materialien, vakuumbasierten Abscheidungsprozessen sowie hohen Prozesstemperaturen.

In Gesamtheit wird durch CoBiP die Möglichkeit gegeben neuartige, kosteneffiziente und qualitativ hochwertige BPP zu fertigen, so dass dem Markt in seinem Wunsch nach hohen Stückzahlen unter Berücksichtigung wichtiger Qualitätsmerkmale nachgekommen werden kann. Es wird eine zusammenhängende Fertigungsstrecke aufgebaut, die durch ihren Innovationsgehalt die derzeitigen Fertigungsverfahren in einer gesamtheitlichen Lösung ablösen kann. Die Innovation bietet zudem die Möglichkeit ein bedeutender Anlaufpunkt für alternative Energiewandler zu werden, indem der Wissensaustausch zwischen den Projektbeteiligten aus Wissenschaft, Mittelstand und Wirtschaft in besonderem Maße gefördert wird.

Das Projektvorhaben CoBiP mit Start am 1.1.2020 wurde stark durch die COVID-19-Pandemie beeinflusst. Die stark erhöhten Lieferzeiten und Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Entwicklung, dem Aufbau und der Inbetriebnahme von Maschinen führten in den vergangenen Projektzeiträumen zu mehreren Verzögerungen und Anpassungen im Projektverlauf. Mit den aufgetretenen Lieferschwierigkeiten essenzieller Komponenten wurde eine Verlängerung der Gesamtprojektdauer begründet. Weitere pandemiebedingte Verzögerungen hatten starken Einfluss auf den Projektzeitraum und die durchgeführten Experimente. Anpassungen des Projektverlaufes sind in den Arbeitspaketen beschrieben. Der Projektverlauf ist in dem nachfolgenden Gantt-Chart in Abbildung 1 dargestellt. Das Projektvorhaben CoBiP wurde in sechs Arbeitspaketen APs bearbeitet. Im AP1 wird die kontinuierlich zu fertigende BPP über den Anwendungsfall und die Limitationen der Fertigungstechnologien spezifiziert und im Anschluss konstruiert. Zusätzlich werden sowohl fluidische wie prozessseitige Simulationen durchgeführt. Erste Designvarianten werden erprobt. Das Walzprägen, wie der Laserschweiß- und -schneidprozess werden in den APs 2-3 erst prototypisch erforscht und dann in die R2R-Gesamtanlage transferiert. Die Beschichtung der BPPs wird in AP4 erforscht und optimiert. Die R2R-Gesamtanlage wird in AP5 entwickelt, konstruiert, beschafft und im Anschluss assembliert und in Betrieb genommen. Unterstützt werden die Arbeiten durch techno-ökonomische Analysen und Zelltests.

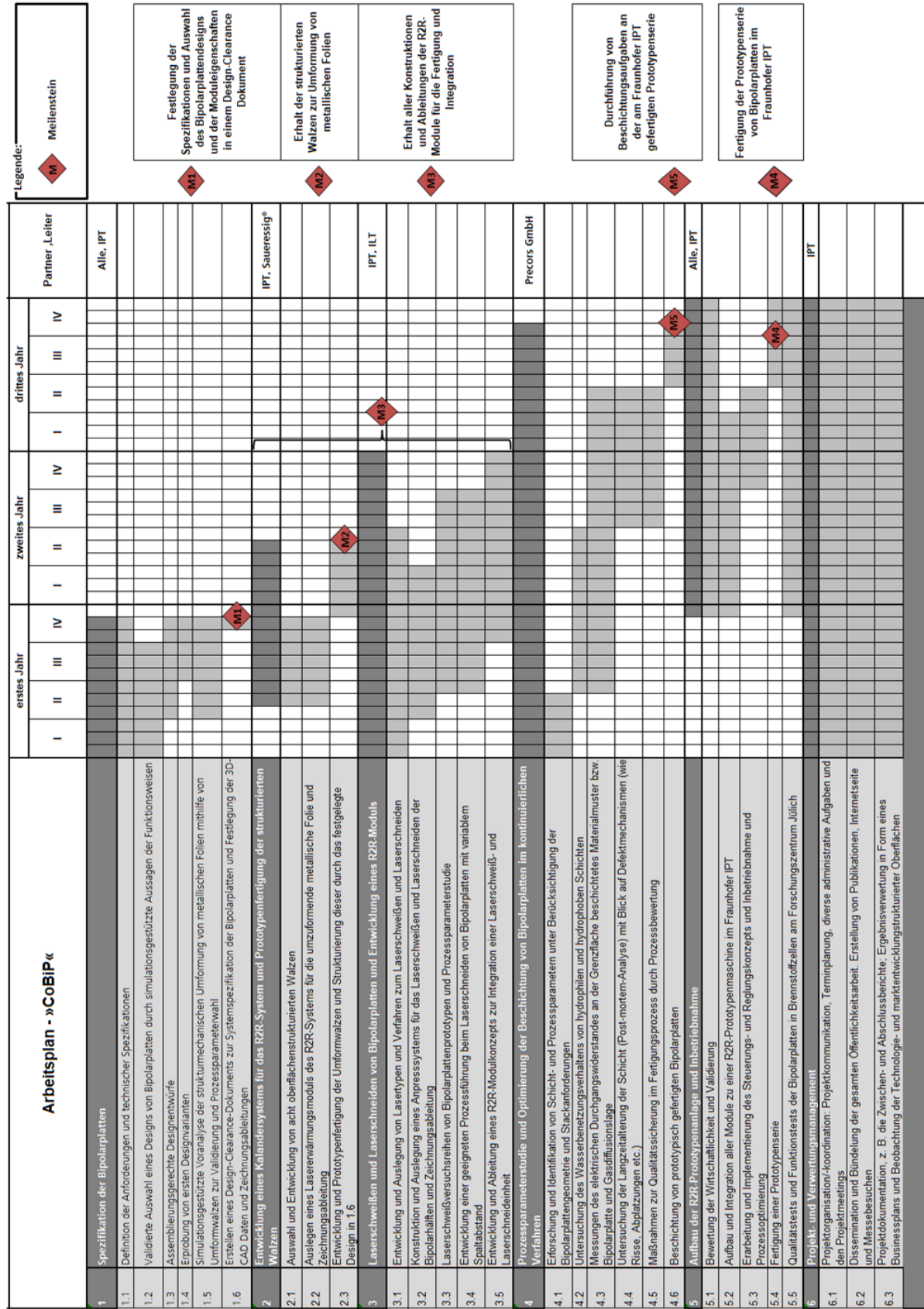


Abbildung 1: Gantt-Chart CoBiP Projektvorhaben

Im Folgenden wird der Stand der Technik für das Projektvorhaben beschrieben. Die BPP ist ein essenzieller Bestandteil einer PEM-Brennstoffzelle, in welcher Wasserstoff und Sauerstoff räumlich getrennt über elektrochemische Reaktionen zu Wasser unter Abgabe von elektrischer Energie und Wärme synthetisiert werden (auch andere Reaktionsgase möglich). Innerhalb der Brennstoffzelle hat die BPP deswegen zentrale Aufgaben der Trennung und Verteilung der Reaktionsgase über die gesamte aktive Fläche der Membran-Elektroden-Einheit, wobei viele Anwendungen von Brennstoffzellen mit vielen verschiedenen Designs existieren. Hier muss sichergestellt sein, dass die BPP eine vollständige und über viele Zyklen gesicherte Trennung der Reaktionsgase ermöglicht, da sonst chemische Reaktionen unkontrolliert ablaufen können und die Energiewandlung unterbrochen wird. Die Korrosionsbeständigkeit muss hier in besonderem Maße für lange Zeit gewährleistet sein, da eine Elektrodenfläche (Kathode) durch die Entstehung von Wasser bei den im Betrieb anliegenden Potenzialen und Temperaturen stark beansprucht wird. Gleichzeitig muss die BPP elektrisch leitfähig sein und bleiben, da die elektrische Energie über Kollektorplatten gesammelt und abgeleitet werden muss. Durch die Vernetzung der Kompetenzen des CoBiP-Konsortiums wird eine Iterationsschleife festgelegt und optimiert mit deren Hilfe die geeignete Design-, Material- und Prozessparameterwahl für die kontinuierliche Fertigung spezifischer BPP für Brennstoffzellen verschiedenster Anwendungen möglich ist. In Abgrenzung zum Stand der Technik wird es nunmehr möglich sein, das bestehende, kontinuierliche System auf neuartige Designs in wenigen Schleifen zu adaptieren und die kontinuierliche Fertigungsstrecke makroskopisch nur in geringem Maße unter Beibehaltung der Qualität zu verändern. Zusätzlich wird durch die Kombination, der sonst größtenteils schrittweise durchgeführten Prozesse, ein bedeutender Zeitvorteil geschaffen. Derzeitig auf dem Markt erhältliche BPP werden über schrittweise gereichte Fertigungsprozesse produziert. Hierbei werden Technologien wie das Kaltstanzen und -Prägen, Hydroforming und Rubber Pad Forming zum Umformen metallischer Platten, Physical Vapor Deposition (PVD) oder Chemical Vapor Deposition (CVD) zum Beschichten von korrosionsbeständigen Lagen und Laserschweißen zum Fügen verwendet. Über Stanzprozesse werden die Platten stückweise oder direkt von der Bahn mittels Werkzeuge umgeformt, so dass pro Stanz- oder Umformprozess eine diskrete Anzahl an BPP geformt wird. Dabei werden Kräfte bis zu 16000 kN pro Platte mit Flächen bis 320 cm² und ein Transportschritt zu der Beschichtungsstation notwendig. Durch die vollautomatisierte Fertigung und Verknüpfung von Modulen werden die ansonsten notwendigen Transportschritte nicht benötigt. Dies führt zu einer Zeit- und Kostenreduktion der Gesamtfertigung und zeigt den erheblichen Vorteil des CoBiP R2R-Konzepts. In einem von der NuCellSys GmbH bis 2008 gehaltenen Patent war die Strukturierung einer erwärmten Metallfolie mittels Umformwalzen in einem Kalendersystem bereits thematisiert, jedoch war die Umformung einseitig auf der metallischen Folie vorgesehen und die Aspektverhältnisse und Formschrägen in den hier zu formenden BPP in ihren Anforderungen für dieses Vorhaben zu gering. Im nächsten Schritt werden über das PVD- oder CVD-Verfahren eine auf das Ausgangsmaterial angepasste, wenige Mikro- oder Nanometer dicke Schicht beidseitig auf die BPP gebracht. Über das Verdampfen von Materialien, die die Korrosionsbeständigkeit und Leitfähigkeit der BPP erhöht, wird meist in einem Vakuum eine dünne gleichmäßige Schicht aufgetragen. Die Anzahl zu beschichtender Platten beschränkt sich hier auf die maximale Arbeitsfläche der Maschine. Die Herausforderung beim Laserstrahl-Mikroschweißen ist die vom BPP-Design geforderte Dichtheit der Schweißnähte zu garantieren. Gerade durch Prozessinstabilitäten können Fehler wie Poren, Auswürfe oder Humping auftreten, welche aufgrund der geringen zu fügenden Materialdicke häufig zu einer Perforierung und damit Beschädigung der BPP führen. Dabei kommen hauptsächlich hochbrillante Strahlquellen mit Fokussdurchmessern < 100 µm zum Einsatz, welche sich zum einen durch eine gezielte Energiebringung und zum anderen durch hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten (~ 1 m/s) auszeichnen. Mit Hilfe einer dem linearen Vorschub überlagerten Oszillationsbewegung lässt sich dabei der Anbindungsquerschnitt an die technischen Anforderungen nahezu beliebig anpassen und eine weitere gesteigerte Prozessstabilität erreichen. Das gasdichte Fügen von zwei Folien in einem kontinuierlichen R2R-Prozess, welche aufgrund der innenliegenden Kanalstruktur kein flächiges Anpressen zulassen, stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Beim Laserstrahlschneiden wird die Schmelze entweder durch einen Überschall-Schneidgasstrahl an der laserabgewandten Blechunterseite aus der entstehenden Schnittfuge ausgetrieben oder aber, ohne zusätzlichen Gasstrahl, zur Blechoberseite aus der sich bildenden Schnittfuge ausgetrieben (Remoteschneiden). Die Anwendung der Lasertechnik zum Schneiden von BPP wird bisher ausschließlich für die Produktion von Prototypen und Kleinserien für die Fertigung der Einzelplatten nach dem Umformprozess eingesetzt. Hauptgrund ist die hohe Flexibilität und Prozessgeschwindigkeit. Der kombinierte Einsatz, sowohl von Laserstrahlschneiden als auch -fügen in der Serienfertigung, scheitert aktuell allerdings noch an unzureichender Schnittqualität und Konturtreue beim Remoteschneiden. Sowohl der Gerad- als auch der Konturschnitt von variablen doppel- und dünnwandigen Strukturen mit lokal

variierendem Wandabstand, der bis zu einem Vielfachen der Gesamtwandstärke beträgt (innere Kanalstruktur der aus Einzelplatten zusammengefügt BPP), ist dagegen eine vollkommen neue, aber vielversprechende Aufgabe für das Laserstrahlschneiden. Insbesondere gilt es, ein Aufplatzen des Gasstrahls nach Durchtritt der oberen Materialschicht zu verhindern und eine saubere Führung des Schmelzaustriebs aus der doppelwandigen Schneidfuge ohne Ablagerungen zu gewährleisten. BPP werden derzeit überwiegend stückweise aus Edelstahl, Titan, Aluminium oder Graphit mit den oben beschriebenen Technologien gefertigt. Zudem gibt es weltweit nur wenige Hersteller, die auch sicherheitsrelevante Aspekte für die Verwendung in Autos bspw. erfüllen können, so dass wenige wirklich Einsatz finden. Neben den einzelnen Fertigungsschritten bestimmt die Anwendung die Wahl des Materials, welches einen bedeutenden Anteil an den Gesamtkosten des Systems ausmacht. Die langen Bearbeitungszeiten führen zudem dazu, dass die große Menge an BPP, die der Markt fordert, derzeit wirtschaftlich nicht umsetzbar ist. So werden vorwiegend Platten mit Maßen von 100 x 400 mm² verwendet. Die Entwicklung einer kontinuierlichen Produktionstechnik in einem R2R-Ansatz für bestimmte typische Dimensionen kontinuierlich zu machen, wird die Produktionsgeschwindigkeit, Qualität und geforderte Menge vom Markt erst möglich machen.

Im Projekt CoBiP soll deshalb eine weitestgehend materialunabhängige und kontinuierliche Fertigungsstrecke in einer R2R Variante entwickelt werden, die auf verschiedenste BPP-Designs effizient adaptiert werden kann. Metallische Folien (Vorder- und Rückseite) werden über ein Kalandersystem umgeformt und dann zu einer BPP in einem Laserschweißmodul zusammengefügt. Durch einen angegliederten Laserschneidprozess wird die Platte entformt. Anschließend werden die hergestellten BPP in einem bereits existierenden Prozess der Precors GmbH GmbH mit einer nanometerdicken, kohlenstoffbasierten Beschichtung versehen. Um die Funktionsfähigkeit der BPP vorherzusagen, werden die Designs simulationstechnisch ausgelegt. Über Simulationen werden zudem die Prozessparameter für das Kalanderprägen als auch des Laserbearbeitungsprozesses abgesichert.

2. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, z.B. des Förderprogramms (ggf. unter Angabe des Schwerpunktes), -soweit dies möglich ist-

Das Projektvorhaben CoBiP behandelt in großem Maße die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klima ausgeschriebenen förderpolitischen Ziele. Die Notwendigkeit der Förderung wird zudem durch Vorteile der Brennstoffzellen und deren möglicher Beitrag zur Besserung der Umweltsituation, dem Beitrag zu Umwelt- und Klimaschutz begründet. Die große Herausforderung der Zukunftssicherung bzw. eine gesamtgesellschaftliche Risikoversicherung unseres Planeten besteht in der Substitution fossiler Brennstoffe durch erneuerbare, schadstoffarme Energieträger. Gleichzeitig wächst in vielen Gebieten dieser Erde das Verkehrsaufkommen und die damit verbundene Umweltverschmutzung. Ein alternativer Energiewandler, speziell die Brennstoffzelle liefert eine exzellente Lösung für diese hier beschriebene Problematik und bedeutet einen Umschwung für die Elektromobilität. Die Reichweite mit Brennstoffzellen angetriebener Fahrzeuge ist im Vergleich zu batterieelektrischen Autos größer, bei viel kürzerer Ladezeit und besserer Umweltbilanz. Mit sehr hohem Wirkungsgrad können regenerative Ressourcen wie Wasserstoff direkt in elektrische Energie umgesetzt werden. Diese werden in speziellen Tanks gespeichert und können bei Energieüberschuss in der Produktion von elektrischer Energie in Windrädern beispielsweise über Elektrolyseverfahren synthetisiert werden. Zusätzlich lassen sich die Brennstoffzellenkomponenten nahezu ganz recyceln und liefern so die ideale, nachhaltige Lösung für die Antriebe der Zukunft. Das CoBiP Projektvorhaben plant zu diesem Zwecke den marktorientierten Ausbau erneuerbarer Energie durch neue Produktionsmöglichkeiten von BPP zu beschleunigen. Durch die Reduktion der Kosten von BPP, einem Hauptkostenträger von Brennstoffzellen, und der gleichzeitigen Qualitäts- und Effizienzsteigerung durch Erhöhung von Lebensdauern und der Energieeffizienz auf allen Systemebenen durch hocheffiziente, neuartige Verarbeitungsprozesse kann die Brennstoffzelle einen erheblichen Vorteil gegenüber anderen Energiewandlern realisieren und so zum Treiber der Energiewende werden. Die Umsetzung dieser Technologie im Verkehrssektor wird als Vorreiter in dieser Thematik einen erheblichen Umschwung auch für weitere Gebiete der Energieversorgung haben und so aus regenerativen Energien erzeugte, alternative Brennstoffe mit hoher Energiedichte wie Wasserstoff in besonderem Maße vorantreiben. Die Verbesserung und Zusammenführung von umweltgerechten Produktionsprozessen wird zudem durch eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung und über Verwertungsszenarien in Verkehrssituationen für den Verkehrsgebrauch optimiert, so dass die Marktorientierung und mögliche Energieinfrastrukturen als erheblicher Punkt mit in die Konzeption des Vorhabens einfließen. Hierfür werden relevante Fahrprofile

verwendet und so eine anwendungsnahe Produktion konzeptioniert, die durch die Standardisierung von Komponenten eine gesamtheitliche, gesellschaftsnahe Produktion gewährleisten kann. Dies stärkt nicht nur den Industriestandort, sondern auch die Vorreiterrolle Deutschlands für ein schadstoffarmes, mit erneuerbaren Energien gespeistes Verkehrswesen. Mit Projektende zielt CoBiP auf eine produktionstechnische Etablierung des Konsortiums im Bereich der Fertigung essenzieller Bestandteile von Brennstoffzellen ab. Die gesamte Wertschöpfungskette der Fertigung wird durch Unternehmen und Forschungsinstitute in Deutschland abgedeckt und stärkt damit den international anerkannten Produktionsstandort. Das Risiko dieses Projektes liegt in der Schwierigkeit der kontinuierlichen Umformung von Mikro-Geometrien mit metallischen Folien über ein R2R System und der kombinierten, kontinuierlichen Laserschweiß- und Laserschneideinheit. Dieses Vorhaben bietet jedoch großes Marktpotential, da die Energieversorgung mit der Brennstoffzelle eine elegante Lösung derzeitiger Probleme darstellt.

Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Berichtszeitraums in den jeweiligen Arbeits- und Unterarbeitspaketen dargestellt.

AP1: Spezifikation der BPP [Alle, IPT]; Laufzeit 01/20- 11/20

Im Rahmen von AP1 werden sämtliche Spezifikationen des BPP-Designs festgelegt, welche für die umsetzungsorientierte Durchführung des Projektes notwendig sind. Das Forschungszentrum Jülich wird über simulationsgestützte Aussagen und entsprechende praktische Voruntersuchungen ein Design entwickeln, das für die spätere Brennstoffzelle im Bereich der Gaszuführung optimiert ist. Die Anforderungen an das Design der BPP hinsichtlich der reaktiven Fläche, des Volumenstroms, Druckniveaus sowie der Lebensdauer werden von der STACK GmbH aus Produktperspektive in das Projekt eingebracht. Dabei spielt neben der Gestaltung der Medienverteilerstruktur auch die spätere Assemblierbarkeit eine wichtige Rolle. Die Anforderungen aus Produktionsperspektive, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Assemblierbarkeit der Bipolarplatte haben, wie beispielsweise das Verspannkonzept oder die Stapelung der Platten, werden von den Projektpartnern ausgearbeitet und eingebracht. Die Platten müssen über Elemente verfügen, die eine präzise Ausrichtung und Kontrolle der richtigen Assemblierung von außen ermöglichen. Zudem werden die ausgewählten Designs durch strukturmekanische Umformsimulationen der metallischen Folie auf Realisierbarkeit überprüft, um mögliche Prozessparameter vorherzusagen und nicht produzierbare Designs in einer Feedbackloop direkt ausschließen zu können. Grundlegende Anforderungen der integrierten Laserbearbeitung sowie Beschichtungsverfahren werden berücksichtigt. Während dieser Arbeiten werden allgemeingültige Zielgrößen und Designregeln für BPP definiert, so dass die Auslegung der BPP durch die direkte Verknüpfung von Funktions- und Produktionssimulation als vorgeschalteter Prüfprozess über den Stand der Technik hinausgeht. Es werden zudem Anforderungen aus der Anwenderperspektive im mobilen Einsatz hergeleitet. Dies hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Flowfield-Design, welches durch die Anforderungen an das Brennstoffzellen-System hinsichtlich Leistungsdichte, Druckniveau oder Zellgröße unterschiedlich gestaltet wird. Über die Zusammenführung wichtiger produktseitiger Ziel- und Kenngrößen, der Dimensionen der zu fertigenden BPP und dem damit festgelegten Anforderungsprofil für die Werkzeug- und Fertigungstechnik in einem Design-Clearance-Dokument, wird die Strukturierung der Prägewalzen im Kalandersystem in einem 3D-CAD-File definiert. Zudem werden die wichtigsten Kenngrößen der R2R-Module für die spätere Entwicklung definiert und wichtige Toleranzen der Designs und Fertigungskette in Verbindung mit Prozessparametern festgelegt.

M1: Festlegung der Spezifikationen und Auswahl des BPP-Designs und der Moduleigenschaften in einem Design-Clearance Dokument

Mit dem Meilenstein 1 (M1) wird das grundsätzliche BPP-Design im Verbundprojekt CoBiP festgelegt. In die Designauslegung fließen unter anderem Anwenderanforderungen (Betriebsbedingungen in der Automotive-Anwendung, Randbedingungen durch den BoP des verwendeten Stacks), darauf aufbauend CFD-Simulationsergebnisse und fertigungstechnische Limitationen der Fertigungsschritte Walzenumformung, Laserschweißen und –schneiden und des Beschichtungsprozesses ein. In mehreren Iterationsschleifen wird somit ein für den Brennstoffzellen funktionales CoBiP-BPP-Design festgelegt. Dieses wird im nachfolgenden Schritt in die Hartmetallwalzen strukturiert, über Laserstrukturierungs-

verfahren und nach der Umformung in Laserschweiß und –schneidprozessen gefügt und vereinzelt. Die so entstehende CoBiP-Bipolarplatte wird beschichtet und für Prüfstandtests mit realen Lastprofilen in Short-Stacks gestapelt. Der Meilenstein wurde erfolgreich erreicht und die das entstandene Dokument genutzt für die weitere Bearbeitung des Projektvorhabens CoBiP.

AP1.1: Definition der Anforderungen und technischer Spezifikationen [01/20-11/20]

Im Folgenden werden Teile der definierten Anforderungen aufgezeigt. Diese umfassen sowohl Anwenderanforderungen wie technische, produktseitige und prozessseitige Anforderungen:

Anwenderanforderungen

Die Ziele des Arbeitspaketes gliederten sich einerseits in die Definition von Anforderungen an das Design der BPP bezüglich der reaktiven Fläche, des Volumenstroms, des Druckniveaus sowie der Lebensdauer, Bereitstellung von Fahrprofilen als auch die Bereitstellung von Fahrprofilen, um eine anwendungsnahe Technologie-Entwicklung abzusichern.

Aus Sicht von Brennstoffzellenkunden als auch BPP-Anwendern lässt sich eine Liste technischer Spezifikationen ableiten. Hierbei ist zu spezifizieren, dass sich die Anwendersicht explizit auf Brennstoffzellen-Range-Extender-Systeme (BZ-Rex) fokussiert.

Definition von Anforderungen aus Brennstoffzellen-Kundenperspektive

Im Rahmen einer bei STACK durchgeführten Markt- und Kundenanalyse wurden Use Cases für (leichte) Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellen Range Extendern definiert. Zwei der Haupteinsatzgebiete konnten hier als Anwendung eines BZ REX identifiziert werden:

- BZ REX zum Einsatz im Light Duty Vehicle bspw. für ÖPNV-Anwendungen mit mediokren Fahrleistungen von 250 bis 300 km bei hohen Einsatzzeiten von etwa 19 h Betriebszeit,
- BZ REX zum Einsatz in Logistik Anwendungen:
Fahrleistung: ≥ 200 km in ≤ 15 h Betriebszeit, bei Fahrzeuggewicht < 4250 kg.

Darauf aufbauende Kundengespräche ergaben zwei zentrale Anforderungen hinsichtlich Leistung und Kosten:

- Umfangreiche Markt- und Kundenanalysen sowie der Austausch mit möglichen Endnutzern ergaben einen Leistungsbedarf zwischen 10 - 60 kW für die Mehrheit der Range-Extender Anwendungen, um eine signifikante Erhöhung der Reichweite oder Einsatzdauer eines Fahrzeugs zu erzielen, ohne eine kritische Menge an zusätzliches Gewicht ins Fahrzeug zu bringen oder exorbitanten Bauraum zu beanspruchen. Ausnahmen bilden besonders leistungsintensive Fahrprofile.
- Sowohl Unterhaltskosten (sind abhängig von der Effizienz des BZ REX) als auch Anschaffungs-/ Abschreibungskosten (diese hängen von dem Leistungsbereich und Lebensdauer ab) werden durch die zugehörige Systemarchitektur abgebildet.

Definition von Anforderungen aus BPP-Anwenderperspektive

Aus der Anwenderperspektive ergeben sich die Anforderungen aus nachgelagerten Prozessschritten des Herstellungsprozesses sowie aus der übergeordneten Baugruppe des Brennstoffzellenstacks. Die wichtigsten Kategorien hierzu sind in Tabelle 1 wiedergegeben. Eine ausführliche Auflistung der Anforderungen aus STACK Perspektive wurde in einem Fragenkatalog des Projektpartners Fraunhofer IPT dokumentiert.

Tabelle 1: Primäre Kategorisierung und Anforderungen

| Qualität | Prozessstabilität | Taktzeit | Toleranzen |
|---|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Dichtigkeit und Positionierung nach dem Schweißen • Durchbiegung und Verdrillung der BPP • Beschichtungsgüte • n. i. O. Teile • Schweißschmauch • Nachverfolgbarkeit | <ul style="list-style-type: none"> • Temperatur • Luftfeuchte | <ul style="list-style-type: none"> • Produktionsvolumen pro Jahr • Rüstzeit / Coilwechsel • Reinigung / Wartung • Ausfallraten | <ul style="list-style-type: none"> • Beschnitt bis Umformfeature • Beschnittkante |

Ableitung technischer Spezifikationen

Aus den beschriebenen Anforderungen lassen sich technische Spezifikationen für die Entwicklung der BPP und das zugehörige Flussfeld ableiten. Zu den spezifizierenden Merkmalen zählen u. a. die reaktive Fläche, umfänglich definierte Lastpunkte (mit Strom, Spannung, Medienflüssen, Temperatur, Druckniveau und Druckabfällen), Dichtungs- (und damit) Verspannungskonzept, Ausrichtungsfeatures für die Stapelung. Darüber hinaus müssen umformprozessspezifische Eigenheiten berücksichtigt werden. Beispielsweise sind bestimmte Grensradien einzuhalten, damit die Walzen während des Umformprozesses keine Schneidwirkung erzielen. Ferner erheben die im Projekt vorgesehenen MEA-Komponenten spezifische Anforderungen an die Zuschnitt- bzw. Kantenqualität. Wesentliche Spezifikationen werden in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Technische Spezifikation der BPP-Attribute

| | |
|-------------------------|--|
| Grundkonzept | Zweischalig Zwischenraum als Kühlraum |
| Hauptabmessungen | Aktive Fläche: 100 cm ² Effiziente Flächennutzung $\geq 0,55$ (Verhältnis aktive Fläche/Gesamtfläche) Materialdicke: $\leq 0,1$ mm |
| Dichtung | Seal-On-Plate Design |
| Flowfield | Mäanderstruktur Kanal tiefe: 0,4 mm Kanalbreite: 0,8 mm Kleinster Radius obere Kante: 0,1 mm Kleinster Radius untere Kante: 0,1 mm |
| Schnittkanten | Gratlänge: ≤ 10 μ m |

Für weitere Detaillierungsgrade besteht die Restriktion, dass sich spezifische Größen erst durch Untersuchungen in weiterführenden Arbeitspaketen explizit evaluieren lassen, da die Kenntnislage im Vorwege des Projektes nicht vorlag. Dazu zählen u. a. die erzielbaren Flankenwinkel sowie effizient nutzbare Flowfield-Strukturen hergestellt im Rolle zu Rolle-Verfahren.

Technische, prozesseitige Anforderungen

Prozesseitige Anforderungen aus dem Walzprägeprozess werden in AP1.5 simuliert. Zur besseren Erstellung der Anforderungen wurden Teststrukturen für das Walzprägen entwickelt, mit denen die Walzenstrukturierung und Umformung auf Limitationen getestet werden konnte.

Anforderungen an das BPP-Design werden durch Randbedingungen/Limitationen im Strukturieren der Hartmetallwalzen durch Saueressig (SE), im Mikrowalzenumformen, durch das Material, etc. gesetzt. Um einige dieser Anforderungen experimentell festzulegen, wurden drei CoBiP Testdesigns durch das Fraunhofer IPT konstruiert, wobei eines für weitere Tests bei Partnern im Rubberforming am Fraunhofer IPT hergestellt wurde.

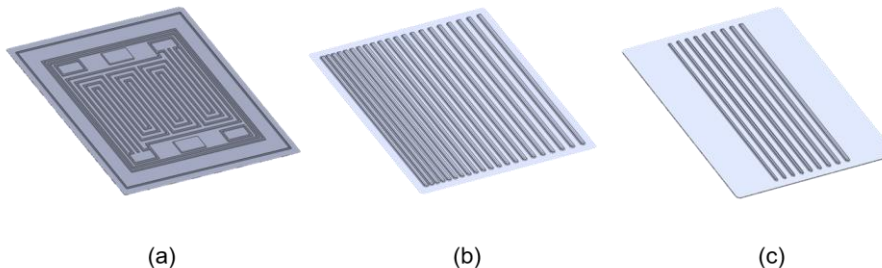


Abbildung 2: (a) CoBiP_BPP_Testdesign (b) CoBiP_BPP_Distance_Testdesign (c) CoBiP_BPP_Aspect_Testdesign

Diese BPP-Testdesigns wurden im Folgenden bei SE in Hartmetallwalzen strukturiert, um mögliche Limitationen festzustellen. Desweiteren können mithilfe des CoBiP_BPP_Testdesigns Laserschweiß- und schneidversuche, sowie Versuche mit vorbeschichteten und nachträglich beschichteten Blechen durchgeführt werden, die als Randbedingungen in die Auslegung des Flowfield-Designs in AP1.2 einfließen werden. In Abbildung 2 sind die drei vom Fraunhofer IPT konstruierten Testdesigns gezeigt. In (a) ist ein Serpentin-Flowfield mit Manifold- und Dichtungsgeometrien gezeigt, welches typische Umformrandbedingungen des Stanzprozesses beinhaltet. Dieses Design bietet zudem die Möglichkeit verschiedenste nachgelagerte Prozesse in definierten Punkten zu vertesten (Anpressmodul für das Laserschweißen und –schneiden, Laserschneiden durch Kühlgeometrien, Dichtungsapplizierung, Beschichtung, elektrochemische Tests, etc.). Die beiden Testdesigns (b) und (c) sind geeignet, um Limitationen der Hartmetallwalzenstrukturierung und Mikrowalzenumformung zu bestimmen. Durch mehrere Testumformungen wurde die Formhaltigkeit zur Sollstruktur und eine Reproduzierbarkeit des Rubberformings nachgewiesen. Um das in AP1.2 finalisierte BPP-Design (M1 Design-Clearance Dokument) in bestimmten relevanten Bereichen in verschiedenen Prozessen zu testen, wurde ein weiterer Rupperpadforming Hestellungsprozess für einen Ausschnitt der CoBiP-BPP geplant. In Abbildung 3 ist der CoBiP_BPP_Kathodenausschnitt gezeigt, der für weitere Tests bei Partnern des CoBiP Konsortiums als Substrat verwendet werden kann. Durch diese Maßnahmen können der Beschichtungs- und die Laserprozesse für die Hochskalierung auf das gesamte BPP-Design vorgetestet werden.

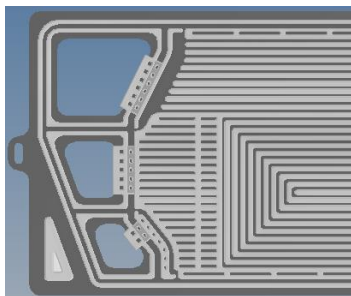


Abbildung 3: CoBiP_BPP_Kathodenausschnitt für relevante vorgelagerte Prozesstests

Das gesamte CoBiP_BPP_Kathodendesign wurde im Folgenden bei SE in Hartmetallwalzen strukturiert, um mögliche Limitationen festzustellen. Desweiteren wurde das finalisierte Bipolarpattendesign (CoBiP_BPP_Kathode) in der Mikrowalzumformung bei SE vertestet. Dieses Design bietet zudem die Möglichkeit verschiedenste nachgelagerte Prozesse in definierten Punkten zu testen.

Anforderungen aus dem Laserschweißprozess werden in den Bahnführungsanforderungen und Genauigkeiten aufgezeigt. Aus Sicht des Laserstrahlschneidens werden die folgenden Designanforderungen bzw. -empfehlungen an das BPP-Layout gestellt:

- Vermeidung scharfer Ecken und kleiner Konturradien
Angestrebt werden Radien ≥ 2 mm, um bei schneidkopfbasierten Verfahren die Bearbeitungsgeschwindigkeit auch in diesen Bereich möglichst hochzuhalten und insgesamt durch die Reduzierung von Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen kurze Zykluszeiten zu erreichen.
- Reduzierung der Anzahl kleinteiliger Konturelemente wie Bohrungen durch Zusammenlegung zu größeren Konturen (ein Langloch statt mehrerer kleinen runden Bohrungen)
- Keine steilen Flanken bei Schrägschnitten
Wenn Schnittlinien über Schrägen führen, um den Schnitt auf einer anderen Ebene der BPP fortzusetzen, sollte aus Qualitätsgründen der Flankenwinkel möglichst flach im Bereich von 45° liegen.
- Spaltfreie Spannmöglichkeit für Schnitte in doppelagiger BPP aus bereits verschweißter Anoden- und Kathodenseite, zu realisieren durch Schweißnähte in unmittelbarer Nähe der Schnittlinie.

Für die in dem Projektvorhaben CoBiP gefertigten BPPs ist ein Messprotokoll festgelegt worden. Zusammengefasst werden folgende Messmerkmale als wichtig eingestuft: Walzengeometrie, Ebenheit der Folie (Vor- und nach dem Laserschweißen und -schneiden), Querschnittsgeometrie (Breite, Höhe, Tiefe und Dicke des Materials). Hierfür werden Konfokal-chromatographische Sensoren, Konfokalmikroskopie und Schliffbilder verwendet.

Eine auf die CoBiP-BPP angepasste Membran-Elektroden-Einheit MEA wurde definiert und beschafft. Für die funktionalen Versuche werden GORE® PRIMEA® A510.1/M775.15/C586.4, AA mit 55,1 x 192 [mm] BA 70,5 x 294 [mm] verwendet. Die Auswahl wurde auf die Betriebsbedingungen von STACK angepasst. Für erste Versuche werden SGL 36 BB GDLs verwendet (280 μ m Dicke, angepasst auf die Kompression im Shortstack).



Abbildung 4: Bild der beschafften Membran-Elektroden-Einheit (MEA) für den CoBiP Shortstack/Einzeller

Das Dichtungskonzept wird auf die CoBiP-BPP angepasst. Die Dichtungen werden auf die Stege aufgebracht und dienen als Andruckfläche auf dem Subgasket der MEA. Die Einzelltests werden mit kontinuierlich umgeformten CoBiP-BPPs, den MEAs und den am Fraunhofer IPT applizierten Dichtungen durchgeführt.

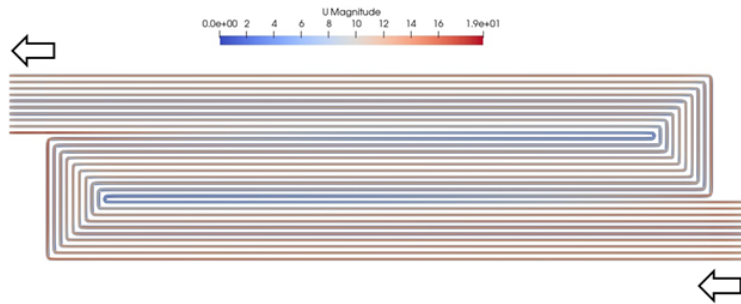
AP1.2: Validierte Auswahl eines Designs von BPP durch simulationsgestützte Aussagen der Funktionsweisen [01/20-09/20]

Das Grundkonzept der BPP beruht auf einem zweischaligen Design, wobei die Anoden- und Kathodenseite sich jeweils voneinander unterscheiden. Daher ist zusätzlich auf eine ausreichend gute Durchströmung des Kühlmittels zwischen den Halbschalen sowie die Schweißbarkeit der BPP zu achten. Die Hauptabmessungen des Flowfields sind 190 mm x 54 mm, so dass die aktive Zellfläche 102,6 cm² beträgt. Die Manifolds sind grob orientiert an einem Design, welches STACK bereitgestellt hat. In Absprache mit den Fertigungspartnern sind eine Kanaltiefe von 0,36 mm festgelegt worden und eine Kanal- sowie Stegbreite von 0,9 mm. Auf diese Weise sollen Defekte, wie Risse im Material, durch die Fertigung (Tiefziehen) weitestgehend verhindert werden. Außerdem ist eine mindestens notwendige Breite der Stege und Kanäle notwendig, um die Stege walzprägen zu können.

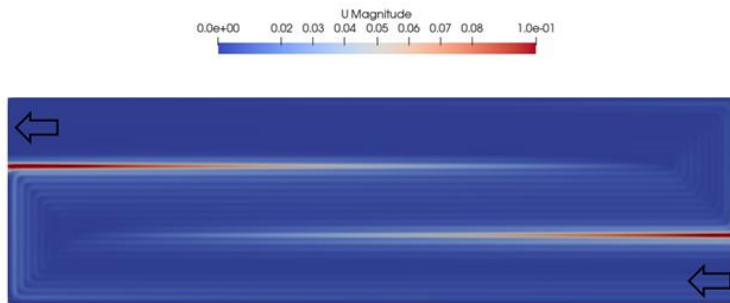
Da die Flowfields auf die gewünschten Betriebsbedingungen abgestimmt werden sollen, wird die Wahl der Flowfields auf Basis von strömungsmechanischen Simulationen getroffen, welche sich schließlich auf den Strömungsverlauf der Gase durch die Strömungskanäle der BPP sowie durch die Gasdiffusionslagen konzentrieren. Dabei wurden keine chemischen Reaktionen und Energiegleichungen gelöst, sondern chemische und thermische Größen in die Wahl der Massenströme und Gaseigenschaften eingebunden (z.B. wird die Dichte des Luftstroms in Abhängigkeit einer bestimmten Temperatur gewählt). Die Zelle bzw. der Stack sollen mit Luft und einem Wasserstoff-Stickstoff-Gemisch (90 % H₂, 10 % N₂) betrieben werden. Die Luft wird dabei nicht befeuchtet, die Anodenseite soll eine relative Feuchtigkeit von 50 % am Eingang haben. Es wird davon ausgegangen, dass die Zelle bei 60 bis 70 °C betrieben wird, dabei wird die Kathode nicht befeuchtet und die Anode etwa zu 50 %. Der Druckverlust hat einen Zielwert von 0,18 bar für die Kathode und 0,07 bar für die Anode. Als minimaler Strom wird 18 A angenommen, während der maximale Strom bei 44 A liegt. Eine Spannung von 0,725 V pro Zelle sollte nicht unterschritten werden.

Für die Kathodenseite sind zehn Serpentin mit zwei Umlenkungen gewählt worden. Diese Anordnung an Strömungskanälen führt unter Berücksichtigung der zu beachtenden Abmessungen zu einem Druckabfall von 0,101 bar. Da im Realfall Flüssigwasser in der Zelle vorliegt, steigt der Druckabfall zusätzlich, so dass für die gewählte Anordnung von einer verbesserten Gleichverteilung der Gasströmung ausgegangen werden kann. Für diese Anordnung ist in den Abbildung 5a) und b) jeweils gezeigt, dass die Kanäle weitestgehend gleichmäßig durchströmt sind, ähnliches gilt auch für die Gasdiffusionslage. In der Gasdiffusionslage wird zudem eine gute Querströmung über die Stege der Serpentin erzielt (hohe Druckgradienten zwischen benachbarten Kanälen im Ein- und Auslaufbereich des Flowfields), wodurch die Membran gleichmäßig mit den Reaktionsgasen versorgt werden kann. Für die Anodenseite der BPP wurden ebenfalls Serpentin gewählt, welche blockweise nebeneinander angeordnet sind. Die Strömungscharakteristik dieses Flowfields ist in Abbildung 6a) bzw. b) gezeigt. Jedoch ist hier zu berücksichtigen, dass für die tatsächliche Umsetzung dieses Flowfields in der BPP insgesamt zehn Kanäle und nicht wie abgebildet vier verwendet wurden, so dass sich ein Druckabfall von 0,07 bar ergibt. Nähere Informationen hierzu sind in der im Rahmen des Projektes entstandenen Publikation¹ zu finden. In Abbildung 5a) ist eine gleichmäßige Verteilung der Strömung zu beobachten, zusätzlich ist die Geschwindigkeit ähnlich zu jener in der Kathode. Auch in der Gasdiffusionslage ist eine Querströmung über die Stege und damit eine gute Durchflutung der GDL mit Gas zu beobachten (s. Abbildung 6b).

¹ Reimer, U.; Nikitsina, E.; Janßen, H.; Müller, M.; Froning, D.; Beale, S.B.; Lehnert, W. Design and Modeling of Metallic Bipolar Plates for a Fuel Cell Range Extender. *Energies* **2021**, *14*, 5484. <https://doi.org/10.3390/en14175484>

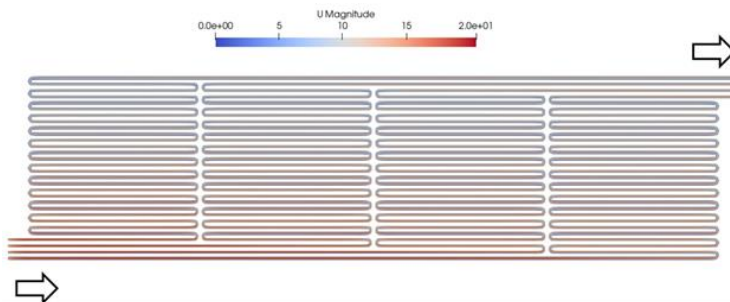


a) Strömungskanäle der Kathode

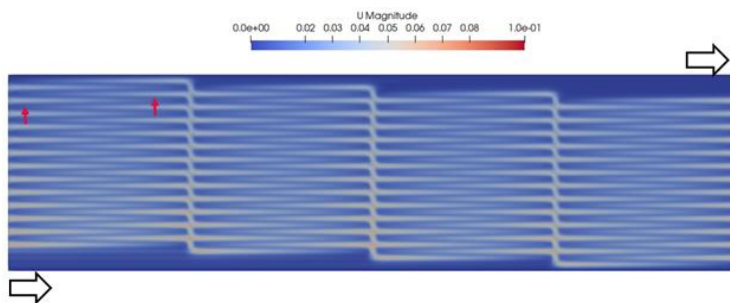


b) Gasdiffusionslage der Kathode

Abbildung 5: Qualitative Berechnungsergebnisse der Geschwindigkeitsverteilung auf der Kathodenseite der BPP



a) Strömungskanäle der Anode



b) Gasdiffusionslage der Anode

Abbildung 6: Qualitative Berechnungsergebnisse der Geschwindigkeitsverteilung auf der Anodenseite der BPP

Da sich das Kühlmittelkompartiment aus dem Design der (Gas-)Flowfields ergibt und es zwischen den Stegen der Anoden- und Kathodenhalbschale liegt, ergibt sich eine geometrische Anordnung entsprechend der Abbildung 7a) bzw. b). Lediglich im Einstromungsbereich ist die Strömungsverteilung unregelmäßig. Über den Einstromungsbereich hinaus gleichen sich die Strömungsverläufe der parallelen Kanäle aus. Hilfreich sind hier insbesondere die querliegenden Kanäle, da durch diese eine Gleichverteilung zwischen den längs angeordneten Kanälen ermöglicht wird.

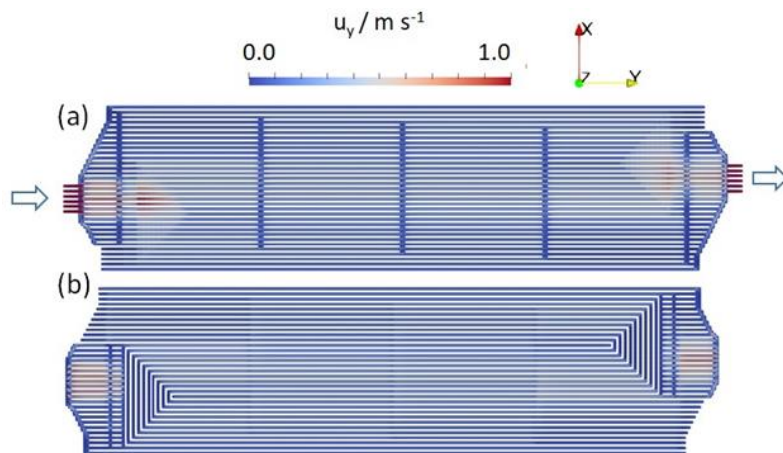
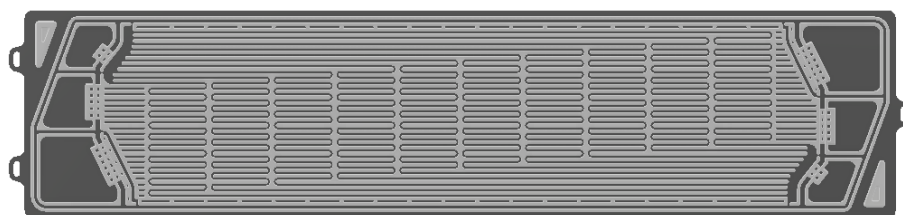


Abbildung 7: Strömungsgeschwindigkeit im Kühlmittelkompartiment, a) auf halber Höhe der Kanaltiefe der Anodenhalbschale und b) auf halber Höhe der Kanaltiefer der Kathodenhalbschale

AP1.3: Assemblierungsgerechte Designentwürfe [04/20-11/20]

Die konstruierten Halbschalen der BPP sind in Kathodenhalbschale Abbildung 8a) und b) zu sehen. Die hellgraue Färbung hebt die Stege hervor, die Kanäle sind in dunkelgrau abgebildet. Hier ist zu beachten, dass die Anodenhalbschale nach Bearbeitung dieses Arbeitspaketes mit 10 Serpentinblöcken ausgestattet worden ist. Grund dafür waren Fehler in der Berechnung des Druckabfalls der Anode (s. AP 1.2). Die Eigenschaften der Abmessungen der Querstrukturen der Kanäle sind in Abbildung 9 zu sehen. Um die Halbschalen ausreichend gut während der Fertigung aufeinander auszurichten, dienen dreieckige Pins in zwei Eckbereichen.



a) Anodenhalbschale



b) Kathodenhalbschale

Abbildung 8: CAD-Daten der Halbschalen für die Prägewalzen

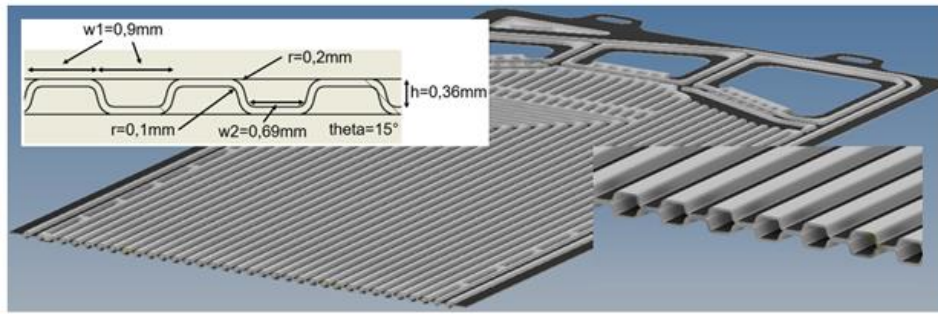


Abbildung 9: Schnittbild der BPP und Abmessungen der Kanal-Steg-Strukturen

Um die BPP in einen Zellaufbau bzw. Stack zu integrieren, ist ein assemblierungsgerechtes Design der BPP notwendig. Um dieses zu gewährleisten, sind an den kurzen Kanten Nuten vorgesehen, in welchem für den Zusammenbau einer Einzelzelle oder eines Stacks Assemblierstifte eingesetzt werden können. Diese Nuten sind auch für weitere Bauteile der Zelle in den folgenden Arbeitspaketen vorgesehen.

Das Dichtungskonzept der BPP beruht auf einer Dichtungsnut um das Flowfield sowie die Manifolds herum, wie in Abbildung 10 in grün eingefärbt zu sehen ist. Eine besondere Herausforderung stellen die drei unterschiedlichen Tiefen der Nut im Bereich der Manifolds dar. Mit Hilfe einer Dispenseranlage und Silikon in flüssiger Form während der Applikation kann eine solche Dichtung unter hohen technischen Anforderungen hergestellt werden.

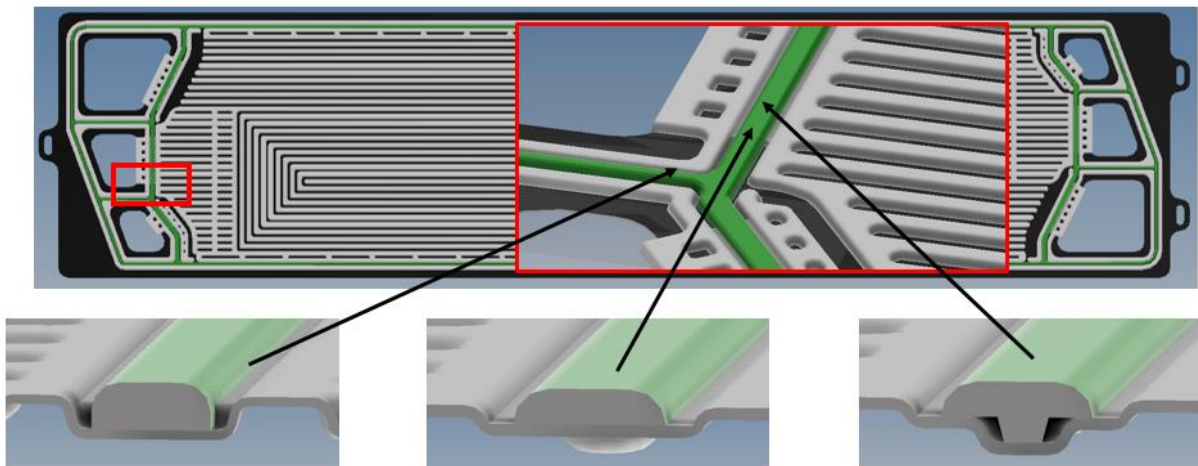


Abbildung 10: Dichtungsnut der BPP mit lokalen Höhenunterschieden

Da im Bearbeitungszeitraum die Anlagen am FZJ nicht funktionsfähig waren und die technischen Anforderungen am IPT nicht ausreichend gut, ist es zu einer Ausweirlösung gekommen, welche in Abbildung 11 dargestellt ist. Das neue Konzept beruht auf dem Aufbringen einer selbstklebenden Dichtung auf die äußeren Stege der Dichtungsnut.

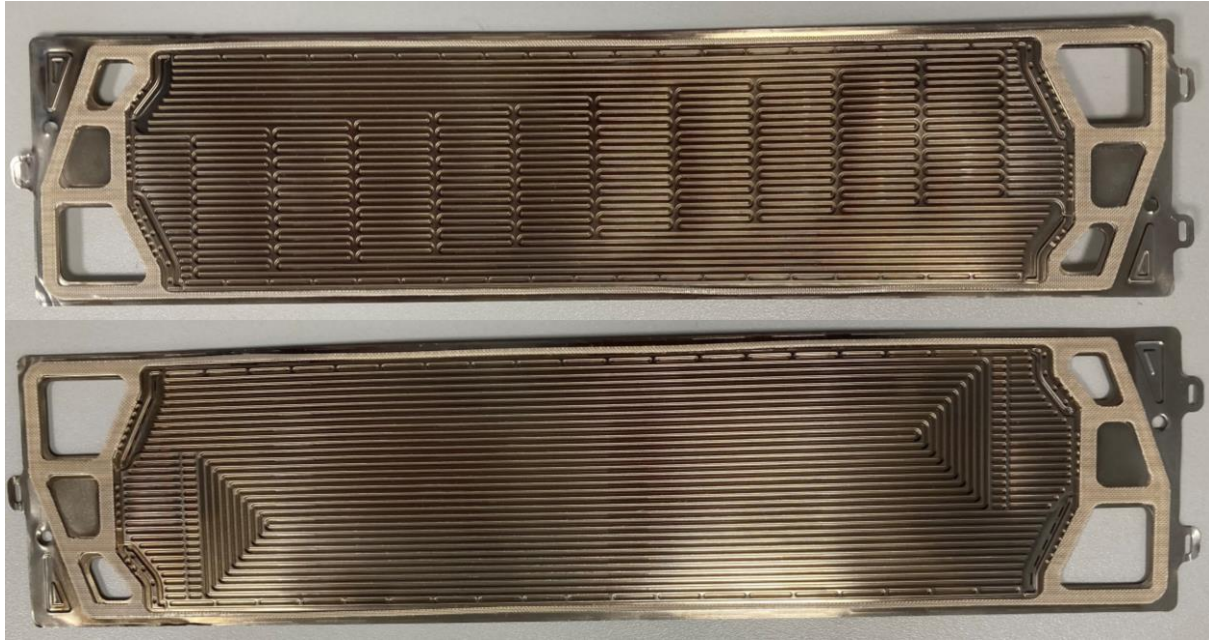
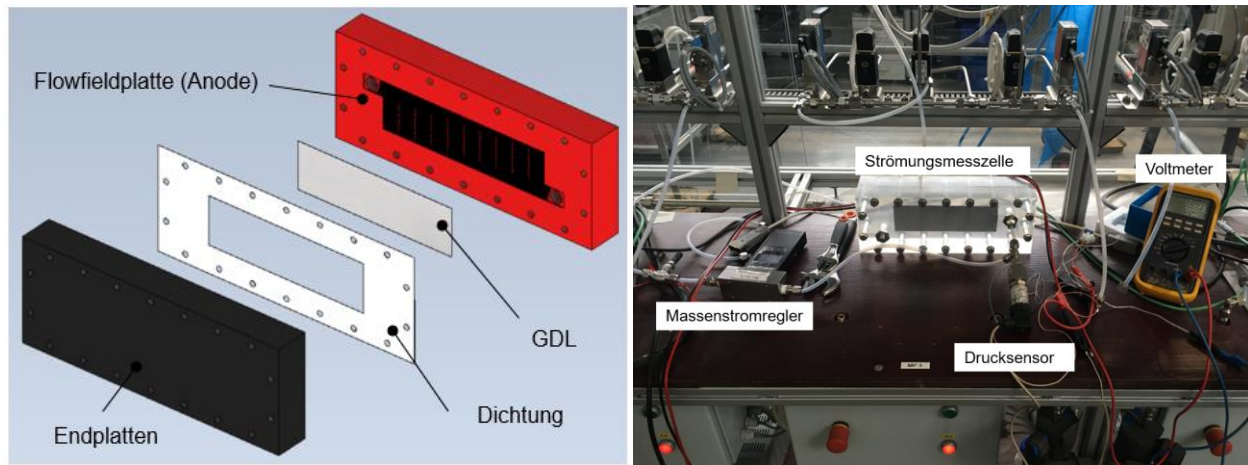


Abbildung 11: Ersatzdichtungskonzept mit selbstklebender Dichtung auf den Stegen neben der Dichtungsnut

AP1.4: Erprobung von ersten Designvarianten [07/20-11/20]

An der Kathodenhalbschale ist exemplarisch geprüft worden, ob der Druckverlust in Größenordnung des Druckverlustes der Kathodenhalbschale aus der Simulation in AP1.2 liegt. Hierzu wurden Komponenten für eine transparente Strömungszelle mit Hilfe des CAD angefertigt (s. Abbildung 12). Die Zelle ist zusammengesetzt aus einer Platte mit dem Kathodenflowfield und einer Gasdiffusionslage (GDL) sowie einer Dichtung und einer Endplatte ohne Flowfield. Im Test wurde eine Gasdiffusionslage des Typs SGL TGP-H-060 mit einer Dicke von 350 μm und eine Dichtung mit einer Dicke von 300 μm in der Strömungsmesszelle verbaut.

Die Messkurve aus dem Aufbau mit GDL in Abbildung 13 einschließlich komprimierter Gasdiffusionslage zeigt bei einem Massenstrom von ca. 0,000037 kg/s einen Druckverlust von 56,7 mbar. Die Messkurve aus dem Aufbau ohne GDL zeigt bei gleichem Massenstrom etwa einen Wert von 146,4 mbar auf. In der Simulation wurde für diesen Massenstrom ein Druckabfall von 101 mbar gemessen, welcher genau zwischen den zuvor genannten Werten liegt. Somit kann die Aussage getroffen werden, dass der berechnete Druckabfall mindestens in seiner Größenordnung realitätsnah bestimmt worden ist. Grundsätzlich muss bei diesem Versuchsaufbau jedoch eine Abweichung zwischen Messwert und Simulationswert erwartet werden, da der Messaufbau die Simulation nicht eindeutig abbildet. Denn in der Simulation strömt das Strömungsmedium sowohl über die GDL (in Richtung Membran) als auch für die Kanalausgänge aus. Im Messaufbau wird die GDL zwar durchflutet, allerdings wird das Strömungsmedium nur über die Kanalausgänge abgeführt.



a) CAD-Komponenten des Strömungsversuchs b) Versuchsaufbau im Labor

Abbildung 12: Komponenten und Aufbau zur Erprobung des Flowfields der Kathodenhalbschale

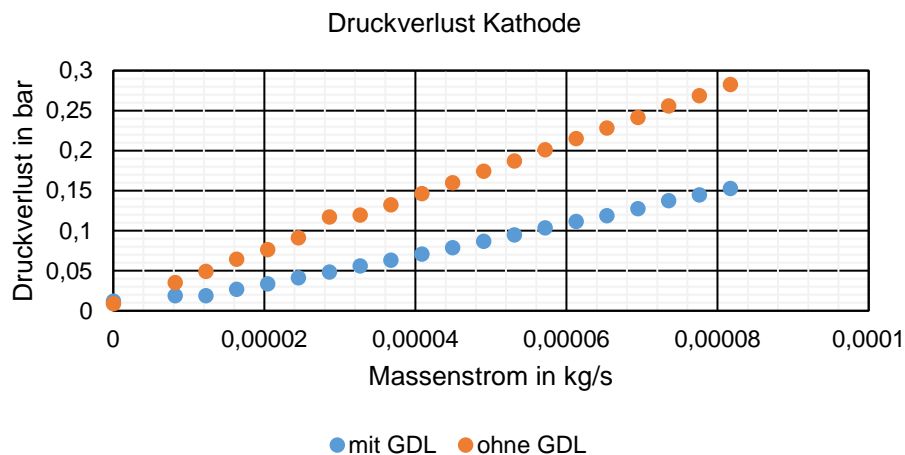


Abbildung 13: Druckverlust des Flowfields der Kathode

AP1.5: Simulationsgestützte Voranalyse der strukturellen Umformung von metallischen Folien mithilfe von Umformwalzen zur Validierung und Prozessparameterwahl [04/20-11/20]

Im Folgenden wird die Herangehensweise für die strukturelle Umformsimulation anhand einer Teststruktur dargestellt. Diese wird in verschiedene Teilschritte aufgeteilt.

Berechnungsmodell, Baugruppenkonfiguration und Vernetzung

Das Berechnungsmodell besteht aus drei Teilinstanzen: Blechzuschnitt, Matrice (untere Walze) und Patrice (obere Walze), wie in Abbildung 14 dargestellt. Jede Teilinstanz hat mehrere Partitionen zur Verbesserung der Netzqualität und der Definition der Kontaktflächen. Sowohl die Matrice als auch die Patrice haben einen Radius von 100 mm und eine Breite von 300 mm, während das Blechmodell die Abmessungen 115x200x0,1 mm³ hat.

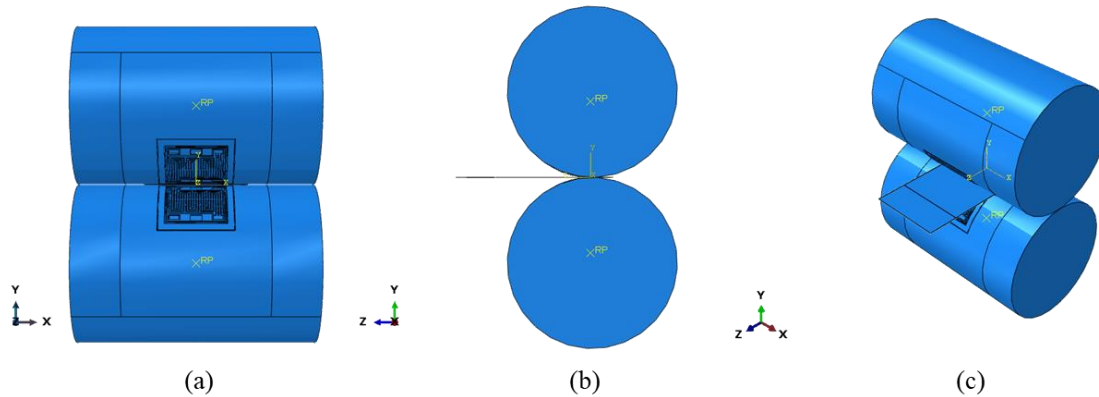


Abbildung 14: CAD-Modell: (a) Vorderansicht, (b) Seitenansicht und (c) isometrische Ansicht

Das Netz, das die Matrizenwalze diskretisiert, ist in Abbildung 15 dargestellt.

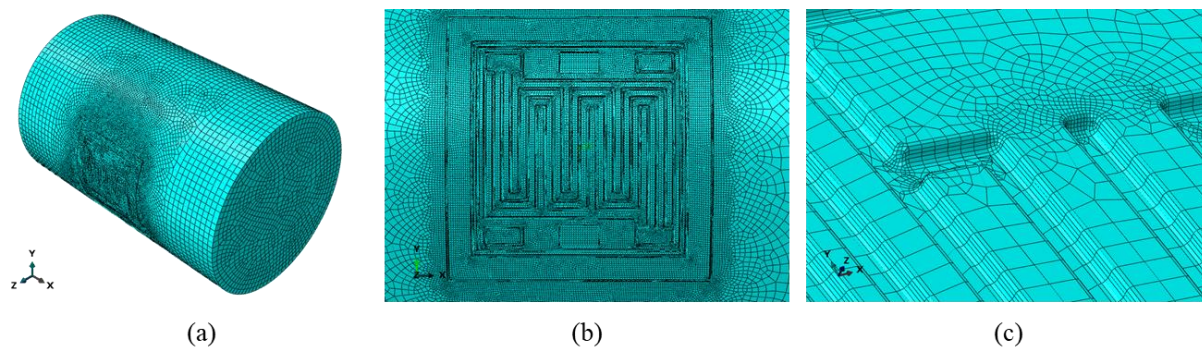


Abbildung 15: Netz der Matrize: (a) isometrische Ansicht, (b) Details im BPP-Bereich, (c) nähere Ansicht der Diskretisierung des Mikrokanalnetzes

Das numerische Modell des Bleches ist, wie in Abbildung 15 (a) dargestellt, in drei Partitionen unterteilt. Daher werden in den Partitionen unterschiedliche Saatkanten aufgelegt, wodurch das Modell hinsichtlich der Berechnungszeiten besser wird. Die Zielelementgröße im Umformbereich wurde unter Berücksichtigung der verfügbaren Berechnungsressourcen und vorläufiger Simulationsergebnisse gewählt, die für größere Elemente ein physikalisch unrealistisches Verformungsverhalten insbesondere im Ausdünnungs- und Hourglass-Effekt zeigten.

Angeichts der gewählten Diskretisierungsparameter besteht das Netz aus etwa 550 000 Kontinuumsschalenelementen SC8R (d.h. etwa 1 Million Knoten) mit reduzierter Integration und 4 Gauß-Integrationspunkten in der Dicke. Es ist erwähnenswert, dass, obwohl Schalenelemente in ihrer konventionellen Formulierung viel weniger rechnerisch aufwendig sind als Kontinuumsschalenelemente, sich letztere aufgrund ihrer zweiseitigen Kontaktformulierung, die Dickenänderungen unabhängig vom Verhältnis zwischen der Dicke und den übrigen Modellabmessungen zu berücksichtigen, als wesentlich genauer in der Kontaktmodellierung erwiesen haben.

Materialmodell und Randbedingungen

Das Blech wird unter Verwendung eines linear-elastischen Kunststoff-Konstitutivgesetzes modelliert, das auf experimentellen Daten basiert, die für EN1.4404 verfügbar sind. Diese Stahllegierung hat ein Elastizitätsmodul von 193 GPa und eine Poissonzahl von 0,31 bei einer volumetrischen Dichte von 8818 kg/m³. Abbildung 16 (a) zeigt die experimentellen Daten, die für die Modellierung des plastischen Verhaltens des Blechs verwendet wurden.

Für den Walzschrift wird eine Massenskalierung "durch den Schritt" mit einer Frequenz von 2 Schritten und einem angestrebten Zeitschritt von $1,5 \times 10^{-5}$ s gewählt. Die Richtigkeit dieses Verfahrens wird im Abschnitt „Ergebnisse“ weiter erörtert. Zusätzlich wird die Gesamtzeit auf 4 Sekunden eingestellt, was den Abschluss des Umformprozesses für die angestrebte BPP-Geometrie sicherstellt. Der Algorithmus des „allgemeinen Kontakts“ (mit Angabe der beteiligten Kontaktpaare) wurde für die Interaktion zwischen den Walzen und den Blechoberflächen mit einem auf 0,1 eingestellten Reibungskoeffizienten übernommen. Dieser Wert liegt in der Nähe der Reibungskoeffizienten, die in früheren Studien zur BPP-Umformung festgelegt wurden.

Ein Schema der Randbedingungen ist in Abbildung 16 (b) dargestellt. Einerseits ist die Matrize vollständig an ihrem Referenzpunkt fixiert und erlaubt nur eine Drehung entlang der x-Achse. Andererseits erlauben die für die Patrize auferlegten Randbedingungen eine Rotation entlang der x-Achse und auch eine Translation entlang der y-Achse. Die letztgenannte Bedingung zielt darauf ab, ein realistischeres Verhalten der Patrize zu modellieren, die die Quelle einer Druckkraft für den Umformprozess sein wird. Die Enden des Blechmodells werden in ihrer y-Verschiebung eingeschränkt, um den Effekt einer kontinuierlichen Wicklung zu modellieren.

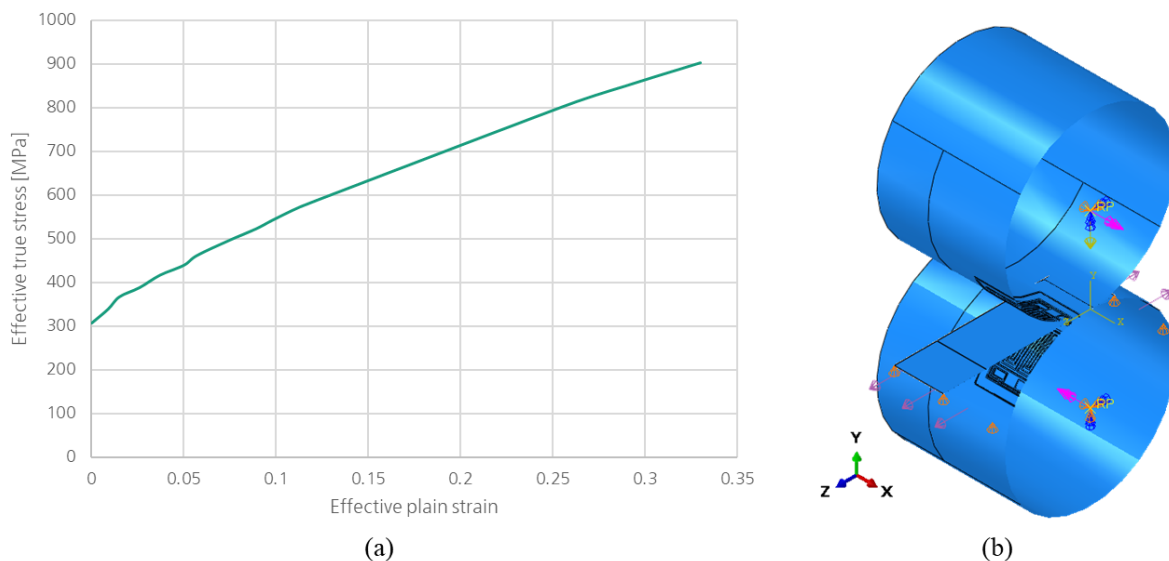


Abbildung 16: (a) Experimentelle Daten zum plastischen Verhalten von EN1.4404 und (b) Schema der auferlegten Randbedingungen

Im aktuellen Modell wird der Rohling mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 30 mm/s in die Rollen eingeführt, die der auferlegten Rollendrehung von 0,3 rad/s entsprechen. Angesichts der angestrebten BPP-Geometrie gewährleistet diese Verarbeitungsgeschwindigkeit eine Produktionsrate von einer BPP alle 3,3 Sekunden. In dieser Konfiguration wird der Umformprozess durch eine Druckkraft von 30 kN in y-Richtung am Referenzpunkt der Patrize und 1 kN Zugkräfte in z-Richtung, die an beiden Enden des Blechs in entgegengesetzten Richtungen aufgebracht werden, geführt. Die Anwendung dieser Zugkräfte zielt auf eine Reduzierung von Falten und Durchbiegungen ab. Unter diesen Bedingungen ist zu erwarten, dass die Zugkräfte Zugspannungen von etwa 85 MPa induzieren, was auf der Grundlage der experimentellen Ergebnisse zu Dehnungen der Größenordnung 0,006 führt. Die Druck- und Zugkräfte werden allmählich mit Amplituden, die durch Glatt-Schritt-Funktionen definiert sind, auf das Modell aufgebracht.

Zwischenergebnisse

Eine Übersicht über die Verformung im Herstellungsprozess ist in Abbildung 17 dargestellt.

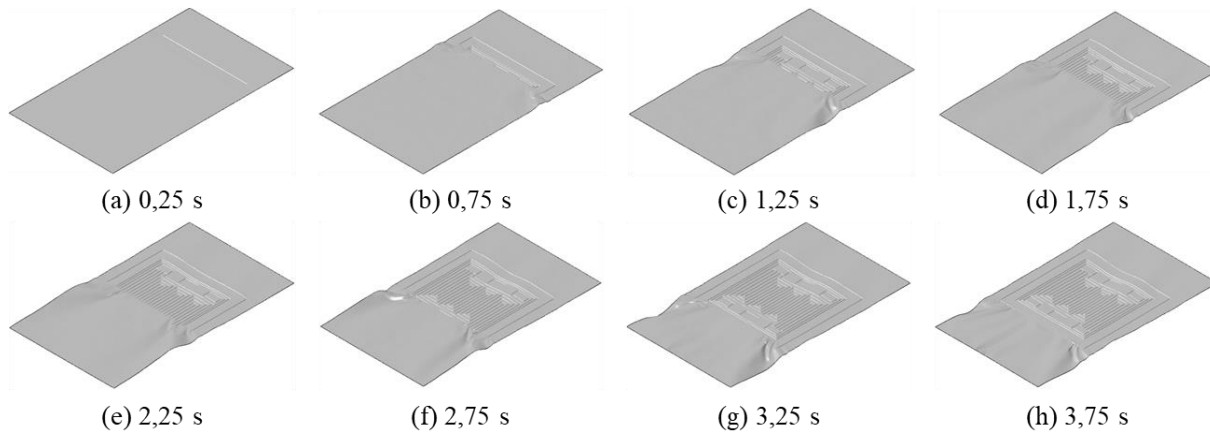


Abbildung 17: Verformungsprozess eines Blechrohlings

Der Verformungsprozess ist durch eine allmähliche Zunahme der Faltenanzahl in Längsrichtung gekennzeichnet. Dieses Verhalten muss eindeutig gemildert werden, da es hohe Verzerrungen des gebildeten Mikrokanals und offensichtliches Materialversagen verursacht. Über den Energieverlauf für den Verformungsprozess des BPP wurde zunächst die Richtigkeit des Modells bestätigt.

Mit Hilfe eines MATLAB-Skripts wurde ein Vergleich zwischen dem Querschnitt des Modells und dem idealen Zielquerschnitt durchgeführt. Abbildung 18 zeigt die Lage der für die Vergleichsstudie extrahierten Knoten. Ein Gesamtvergleich des geformten und des idealen Querschnitts zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse und der Zielgeometrie, die nur in bestimmten Bereichen durch unerwünschte Biegungen verzerrt ist.

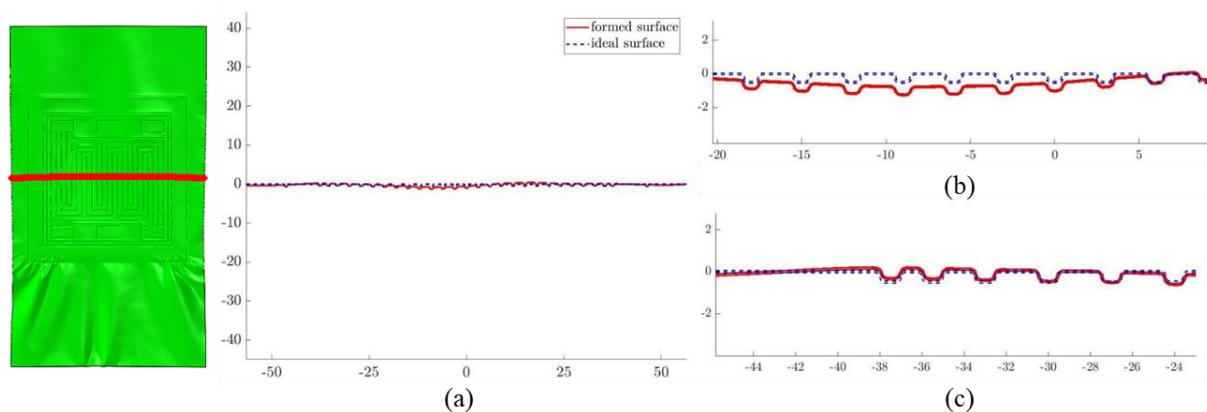


Abbildung 18: Vergleich des geformten und des idealen Querschnitts: (a) Gesamtansicht, (b) mittlerer Bereich und (c) linker Bereich

Design of Experiment

Basierend auf dem 100x100 mm² großen BPP-Testdesign wurde die Methodik zur Simulation des R2R-Prozesses vollständig entwickelt. In diesem numerischen Modell wurde das Blech auf Basis eines elasto-plastischen Materialmodells und mit Kontinuumsschalenelementen mit optimierter Größe durch Netzkonvergenzstudien modelliert. Die Berechnungszeit wurde durch die Verwendung geeigneter Massenskalierungsfaktoren im quasistatischen Modell drastisch reduziert und durch den Vergleich der kinetischen Energie mit der inneren Energie verifiziert.

Nach Fertigstellung des numerischen Modells wurden die Prozessparameter durch einen Design of Experimentansatz mit der Origin Pro Software optimiert. Die Parameterstudie wurde nach einem Box-Behnken-Design durchgeführt. Für diese Studie variiert die Presskraft von 10 kN bis 30 kN, während die Zugkraft auf die Bahn in einem Bereich von 1 kN bis 3 kN betrachtet wird. Zusätzlich liegt die

Vorschubgeschwindigkeit im Intervall: 30 mm/s bis 60 mm/s. Für die vorliegende Studie wurden die folgenden Ergebnisse ausgewertet:

- Maximale Ausdünnung (α);
- Tiefe des Mikrokanals in Rollrichtung (H_r);
- Tiefe des Mikrokanals quer zur Walzrichtung (H_p);
- Geradheitsabweichung des BPP in Walzrichtung (κ_r);

Für die maximale Ausdünnung α wird der Wert für jeden Studienfall als der Minimalwert der Ausdünnungswertverteilung ermittelt. In ähnlicher Weise wird die Mikrokanaltiefe in Walzrichtung H_r in Zone C gemessen, wie in Abbildung 19 dargestellt. Dieser Bereich wurde ausgewählt, da er den kritischsten Fall der unerwünschten Dehnung eines Mikrokanals durch die Einwirkung der Zugkraft F umfasst. Die Dehnung beginnt nach der Umformung des Mikrokanals und wird allmählich schwächer, je weiter er sich vom Bereich der Kontaktumformung entfernt. Die Tiefe wird mit dem manuellen Knotenpunktstandsmessgerät gemessen. Ebenso wird die Tiefe des geformten Mikrokanals quer zur Walzrichtung H_p im Querschnitt gemessen, bezeichnet mit den Buchstaben AA'. Die Geradheitsabweichung in Walzrichtung κ_r wird im Querschnitt BB' gemessen.

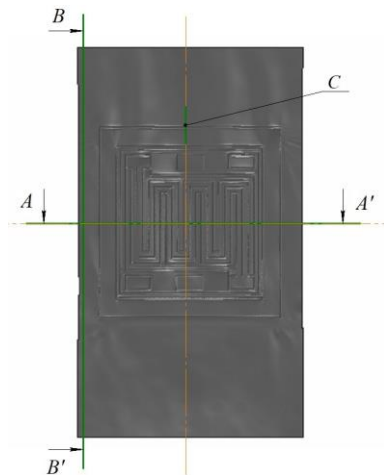


Abbildung 19: Messbereiche in gebildeten BPP für Ergebnisbewertung

Response Surface Analyse

Insgesamt zeigten die Daten, dass bei hohen Druckkräften (größer als 30 kN) und geringen Zugkräften (um 1 kN) in einigen Bereichen ein übermäßiger Verzug aufgrund der unzureichenden Dämpfung der Faltenbildung während des Umformvorgangs auftritt. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass es einen sicheren Bereich für die Werte der Umformkräfte gibt. Die Ergebnisse zeigten, dass mit steigender Presskraft der Füllungsgrad erhöht wird, was zu geometrisch genaueren Mikrokanälen führt. Außerdem, obwohl die Zugkraft erfolgreich die Größe und Häufigkeit der beobachteten Falten reduziert, gibt es damit verbundene Nachteile, insbesondere im Hinblick auf die unerwünschte Dehnung von Mikrokanälen mit Profilen parallel zur Walzrichtung. In Bezug auf die Zugkraft nimmt die maximale Ausdünnung mit steigender Zugkraft proportional zu, während das Datenverhalten einen geringen Einfluss der Geschwindigkeit auf das Muster der maximalen Ausdünnung zeigt. Die Umformbarkeit von gewalzten BPPs wird also vorwiegend durch die Presskraft bestimmt.

Ein ähnliches Verhalten, wie in Abbildung 20 (b) dargestellt, zeigt sich bei der Tiefe der gebildeten Mikrokanäle parallel zur Walzrichtung (H_r). Die Geschwindigkeit scheint keinen signifikanten Einfluss auf den erreichbaren Tiefenwert zu haben. Eine Erhöhung der Presskraft führt zu einer geformten BPP mit tieferen Mikrokanälen.

Die Geradheitsabweichung der umgeformten BPP in Walzrichtung (κ_r) wird stark von der Zugkraft beeinflusst (wie in Abbildung 20 (d) dargestellt): der Parameter κ_r verringert seinen Wert proportional, wenn

die Zugkraft zunimmt. Außerdem nehmen mit steigender Vorschubgeschwindigkeit auch die Faltenbildung und die Amplitude der Verformungswellen zu, wenn auch in einem kleineren Intervall.

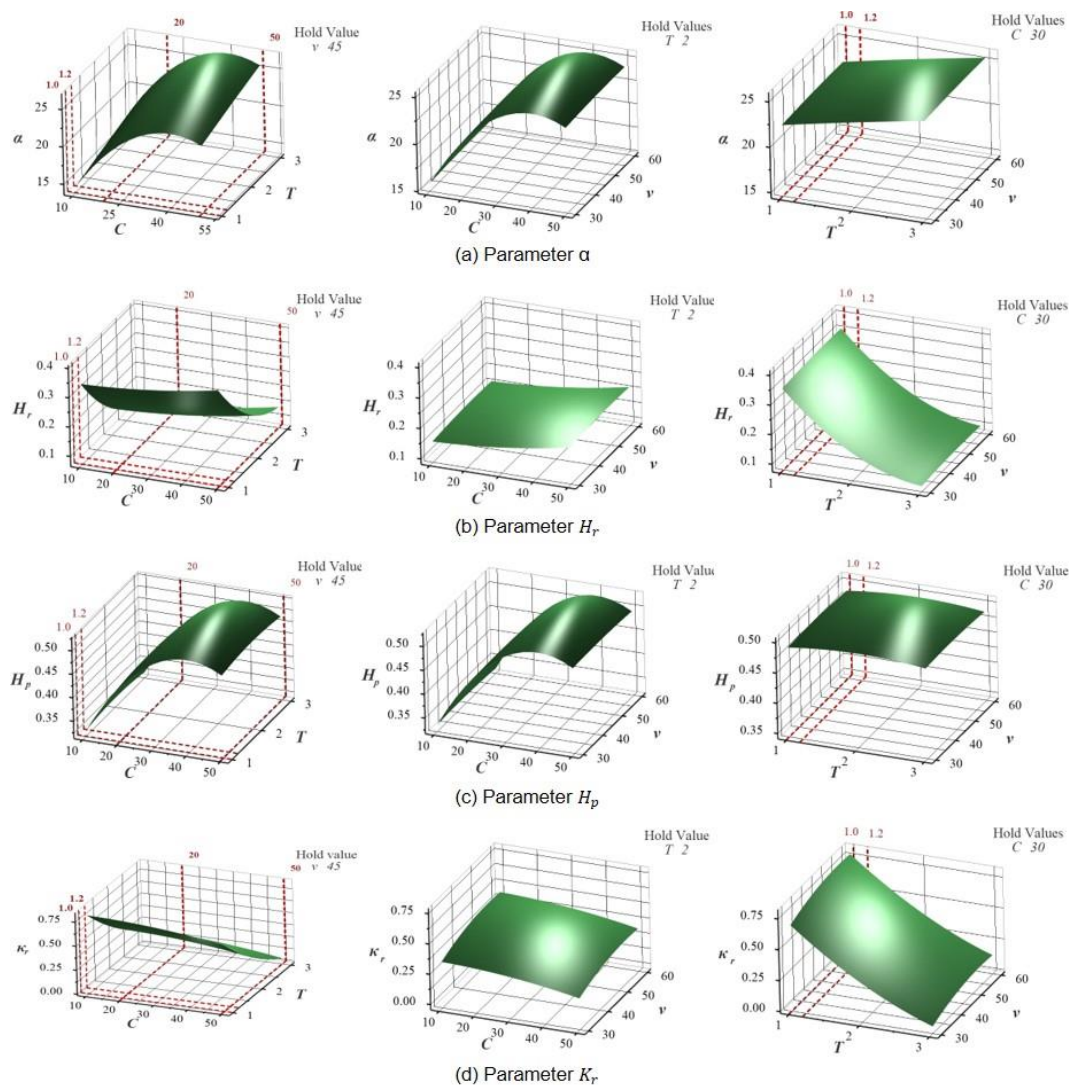


Abbildung 20: Response Surfaces für verschiedene Prozessparameter im Mikrowalzumformen

Optimierung der Prozessparameter

Mit Hilfe der Response Surface kann ein Response-Optimierungsalgorithmus verwendet werden, um die optimale Kombination der Prozessparameter zu finden. Um eine hohe Sicherheit der BPP-Komponente zu gewährleisten, wurde eine maximale Ausdünnung von 20 % als akzeptabel angesehen. Zusätzlich wurde die Zugkraft auf ein Intervall von 1,2 kN bis 3 kN beschränkt. Für den Optimierungsalgorithmus wurde eine maximale Ausdünnung von 19,90 % gewählt, wobei eine minimale Geradheitsabweichung und maximale Mikrokanaltiefen angestrebt wurden. Der Algorithmus sagt voraus, dass ein optimales Verhalten mit einer maximalen Ausdünnung von nicht mehr als 20 % erreicht wird, wenn eine Presskraft von 20,9 kN in Kombination mit einer Zugkraft von 1,2 kN und einer Vorschubgeschwindigkeit von 30 mm/s angewendet wird.

Basierend auf den Ergebnissen des Optimierungsalgorithmus wurde eine Simulation mit folgenden Werten durchgeführt: Die Simulation sagt voraus, dass die höheren Werte der Ausdünnung in den Zonen der schnellen Änderung der Biegeverformung auftreten werden, d. h. in der Nähe der Bereiche, in denen die Mikrokanäle eine Richtungsänderung vornehmen (siehe Abbildung 21 (a)). Darüber hinaus ist anzumerken, dass das maximale Ausdünnungsverhältnis nicht mit dem vorhergesagten Wert aus der im vorigen

Abchnitt erhaltenen Response Surface übereinstimmt, was die Komplexität der Phänomene und die Notwendigkeit einer eingehenderen Untersuchung der maßgeblichen Parameter bestätigt.

Die Verteilung der Falten kann besser visualisiert werden, wenn die Verteilung der äquivalenten plastischen Dehnung (PEEQ) betrachtet wird, die in Abbildung 21 (b) dargestellt ist.

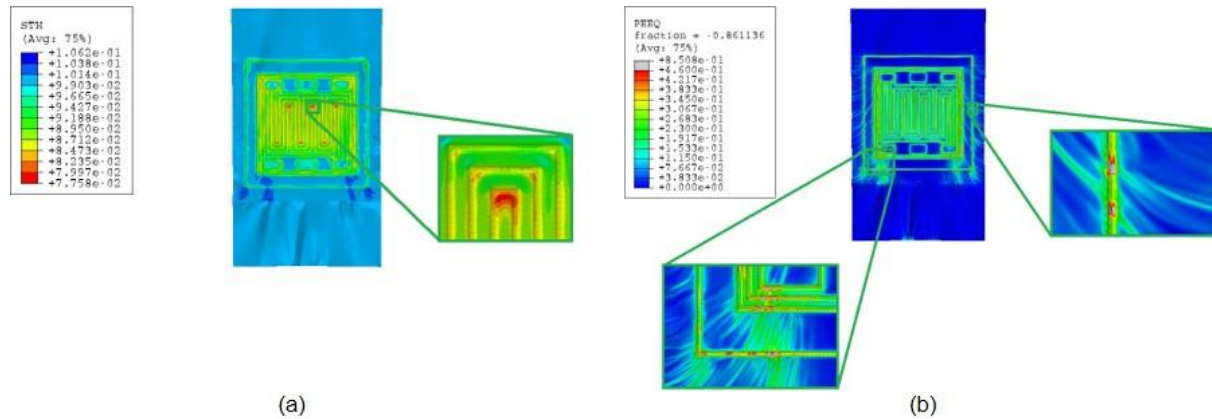


Abbildung 21: Verteilung der (a) Dickenwerte [mm] und (b) äquivalenten plastischen Dehnungen für optimierte Parametersätze

Mit Hilfe eines Box-Behnken-Designs wurde die Machbarkeit der vorgeschlagenen Fertigungstechnik bewertet. Innerhalb dieser Studie wurde die Auswirkung der Variation der Presskraft, der Zugkraft und der Vorschubgeschwindigkeit analysiert. Die Ergebnisse zeigten die Schlüsselrolle der Presskraft bei der Response auf die maximale Ausdünnung und die erreichbare Mikrokanaltiefe. Darüber hinaus weisen die erhaltenen Daten auf einen wichtigen Nachteil der Einführung einer Zugkraft hin: die unerwünschte Dehnung, die in den Mikrokanälen beobachtet wird, deren Profile parallel zur Walzrichtung verlaufen. Die Auswirkung der Vorschubgeschwindigkeit wurde als weniger signifikant eingestuft, verglichen mit der Auswirkung der übrigen Prozessparameter. Darüber hinaus wurde ein optimaler Satz von Werten für die Prozessparameter auf der Grundlage eines Algorithmus zur Response-Optimierung unter Berücksichtigung der zuvor beobachteten Simulationsfehler und der berichteten Werte der maximal zulässigen Ausdünnung gefunden. Die Ergebnisse bei verschiedenen Produktionsraten zeigen, dass die Vorschubgeschwindigkeit einen weniger signifikanten Einfluss auf die Qualität des Endprodukts hat, und bestätigten die Möglichkeit, die Produktionsrate zu erhöhen, ohne die geometrische Genauigkeit der BPP signifikant zu beeinträchtigen. Nichtsdestotrotz müssen bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten Stabilitätsfragestellungen behandelt werden, um die Sicherheit des Herstellungsprozesses zu gewährleisten.

Das in AP1.5 erstellte Tool zur Simulation von Umformungen von metallischen BPP im Walzprägen wird benutzt, um optimale Prozessparameterintervalle der R2R-Umformung in der CoBiP-Fertigungslinie anhand der in AP1.2 konstruierten und finalisierten CoBiP_BPPs vorzuplanen. Dafür wurden Walzenpaare konstruiert, die Patrizie und Matrize der CoBiP_Anoden und CoBiP_Kathoden enthalten. In Abbildung 22 sind die am Fraunhofer IPT konstruierten Walzenpaare gezeigt. In diesem Zuge werden die Alignmentstrukturen aus AP5.1 ausgelegt, um eine Ausrichtung der umgeformten Bänder zu garantieren.

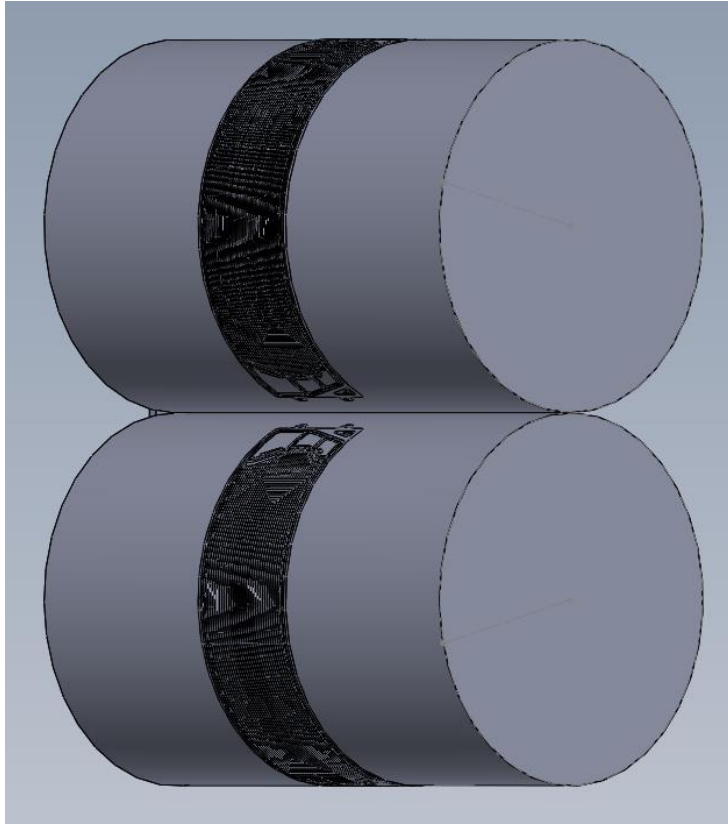


Abbildung 22: Beispiel eines konstruierten Walzenpaares mit der CoBiP_Kathode

AP1.6: Erstellen eines Design-Clearance-Dokuments zur Systemspezifikation der BPP und Festlegung der 3D-CAD Daten und Zeichnungsableitungen [11/20]

In Zusammenarbeit mit dem FZJ wurde ein Design-Clearance-Dokument zur Definition der funktionalen CoBiP_BPP angefertigt. In dieses Dokument wurden Anforderungen aus Anwender-, Herstellungs- und Betriebsperspektive aufgenommen und in die Auslegung des Flowfields, des Manifolds und der Stackgeometrie einbezogen. Das für das Projekt funktionale CoBiP_BPP_Design wurde somit für den weiteren Projektverlauf definiert. Dieses gilt es mit der CoBiP-Fertigungskette zu produzieren und in einem Shortstack mit Lastprofilen von STACK zu testen. Durch nun folgende iterative Versuchsreihen können kleinere Anpassungen in das CoBiP_BPP_Design eingearbeitet werden. In diesem Arbeitspaket wurde der Meilenstein 1 (M1) des CoBiP-Projektes erreicht. Ein den fluiddynamischen Anforderungen angepasstes Flowfelddesign und CoBiP_BPP_Design wurden definiert (M1 Design-Clearance-Dokument).

AP2: Entwicklung eines Kalendersystems für das R2R-System und Prototypenentwicklung der strukturierten Walzen [IPT, Saueressig]; Laufzeit 05/20-06/23

Mithilfe des Design-Clearance-Dokuments wurden die Walzen des Kalenderprägesystems von Matthews International GmbH definiert. Dieses Kalendersystem wird mit acht Walzen für die spätere Umformung von zwei metallischen Folienbahnen ausgelegt. Hierbei werden die Spezifikationen der Bipolarplatte und Anforderungsprofile des Werkzeugs einbezogen, um beispielsweise die Presskraft des Systems, welche simulativ in AP1 abgeschätzt wurde, mit diesem System umsetzen zu können. Dies erfordert eine detaillierte Abstimmung der Konsortialpartner. Nach Definition der Hartmetallwalzenpaare werden diese von der Matthews International GmbH hochpräzise gefertigt und in das Kalendersystem integriert. Nach Fertigstellung wird dieses Modul zu dem Fraunhofer IPT gesendet, um in AP5 in Betrieb genommen zu werden.

M2: Erhalt der strukturierten Walzen zur Umformung von metallischen Folien [06/23]

Die für die Umformung genutzten Walzen wurden von Matthews International GmbH an das Fraunhofer IPT geliefert.

AP2.1: Auswahl und Entwicklung von acht oberflächenstrukturierten Walzen [05/20-11/20]

Bereits während der Erstellung der Anforderungsliste für das Design-Clearance-Dokument wurden erste Fertigungstests bei Saueressig durchgeführt. Diese dienten zur Festlegung des zu verwendenden Walzenmaterials sowie zur Bestimmung der Prozessparameter für die Walzenfertigung.

Nach einem ersten Materialscreening wurden verschiedene Kaltarbeitsstähle in Kombination mit unterschiedlichen Produktionstechnologien für Produktionstests verwendet, um eine generelle Auswahl des Materials und der Produktionstechnologie zu treffen. Hauptaugenmerk lag hierbei auf der Fertigungszeit und der Qualität der produzierten Strukturen. Anschließend wurden zusätzlich verschiedenen Oberflächenbearbeitungstechnologien zur Vor- und Nachbehandlung der strukturierten Elemente getestet sowie die Produktionsparameter variiert, um die Grenzen der Fertigungstechnologien zu bestimmen und diese in die Erstellung des BPP-Designs einfließen zu lassen.

Für die Fertigungstests wurde ein generisches Testdesign verwendet, welches alle typischen geometrischen Elemente einer BPP enthält. Dieses wurde vom Fraunhofer IPT zur Verfügung gestellt. Eine Version des verwendeten Testdesigns und das erzeugte Motiv auf einer Testwalze sind in Abbildung 23 dargestellt. Die Strukturierung erfolgte dabei jeweils als Positiv- und Negativ-Motiv, da die Prägung der Platten später in Matrize-Patrize-Prägung erfolgt.

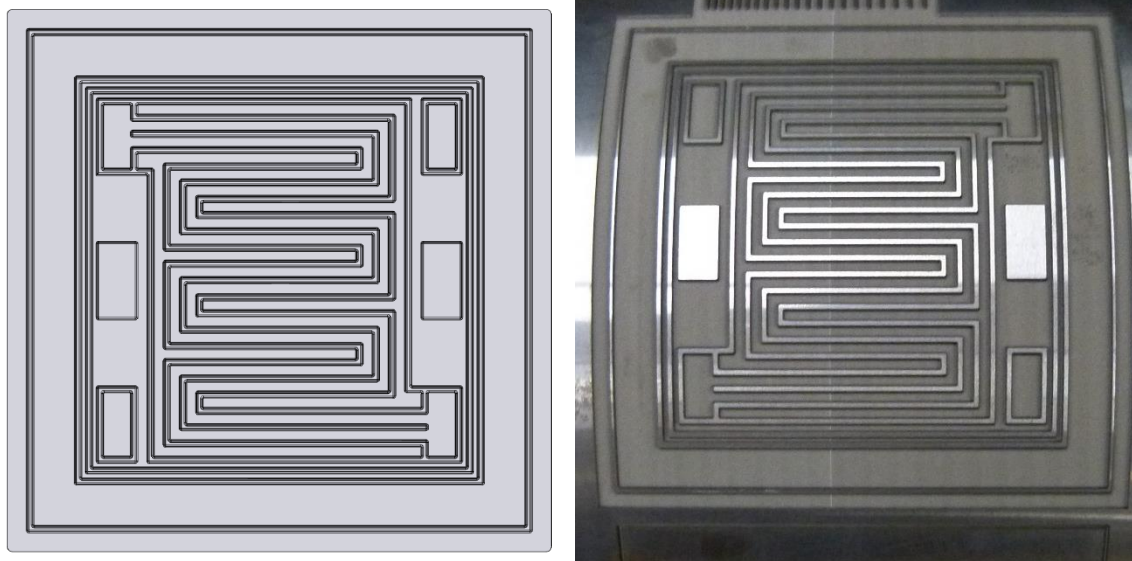


Abbildung 23: Links: Darstellung des Testdesigns für Vorab-Tests; Rechts: Testdesign auf einer Testwalze

Das gefertigte Testdesign wurde anschließend mit einem optischen Mikroskop dreidimensional vermessen. Besonderer Fokus wurde dabei auf die Geometrie der Kanäle gelegt, sprich auf die Tiefe sowie das Profil ebendieser. Exemplarisch sind in Abbildung 24 die Draufsicht sowie das Profil eines Kanals abgebildet. Anhand der Ergebnisse der Analysen wurden die Parameter des Designs der BPP an die Grenzen der Fertigungstechnologien angepasst. Anhand des Testdesigns konnten dabei nur generelle Grenzen (Flankenwinkel, Kanalbreiten, etc.) festgelegt werden. Eine iterative Optimierung des Designs sowie die Bestimmung der endgültigen Produktionsparameter erfolgten in AP2.3 unter Verwendung der erstellten Halbschalen-Designs.

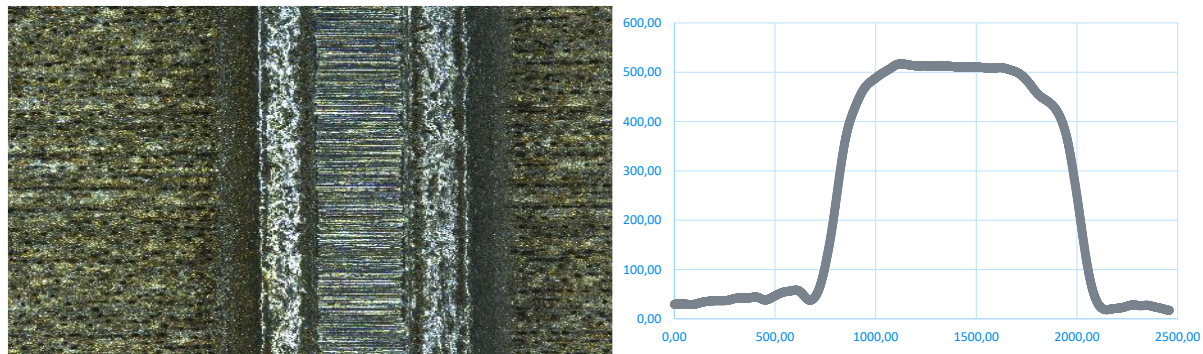


Abbildung 24: Draufsicht (links) und Querschnitt (rechts) eines Kanals aus einem gefertigten Testdesign

AP2.2: Auslegen eines Lasererwärmungsmoduls des R2R-Systems für die umzuformende metallische Folie und Zeichnungsableitung [05/20- 11/20]

Das Lasererwärmungsmodul (siehe Abbildung 25) wurde beschafft und am Fraunhofer IPT in Betrieb genommen (Spannungsversorgung & Steuerung, Kühlsystem). Hierfür wurde ein Direktiodenmodul mit Linienlänge 200 mm und einer Wellenlänge von 940 nm angeschafft. Die spezifische Leistung liegt bei 40 W/mm. Für die Umformtests können so individuelle P-t-Profile für die acht Liniensegmente programmiert werden. Eine geeignete Temperatursensorik wurde in das Abwicklermodul integriert.



Abbildung 25: Direktiodenmodul mit 940 nm Wellenlänge

Für die Integration des entwickelten und in Betrieb genommenen Lasererwärmungsmodul in die R2R-Linie wurde eine lokale Laserschutzumhausung entwickelt und konstruiert. Diese ist in Abbildung 26 dargestellt. Die Laserschutzumhausung schützt den Bediener der Maschine vor austretender Laserstrahlung. Zeitgleich wird durch die lokale Umhausung ein aufwändiger Laserschutz für das Gesamtmaschinengehäuse vermieden. Die Laserschutzumhausung kann gezielt durch das Anschließen an eine Absaugungsanlage mit Luft durchströmt werden, um die durch den Laserprozess entstehende Wärme und Partikel abtransportieren zu können. Zudem sind hinter der Bearbeitungszone Pyrometer zur Messung der Temperaturverteilung befestigt.

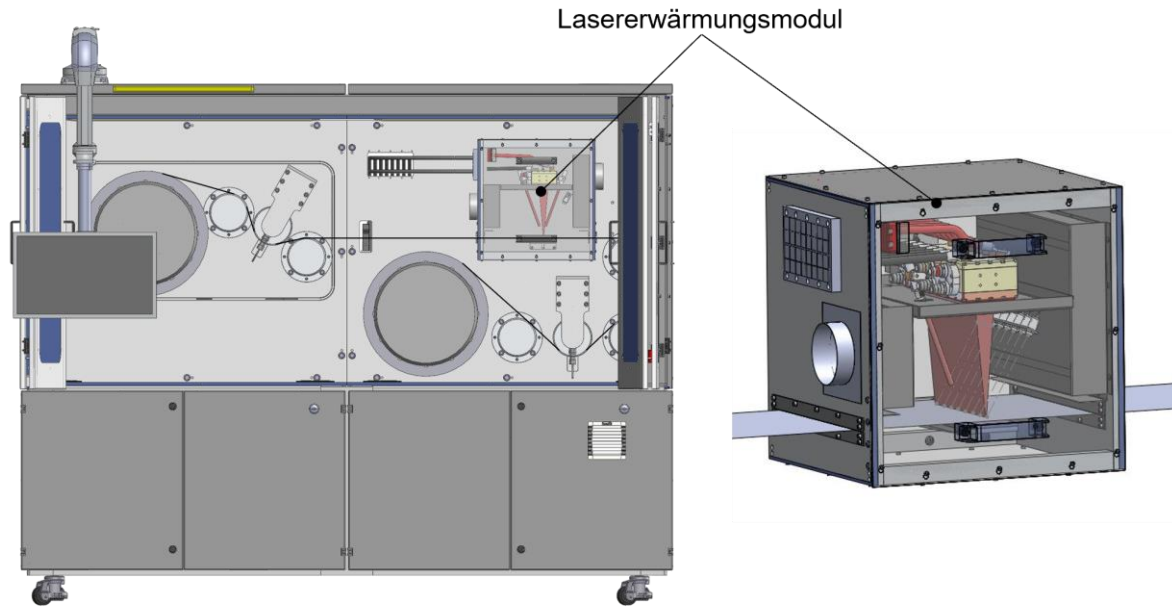


Abbildung 26: Lokale Laserschutzumhausung zur Integration des Lasererwärmungsmoduls in das R2R-Abwicklermodul

Das Lasererwärmungsmodul wurde in das R2R-Abwicklermodul integriert, sodass eine Temperatur- oder Gefügeveränderung dem Prägeprozess direkt vorgelagert ist und der Einfluss auf die Prägung untersucht werden kann (siehe Abbildung 26). Die montierte Umhausung ist in Abbildung 27 dargestellt. Die mechanische Anbindung erfolgt über die vertikale Grundplatte.



Abbildung 27: Lasererwärmungsmodul

AP2.3: Entwicklung und Prototypenfertigung der Umformwalzen und Strukturierung dieser durch das festgelegte Design in 1.6 [11/20-06/23]

Das BPP-Design wurde vom Forschungszentrum Jülich als STL-Datei zur Verfügung gestellt und bei Saueressig für die Strukturierung der Walzen aufbereitet. Zusätzlich wurden die Walzen mit weiteren Zusatzelementen versehen, welche für eine exakte Ausrichtung der Walzen zueinander notwendig sind. Im weiteren Verlauf des Projektes wurden zudem Alignment-Strukturen für die Ausrichtung der Platten in den Laserschweiß- und Laserschneidprozessen entwickelt und ebenfalls zum Gesamtlayout hinzugefügt. Anschließend wurden die Walzen für mehrere Prägeversuche im Saueressig Competence Center genutzt.

Die Versuche dienen zum einen zur Optimierung der Prägestrukturen und des BPP-Designs und zum anderen zur Bestimmung der Prozessparameter, mit denen die BPP-Halbschalen erfolgreich geprägt werden konnten. Diese Parameter fließen dann in die Auslegung des R2R-Moduls ein. Abbildung 28 zeigt die strukturierten Walzen während eines Prägeversuchs. Im Laufe der Versuchsreihen wurden die Walzen mit einer Stahloberfläche zeitweise gegen Walzen mit einer Kupferoberfläche ausgetauscht. Die Kupferoberfläche ermöglicht eine schnellere und ressourcenschonendere Aufarbeitung und Bearbeitung der Oberfläche, sodass beschädigte Walzen schneller ausgetauscht werden können und auch ein schnellerer Wechsel des Layouts durchgeführt werden kann.

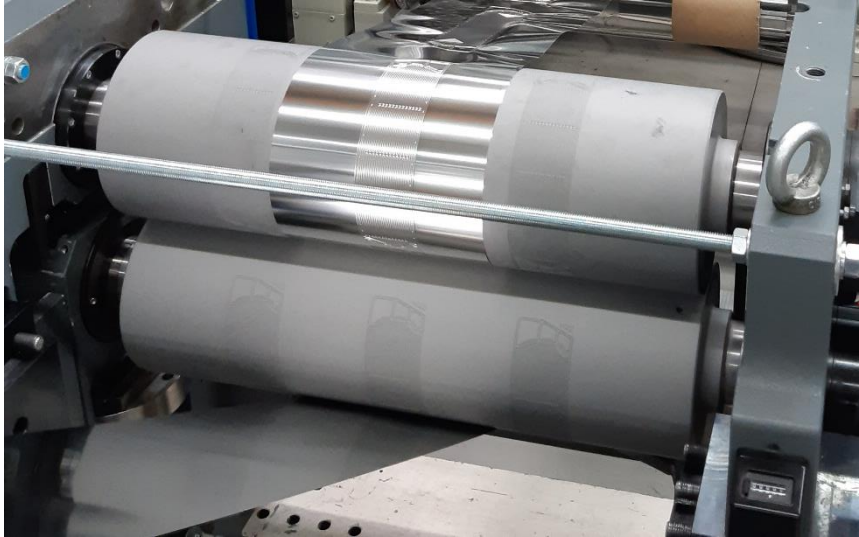


Abbildung 28: Foto von strukturierten Prägewalzen mit mehreren Halbschalen-Varianten während eines Prägeversuchs

Die geprägte Folie wurde mittels optischer Mikroskope dreidimensional vermessen, um die Ausformung des Layouts zu überprüfen. Zusätzlich wurden Querschliffe zur Überprüfung der Plattenqualität angefertigt. Diese zeigen im Endergebnis eine sehr gute Flankenqualität der geprägten Kanäle (s. Abbildung 29). Zudem liegt die Tiefe der geprägten Strukturen im Bereich der Strukturtiefe auf den Prägewalzen. Damit wurde die angestrebte Maximaltiefe der Kanäle erreicht. Auch am Fraunhofer IPT wurden Querschliffe der geprägten Folien erstellt und die Verdünnung des Materials bestimmt. Diese betrug maximal 13 %.

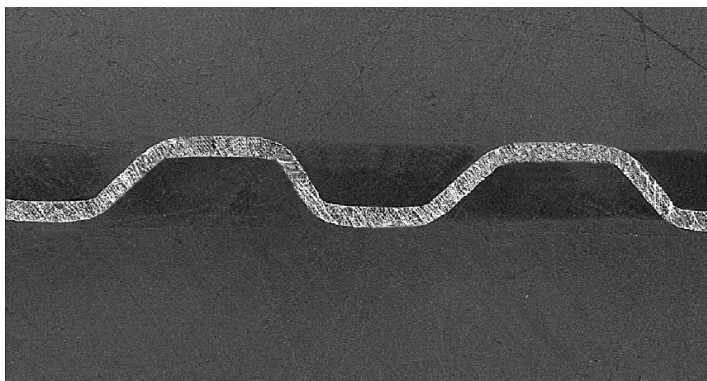


Abbildung 29: Mikroskopaufnahme des Querschliffs einer geprägten Halbschale im Bereich des Flowfields

Die geprägte Folie wurde anschließend den weiteren Projektpartnern für weitere Versuche und die Weiterverarbeitung innerhalb der Prozesskette zur Verfügung gestellt.

Es zeigt sich, dass vor allem die Prägegeschwindigkeit und die Bahnspannung ausschlaggebend für die Qualität und Glattlage der geprägten Folie sind. Dabei ist die notwendige Bahnspannung deutlich höher als ursprünglich erwartet. Die Konstruktion des Kalanders und der gesamten R2R-Anlage mussten daher auf die höhere Bahnspannung angepasst werden. Dies führte zu der Entscheidung die Ausrichtung des Prägewerks zu ändern und andere Komponenten (z.B. Walzenlager u.ä.) im Aufbau des Kalanders zu verwenden.

Die strukturierten Walzen für das Prägekalandersmodul der R2R-Prototypenanlage wurden an das Fraunhofer IPT geliefert. Vorab wurde das Kalandersmodul bereits im Oktober 2022 im Rahmen von AP5 an das Fraunhofer IPT ausgeliefert. Die Inbetriebnahme des Moduls erfolgte mit einem älteren Walzenpaar aus den Versuchskampagnen, um eine Beschädigung der endgültigen Walzen bei der Einrichtung des Kalanders zu vermeiden.

Das Gesamtlayout der Walzen beinhaltet jeweils ein Kathoden- und Anoden-Halbschalen-Layout, welche nacheinander in Umfangsrichtung auf den Walzen angeordnet sind. Zusätzlich sind Elemente zur Ausrichtung der Walzen im Kalanders sowie Alignment-Strukturen für die folgenden Laserprozesse in das Layout integriert.

AP3: Laserschweißen und Laserschneiden von BPP und Entwicklung eines R2R-Moduls [IPT, ILT]: Laufzeit 01/20-12/21

In diesem Arbeitspaket soll ein kombiniertes R2R-Modul zum Laserschweißen und Laserschneiden von BPP von dem Fraunhofer ILT mit Unterstützung des Fraunhofer IPT entwickelt werden. In dem Design-Clearance-Dokument wird festgelegt auf welcher Coil-Breite dies stattfinden soll. Über die möglichen festgelegten Werkstoffvarianten und BPP-Designs, lässt sich ein Lasersystem und dessen Anforderungen ableiten sowie ein Verfahren zur Integration dieser Fertigungstechnologien - im optimalen Fall über nur eine Laserstrahlquelle - ermöglichen. Aufwändige, umfangreiche Reihenuntersuchungen zur optimalen Prozessführung beim Laserstrahlschneiden, werden durch Simulationsrechnungen auf wesentliche Prozessparametervariationen reduziert.

Die Forderung nach einer gasdichten Schweißnaht stellt insbesondere hohe Ansprüche an die zu entwickelnde kontinuierliche Spanntechnik. Weiterhin werden die im Allgemeinen schrittweise durchgeführten Fügeaufgaben in eine der Bandgeschwindigkeit angepasste Prozessführungsstrategie und Anlagentechnik übertragen. Die Ergebnisse der Prozessentwicklung werden in einem iterativen Prozess zur Anpassung des Designs der BPP zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit und Erhöhung der Prozessstabilität und Produktionsgeschwindigkeit genutzt. Zur Bewertung der Prozessfähigkeit wird ein auf Prozessemissionen basierendes Prozessüberwachungssystem installiert. Eine besondere Herausforderung besteht bei der Auslegung des Laserschneidprozesses an den doppelwandigen Kühlkanalstrukturen. Zum einen wird die Schneidgasströmung nach Durchtritt der oberen Materialschicht gestört, so dass die Schmelze in der Schnittfuge an der unteren Materialschicht unter Umständen nicht ausreichend beschleunigt bzw. ausgetrieben werden kann. Zum anderen ist die auftreffende Laserintensität an der unteren Materialschicht, aufgrund der Strahldivergenz sowie der Absorption und Reflektion an der sich ausbildenden oberen Fuge, nicht mehr optimal verteilt. Um einen grat- und spritzfreien Schnitt sowie eine Konturtreue zu gewährleisten, muss eine spezialisierte Prozessführung gestaltet werden. Entsprechende Prozessuntersuchungen beinhalten Gerad- und Konturschnitte an geschichteten Platten mit variablen Wandabstand mit Betrachtung des Funkenflugs und der Gratbildung. Wird ein schneidgasunterstützter Prozess angestrebt, wird die Schneidgasexpansion innerhalb der doppelwandigen Struktur mittels schlierenoptischer Analyse untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Konzeption von optimierten Schneidgasdüsen mit ein. Die beiden Verfahren werden zunächst getrennt untersucht und die Ergebnisse der Prozessentwicklung an separaten Testständen am Fraunhofer ILT evaluiert. Danach erfolgt die Konzeptionierung eines R2R-Moduls.

Bei Fertigstellung und Ableitung dieses R2R-Moduls nach den spezifischen Anforderungen, die eine Integrierbarkeit in die Fertigungsstrecke am Fraunhofer IPT gewährleisten, werden Versuchsreihen dieses Moduls für Materialvarianten und BPP-Designs durchgeführt, so dass ein Konzept zur Steuerung und optimierten Funktionsweise in der kontinuierlichen Fertigungsstrecke umgesetzt werden kann. Während dieser Entwicklungsarbeit, wird ein Anpresssystem, bzw. Haltesystem für die metallischen Folien in

Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPT entwickelt, damit ein Fügen beim Laserschweißen garantiert werden kann.

M3: Erhalt aller Konstruktionen und Ableitungen der R2R-Module für die Fertigung und Integration [12/21]

In AP5 werden Teile der fertigen Konstruktionen gezeigt. Diese wurden erfolgreich erstellt und für den Aufbau der R2R-Gesamtanlage verwendet.

AP3.1: Entwicklung und Auslegung von Lasertypen und Verfahren zum Laserschweißen und Laserschneiden [01/20-06/21]

Laserschweißen

Zu Beginn des Projekts wird ein neuer Versuchsaufbau zum Fügen der BPP-Hälften konzipiert und zusammengestellt. Dieser Aufbau besteht aus einem RAYLASE Axial Scan Fiber 30 Scankopf und einem 1 kW single mode Faserlaser der Firma SPI Lasers. Daten zu den zwei Komponenten werden in der Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Geräteeigenschaften des verwendeten Aufbaus

| Laserstrahlquelle | SPI redPOWER QUBE |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Betriebsart | Kontinuierlich (cw) |
| Strahlqualität | $M^2 < 1,3$ |
| Maximale Leistung [W] | 1000 |
| Wellenlänge | 1075 +/- 7 nm |
| Durchmesser Faser [μm] | 20 |
| Scankopf | RAYLASE Axial Scan Fiber 30 SC |
| Bearbeitungsfeld [mm^2] | 300x300 |
| Spotgröße [μm] | 42 |
| Arbeitsabstand [mm] | 318 |

Der verwendete Scankopf bietet drei Vorteile an: eine hochdynamische Spiegelbewegung, die Möglichkeit der Verschiebung der z-Lage und ein großes Bearbeitungsfeld. Das BPP-Design, welches im CoBiP Projekt festgelegt ist, weist Dimensionen von 280x66,5mm² auf und passt somit vollständig im Bearbeitungsfeld des Scanners.

Eine Minimierung der Prozesszeit erfordert eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit. Die Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit erfordert wiederum höhere Oszillationsfrequenzen, welche mit vorhandenen Scanköpfen entweder nicht erreichbar oder nur bedingt möglich sind. Aus diesem Grund muss als Erstes eine systematische Untersuchung zur örtlichen Leistungsmodulation stattfinden. Das Ziel dieser Untersuchungen ist eine bestimmte Wobble Amplitude und Frequenz zu definieren, welche zu verbesserten Ergebnissen führen. Verschiedene Versuchsreihen mit und ohne örtliche Leistungsmodulation finden statt. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst und dargestellt. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, werden die eingestellten Werte (Soll-Werte) im Scanner wie die Oszillationsamplitude und -frequenz der örtlichen Leistungsmodulation und Scannergeschwindigkeit v_s mit gemessenen Werten (Ist-Werten) verglichen. Dies erfolgt für die Messung von f_s , A_s und v_s (Wobble Frequenz [Hz], Wobble Amplitude [mm] und Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]) mit einer positionssensitiven Diode (PSD). Der Pilotlaser der Anlage wird auf die 4 x 4 mm² große Fläche einer PSD gestrahlt und die durch den auftreffenden Lichtstrahl verursachten elektrischen Spannungsunterschiede an der Diode werden aufgenommen. Die Messung des Spannungsunterschieds in zwei orthogonalen Richtungen erlaubt eine zweidimensionale Aufzeichnung des Pilotlaserstrahlpunktes über die Zeit. Die Spannungsmessung kann mittels eines Oszilloskops aufgezeichnet und als Diagramm dargestellt werden. Für die Geschwindigkeitsmessung werden 10 Messungen bei einer Geschwindigkeit von 100-1000 mm/s durchgeführt. Für die Messung wird ein 3 mm langer Vektor in x-Richtung des Diodenfelds gefahren. Abbildung 30 zeigt beispielhaft den Verlauf des Strahls auf der Diode über die Zeit.

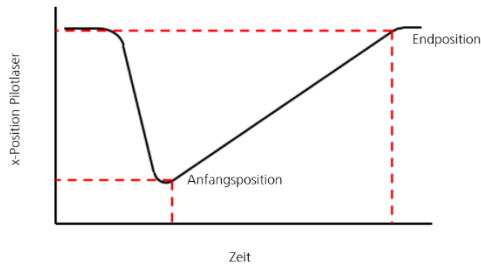


Abbildung 30: Oszilloskopaufzeichnung einer Geschwindigkeitsmessung

Zu Beginn ist die negative Bewegung in x-Richtung des Pilotlasers auf die Startposition der Schweißkontur zu beobachten. Nach der Rundung beginnt der Scanner die Kontur abzufahren und diese wird als Anfangsposition für die Geschwindigkeitsmessung bestimmt. Die Galvanometerspiegel fahren die Kontur mit einer konstanten Geschwindigkeit in positiver x-Richtung ab. Anschließend ist der Schleppverzug bei der Entschleunigung der Spiegel als Rundung zu sehen. Die Endposition der Geschwindigkeitsmessung wird vor der Rundung definiert, um Messfälschungen durch den Schleppverzug zu vermeiden. Die Geschwindigkeitsmessungen der PSD sind in Abbildung 31 aufgetragen. Der maximale Fehler zwischen Ist- und Soll-Geschwindigkeit beträgt 5 % und entsteht bei 100 mm/s bzw. 500 mm/s. Der Geschwindigkeitsbereich für die experimentellen Versuche erstreckt sich von 300 mm/s bis 800 mm/s. In diesem Bereich weist der Fehler einen Wert zwischen 2,13 und 5 % auf.

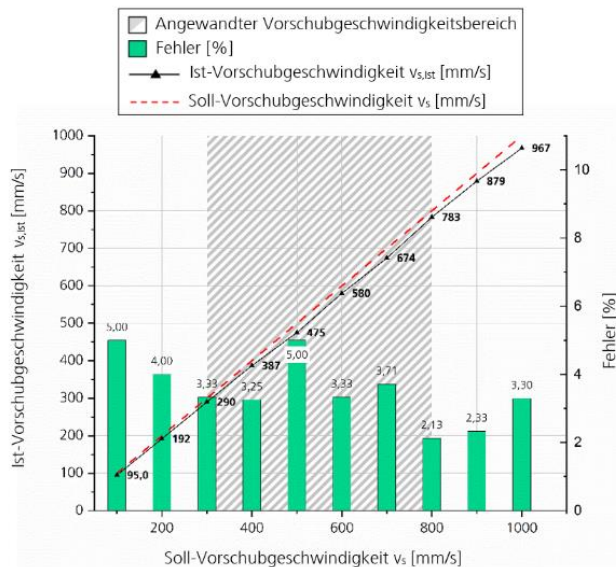


Abbildung 31: Soll- und Ist-Verlauf anhand der Geschwindigkeitsmessung inkl. Fehlerquotient der beiden Verläufe

Die Messung beider Größen Oszillationsamplitude und -frequenz der ö.L.M. kann anhand einer einzelnen Aufnahme abgelesen werden. Als Messkontur wird weiterhin ein Vektor der Länge 3 mm verwendet. Um den linearen Vorschub aus der Messung zu entfernen, wird der Strich in x-Richtung gefahren und nur die y-Position des Pilotlasers auf der PSD untersucht. Abbildung 32 zeigt den sinusförmigen Verlauf der Messung.

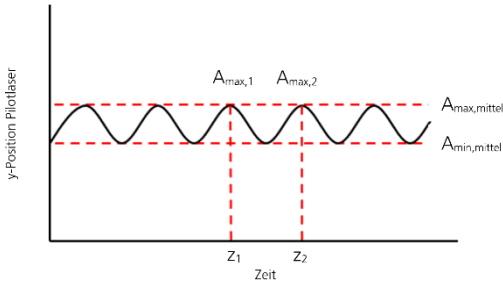


Abbildung 32: Oszilloskop-aufzeichnung der Messung von A_s und f_s

Die Ist-Oszillationsamplitude ergibt sich aus den durchschnittlichen Maxima und Minima der Amplituden A_{\max} und A_{\min} . Die Mittelung der Werte $A_{\max,mittel}$ und $A_{\min,mittel}$ ergibt schließlich die Ist-Oszillationsamplitude der ö.L.M. Die Ist-Oszillationsfrequenz ist der Quotient aus der Zeit zwischen zwei A_{\max} und die Periode der Sinuswelle in diesem Zeitbereich. In Abbildung 33 zu sehen sind die Ist- und Soll-Vergleichswerte bei $A_s = 0,05$, $0,1$ und $0,2$ mm bei $f_s = 1000$, 2000 , 3000 , und 4000 Hz. Jeder Wert wird bei den drei Geschwindigkeiten $v_s = 100$, 500 und 1000 mm/s gemessen.

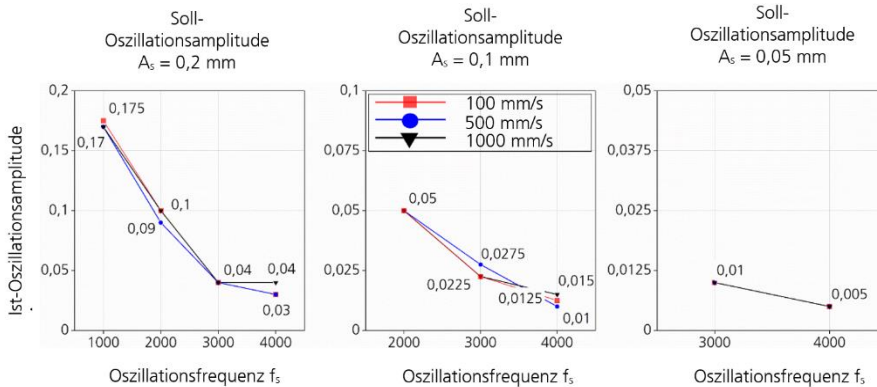


Abbildung 33: Graphische Darstellung der Ist-Oszillationsamplituden über der Frequenz

Die Ist-Oszillationsamplituden $A_{s,ist}$ verkleinern sich gegenüber jeder Soll-Amplitude A_s mit zunehmender Frequenz. Die Vorschubgeschwindigkeit hat hingegen einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Ist-Amplitude. Die Ist-Frequenz unterscheidet sich nicht von der Soll-Frequenz. Die Ursache der Verkleinerung der Amplitude hängt im Wesentlichen von der dynamischen Einschränkung der Galvanometerspiegel ab. Die Rate der Verkleinerung vergrößert sich mit zunehmender Soll-Amplitude. Die Ist-Amplitude nähert sich bei allen drei Soll-Amplituden asymptotisch auf 0 mm an, so dass eine Vergrößerung der Frequenz eine immer kleinere Änderung der Ist-Amplitude bedeuten würde. In Abbildung 34 ist ein visueller Verlauf zur Scannerbewegung für sechs Messpunkte aus den Diagrammen in Abbildung 33 zu sehen. Eine Überlagerung der Kreisbewegung ist nur bei $v_s = 100$ mm/s gegeben. Bei dieser Geschwindigkeit ist auch ab $f_s \geq 3000$ Hz und $A_s \leq 0,1$ mm eine Überlagerung der Kreisbewegung nicht mehr gegeben. Bereits ab $f_s \geq 2000$ Hz und $A_s \leq 0,1$ mm ist die lineare Vorschubgeschwindigkeit $v_s = 1000$ mm/s gleich oder schneller als die Geschwindigkeit der Oszillationsbewegung am Punkt, wo sie genau entgegen der Vorschubgeschwindigkeit wirkt. Die Relativgeschwindigkeit v_r bzw. die Überlagerung des linearen Vorschubs mit der Kreisbahngeschwindigkeit wirkt nicht mehr entgegengesetzt der Schweißrichtung. Ist dies der Fall entstehen keine Kreise bzw. Schleifen mehr und die Kontur gleicht einer Sinuskurve. An den

Stellen der geringsten Relativgeschwindigkeit ist Wärmestauung und anschließender Lochbildung in der Schweißnaht zu erwarten.

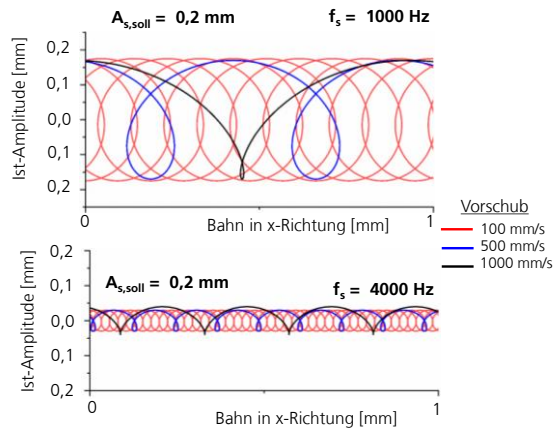


Abbildung 34: Berechnung der Variierung der Wobble-Amplitude und Frequenz in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit

Laserschneiden

Für die Konzeptionierung des Demonstrators hinsichtlich der Schneidprozesse sind aus system- und verfahrenstechnischer Sicht besonders die Untersuchungen relevant, die die Vergleichsmöglichkeit und letztendlich die Festlegung folgender Alternativen erlauben:

- Schneidgasunterstützter Prozess mit Schneidkopf oder Remoteschneiden mit einem Scanner und Crossjet
- Nutzung eines Multimode- oder eines Singlemode-Faserlasers.

Da für das Remoteschneiden hohe Intensitäten für den dampfdruckinduzierten Austrieb des Materials erforderlich sind, ist die Variante aus Remoteschneiden mit einem Multimodelaser im betrachteten Blechdickenbereich der BPP keine sinnvolle Kombination. Die übrigen Varianten werden im Folgenden betrachtet und auf geeignete Parameterräume bezüglich Schneidgeschwindigkeit, Schnittqualität und Toleranzen hin untersucht.

Schneidgasunterstütztes Schneiden (Schneidkopf) mit Multimode-Faserlaser

Zur Entwicklung einer geeigneten Prozessführung beim Laserstrahlschneiden wurden Linearschnitte an ungeprägtem und unbeschichtetem Stahlblech durchgeführt. Zielstellung war hierbei die Ermittlung der Trenngrenze als Funktion der Laserleistung und somit die Bestimmung der notwendigen Laserstrahlleistung und der Einfluss der Fokusslage. Zudem wurden die anhaftende Schmelze an der Blechunterkante (Bartlänge), die Blechoberflächen sowie die Breite der Schnittfuge untersucht. Die Konfiguration und nicht variierte Parameter sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Die Ermittlung der Trenngrenze als Funktion der Laserleistung führt zu dem Ergebnis, dass bereits mit einer geringen und kostengünstigen Laserleistung von nur $P=500\text{W}$ bei $0,1\text{ mm}$ Materialdicke eine Schneidgeschwindigkeit von $v=75\text{ m/min}$ sicher erreicht werden kann (Abbildung 35). Eine Laserleistung von $P=1\text{ kW}$ führt zu einem sicheren linearen Trennschnitt mit $v\sim 150\text{ m/min}$. Mit einer Laserleistung $P=1,5\text{ kW}$ werden $v\sim 200\text{ m/min}$ erreicht. Mit $P=2\text{ kW}$ kann mit dem genutzten Bewegungssystem „Breakdancer“, dessen maximal mögliche Geschwindigkeit bei $v=300\text{ m/min}=5\text{ m/s}$ liegt, keine Trenngrenze mehr ermittelt werden. Die ermittelte Trenngrenze bei Variation der Fokusslage zeigt zudem ein empfindliches Prozessverhalten (Abbildung 36). Eine Erhöhung der Fokusslage um $0,5\text{ mm}$ führt zu einer Reduktion der möglichen Trenngrenze von $v=160\text{ m/min}$ ($z=0\text{ mm}$) auf $v=155\text{ m/min}$ und eine Reduktion

der Fokuslage auf $z=-0,5$ mm zu einer möglichen Trenngrenze von $v=135$ m/min. Dieser Effekt ist bei der Wahl einer prozesssicheren Schneidgeschwindigkeit zu beachten.

Tabelle 4: Optische Konfiguration und konstante Prozessparameter

| Spezifikationen des Lasers und optische Konfiguration | |
|---|--------------|
| Strahlquelle | YLR-4000 SS |
| Maximale Laserleistung | 4000 W |
| Wellenlänge der Emission | 1070-1080 nm |
| Brennweite Fokussierung | 209 mm |
| Brennweite Kollimation | 100 mm |
| Abbildungsverhältnis | 1:2,1 |
| Durchmesser Faser | 50 μ m |

| Konstante Prozessparameter | |
|----------------------------|--|
| Betriebsmodus des Lasers | cw |
| Düsendurchmesser | 2 mm |
| Schneidgasdruck | 5 bar |
| Arbeitsabstand | 0,7 mm (sofern nicht anders angegeben) |
| Schneidgas | Stickstoff |

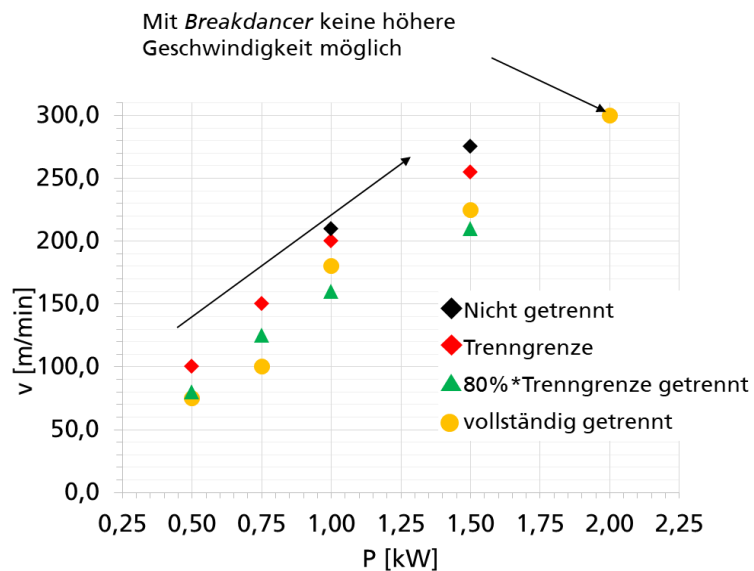


Abbildung 35: Abhängigkeit der erreichbaren Schneidgeschwindigkeit als Funktion der Laserleistung bei Fokuslage $z=0$ mm

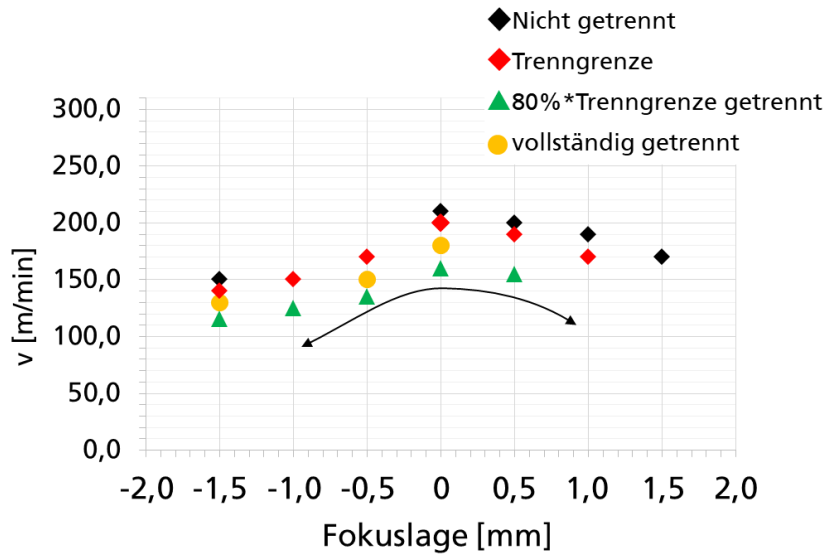


Abbildung 36: Abhängigkeit der erreichbaren Schneidgeschwindigkeit als Funktion der Fokusslage bei Laserleistung $P=1$ kW

In einem weiteren Schritt wurde die Anhaftung von Schmelztropfen (Bart) bei Variation der Schneidgeschwindigkeit an der Blechunterseite evaluiert. Diese Untersuchung berücksichtigt Reduktion der möglichen Verfah-, bzw. Schneidgeschwindigkeit in engen Konturen bzw. Radien der zu schneidenden BPP. Die Untersuchung führt zu dem Ergebnis, dass bei der Bearbeitung von Einzelblechen über einen großen Geschwindigkeitsbereich bartfreie Schnittflanken möglich sind (Abbildung 37). Die Bartbildung bei niedrigen Geschwindigkeiten ist für dünne Bleche typisch und kann durch eine geschwindigkeitsangepasste Laserleistungsmodulation drastisch reduziert werden.

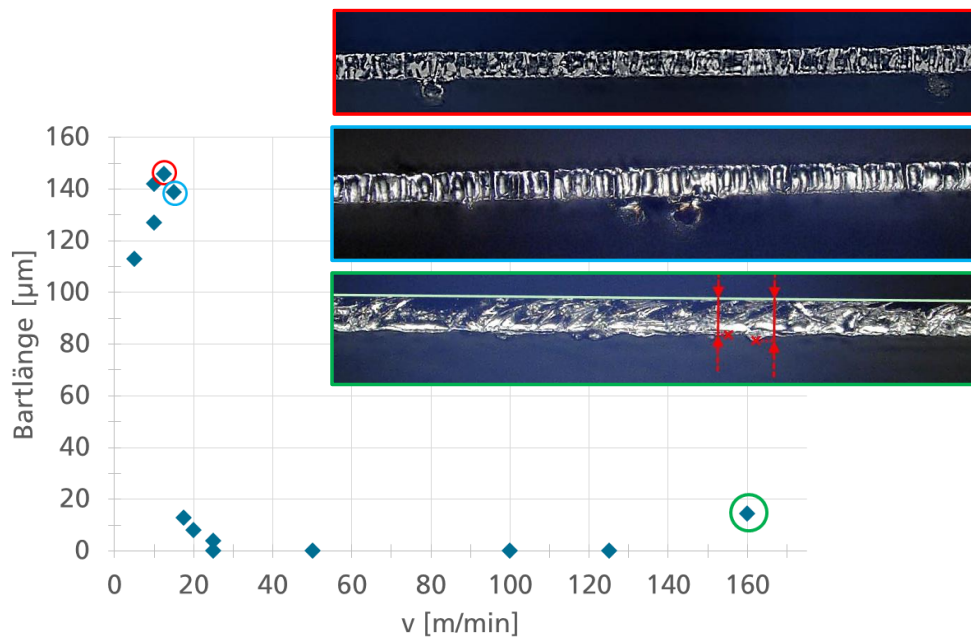


Abbildung 37: Abhängigkeit der Bartlänge als Funktion der Schneidgeschwindigkeit bei Fokusslage $z=0$ mm und Laserleistung $P=1$ kW

Für die Bearbeitung mit Schneidkopf sind zum Erreichen der möglichen Maximalgeschwindigkeiten von bis zu 200 m/min selbst mit hochdynamischen Antrieben ca. 150 mm Beschleunigungsstrecke erforderlich (Beschleunigung 5g, Ruck 5000 m/s³). Die möglichen Maximalgeschwindigkeiten werden bei den typischen Schnittkonturen der hier betrachteten BPP damit nur an den gerade verlaufenden Längsseiten überhaupt erreicht. Entscheidend für eine geringe Taktzeit beim Schneiden ist vielmehr eine gute Dynamik der Maschine für den Konturbetrieb.

Die Auslegung der Schneidprozesses konzentriert sich daher auf Qualitätskriterien und Robustheit des Prozesses. Dazu wurden die die Bartbildung stark beeinflussenden Parameter Fokuslage, Düsenabstand und Schneidgeschwindigkeit variiert und Toleranzfelder bestimmt.

Der Einfluss der Fokuslage wurde für die Geschwindigkeiten 20, 30 und 90 m/min untersucht. Dies erfasst zum einen den im Vergleich zur Maximalgeschwindigkeit typischerweise sehr robusten Bereich mittlerer Geschwindigkeiten, der eine weite Variation der Fokuslage zulässt, sowie für das Schneiden kleinerer Konturen anwendungsrelevanten Bereich niedriger Geschwindigkeiten, die aber noch oberhalb der Grenzgeschwindigkeit liegen, bei der zur Bartreduzierung eine Modulation der Laserstrahlung erfolgen sollte. Abbildung 38 zeigt, dass für alle Geschwindigkeiten ein Fokuslagenbereich mit negativen Fokuslagen existiert, in dem die maximale Bartlänge <10 µm ist. Mit Fokuslage ~0 mm (Fokus auf der Blechoberfläche) werden die schmalsten Fugen erzielt und bei niedrigen Geschwindigkeiten, bei denen keine durch Verdampfung erzeugte Beschleunigung der Schmelze auftritt, bildet sich in diesem Regime Bart. Die geringe Breite der Fuge und die Steilheit der Schneidfront trägt ebenfalls zu diesem Effekt bei.

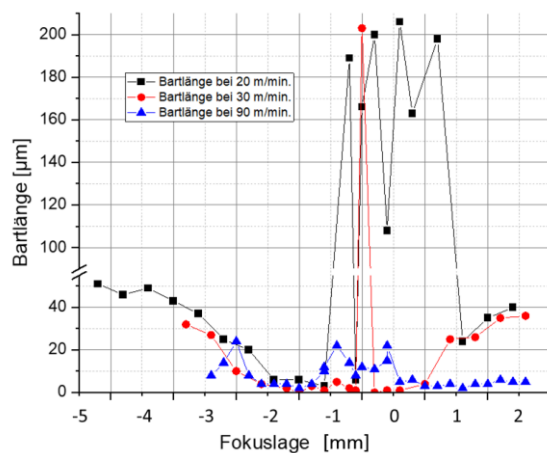


Abbildung 38: Bartbildung in Abhängigkeit der Fokuslage

Auf Grund der aufgeprägten Kanalstruktur ist eine große Toleranz des Arbeitsabstands vom Bearbeitungskopf (Düsen Spitze) zur Materialoberfläche wichtiges Auslegungskriterium. Die Variation des Arbeitsabstands führt gleichzeitig zu einer Verschiebung der Fokuslage um den gleichen Betrag. Abbildung 39 zeigt, dass das Toleranzfeld, das sich aus der Änderung des Arbeitsabstandes ergibt, die aus der Fokuslage resultierende Toleranz auch bei variierendem Düsenabstand nicht weiter einschränkt. Mit den gewählten Schneidgasparametern (Düsensdurchmesser 2 mm, Druck 5 bar) werden für Arbeitsabstände zwischen 0,5 mm und 1,3 mm (30 m/min) bzw. 1,5 mm (90 m/min) Barthöhen unter 15 µm erreicht. Die Fokuslage war für diese Versuchsreihen so gewählt, dass bei geringstem Arbeitsabstand auch die tiefste tolerierbare Fokuslage genutzt wurde.

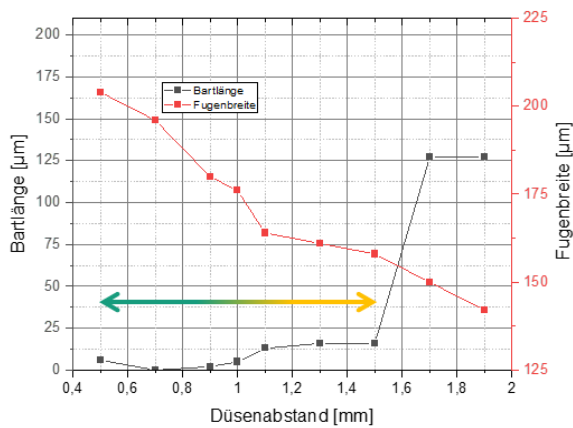


Abbildung 39: Bartbildung in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes

Die an planen Blechen optimierten Parameter und Toleranzfelder wurden nachfolgend an Platten mit aufgeprägter Kanalstruktur getestet. Zusätzlich zum variierendem Arbeitsabstand liegen an den Schrägen im Übergang von der unteren auf die obere Ebene bzw. auch umgekehrt veränderte Prozessbedingungen vor, weil der Laser- und Gasstrahl nicht mehr senkrecht auf die Oberfläche trifft und dies die effektiv zu schneidende Materialdicke und die Einkopplung des Gasstrahls in die Schnittfuge beeinflusst. Die Fotos in Abbildung 40 zeigen, dass auch unter diesen Bedingungen eine gute, annähernd bartfreie Qualität erreicht wird. Auf der Blechunterseite ist neben der Schnittkante Schmelze zu finden, die dort auf das Material auftrifft und teilweise anhaftet (s. Pfeile in Abbildung 40 unten). Dabei sind parameterabhängig unterschiedliche Ausprägungen dieses Effektes zu erwarten, da sich Richtung und Form des Schmelzaustriebs u. a. mit der Schneidgeschwindigkeit (Abstand zur Trenngrenze), der Fokusslage, der Gasströmung und der Krümmung der Schnittlinie ändern.

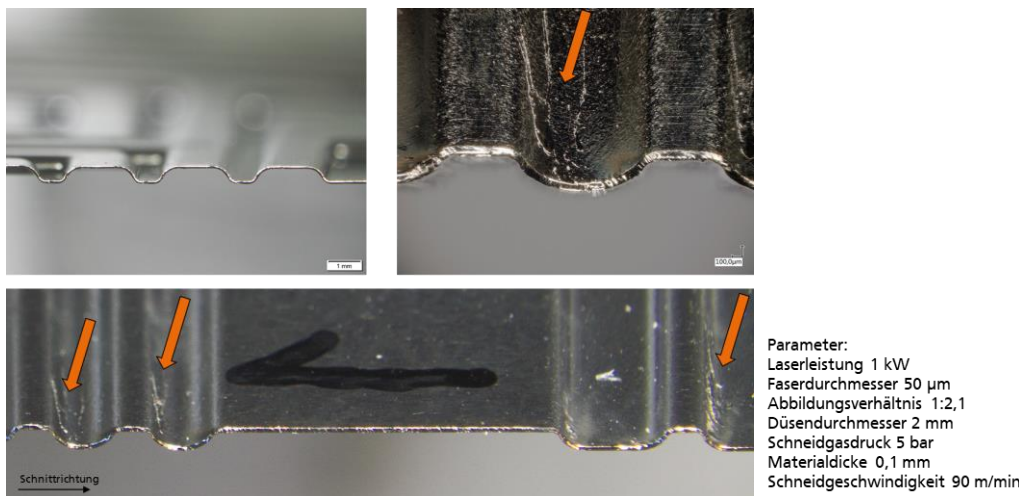


Abbildung 40: Schnitt in Material mit Prägung für Kanäle. Sicht auf die Blechunterseite.

In weitere Versuchsserien wurde ein Single-Mode Faserlaser eingesetzt, der sowohl für den Prozess mit Schneidkopf (gasunterstütztes Schneiden) als auch für das Remoteschneiden geeignet ist. Zum Vergleich mit dem Multimode-Faserlaser wurden zunächst Versuche mit Gasunterstützung durchgeführt. Der Single-Mode Laser zeichnet sich durch eine bessere Strahlqualität aus (Strahlparameterprodukt 0,4 mm*mrad gegenüber 1,9 mm*mrad bei einem Multi-Mode Laser mit einer 50 µm Faser) und erreicht damit kleinere Fokussdurchmesser. Abbildung 41 zeigt die Kaustiken der beiden hier eingesetzten Laser mit den für die

Versuche gewählten Fokussierungen. Die Intensität im Fokus ist beim Single-Mode Laser bei gleicher Leistung um den Faktor 7,6 größer.

Multimode Laser

Strahlqualität 1,8 mm*mrad
Faserdurchmesser 50 µm
Fokusbereich 105 µm
Rayleighlänge 1,5 mm

Singlemode Laser

Strahlqualität 0,4 mm*mrad
Faserdurchmesser 30 µm
Fokusbereich 38 µm
Rayleighlänge 0,9 mm

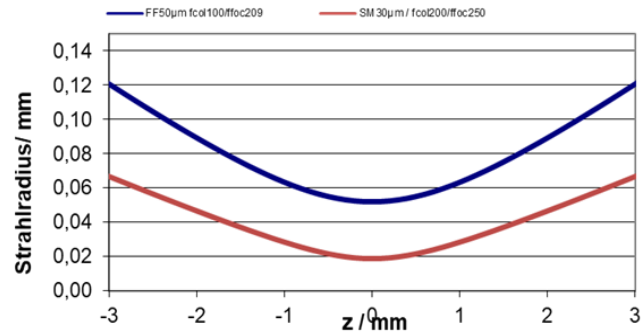


Abbildung 41: Kaustikvergleich Single/Multimodelaser für die eingesetzten Abbildungsverhältnisse (2,1 und 1,25)

Durch den kleineren Fokus und den resultierenden schmalen Schnittspalt ist der Leistungsbedarf für den Schnitt nochmals geringer. Bereits mit einer Leistung von 300 W wird die Maximalgeschwindigkeit der für diese Versuche zur Verfügung stehenden Linearachse von 120 m/min erreicht. Abbildung 42 zeigt die Geschwindigkeits- und Fokusbereichabhängigkeit der Barthöhe. Die besten Ergebnisse werden auch hier mit einer Defokussierung im Bereich von 1 mm erreicht. Die Defokussierung ist damit größer als die Rayleighlänge und der Vorteil des kleinen Fokus wird in dieser Einstellung nicht voll genutzt. Die ausführliche Betrachtung über der Geschwindigkeit zeigt, dass es in einem mittleren Geschwindigkeitsbereich zu lokaler Bartbildung kommen kann.

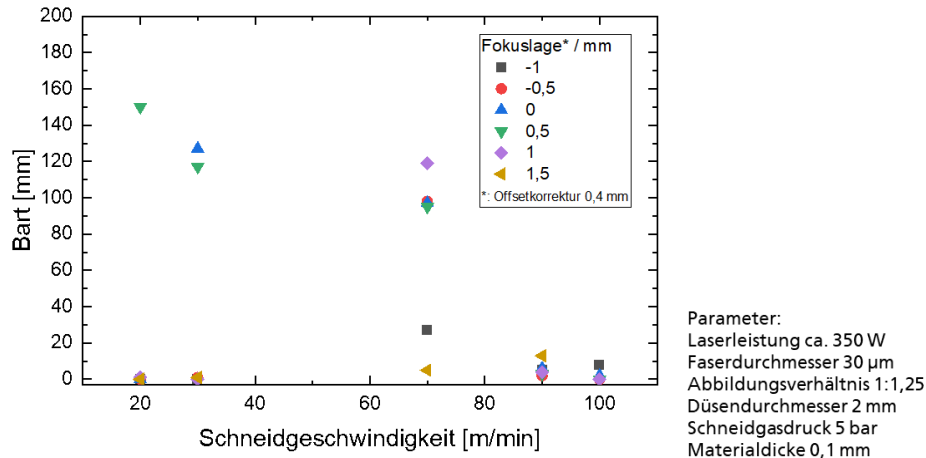


Abbildung 42: Bartbildung

Remoteschneiden

Beim Remoteschneiden wird der fokussierte Laserstrahl mit einem Scanner über das Material geführt und der Austrieb des aufgeschmolzenen und teilweise verdampften Materials erfolgt allein durch die im Prozess auftretende Verdampfung und die resultierenden Dampfdruckgradienten. Im Gegensatz zum gasunterstützten Schneiden erfolgt der überwiegende Teil des Austriebs zur Oberseite des Materials. Ohne die nach unten austreibende Wirkung eines Schneidgasstrahls ist damit die Oberseite bezüglich Bartbildung und Debris die kritischere Materialseite.

Abhängig von der Laserstrahlleistung bzw. Laserstrahlintensität, der Scangeschwindigkeit und der Materialart und -dicke kann der Schnitt in einer Überfahrt (single-pass) oder in mehreren, das Material sukzessive abtragenden Überfahrten (multi-pass) erfolgen (Abbildung 43).

Die Versuche werden mit einem Singlemode-Laser der Fa. IPG mit einer maximalen Leistung am Werkstück von 4,6 kW durchgeführt. Tabelle 5 und Abbildung 44 zeigen die Details zum Setup. Zur Ermittlung der erzielbaren Schneidgeschwindigkeit und der Schnittqualität werden folgende Parameter variiert:

- Laserleistungen von 750 W bis 4600 W
- Scangeschwindigkeiten von 1 m/s bis 25 m/s
- Anzahl der Überfahrten n bis zur vollständigen Trennung bei Multipass-Schnitten.
- Blechdicke des Plattenmaterials 0,1 mm und 0,2 mm

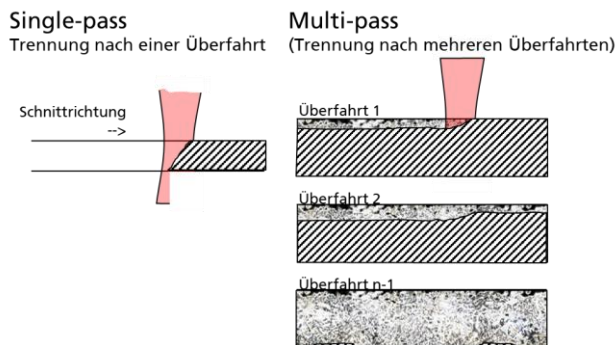


Abbildung 43: Abtrag beim Remoteschneiden in Single- und Multi-pass Scanstrategie

Tabelle 5: Optische Konfiguration zum Remoteschneiden

| | |
|-------------|--|
| Laser | IPG SM-Laser YLS-5000-SM |
| | Max. Leistung am Werkstück 4,6 kW |
| | Faserdurchmesser 30 μm |
| Kollimation | IPG, Brennweite 200 mm |
| Scanner | Scanlab Prototyp für High-Power SM-Strahl |
| | F-Theta Objektiv, Brennweite 420 mm |
| | Scanfeld 120 x 120 mm ² |
| | Max. Scangeschwindigkeit 30 m/s |
| | Fokusbereich ca. 65 μm |
| Crossjet | Optikschutz mit Pressluft, kein Prozessgas |

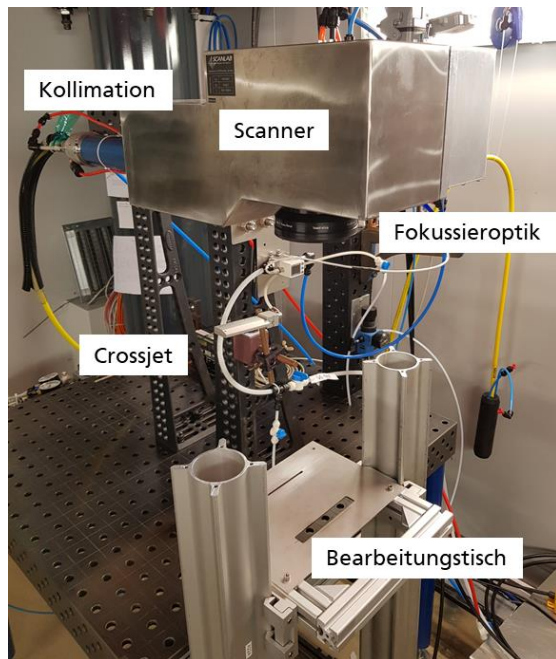


Abbildung 44: Setup Remoteschneiden

Prozessfenster Singlepass-Schnitte

Mit der Laserleistung von 4,6 kW wird ein Prozessfenster mit Scangeschwindigkeiten zwischen 3 m/s und 6-7 m/s ermittelt, in dem 0,1 mm dickes Material in einer Überfahrt geschnitten werden kann. Bei geringeren Geschwindigkeiten geht der Prozess auf Grund unzureichender Austriebswirkung in einen Schweißprozess über, bei dem das Material in der Schnittfuge zwar aufgeschmolzen wird, aber dort auch wieder erstarrt. Bei größeren Scangeschwindigkeiten bleiben in einem Übergangsbereich nicht getrennte Stege zwischen den Schnitthälften im Schnittspalt bestehen.

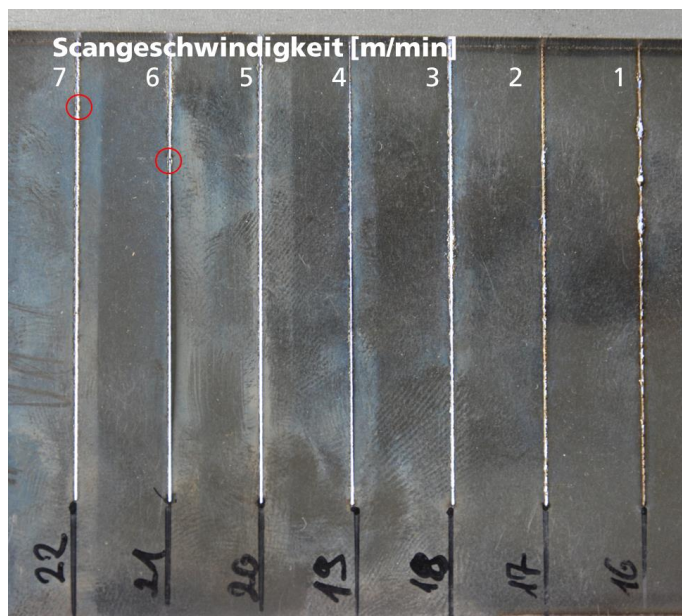


Abbildung 45: Schnittergebnis in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit. Bei Scangeschwindigkeit 1 und 2 m/s nicht getrennt, bei 6 und 7 m/s erste Stege im Schnittspalt.

Mit einer Reduzierung der Laserleistung und einer Vergrößerung der Materialdicke verkleinert sich das Prozessfenster. Die 0,2 mm dicken Bleche können auch bei voller Laserleistung nicht im Single-pass getrennt werden. Ebenso werden die 0,1 mm dicken Bleche bei einer Reduzierung der Leistung auf 1,7 kW nicht getrennt.

Prozessfenster Multipass-Schnitte

Das Parameterfeld der Scangeschwindigkeit beim Multipass-Schneiden umfasst den Bereich zwischen 5 m/s und 25 m/s sowie einzelne Test mit reduzierter Geschwindigkeit. In diesem Feld wird die minimale Anzahl n der Scans bestimmt, die erforderlich ist, um einen vollständigen Schnitt zu erreichen. Im Grenzfall bei kleiner Materialdicke, hoher Laserleistung und geringer Scangeschwindigkeit sind dabei mit $n=1$ auch Singlepass-Schnitte im Parameterfeld enthalten.

Abbildung 46, links, zeigt, dass die Anzahl der Scans etwa linear mit der Scangeschwindigkeit steigt. Abweichungen davon sind durch die Diskretisierung auf einen Scan und die Erkennungsschwierigkeit kleinster Stege im Schnittspalt zur Beurteilung des Durchschneiderfolges zu erklären.

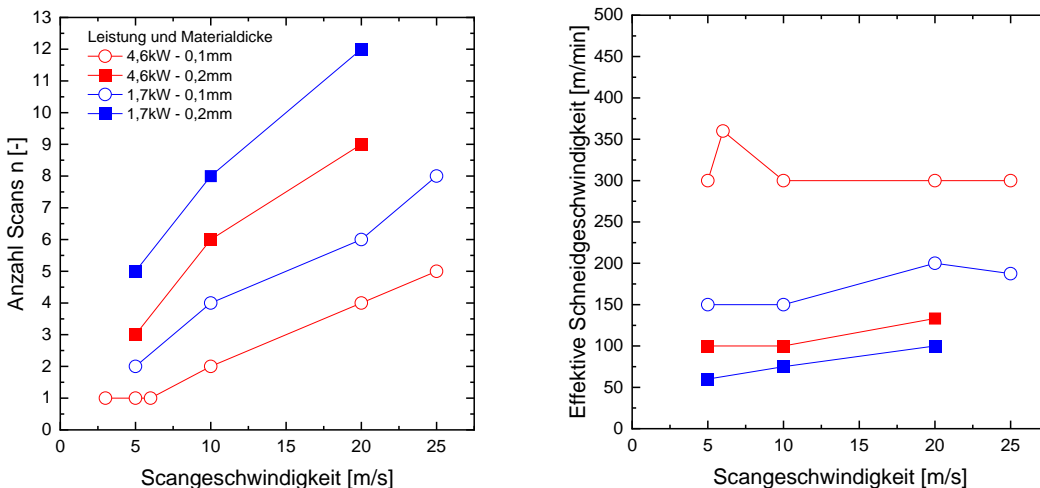


Abbildung 46: Erforderliche Scans in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit (links) und effektive Schneidgeschwindigkeiten (rechts)

Mit dem Quotienten aus Scangeschwindigkeit und der Anzahl der Scans lässt sich eine effektive Schneidgeschwindigkeit angeben, die für die Bestimmung der Bearbeitungsdauer herangezogen werden kann. Tendenziell steigt die effektive Schneidgeschwindigkeit leicht mit der Scangeschwindigkeit (Abbildung 46, rechts), d. h. es ist effizienter den Laserstrahl häufiger mit großer Scangeschwindigkeit über die Kontur zu führen als nur wenige Male mit kleiner Scangeschwindigkeit. Konturabhängig können Zeiten für Zustellbewegungen zwischen den Scans erforderlich werden. Auf Grund der hohen Beschleunigung und Geschwindigkeit der Scannerbewegung sind diese Zeiten bei wenigen Scans vernachlässigbar, können bei sehr vielen Scans aber zu einer längeren Bearbeitungsdauer führen.

Wird die effektive Schneidgeschwindigkeit mit der eingesetzten Laserstrahlleistung skaliert, wird ersichtlich, dass mit der geringeren Leistung von 1,7 kW ein effizienterer Prozess möglich ist als mit 4,6 kW. In Abbildung 47 liegen die Kurven bei gleicher Blechdicke mit der geringeren Leistung deutlich über denen mit großer Leistung.

Deutlicher Effizienzunterschied zeigt sich im Vergleich zum gasunterstützten Schneiden. In Abbildung 47 sind auch dazu zwei Ergebnisse eingetragen (gekreuzte Symbole). Die Scangeschwindigkeit entspricht dabei der Schneidgeschwindigkeit. Die erzielbaren Geschwindigkeiten liegen deutlich, etwa um den Faktor zwei, über denen des Remoteschneidens. Der Effekt wird noch unterschätzt, weil der Fokus im Falle des gasunterstützten Schneidens bei diesem Vergleich ca. 50 % größer ist als in den Versuchen zum

Remoteschneiden. Der größere Fokus bewirkt ein breitere Schnittfuge und eine geringere maximale Schneidgeschwindigkeit als mit kleinerem Fokus und damit schmalerer Fuge möglich wäre.

Ein Grund für den geringeren Prozesswirkungsgrad beim Remoteschneiden ist der hohe Anteil verdampften Materials.

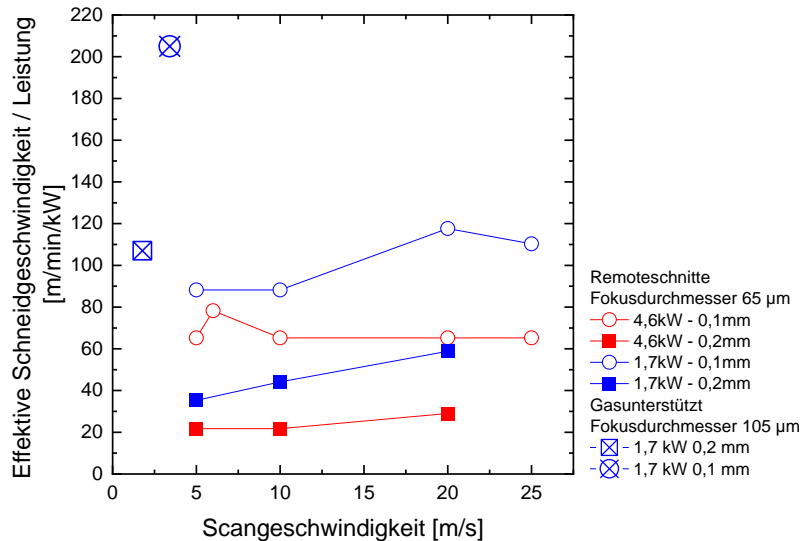


Abbildung 47: Maximale Schneidgeschwindigkeit skaliert auf die Laserleistung

Abbildung 48 zeigt die Abhängigkeit der Bartbildung von der Scangeschwindigkeit und der Laserleistung. Die niedrigsten Werte sowohl für 0,1 als auch für 0,2 mm dickes Material werden bei der kleineren Laserleistung und den höchsten Scangeschwindigkeiten des Versuchsfeldes erzielt. Der Abtrag mit geringsten Abtragvolumen pro Scan führt somit zu den qualitativ besten Schnitten. Bei Material der Dicke 0,1 mm beträgt der minimale Bart >25 µm, bei 0,2 mm Dicke >35 µm.

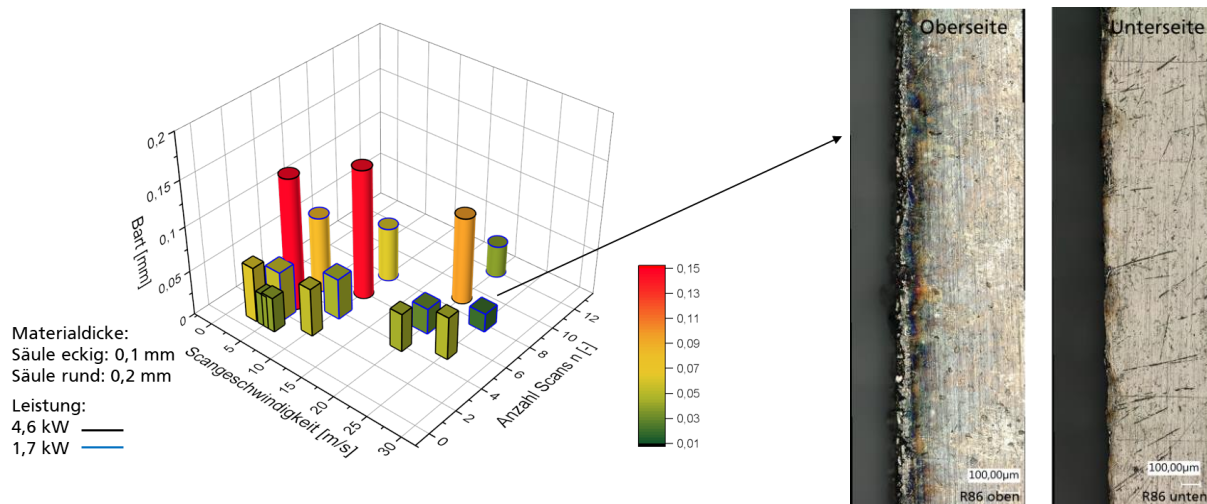


Abbildung 48: Bartbildung in Abhängigkeit von Scangeschwindigkeit, Laserstrahlleistung und Materialdicke und Ober- und Unterseite eines Schnittes.

Die Schnittflächen der Remoteschnitte (Abbildung 49) sind unregelmäßig und weisen nicht die regelmäßige Riefenstruktur von gasunterstützten Schnitten auf. Der Abtrag entwickelt sich von Scan zu Scan entlang der Schnittlinie nicht vollständig gleichmäßig, sondern es bilden sich Bereiche heraus mit unterschiedlicher

Abtragtiefe. Bei den letzten Scans gibt es dann Abschnitte, die bereits vollständig getrennt sind und Abschnitte, bei denen noch Stege zwischen den Schnittfugenseiten vorhanden sind. Beim Auftrennen dieser Stege können fadenförmige Schmelzfäden oder nicht abgetragenes Material zurückbleiben, das in die Schnittfuge ragt. Eine mögliche Vermeidung könnte durch weitere Scans über die minimal benötigte Anzahl hinaus erreicht werden.

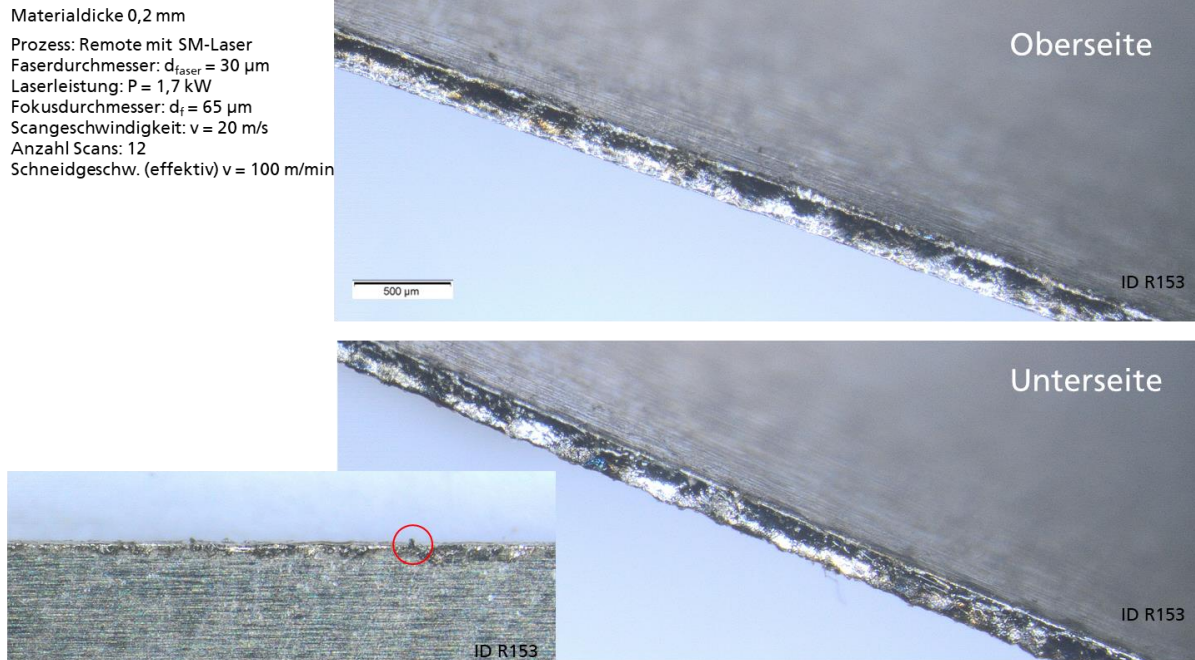


Abbildung 49: Schnittkanten von Multipass-Remoteschnitt in 0,2 mm Blechdicke. Die Markierung im Ausschnitt unten links weist auf einen in die Schnittfuge ragenden Schmelzfaden hin.

Vergleich Remoteschneiden und gasunterstütztes Schneiden

Bei Verwendung eines Schneidkopfes lässt sich durch die Schneidgasströmung eine deutlich bessere Kantenqualität erreichen. Die Oberfläche bei gasunterstützten Schnitten ist sauberer und die Grathöhe geringer. Sie liegt unter $20 \mu\text{m}$, in weiten Parameterbereichen unter $10 \mu\text{m}$. Abbildung 50 zeigt die unterschiedliche Schnittqualität der Verfahren sowohl für die Ober- wie auch die Unterseite der Bleche.

Weiterhin wurde oben (Abbildung 47) gezeigt, dass das Verfahren mit Schneidkopf den größeren Prozesswirkungsgrad aufweist. Vorteile zeigt das Remoteschneiden in der mit dem Scanner erreichbaren Bewegungsdynamik für die Bearbeitung von Konturen mit kleinen Radien. Im Plattendesign von CoBiP werden die maximal möglichen Schneidgeschwindigkeiten auch bei Verwendung von hochdynamischen Achssystemen auf den Längsseiten der Platte erreicht, im Bereich der Manifolds und der Querseiten mit den Anschlusslaschen begrenzen Beschleunigungs- und Ruckvermögen der Antriebe die Geschwindigkeit. Diese Begrenzung trifft für die Bewegung des Strahls mit dem Scanner nicht zu, bzw. greift erst bei wesentlich kleineren Konturen. Der systemtechnische Aufwand ist mit der Installation eines Scanners deutlich geringer als der Aufbau eines hochdynamischen 2D-Achssystems, bei dem zudem eine präzise Führung von Material und Schneidkopf in der z-Richtung gefordert ist, um bei einem Düsenabstand von ca. $0,7 \text{ mm}$ Toleranzen im Bereich von idealerweise $0,2 \text{ mm}$ einzuhalten.

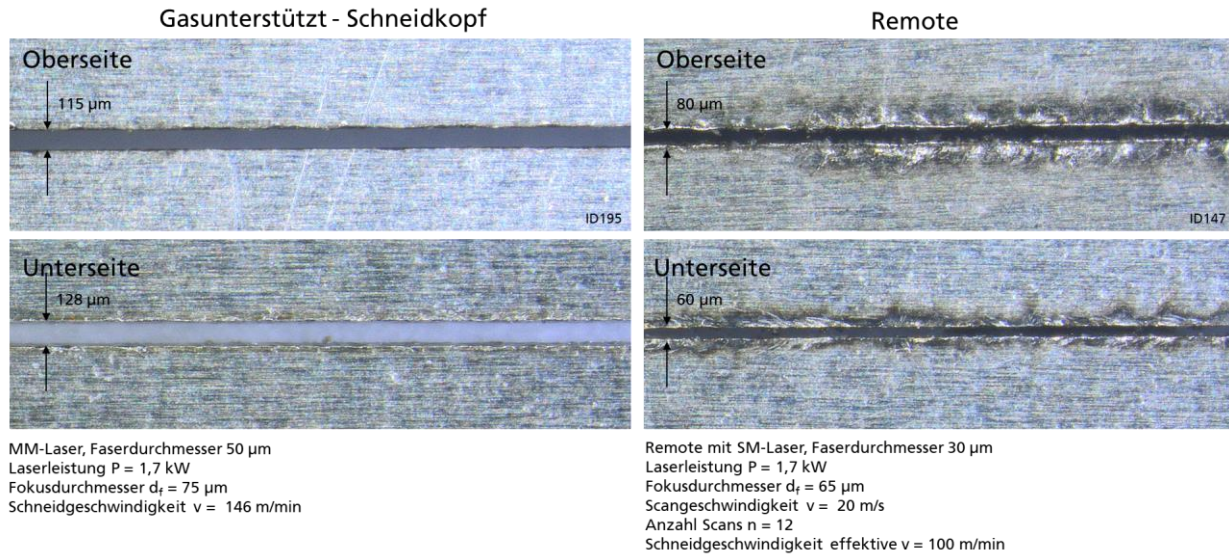


Abbildung 50: Vergleich der Schnittqualität zwischen gasunterstütztem und Remoteschnitt.

AP3.2: Konstruktion und Auslegung eines Anpresssystems für das Laserschweißen und Laserschneiden der BPP-Hälften und Zeichnungsableitung [04/20-03/21]

Für das kontinuierliche Laserschweißen und Laserschneiden ist eine präzise Ausrichtung der im Blechverbund befindlichen Halbschalen zueinander notwendig. Die Positionierung ist in Bahnaufrichtung (MD), quer zur Bahnaufrichtung (CD) sowie im Winkel der Bahnen notwendig.

Die Ausrichtung wird über passende im Umformprozess neben der CoBiP-BPP eingefügte Halbkugelstrukturen optisch vermessen und über Bildauswertungsalgorithmen berechnet. Die möglichen Fehler der einlaufenden metallischen Bänder im CoBiP-Gesamtprozess sind in Abbildung 51 gezeigt. Die in das Band eingebrachten Ausrichtestrukturen sind ebenfalls gezeigt. Eine bei maximal, geplanter Bahngeschwindigkeit verwendete Bildauswertung sollte im 10 Hz Takt nutzbar sein, die Ausrichtestrukturen sind linksseitig neben der Umformung in einem Abstand von 8,5 mm eingepreßt und haben somit einen festen Bezug zu der Position der CoBiP-BPP. Die Strukturen werden zudem im Regelkonzept als Trigger für den Start des Laserschweißprozesses verwendet. Zudem können zwischen den CoBiP-BPPs mechanische Alignmentstrukturen in das Band geprägt werden, die durch Klemmung eine mechanische Vorpositionierung gewährleisten.

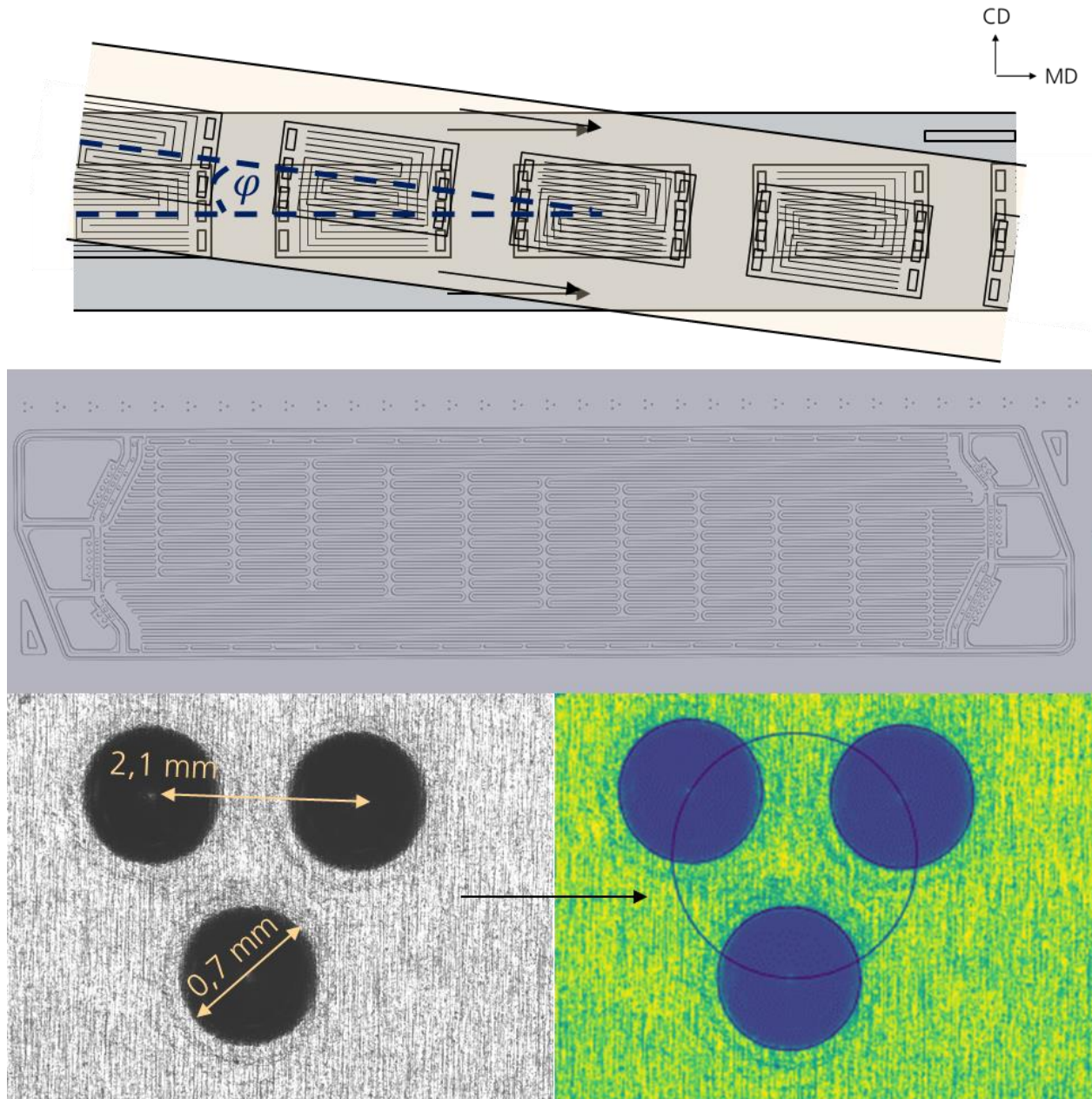


Abbildung 51: Mögliche Einlauffehler der metallischen Bänder und Ausrichtemerkmale zur Vermessung dieser

Das Konzept des Anpressmoduls wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ILT in bilateralen Gesprächen erstellt. Zum Anpressen wird ein Elektromagnet mit einer zum CoBiP-BPP-Design (Anode/Kathode) passenden ferromagnetischen Maske verwendet. Diese Komponenten werden auf einer mit dem CoBiP-BPP-Band synchronisierten Linearachse mitgeführt und über zusätzliche Antriebe final (lateral, longitudinal und rotativ) ausgerichtet, bevor durch Einschalten des Elektromagneten ein Nullspalt zwischen den beiden metallischen Bänder erzeugt wird.

Die Konstruktion des Anpressmoduls inklusive Positioniereinheit ist in Abbildung 52 dargestellt. Zur Erläuterung der Einzelkomponenten wurde die Umhausung ausgeblendet.

Die Positionierung der eigentlichen Anpresseinheit zur bewegten Bahn wird durch drei Linearachsen realisiert. Zwei Linearachsen sind dabei lateral zur Bahnaufrichtung angeordnet, welche über eine weitere

Linearachse in Bahnlaufrichtung verbunden sind. Alle Linearachsen lassen sich unabhängig voneinander bewegen, sodass mit den äußeren Linearachsen einerseits die laterale Position mit der Bahn synchronisiert und andererseits durch eine relative Bewegung der beiden Achsen der Winkel zum Bahnlauf abgeglichen werden kann. Somit ist die in Bahnlauf gerichtete Linearachse parallel zum Bahnlauf angeordnet. Die Ausrichtung wird über passende im Umformprozess neben der CoBiP-BPP eingefügte Halbkugelstrukturen optisch vermessen und über Bildauswertungsalgorithmen berechnet.

Die Anpresseinheit zur Erzeugung eines Nullspaltes besteht aus einem oberen und unteren Teil. Im unteren Teil ist insbesondere der Elektromagnet verbaut, auf dessen Oberseite die Lamellenplatte verschraubt ist. Die Lamellenplatte ist mit Strukturen versehen, mit denen die Anpressung an den Stegen der BPP-Hälfte möglich ist. Ebenfalls kann hier Schutzgas von außen und über Kanalbohrungen zum Bearbeitungsraum geleitet werden. Im oberen Teil ist die Anpressmaske vorgesehen, welche über einen Rahmen gehalten wird. In dem Rahmen sind Schlitze vorgesehen, durch die ebenfalls Schutzgas geleitet und der Schweißbereich mit Gas geflutet werden kann.

Die oberen und unteren Teile sind über Pneumatikzylinder vertikal verstellbar. Die Bewegung wird über die außenliegenden Führungen bestimmt. Zu Beginn eines Prozessablaufes ist die Anpresseinheit nahe der linken Endlage positioniert und der obere und untere Teil auseinandergefahren. Die beiden Bahnen sind bereits vollständig zueinander ausgerichtet. Der Prozessablauf sieht folgendermaßen aus:

1. Vermessen, Auswerten und Einstellen der lateralen und angularen Position zur Bahn mithilfe der Halbkugelstrukturen
2. Synchronisieren der Geschwindigkeit von Bahn und Anpresseinheit
3. Zusammenfahren von oberem und unterem Teil
4. Einschalten des Elektromagneten und damit Anpressen der beiden Bahnen
5. Starten des Schweißprozesses mittels Laserscanner
6. Ausschalten des Elektromagneten und auseinanderfahren von oberem und unterem Teil nach Abschluss des Schweißprozesses
7. Schnelle Rückbewegung der Anpresseinheit in die Ausgangslage

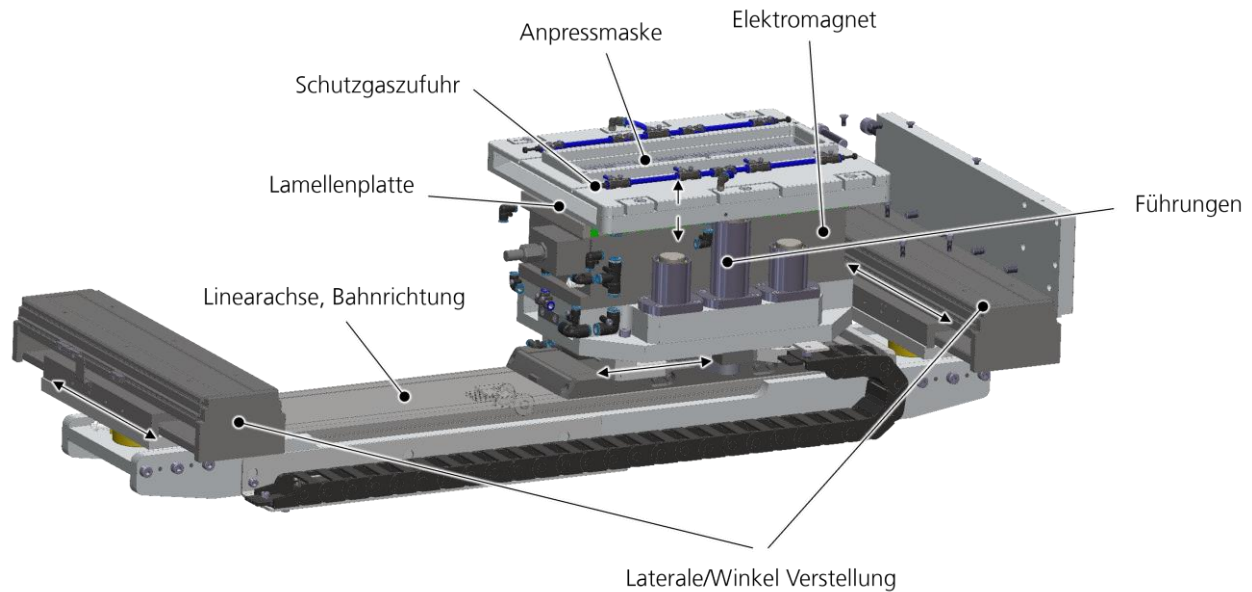


Abbildung 52: CAD-Modell des Anpressmoduls mit ausgeblendeter Umhausung

Der mechanische Aufbau des Anpressmoduls innerhalb des R2R-Lasermoduls ist in Abbildung 53 zu erkennen. Die Inbetriebnahme der einzelnen Linearachsen, sowie die pneumatische Zustellbewegung wurde erfolgreich abgeschlossen. Weitere Details zum Komponentenaufbau des Lasermoduls sind im Abschnitt AP 5.2 beschrieben.

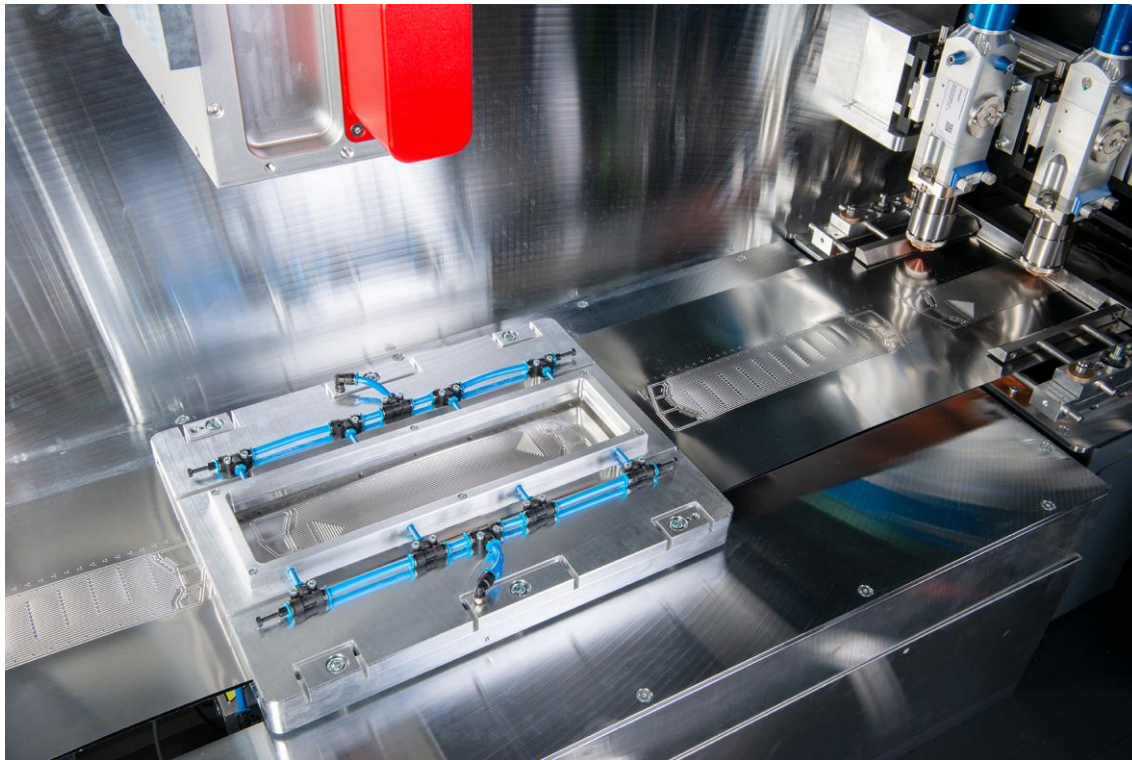


Abbildung 53: Vollständig montiertes und in das R2R-Lasermodul integrierte Anpressmodul

AP3.3: Laserschweißversuchsreihen von BPP-Prototypen und Prozessparameterstudie [06/20-09/21]

In einer weiteren Versuchsreihe werden verschiedene Parameter eingestellt um ein Parameterfenster zum Schweißen von Flachproben ohne örtliche Leistungsmodulation (ö.L.M) zu definieren. Hierbei geht's hauptsächlich darum, eine Leistung und eine maximale Geschwindigkeit zu bestimmten. Die Ergebnisse werden in vier Kategorien sortiert: Durchgeschweißt, eingeschweißt, Humping und Lochbildung (Löcher). Diese sind in der folgenden Abbildung 54 dargestellt.

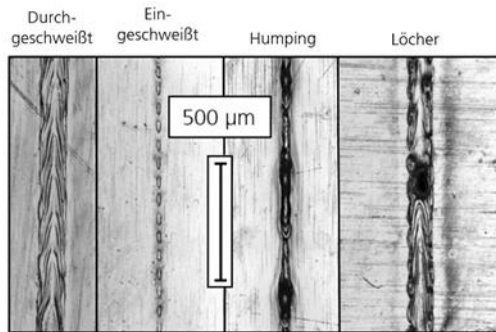


Abbildung 54: Beispiel Bilder für die vier Nahtkategorien

In den folgenden Diagrammen (Abbildung 55 und Abbildung 56) werden die wichtigsten Ergebnisse der Parameteruntersuchungen dargestellt. Die individuellen Versuche sind im Diagramm mit einem Kreuz der korrespondierenden Kategorie versehen. Zusätzlich ist der Gesamtbereich einer Kategorie farblich markiert. Die Schweißnähte der Kategorie „Löcher“ treten vereinzelt auf und sind mit einem roten Punkt im Diagramm versehen. In den Fällen, wo die Schweißnaht einer anderen Kategorie zugehört als die Vor- und Nachgänger der Leistungsreihe, ist diese mit einem Punkt der Farbe der entsprechenden Kategorie markiert. Die rote Gerade bildet die Streckenenergie $E_{\max, \text{hump}}$ des durchgeschweißten Versuchs mit der höchsten Vorschubgeschwindigkeit $v_{\max, \text{hump}}$ in dem Parametersatz ab.

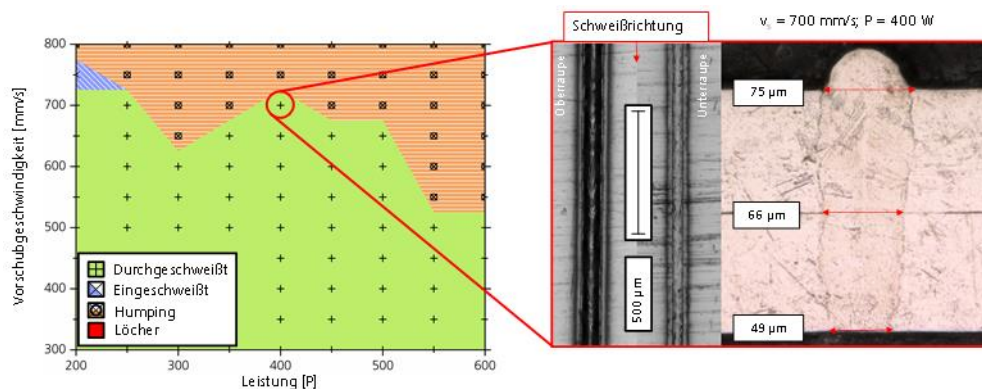


Abbildung 55: Ergebnisse aus der Parametersuche ohne ö.L.M. (links) und ein Oberflächenbild und Querschliffbild als Beispiel (rechts)

$$A = 0,05 \text{ mm}$$

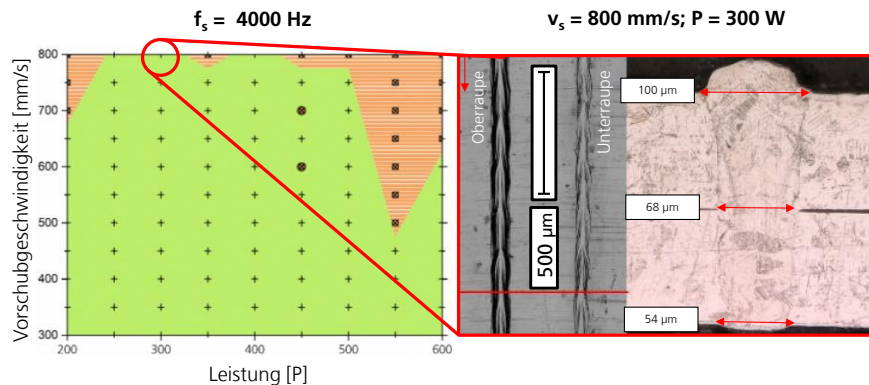


Abbildung 56: Ergebnisse aus der Parametersuche mit ö.L.M. ($A=0,05\text{mm}$ und $f_s=4000\text{Hz}$)

Die Versuche ohne ö.L.M. ergeben ein Maximum ($v_{\max, \text{hump}}$) von 700 mm/s und dieser ist somit kleiner als $\text{Max}(v_{\max, \text{hump}})$ ö.L.M. = 800 mm/s bei den Versuchen mit örtlicher Leistungsmodulation. Die Versuche ohne örtliche Leistungsmodulation sind somit instabiler bei höheren Geschwindigkeiten und Nahtfehler wie Humping treten eher auf. Eine Erklärung hierfür könnte die Schmelzbaddynamik sein. Durch die örtliche Leistungsmodulation und die damit verbundene Änderung der Relativgeschwindigkeit v_r wird die Schmelze-Umströmung der Dampfkapillare periodisch unterbrochen. Durch die verringerte Schmelzbaddynamik treten Spritzer und Humping bei örtlicher Leistungsmodulation erst bei höheren Geschwindigkeiten auf. Die Werte von $v_{\max, \text{hump}}$ ohne ö.L.M. nähern sich denen mit ö.L.M. bei allen Versuchen bei höheren Leistungen. Bei höheren Leistungen ist zu beobachten, dass für alle Parametersätze die Werte für $v_{\max, \text{hump}}$ sich annähern und die zusätzliche Stabilität des Schweißprozesses mit örtlicher Leistungsmodulation weniger ausschlaggegeben ist. Mit $A_s = 0,05 \text{ mm}$ kann die größte Anzahl an durchgeschweißten Versuchen erzielt werden. Diese Amplitude wird anschließend in Kombination mit einer Frequenz von 4 kHz festgelegt. Im Rahmen der Untersuchungen mit dem BPP-Design werden ebenfalls Versuche mit vorbeschichtetem Material durchgeführt. In Abbildung 57 und in Abbildung 58 werden Beispiele aus solchen Versuchen gezeigt. In beiden Bildern sind ebenfalls die verwendeten Parameter dazu in einer Tabelle aufgelistet. Hier werden wiederum die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur ö.L.M. gespiegelt. Die Proben werden ebenfalls im defokussierten Zustand geschweißt. Die Nähte sind kontinuierlich und zeigen bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 600 mm/s noch keine Humping-Effekte. Auch die geringere Leistung von 300 W erlaubt günstige Bedingungen für die Verschiebung der Humping-Grenze. Dazu wird die Beschichtung nur im Bereich der Schweißnaht zerstört. In unmittelbarer Nähe der Schweißnaht scheint die Beschichtung noch intakt zu sehen.

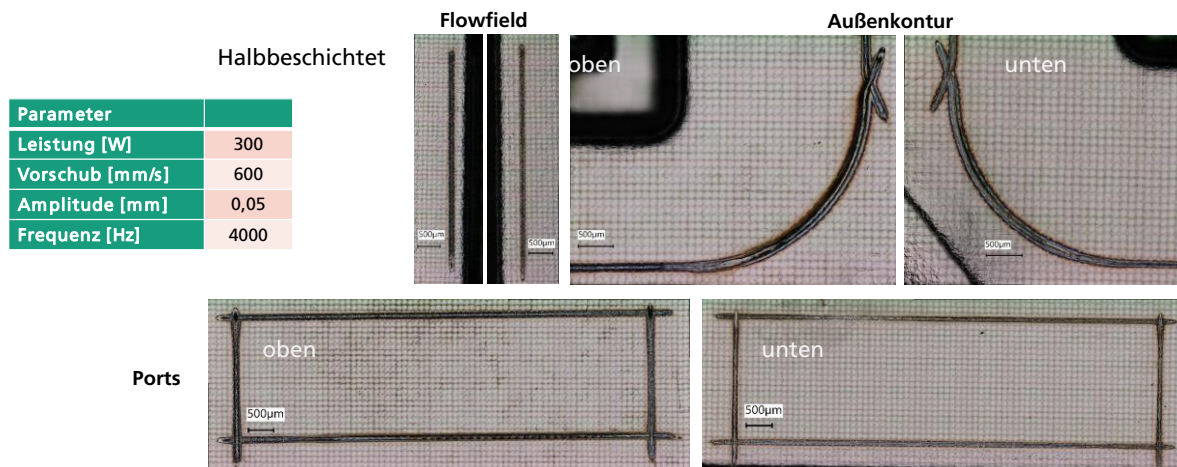


Abbildung 57: Verschweißte halbbeschichtete BPP mit dem CoBiP Prototyp-Design

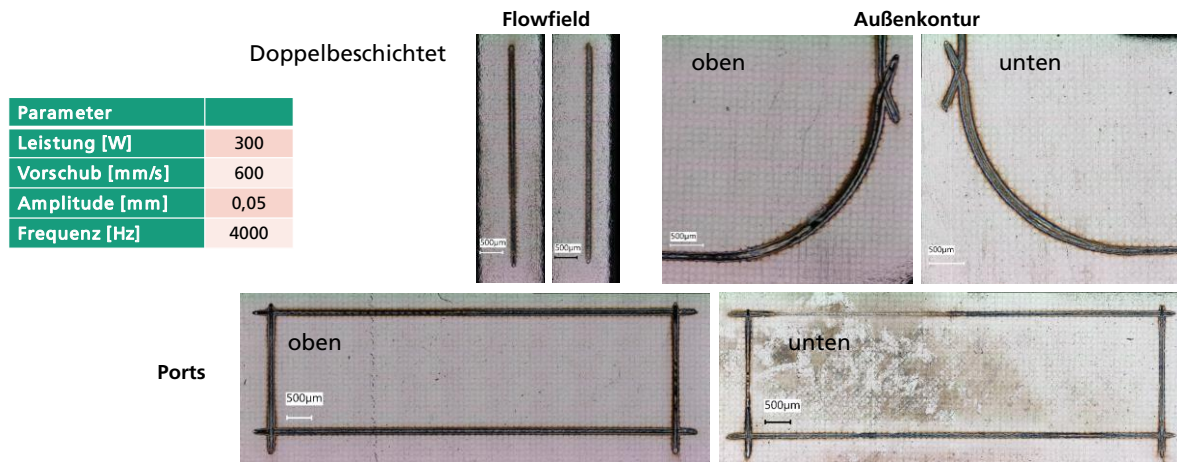


Abbildung 58: Verschweißte doppelbeschichtete BPP mit dem CoBiP Prototyp-Design

In einem ersten Anlauf werden zwei Spannrahmen verwendet, um die umgeformten Platten mit dem Teildesign fürs Schweißen anzupressen und zu positionieren. Die Rahmen werden anhand von Schrauben aneinander befestigt. Zylinderstifte dienen als Positionierhilfe. Ein Nachteil von solcher Art Fixierung ist die lange Vorbereitungszeit durch das Zu- und Aufdrehen der Schrauben. Die Versuche finden in diesem Fall weiterhin am Aufbau mit dem Raylase Scanner statt. Wichtig ist dabei, dass eine Durchschweißung (Einschweißtiefe $> 200 \mu\text{m}$) erzielt wird. Folgende Parameter werden in diesem Fall eingestellt: Laserleistung $P = 300 \text{ W}$, Vorschubgeschwindigkeit $V = 500 \text{ mm/s}$, Wobbleamplitude $a = 0,05 \text{ mm}$ und Wobblefrequenz $f = 4000 \text{ Hz}$. Die Positionierung der Schweißlinien aufs Werkstück erfolgt mittels Laserpointer. Der Aufbau mit dem Raylase Scanner erlaubt seit der letzten Aktualisierung die Option „Click&Teach“. Diese Option dient dazu, dass das Bearbeitungsfeld im Hintergrund vom Scanner-Programm durch mehrere Bilder als Bild gezeigt wird, welches zur Vereinfachung der Positionierung der Schweißlinien beiträgt. Zukünftig wird anhand dieses Features die Positionierung weiterhin verbessert.

Anhand der in Abbildung 59 gezeigten Aufnahmen wird die Unerlässlichkeit der Anpress-Vorrichtung verdeutlicht. Die Bilder werden mit einer erhöhten Helligkeit dargestellt, um die Schweißlinie – welche eine Breite von ca. $100 \mu\text{m}$ aufweist – besser sehen zu können. Diese wird zusätzlich mithilfe von Pfeilen gezeigt und verläuft hauptsächlich in der Dichtungsnut. Auf der unteren Seite (Abbildung 59 b) wird an mehreren Bereichen keine Schweißnaht erkannt. Besonders die Stelle vorne links (unten rechts) wird durch einen Kreis angedeutet. Hier ist keine Anbindung vorhanden. Dies deutet darauf hin, dass die Anpressung

ungleichmäßig ist. Weiterhin wird anhand der Nahaufnahme (Abbildung 59 c) klar, dass die Schweißnaht fehlerbehaftet ist. Hier kommt vor allem Lochbildung vor. Diese Art Schweißfehler deutet darauf hin, dass ein Spalt zwischen den Fügepartnern vorhanden ist. Im Gegensatz dazu, zeigt die andere Nahaufnahme (Abbildung 59 d) eine erfolgreiche Schweißstelle, wo zwei Schweißnähte sich kreuzen. Die Schweißnaht wird nicht in einem Anlauf angebracht, sondern in kleineren Strecken aufgeteilt. Damit stellt sich heraus, dass so eine Art Vorrichtung für die Übertragung der Parameter aufs CoBiP-Design ungeeignet ist.

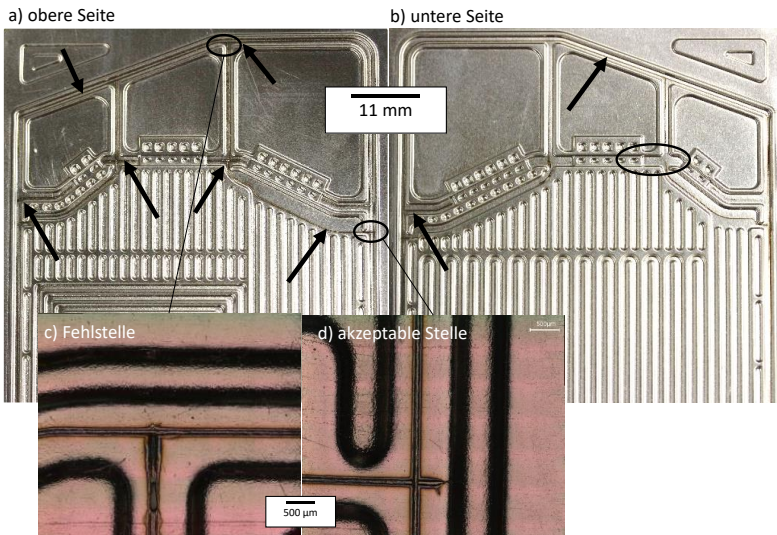


Abbildung 59: Aufnahmen des BPP-Teildesigns nach dem Schweißen a) obere Seite b) untere Seite c) Schweißstelle mit Lochbildung d) erfolgreiche Schweißstelle

Für die endgültige Vorrichtung zum Schweißen werden verschiedene Konzepte berücksichtigt: mechanisch, pneumatisch und magnetisch. Hierbei müssen hauptsächlich folgende Kriterien erfüllt werden:

- eine null-Spalt-Garantie zwischen den Fügepartnern
- eine möglichst gleichmäßige Anpressung und Kompensierung des thermischen Verzugs
- hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeit
- und die Möglichkeit zur Automatisierung bzw. zur Integration in einer Fertigungslinie.

Basierend auf am Fraunhofer ILT gesammelten Erfahrungen erfüllt ein magnetisches Konzept alle diese Kriterien. Die Schweißlinien werden so ausgelegt, dass diese eine kontinuierliche Anbindung in der Dichtungsnut und an den Ports erlauben. Im Flowfield sind 150 Nähte mit einer maximalen Länge von 10 mm geplant und an der Außenkante sind 3 mm Unterbrechungen vorgesehen. Die Anpressvorrichtung basiert auf eine Lösung, welche später für die Integration in die R2R Anlage angepasst und automatisiert wird. Die Hauptkomponente solch einer Vorrichtung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ein Magnet, welcher die entsprechende Polteilung besitzt und genügend Haltekraft anbringen kann. Zusätzlich muss dieser eine Möglichkeit zur Automatisierbarkeit der Anspannung anbieten. In den gesammelten Erfahrungen am Fraunhofer-ILT wird mit Permanentmagnetspannplatten gearbeitet. Fürs CoBiP Projekt wird ein Elektromagnet mit möglichst ähnlichen Eigenschaften angestrebt. Die Automatisierung von Permanent-Magneten ist mit Verschleiß verbunden und die Integration ist komplexer.
- eine Lamellenplatte, welche als Auflageplatte auf dem Magneten befestigt wird. Diese bietet die Möglichkeit zur Individualisierung der Schweißnuten nach dem ausgewählten Design, ohne den Magnet selbst mechanisch bearbeiten zu müssen. Zusätzlich wird durch die Polteilung dieser Platte das Magnetfeld weiter nach oben geleitet, um eine sichere Anziehung der benötigten Masken zu gewährleisten.
- Schweißmasken bestehend aus einem festen Stahl, mit den entsprechenden Öffnungen für die Stellen, wo die Laserstrahlung auf die BPP-Hälften auftreffen muss.

Abbildung 60 zeigt den letzten Aufbau der Spannvorrichtung. Mit diesem werden die Schweißversuche für Ein-Zell-Tests durchgeführt. Zwei Schweißmasken müssen abwechselnd verwendet werden, um die Schweißlinien umlaufend zu setzen. Durch die Verwendung von nur einer Maske wird dies nicht ermöglicht, da die innere Kontur der Maske sonst rausfallen würde bzw. kein genügendes Material zum Anpressen vorhanden wäre. Weiterhin kommt in dem Fall ebenfalls ein Elektromagnet zum Einsatz.



Abbildung 60: Aufbau der Spannvorrichtung für die Schweißversuche

In einem vorherigen Schritt zur Zusammenstellung der Spannvorrichtung muss die Lamellenplatte entsprechend der Schweißlinien bearbeitet werden. Durch diese Bearbeitung wird sichergestellt, dass einerseits die BPP nicht an die Auflageplatte festgeschweißt wird. Andererseits wird das Schutzgas in die Kanäle verteilt. Dies dient dazu, dass die Rückstände vom Schweißen abgeschieden werden und dass die Schweißnähte in ihrer Qualität steigen. Eine zusätzliche Schutzgas-Zufuhr wird ebenfalls auf der Oberseite des Werkstücks benötigt. Hierfür wird eine Lösung in der R2R Anlage integriert. Für die Schutzgas-Verteilung in der Lamellenplatte wird eine Lösung besonders für den Fall entwickelt. In der Abbildung 61 wird der Lösungsansatz dargestellt. Durchgangsbohrungen entlang der gesamten Länge (die Platte wird auf ca. 300 mm gekürzt, um Gewicht und Raum im Schweißmodul einzusparen) eingebracht. Weiterhin sorgen entlang der Breite neun Sackbohrungen für eine ausreichende Verteilung und durch kleine Bohrungen a ca. 1 mm wird das Schutzgas in die Nuten auf der Oberfläche der Platte geleitet. Die mittlere Sackbohrung wird an die Schutzgasversorgung angeschlossen und die restlichen Öffnungen werden bis auf eine mit Verschlussstopfen geschlossen. Im Abbildung 61 links sind die kleinen Bohrungen in den jeweiligen Nuten zu sehen. Die Bearbeitung dieser Platte erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-IPT.

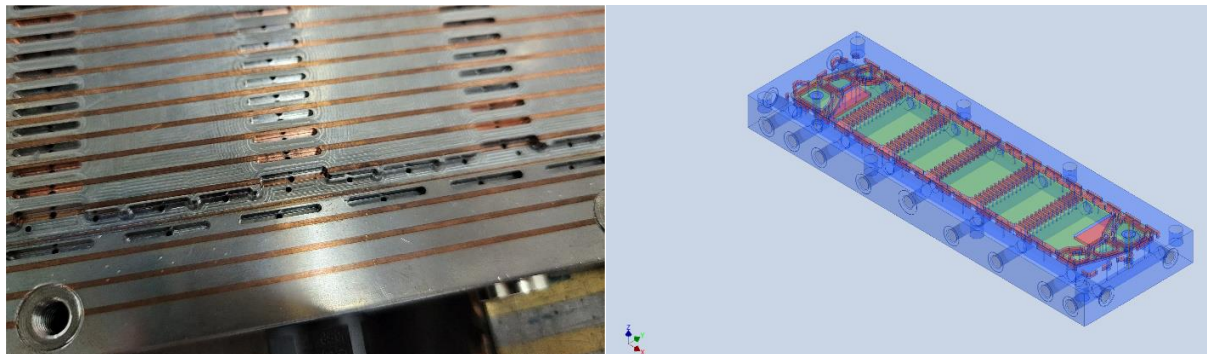


Abbildung 61: Lösung zur Schutzgas Verteilung in der Lamellenplatte

Schweißversuche mit der Anpressvorrichtung und den Endplatten

Die Versuchsdurchführung mit den Halbschalen erfolgt am Aufbau mit dem RAYLASE Axial-Scan Fiber 30, analog zu den Vorgehensweisen in früheren Berichtszeiträumen. Die zwei Halbschalen werden durch die Positionierbohrungen bzw. den Positionierbolzen aufeinander platziert und durch die Spannmaste gedrückt. Die Positionierung der Schweißlinien gelingt mithilfe einer Kamera und eines Pilotlasers. In Abbildung 62 wird die Benutzeroberfläche „RAYGUIDE“ von diesem Scankopf gezeigt. Diese bietet die Möglichkeit der Darstellung des gesamten Scanfelds durch aneinander gekachelte Aufnahmen an. Hierzu kann mit dem Live-Bild und dem Fadenkreuz geschaut werden, ob die Schweißlinie nachher an der gewünschten Position gefahren wird.

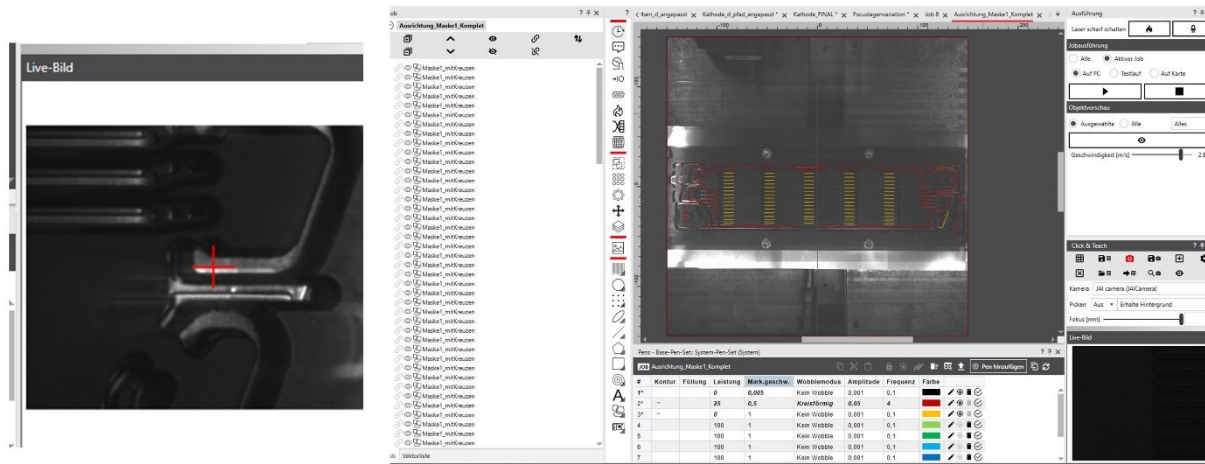


Abbildung 62: Zugehörige RAYLASE Scanner Benutzeroberfläche mit Live-Bild Positionierung

Nach der Sicherstellung der Positionierung der Schweißlinien wird der Laser angeschaltet und das Programm durch das Drücken auf dem „Play“ Knopf (rechts) gestartet. Die Dauer der Ausführung hängt mit der Anzahl der Geometrien, der Länge der Schweißnähte, der Sprünge zwischen den einzelnen Konturen und der eingestellten Vorschubgeschwindigkeit zusammen.

In-Situ Prozessüberwachung mit den Platten mit dem Teildesign

Eine Prozessüberwachung ermöglicht das Detektieren von Fehlstellen an den Schweißnähten und somit den Ausschluss von defekten Platten von weiterer Bearbeitung. Eine Möglichkeit zum Reparatur-Schweißen von solchen BPP wird am Fraunhofer-ILT untersucht. Die Versuchsreihe gelingt mittels eines Sensors der Firma 4D GmbH. Durch diesen Sensor werden optische Strahlungen aufgenommen, welche bei der Wechselwirkung zwischen Laserlicht und Material entstehen. Die Intensität der verschiedenen Strahlungen gibt Auskunft über den Verlauf des Schweißprozesses. Der Sensor wird koaxial am Bearbeitungskopf integriert. Ein Ergebnis aus dieser Untersuchung zeigt das Abbildung 63. Mit dem Teildesign werden mit einer Maske 31 einzelne Konturen und mit der anderen 28 einzelne Konturen verschweißt. Die Sprünge zwischen den jeweiligen Konturen sind durch Pausen in den Sensor-Aufnahmen gekennzeichnet. In einem fehlerfreien Verlauf der Schweißnaht, sehen die optische Signale wie im Abbildung 63 rechts aus, d.h. mit einem Peak am Anfang und sonst mit einem gleichmäßigen restlichen Verlauf. Die Aufnahme Zeit beträgt in diesem Fall 1500 ms. Um die Trigger-Schwelle und somit den Signalpegel für die Aufnahme festzulegen, müssen drei bis vier Versuche durchgeführt werden. Diese erlauben die Anpassung des Aufnahmezeitfensters. Schweißnähte, wo mögliche Fehler wie z.B. Lochbildung oder Schmelze-Anhäufung aufgetreten sind, werden durch deutlich höhere Signale wie z.B. zwischen den Instanzen 1095-1179 ms in der Abbildung 63 links angedeutet. Schweißnähte, welche nicht durchgeschweißt sind, sind mit diesem Sensor ebenfalls gut zu detektieren. Für die automatische Fehlererkennung müssen mehrere Versuchsreihen und größere Mengen an Daten generiert werden. Diese können in einem weiteren Schritt beispielsweise zum Trainieren eines neuronalen Netzes eingesetzt werden.

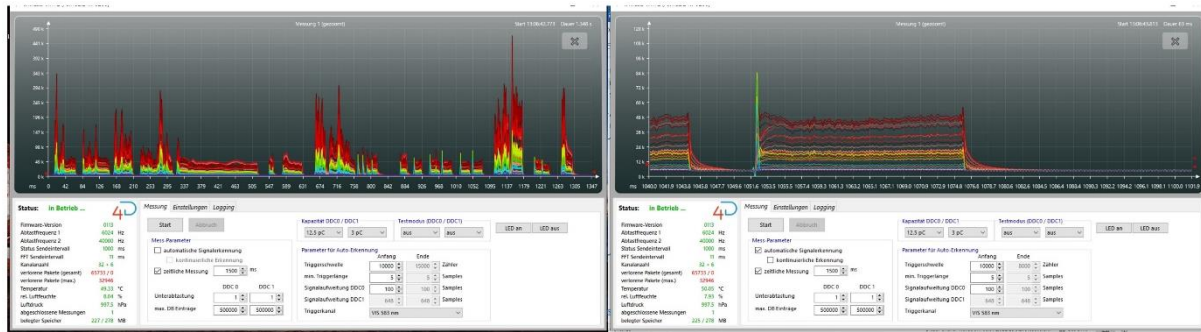


Abbildung 63: 4D Sensor Aufnahmen

Abschließend werden ein paar Mikroskop-Aufnahmen von den Schweißungen mit dem Teildesign gezeigt. Diese sind in Abbildung 64 zu sehen. Die beiden linken Schweißnähte zeigen Beispiele für fehlerfrei-gelungene Schweißnähte. Die Schweißnaht ist vollständig durchgeschweißt. Die untere Seite der Naht zeigt eine bessere Oberflächenbeschaffenheit aufgrund der Nutzung von Argon Schutzgas. In der Abbildung 64 rechts ist ein Beispiel für eine fehlerhafte Positionierung der Schweißnaht in der Verteilerstruktur. Die Laserstrahlung hat in diesem Fall die Kanalwand getroffen. Dies führt dazu, dass das Material an der Stelle abgeschieden wird und ein Loch entsteht. Alle Schweißnähte werden mit folgenden Parametern verschweißt: $P = 250 \text{ W}$, $V = 500 \text{ mm/s}$, $a = 0,05 \text{ mm}$ und $f = 4000 \text{ Hz}$.

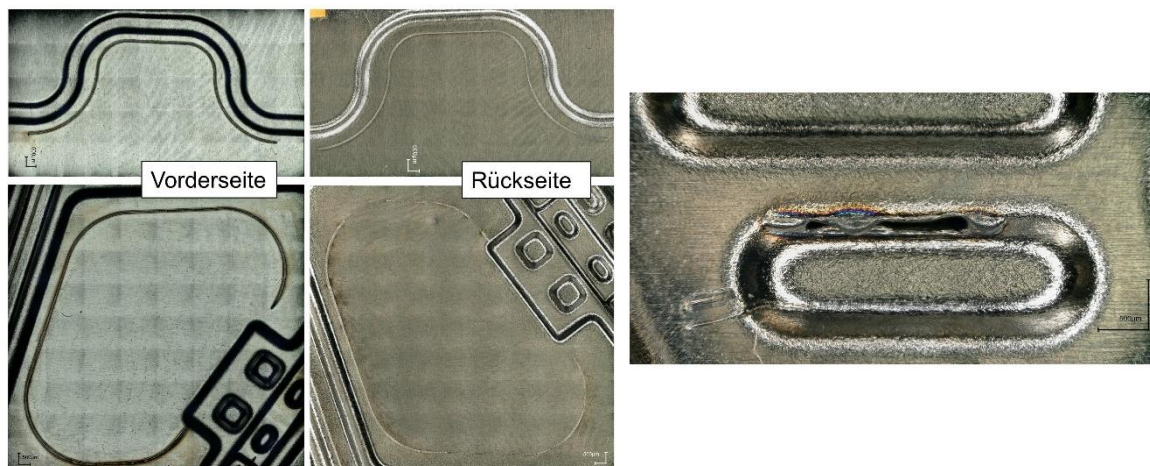


Abbildung 64: Mikroskop-Aufnahmen am Teildesign

Gewonnene Kenntnisse aus den Untersuchungen zum Laserschweißen von BPP-Hälften im CoBiP Projekt lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das eingesetzte Umform-Verfahren und die Qualität der gelieferten umgeformten Platten haben einen signifikanten Einfluss auf das Schweißergebnis, vor allem, was die Ebenheit der BPP betrifft.
- Die benötigte Spannkraft zur Gewährleistung eines Null-Spalts muss genauer definiert werden.
- Die Entwicklung der Spannvorrichtung, insbesondere die Spannmasken muss iterativ erfolgen, um eine optimierte Lösung zu gestalten.

AP3.4: Entwicklung einer geeigneten Prozessführung beim Laserschneiden von BPP mit variablem Spaltabstand [06/20-09/21]

Beim Schneiden von doppelagigem Material mit einem Spalt zwischen den Platten – einer Anordnung, die der Kanalstruktur der Bipolarplatten entspricht – entsteht beim Einsatz des Singlemodelasers ein geringeres abzutransportierendes Schmelzvolumen. Der Grund dafür ist die geringere Fokusgröße mit der daraus resultierenden schmalen Schnitffugenbreiten zwischen etwa $50 \mu\text{m}$ und $90 \mu\text{m}$ (Abbildung 65)

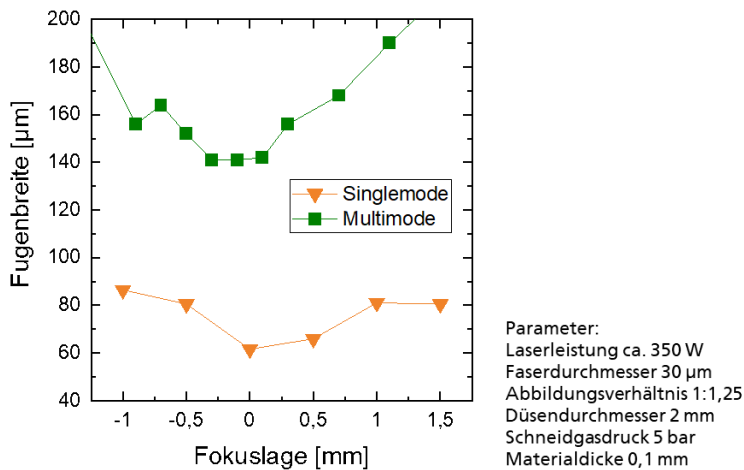


Abbildung 65: Vergleich der Schnittfugenbreiten bei Einsatz des Multimode- und des Singlemode Faserlasers

In einem Parameterfeld, in dem Fokuslage, Schneidgeschwindigkeit und der Abstand zwischen den Plattenhälften (Spalt) variiert werden, wird der Einfluss des schmaleren Schnittpalts auf die Qualität untersucht. Dem positiven Effekt des geringen Schmelzvolumens steht dabei entgegen, dass durch die enge obere Schnittfuge der Gaseintritt durch die Fuge zur Unterstützung des Austriebs am unteren Schnitte gegenüber breiten Fugen noch weiter reduziert ist.

Tabelle 6: Versuchsparameter zu Versuchsreihen „variabler Spaltabstand“

| | |
|------------------------|---|
| Laserleistung | 930 W |
| Fokusbereich | 38 µm |
| Fokuslage | +0,5 ... -1,5 mm (Bezug: Oberfläche oberes Blech) |
| Düsendurchmesser | 2,0 mm |
| Düsenabstand | 0,5 mm |
| Schneidgas | N ₂ |
| Schneidgasdruck | 5 bar |
| Schneidgeschwindigkeit | 30 m/min / 100 m/min |
| Spalt | 0,25 mm / 0,5 mm / 1,0 mm |

Die Untersuchungen werden mit den in Tabelle 6 gelisteten Parametern durchgeführt.

Für das obere Blech werden unabhängig vom Spalt und der Schneidgeschwindigkeit (30 m/min und 100 m/min) bei geeignet gewählter Fokuslage gute Schnittqualität erzielt mit ähnlichen Ergebnissen wie bei Versuchen mit Einzelblechen.

Am unteren Blech sind bei hoher Geschwindigkeit eine deutliche Verschmutzung und teilweise Schmelzanhaftungen auf der Oberfläche zu beobachten (Abbildung 66). In diesem Geschwindigkeitsregime sind die Schnitte annähernd bartfrei. Bei niedriger Geschwindigkeit ist die Oberfläche deutlich sauberer, aber es bildet sich Bart.

Die bartfreie oder zumindest bartarme Qualität bei hohen Geschwindigkeiten wird erreicht, weil der Austrieb signifikant durch Dampfdruckgradienten unterstützt wird. Bei niedrigen Geschwindigkeiten fehlt diese Unterstützung und die durch das obere Blech stark eingeschränkte Schneidgaszufuhr ist nicht in der Lage, ausreichend Kräfte auf die Schmelze zu übertragen, um die Ablösung von der Unterkante zu erreichen. Dieser Effekt tritt auch bei üblichen, einlagigen Schnitten auf, jedoch erst bei noch niedrigeren Geschwindigkeiten. Erprobte Maßnahme zur Vermeidung von Bartbildung ist dann die Modulation der Laserstrahlung („Pulsen“). Dies könnte auch beim Schneiden von doppelagigem Material mit Spalt ein Lösungsansatz sein, dann schon bei mittleren Geschwindigkeiten wie den hier untersuchten 30 m/min.

Die Konzentration auf niedrige und mittlere Schneidgeschwindigkeiten ist geboten, weil an der Bipolarplatte zu schneidende, doppellagige Bereiche an den Manifolds auf Grund der geometrischen Gegebenheiten (kleine Konturen) nicht mit hohen Geschwindigkeiten geschnitten werden können.

Aufgrund der durch Bartbildung und Eintrag von Schneidemissionen zwischen die Plattenhälften reduzierten Qualität wird allerdings grundsätzlich empfohlen, eine Schnitfführung innerhalb der Kanäle zu vermeiden und diese Bereiche in einem vorgelagerten Schritt in den einzelnen Plattenhälften zu schneiden

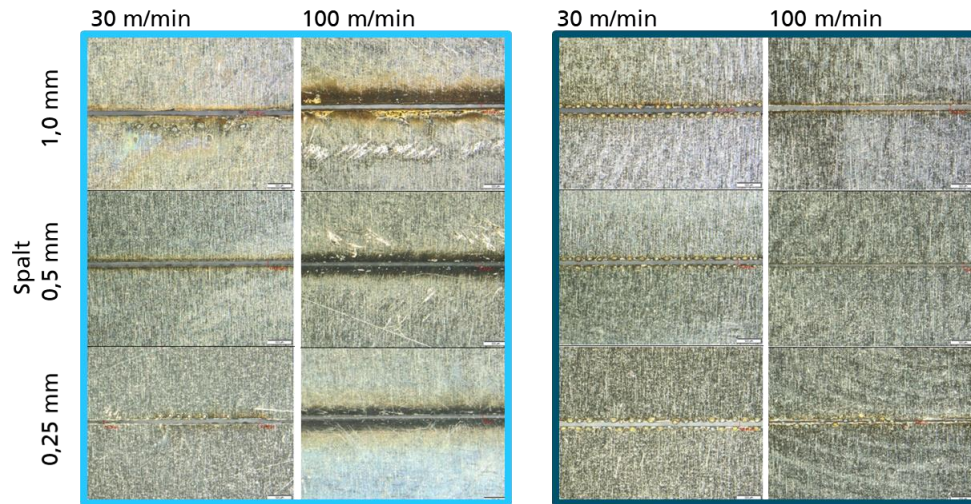


Abbildung 66: Oberseite (links) und Unterseite (rechts) des unteren Blechs bei Schnitten durch doppellagiges Blech mit Spalt. Parameter s. Tabelle 6.

Doppellagig auf Block liegendes Material kann dagegen in guter Qualität geschnitten werden. Durch Positionierung der Schnittlinie angrenzend an die Schweißnähte der gefügten Platte kann eine Konfiguration ohne oder mit minimalem Spalt erreicht werden. Mit Versuchen, in denen der laterale Abstand zur Schweißnaht variiert wurde, konnte gezeigt werden, dass das doppellagige Material mindestens bis zu 1 mm Entfernung zur Schweißnaht bartfrei zu schneiden ist (Abbildung 67). Bei größeren Entfernungen können die Einspannsituation sowie Spannungen und Welligkeiten im Material zunehmend an Einfluss gewinnen, so dass eine Positionierung in größerer Entfernung vermieden werden sollte. Nach unten wird die Entfernung zur Schweißnaht durch die Toleranz der Schnittlinie begrenzt. Um keine unnötigen Anforderungen an Positionierung der Bauteile, Toleranz der Lage der Schweißnähte und Bahngenaugigkeit der Schneidmaschine zu stellen, erscheint ein Mindestabstand von 0,3 mm vom Rand der Naht aus aktueller Sicht als angemessen.

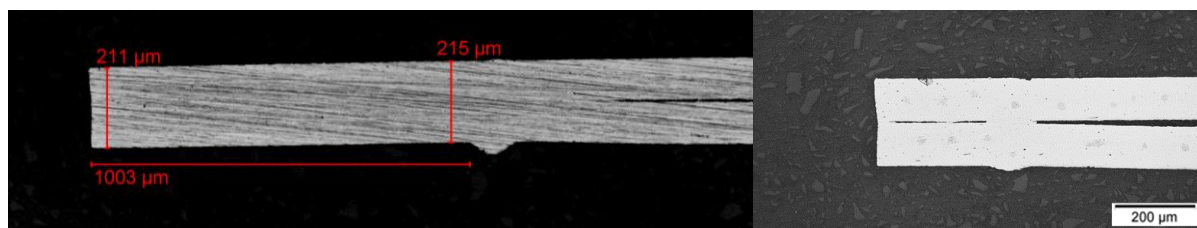


Abbildung 67: Querschliffe von Schnitten durch doppellagiges Material in 1 mm Entfernung und 0,25 mm Entfernung zur Schweißnaht. Das Beispiel rechts zeigt einen geringfügigen Spalt zwischen den Blechen an der Schnittkante, der die Qualität nicht beeinträchtigt.

AP3.5: Entwicklung und Ableitung eines R2R-Modulkonzepts zur Integration einer Laserschweiß- und Laserschneideinheit [10/20- 09/21]

Auf Basis der vom Fraunhofer ILT in AP3 erzielten Erkenntnisse aus Versuchen zum Laserschweißen und -schneiden wurde das R2R-Modulkonzept in Zusammenarbeit des Fraunhofer IPT und ILT detailliert. Weiterhin wurden konkrete Lösungen für die einzelnen Funktionsbausteine ausgearbeitet. Das

Modulkonzept ist ein zentraler Bestandteil des Gesamtkonzeptes der R2R-Prototypenmaschine und wird in AP5 genauer beschrieben. In der Beschreibung der Ergebnisse des AP5: Aufbau der R2R-Prototypenanlage und Inbetriebnahme [Alle, IPT] wird das R2R-Modulkonzept und auch die Konstruktion der Laserschweiß- und Laserschneideinheit detaillierter beschrieben. Weitere Informationen sind dieser Beschreibung zu entnehmen.

AP4: Prozessparameterstudie und Optimierung der Beschichtung von BPP im kontinuierlichen Verfahren [Alle, IPT]; Laufzeit 01/20-06/23

Die Precors GmbH GmbH übernimmt in AP4 mit der Adaptation ihres kontinuierlichen Beschichtungsmoduls die Veredelung der gefertigten BPP. Dieses bereits entwickelte Modul ist aus technischer Sicht integrierbar in die am Fraunhofer aufzubauende R2R-Fertigungsstrecke. Über die Festlegungen im Design-Clearance-Dokument wird für das Material und das Design eine passende Beschichtung gewählt und eine spätere Prozessparameterstudie hinsichtlich i) Reinigung und Vorbehandlung bzw. Aktivierung von Oberflächen, ii) Beschichtung und iii) Nachbehandlung der BPP ausgelegt. Diese Versuchsreihen werden mit experimentellen Messungen der BPP-Prototypen hinterlegt, so dass eine optimale Prozessdurchführung gewährleistet werden kann. Dabei wird es sich um folgende Charakterisierungsmethoden handeln:

- Die Erforschung und Identifikation von Schicht- und Prozessparametern (unter Berücksichtigung der BPP-Geometrie und Stackanforderungen) erfolgt durch Auslagerungsversuche sowie elektrochemische Untersuchungen in einem 3-Elektroden-Messaufbau in Abhängigkeit von Elektrolyt, Temperatur und angelegtem Potential bzw. Strom. Hierfür wird im Rahmen des Vorhabens ein Teststand aufgebaut. Ein entscheidender Aspekt für hohe Leistungsdichten von Brennstoffzellen ist der Wasserhaushalt (Benetzungsverhalten in den Kanälen sowie Austrag auf Kathodenseite). Hierfür wird durch Oberflächenmodifikation bzw. Zugabe von Additiven das Benetzungsverhalten der Schicht variiert und der Einfluss auf den Zellbetrieb untersucht.
- Messungen des elektrischen Durchgangswiderstandes an der Grenzfläche beschichtete(s) Materialmuster bzw. Bipolarplatte und Gasdiffusionslage (simulierte Zellanordnung).
- Untersuchung der Langzeitalterung der Schicht (Post-mortem-Analyse) mit Blick auf Defektmechanismen (wie Risse, Abplatzungen etc.).
- Maßnahmen zur Qualitätssicherung im Fertigungsprozess durch Prozessbewertung.

Da die Beschichtung für die Größe des Lebenszyklus verantwortlich ist, wird dies als Qualitätssicherung der BPP gesehen. Die Durchführung dieser Tests wird mit Prototypenmaterial bei der Precors GmbH GmbH durchgeführt.

M5: Durchführung von Beschichtungsaufgaben an der am Fraunhofer IPT gefertigten Prototypenserie [04/23]

Für die funktionalen Tests wurden walzgeprägte, lasergeschweißte und -geschnittene BPPs von Precors GmbH GmbH beschichtet. Diese Beschichtungsaufgaben wurden erfolgreich während der Projektlaufzeit durchgeführt. Aufgrund der Ebenheitsproblematik wurden hierfür diskret verknüpfte BPPs verwendet.

AP4.1 Erforschung und Identifikation von Schicht- und Prozessparametern unter Berücksichtigung der BPP-Geometrie und Stackanforderungen [01/20-05/20]

Es wurden drei Verfahren entwickelt, mit deren Hilfe es möglich ist BPP und deren Beschichtung unter simulierten Brennstoffzellenbedingungen zu testen und für den Einsatz in einem Stack zu validieren. Diese Tests sehen eine Auslagerung im Wasserbad bei 80°C, die Auslagerung in einer Elektrolytlösung bei 100°C und die elektrochemische Messung des Korrosionsstromes der Probe in einer elektrochemischen Zelle bei 80°C vor.

Für die Durchführung der elektrochemischen Messungen der Proben wurde ein spezieller Messstand aufgebaut. Dieser Messstand ermöglicht es eine möglichst große Probenfläche zu untersuchen, um Fehlstellen in der Beschichtung mit einer höheren Statistik zu detektieren. Zudem ist die Messzelle beheizbar. Das Design ermöglicht es sowohl glatte Folien als auch geformte Kanalstrukturen zu testen. Außerdem vermeidet der Aufbau unbeschichtete Kanten, die bisher bei derartigen Messungen ein Problem darstellen. Die für diese Zwecke entwickelte Messzelle ist in Abbildung 68 gezeigt:

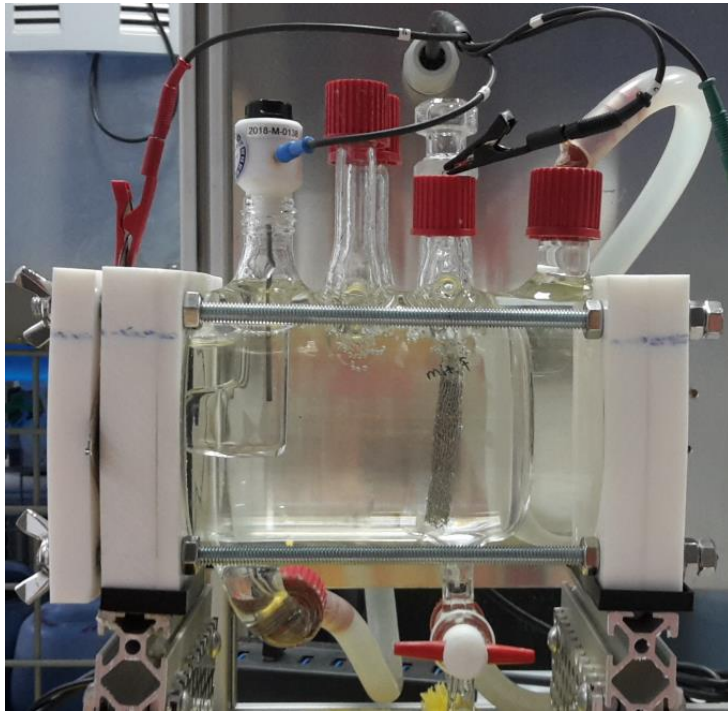


Abbildung 68: Elektrochemische Messzelle

Zunächst wurden die entwickelten Testmethoden an den vom IPT zur Verfügung gestellten Mustern (Abbildung 69) des entwickelten Testdesigns angewendet, die von Precors GmbH beschichtet wurden. Der Korrosionsstrom der beschichteten Testplatten liegt zwei Größenordnungen niedriger als die notwendigen Anforderungen für den Einbau in einen Brennstoffzellenstack.

Um die von Precors GmbH für die Beschichtung gewählten Beschichtungsparameter ebenfalls in einem Langzeitversuch (> 1000 h) testen zu können wurde der Messaufbau um eine weitere Testzelle gleicher Bauart erweitert.

Sowohl vom IPT als auch von Saueressig wurden für die Tests verschiedene Musterplatten zur Verfügung gestellt. Diese sind in Abbildung 69 dargestellt:



Abbildung 69: Muster der während des Projektes zu fertigenden BPP. Links: Manifoldbereich Kathode, mitte: Erster Prototyp der gewalzten BPP, rechts: Manifoldbereich Anode.

Mithilfe dieser Testmuster wurden Beschichtungsversuche durchgeführt und die Parameter der Beschichtungslinie entsprechend der Versuchsergebnisse auf die BPP-Geometrie eingestellt.

In der Mitte ist ein Prototyp der konstruierten Kathoden Halbschale zu sehen. Dieser wurde von Saueressig durch Walzenprägung hergestellt. Diese Halbschale wurde mit Hilfe der zuvor gewonnenen Parameter durch Precors GmbH GmbH beschichtet und getestet.

Die Messergebnisse des Kontaktwiderstandes der beschichteten Platte auf verschiedenen Bereichen der Halbschale sind in Abbildung 70 zu sehen:

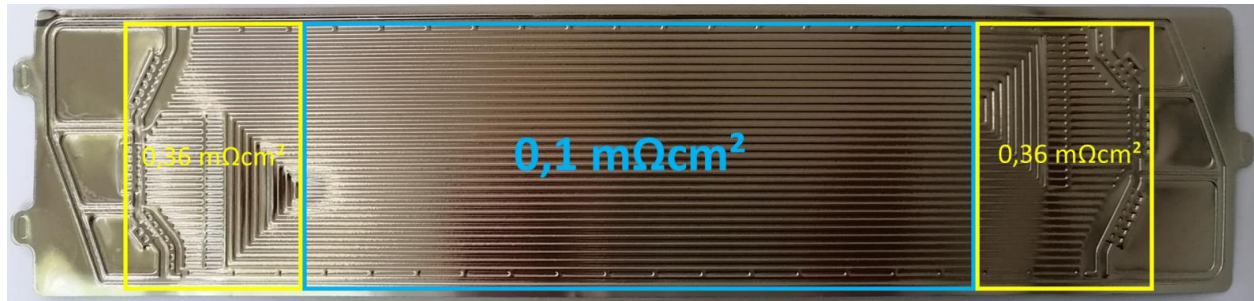


Abbildung 70: Messung der Kontaktwiderstände einer beschichteten, durch Walzenprägung umgeformten Halbschale.

Der Anstieg des Kontaktwiderstandes in den Manifoldbereichen hängt wahrscheinlich mit der veränderten Geometrie in diesen Bereichen zusammen.

Die beschichtete Platte wurde in einem Wasserbad bei 80°C über 200 h ausgelagert. Durch die Auslagerung steigt der Kontaktwiderstand leicht an. Der Kontaktwiderstand erreicht ein konstantes Niveau ab einem Wert von ca. 0,5 mΩcm². Dieses Verhalten ist normal für einen solchen Auslagerungsversuch.

Die beschichtete Halbschale wurde ebenfalls für 200 h in Brennstoffzellen-Elektrolyten bei einer Temperatur von 100°C ausgelagert. Das Plateau wird ab einem Wert von 0,9 mΩcm² erreicht.

Die Oberfläche der Platte wurde via Mikroskop auf Korrosionsspuren hin untersucht (Abbildung 71).

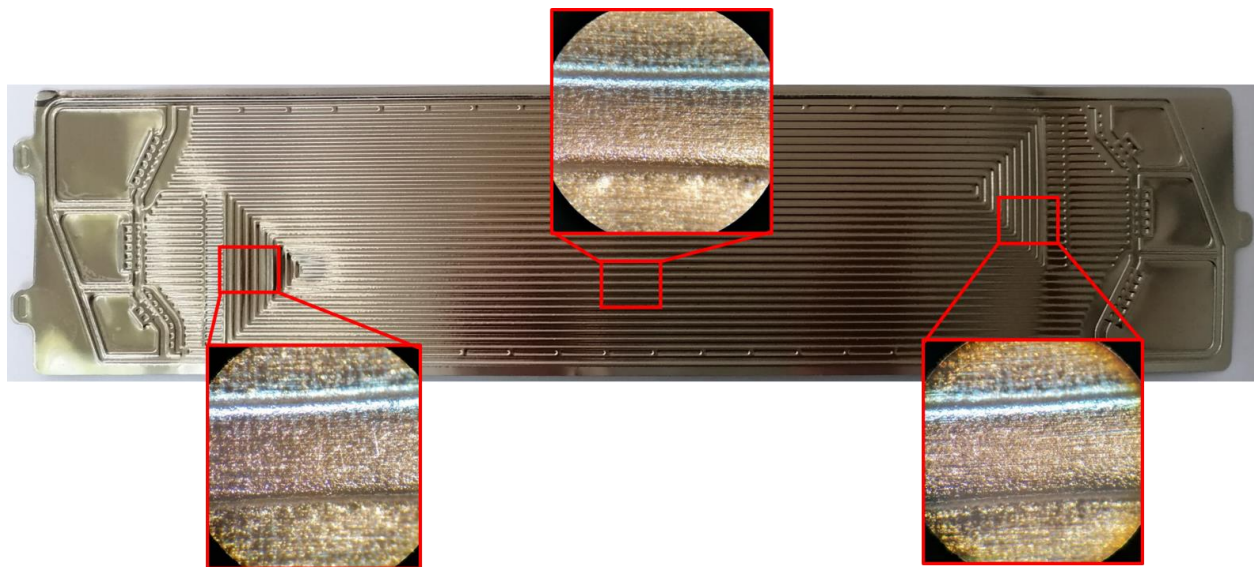


Abbildung 71: Mikroskopische Untersuchung der Oberfläche einer ausgelagerten Halbschale.

Es konnten weder Korrosionsspuren noch Abplatzungen oder Risse in der Beschichtung gefunden werden. Die Beschichtung der Prototypen Halbschale erfüllt somit sämtliche Anforderungen.

AP4.2 Untersuchung des Wasserbenetzungsverhaltens von hydrophilen und hydrophoben Schichten [06/05/22]

Um das Benetzungsverhalten von Oberflächen testen zu können wurde ein Messaufbau entwickelt, mit dessen Hilfe der Kontaktwinkel eines Wassertropfens auf der Probenoberfläche gemessen werden kann.

Zunächst wurde untersucht, ob das Benetzungsverhalten des Metallsubstrates verändert werden kann, indem die Oberfläche aufgeraut wird. Die hierdurch erhaltenen Oberflächen sind im Folgenden aufgelistet:

1. Unbehandeltes Blech (Referenz)
2. Von Precors GmbH beschichtetes Blech
3. Elektropoliertes Blech, unbeschichtet
4. Elektropoliertes Blech, von Precors GmbH beschichtet
5. Mit Sandpapier angerautes Blech, unbeschichtet
6. Mit Sandpapier angerautes Blech, von Precors GmbH beschichtet

Das unbehandelte Blech 1. dient hierbei als Referenzwert für die Messungen. Durch Elektropolieren der Proben 3. und 4. wurde eine sehr glatte Oberfläche erzeugt. Als Gegensatz hierzu wurden Bleche mit Hilfe von Sandpapier mit einer Körnung von #240 behandelt, wodurch eine sehr raue Oberfläche erzeugt wurde. Die verschiedenen Oberflächenmodifikationen wurden unter dem Mikroskop untersucht und sind in Abbildung 72 zu sehen:

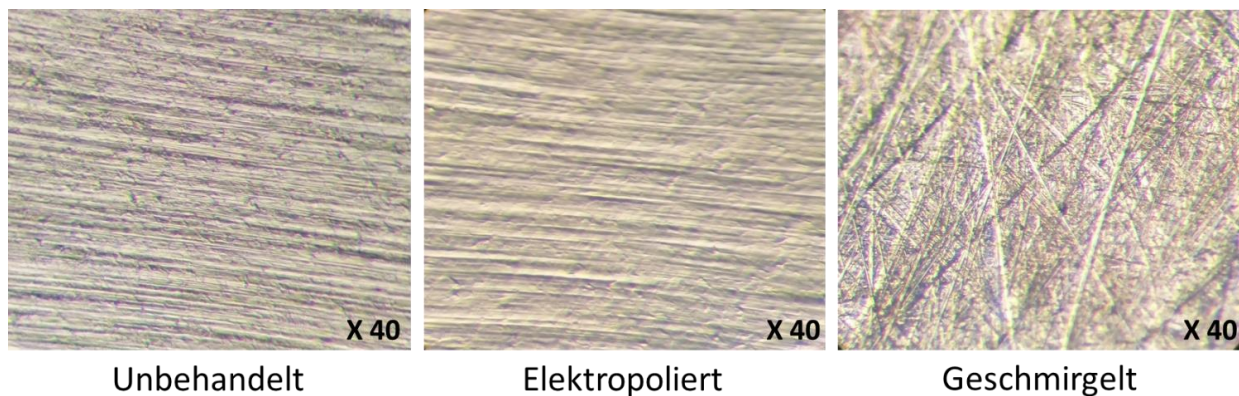


Abbildung 72: Mikroskopaufnahmen der Oberflächen der untersuchten Proben

Im Anschluss an diese Untersuchungen wurde jede der Proben in den konstruierten Messstand eingebaut und der Kontaktwinkel zwischen einem darauf aufgetragenen Wassertropfen und der Probe vermessen. Die Ergebnisse dieser Messung sind in Tabelle 7 dargestellt:

Tabelle 7: Untersuchung des Kontaktwinkels von Proben mit unterschiedlichen Oberflächen. Die Werte wurden aus mehreren Messungen gemittelt.

| Probe: | Tag 0: | Tag 30 |
|--|--------|--------|
| 1.) Unbehandeltes Blech | 83° | 83° |
| 2.) Von Precors GmbH beschichtetes Blech | 54° | 73° |
| 3.) Elektropoliertes Blech, unbeschichtet | 80° | 76° |
| 4.) Elektropoliertes Blech, von Precors GmbH beschichtet | 46° | 82° |
| 5.) Mit Schmirgelpapier angerautes Blech, unbeschichtet | 34° | 71° |
| 6.) Mit Schmirgelpapier angerautes Blech, von Precors GmbH beschichtet | 39° | 82° |

Ein Kontaktwinkel größer 90° bedeutet hydrophobes und ein Kontaktwinkel kleiner 90° bedeutet hydrophiles Benetzungsverhalten. Durch die Beschichtung mit der Precors GmbH Beschichtung wurde die Benetzbarkeit von Probe 1 und 3 deutlich erhöht.

Das Benetzungsverhalten von Probe 5 ändert sich durch die Beschichtung nicht. Dieses Verhalten stimmt mit den Erkenntnissen aus der durchgeführten Literaturstudie überein.

Um das Langzeitverhalten der Proben zu untersuchen, wurden diese 30 Tage an Luft ausgelagert. Das Ergebnis ist in Tabelle 7 (rechte Seite) zu sehen. Das Benetzungsverhalten aller Proben entspricht nach Auslagerung weitgehend wieder dem Benetzungsverhalten der Referenzprobe und ist somit nur temporär.

Eine weitere Möglichkeit die Substratoberfläche aufzurauen ist die gezielte Strukturierung der Substratoberfläche mittels Laserbearbeitung. Die Strukturierung der Proben wurde durch das Fraunhofer-ILT in Aachen durchgeführt. Es wurden zwei unterschiedliche Strukturierungstypen bei den verwendeten Proben angewandt. Abbildung 73 zeigt Beispiele dieser beiden Strukturen:

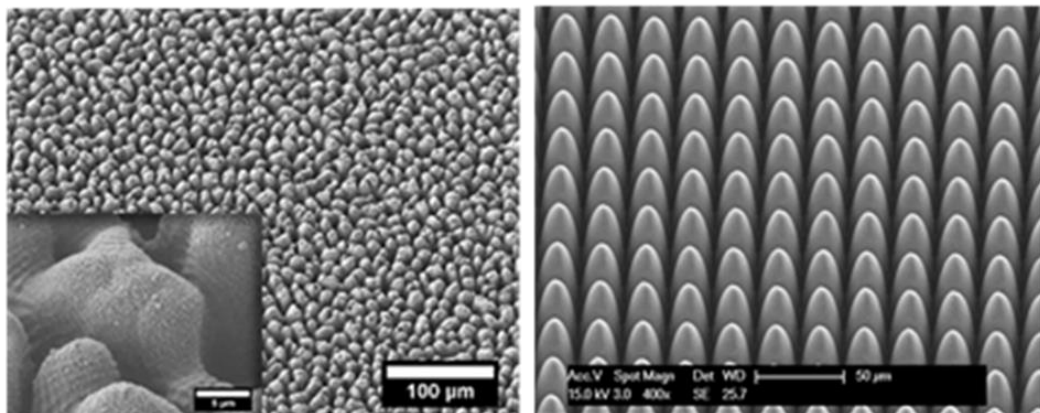


Abbildung 73: unregelmäßig strukturierte Probe, rechts: regelmäßig strukturierte Probe mit nadelförmigen Spitzen. (Bildquelle: Fraunhofer-ILT)

Die Probenmatrix ist in Tabelle 8 aufgeführt:

Tabelle 8: Probenmatrix Laserstrukturierte Proben.

| Probenname | Art der Strukturierung | Parameter |
|------------|------------------------|--------------|
| RAU | unregelmäßig | |
| CLP 15 | Regelmäßige Spitzen | Tiefe 15 µm |
| CLP 30 | Regelmäßige Spitzen | Tiefe 30 µm |
| CLP 130 | Regelmäßige Spitzen | Tiefe 150 µm |

Jede dieser Proben wurde zunächst unter dem Mikroskop untersucht und anschließend das Benetzungsverhalten im unbeschichteten Zustand überprüft (Abbildung 74 bis Abbildung 77):

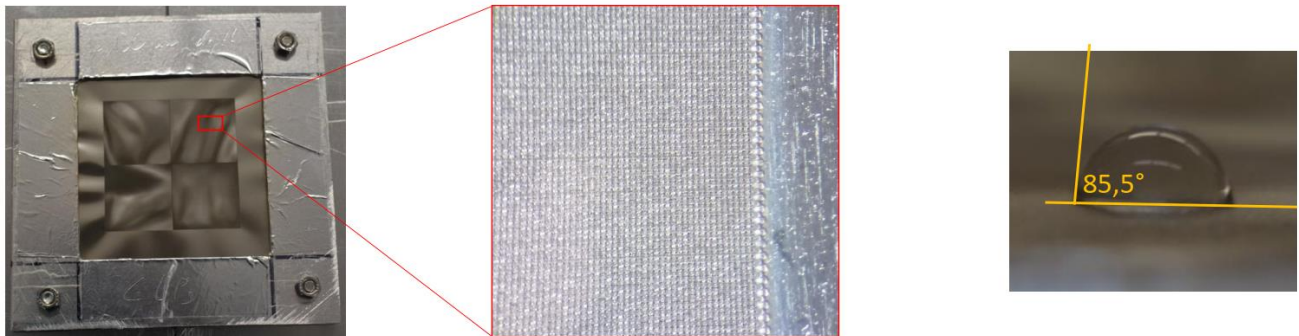


Abbildung 74: Untersuchung der Probe CLP 130 vor der Beschichtung. Links: Mikroskop-aufnahme, rechts: Benetzungsverhalten.

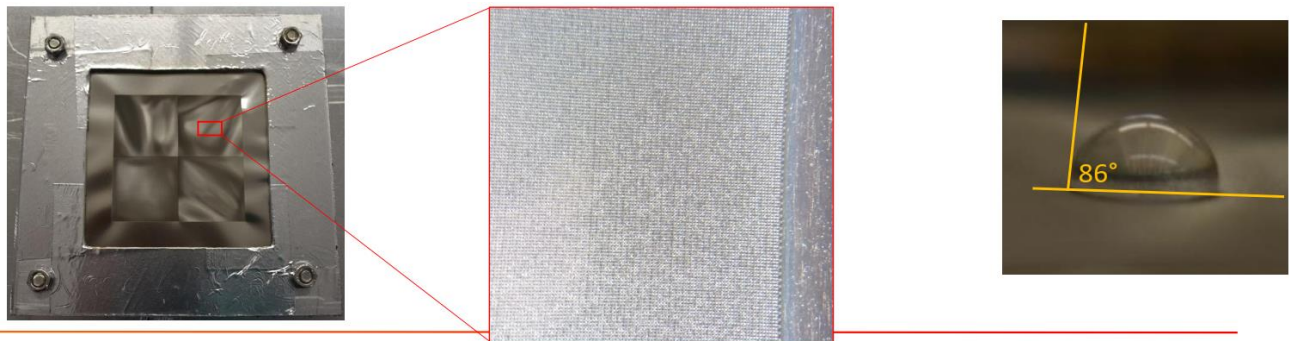


Abbildung 75: Untersuchung der Probe CLP 30 vor der Beschichtung. Links: Mikroskop-aufnahme, rechts: Benetzungsverhalten.

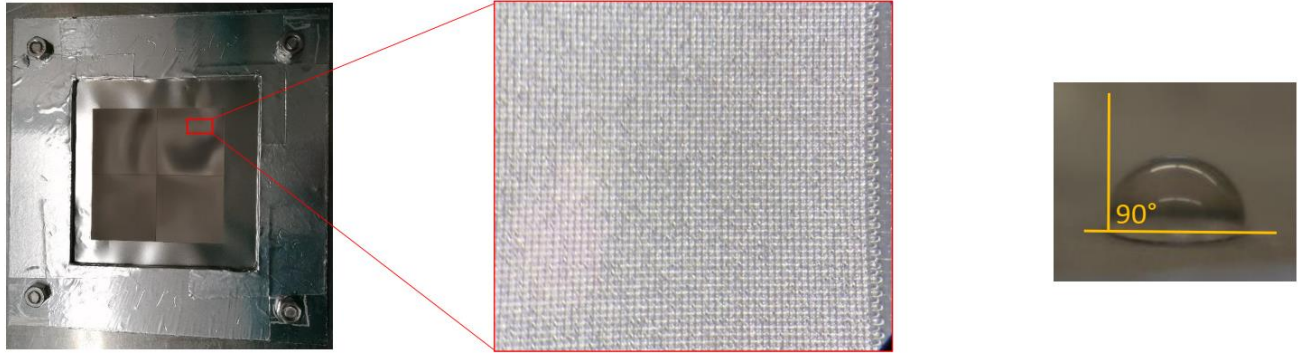


Abbildung 76: Untersuchung der Probe CLP 15 vor der Beschichtung. Links: Mikroskopaufnahme, rechts: Benetzungsverhalten.

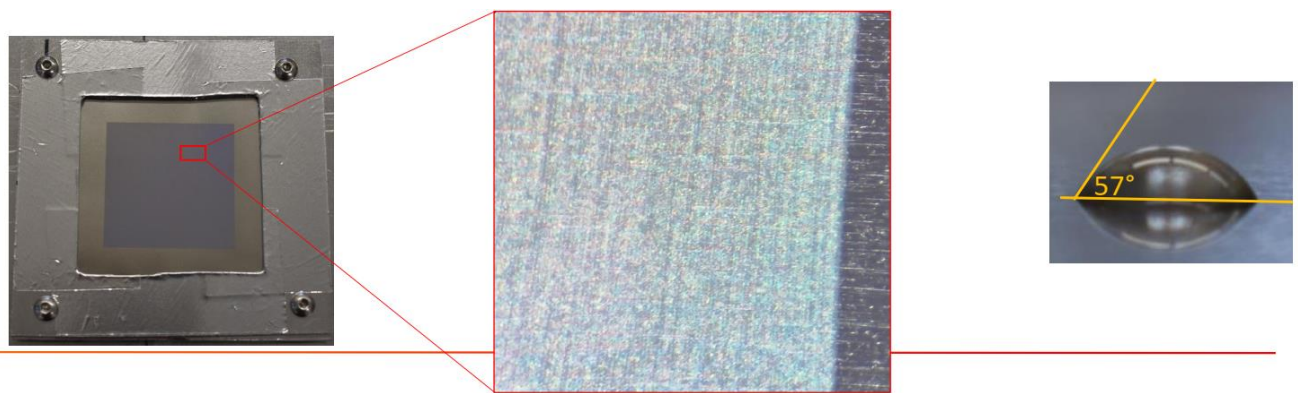


Abbildung 77: Untersuchung der Probe RAU vor der Beschichtung. Links: Mikroskopaufnahme, rechts: Benetzungsverhalten.

Von den untersuchten Proben zeigt lediglich Probe „RAU“ ein hydrophiles Verhalten. Nach der Beschichtung der Proben steigt der Kontaktwinkel leicht an (Tabelle 9). Der gemessene Kontaktwinkel aller beschichteter Proben liegt zwischen 102° und 90°. Alle Proben verhalten sich hinsichtlich ihres Benetzungsverhaltens neutral.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung der Laserstrukturierten Proben

| Probe | Unbeschichtet | Beschichtet |
|---------|---------------|-------------|
| CLP 130 | 85,5° | 93° |
| CLP 30 | 86° | 102° |
| CLP 15 | 90° | 100° |
| RAU | 57° | 90° |

Sowohl vor als auch nach der Beschichtung zeigen die Laserstrukturierten Proben keine deutliche Abweichung von einem neutralen Benetzungsverhalten (90°). Lediglich die Probe RAU zeigt nach der Strukturierung eine Tendenz hin zum hydrophilen Verhalten, verliert diese allerdings nach der Beschichtung wieder.

Durch die hier durchgeführte Laserstrukturierung der Probenoberfläche konnte keine deutliche Veränderung im Benetzungsverhalten erzielt werden.

Im weiteren Verlauf wurde der Versuch unternommen die Benetzbarkeit der Proben durch den Einsatz entsprechender Nanopartikel zu verändern. Hierfür steht ein Präparat zur Verfügung, dass hydrophiles benetzungsverhalten erzeugt und ein Präparat, dass hydrophobes benetzungsverhalten erzeugt. Mit diesen Präparaten behandelte Referenzproben zeigen Benetzungswinkel von 30° bzw. 87°. Dieser Effekt bleibt selbst nach Auslagerung im Wasserbad (24 h, 80°C) stabil.

Die Behandlung eines von Precors GmbH beschichteten Blechs mit den jeweiligen Nanopartikel-Lösungen führt zu deutlicher Folienbildung auf deren Oberfläche. Eine dieser Proben ist in Abbildung 78 gezeigt:



Abbildung 78: Behandlung eines beschichteten Bleches mit Nanopartikel-Lösung.

Die Kontaktwiderstände der Proben betragen 4,2 mΩcm² und 6,85 mΩcm². Beide Werte sind im Vergleich zu unbehandelten Proben stark erhöht (ICR unbehandelte Probe 0,1 mΩcm²). Die Benetzbarkeiten der Proben blieben auch hier nach Auslagerung in einem Wasserbad (24 h, 80°C) stabil.

Die Nanopartikel-Lösung wurde in folgenden Mischungsverhältnissen zu der Suspension für die Beschichtung zugemischt (Tabelle 10):

Tabelle 10: Mischungsverhältnisse und Ergebnisse für Beschichtungsversuche mit zugemischter Nanopartikel-Lösung.

| | Feststoffverhältnis | Ergebnis (hydrophilisierend) | Ergebnis (hydrophobisierend) |
|---|---------------------|------------------------------|-------------------------------|
| A | 1:1 | Beschichtung blättert ab | Beschichtung blättert ab |
| B | 2:1 | Beschichtung blättert ab | Beschichtung blättert ab |
| C | 5:1 | ICR: 0,42 mΩcm ² | Nicht sprühbar / Inselbildung |
| D | 5:1 + Isopropanol | ICR: 0,14 mΩcm ² | Nicht sprühbar / Inselbildung |

Von den verwendeten Mischungen zeigten nur Probe C und D (hydrophilisierend) ein brauchbares Beschichtungsergebnis. Die Kontaktwiderstände der Proben betrug $0,42 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ bzw. $0,14 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$. Diese Werte liegen nahe bei den gemessenen Werten der Standardbeschichtung. Die Kontaktwiderstände der Proben mit hydrophobierender Beschichtung liegen bei $6,8 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ und sind somit stark erhöht. Dies kann auf die Inselbildung während des Beschichtungsvorganges zurückgeführt werden.

Durch Auslagerung in einem Wasserbad stieg der Kontaktwiderstand der Proben C und D (hydrophilisiert) auf $3,7 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ bzw. $2,2 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$. Der Kontaktwiderstand der Proben mit hydrophobierender Beschichtung liegt nach der Auslagerung bei $28,6 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ und ist somit erheblich erhöht.

Als mögliche Begründung wird eine Störung des Netzwerks in der Beschichtungsmatrix vermutet (Abbildung 79):

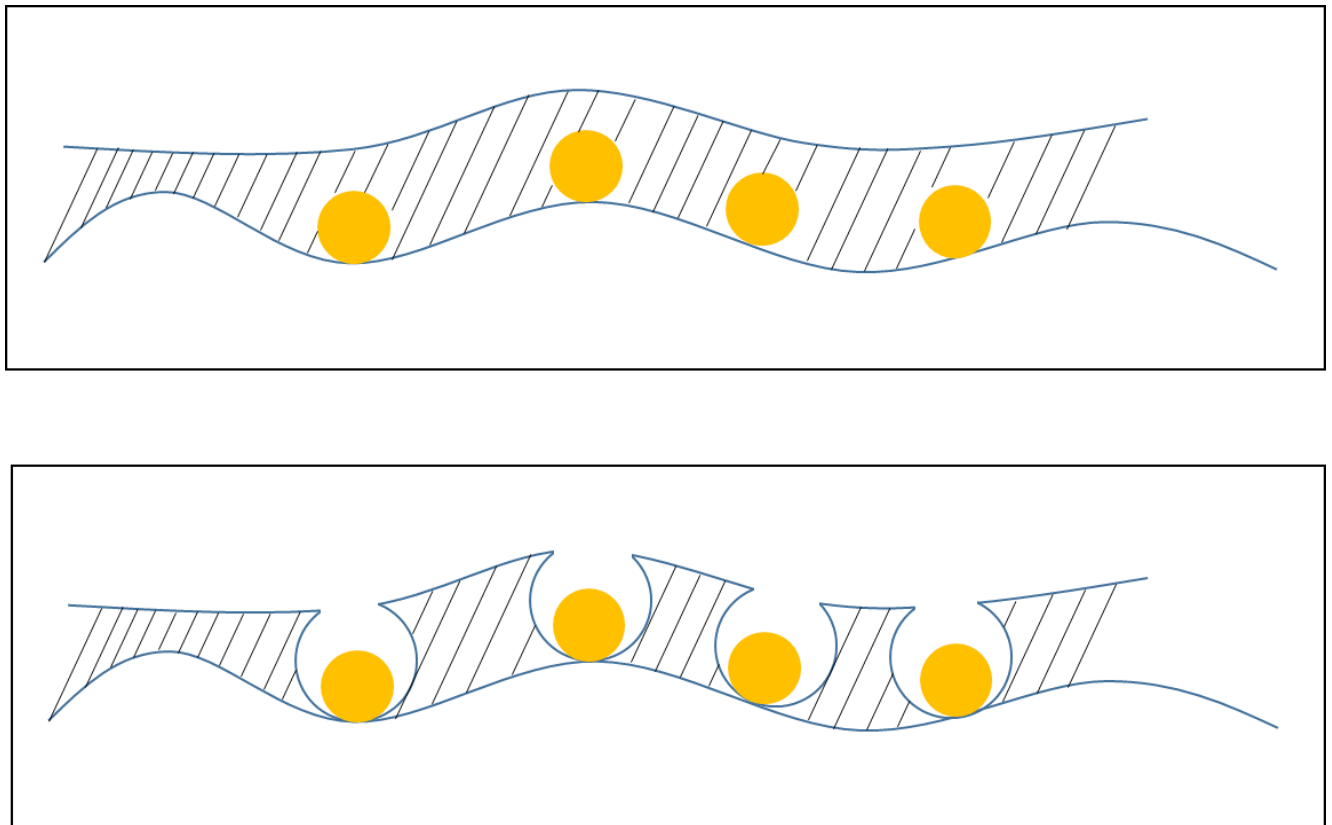


Abbildung 79: Skizze zu Vernetzungsstörung bei Zugabe von Fremdpartikeln zu der Beschichtungssuspension. Oben: Zugabe von hydrophilisierenden Partikeln, unten: Zugabe von hydrophobisierenden Partikeln.

Hydrophile Nanopartikel lagern sich homogen in der wasserbasierten Beschichtungsmatrix ab und werden von dem Beschichtungsmaterial überdeckt (oberes Bild). Die eingebrachten Partikel stören die Quervernetzung der Beschichtung und erzeugen Risse im Beschichtungsmaterial. Die Folge ist ein Anstieg des Kontaktwiderstandes der Probe.

Um die hydrophoben Nanopartikel bildet sich in der wasserbasierten Suspension eine Pore aus (unteres Bild). Dies beeinträchtigt die Quervernetzung des Beschichtungsmaterials und führt zur Korrosion des Substrates wodurch der Kontaktwiderstand ansteigt.

Auf diese Weise modifizierte BPP sind für den Einsatz in einer Brennstoffzelle ungeeignet.

AP4.3 Messungen des elektrischen Durchgangswiderstandes an der Grenzfläche beschichtetes Materialmuster bzw. BPP und Gasdiffusionslage [06/20-05/22]

Zunächst wurde ein rudimentärer Messstand aufgebaut, um den Kontaktwiderstand und somit die Güte der Beschichtung bestimmen zu können (Abbildung 80).

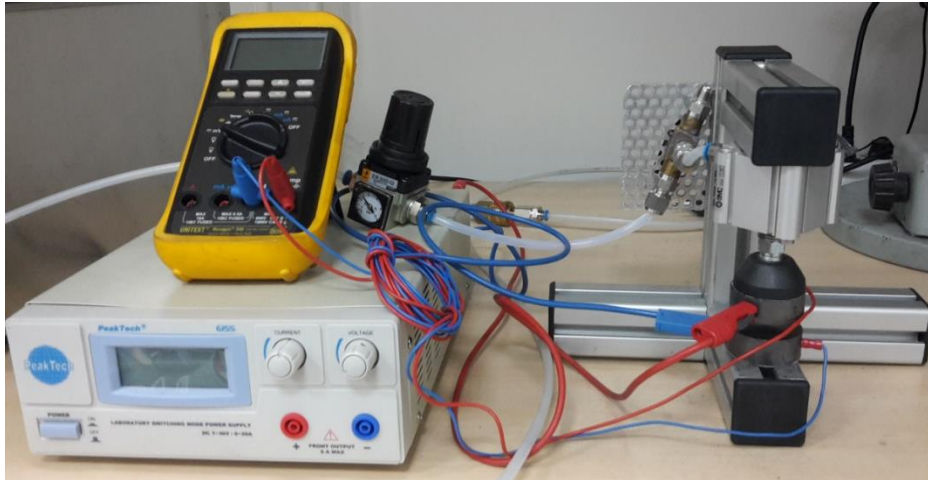


Abbildung 80: Messstand zur Untersuchung des Durchgangswiderstandes von flachen und geprägten Strukturen

Die Messung erfolgt zwischen zwei Stempeln, die mit einem konstanten Druck von 3 bar auf die Probe gepresst werden. Zwischen Stempel und Probe erfolgt die Kontaktierung durch eine Lage Graphitpapier. Dieses gleicht Unebenheiten wie Kanalstrukturen in der Probe aus. Zwischen den Messblöcken wird ein Strom von 10 A angelegt, wobei der Spannungsabfall zwischen den Blöcken gemessen wird. Aus diesen Werten lässt sich der Durchgangswiderstand der Probe bestimmen. Die genauen Messparameter wurden in einer Versuchsreihe angepasst und optimiert, so dass der Kontaktwiderstand mit dem hier gezeigten System verlässlich ermittelt werden kann.

Beispielhafte Messungen der Durchgangswiderstände verschiedener Proben sind in Tabelle 11 dargestellt:

Tabelle 11: Ergebnisse der Messungen des Durchgangswiderstandes nach Auslagerung

| Testverfahren | Durchgangswiderstand |
|--|------------------------|
| Nach der Beschichtung | 0,75 mΩcm ² |
| Auslagerung im Wasserbad (5 Tage bei 80°C) | 2 mΩcm ² |
| Auslagerung in Elektrolytlösung (5 Tage bei 100°C) | 3,25 mΩcm ² |
| 3-Elektroden-Test (36 h bei 80°C) | 4,13 mΩcm ² |

Für den Einsatz in einer Brennstoffzelle muss dieser Wert unter 10 mΩcm² liegen.

Im weiteren Verlauf wurde dieses System erweitert, um es in die Produktionslinie integrieren zu können. Hierzu wurde die Messung des Durchgangswiderstandes weitestgehend automatisiert. Der Prototyp dieses Messsystems ist in Abbildung 81 zu sehen:

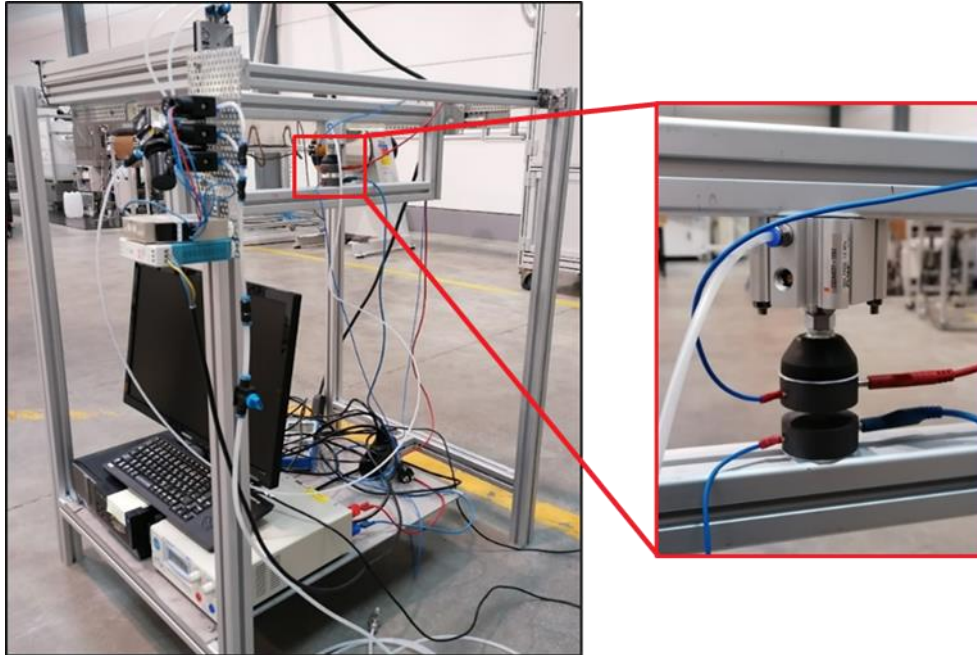


Abbildung 81: Prototyp des automatischen Messsystems zur Ermittlung des elektrischen Durchgangswiderstandes

Die Integration des Systems in die Produktionslinie erfolgte in AP4.5.

AP4.4 Untersuchung der Langzeitalterung der Schicht (Post-mortem-Analyse) mit Blick auf Defektmechanismen (wie Risse, Abplatzungen etc.) [07/21-05/22]

Für die Untersuchung der Alterung werden Laufzeiten von mehreren tausend Stunden gefordert. Deshalb muss aus Zeitgründen schon frühzeitig in der Projektlaufzeit mit der Auslagerung der Proben begonnen werden. Die Einrichtung des Teststandes für die geplante Langzeitauslagerung erfolgte mittels eines beschichteten Testflowfields (vom IPT zur Verfügung gestellt). In einer 3-Elektroden-Zelle eingebaut wurde das Flowfield unter konstantem Potential von 0,9 V gealtert. Dieser erste Test wurde verwendet, um Erfahrungen mit derartigen Dauerversuchen zu sammeln und den verwendeten Teststand dahingehen ständig weiter zu optimieren. Das Testmuster wurde insgesamt 2470 Stunden in der Zelle ausgelagert (Abbildung 82).

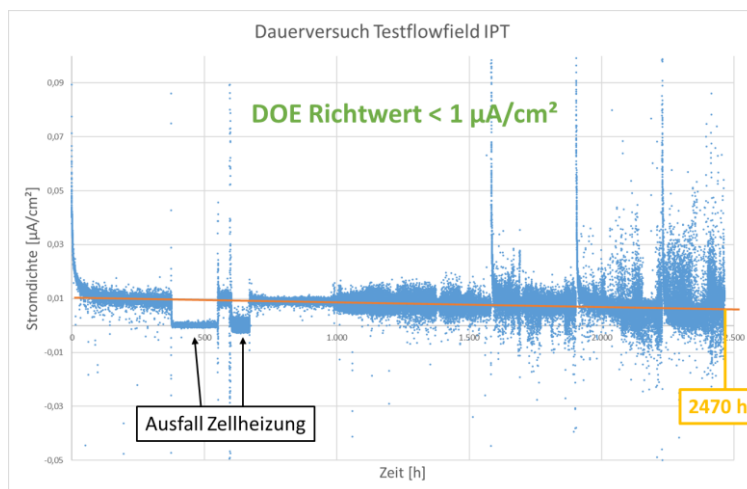


Abbildung 82: Dauerlauf eines Testflowfields für 2470 h zur Untersuchung der Langzeitalterung

Im Anschluss an diesen Versuch wurde die Probe auf Korrosionsspuren untersucht (Abbildung 83).

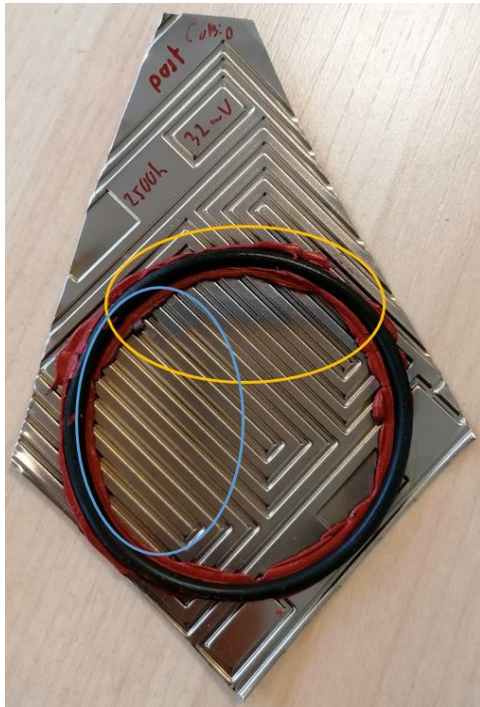


Abbildung 83: Probe nach der Auslagerung in einer 3-Elektroden-Zelle für 2470 h

Auf der Probe sind zwei verfärbte Bereiche zu erkennen. Im Orangefarben markierten Bereich wurde die Probe aufgrund einer Luftblase während des Versuches nicht vollständig mit Elektrolyt benetzt. Im blau markierten Bereich hat sich die Probe aufgrund des verwendeten Dichtungsmaterials verfärbt.

In Abbildung 84 sind Mikroskopaufnahmen der ausgelagerten Probe vor der Auslagerung und nach 2470 h in der 3-Elektroden-Zelle zu sehen:

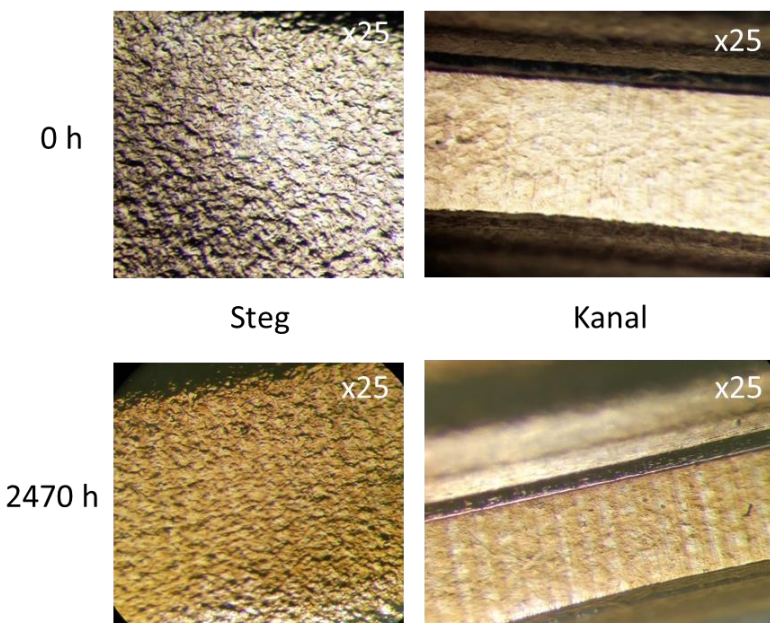


Abbildung 84: Mikroskopische Untersuchung der ausgelagerten Probe

Auf der Probenoberfläche der gealterten Probe sind im Mikroskop keine Veränderung im Vergleich zu der Probe vor der Auslagerung zu sehen. Der Kontaktwiderstand der Probe ist auf 40 mΩcm² gestiegen.

Zur weiteren Optimierung des Teststandes wurden flache, beschichtete Testbleche in der Zelle verwendet. Hierdurch konnte mehr Erfahrung über das Langzeitverhalten von beschichteten Blechen gesammelt werden. Durch die Verwendung eines flachen Bleches wird kein Dichtungsmaterial benötigt, um den O-Ring auf der Probe abzudichten. Hierdurch kann der Grund für die in Abbildung 83 gezeigte Verfärbung auf der Probe weiter untersucht werden.

Bisher wurden diese Tests mit dem Standardelektrolyten von Precors GmbH durchgeführt. Dessen Zusammensetzung ist zusammen mit der Zusammensetzung des vom DOE empfohlenen Elektrolyten in Tabelle 12 zu sehen.

Tabelle 12: Zusammensetzung verschiedener Elektrolyte, die für die elektrochemische Untersuchung verwendet werden.

| Bezeichnung | F-Ionen | Cl-Ionen | pH-Wert (Schwefelsauer) |
|-----------------------|---------|----------|-------------------------|
| Precors GmbH Standard | 30 | 10 | 3 |
| DOE | 0,1 | | 3 |

Der Standard Elektrolyt von Precors GmbH ist erheblich schärfer als vom DOE für Auslagerungsersuche empfohlen. Es ist notwendig eine erhöhte Ionenkonzentration in dem Precors GmbH „Standard“-Elektrolyten zu verwenden, um in einer möglichst kurzen Auslagerungszeit von 30 h verlässliche Ergebnisse zu erzielen. Für die Untersuchung der Langzeitalterung ist ein Test unter verschärften Bedingungen allerdings nicht empfehlenswert. Aus diesem Grund wurde im Folgenden für die Untersuchung der Langzeitalterung der von DOE empfohlene Elektrolyt verwendet.

Es wurde ein beschichtetes Glattblech in die elektrochemische Zelle eingebaut und ein Langzeitversuch unter Verwendung des DOE Elektrolyten gestartet (Abbildung 85).

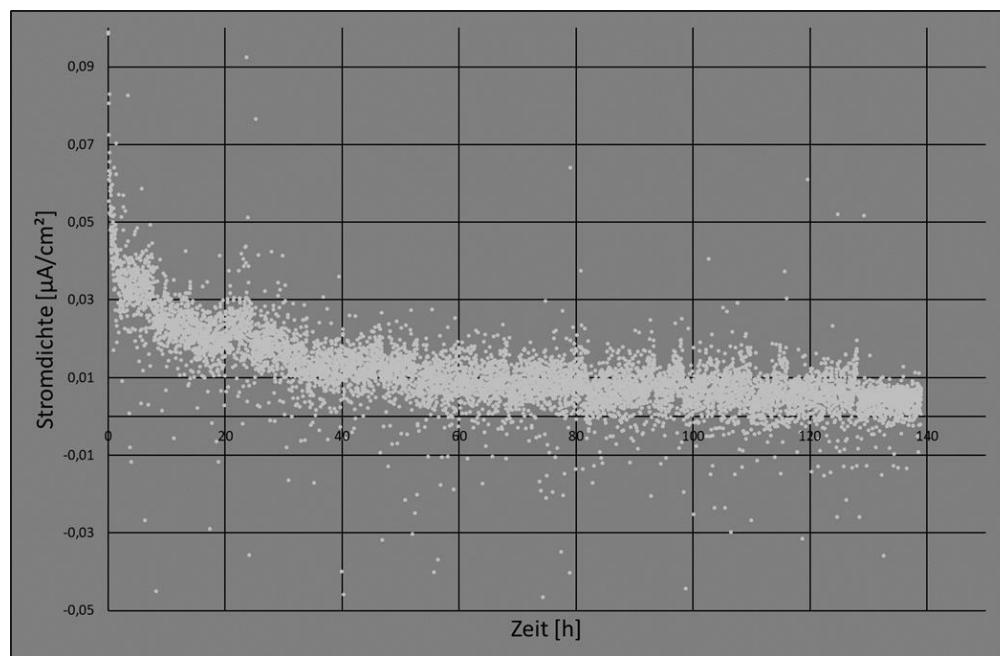


Abbildung 85: Langzeituntersuchung des Korrosionsstromes eines beschichteten Glattblechs in der 3-Elektroden-Messzelle mit dem DOE-Elektrolyten.

Der gemessene Korrosionsstrom der Probe beträgt weniger als 10 nA/cm². Die Vorgabe des DOE für die Verwendung von BPP in einem Brennstoffzellenstack ist ein Korrosionsstrom von maximal 1000 nA/cm². Die hier gemessene Probe liegt somit um den Faktor 100 unter den Vorgaben und erfüllt die notwendigen Kriterien für die Verwendung in einem Brennstoffzellenstack.

Für die Untersuchung der Langzeitalterung wurde eine Versuchsmatrix (Tabelle 13) gewählt, die es erlaubt neben der Beständigkeit der Schicht ebenfalls die Effekte der unterschiedlichen Elektrolyte und eine Veränderung des Potentials auf die Probe zu betrachten.

Tabelle 13: Versuchsmatrix für Langzeitauslagerungstest in der 3-Elektroden-Messzelle

| Elektrolyt | Versuchsdauer | Potential |
|------------|------------------------|--------------|
| Standard | 500 h: 1000 h: 1500 h: | 0.6 V: 0.9 V |
| DOE | 500 h: 1000 h: 1500 h: | 0.9 V |

Ein Potential von 0,9 V entspricht sehr anspruchsvollen Testbedingungen, die in Extremfällen im Brennstoffzellenstack vorkommen und 0,6 V entspricht den „Standard“ Betriebsbedingungen in einem Brennstoffzellen Stack.

In Abbildung 86 ist exemplarisch die Auslagerung der Probe im Standard Elektrolyten für 1000 h bei einem konstanten Potential von 0,9 V zu sehen:

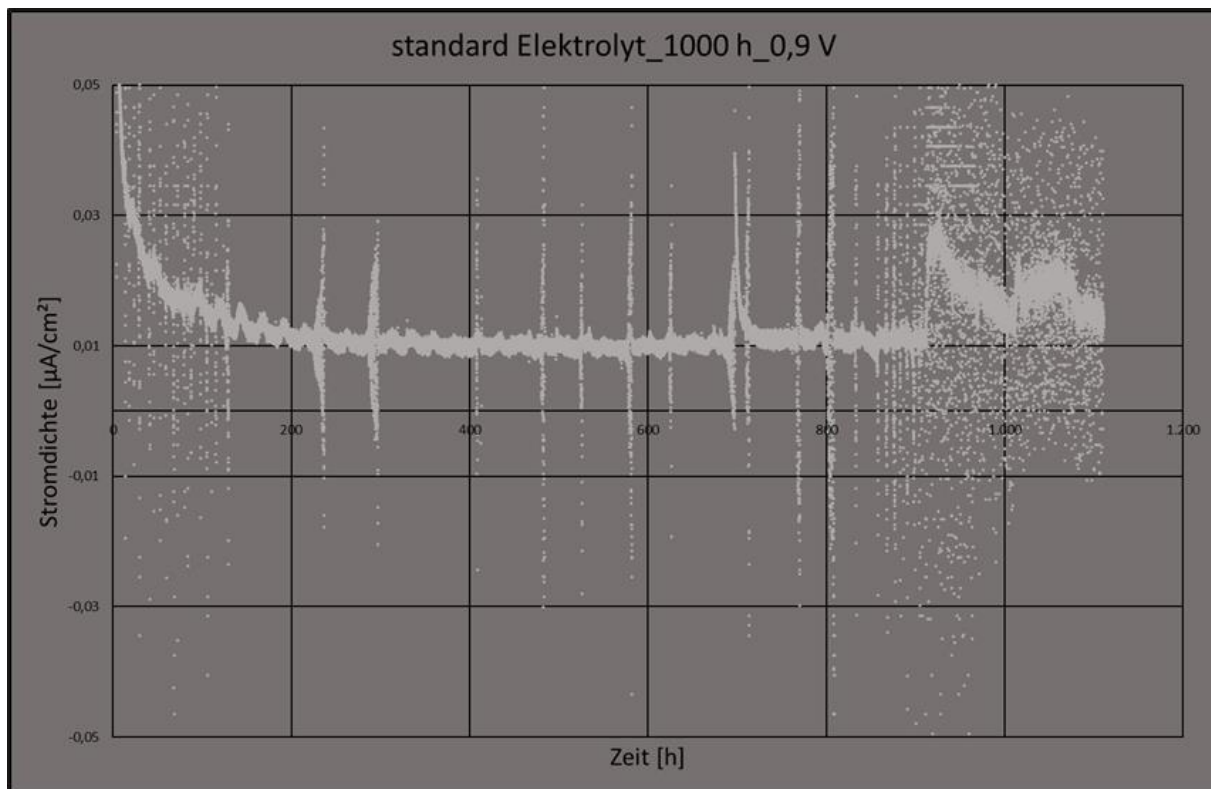


Abbildung 86: Auslagerung einer Probe im Standard Elektrolyten für 1000 h.

Die Messung zeigt einen stabilen Korrosionsstrom von unter 10 nA/cm² über die gesamte Versuchsdauer. Im Anschluss wurde diese Probe unter dem Lichtmikroskop untersucht, um eventuelle Defekte in der Beschichtung zu detektieren. Die postmortem Mikroskop Aufnahmen der Probe sind in Abbildung 87 zu sehen:

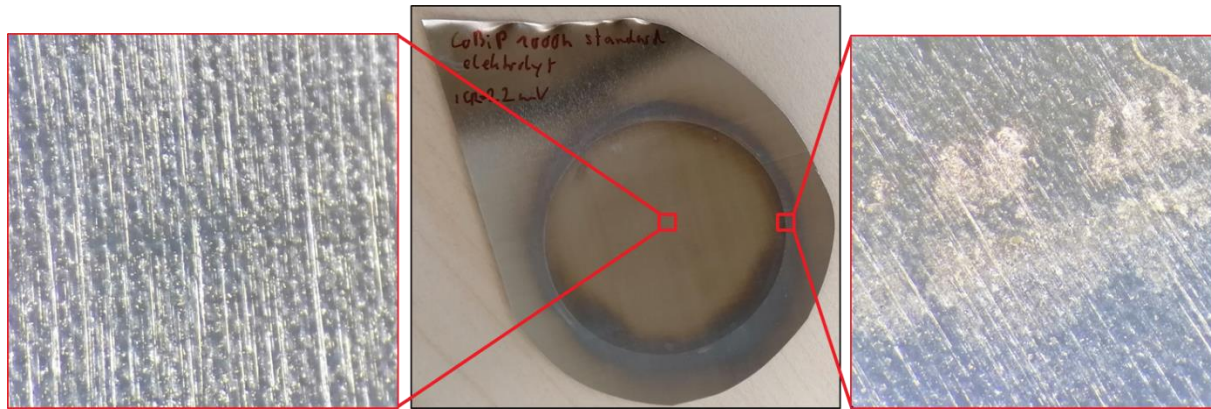


Abbildung 87: post mortem Untersuchung der 1000 h Standard Elektrolyt Probe im Auflichtmikroskop. Links: Untersuchung des zentralen Probenbereichs, rechts: Untersuchung der verfärbten Stelle im Dichtungsbereich.

Die Mikroskop Untersuchung des zentralen Bereiches zeigt keine Abplatzungen oder andere Defekte der Beschichtung auf mikroskopischer Skala, die auf eine mögliche Korrosion hinweisen. Die Mikroskop Untersuchungen des verfärbten Bereiches zeigt deutliche Ablagerungen auf der Probenoberfläche. Diese können sowohl aus dem Dichtungsmaterial als auch aus dem Elektrolyten stammen. Der Kontaktwiderstand beträgt nach der Auslagerung 13,82 m Ω cm².

Zum Vergleich ist in Abbildung 88 eine Probe zu sehen, die für 1000 h in dem vom DOE empfohlenen Elektrolyten ausgelagert wurde.

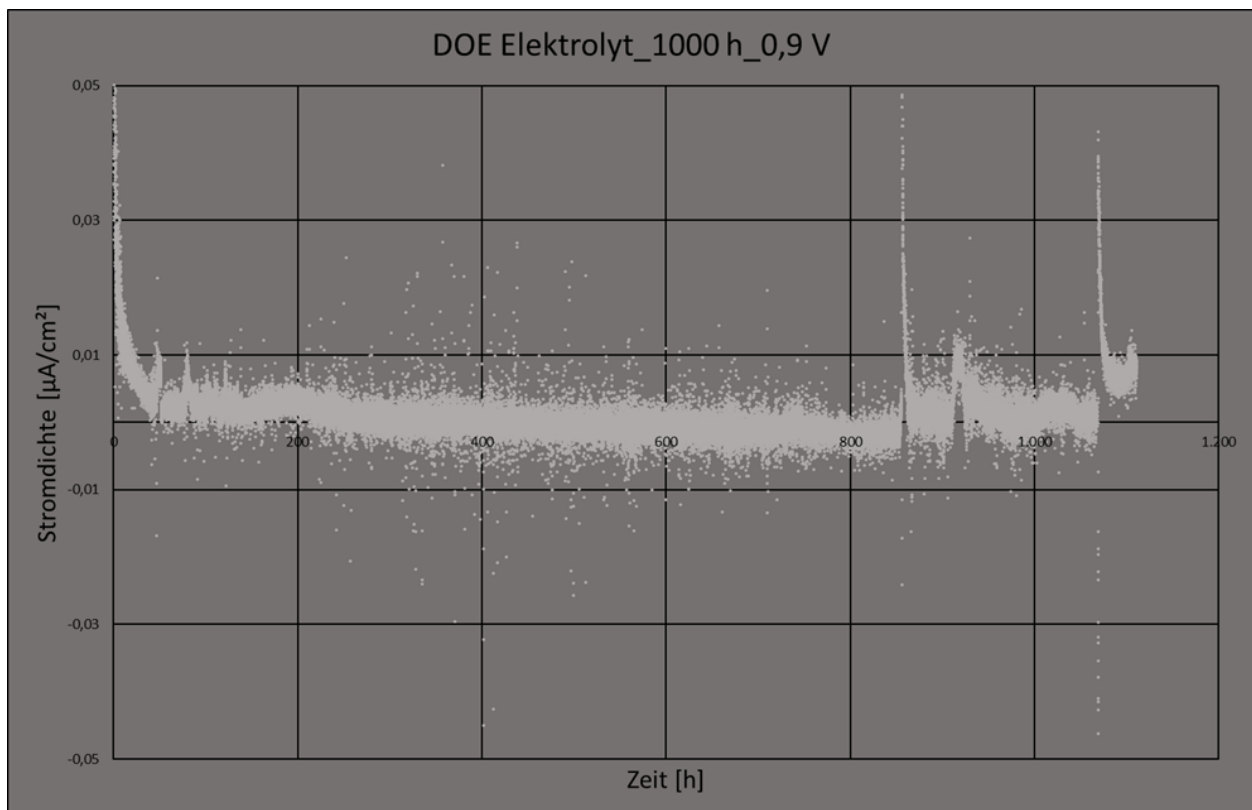


Abbildung 88: Auslagerung einer Probe im DOE Elektrolyten für 1000 h bei 0,9 V.

Der Korrosionsstrom dieser Probe liegt im Bereich um 0 nA/cm² und ist somit äußerst gering. Die Mikroskopische Untersuchung dieser Probe ist in Abbildung 89 dargestellt:

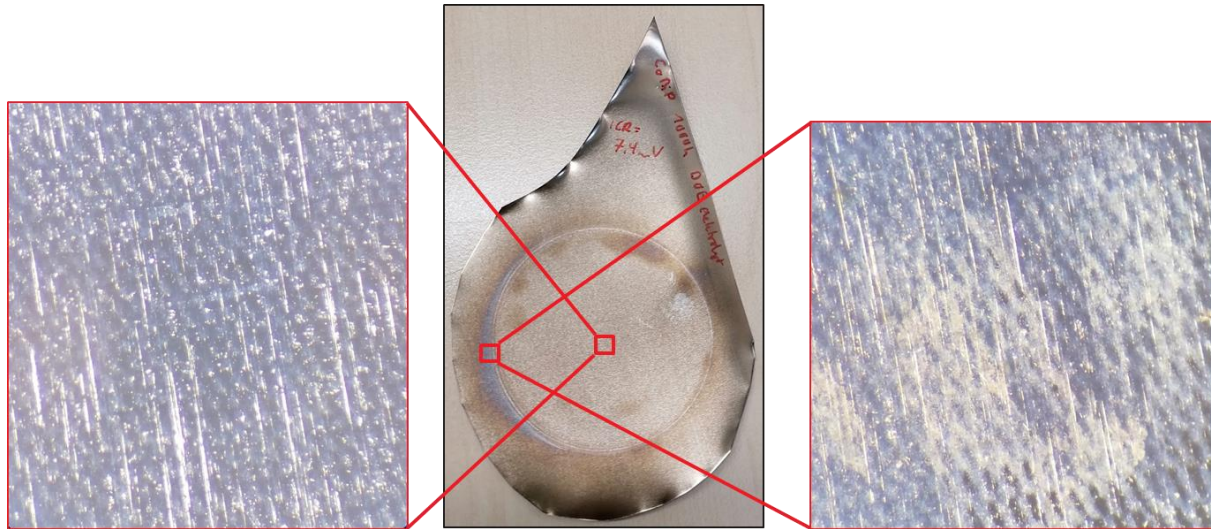


Abbildung 89: post mortem Untersuchung der 1000 h DOE Elektrolyt Probe im Auflichtmikroskop. Links: Untersuchung des zentralen Probenbereichs, rechts: Untersuchung der verfärbten Stelle im Dichtungsbereich.

Es ist deutlich erkennbar, dass bei dieser Probe die Ablagerung im Bereich der Dichtung erheblich geringer ausgeprägt ist als bei den Proben, die im Standard Elektrolyten ausgelagert wurden. Die Mikroskopische Untersuchung des zentralen Bereichs zeigt keine Defekte in der Beschichtung. Der Kontaktwiderstand der Probe beträgt 4,65 mΩcm².

Die Ergebnisse der durchgeführten Auslagerungsversuche sind in Tabelle 14 (0,9 V) und Tabelle 15 (0,6 V) dargestellt:

Tabelle 14: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den durchgeführten Langzeitauslagerungen bei 0,9 V

| Probe | Schäden | ICR [mΩcm ²] |
|----------------------------|---------|--------------------------|
| Standard Elektrolyt 500 h | Nein | 3,7 |
| Standard Elektrolyt 1000 h | Nein | 13,8 |
| Standard Elektrolyt 1500 h | Nein | 35,2 |
| DOE Elektrolyt 500 h | Nein | 1,5 |
| DOE Elektrolyt 1000 h | Nein | 4,7 |
| DOE Elektrolyt 1500 h | Nein | 6,1 |

Tabelle 15: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den durchgeführten Langzeitauslagerungen bei 0,6 V.

| Probe | Schäden | ICR [$\text{m}\Omega\text{cm}^2$] |
|----------------------------|---------|-------------------------------------|
| Standard Elektrolyt 500 h | Nein | 2,1 |
| Standard Elektrolyt 1000 h | Nein | 3,5 |
| Standard Elektrolyt 1500 h | Nein | 3,5 |

Der Kontaktwiderstand der Proben sowohl im Standard wie auch im DOE Elektrolyten nimmt mit der Zeit zu. Der Verlauf der Kontaktwiderstände der Proben im DOE und Standard Elektrolyten ist in Abbildung 90 gezeigt:

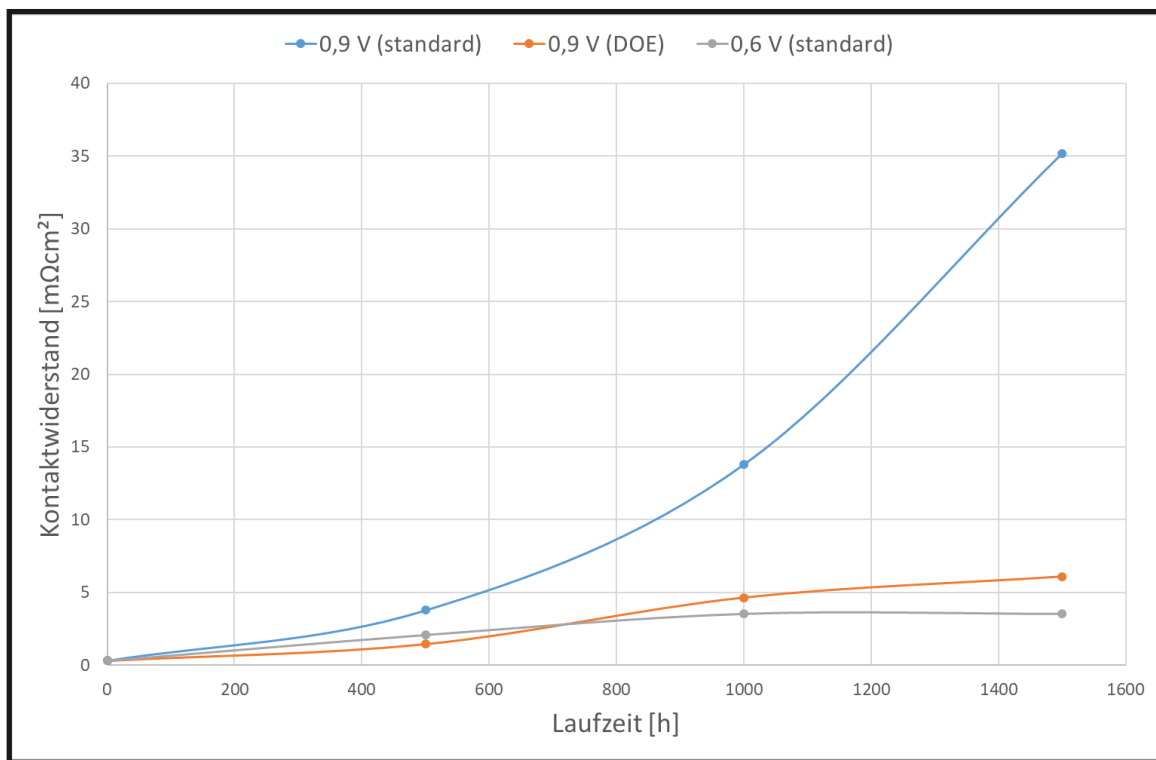


Abbildung 90: Vergleich der Auslagerungstests im DOE- und Standard Elektrolyten bei 0,9 V und 0,6 V.

Die blaue Kurve entspricht den Proben mit dem Standard Elektrolyten. Diese steigt kontinuierlich an und zeigt bis 1500 h ein exponentielles Verhalten. Die rote Kurve entspricht den Proben mit dem DOE Elektrolyten. Diese flacht hingegen nach 1500 h deutlich ab und zeigt ein Sättigungsverhalten. Die Zusammensetzung des Elektrolyten beeinflusst somit maßgeblich das Korrosionsverhalten der Proben. Die graue Kurve entspricht den Auslagerungsversuchen bei 0,6 V. Diese zeigt trotz der Verwendung des Standard Elektrolyten eine Abflachung. Die Kontaktwiderstände liegen unter den Werten der roten Kurve. Die Korrosion ist sowohl bei der roten als auch bei der grauen Kurve stark gehemmt.

Eine Verschärfung des Elektrolyten, oder eine Steigerung des Auslagerungspotentials bildet somit keine Möglichkeit eines beschleunigten Alterungstests.

AP4.5 Maßnahmen zur Qualitätssicherung im Fertigungsprozess durch Prozessbewertung [07/21-05/22]

Die für die Qualität der Beschichtung entscheidende Benetzbarkeit des verwendeten Substratmaterials hängt maßgeblich von der Kontamination der Oberfläche (Prozessmittel) ab. Diese wird mit Hilfe spezieller Testtinten untersucht. Diese Tinten besitzen genau kalibrierte Oberflächenspannungen. Durch das Auftragen der Tinten auf die Substratoberfläche kann die Oberflächenenergie und damit der Kontaminationsgrad des Substrates bestimmt werden (Abbildung 91).

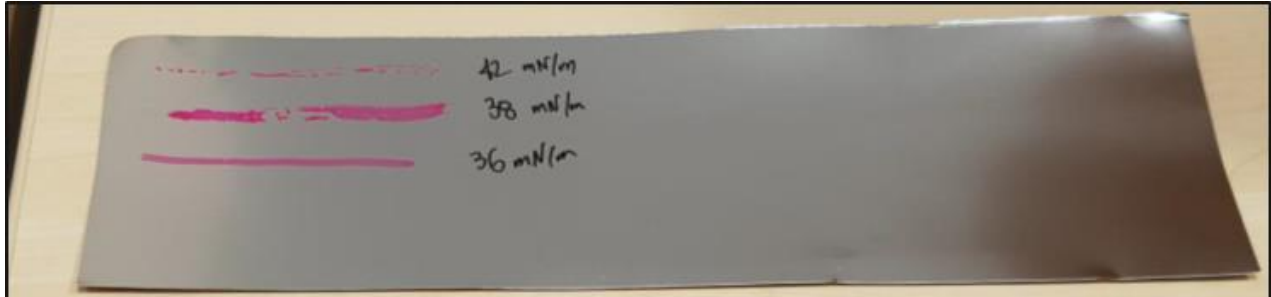


Abbildung 91: Untersuchung der Kontamination von Substratblechen mit der Hilfe von Testtinten.

Benetzt die Tinte das Blech, dann ist die Oberflächenenergie des Substrates höher als die Oberflächenspannung der Tinte. Bilden sich hingegen Tropfen auf der Substratoberfläche, so ist die Oberflächenenergie geringer als die Oberflächenspannung der Testtinte. Öle und Fette reduzieren die Oberflächenenergie und beeinflussen das Benetzungsverhalten der Substratoberfläche erheblich. Im Zuge der Versuche wurden Substratmaterialien von verschiedenen Herstellern vor und nach einem Waschprozess untersucht. Außerdem wurden sowohl Edelstahlsubstrate als auch Titansubstrate getestet. Zusätzlich zu diesen Untersuchungen wurden auch noch die Oberflächenenergien von Beschichteten Proben untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 16 zu sehen:

Tabelle 16: Untersuchung der Oberflächenenergie verschiedener Proben mittels Testtinten.

| Probe: | Vor dem Waschen | Nach dem Waschen | Beschichtet |
|--------------------|-----------------|------------------|-------------|
| Edelstahl gut | 36 mN/m | 48 mN/m | > 90 mN/m |
| Edelstahl schlecht | --- | --- | |
| Titan gut | 38 mN/m | 48 mN/m | > 90 mN/m |
| Titan schlecht | 26 mN/m | 38 mN/m | |
| PVD | --- | --- | < 64 mN/m |

In der Eingangskontrolle (vor dem Waschprozess) muss das Substratmaterial somit einen Wert von mind. 36-38 mN/m besitzen, um ein ausreichend gutes Beschichtungsergebnis zu erzielen. Diese Untersuchungen verbessern den Prozess der Wareneingangskontrolle erheblich und lassen eine Vorauswahl der Substratmaterialien anhand ihres Kontaminationsgrades zu.

Schließlich wurde ebenfalls die Oberflächenenergie, der von Precors GmbH beschichteten Proben und einer via PVD beschichteten Probe untersucht. Die Precors GmbH Beschichtung zeigt sowohl auf Edelstahl wie auch auf Titan eine sehr hohe Oberflächenenergie von über 90 mN/m auf. Dies führt zu einer sehr guten Benetzbarkeit dieser Proben und einem hydrophilen Charakter. Die Probe, die mittels PVD beschichtet wurde, zeigte mit 64 mN/m eine geringere Benetzbarkeit als die Precors GmbH Beschichtung.

Eine Möglichkeit die Beschichtung zu charakterisieren, ist die Durchführung elektrochemischer Korrosionstests in einer 3-Elektroden-Zelle. Der Wert des hierbei gemessenen Korrosionsstromes und der Kontaktwiderstand der Probe nach der Messung ermöglichen eine Bewertung der Beschichtungsgüte. Parallel zu diesen Tests können die Proben in verschiedenen Medien (Wasser, Elektrolyt) bei erhöhten Temperaturen ausgelagert werden, um die Beschichtung zu testen. Auch hier gibt der anschließend gemessene Kontaktwiderstand Aufschluss über die Qualität der Beschichtung.

Mit Hilfe dieser Testverfahren können selbst kleinste Defekte in der Beschichtung aufgespürt werden, allerdings wird die Probe dabei zerstört, wodurch nicht jedes Bauteil getestet werden kann. Ein weiterer Nachteil dieser Tests ist ihre lange Dauer von mehreren Tagen. Es ist also lediglich möglich Stichprobenartige Tests begleitend zu der Produktion durchzuführen. Im Zuge des Projektes wurde hierfür ein Testprotokoll entwickelt welches sich in Verbindung mit anderen Qualitätssichernden Maßnahmen als sinnvoll erwiesen hat:

- 1.) Untersuchung einer beschichteten Probe, bevor die Produktion startet zur Kontrolle der Beschichtungsparameter.
- 2.) Untersuchung einer Probe zu Beginn jeder Tagesproduktion, um den Produktionsbatch zu kontrollieren.

Es gibt zudem die Möglichkeit ein Spionblech mit in die Produktion einzuschleusen welches später anstelle der eigentlichen Bauteile getestet werden kann.

Die gewonnenen Messdaten werden in einer Datenbank gespeichert und zu jeder Einzelmessung wird ein Messprotokoll erstellt und abgelegt. Zudem wurden weitere Untersuchungsmethoden mit dem Ziel einer In-Line Bauteilkontrolle entwickelt. Hierzu wurde in der Produktionslinie ein Kamerasystem (Abbildung 92) integriert. Dieses wird über eine Lichtschranke gesteuert und ermöglicht es von jedem Bauteil ein Foto aufzunehmen.

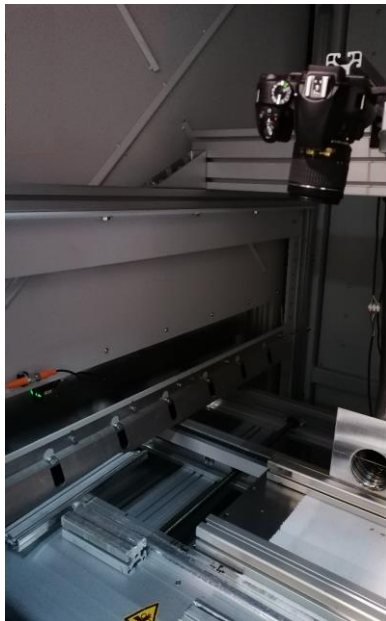


Abbildung 92: Integriertes Kamerasystem mit Lichtschranke zur visuellen Bauteilinspektion

Durch die Auswertung der Aufnahmen ist es möglich makroskopische Fehler im Beschichtungsprozess zu entdecken und die fehlerhaft beschichteten Bauteile auszusondern. In der ersten Iteration geschieht die Auswertung und anschließende Aussonderung noch händisch, kann zu einem späteren Zeitpunkt allerdings durchaus über eine Softwarelösung automatisiert werden.

Für die prozessbegleitende, kontinuierliche Messung des Kontaktwiderstandes jeder Probe wurde das automatische Messsystem aus AP 4.3 in die Beschichtungsanlage integriert (Abbildung 93).



Abbildung 93: Messanordnung zur kontinuierlichen Messung des Kontaktwiderstandes der beschichteten Bauteile

Somit muss der kontinuierliche Produktionsprozess für die Messung nicht unterbrochen werden. Die gemessenen Daten werden in einer Datenbank gespeichert.

AP4.6 Beschichtung von prototypisch gefertigten BPP [06/22-06/23]

Im Zuge der Vorbereitung auf die Beschichtung der im Projekt gefertigten BPP wurden Tests auf der Beschichtungsline mit ersten Testplatten durchgeführt. Hierbei wurde der Transport der Platten in der Linie angepasst und auf die BPP-Geometrie eingestellt. Außerdem wurden die kritischen Übergabestellen in der Beschichtungsline getestet, um einen reibungslosen Beschichtungsablauf zu gewährleisten. Es wurden keine kritischen, prozessbezogenen Problemstellen identifiziert.

Sämtliche, während der Projektlaufzeit zur Verfügung gestellten Bauteile, wurden von Precors GmbH beschichtet und durch die hier beschriebenen Testmethoden auf ihre Tauglichkeit für den Einsatz in einer Brennstoffzelle überprüft.

AP5: Aufbau der R2R-Prototypenanlage und Inbetriebnahme [Alle, IPT]; Laufzeit 12/20-06/23

Durch eine Zusammenführung der separat entwickelten und getesteten R2R-Module nach den Spezifikationen der am Fraunhofer IPT entwickelten modularen R2R-Module, wird die Fertigungsstrecke für das kontinuierliche Fertigen von BPP am Fraunhofer IPT aufgebaut. Zusätzlich wird ein gemeinsames Steuerungs- und Regelungskonzept entworfen und integriert, dass über Versuchsreihen im Prozess optimiert wird. Für die funktionalen Tests werden Prototypen im Konsortium gefertigt, die für Qualitätstests in einem Brennstoffzellenstand am Forschungszentrum Jülich genutzt werden.

Weiter wird eine gesamtheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Anlage sowie die Machbarkeitsbewertung hinsichtlich der Serienproduktion von BPP von der STACK durchgeführt, um langfristig die kontinuierliche Produktion von BPP sicherzustellen.

M4: Fertigung der Prototypenserie von BPP im Fraunhofer IPT [02/23]

Die R2R-Gesamtanlage wurde im Laufe der Projektlaufzeit für Teileexperimente genutzt. Die Problematik bezüglich der Ebenheit der Platten hatten starken Einfluss auf die Anpressung der Hälften für den Laserschweißprozess. Die Funktionalität des Lasermoduls wurden erfolgreich gezeigt. Insgesamt wurde im Konsortium eine Prototypenserie durchgeführt.

AP5.1 Bewertung der Wirtschaftlichkeit und Validierung [12/20-06/23]

Die Wirtschaftlichkeit einer Produktionstechnik bzw. die Darstellung von dessen Potenzial ist eine elementare Voraussetzung, um eine signifikante Marktdurchdringung zu erzielen. Aus diesem Grund entstand ein Bewertungsrahmen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die kontinuierliche R2R BPP-Fertigung. Ziel ist es eine wirtschaftliche Machbarkeitsbewertung hinsichtlich einer Serienproduktion von BPP zu kalkulieren. Hierzu wurde der Referenzproduktions-prozess zunächst in kostentechnisch geclusterte Einzelprozessschritte zerlegt. Als Grundlage für die Aufteilung in Einzelprozessschritte dienten die verschiedenen Anlagenabschnitte; s. Abbildung 94.

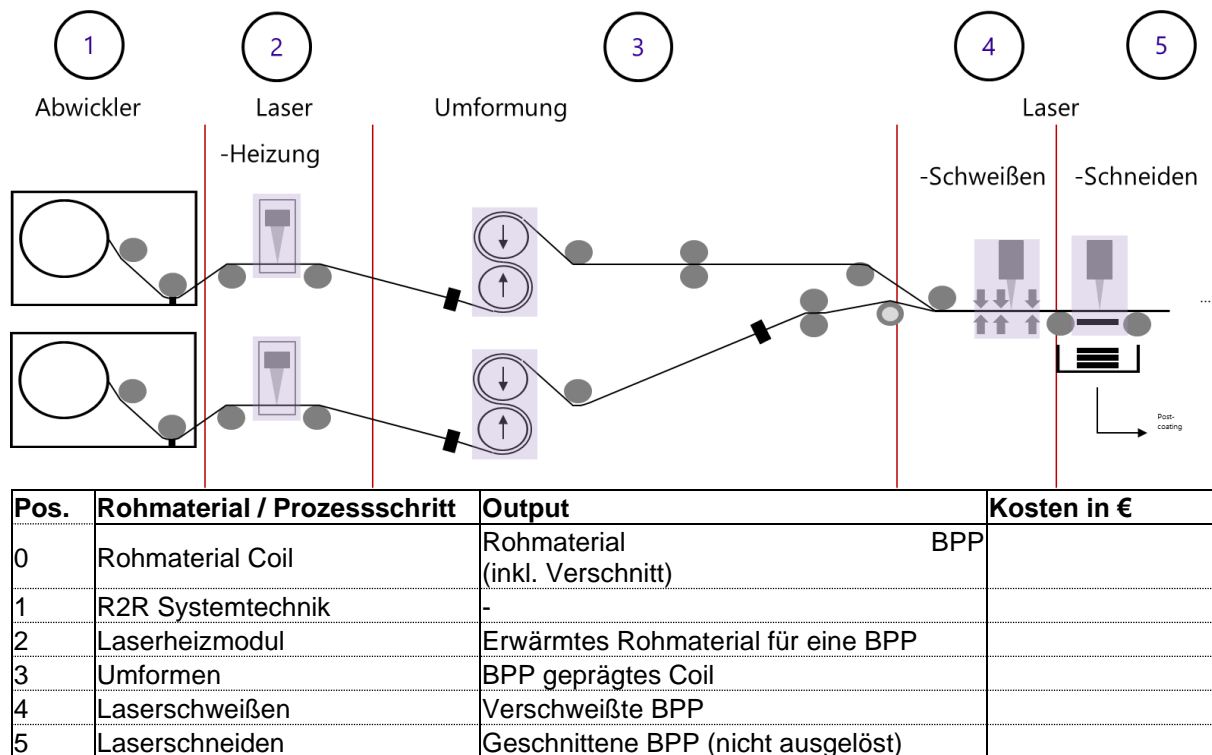


Abbildung 94: Prozesskette und zugehörige Outputs

Methodologie

Die Durchführung der monetären Bewertung in Orientierung an den Anlagenabschnitten bietet vor allem Vorteile hinsichtlich der Befüllung des Bewertungsrahmens mit Informationen zu Kosten, da sich die Kosteninformationen i. d. R. von Anlagenabschnitt zu Anlagenabschnitt unterschiedlich zusammensetzen. Ferner bietet die Vorgehensweise den Vorteil bei der späteren Wirtschaftlichkeitsanalyse sowie der Bewertung des Upscaling-Potenzials die „Kostenentstehung“ im Produktionsverlauf vom Rohmaterial bis zur fertigen BPP übersichtlich aufzuzeigen und etwaige wirtschaftlich kritische Anlagenbereiche zu identifizieren.

1. Investitionskosten - Maschinen u. Anlagen,
2. Investitionskosten - Werkzeuge,
3. Materialkosten,
4. Betriebskosten.

Initial beginnt das Tool mit einer Startseite für den Nutzer, die die wesentlichen prozessübergreifenden Größen zur Kostenberechnung aufnimmt, wie etwa Anzahl der Arbeitstage pro Jahr, Anzahl der Schichten oder Anzahl der Stunden pro Schicht. Ferner lässt sich anhand von Informationen aller beteiligten Projektpartner eine Spezifikation der erzielbaren Bahngeschwindigkeit festlegen, die Anlagenverfügbarkeit in Prozent abschätzen und die Länge der BPP inklusive Zuschnitt spezifizieren. Der Übersicht halber befindet sich eine Prinzipdarstellung der Anlage mit allen Modulen in prozesschronologischer Reihenfolge auf der gleichen Seite. Sie informiert über die absoluten und prozentualen Kosten pro BPP, die anteilig durch das jeweilige Modul verursacht werden. Ein sogenanntes Wasserfalldiagramm dient hierbei der besseren optischen Veranschaulichung der Kostenaufsummierung und deren Verhältnismäßigkeit; siehe Abbildung 95.



1. Gesamtprozess-Datenband
2. Investitionskosten unterteilt in Maschinen- und Anlagenkosten sowie Werkzeugkosten
3. Materialkosten
4. Betriebskosten

Basierend auf den Eingaben werden Ergebnisse zu den erwarteten Rüstzeiten sowie modulindividuellen Kosten pro Stunde sowie pro BPP ausgegeben.

Die Investitionskosten für Maschinen und Anlagen umfassen sowohl dokumentarische Informationen, wie etwa den Maschinentyp und eine dazugehörige Beschreibung, als auch technische und ökonomische Angaben. Hierbei lassen sich basierend auf den Investitionskosten in € und der zugehörigen Abschreibungsdauer sowie den Prozesszeiten wesentliche Kostengrößen berechnen. Zur Bewertung des Upscaling-Potenzials können Annahmen zur repräsentativen Berechnung getroffen werden, wie etwa durch die Festlegung der Kostensenkungspotenziale oder des zu erwarteten Ausschusses.

Investitionskosten von Werkzeugen unterliegen einer ähnlich gearteten Berechnungslogik, jedoch beeinflussen vor allem die Nutzungsdauer und der Umrüstaufwand die berechneten Standzeiten der Anlage. Da es sich um ein gekoppeltes Anlagenkonzept handelt, führt jeder Rüstaufwand zu Standzeiten. In Serienproduktionen werden überschneidende Rüstzeiten (sofern möglich) planerisch zusammengelegt, um Standzeiten zu reduzieren. Da nicht für alle Module und zugehörige Werkzeug-komponenten hinreichend statistisch gesicherte Erfahrungswerte für den Prozess sowie Material-wechselwirkungen vorliegen, werden im Rahmen des Projekts alle auftretenden Rüstzeiten als separate Produktionsunterbrechungen kalkuliert.

Materialkosten beziehen sich auf Rohmaterialien, wie etwa das Coil-Material der BPP, und erforderliche Zukaufteile. Für die BPP sind keine Inserts oder vergleichbare Montage-komponenten vorgesehen, sodass die Materialkosten nur das Rohmaterial für die Fertigungslinie um-fassen.

Kontinuierliche Betriebskosten erfassen die wesentlichen Personal-, Energie- und Gebäudekosten sowie den monetären Aufwand für Hilfs- und Betriebsstoffe. Insbesondere durch den Einsatz von Schutzgas bei unterschiedlichen Laserprozessen sowie den kontinuierlich steigenden Energiepreisen am Standort Deutschland wird somit maßgeblich nachgegangen. Für die Personalkosten wurde die Abschätzung getroffen, dass 1 Mitarbeiter die hochautomatisierte Fertigungsanlage pro Schicht zu bedienen vermag. Dies umfasst einem Verantwortungsgrad die Anlage mehrheitlich selbstständig zu Rüsten und kleinere Reparaturen durchzuführen. Um in einem 3 Schichtsystem bei 260 Arbeitstagen pro Jahr ohne Produktionsausfälle zu arbeiten, wurden in Summe 5 Mitarbeiter mit einem initialen Mitarbeiterbruttogehalt (inkl. Arbeitgeberanteil) von 50.000 € für die Linie kalkuliert. Die grundlegende Anlagenverfügbarkeit erhielt eine Abschätzung von 80 %. Die Gebäudekosten wurden mit 8 €/m² für eine ländliche Werkhalle kalkuliert. Dieser Wert kann je nach Standort erheblich schwanken.

Tests an der gegenwärtige Laboranlage und zugehörigen Equipment gestatten eine erste Analyse zu den Prozessgeschwindigkeiten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wärmeübertragungsprozesse die Limitation der Anlage bilden. Hierbei ist vor allem der dosierte Wärmeeintrag im herausfordernden Schweißprozess das „Bottleneck“; s. Tabelle 17.

Tabelle 17: Prozessgeschwindigkeitsanalyse der einzelnen Module

| Module | Anlagen v_{\max} | |
|----------------|--------------------|-----------|
| Abwickler | 1,2 s/BiP | 33,3 cm/s |
| Laserheizung | 1,2 s/BiP | 33,3 cm/s |
| Kalanderwalze | 0,6 s/BiP | 66,7 cm/s |
| Laserschweißen | 4,6 s/BiP | 8,7 cm/s |
| Laserschneiden | 3 s/BiP | 13,3 cm/s |

Die Begrenzung der Fertigungsgeschwindigkeit ist weniger auf die Laserleistung selbst als auf die Restriktionen der Aktorik der Laserpunkte zurückzuführen. Sobald sich diese signifikant erhöhen lässt, ohne Einbußen in Anlagenpräzisionsattributen hervorzurufen oder eine erhebliche Zunahme der Rüstkosten und -zeiten zu verursachen, werden signifikant höhere Prozessgeschwindigkeiten erzielbar. Für die Laboranlage wurde zur Sicherheit eine maximale Geschwindigkeit von 8,7 cm/s angenommen. In Abhängigkeit der Prozessgeschwindigkeit und den erforderliche Leistungsspektren der Laser lassen sich Abschätzungen zum Rüstaufwand treffen.

Tabelle 18: Jährlicher Rüstaufwand pro Modul

| Module | Rüstaufwand | |
|----------------|--------------------|-------|
| Abwickler | 1.970 | min/a |
| Laserheizung | 60 | min/a |
| Kalanderwalze | 20 | min/a |
| Laserschweißen | 60 | min/a |
| Laserschneiden | 180 | min/a |

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der CoBiP-Anlage

Um sowohl den Status quo der Anlage als auch die perspektive aufzuzeigen wurden mehrere Szenarien berechnet. Der Status quo zeigt dabei die Kostenstruktur mit den Kapazitäten einer kontinuierlichen Laboranlage auf. Da eine Vielzahl an Parametern sich entlang der verknüpften Fertigungskette verändern lassen, wurde ausgewählte Szenarien anhand der ökonomisch und technisch dominantesten Attribute zusammengestellt; s. Tabelle 19.

Tabelle 19: Übersicht ausgewählter Szenarien mit den einflussreichsten Attributen

| Einflussgröße | Einheit | Szenario 1 | Szenario 2 | Szenario 3 |
|---|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Kosten-Coil-Material | € | 8800 | 5000 | 3000 |
| Einspannlänge | m | 30 | 20 | 10 |
| Bahngeschwindigkeit | cm/s | 8,3 | 10 | 15 |
| Personalkosten (5 Werker, 3 Schicht) | €/a | 50.000 | 45.000 | 35.000 |
| Walzennutzungsdauer | Jahre | 0,5 | 1 | 1,5 |
| Gesamtanlagen-Investment | Mio. € | 1,98 | 1,68 | 1,55 |
| Abschreibungsdauer | Jahre | 6 | 7 | 8 |
| Energiekosten | €/kWh | 0,28 | 0,2 | 0,10 |
| Arbeitstage | Tage/a | 260 | 300 | 360 |
| Anlagenverfügbarkeit | % | 80 | 85 | 90 |

Szenario 1 repräsentiert das gegebene ökonomische und technologische Potenzial, das sich mit der Laboranlage erzielen lässt. Es steht damit repräsentativ für einen manufakturhaften Betrieb. Das 2. Szenario bewertet eine Weiterentwicklung zu einer serienreifen Anlage und reduzierten Betriebskosten sowie potenziell geringeren Einkaufskosten für Investitionsgüter sowie Verbrauchsmaterial. Beim 3. Szenario handelt es sich um eine optimistische Bewertung für eines hinreichend vom Serienstand aus Szenario 2 weiterentwickelten Linie sowie weiter vergünstigten Randbedingungen. Anhand der Szenarien und zugeordneten Faktoren wird deutlich, dass das CoBiP-Anlagesystem sowie darin gefertigten BPP sowohl durch entwicklungsinterne als auch entwicklungsexterne Faktoren signifikant kostentechnisch beeinflusst werden. Die ausgewählten Szenarien betrachten sich allfassend begünstigende Faktoren, um die damit verbundene Tendenz zu verdeutlichen und das Anlagenpotenzial hervorzuheben. Die Kostenverteilungen der CoBiP-Anlage sind in ausgewählten Szenarien in Tabelle 20 gegenübergestellt. Aufgrund der ausgeprägten Dominanz eines spezifischen Kostenfaktors wird neben den absoluten Herstellungskostenverteilung pro BPP, ergänzend noch die prozentuale Prozesskostenverteilung aufgeführt.

Tabelle 20: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der CoBiP-Anlage

| Szenario 1: Manufakturserie | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---------|------------|----------------|--------|----------------|-------|----------|--------|----------------|-------|-------------------|-------|
| Herstellungskosten pro BPP: 7,38 € | Prozentuale Prozesskostenverteilung | | | | | | | | | | | | |
| <p>Waterfall chart showing the cumulative cost breakdown for Scenario 1. The base cost is 7,00 €. The components and their costs are: Rohmaterial Coil (€7,07), R2R Systemtechnik (€0,03), Laserheizmodul (€0,02), Umformen (€0,09), Laserschweißen (€0,03), and Laserschneiden (€0,14). The total cost is 7,38 €.</p> | <p>Horizontal bar chart showing the percentage distribution of process costs for Scenario 1. The data is as follows:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Prozess</th> <th>Anteil (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Laserschneiden</td> <td>44,71%</td> </tr> <tr> <td>Laserschweißen</td> <td>8,35%</td> </tr> <tr> <td>Umformen</td> <td>29,40%</td> </tr> <tr> <td>Laserheizmodul</td> <td>7,79%</td> </tr> <tr> <td>R2R Systemtechnik</td> <td>9,74%</td> </tr> </tbody> </table> | Prozess | Anteil (%) | Laserschneiden | 44,71% | Laserschweißen | 8,35% | Umformen | 29,40% | Laserheizmodul | 7,79% | R2R Systemtechnik | 9,74% |
| Prozess | Anteil (%) | | | | | | | | | | | | |
| Laserschneiden | 44,71% | | | | | | | | | | | | |
| Laserschweißen | 8,35% | | | | | | | | | | | | |
| Umformen | 29,40% | | | | | | | | | | | | |
| Laserheizmodul | 7,79% | | | | | | | | | | | | |
| R2R Systemtechnik | 9,74% | | | | | | | | | | | | |
| Max. Produktion/a: 3.3 Mio. Stück | | | | | | | | | | | | | |
| Szenario 2: Großserie | | | | | | | | | | | | | |
| Herstellungskosten pro BPP: 4,19 € | Prozentuale Prozesskostenverteilung | | | | | | | | | | | | |
| <p>Waterfall chart showing the cumulative cost breakdown for Scenario 2. The base cost is 3,50 €. The components and their costs are: Rohmaterial Coil (€4,00), R2R Systemtechnik (€0,02), Laserheizmodul (€0,01), Umformen (€0,05), Laserschweißen (€0,01), and Laserschneiden (€0,09). The total cost is 4,19 €.</p> | <p>Horizontal bar chart showing the percentage distribution of process costs for Scenario 2. The data is as follows:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Prozess</th> <th>Anteil (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Laserschneiden</td> <td>46,68%</td> </tr> <tr> <td>Laserschweißen</td> <td>7,96%</td> </tr> <tr> <td>Umformen</td> <td>29,23%</td> </tr> <tr> <td>Laserheizmodul</td> <td>7,48%</td> </tr> <tr> <td>R2R Systemtechnik</td> <td>8,65%</td> </tr> </tbody> </table> | Prozess | Anteil (%) | Laserschneiden | 46,68% | Laserschweißen | 7,96% | Umformen | 29,23% | Laserheizmodul | 7,48% | R2R Systemtechnik | 8,65% |
| Prozess | Anteil (%) | | | | | | | | | | | | |
| Laserschneiden | 46,68% | | | | | | | | | | | | |
| Laserschweißen | 7,96% | | | | | | | | | | | | |
| Umformen | 29,23% | | | | | | | | | | | | |
| Laserheizmodul | 7,48% | | | | | | | | | | | | |
| R2R Systemtechnik | 8,65% | | | | | | | | | | | | |
| Max. Produktion/a: 4.8 Mio. Stück | | | | | | | | | | | | | |
| Szenario 3: Großserie 2.0 | | | | | | | | | | | | | |
| Herstellungskosten pro BPP: 2,48 € | Prozentuale Prozesskostenverteilung | | | | | | | | | | | | |
| <p>Waterfall chart showing the cumulative cost breakdown for Scenario 3. The base cost is 2,00 €. The components and their costs are: Rohmaterial Coil (€2,40), R2R Systemtechnik (€0,01), Laserheizmodul (€0,01), Umformen (€0,02), Laserschweißen (€0,01), and Laserschneiden (€0,04). The total cost is 2,48 €.</p> | <p>Horizontal bar chart showing the percentage distribution of process costs for Scenario 3. The data is as follows:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Prozess</th> <th>Anteil (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Laserschneiden</td> <td>49,57%</td> </tr> <tr> <td>Laserschweißen</td> <td>7,01%</td> </tr> <tr> <td>Umformen</td> <td>29,52%</td> </tr> <tr> <td>Laserheizmodul</td> <td>6,31%</td> </tr> <tr> <td>R2R Systemtechnik</td> <td>7,59%</td> </tr> </tbody> </table> | Prozess | Anteil (%) | Laserschneiden | 49,57% | Laserschweißen | 7,01% | Umformen | 29,52% | Laserheizmodul | 6,31% | R2R Systemtechnik | 7,59% |
| Prozess | Anteil (%) | | | | | | | | | | | | |
| Laserschneiden | 49,57% | | | | | | | | | | | | |
| Laserschweißen | 7,01% | | | | | | | | | | | | |
| Umformen | 29,52% | | | | | | | | | | | | |
| Laserheizmodul | 6,31% | | | | | | | | | | | | |
| R2R Systemtechnik | 7,59% | | | | | | | | | | | | |
| Max. Produktion/a: 9.7 Mio. Stück | | | | | | | | | | | | | |

Die Szenarien-Ergebnisse der Kostenkalkulation zeigen auf, dass enorme Produktionspotenziale dem Anlagensystem innewohnen. Bereits das Laboranlagensystem könnte im vollumfänglichen Ausbau- und Betriebsstadium bis zu 3,3 mio. BPP pro Jahr herstellen. Bei einem exemplarischen Stack mit 300 Zellen entspräche dies einer Lieferkapazität von über 10.000 Stacks pro Jahr. Für die Ausbaustufen in der Szenarien 2 und 3 entspräche diese sogar 16.000 bzw. 32.300 Stacks pro Jahr. Folglich lassen sich rein kapazitiv bereits mit wenigen Fertigungslinien mögliche Großserienbedarfe im Bereich der Light und Heavy Duty Anwendungen abdecken.

Die Kostenanalyse in Tabelle 20 zeigt zunächst auf, dass das Anlagenkonzept enorme Produktions- und Kostenpotenziale besitzt. Die Prozesskosten im 1. Szenario betragen lediglich 0,31 €/BiP und haben an den Gesamtkosten pro BPP einen äußerst geringen Anteil von lediglich 4,25 %. Dies lässt sich mit einer Weiterentwicklung zu Großserienstandards und -abläufen voraussichtlich auf 0,18 €/BiP senken und besitzt die Entwicklungsperspektive bis zu 0,09 €/BiP zu erreichen. Dagegen entsteht die Majorität der Herstellungskosten durch die Halbzeugkosten des Coils. Mit über 7 €/BiP lassen sich die Ziele des Departments of Energy (DOE) von 3 \$/kW für 2020 bzw. 2 \$/kW für 2025, unabhängig von der Produktionstechnik, nicht realisieren. Konkurrierende Technologien, wie etwa Stamping oder Hydroforming sind durch aus in der Lage ähnliche Preise zu erzielen. In den Szenarien 2 und 3 erfolgt eine sukzessive Annäherung an die Zielvorgaben. Da die Hauptkostenursache mit über 90 % auch im 3. Szenario beim Coil-Material verortet ist, lässt sich daraus schlussfolgern, dass für die Versorgung zukünftiger Märkte eine signifikante Senkung der Halbzeugkosten erzielt werden muss. Anderweitig entstehen große Hürden, um im nationalen und internationalen Marktumfeld konkurrenzfähig gegenüber anderen Produktionsstandorten für BPP sowie flankierenden Systemtechnologien zur Brennstoffzelle zu sein.

Der Vergleich der CoBiP-Anlagenmodule in den einzelnen Szenarien zeigt auf, dass die investitionsintensivsten Teilmodule auch die größten Prozesskostenanteile prozentual pro BPP verursachen. Ferner gestalten sich, je nach Stufung der Energiekosten, die Anteile der energieintensiven Lasermodule. Andererseits entstehen auch verborgene Kosten, beispielsweise durch signifikante Anlagenstandzeiten im R2R-Modul mit zunehmender Prozessgeschwindigkeit, infolge der beständigen Coil-Wechsel. An dieser Stelle müssen Weiterentwicklungen zum automatisierten Coil-Wechsel und größeren Coil-Längen stattfinden. Als Ergebnis der Szenarien-Analyse lassen sich die drei dominantesten Kosten-Einflussgrößen evaluieren:

1. Coil-Materialkosten,
2. Coil-Einspannlänge,
3. Investitionskosten.

Die Coil-Einspannlänge ist sogar noch prekärer als die Investitionskosten einzuordnen, unter der Annahme, dass das Material zur Einspannung nicht zur Produktion von BPP genutzt werden kann. Insbesondere bei steigendem Materialdurchsatz der Anlage wächst die Menge an nicht nutzbaren Coil-Restmaterial. Daher sind technische Iterationen zur effizienteren Einspannung des Coil-Material nach einem Coil-Wechsel unabdingbar.

Darüber hinaus erfordert es intensive Weiterentwicklungen im Bereich der Laserschweiß-Prozesse, um sowohl die Prozessgeschwindigkeit zu steigern als auch die Prozessqualität konstant zu verbessern. Aufgrund des Reifegrads der Anlagen lassen sich die qualitätssichernden Maßnahmen und der Grad an Ausschuss noch nicht bewerten und gegenüber anderen Fertigungstechnologien einstufen.

AP5.2 Aufbau und Integration aller Module zu einer R2R-Prototypenmaschine im Fraunhofer IPT [12/20-03/23]

Das Arbeitspaket 5 umfasst den Aufbau und die Inbetriebnahme einer R2R-Prototypenanlage. Die R2R-Prototypenanlage setzt sich aus den folgenden Teilmodulen zusammen:

- Abwickler mit Lasererwärmungsmodul
- Umformmodul (Kalendersystem mit Prägewalzen)
- Kombiniertes Laserschweiß- und schneidmodul
- Aufwickler

Die Zusammenführung dieser Teilmodule zu einer Gesamtanlage erfordert eine detaillierte Ausarbeitung der Anforderungen, welche aus den Einzelprozessen entstehen. Der Zeitplan des CoBiP-Projektvorhabens definiert den Beginn des AP5 im Anschluss an der Erreichung des Meilenstein 1 im November 2020. Aufgrund der Komplexität der Anlage wurde bereits während der Spezifikationsphase der BPP und der Entwicklung der einzelnen Prozesse ein Lastenheft in Form einer Anforderungsliste erstellt und kontinuierlich erweitert. Diese Tätigkeiten lagen im Bereich des AP1.1 und AP1.2 und dienten der Vorbereitung des AP5. Das Fraunhofer IPT hat dazu einen R2R-Fragenkatalog erstellt, welcher eine umfangreiche Basis an relevanten Fragestellungen bezüglich möglicher Anforderungen enthält und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt wurde. Ein Auszug der Anforderungen an die CoBiP-Gesamtmaschine ist in Tabelle 21 gelistet. Ein wichtiger Punkt in der Erstellung des Maschinenkonzepts ist die Definition der benötigten Bahnspannungen. Die Umformsimulation (siehe AP 1.5) hat ergeben, dass eine hohe Bahnspannung einen positiven Effekt auf die Umformung hat. Gleichzeitig ist für die folgenden Laserprozesse eine niedrigere Bahnspannung sinnvoll, um die äußeren Spannungen beim Laserschweißen gering zu halten. Daher ist es notwendig diese unterschiedlichen Bahnbereiche zu trennen.

Tabelle 21: Hauptanforderungen der CoBiP-Gesamtmaschine

| F/W | Anforderung | Wert | Einheit |
|------------|---------------------------|----------------|----------------|
| F | Bahnspannung Umformung | < 130 | MPa |
| F | Bahnspannung Laserprozess | < 45 | MPa |
| F | Bahngeschwindigkeit | < 3,6 | m/min |
| F | Material Warenbahn | Edelstahlfolie | - |
| F | Bahnbreite | 230 | mm |
| F | Bahndicke | Bis 0,1 | mm |

Die R2R-Prototypenmaschine bestehend aus den Einzelmodulen wird mit dem Ziel aufgebaut den verketteten Prozess der kontinuierlichen Herstellung von Bipolarplatten in einer realen Produktionsumgebung abzubilden. Die definierten Anforderungen sind die Basis der Gestaltung und Auslegung der Einzelmaschinenkomponenten sowie des Gesamtmaschinenkonzeptes. Weiterhin wird ein hoher Automatisierungsgrad der Maschine angestrebt, um eine größtmögliche Produktionskapazität bei gleichbleibend hoher Produktqualität zu erreichen. Somit wird das Ziel der Kostenreduktion bei gleichzeitig hohen Stückzahlen für die Herstellung von Bipolarplatten adressiert.

Die am Fraunhofer IPT umgesetzte Konstruktion der CoBiP Gesamtmaschine mit in Rot gekennzeichnetem Bahnverlauf ist in Abbildung 96 zu erkennen. Die R2R-Maschine wurde in einer Modulbauweise aufgebaut, welche eine flexible Anordnung und Verkettung der Einzelmodule erlauben. Aufgrund der hohen erforderlichen Bahnspannungen in dem Umformungsprozess, wurden die Rahmen mit einer zusätzlichen Verstärkung ausgeführt.

Das Abwicklermodul bildet den Startpunkt der Produktionskette. Hier können zwei Edelstahlcoils auf Spanndornen mit einem Innendurchmesser von 400 mm aufgenommen werden. Elektrische Motoren in Verbindung mit Getrieben treiben die Spanndorne an und gewährleisten einen kontinuierlichen Abwicklungsprozess. Die beiden Warenbahnen durchlaufen eine Reihe verschiedener Prozessschritte. Nach der Abwicklung der Bahnen wird die Bahnspannung mittels einer Kraftmesswalze gemessen. Danach folgt für die obere Warenbahn die Bestimmung der Bahnposition mittels Bahnkantensensoren, die Gefüge- oder Temperaturänderung im Lasererwärmungsmodul und anschließend die Umformung im Umformmodul. Im Lasermodul wird die Folie durch eine Klemmstelle geführt, die Bahnposition über Bahnkantensensoren und einem Kamerasystem gemessen und anschließend mit der unteren Warenbahn zusammengeführt. Die laterale Ausrichtung der unteren zur oberen Warenbahn erfolgt durch einen Kantiroller am Eingang des Lasermoduls. Anschließend durchläuft auch diese Warenbahn eine Klemmstelle, bevor es zur Zusammenführung der beiden Bahnen kommt.

Im nächsten Schritt folgen die Laserbearbeitungsschritte. Hierbei werden die Halbschalen präzise mittels eines Laserscanners verschweißt und über Laserschneidköpfe zugeschnitten, um die gewünschten Bipolarplatten zu erhalten. Im letzten Schritt wird das übrige Material auf angetriebenen Spanndornen im Aufwicklermodul aufgewickelt. Während des gesamten Prozesses gewährleisten die verschiedenen Sensoren wie die Überwachung und Regelung der Bahnspannung sowie die Positionierung der Warenbahnen eine hohe Präzision und Konsistenz der hergestellten Bipolarplatten.

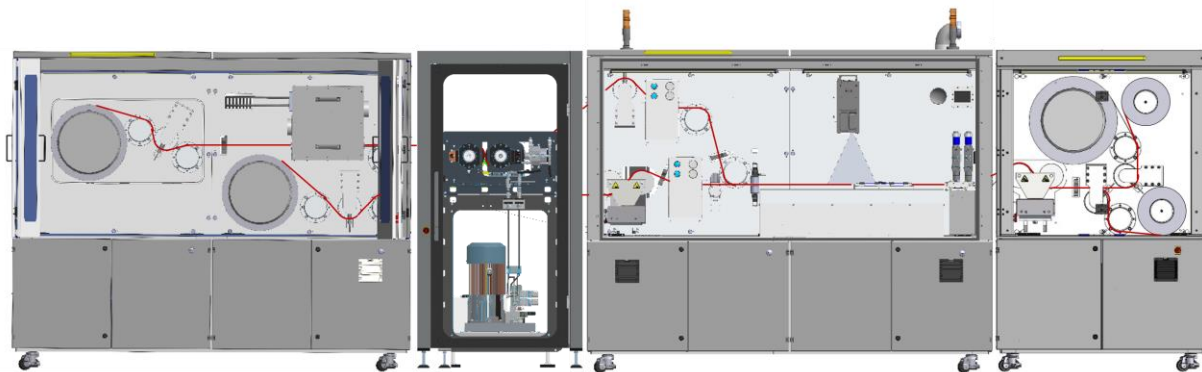


Abbildung 96: CAD der CoBiP R2R-Gesamtmaschine

Für den Aufbau eines stabilen, kontinuierlichen Prozesses sind Bahnregelungen nötig. Diese werden hauptsächlich in die laterale Positionsregelung und die Bahnspannungsregelung eingeteilt und im Folgenden genauer beschrieben.

Bezogen auf die laterale Positionsregelung ist es zunächst entscheidend einen gleichmäßigen Einlauf der Warenbahn in die Kalandereinheit zu gewährleisten. Hierfür wird eine Verstellung der Abwickleinheit inklusive der Messeinrichtung über einen Linearantrieb gewählt. Die Messung der Bahnposition wird dann mit einem Bahnkantensensor realisiert. Eine weitere laterale Bahnregelung ist für die Positionierung der unteren zur oberen Warenbahn nötig. Hierzu wurde ein Drehrahmensystem beschafft und in die Maschine integriert, welches die Bahn mit einer Dreh-Schwenkbewegung lateral bewegen kann. Über Bahnkantensensoren an der unteren und oberen Bahn kann die Differenz der Bahnposition über einen größeren Messbereich erfasst werden und über das Drehrahmensystem ausgeregelt werden. Zur Erhöhung der Ausrichtgenauigkeit der beiden Warenbahnen wurden zudem Kamerasysteme beschafft, welche mit hoher Präzision in die Bahn eingeprägte Strukturen mittels Bildverarbeitungsalgorithmen erkennen und somit deutlich genauer Bahnausrichtfehler bestimmen können.

Die Bahnspannung wird über die Ab- und Aufwickler sowie die Klemmstellen aufgebaut. Die aktuelle Bahnkraft wird in den einzelnen Bahnabschnitten (Abwickler – Kalandersystem – Klemmstelle – Aufwickler) über Kraftmessdosen zweiseitig erfasst. Vor und hinter dem Kalandersystem kann hierbei eine Bahnspannung bis 3 kN erzeugt werden, während bei den Laserprozessen die Spannung bis 1 kN geregelt werden kann. Die Kraftdifferenz kann über die Klemmstelleneinheit aufgenommen werden. Die Bahnspannungsregelung wurde in die Steuerung implementiert und regelt über einen PID-Regler den entsprechenden Antrieb auf die eingestellte Sollbahnspannung.

Abwicklermodul

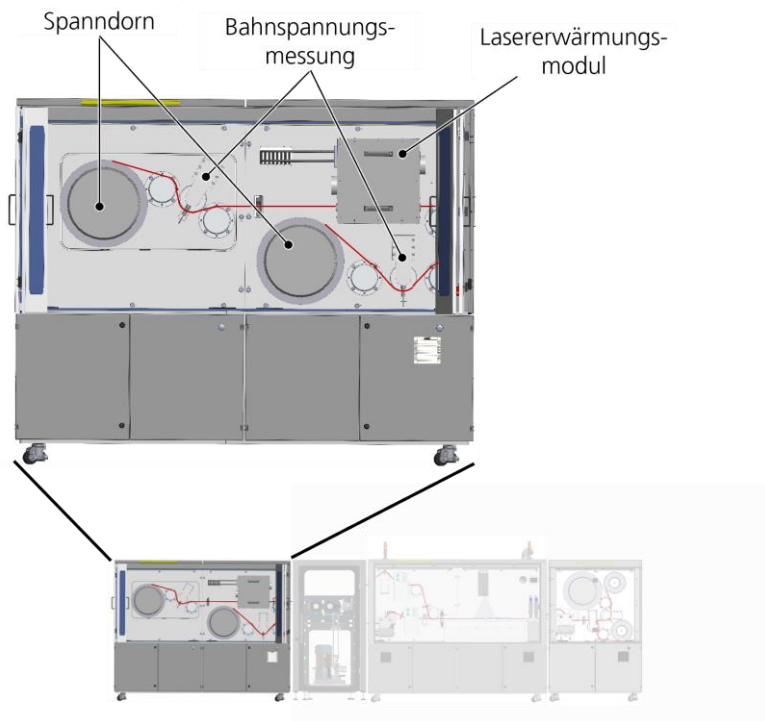


Abbildung 97: Umsetzung Abwicklermodul

Die Fertigungskette der R2R-Prototypenanlage beginnt mit dem Abwicklermodul. Die wichtigsten Bestandteile sind in Abbildung 97 dargestellt. Auf zwei Spannwellen kann der Materialvorrat in Form von Edelstahlfoliencoils aufgenommen werden. Um ein gerades Einlaufen der oberen Folienbahn in das Kalandersystem im Prozess zu gewährleisten, wird die Abwicklung mittels eines Linearantriebes lateral, also quer zur Bahnaufrichtung, verstellbar ausgeführt. Die Verstellung beinhaltet die Spannwellen, die zwei Umlenkwalzen sowie die Kraftmesswalze. Über die Kraftmesswalze kann die aktuelle Bahnspannung gemessen und geregelt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Walze in einem Winkel von 90° umschlungen wird. Die Position der Bahn kann über einen Bahnkantensensor hinter der zweiten Umlenkwalze gemessen werden. Das Lasererwärmungsmodul wird ebenfalls in das Abwicklermodul integriert. Für das Lasererwärmungsmodul wurde ein lasergeschütztes Gehäuse umgesetzt, sodass ein Laserschutz des Gesamtmoduls entfällt.

Umformmodul

Das Umformmodul bezeichnet das von dem Projektpartner Saueressig entwickelte und beschaffte Kalandersystem, welches ein Prägewalzenpaar bestehend aus Patrizie und Matrizie enthält. Dieses wurde in die Fertigungskette und in die Maschinensteuerung der R2R-Prototypenanlage integriert. Zusätzlich wurde eine Umhausung für das Kalandersystem am Fraunhofer IPT entwickelt und aufgebaut, sodass ein sicherer Betrieb im Maschinenverbund möglich ist. Weitere Details zum Kalandersystem sind am Ende der Beschreibung zu AP5.2 zu finden.

Lasermodul

Das Konzept des Komponentenaufbaus des R2R-Lasermoduls ist in Abbildung 98 dargestellt. Beim Einlauf der oberen Materialbahn in das Modul ist zunächst eine Kraftmesswalze vorgesehen. Diese ist notwendig, um die Bahnspannung zwischen der vorgelagerten Prägeeinheit und der nachgelagerten Klemmstelle auf das gleiche Niveau wie in dem Bahnabschnitt vor der Prägeeinheit regeln zu können. Mit der Klemmstelle selbst wird eine Entkopplung zum Laserschweiß- und -schneidprozess hergestellt. Während im Prägeprozess die hohe Bahnspannung für ein gutes Prägeergebnis benötigt wird, ist diese für das Ausrichten, Schweißen und Schneiden nicht von Vorteil und soll möglichst weit herabgesetzt werden.

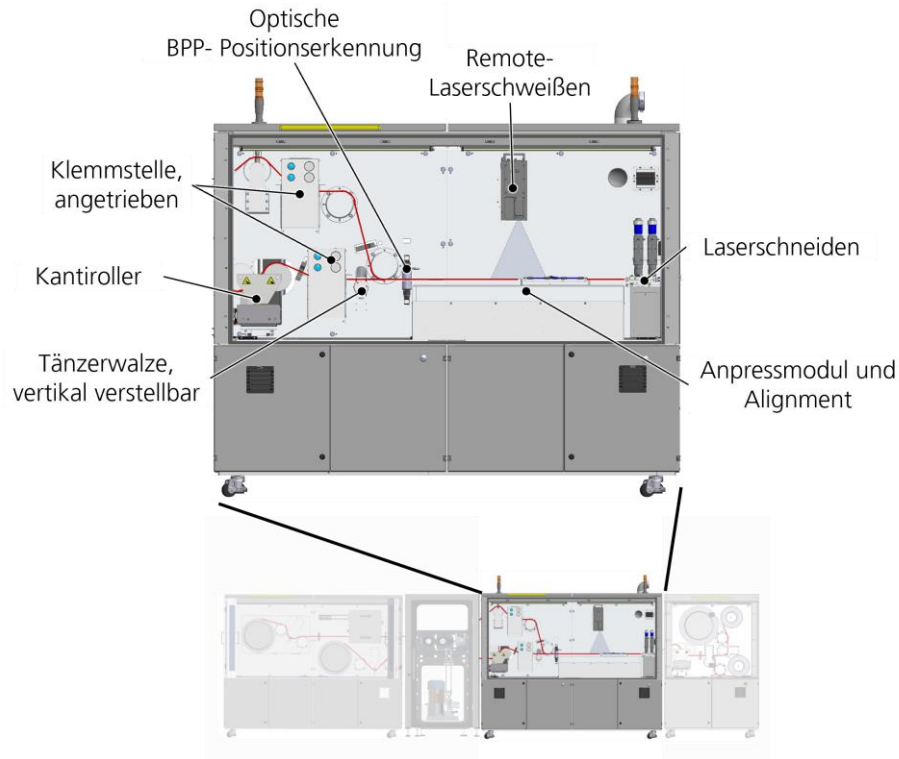


Abbildung 98: Umsetzung Lasermodul

Die untere Materialbahn wird zunächst durch einen Kantiroller geführt. Dieser kann über einen Linearantrieb eine Dreh-Schwenk-Bewegung ausführen und damit die Bahn in lateraler Richtung bewegen. Über Bahnkantensensoren an der oberen und unteren Bahn kann dieses System die Positionsabweichung der beiden Bahnen aufnehmen und zueinander ausrichten. Auch an der unteren Materialbahn ist eine Klemmstelle vorgesehen, welche die Bahnabschnitte trennt und die Geschwindigkeitsvorgabe der Bahn regelt.

Die Konstruktion der Klemmstelle ist in Abbildung 99 dargestellt. Um Bahnspannungsdifferenzen von über 2000 N zu erreichen, ist ein möglichst hoher Reibkoeffizient zwischen Materialbahn und Walze notwendig. Aus diesem Grunde werden die beiden Walzen der Klemmstelle mit einer Hartgummierung ausgeführt. An den Enden der Walzen sind jeweils zwei pneumatisch betätigte Hochkraftzylinder eingebaut, welche die Walzen aufeinanderpressen und insgesamt Anpresskräfte von über 5 kN erzeugen können. Damit die zuvor eingeprägten Strukturen nicht beschädigt werden, ist zudem der Durchmesser in dem mittleren Bereich mit einer Breite von ca. 90 mm abgesenkt. Dadurch wird eine Anpressung auf die eingeprägte BPP-Halbschalenstruktur verhindert.

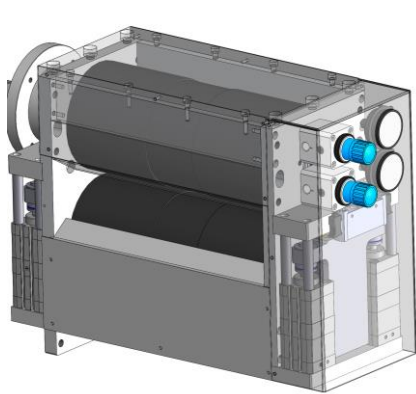


Abbildung 99: Konstruktion der Klemmstelleneinheit

Das Konzept und die Konstruktion des Anpresssystems für das Laserschweißen wurde bereits in AP3.2 beschrieben. Das Laserschneidkonzept basierte ursprünglich auf einem Gantry-Achssystem, welches den Laserschneidkopf mit hoher Dynamik und Präzision bewegt. Ein den Anforderungen genügendes Achssystem konnte jedoch aufgrund der sehr hohen Investitionskosten im CoBiP-Projektvorhaben nicht umgesetzt werden. Aus diesem Grunde wurde das Laserschneiden aufgeteilt in einen Grob- und einen Feinschneidprozess. Der Grobschnitt soll dabei in die R2R-Fertigungslinie integriert werden, während das Fraunhofer ILT den Feinschnitt anschließend auf vorhandenen Maschinensystemen mit der nötigen Dynamik und Präzision durchführen kann. Das in die R2R-Fertigungslinie integrierte Laserschneidkonzept ist in Abbildung 100 dargestellt. Hier werden zwei Laserschneidköpfe verwendet, wobei der eine Schneidkopf an einer festen Position und der andere Schneidkopf an einer verfahrbaren Linearachse befestigt wird. Der Schneidkopf kann damit lateral zur Bahn geführt werden und zwischen zwei geprägten BPP die Metallfolie schneiden und an einer gewünschten Position den Schnitt mit der entsprechenden seitlichen Rückbewegung den Schnitt schließen.

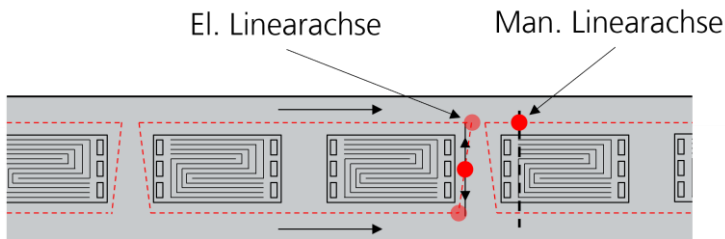


Abbildung 100: Laserschneidkonzept zur Integration in die R2R-Fertigungslinie

Die Konstruktion der Laserschneideinheit ist in Abbildung 101 zu erkennen. Die Laserschneidköpfe wurden vom Fraunhofer ILT integriert. Um die geringe Höhentoleranz der zu schneidenden Metallfolie gerecht zu werden, sind einstellbare Längs- und Querführungen vorgesehen, welche von oben und unten die Bahn führen können. Diese sind in der Höhe sowie in der Position zur Schnittlinie einstellbar ausgeführt. Zudem befindet sich unterhalb der Folie eine Auffangwanne mit einer Opferplatte und Anschluss für einen Absaugungsschlauch. Dem Prozess wird Stickstoff direkt über die Laserschneidköpfe zugeführt.

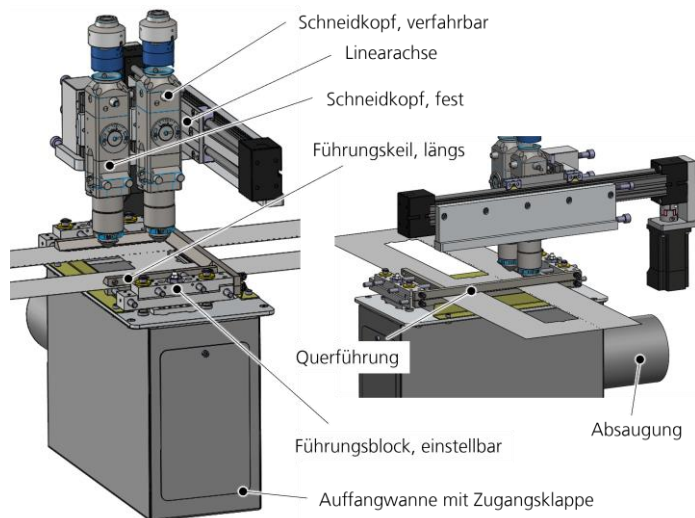


Abbildung 101: Konstruktion der Laserschneideinheit

Aufwicklermodul

Die Umsetzung des Aufwicklermoduls ist in Abbildung 102 dargestellt. Die Hauptkomponenten sind zwei Kraftmesswalzen, zwei kleinere sowie ein großer Spanndorn. Es wurden zwei unterschiedliche Versuchskonfigurationen berücksichtigt. In den ersten Tests sind ausschließlich Prägeversuche mit einer einzelnen Folienbahn in der R2R-Prototypenanlage geplant. Dabei wird die geprägte Folie auf einer aus dem Abwickler äquivalenten Spannwellen aufgewickelt, ohne dass Laserschweiß- und -schneidprozesse eingeschaltet sind. Die hierbei aufgewickelte Folie kann in anschließenden Versuchen zur Verbindung zweier metallischen, geprägter Folien auf die Spannwellenaufnahme der unteren Bahn im Abwickler montiert und der Fertigungskette zugeführt werden. Die Aufwicklung des Restmaterials kann auf den beiden anderen Spannwellen vorgenommen werden. Der bereits zum Lasermodule beschriebene Kantiroller zur lateralen Bahnsteuerung kann flexibel ebenfalls in das Aufwicklermodul integriert werden.

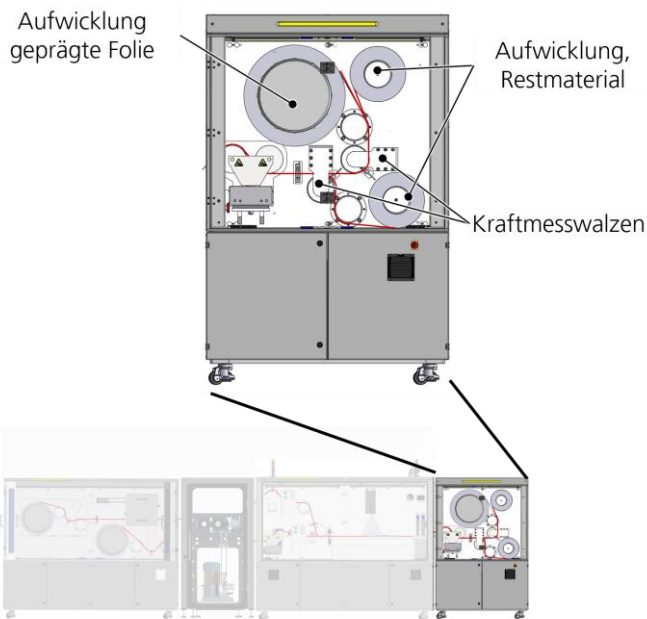


Abbildung 102: Umsetzung Aufwicklermodul

Die wichtigsten Hauptkomponenten der CoBiP-Gesamtmaschine sind in Tabelle 22 beschrieben.

Tabelle 22: Beschreibung der Hauptkomponenten innerhalb der CoBiP-Gesamtmaschine

| Komponente | Beschreibung |
|--|--|
| Spanndorn, Abwickler | Der Spanndorn besitzt pneumatische Andrückleisten, mit denen Coils mit einem Innendurchmesser von 400 mm mit hoher Kraft gespannt werden können, sodass eine Bahnkraft bis zu 3 kN erzeugt und übertragen werden kann. |
| Abwicklervorstellung mit Linearantrieb, Bahnkantensensor | Über den Linearantrieb kann die Abwicklereinheit lateral zum Bahnlauf bewegt werden und somit ein gleichmäßiger Einlauf in den Kalandar gewährleistet werden. Die Bahnpositionsmessung erfolgt über einen Bahnkantensensor |
| Kraftmesswalze | Die Bahnspannung wird über die Kraftmesswalzen gemessen, welche zweiseitig die Kraft über integrierte Kraftmessdosen misst. |
| Lasererwärmungsmodul | Das Lasererwärmungsmodul ist dem Umformprozess direkt vorgelagert. Mit diesem kann eine Temperatur- oder Gefügeveränderung zur besseren Umformbarkeit realisiert werden. |
| Kalandar | Die Kalandereinheit wurde von Saueressig beschafft. Im Kern besteht diese aus zwei Prägewalzen und einem hydraulischen Anpresssystem, mit welchem Andrückkräfte bis 150 kN erreicht werden können. |
| Klemmstelle | Zur Trennung von Bahnabschnitten mit unterschiedlichen Bahnspannungen wird die Warenbahn mittels zweier gummierter Walzen geklemmt. Die Klemmung der Warenbahn erfolgt ausschließlich außen außerhalb der geprägten Strukturen, um diese nicht zu beschädigen. |
| Kantiroller | Mit dem Kantiroller-Bahnsteuerungssystem wird die Metallfolie in lateraler Richtung im kontinuierlichen Betrieb positioniert. |
| Kamerasystem | Zur Erhöhung der Präzision der Bahnpositionsmessung werden Strukturen im Prägeprozess in die Metallfolie eingebracht. Über ein Kamerasystem und Bilderkennungsalgorithmen können diese Strukturen erkannt und die Position relativ zur BPP bestimmt werden. |
| Tänzerwalze | Zur Feinjustage der Positionierung von oberer und unterer Warenbahn in Bahnaufrichtung wird eine vertikal verstellbare Walze genutzt. |
| Anpressmodul mit Positioniereinheit | Das Anpressmodul wird im Bereich des Laserschweißprozesses genutzt und dient der Anpressung von oberer und unterer Warenbahn zur Erzeugung eines Nullspaltes. Das Anpressmodul wird über die Positioniereinheit präzise zu den Halbschalen positioniert und zum Bahnlauf synchronisiert. |
| Laserscanner | Für das Fügen der Halbschalen wird ein Single-Mode Laserscanner des Fraunhofer ILT in das Lasermodul integriert. |

| | |
|---------------------------------------|--|
| Laserschneideinheit mit Schneidköpfen | Das Austrennen der gefügten Bipolarplatten wird mithilfe von Laserschneidköpfen durchgeführt. In der Laserschneideinheit sind Ausrichtelemente vorgesehen, um einen konstanten Arbeitsabstand einzuhalten. |
| Spanndorn, Aufwickler | Im Aufwicklermodul wird das Restmaterial der Edelstahlfolie über angetriebene Spanndorne aufgewickelt. |

Zur Förderung der Warenbahn und Regelung der Bahnspannung werden elektrische Antriebsmotoren eingesetzt. Diese sind an die Spanndorne im Ab- und Aufwicklermodul sowie an den Klemmstellen im Lasermodul angebunden. Die Auslegung erfolgte anhand der gesetzten Anforderungen an die maximale Bahnspannung und Bahngeschwindigkeit. Für die großen Spanndorne wurde die maximale Bahnspannung auf 3 kN festgelegt. Aus dem maximalen Durchmesser von 550 mm ergibt sich ein maximal zu übertragendes Abtriebsdrehmoment von 825 Nm. Da die Bahngeschwindigkeiten mit bis zu 3,6 m/min gering sind, wurden Getriebe mit hoher Übersetzung eingesetzt. Die Antriebsmotoren wurden entsprechend der Drehzahl und Drehmoment auf Dauerbetrieb ausgelegt. Für die Auslegung der Antriebsmotoren der kleinen Spanndorne wurden vergleichbare Berechnungen durchgeführt. Da hier die maximale Bahnspannung mit 1 kN definiert wurde und gleichzeitig die Durchmesser kleiner sind, müssen nur deutlich kleinere Drehmomente übertragen werden.

Der mechanische und elektrische Aufbau der R2R-Prototypenmaschine inkl. aller Einzelmodule- und Komponenten wurde am Fraunhofer IPT durchgeführt und abgeschlossen. Abbildung 103 zeigt den finalen Aufbau der gesamten Fertigungslinie. Die Maschinensteuerung basiert auf dem Beckhoff-Steuerungssystem. Die Programmierung der Steuerung wurde mit allen notwendigen Regelungs- und Sicherheitseinrichtungen nach Maschinenrichtlinie durchgeführt. Zur einfachen Bedienung der Maschine wurde eine HMI erstellt, welche die für den Maschinenbediener notwendigen Funktionen wie Parametereinstellungen oder Starten der Prozesse beinhaltet. Zusätzlich können wichtige Messwerte der eingebauten Sensorik angezeigt und aufgezeichnet werden. Eine detailliertere Beschreibung zum Steuerungs- und Regelungskonzept folgt in AP5.3.



Abbildung 103: Aufbau der CoBiP-Gesamtmaschine am Fraunhofer IPT

Die Entwicklung des Kalanders greift auf die Konstruktion des Saueressig Laborkalanders zurück. Dieser Laborkalender ist auf einem Werkstattwagen montiert und damit frei beweglich, dadurch ist das Kalandersystem äußerst flexibel konzipiert. In Abbildung 104 ist der Laborkalender in horizontaler Ausrichtung dargestellt, d.h. die Prägewalzen sind nebeneinander angeordnet. Für das Projekt wurde ursprünglich entschieden die Prägewalzen um 90° zu drehen, damit sie vertikal ausgerichtet sind und die Metallfolie horizontal durch den Kalender hindurchläuft. Aufgrund der hohen Bahnspannung wurde diese Entscheidung jedoch revidiert. Dieser Punkt sowie viele weitere wurden im regen Austausch mit den Projektpartnern festgelegt, damit der Kalender optimal mit den weiteren R2R-Modulen zusammenarbeiten kann. Zu den Absprachen gehören auch die folgenden Änderungen: Für die Patrizie-Matrize-Prägung wird eine axiale Einstellbarkeit sowie eine Drehwinkel Einstellbarkeit benötigt, damit die beiden Prägewalzen ineinandergreifen. Die Winkellage soll über eine Regelung der Motoren realisiert werden. Durch eine aktive Spalt-/Druckregelung wird die Anstellkraft geregelt und der Spalt ist am Touchpanel einstellbar. Das Maschinengestell erlaubt einen einfachen Walzenwechsel, so dass der Kalender ohne lange Umrüstzeiten mit anderen Prägewalzen ausgestattet werden kann.



Abbildung 104: Saueressig Laborkalender. Die Konstruktion dieses Kalanders dient als Grundlage für die Konstruktion des R2R-Moduls

Das Kalandersystem wurde im Oktober 2022 bei Saueressig mechanisch und elektrisch montiert und anschließend in Betrieb genommen. Die Auslieferung an das Fraunhofer IPT und der Aufbau vor Ort erfolgten im November 2022. Die endgültige Inbetriebnahme des Kalanders in Kombination mit den weiteren R2R-Modulen erfolgte im Februar 2023. Abbildung 105 zeigt das Prägekalandersystem während der Integration in die Gesamtanlage. Anschließend wurden erste Prägeversuche vor Ort zur Abstimmung der unterschiedlichen Module und Fertigungs-Parameter durchgeführt.



Abbildung 105: Foto des Kalandermoduls während der Integration in die R2R-Anlage

AP5.3 Erarbeitung und Implementierung des Steuerungs- und Regelungskonzeptes und Inbetriebnahme und Prozessoptimierung [09/21-03/23]

Zur Realisierung eines Steuerungs- und Regelungskonzeptes der R2R-Fertigungslinie wurden zunächst Betriebszustände definiert, welche während der Inbetriebnahme und Prozessoptimierungsphase realisiert werden sollen. Die Betriebszustände unterscheiden sich in den folgenden Merkmalen: Manuel-/Automatikbetrieb, Anzahl der eingesetzten Materialbahnen, mit/ohne Kalandrier, mit/ohne Lasererwärmungsmodul, mit/ohne Laserschweiß- und schneidprozess. Damit werden insgesamt 12 Zustände unterschieden. Die Zustandsübersicht ist in Abbildung 106 zu sehen. Für jeden Zustand wurden anschließend die Betriebsmodi der verschiedenen Antriebe festgelegt. Beispielsweise ändert sich für die obere Materialbahn die geschwindigkeitsvorgebende Achse, wenn der Prozess mit oder ohne Kalandrier betrieben wird. Die Zustände wurden anschließend in das Steuerungsprogramm implementiert.

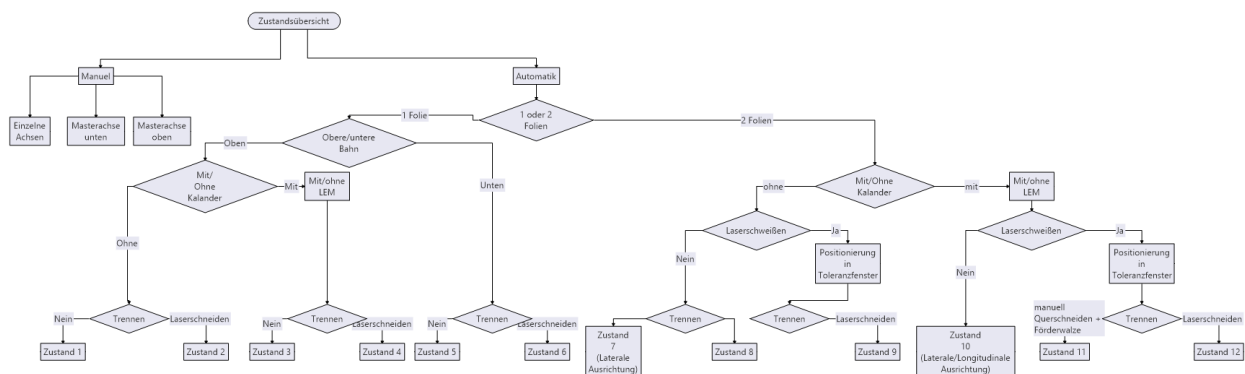


Abbildung 106: Übersicht der Betriebszustände der R2R-Fertigungslinie

Die Hauptsteuerung der CoBiP-Gesamtmaschine wird wie bereits in AP5.2 beschrieben auf Basis der Beckhoff-Steuerungsarchitektur aufgebaut. Diese bietet unter anderem eine hohe Flexibilität in der Einbindung von Maschinenkomponenten unterschiedlicher Hersteller. Zudem ist durch bereits aufgebaute Maschinensysteme am Fraunhofer IPT ein weitgreifendes Know-How im Bereich der Steuerungsprogrammierung in Beckhoff vorhanden.

Nach dem mechanischen und elektrischen Aufbau der Einzelmodule wurde die Inbetriebnahme der Maschine durchgeführt. Hierzu wurden zunächst die elektrischen Einzelkomponenten im Steuerungsprogramm eingebunden wie die Rotationsmotoren (Abwickler, Aufwickler, Klemmstellen) und Linearachsen (Quer- und Längsachse Anpressmodul, Laserschneidachse) mit den zugehörigen Umrichtern, Pneumatikventile und Sensoren (Bahnkantensensoren, Kraftmessdosen, Kameras). Für die Motoren und Achsen wurden Grenzwerte für Position und Drehmoment definiert und implementiert, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Zudem wurden alle Komponenten getestet und die Sensoren kalibriert. Das Einmessen und Referenzieren der Linearachsen des Anpressmoduls erfolgt über ein Referenzierwerkzeug und dem Kamerasystem. Zur Integration des Kalandersystems, welches von dem Projektpartner Saueressig mit einer Siemens-Steuerung geliefert wurde, wird eine Profinet-Schnittstelle zur Übertragung der Bussignale zwischen der R2R-Steuerung und dem Kalandersystem genutzt. Es werden Signale wie Bahngeschwindigkeit, Start/Stop und Anpresskraft der Walzen übertragen, sodass diese über die R2R-Steuerung eingestellt und überwacht werden können. Zudem werden sichere Signale ausgetauscht, sodass die Not-Halt-Einrichtung am Kalandersystem in die Gesamtsteuerung eingebunden und mit weiteren Sicherheitseinrichtungen verknüpft ist.

Der allgemeine Prozessablauf ist von dem gewählten Zustand abhängig. Insbesondere die geschwindigkeitsvorgebende Achse (Masterachse) für die obere Bahn unterscheidet sich je nach Zustand. Wird das Kalandersystem genutzt, wird dieses als Masterachse verwendet. Andernfalls wird hierfür die Klemmstelle genutzt. Für die untere Bahn ist in jedem Zustand die Klemmstelle Masterachse. Zu Beginn eines Prozessablaufes mit Kalender muss dieser referenziert werden, sodass die Prägewalzen präzise zueinander ausgerichtet sind und synchron laufen. Dieser Schritt ist sehr wichtig und muss sorgfältig ausgeführt werden, da die Walzen bei einer Fehlausrichtung beschädigt werden können. Unabhängig von der Wahl der Masterachse, wird nach dem Abschluss der Initialisierung und Referenzierung beim Starten des Prozesses zunächst die Bahnspannungsregelung aktiviert, ohne dass sich die Bahn bewegt. Befindet sich die Bahnspannung innerhalb der vorgegebenen Fenster, kann der Masterachse eine Geschwindigkeit gesetzt werden, um die Bewegung zu starten. Die Bahnspannung wird dabei kontinuierlich nachgeregelt.

Je nach Zustand werden nun unterschiedliche Regelstrategien aktiv. Soll die obere und untere Bahn für die Laserbearbeitungsprozesse synchronisiert werden, startet die Positionierung der beiden Bahnen in Bahnaufrichtung über ein Geschwindigkeitsoffset der Masterachsen. Die seitliche Ausrichtung von unterer zur oberen Bahn wird über den Kantiroller geregelt. Die Bahnpositionsmessung erfolgt dabei mithilfe von Bahnkantensensoren und einem Kamerasystem. Nach erfolgreicher Ausrichtung der Bahnen innerhalb der vorgegebenen Toleranzfenster können die Laserbearbeitungsschritte gestartet werden. Hierbei positioniert sich das Anpressmodul mithilfe der Linearachsen zu den Halbschalen und synchronisiert sich mit dem Bahnlauf. Die Positionsüberwachung bleibt während des gesamten Prozessablaufs aktiv. Die Aufwicklung des Restmaterials erfolgt ebenfalls bei kontinuierlich geregelter Bahnspannung, um einen stabilen Prozessablauf zu gewährleisten.

Zur Bedienung der Maschine wurde eine HMI (Human Machine Interface) in der Programmiersprache C# entwickelt. C# bietet den Vorteil einer großen Flexibilität in der Einbindung verschiedenster Prozessabläufe. Die HMI verfügt über eine Schnittstelle zur Beckhoff-Steuerungsumgebung, sodass Daten untereinander ausgetauscht werden können. Ein Auszug der HMI ist in Abbildung 107 dargestellt. Auf der linken Seite wird der Status Allgemein und verschiedener Komponenten bzw. Module angezeigt. Beispielsweise ist zu erkennen, ob die Bahn sich aktuell in Bewegung befindet, die Bahnspannungsregelungen aktiv sind oder auf welcher Position sich aktuell die Bahnen befinden. Im mittleren Bereich der HMI können für die verschiedenen Module Befehle ausgeführt werden. Hierzu gehört unter anderem das (De-)Aktivieren aller Achsen, Start/Stop der Hydraulikpumpe des Kalanders oder das Ein- und Ausschalten der Bahnspannungsregelung. Auf der rechten Seite der HMI können modulspezifische Parameter eingestellt werden, die anschließend an die Steuerung übergeben werden. Beispiele hierfür sind die Sollbahnspannung oder Grenzwerte der Bahnspannung und der Wickeldurchmesser.

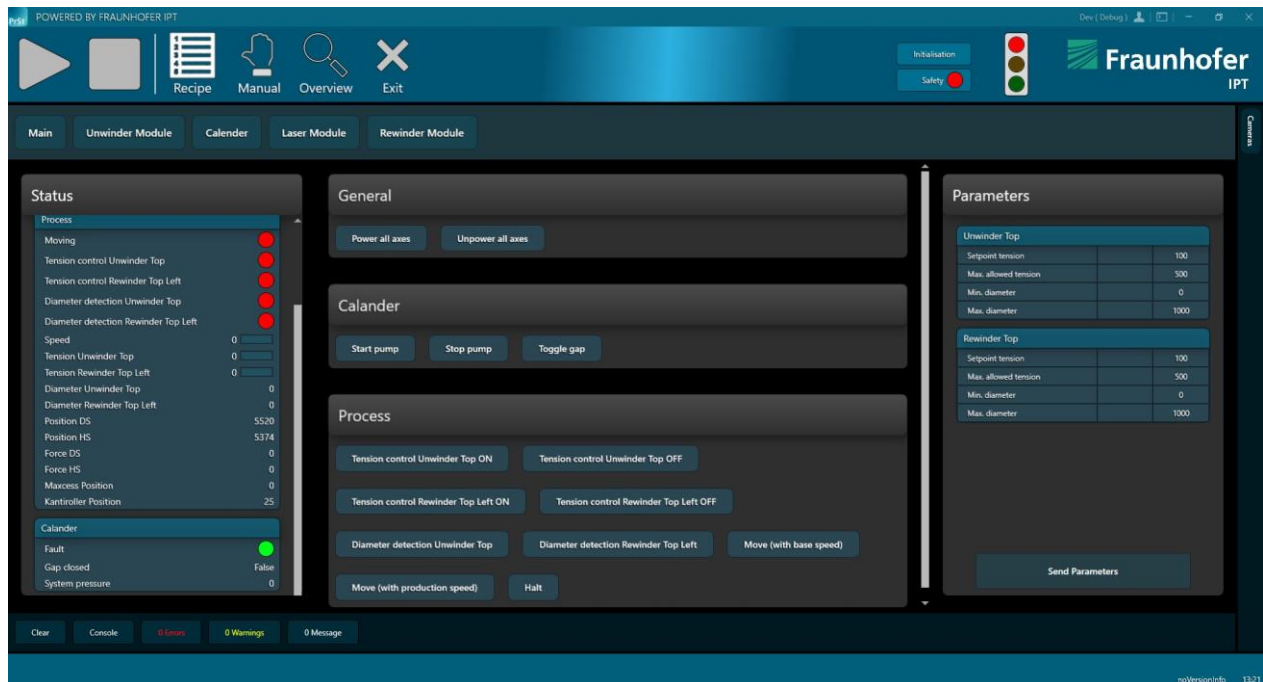


Abbildung 107: Auszug aus der entwickelten HMI zur Bedienung der CoBiP-Maschine

Zusätzlich ist es möglich Sensordaten über die HMI in Echtzeit anzeigen zu lassen. Dies ermöglicht dem Maschinenbediener während des Prozessablaufes eine zusätzliche Überwachung des Prozesses sowie das Sammeln wichtiger Erkenntnisse über die Prozesse selbst.

AP5.4 Fertigung einer Prototypenserie [06/22-03/23]

Durch die Verknüpfung mehrerer Tätigkeiten der Konsortialpartner wurden Prototypen gefertigt. Hierfür wurden walzgeprägte BPPs, in mehreren Schritten lasergefügt, -geschnitten und anschließend beschichtet. Die Dichtung wird über geschnittene Klebedichtungen realisiert. Im Folgenden werden einzelne Prozesse der Prototypenfertigung beschrieben:

Laserschweißen und -schneiden

Die Bearbeitungsfolge der Schneidprozesse bei der Fertigung der Prototypen ist nach dem Kalandern

- 1) Remoteschneiden der Halbplatten der Medienzu-/abfuhrschlitze, der Ports sowie von Positionierlöcher zur Ausrichtung in der Spannvorrichtung beim Schweißen in Kathoden und Anodenplatten
- 2) Schweißen
- 3) Schneiden der Außenkontur mit Schneidkopf

Für das Remoteschneiden der Schlitze und Ports konnten die Parameter der Vorversuche für die Konturen erfolgreich mit nur geringfügigen Nachjustagen übernommen werden. Die erreichten Schnittergebnisse wurden damit reproduziert. Wesentlichen Kriterien sind dabei vor allem die Bartbildung im Bereich von 25 µm, die durch den modulierten Prozess erreicht wird, und eine weitestgehend schmauchfreie Materialoberfläche.

Abbildung 108 zeigt die Schnittkonturen auf einer Hälfte einer Platte sowie Details im Bereich der Schlitzöffnungen von der Oberseite und Unterseite

Tabelle 23: Ausrüstung zum Remoteschneiden der Schlitzöffnungen

| | |
|----------|--|
| Laser | 1,0 kW SM-Laser |
| | Max. Leistung am Werkstück 1,0 kW |
| | Faserdurchmesser 14 μm |
| Scanner | Raylase Axial Scan Fiber 30 SC |
| | Brennweite 105 mm |
| | Scanfeld 300 x 300 mm ² |
| | Max. Scangeschwindigkeit 7 m/s |
| | Fokusbereich ca. 40 μm |
| Crossjet | 1. Optikschild unter dem Schildglas 2. Anblasen der Prozesszone zur Prozessstabilisierung |

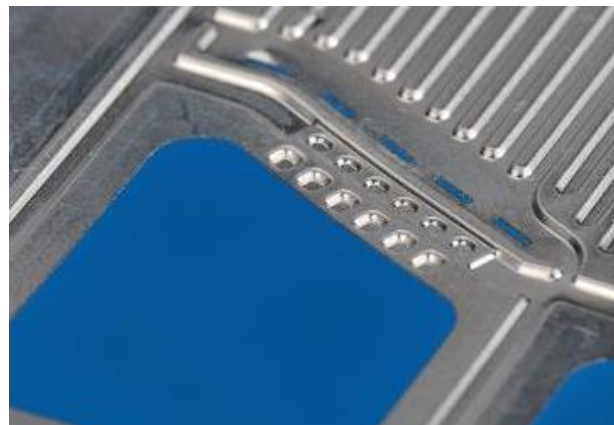
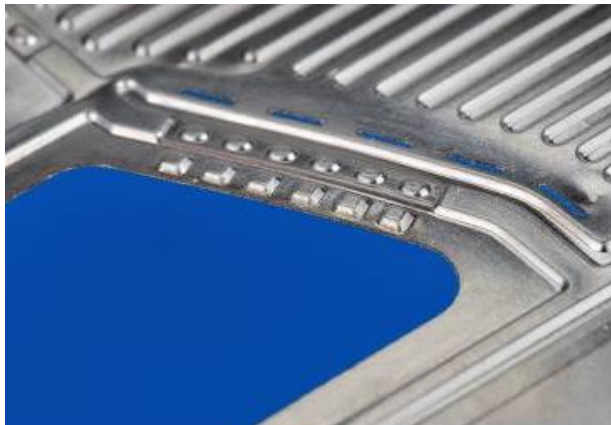
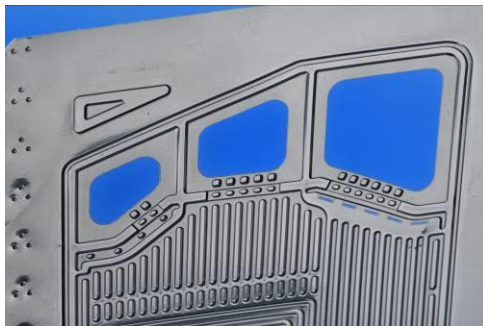


Abbildung 108: Mit Remoteschnitt geschnittene Manifolds und Details im Bereich der Schlitzöffnungen zur Gasversorgung (links Oberseite, rechts Unterseite)

Kritische Stelle der Schnittkontur der Schlitzte ist das Schließen der Kontur. Aufgrund der Bahngenerierung durch die Scannersoftware und der Delayeinstellungen von Laser und Scannerspiegeln verblieb bei einigen Schnitten am Schnittende ein ca. 100 μm breiter Steg, der das Auslösen des Mittelstücks verhindert (S. Abbildung 109).



Abbildung 109: Schlitzöffnung vollständig geschnitten (links) und mit Steg am Schnittanfang/Ende, der das Herauslösen des Mittelteils verhindert.

Durch eine Verlegung des Schnittanfangs/Schnittendes konnte das Herauslösen der Stege deutlich verbessert werden. Auch die weitere Optimierung der Gaszufuhr im Bearbeitungsbereich (Crossjet) hat das Auslösen der Stege verbessert, so dass die Schlitzte zuverlässig geschnitten wurden. Durch Softwarefehler in der Scannersteuerung war die Positionierung der Schnitte über die in den Scanner integrierte Kamera unzuverlässig und erforderte häufige aufwändige Kalibrierung und eine individuelle manuelle Korrektur der Positionen bei jeder Platte jeweils für die an der rechten Seite und linken Seite liegenden Löcher.

Es wurden unterschiedliche Varianten für die Verwendung als Endplatte, als Wiederholeinheit im Stack und für Einzelzelltest geschnitten (je 10 Anoden und Kathoden).

Der Zuschnitt der Außenkontur sowie von Löchern in den stirnseitigen Laschen erfolgte mit einem Schneidkopf auf der ILT High-Speed-Schneidanlage. Im vorliegenden Setup wurde die minimal erforderliche Laserleistung für den Schnitt mit 1,2 kW für eine Schneidgeschwindigkeit von 100 m/min, die auf den langen Seiten der Platten erreicht wird, ermittelt. Die Schnitte an den verschweißten Platten wurden mit 1,5 kW durchgeführt, um eine Reserve für Positionstoleranzen in z auf Grund der Welligkeit des Materials oder nicht spaltfrei aufeinander liegender Plattenhälften vorzuhalten. Die Bearbeitungszeit für den Zuschnitt beträgt 1,6 s.

Für die Positionierung zum Schnitt der Außenkontur wurde die Anlage mit einer Kamera ausgerüstet (Abbildung 110) und die Programmierung so erweitert, dass zwei Referenzpunkte der BPP übernommen werden und das Koordinatensystem der Bahnbewegung durch Offset und Drehung auf die tatsächliche Lage der Platten in der Spannvorrichtung angepasst wird.

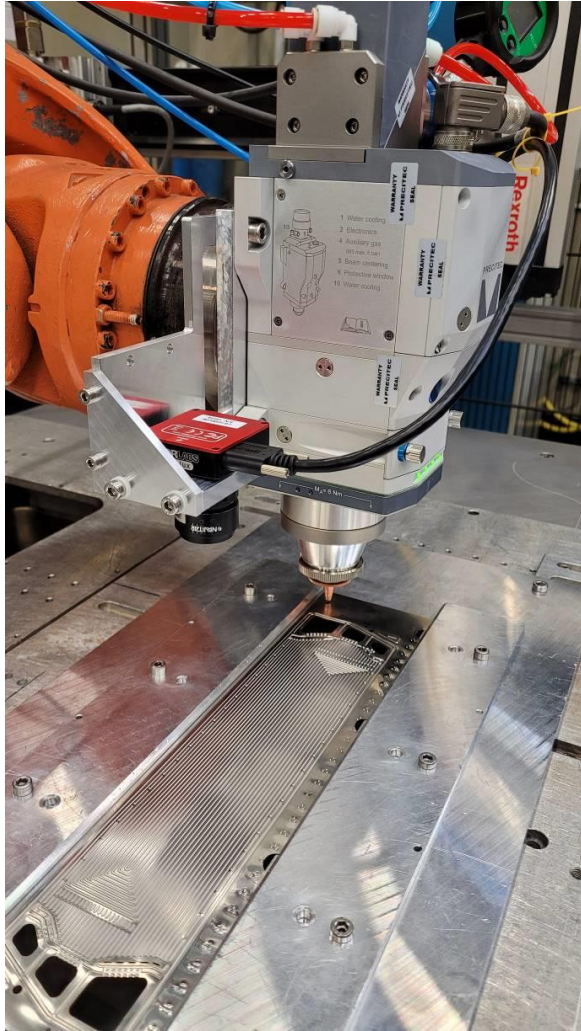


Abbildung 110: Schneidkopf und Positionierkamera über der verschweißten BPP. Die im Bild bereits vorhandenen Öffnungen der Platte wurden vor dem Schweißen mit dem Scanner geschnitten (Remoteschnitt).

Qualitätsprobleme sind durch die unpräzise Positionierung der Remoteschnitte (Ports und Gaszu-/abfuhröffnungen) aufgetreten. Schnittbereiche, an denen neben dem Schnitt keine Schweißnaht das Aufeinanderliegen der Plattenhälften sicherstellt, weisen Grat auf. Bei eng aufeinander liegenden Plattenhälften wird eine gratfreie Qualität erreicht. Es wurden zusätzliche Schweißlinien definiert, um in unmittelbarer Nähe auch in diesen Bereichen mit hoher Qualität schneiden zu können.

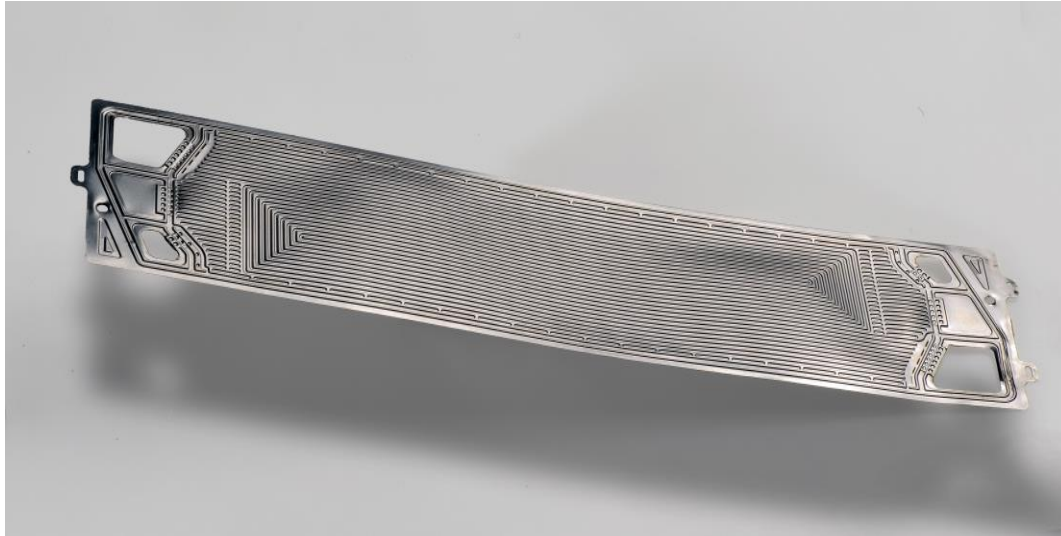


Abbildung 111: Verschweißte und zugeschnittene Platte



Abbildung 112: Schnittdetails; Links: Portöffnungen mit korrekter Positionierung Schweißnaht auf der linken Seite und Positionsfehler auf der rechten Seite. Rechts: Schnittkante und Schweißnahtsegment an der Außenkontur.

AP5.5 Qualitätstests und Funktionstests der BPP in Brennstoffzellen am Forschungszentrum Jülich [12/20-06/23]

Der Aufbau einer Zelle bzw. eines Stacks mit der entworfenen BPP bedarf einiger weiterer Komponenten. Gemeint sind damit insbesondere die Endplatten, Isolierschichten zwischen Endplatten und Stromabnehmer, Stromabnehmer, Gasdiffusionslagen und die katalysatorbeschichtete Membran einschließlich Subgasket. Eine Einzelzelle mit ihren Komponenten ist in Abbildung 113 dargestellt.

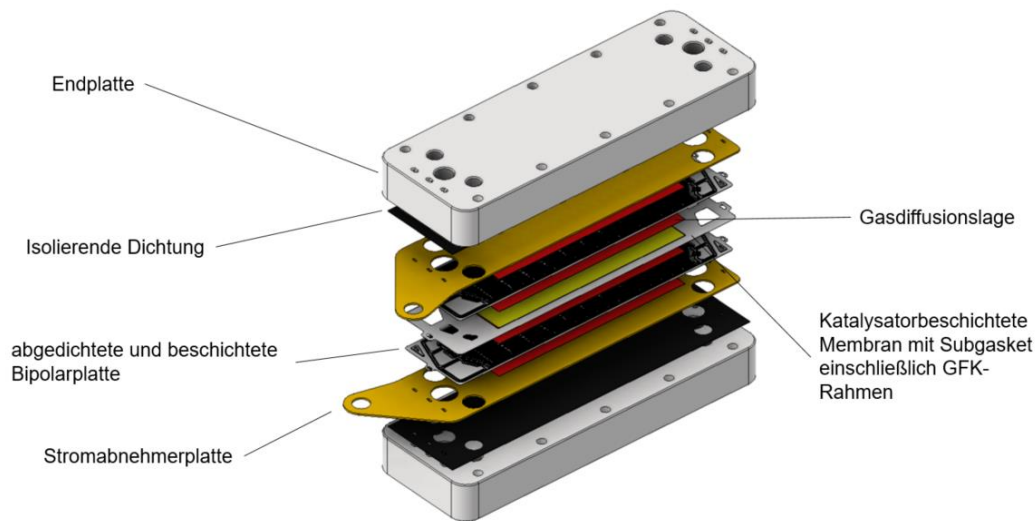


Abbildung 113: Explosionsdarstellung (CAD-Modell) aller Stackkomponenten am Beispiel einer Einzelzelle

Fertig zugekauft wurden die Gasdiffusionslage sowie die katalysatorbeschichtete Membran mit Subgasket. Da eine Mindestdicke von 276 μm für die Gasdiffusionslage benötigt wird und das Subgasket der Membran nur 89 μm dick ist, ist zusätzlich ein GFK-Rahmen mit den Konturen des Subgaskets gestanzt worden. Weitere Stackbauteile wurden in der Hauptwerkstatt des FZJ hergestellt:

- Endplatten aus Edelstahl (Werkstoff-Nr. 1.4571)
- Elektrisch isolierende Dichtung aus FKM
- Stromabnehmerplatte aus Edelstahl (Werkstoff-Nr. 1.4571) mit 3 μm dicker galvanisch aufgetragener Vergoldung

Während der Fertigung der Bipolarplatte und der anderen Stackkomponenten sind an Standardmesszellen des FZJ Testmessungen mit unterschiedlichen Gasdiffusionslagen durchgeführt worden. In Abbildung 114 sind Polarisationskurven mit GDLs der Firma SGL Carbon aufgeführt. Die Versuche wurden bei einigermaßen konstanten relativen Eintritts-Gasfeuchten (Wasserstoff und Luft) von 60 % bis 70 % durchgeführt. Variiert wurde neben dem GDL-Typ (36BB bzw. 39BB von SGL) die Zelltemperatur (60, 70 und 80 $^{\circ}\text{C}$).

Es ist festzuhalten, dass die GDL 36BB bei Stromdichten um etwa 1,5 A/cm^2 höhere Spannungen als die GDL 39BB erbringt. Bei höheren Stromdichten kehrt sich das Verhalten um. Weiterhin auffällig sind bei der GDL 36BB die größeren Unterschiede der Stromdichten ab etwa 1,3 A/cm^2 in Abhängigkeit von der Temperatur. Das beobachtete Verhalten der Zelle, dass die Zellspannung bei 80 $^{\circ}\text{C}$ stärker „einbricht“ als bei 60 und 70 $^{\circ}\text{C}$ ist zunächst nicht zu erwarten gewesen. Möglicherweise spielt das Wassermanagement hier eine große Rolle. Bei konstanter relativer Eingangsfeuchte wird bei 80 $^{\circ}\text{C}$ wesentlich mehr Wasser in die Zelle eingetragen als bei den geringeren Temperaturen. Bei hohen Stromdichten wird zudem noch in hohem Maße Wasser produziert. Es ist zu vermuten, dass der Gesamtwassergehalt bei 80 $^{\circ}\text{C}$ so hoch ist, dass es partiell zu Kondensation von Wasser im Flowfield- und GDL-Bereich kommt. Dadurch wird der Gastransport an die Katalysatorschicht erschwert und es führt zu sogenannten Massentransportverlusten. Zusammenfassend kann man festhalten, dass die GDL 36BB im kleinen und mittleren Stromdichtebereich zu einer höheren Zellperformance führt. Bei hohen Stromdichten oberhalb von 1,3 A/cm^2 zeigt die GDL 39BB ein stabileres Verhalten. Ob dieses Phänomen auch im Zusammenhang mit der CoBiP-Zelle auftritt, bleibt abzuwarten.

36BB 280µm und 39BB 315µm, 30% Kompression

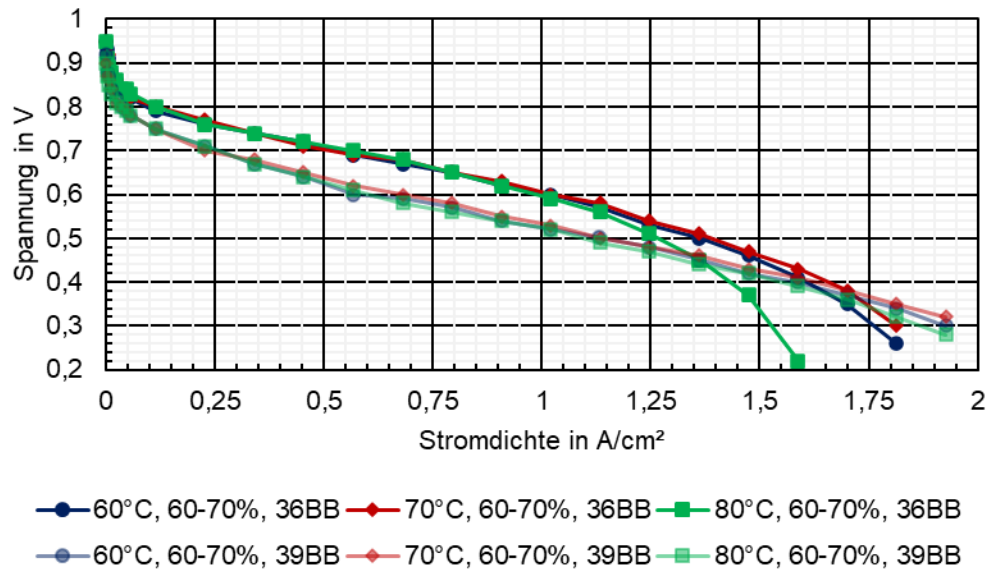


Abbildung 114: Vergleich der Polarisationskurven der zwei Gasdiffusionslagen 36BB und 39BB

Der erste Versuch mit einer CoBiP-BPP schließt bisher nur den Aufbau einer Einzelzelle (s. Abbildung 115) und Prüfung der Dichtigkeit ein. Die Dichtigkeit der Zelle nach Außen und auch quer (anoden-/kathodenseitiger Gasaustausch) muss aus Sicherheitsgründen gewährleistet sein. Wasserstoffkonzentrationen von > 4 Vol.-% in Luft (untere Explosionsgrenze) sind zündfähig. Bei erhöhten Undichtigkeiten ist kein Brennstoffzellenbetrieb möglich, die Teststände sperren bei Erkennen von erhöhten Wasserstoffkonzentrationen (40 % der unteren Explosionsgrenze) automatisch alle Gase ab und spülen die Anlage zur Inertisierung mit Stickstoff. Die aufgebaute Zelle wurde insbesondere auf Querundichtigkeit geprüft, da diese maßgebend für Gefahrensituationen ist. Die Untersuchungen haben dabei ergeben, dass die Zelle an Stellen nahe der Manifolds eine hohe Undichtigkeit nach außen sowie eine erhöhte Querundichtigkeit aufweist. Die Undichtigkeit nach außen konnte auch mit Hilfe von Silikoneinspritzung an die Leckagestelle nicht behoben werden (s. Abbildung 116). Aus diesem Grund konnten bisher noch keine Brennstoffzellen-Versuche mit der CoBiP-BPP unternommen werden.



Abbildung 115: Einzelzelle im realen Aufbau

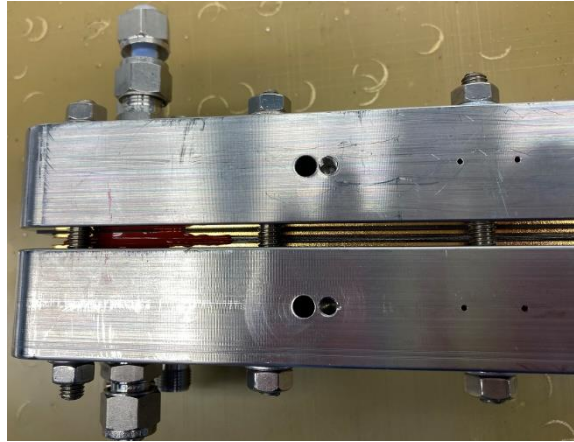


Abbildung 116: Mit Silikon befüllte Leckagestelle in der Nähe der Manifolds

Vor der Assemblierung der Zelle waren die BPP sehr uneben. Der Höhenunterschied von Manifoldbereich zu Manifoldbereich (lange Achse der Platte) betrug durch die BPP-Krümmung mehr als 5 mm. Dies erschwerte eine maßhaltige Assemblierung sehr stark. Durch die massiven Endplatten haben sich die BPP bei der Assemblierung gerade gezogen. Nach der Deassemblierung der Zelle wurde aber festgestellt, dass sich Schweißnähte im Manifoldbereich und im Randbereich gelöst haben. Wegen der Untertunnelung der Gaseinströmbereiche führte dies zu den festgestellten Undichtigkeiten.

Im Rahmen des Projektes ist es nicht gelungen, eine geeignete Dichtungstechnik zu entwickeln. Die geplante Dispensereinspritzung in die vorgesehene Dichtungsnut der BPP konnte am FZJ wegen einer irreparabel defekten Anlage nicht durchgeführt werden. Das Fraunhofer IPT hat als Alternative textilverstärkte PTFE-Flachdichtungen hergestellt, die für die geplanten Tests auf die Stege der Dichtungsnuten aufgeklebt wurden. Eine sichere Abdichtung war auch damit nicht möglich.

Insgesamt muss leider festgehalten werden, dass ein finaler Betriebsnachweis der im R2R-Prozess hergestellten BPP im Brennstoffzellenbetrieb im Rahmen des Projektes nicht erbracht werden konnte. Der Gesamtprozess ist z.Zt. nicht geeignet, um eine ausreichende Dichtigkeit von Zellen und Stacks zu gewährleisten.

Dies ist aber keine endgültige Problematik. Zur Eliminierung der technischen Defizite stehen vielversprechende Ansätze zur Verfügung. Weiterführende Arbeiten würden dabei aus Sicht des FZJ folgende Aspekte umfassen:

- Redesign der BPP (Längen- zu Breitenverhältnis, Kanal-/Stegstrukturen,...) in Hinblick auf die Fertigungstechnik mit dem Ziel einer gesteigerten Maßhaltigkeit und Ebenheit
- Überarbeitung des Dichtkonzeptes und stärkerer Fokus darauf
- Neues Konzept für die Manifolds in Verbindung mit Schneid- und Schweißtechnik sowie Dichtkonzept

AP6: Projekt- und Verwertungsmanagement [IPT]; Laufzeit 01/20-06/23

In diesem Arbeitspaket sind sämtliche Arbeiten, die für die Projektkoordination benötigt werden, gebündelt. Dies umfasst die Koordination von Projekttreffen, die Abstimmung hinsichtlich des Berichtswesens sowie die Koordination von transdisziplinären Treffen. Ferner werden in diesem Arbeitspaket erste Maßnahmen für einen erfolgreichen Technologietransfer durchgeführt. Die Projektergebnisse sollen auf einer Internetplattform für alle Projektpartner zugänglich gemacht werden, um einen problemlosen Informationsfluss zu ermöglichen. Die Verwertung der Projektergebnisse wird von dem gesamten Projektkonsortium vorbereitet und beinhaltet die Veröffentlichung der Projektergebnisse in Fachzeitschriften sowie bei Konferenzen und Messen.

Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Tabelle 24: Erzielte Ergebnisse im Vergleich zum Projektbeginn

| Kenngröße | Projektbeginn | Status heute | Ziel |
|--|---------------|--------------|--------|
| TRL | 3 | 5/6 | 6 |
| Bahngeschwindigkeiten in m/min | - | > 3 | 3 |
| Formgenauigkeit in %-Abweichung vom Sollwert | - | < 5% | - |
| Ausdünnung in % der Materialdicke | - | << 20 % | < 20 % |
| Ebenheit in mm | - | >> 1 | - |

3. Sind inzwischen von dritter Seite FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind (auch Darstellung der aktuellen Informationsrecherchen nach Nr. 6.1 NKBf 98)?

Es sind keine FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

4. Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans. Diese soll, soweit im Einzelfall zutreffend, Angaben zu folgenden Punkten enthalten (Geschäftsgeheimnisse des ZE brauchen nicht offenbart zu werden):

Es sind Technologien derart weiterentwickelt und innoviert worden, dass diese für zukünftige Wertschöpfung genutzt werden können. Dazu zählen: Strukturierungsverfahren von Hartmetallwalzen, Umformsimulationen und Umformungen, Entwicklung von Laserprozessen für BPP, Beschichtungen für BPP.

- Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Die hier betrachteten Technologien bieten sehr hohen Innovationsgehalt im Bezug zur Brennstoffzellentechnologie. Mögliche Schutzrechtsanmeldungen können durch Konsortialpartner folgen.

- Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Durch die Entwicklung einer automatisierten und kontinuierlichen R2R- Konzeptionierung der BPP-Fertigungslinie wird eine erhebliche Effizienz- und Qualitätssteigerung der zugehörigen Wertschöpfungskette erreicht und ein wirtschaftlicher Nutzen für Unternehmen erzielt. Die R2R-Konzeptionierung liefert zudem ein hochskalierbares Handhabungskonzept und macht damit hohe Produktionsvolumen möglich. Die bezüglich der Zykluszeit problematischen und kostenaufwendigen Handlingskonzepte, die bei der jetzigen BPP-Fertigungskette notwendig sind, werden durch den CoBiP-Ansatz substituiert. Weitere Projekte zur kontinuierlichen Fertigung von Brennstoffzellen wie auch von Elektrolyseuren sind bereits in der Ausarbeitung (Technologietransfer). Die R2R-Fertigung von BPP ist eine in der Nachfrage wachsende Fertigungsmethode zur Hochskalierung geworden. Einzelne Technologien der Fertigungslinie werden bereits in Transferprojekten genutzt. Die Wirtschaftlichkeit kann durch die Erhöhung der Bahngeschwindigkeit, der Vergrößerung der Bahnbreiten/-umfänge und durch die erhöhte Ausnutzung der Walzenfläche gesteigert werden. Ein wichtiger Schritt in der Hochskalierung bezieht sich auf die

Erhöhung der Bahngeschwindigkeit. Dieses kann durch Kompetenzen der Partner im Projektvorhaben in nachfolgenden Untersuchungen getestet werden. In der jetzigen Projektphase werden Tools für die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Gesamtanlage und eine Prozesskostenrechnung mit den Partnern finalisiert, die mit Realdaten geprüft werden können. Dies liefert wichtige Hinweise auf die wirtschaftliche Verwertung der Gesamtidee.

- Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Auf nationalen und internationalen Fachkonferenzen wurden Ergebnisse des Projektes einem breiten Fachpublikum präsentiert werden. Die Teilnahme an nationalen und internationalen Fachkonferenzen ermöglicht den direkten und intensiven Austausch mit Experten im Bereich der Brennstoffzellentechnologie sowie insbesondere die Publikation der erarbeiteten Projektergebnisse.

Messebesuche tragen dazu bei, dass die wissenschaftlichen Mitarbeiter des beantragten Projekts ihre Kenntnisse über den Markt aktualisieren und zusätzliche Anwendungen der erforschten Technologie sowie weitere potenzielle Anwender ausfindig machen können. Sie dienen der Technologierecherche und dem fachlichen Austausch mit Herstellern und Anwendern. Darüber hinaus bieten die Besuche die Möglichkeit, das eigene Projekt darzustellen und weitere potenzielle Interessenten für verwandte Themenschwerpunkte zu akquirieren. Eine Veröffentlichung des FZJ ist bereits erschienen, eine weitere des Fraunhofer IPT wird derzeit geprüft.

- Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Das Projektkonsortium stärkt durch die Durchführung dieses Projektes seine technologische Position in der Forschungs- und Entwicklungsbranche im Bereich der Brennstoffzellentechnologie und Produktion. Weiterhin können durch den Technologietransfer der in CoBiP erforschten Ansätze neue Forschungsgebiete im Bereich der Elektrolyseursysteme erschlossen werden. Weitere Projektideen auf die kontinuierliche Umsetzung der Fertigungslinie aufbauend sind bereits in der Planung.

5. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Folgende Punkte sind weiterhin im Fokus der Forschung & Entwicklung:

- Optimiertes Design für das kontinuierliche Fertigen von BPPs (Walzprägen)
- Ebenheit der walzgeprägten BPPs
- Kontinuierliches Anpressen für das Laserschweißen

6. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer – z.B. Anwenderkonferenzen (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt)

Die Ergebnisse des Projektvorhabens werden durch die Konsortialpartner auf verschiedenen Messen gezeigt. Veröffentlichungen wurden durch die Konsortialpartner umgesetzt. Die R2R-Gesamtanlage kann für weiterführende Fragestellungen am Fraunhofer IPT genutzt werden.

7. Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Die Kostenplanung in dem Projektvorhaben CoBiP wurde eingehalten. Die Projektlaufzeit wurde aufgrund der pandemiebedingten Auswirkungen um sechs Monate verlängert. Einige AP-Inhalte wurden stark beeinflusst.

I. Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Gantt-Chart CoBiP Projektvorhaben | 5 |
| Abbildung 2: (a) CoBiP_BPP_Testdesign (b) CoBiP_BPP_Distance_Testdesign (c) CoBiP_BPP_Aspect_Testdesign..... | 11 |
| Abbildung 3: CoBiP_BPP_Kathodenausschnitt für relevante vorgelagerte Prozesstests | 11 |
| Abbildung 4: Bild der beschafften Membran-Elektroden-Einheit (MEA) für den CoBiP Shortstack/Einzeller | 12 |
| Abbildung 5: Qualitative Berechnungsergebnisse der Geschwindigkeitsverteilung auf der Kathodenseite der BPP | 14 |
| Abbildung 6: Qualitative Berechnungsergebnisse der Geschwindigkeitsverteilung auf der Anodenseite der BPP | 14 |
| Abbildung 7: Strömungsgeschwindigkeit im Kühlmittelkompartiment, a) auf halber Höhe der Kanaltiefe der Anodenhalbschale und b) auf halber Höhe der Kanaltiefer der Kathodenhalbschale | 15 |
| Abbildung 8: CAD-Daten der Halbschalen für die Prägewalzen | 15 |
| Abbildung 9: Schnittbild der BPP und Abmessungen der Kanal-Steg-Strukturen | 16 |
| Abbildung 10: Dichtungsnut der BPP mit lokalen Höhenunterschieden | 16 |
| Abbildung 11: Ersatzdichtungskonzept mit selbstklebender Dichtung auf den Stegen neben der Dichtungsnut..... | 17 |
| Abbildung 12: Komponenten und Aufbau zur Erprobung des Flowfields der Kathodenhalbschale..... | 18 |
| Abbildung 13: Druckverlust des Flowfields der Kathode | 18 |
| Abbildung 14: CAD-Modell: (a) Vorderansicht, (b) Seitenansicht und (c) isometrische Ansicht..... | 19 |
| Abbildung 15: Netz der Matrize: (a) isometrische Ansicht, (b) Details im BPP-Bereich, (c) nähere Ansicht der Diskretisierung des Mikrokanalnetzes..... | 19 |
| Abbildung 16: (a) Experimentelle Daten zum plastischen Verhalten von EN1.4404 und (b) Schema der auferlegten Randbedingungen | 20 |
| Abbildung 17: Verformungsprozess eines Blechrohrlings | 21 |
| Abbildung 18: Vergleich des geformten und des idealen Querschnitts: (a) Gesamtansicht, (b) mittlerer Bereich und (c) linker Bereich | 21 |
| Abbildung 19: Messbereiche in gebildeten BPP für Ergebnisbewertung | 22 |
| Abbildung 20: Response Surfaces für verschiedene Prozessparameter im Mikrowalzumformen | 23 |
| Abbildung 21: Verteilung der (a) Dickenwerte [mm] und (b) äquivalenten plastischen Dehnungen für optimierte Parametersätze | 24 |
| Abbildung 22: Beispiel eines konstruierten Walzenpaares mit der CoBiP_Kathode | 25 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 23: Links: Darstellung des Testdesigns für Vorab-Tests; Rechts: Testdesign auf einer Testwalze..... | 26 |
| Abbildung 24: Draufsicht (links) und Querschnitt (rechts) eines Kanals aus einem gefertigten Testdesign | 27 |
| Abbildung 25: Direktiodenmodul mit 940 nm Wellenlänge..... | 27 |
| Abbildung 26: Lokale Laserschutzumhausung zur Integration des Lasererwärmungsmoduls in das R2R-Abwicklermodul | 28 |
| Abbildung 27: Lasererwärmungsmodul..... | 28 |
| Abbildung 28: Foto von strukturierten Prägewalzen mit mehreren Halbschalen-Varianten während eines Prägeversuchs..... | 29 |
| Abbildung 29: Mikroskopaufnahme des Querschliffs einer geprägten Halbschale im Bereich des Flowfields | 29 |
| Abbildung 30: Oszilloskopaufzeichnung einer Geschwindigkeitsmessung..... | 32 |
| Abbildung 31: Soll- und Ist-Verlauf anhand der Geschwindigkeitsmessung inkl. Fehlerquotient der beiden Verläufe | 32 |
| Abbildung 32: Oszilloskop-aufzeichnung der Messung von A_s und f_s | 33 |
| Abbildung 33: Graphische Darstellung der Ist-Oszillationsamplituden über der Frequenz..... | 33 |
| Abbildung 34: Berechnung der Variierung der Wobble-Amplitude und Frequenz in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit | 34 |
| Abbildung 35: Abhängigkeit der erreichbaren Schneidgeschwindigkeit als Funktion der Laserleistung bei Fokusslage $z=0$ mm | 35 |
| Abbildung 36: Abhängigkeit der erreichbaren Schneidgeschwindigkeit als Funktion der Fokusslage bei Laserleistung $P=1$ kW..... | 36 |
| Abbildung 37: Abhängigkeit der Bartlänge als Funktion der Schneidgeschwindigkeit bei Fokusslage $z=0$ mm und Laserleistung $P=1$ kW | 36 |
| Abbildung 38: Bartbildung in Abhängigkeit der Fokusslage..... | 37 |
| Abbildung 39: Bartbildung in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes | 38 |
| Abbildung 40: Schnitt in Material mit Prägung für Kanäle. Sicht auf die Blechunterseite. | 38 |
| Abbildung 41: Kaustikvergleich Single/Multimodelaser für die eingesetzten Abbildungsverhältnisse (2,1 und 1,25)..... | 39 |
| Abbildung 42: Bartbildung | 39 |
| Abbildung 43: Abtrag beim Remoteschneiden in Single- und Multi-pass Scanstrategie | 40 |
| Abbildung 44: Setup Remoteschneiden | 41 |
| Abbildung 45: Schnittergebnis in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit. Bei Scangeschwindigkeit 1 und 2 m/s nicht getrennt, bei 6 und 7 m/s erste Stege im Schnittspalt. | 41 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 46: Erforderliche Scans in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit (links) und effektive Schneidgeschwindigkeiten (rechts)..... | 42 |
| Abbildung 47: Maximale Schneidgeschwindigkeit skaliert auf die Laserleistung..... | 43 |
| Abbildung 48: Bartbildung in Abhängigkeit von Scangeschwindigkeit, Laserstrahlleistung und Materialdicke und Ober- und Unterseite eines Schnittes. | 43 |
| Abbildung 49: Schnittkanten von Multipass-Remoteschnitt in 0,2 mm Blechdicke. Die Markierung im Ausschnitt unten links weist auf einen in die Schnittfuge ragenden Schmelzfaden hin..... | 44 |
| Abbildung 50: Vergleich der Schnittqualität zwischen gasunterstütztem und Remoteschnitt..... | 45 |
| Abbildung 51: Mögliche Einlauffehler der metallischen Bänder und Ausrichtemerkmale zur Vermessung dieser | 46 |
| Abbildung 52: CAD-Modell des Anpressmoduls mit ausgeblendeter Umhausung | 48 |
| Abbildung 53: Vollständig montiertes und in das R2R-Lasermodul integrierte Anpressmodul..... | 48 |
| Abbildung 54: Beispiel Bilder für die vier Nahtkategorien | 49 |
| Abbildung 55: Ergebnisse aus der Parametersuche ohne ö.L.M. (links) und ein Oberflächenbild und Querschliffbild als Beispiel (rechts) | 49 |
| Abbildung 56: Ergebnisse aus der Parametersuche mit ö.L.M. ($A=0,05\text{mm}$ und $f_s=4000\text{Hz}$) | 50 |
| Abbildung 57: Verschweißte halbbeschichtete BPP mit dem CoBiP Prototyp-Design | 51 |
| Abbildung 58: Verschweißte doppelbeschichtete BPP mit dem CoBiP Prototyp-Design | 51 |
| Abbildung 59: Aufnahmen des BPP-Teildesigns nach dem Schweißen a) obere Seite b) untere Seite c) Schweißstelle mit Lochbildung d) erfolgreiche Schweißstelle..... | 52 |
| Abbildung 60: Aufbau der Spannvorrichtung für die Schweißversuche | 53 |
| Abbildung 61: Lösung zur Schutzgas Verteilung in der Lamellenplatte | 53 |
| Abbildung 62: Zugehörige RAYLASE Scanner Benutzeroberfläche mit Live-Bild Positionierung | 54 |
| Abbildung 63: 4D Sensor Aufnahmen | 55 |
| Abbildung 64: Mikroskop-Aufnahmen am Teildesign | 55 |
| Abbildung 65: Vergleich der Schnittfugenbreiten bei Einsatz des Multimode- und des Singlemode Faserlasers | 56 |
| Abbildung 66: Oberseite (links) und Unterseite (rechts) des unteren Blechs bei Schnitten durch doppelagiges Blech mit Spalt. Parameter s.Tabelle 6..... | 57 |
| Abbildung 67: Querschliffe von Schnitten durch doppelagiges Material in 1 mm Entfernung und 0,25 mm Entfernung zur Schweißnaht. Das Beispiel rechts zeigt einen geringfügigen Spalt zwischen den Blechen an der Schnittkante, der die Qualität nicht beeinträchtigt..... | 57 |
| Abbildung 68: Elektrochemische Messzelle | 59 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 69: Muster der während des Projektes zu fertigenden BPP. Links: Manifoldbereich Kathode, mitte: Erster Prototyp der gewalzten BPP, rechts: Manifoldbereich Anode. | 59 |
| Abbildung 70: Messung der Kontaktwiderstände einer beschichteten, durch Walzenprägung umgeformten Halbschale. | 60 |
| Abbildung 71: Mikroskopische Untersuchung der Oberfläche einer ausgelagerten Halbschale. | 60 |
| Abbildung 72: Mikroskopaufnahmen der Oberflächen der untersuchten Proben | 61 |
| Abbildung 73: unregelmäßig strukturierte Probe, rechts: regelmäßig strukturierte Probe mit nadelförmigen Spitzen. (Bildquelle: Fraunhofer-ILT) | 62 |
| Abbildung 74: Untersuchung der Probe CLP 130 vor der Beschichtung. Links: Mikroskop-aufnahme, rechts: Benetzungsverhalten. | 63 |
| Abbildung 75: Untersuchung der Probe CLP 30 vor der Beschichtung. Links: Mikroskopaufnahme, rechts: Benetzungsverhalten. | 63 |
| Abbildung 76: Untersuchung der Probe CLP 15 vor der Beschichtung. Links: Mikroskopaufnahme, rechts: Benetzungsverhalten. | 64 |
| Abbildung 77: Untersuchung der Probe RAU vor der Beschichtung. Links: Mikroskopaufnahme, rechts: Benetzungsverhalten. | 64 |
| Abbildung 78: Behandlung eines beschichteten Bleches mit Nanopartikel-Lösung. | 65 |
| Abbildung 79: Skizze zu Vernetzungsstörung bei Zugabe von Fremdpartikeln zu der Beschichtungssuspension. Oben: Zugabe von hydrophilisierenden Partikeln, unten: Zugabe von hydrophobisierenden Partikeln. | 66 |
| Abbildung 80: Messstand zur Untersuchung des Durchgangswiderstandes von flachen und geprägten Strukturen | 67 |
| Abbildung 81: Prototyp des automatischen Messsystems zur Ermittlung des elektrischen Durchgangswiderstandes | 68 |
| Abbildung 82: Dauerlauf eines Testflowfields für 2470 h zur Untersuchung der Langzeitalterung | 68 |
| Abbildung 83: Probe nach der Auslagerung in einer 3-Elektroden-Zelle für 2470 h..... | 69 |
| Abbildung 84: Mikroskopische Untersuchung der ausgelagerten Probe | 69 |
| Abbildung 85: Langzeituntersuchung des Korrosionsstromes eines beschichteten Glatblechs in der 3-Elektroden-Messzelle mit dem DOE-Elektrolyten. | 70 |
| Abbildung 86: Auslagerung einer Probe im Standard Elektrolyten für 1000 h. | 71 |
| Abbildung 87: post mortem Untersuchung der 1000 h Standard Elektrolyt Probe im Auflichtmikroskop. Links: Untersuchung des zentralen Probenbereichs, rechts: Untersuchung der verfärbten Stelle im Dichtungsbereich. | 72 |
| Abbildung 88: Auslagerung einer Probe im DOE Elektrolyten für 1000 h bei 0,9 V. | 72 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 89: post mortem Untersuchung der 1000 h DOE Elektrolyt Probe im Auflichtmikroskop. Links: Untersuchung des zentralen Probenbereichs, rechts: Untersuchung der verfärbten Stelle im Dichtungsbereich. | 73 |
| Abbildung 90: Vergleich der Auslagerungstests im DOE- und Standard Elektrolyten bei 0,9 V und 0,6 V. | 74 |
| Abbildung 91: Untersuchung der Kontamination von Substratblechen mit der Hilfe von Testtinten. | 75 |
| Abbildung 92: Integriertes Kamerasystem mit Lichtschranke zur visuellen Bauteilinspektion. | 76 |
| Abbildung 93: Messanordnung zur kontinuierlichen Messung des Kontaktwiderstandes der beschichteten Bauteile. | 77 |
| Abbildung 94: Prozesskette und zugehörige Outputs. | 78 |
| Abbildung 95: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungstool – Startseite mit: (1) Hauptinformationsband, (2) Prinzipschaubild, (3) Modulkosten und zugehörigen Wasserfalldiagramm, (4) Gesamtkosten pro BPP ... | 79 |
| Abbildung 96: CAD der CoBiP R2R-Gesamtmaschine. | 85 |
| Abbildung 97: Umsetzung Abwicklermodul. | 86 |
| Abbildung 98: Umsetzung Lasermodule. | 87 |
| Abbildung 99: Konstruktion der Klemmstelleneinheit. | 88 |
| Abbildung 100: Laserschneidkonzept zur Integration in die R2R-Fertigungslinie. | 88 |
| Abbildung 101: Konstruktion der Laserschneideinheit. | 89 |
| Abbildung 102: Umsetzung Aufwicklermodul. | 89 |
| Abbildung 103: Aufbau der CoBiP-Gesamtmaschine am Fraunhofer IPT. | 91 |
| Abbildung 104: Saueressig Laborkalender. Die Konstruktion dieses Kalenders dient als Grundlage für die Konstruktion des R2R-Moduls. | 92 |
| Abbildung 105: Foto des Kalendermoduls während der Integration in die R2R-Anlage. | 93 |
| Abbildung 106: Übersicht der Betriebszustände der R2R-Fertigungslinie. | 93 |
| Abbildung 107: Auszug aus der entwickelten HMI zur Bedienung der CoBiP-Maschine. | 95 |
| Abbildung 108: Mit Remoteschnitt geschnittene Manifolds und Details im Bereich der Schlitzöffnungen zur Gasversorgung (links Oberseite, rechts Unterseite). | 96 |
| Abbildung 109: Schlitzöffnung vollständig geschnitten (links) und mit Steg am Schnittpunkt/Ende, der das Herauslösen des Mittelteils verhindert. | 97 |
| Abbildung 110: Schneidkopf und Positionierkamera über der verschweißten BPP. Die im Bild bereits vorhandenen Öffnungen der Platte wurden vor dem Schweißen mit dem Scanner geschnitten (Remoteschnitt). | 98 |
| Abbildung 111: Verschweißte und zugeschnittene Platte. | 99 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 112: Schnittdetails; Links: Portöffnungen mit korrekter Positionierung Schweißnaht auf der linken Seite und Positionsfehler auf der rechten Seite. Rechts: Schnittkante und Schweißnahtsegment an der Außenkontur. | 99 |
| Abbildung 113: Explosionsdarstellung (CAD-Modell) aller Stackkomponenten am Beispiel einer | 100 |
| Abbildung 114: Vergleich der Polarisationskurven der zwei Gasdiffusionslagen 36BB und 39BB | 101 |
| Abbildung 115: Einzelzelle im realen Aufbau | 101 |
| Abbildung 116: Mit Silikon befüllte Leckagestelle in der Nähe der Manifolds | 102 |

II. Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Primäre Kategorisierung und Anforderungen | 10 |
| Tabelle 2: Technische Spezifikation der BPP-Attribute..... | 10 |
| Tabelle 3: Geräteeigenschaften des verwendeten Aufbaus | 31 |
| Tabelle 4: Optische Konfiguration und konstante Prozessparameter | 35 |
| Tabelle 5: Optische Konfiguration zum Remoteschneiden | 40 |
| Tabelle 6: Versuchsparameter zu Versuchsreihen „variabler Spaltabstand“ | 56 |
| Tabelle 7: Untersuchung des Kontaktwinkels von Proben mit unterschiedlichen Oberflächen. Die Werte wurden aus mehreren Messungen gemittelt. | 62 |
| Tabelle 8: Probenmatrix Laserstrukturierte Proben. | 63 |
| Tabelle 9: Zusammenfassung der Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung der Laserstrukturierten Proben | 64 |
| Tabelle 10: Mischungsverhältnisse und Ergebnisse für Beschichtungsversuche mit zugemischter Nanopartikel-Lösung. | 65 |
| Tabelle 11: Ergebnisse der Messungen des Durchgangswiderstandes nach Auslagerung | 67 |
| Tabelle 12: Zusammensetzung verschiedener Elektrolyte, die für die elektrochemische Untersuchung verwendet werden. | 70 |
| Tabelle 13: Versuchsmatrix für Langzeitauslagerungstest in der 3-Elektroden-Messzelle | 71 |
| Tabelle 14: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den durchgeführten Langzeitauslagerungen bei 0,9 V | 73 |
| Tabelle 15: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den durchgeführten Langzeitauslagerungen bei 0,6 V. | 74 |
| Tabelle 16: Untersuchung der Oberflächenenergie verschiedener Proben mittels Testtinten. | 75 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 17: Prozessgeschwindigkeitsanalyse der einzelnen Module | 80 |
| Tabelle 18: Jährlicher Rüstaufwand pro Modul | 81 |
| Tabelle 19: Übersicht ausgewählter Szenarien mit den einflussreichsten Attributen | 81 |
| Tabelle 20: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der CoBiP-Anlage | 82 |
| Tabelle 21: Hauptanforderungen der CoBiP-Gesamtmaschine | 84 |
| Tabelle 22: Beschreibung der Hauptkomponenten innerhalb der CoBiP-Gesamtmaschine | 90 |
| Tabelle 23: Ausrüstung zum Remoteschneiden der Schlitzöffnungen | 96 |
| Tabelle 24: Erzielte Ergebnisse im Vergleich zum Projektbeginn | 103 |