

Forschungsprojekt

PowerPaste - Mobile Wasserstoffversorgung der nächsten Generation

im Rahmen der BMWK-Förderinitiative

7. Energieforschungsprogramm

„Innovationen für die Energiewende: Systemintegration (Stromnetze, Stromspeicher sowie Sektorenkopplung und Wasserstofftechnologien)“

Schlussbericht

Beitrag des
Zuwendungsempfängers: Vitesco Technologies GmbH
Siemensstr. 12
93055 Regensburg

zum Teilprojekt: Entwicklung und Fertigung einer flüssiggekühlten Brennstoffzelle mit ca. 1 kW elektrischer Ausgangsleistung

Laufzeit: 01.11.2020 - 31.12.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03EI3026D gefördert.

Für den Inhalt dieser Veröffentlichung haften die Autoren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Regensburg, 30.06.2025

Dieser Bericht wurde erstellt durch die

Vitesco Technologies GmbH

Stefan Granzow

mit Zuarbeit von

Christian Hüfers
Stephan Bartz
Andreas Heinrich
Frank Todt
Frank Dietrich

Inhaltsverzeichnis:

1	Kurzdarstellung	5
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	5
1.1.1	Zielsetzung der Arbeitspakete von Vitesco Technologies GmbH	5
1.2	Voraussetzungen des Vorhabens	6
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.4	Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektstart.....	7
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
1.5.1	Zusammenarbeit mit den Partnern	9
1.5.2	Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten und Hochschulen	9
2	Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse.....	10
2.1	Systemanalyse und -anforderungen	10
2.1.1	Brennstoffzellenspezifikation	10
2.1.2	Systemsteuerung und Brennstoffzellensystemauslegung	14
2.1.2.1	Systemsteuerung	15
2.2	Bipolarplattenherstellung.....	17
2.2.1	Vorversuchsmuster.....	18
2.2.2	Tiefziehen	21
2.2.2.1	Einstufiger Tiefziehprozess	21
2.2.3	Laserschweißen	25
2.2.3.1	Auslegung des Schweißkonzeptes	25
2.2.3.2	Stützschweißungen.....	26
2.2.3.3	Dichtnahtschweißungen.....	27
2.2.4	Bipolarplattenbeschnitt	30
2.2.4.1	Submanifolds ausschneiden	30
2.2.4.2	Konturbeschnitt.....	31
2.2.5	Dichtheitsprüfung.....	33
2.2.5.1	Versuchsaufbau Dichtheitstest.....	33
2.2.5.2	Dichtungsauftrag.....	35
2.2.6	Übersicht gelieferter Komponenten	36
2.3	Systemaufbau und Integration	38
2.3.1	Brennstoffzellensystemauslegung	38
2.3.1.1	Kathodenpfad.....	38
2.3.1.2	Anodenpfad.....	40
2.3.1.3	Kühlkreislauf	41
2.3.2	Systemaufbau.....	44
2.3.3	Kommunikation.....	45
2.3.3.1	Errorhandling	47
2.3.4	Prüfstands- und Systemversuchsergebnisse.....	48
2.4	Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	51
2.5	Berichte, Vorträge und Veröffentlichungen	51
2.6	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen	51
3	Referenzen.....	52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: P& ID Schema Ausschnitt.....	15
Abbildung 2: Prozessablaufplan Bipolarplattenfertigung	18
Abbildung 3: Messtechnische Überprüfung der Vorversuchsmuster	19
Abbildung 4: Foto Vorversuchsmuster 2.....	20
Abbildung 5: Herstellung der Tiefziehgesenke	22
Abbildung 6: Säulengestell mit Tiefziehgesenken in Hydraulikpresse	23
Abbildung 7: Tiefgezogene Anoden- und Kathodenplatten	23
Abbildung 8: Detailansichten der hergestellten Strukturen	24
Abbildung 9: Messtechnische Überprüfung der hergestellten Halbplatten	24
Abbildung 10: konstanter Energieeintrag führte zu Schweißfehlern	28
Abbildung 11: gepulstes Verfahren für Dichtnahtschweißung	28
Abbildung 12: Vorversuchsmuster zur Herstellung der Submanifolds	31
Abbildung 13: Final beschnittene Bipolarplatte.....	32
Abbildung 14: Exemplarische Darstellung des Dichtheitsprüfprotokolls	34
Abbildung 15: Powerpaste Stack.....	37
Abbildung 16: Kennfeld des im Projekt eingesetzten Verdichters.....	39
Abbildung 17: Prüfaufbau des Systempfades der Kathode	39
Abbildung 18: Gesamtaufbau der Systempfade	43
Abbildung 19: Übergeordnete Kommunikationsstruktur	45
Abbildung 20: Auszug aus der CAN- Gesamtstruktur.....	46
Abbildung 21: Darstellung der Erreichten Systemleistung bei Labortests	49
Abbildung 22: Integriertes System in Demonstratorfahrzeug.....	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Stack- und Systemanforderungen.....	12
--	----

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Trotz der Serienreife von Brennstoffzellenfahrzeugen bleibt deren Anteil an der Elektromobilität gering, was vor allem an der unzureichenden Wasserstoff-Infrastruktur liegt. [1] [2] Besonders für kleinere Antriebssysteme wie E-Bikes oder Drohnen existieren bislang keine geeigneten Betankungslösungen, während der Bedarf an elektrischen Antrieben in verschiedensten Bereichen stetig wächst. Die aktuelle Batterietechnologie stößt hinsichtlich Energiedichte, Ladezeiten und Infrastruktur an Grenzen, und auch Druckwasserstoff ist für viele kleinere Anwendungen weder technisch noch wirtschaftlich sinnvoll.

Ziel des Projekts PowerPaste ist es, eine kompakte, flexible und modulare Energieversorgung für elektrische Antriebe auf Brennstoffzellenbasis zu entwickeln und zu erproben, die unabhängig von der klassischen Wasserstoff-Infrastruktur funktioniert. Im Fokus steht zunächst der Einsatz in flottentauglichen Kleinfahrzeugen. PowerPaste ermöglicht durch drucklose Wasserstoffspeicherung eine einfache und sichere Logistik sowie hohe Energiedichte, was neue Einsatzmöglichkeiten für emissionsfreie Elektromobilität eröffnet. Ziel ist es, die Praxistauglichkeit und das wirtschaftliche Potenzial dieser Technologie im realen Betrieb zu demonstrieren und damit einen Beitrag zur Lösung der Energie- und Infrastrukturprobleme in der Elektromobilität zu leisten.

1.1.1 Zielsetzung der Arbeitspakete von Vitesco Technologies GmbH

Vitesco Technologies fokussierte sich im Rahmen des Teilvorhabens des Projektes „Bedarfsgerechte Wasserstoffherzeugung mittels PowerPaste für PEM-Brennstoffzellen“ auf die Entwicklung und Fertigung einer wassergekühlten Brennstoffzelle, die gezielt für den Betrieb in Kombination mit dem PowerPaste-Wasserstoffgenerator ausgelegt und optimiert wurde. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Abstimmung des Zell- und Stack-Designs sowie der optimierten Betriebsführung der Brennstoffzelle im Zusammenspiel mit „feuchtem Wasserstoff“. Die Auslegung des Anoden-Flussfelds, die Konstruktion der metallischen Bipolarplatten und das Endplatten- bzw. Medienmodul wurden gemeinsam mit dem ZBT entwickelt und optimiert. Das Brennstoffzellensystem wurde als flüssiggekühlt konzipiert und mit einer geschlossenen Kathode ausgestattet, was eine besonders kompakte Bauweise des Stapels ermöglichte.

Seit Oktober 2024 ist die Vitesco Technologies Group AG Teil der Schaeffler AG. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Lösungen werden dadurch zukünftig auch innerhalb des erweiterten Unternehmensverbundes nutzbar gemacht und weiterentwickelt.

1.2 Voraussetzungen des Vorhabens

Das Vorhaben wurde durch das Fraunhofer-Institut initiiert und als Verbundprojekt gemeinsam mit mehreren Partnern umgesetzt. Zu Beginn des Projektes waren zahlreiche organisatorische, technische und wissenschaftliche Voraussetzungen gegeben, die eine zielgerichtete Umsetzung des Vorhabens ermöglichten. Vitesco Technologies verfügte über umfangreiche Erfahrungen und Kompetenzen im Bereich moderner Antriebstechnologien, insbesondere im Hinblick auf Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellentechnologien. Die technische Umsetzung des Projekts sollte schwerpunktmäßig durch die Abteilung „Technology & Innovation“ am Standort Schwalbach erfolgen, wobei weitere spezialisierte Abteilungen unterstützend eingebunden waren.

Auch die Zusammenarbeit mit dem Zentrum für BrennstoffzellenTechnik (ZBT) war etabliert, sodass wissenschaftliche Expertise und Simulationskompetenz von Beginn an in das Projekt einfließen. Die Aufgabenverteilung und die Kooperation mit weiteren Partnern, wie dem Projektpartner EMEC für die Integration ins Fahrzeug, waren klar geregelt. Als Anwendungsszenario war die Entwicklung eines Systems für Klein- und Leichtfahrzeuge im Logistik- und Verteilverkehr vorgesehen, wobei ein Demonstratorfahrzeug die Funktionsfähigkeit der kombinierten Wasserstoffherzeugung und Brennstoffzellentechnologie unter realen Einsatzbedingungen demonstrieren sollte.

Die beteiligten Verbundpartner am Projekt Powerpaste waren:

- Fraunhofer IFAM
- Vitesco Technologies GmbH
- Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH (ZBT)
- EMEC Prototyping GmbH
- Otto von Guericke Universität Magdeburg
- AVA Maschinenservice GmbH

Der Konsortialvertrag wurde im Februar 2021 von allen oben genannten Beteiligten abgeschlossen. Die Partner verfügen allesamt über das jeweilige Knowhow, das Projekt erfolgreich durchzuführen.

Das Konsortium bedankt sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung und beim Projektträger Jülich (PTJ) für die Abwicklung.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Bei der Planung des Projektes PowerPaste konnte auf die Erfahrungen aus vorangegangenen BMWK- und EU-Projekten zurückgegriffen werden. Die Planung konnte daher – auch aufgrund der guten Kooperation mit den anderen Verbundpartnern – zügig abgeschlossen und konsequent umgesetzt werden.

1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektstart

Zu Beginn des PowerPaste-Projekts Anfang 2020 befand sich der wissenschaftlich-technische Stand im Bereich der mobilen Wasserstoffspeicherung und -versorgung an einem entscheidenden Wendepunkt. Zwar hatten Brennstoffzellenfahrzeuge zu diesem Zeitpunkt bereits die Serienreife erreicht, doch spielten sie im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen weiterhin eine untergeordnete Rolle. Ein wesentlicher Grund hierfür war die fehlende Infrastruktur zur Betankung von Wasserstofffahrzeugen, insbesondere für kleinere Antriebssysteme im Leistungsbereich von einigen 100 Watt bis etwa 5 Kilowatt. Während es in Deutschland zum Zeitpunkt der Projektskizze lediglich rund 74 Wasserstofftankstellen für Pkw mit 700-bar-Technologie gab, existierte für kleinere Anwendungen praktisch keine geeignete Betankungsinfrastruktur.[3] Die verfügbaren Wasserstoffspeichertechnologien – hauptsächlich Hochdruck- oder Flüssigwasserstoff – waren für viele mobile Anwendungen technisch wie wirtschaftlich ungeeignet und stellten somit ein unüberwindbares Hindernis dar.

Gleichzeitig stieg der Bedarf an elektrischen Antrieben für unterschiedlichste mobile Anforderungen und Leistungsbereiche kontinuierlich an. Dies betraf nicht nur den Automobilbereich, sondern auch wachstumsstarke Märkte wie den europäischen Leih- und Flottenfahrradsektor oder den Bereich unbemannter kommerzieller Luftfahrtsysteme (UAS). Für E-Bikes, insbesondere Flotten- und Logistikanwendungen, wurde eine jährliche Wachstumsrate von über 9 Prozent prognostiziert. [1] Die damals eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien verfügten meist über eine Kapazität von weniger als 500 Wh, was im Flottenbetrieb Reichweiten von unter 40 Kilometern bedeutete. Die Vollladung eines Akkus dauerte etwa acht Stunden, und die Logistik für Ersatzbatterien war aufgrund des hohen Gewichts und der Kosten mit erheblichen Zusatzaufwänden verbunden. [1] [4] Auch für andere Elektromobilitätslösungen, wie Drohnen, war die damals verfügbare Batterietechnologie ein limitierender Faktor – insbesondere wegen der begrenzten spezifischen Energie und der langen Ladezeiten.

Vor diesem Hintergrund war klar, dass Batterien nicht alle Herausforderungen der Energiespeicherung lösen konnten. Auch die klassische Wasserstoffspeicherung mittels Druckgasflaschen oder Flüssigwasserstoff war für viele Anwendungen – insbesondere für kleinere Antriebe und geringeren Energiebedarf – weder technisch noch wirtschaftlich sinnvoll. Eine flächendeckende Infrastruktur für Druckwasserstoff, vergleichbar mit dem bestehenden Tankstellennetz, erschien aus wirtschaftlichen Gründen kaum realisierbar. Gerade für Anwendungen wie E-Bikes, UAS oder Range-Extender für batterieelektrische Fahrzeuge fehlten somit geeignete Lösungen.

Das PowerPaste-Projekt setzte genau an diesem Punkt an: Ziel war die Entwicklung und Erprobung einer kompakten, modularen und von der klassischen Wasserstoffinfrastruktur unabhängigen Energieversorgung für elektrische Antriebe auf Brennstoffzellenbasis. PowerPaste ist ein innovativer, flüssiger bzw. pastöser Wasserstoffspeicher, der Wasserstoff bedarfsgerecht und quasi drucklos durch eine gesteuerte chemische Reaktion mit Wasser freisetzt. [5] [6] [3] Die Technologie sollte zunächst für flottentaugliche Elektrofahrräder entwickelt und erprobt werden, wobei ein unmittelbares wirtschaftliches Verwertungspotenzial bestand. Darüber hinaus war die flexible und modulare Auslegung der Technologie vorgesehen, um sie später auch für andere Einsatzszenarien wie unbemannte Luftfahrtsysteme oder Range-Extender weiterentwickeln zu können.

Zum Projektstart war der Technologiereifegrad (TRL) von PowerPaste auf Stufe 5 einzuordnen, was einer Validierung im relevanten Umfeld entspricht. Ziel des Projekts war es, durch Entwicklung und Erprobung den Sprung zu TRL 7 – also zur Systemdemonstration im Einsatz – zu schaffen. Die angestrebte spezifische Energie des Gesamtsystems aus PowerPaste, Wasser, Wasserstoffgenerator und Brennstoffzelle sollte bei 200 bis 250 Wh/kg liegen und damit besser sein als alle damals für E-Bikes verfügbaren Batteriesysteme. Die Nachfüllkartuschen sollten eine spezifische Energie von etwa 1,2 kWh/kg erreichen. Auch in Bezug auf Kosten, Wartungsaufwand und Recycling sollte das System für den Flottenbetrieb optimiert werden. [5] [6] [3]

Insgesamt war der wissenschaftlich-technische Stand bei Projektstart durch eine Vielzahl ungelöster Herausforderungen in der mobilen Wasserstoffspeicherung und -logistik geprägt. PowerPaste setzte genau hier an, um eine innovative, wirtschaftliche und praxistaugliche Lösung für eine neue Generation mobiler elektrischer Antriebe zu schaffen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

1.5.1 Zusammenarbeit mit den Partnern

Besonders erwähnenswert ist die offene und gute Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern in allen Arbeitspaketen, an denen Vitesco Technologies beteiligt war.

1.5.2 Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten und Hochschulen

Die Zusammenarbeit mit externen Stellen war von Beginn an ein wichtiger Bestandteil des Projekts und wurde maßgeblich durch die Initiative des Fraunhofer-Instituts angestoßen. Bereits zu Projektbeginn bestanden enge Kontakte zu deutschen Forschungsinstituten, Universitäten und Hochschulen, die den fachlichen Austausch und die gemeinsame Entwicklung innovativer Lösungen förderten. Besonders hervorzuheben ist die intensive Kooperation mit den im Projekt beteiligten Partnern, zu denen das Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT), das Fraunhofer IFAM sowie die Universität Magdeburg zählten. Diese Partner brachten jeweils ihre spezifische wissenschaftliche und technische Expertise ein und trugen so entscheidend zum Erfolg des Gesamtvorhabens bei. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit ermöglichte es, neueste Forschungsergebnisse und praxisnahe Entwicklungen effizient zu verknüpfen und gemeinsam voranzutreiben

2 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen erarbeiteten Ergebnisse vorgestellt.

2.1 Systemanalyse und -anforderungen

2.1.1 Brennstoffzellenspezifikation

Im Rahmen des Teilvorhabens von Vitesco Technologies GmbH im Verbundprojekt „Bedarfsgerechte Wasserstofferzeugung mittels PowerPaste für PEM-Brennstoffzellen“ lag ein zentraler Fokus auf der umfassenden Systemanalyse und der präzisen Definition der Anforderungen an das zu entwickelnde Brennstoffzellensystem. Ziel war es, ein innovatives, wassergekühltes PEM-Brennstoffzellensystem zu realisieren, das in Kombination mit einem PowerPaste-Wasserstoffgenerator insbesondere für den Einsatz in Klein- und Leichtfahrzeugen im Logistik- und Verteilverkehr optimiert ist.

Die Systemanalyse begann mit einer detaillierten Betrachtung der Einsatzszenarien. Im Vordergrund stand die Versorgung von Fahrzeugen, die aufgrund ihrer Betriebsprofile – wie häufige Stopps, kurze Ladezeiten und hohe Verfügbarkeit – besonders hohe Anforderungen an die Energieversorgung stellen. Hier stoßen batterieelektrische Systeme schnell an ihre Grenzen, weshalb das Brennstoffzellensystem als Reichweitenverlängerer („Range Extender“) eine zentrale Rolle einnimmt. Die Analyse berücksichtigte dabei sowohl die spezifischen Anforderungen der Zielsegmente als auch die bestehenden technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

Ein wesentliches Ergebnis der Systemanalyse war die Festlegung auf eine flüssiggekühlte Brennstoffzelle mit geschlossener Kathode. Diese Konfiguration bietet entscheidende Vorteile hinsichtlich Kompaktheit, Effizienz und Systemintegration. Die Kopplung des Kühlsystems von Brennstoffzelle und Wasserstoffgenerator ermöglicht ein optimiertes Thermomanagement auf Fahrzeugebene und trägt wesentlich zur Erhöhung der Systemzuverlässigkeit und Skalierbarkeit bei. Insbesondere die Möglichkeit, das System auf größere Leistungsklassen zu skalieren, wurde als strategisch wichtig für die spätere industrielle Verwertung identifiziert.

Zu den zentralen Systemanforderungen gehörten eine hohe gravimetrische und volumetrische Leistungsdichte, ein Systemwirkungsgrad von über 50% sowie eine hohe Dauerhaltbarkeit unter realen Betriebsbedingungen. Die Systemarchitektur musste zudem modular ausgelegt sein, um eine flexible Anpassung an verschiedene

Fahrzeug- und Leistungsklassen zu ermöglichen. Dies betraf sowohl das Design der Brennstoffzellenstacks als auch die Gestaltung der metallischen Bipolarplatten, deren Fertigung und Materialauswahl explizit auf eine wirtschaftliche Produktion im industriellen Maßstab ausgelegt wurden. Die Systemanalyse umfasste dabei die Bewertung unterschiedlicher Fertigungstechnologien, Beschichtungsverfahren und Fügeprozesse, um eine optimale Balance zwischen Kosten, Langlebigkeit und Leistungsfähigkeit zu erreichen.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Integration von Subsystemen und Komponenten aus dem bestehenden Produktportfolio von Vitesco Technologies GmbH. Dazu zählen Kühlmittelpumpen, Ventile, Aktuatoren, Sensoren sowie elektrische Steuergeräte und Regelstrategien, die bereits in anderen Leistungsbereichen – etwa in Hybridanwendungen oder Batteriesystemen – erfolgreich eingesetzt werden. Die Übertragung und Anpassung dieser Komponenten auf das neue Brennstoffzellensystem stellte einen wichtigen Beitrag zur Erfüllung der Systemanforderungen dar und ermöglichte einen effizienten Know-how-Transfer innerhalb des Unternehmens.

Die Anforderungen an das Gesamtsystem wurden auch durch die spezifischen Eigenschaften des PowerPaste-Wasserstoffgenerators geprägt. Die Brennstoffzelle musste in der Lage sein, mit feuchtem, unter geringem Vordruck stehendem Wasserstoff effizient zu arbeiten. Dies stellte besondere Anforderungen an das Anoden-Flussfeld, das Wassermanagement und die Regelung der Betriebsparameter. Die Entwicklung eines intelligenten Steuerungssystems, das sowohl die Brennstoffzelle als auch das gekoppelte Kühlsystem optimal regelt, war daher ein zentrales technisches Ziel. Die Systemanalyse berücksichtigte zudem die Anforderungen an die Schnittstellen zu anderen Fahrzeugkomponenten sowie an die Gesamtintegration in das Demonstratorfahrzeug.

Schließlich wurde im Rahmen der Systemanalyse auch die Skalierbarkeit und zukünftige Verwertbarkeit des Systems eingehend betrachtet. Die modulare Architektur und die konsequente Auslegung auf industrielle Fertigungsprozesse ermöglichen eine Übertragung auf größere Marktsegmente, einschließlich Anwendungen im Automotive-Bereich mit Leistungen über 10 kW_{el}. Die Systemanforderungen wurden so definiert, dass sie sowohl die aktuellen Projektziele erfüllen als auch eine nachhaltige industrielle Nutzung und Weiterentwicklung des Brennstoffzellensystems sicherstellen.

Insgesamt zeigt die durchgeführte Systemanalyse, dass die definierten Anforderungen an das Brennstoffzellensystem – von der Kompaktheit und Effizienz über die Modularität bis hin zur industriellen Fertigbarkeit – konsequent auf die Bedürfnisse der Zielanwendungen und die Anforderungen des Marktes ausgerichtet wurden. Dies

bildet die Grundlage für eine erfolgreiche Umsetzung und zukünftige Verwertung der Projektergebnisse.

Nachfolgend sind die zusammengetragenen System- und Stackanforderungen, welche in einem Workshop grundlegend erarbeitet wurden, in tabellarischer Form dargestellt.

Tabelle 1: Stack- und Systemanforderungen

Grundkonzept	
elektrische Leistung Stack	1 kW
max. Gewicht	800-1000 g
Max. Anzahl von Zellen je Stack	32
Aktive Fläche	100 cm ²
Nennpunkt	0,5 A/cm ²
nomielle Betriebstemperatur	65-75°C
Druckaufladung	eher nein, atmosphärischer Betrieb
Anströmung im Stack	U-Versorgung, eine Endplatte als Medienschnittstelle
BPP: einschalig/zweischalig/dreischalig	zweischalig
BPP-Typ	metallisch
Schnittstellen zum System	noch nicht definiert
Kathode	
Kathode: Ziel-Druckabfall Manifold-Zelle-Manifold Max. Betriebspunkt	100-200 mbar
Kathode: Max. Stöchiometrie bei Max. Betriebspunkt	1.8
Kathode: Max. Stöchiometrie bei Min. Betriebspunkt	1.8
Anode	
Art der Versorgung (aktive/passive Rezirkulation oder Dead-End)	aktiv
Ziel-Druckabfall	>100 mbar (hoher Feuchteanteil)

Max. Stöchiometrie bei Max. Betriebspunkt	1, aber Rezirate ggfs. bis zu 1.5
Max. Stöchiometrie bei Min. Betriebspunkt	1, aber Rezirate ggfs. bis > 1.5
Kühlung	
Fluid	z.B. Glysantin FCG-20 (BASF)
Temperaturspreizung	5-10 K
max. Volumenstrom/Durchfluss	27...53 g/s
Max. Druckabfall Stack bei max. Volumenstrom	< 200 mbar
Hauptabmessungen	
aktive Fläche	> 100 cm ² erwünscht
Seitenverhältnis aktive Fläche L/B	z.B. 3/1 verbreitet
BPP-Fertigung	
Substratmaterial	316L / 75µm
Coating	Pre coated Material
Umformverfahren	konv. Tiefziehen
Schneiden	Stanzen/Laser
Fügeverfahren	Laser
Dichtkonzept	Dispenserdichtung, BZ-Silikon

2.1.2 Systemsteuerung und Brennstoffzellensystemauslegung

Im Projekt wurde das Brennstoffzellensystem gezielt für einen modularen, skalierbaren Einsatz konzipiert. Ein zentrales Element der Systemauslegung war die Entscheidung, das System in fest definierten Leistungsstufen zu betreiben. Anstelle einer stufenlosen Regelung erfolgte die Anpassung der Systemleistung schrittweise in 50-Watt-Intervallen. Diese Betriebsstrategie reduzierte die Komplexität der Regelalgorithmen und ermöglichte eine gezielte Abstimmung aller Systemkomponenten auf die jeweiligen Lastpunkte. Dadurch wurde die Robustheit des Gesamtsystems erhöht und die Auslegung auf typische Einsatzprofile im Klein- und Leichtfahrzeugbereich optimiert.

Die Leistungsstufen wurden so gewählt, dass sie sowohl den Anforderungen an den Energiebedarf im Betrieb als auch den betrieblichen Rahmenbedingungen des Gesamtsystems entsprachen. Durch die schrittweise Anpassung der Leistung konnte auf wechselnde Lastanforderungen flexibel reagiert werden, ohne die Systemstabilität zu beeinträchtigen. Diese Betriebsweise erwies sich insbesondere für Anwendungen mit häufigen Lastwechseln und variablen Fahrprofilen als vorteilhaft.

Ein besonderes Augenmerk lag auf dem Thermomanagement. Die Kühlung des Brennstoffzellenreaktors wurde über einen ins Gesamtsystem integrierten Kühlkreislauf realisiert. Im Gegensatz zu herkömmlichen Lösungen, bei denen separate Kühlsysteme für einzelne Komponenten eingesetzt werden, verband der entwickelte Kühlkreislauf das Brennstoffzellensystem direkt mit dem Wasserstoffgenerator. Diese thermische Kopplung ermöglichte ein effizientes und kompaktes Systemdesign, da der Wärmeaustausch zwischen beiden Subsystemen innerhalb eines gemeinsamen Kreislaufs stattfand. Hierdurch konnten zusätzliche Komponenten eingespart und die volumetrische Leistungsdichte des Gesamtsystems gesteigert werden.

Die Integration des Kühlkreislaufs erforderte eine sorgfältige Abstimmung der Betriebsparameter beider Subsysteme. Die Temperaturführung wurde so gestaltet, dass sowohl die Brennstoffzelle als auch der Wasserstoffgenerator stets im optimalen Bereich arbeiteten. Die im Abschlussbericht dokumentierte enge Zusammenarbeit zwischen den Entwicklungspartnern ermöglichte es, die Wechselwirkungen zwischen Wasserstofferzeugung und Brennstoffzellenbetrieb gezielt zu nutzen und das Thermomanagement auf Systemebene zu optimieren.

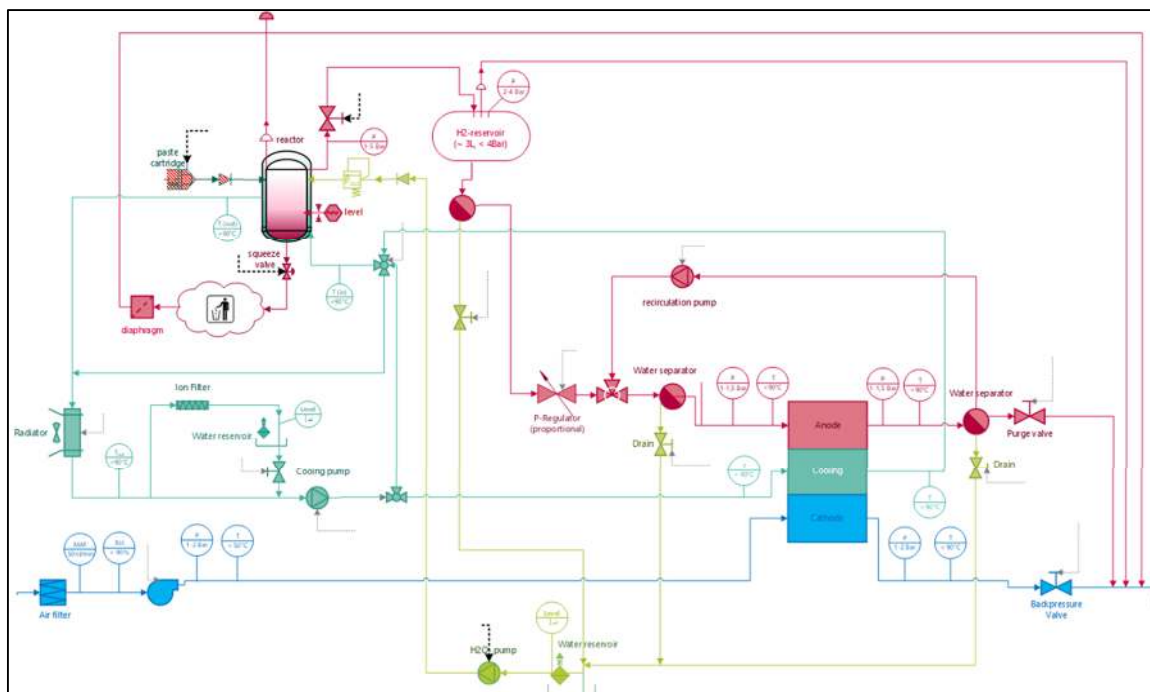


Abbildung 1: P & ID Schema Ausschnitt

Die Systemauslegung berücksichtigte darüber hinaus die Anforderungen an Kompaktheit, Skalierbarkeit und Wartungsfreundlichkeit. Die modulare Architektur des Systems erleichterte die Anpassung an verschiedene Leistungsklassen und Anwendungsfälle. Die im Projekt entwickelte Lösung wurde als Demonstrator in einem Klein- bzw. Leichtfahrzeug umgesetzt, was die Praxistauglichkeit der gewählten Systemarchitektur unterstrich.

2.1.2.1 Systemsteuerung

Die Steuerung des Brennstoffzellensystems wurde mit einer im Automotive-Bereich bewährten Hardwareplattform umgesetzt. Zum Einsatz kam eine MicroAutoBox von dSPACE, die für anspruchsvolle Steuerungs- und Regelungsaufgaben ausgelegt ist. Diese Hardware ermöglichte eine präzise und flexible Implementierung der Systemregelung und wurde gezielt auf die spezifischen Anforderungen des Projekts angepasst.

Die Systemsteuerung umfasste die Koordination sämtlicher Systempfade: Neben der Leistungsregelung der Brennstoffzelle wurden auch die Steuerung des Wasserstoffgenerators, die Überwachung und Regelung des integrierten Kühlkreislaufs sowie die Ansteuerung aller relevanten Aktuatoren und Sensoren realisiert. Die MicroAutoBox bildete die zentrale Schnittstelle, über die alle Betriebszustände und Steuerbefehle verarbeitet wurden.

Die Regelungsstrategie wurde so entwickelt, dass die Leistungsanpassung in 50-Watt-Schritten zuverlässig und ohne Verzögerung umgesetzt werden konnte. Hierzu wurden die einzelnen Regelkreise für Brennstoffzelle, Wasserstoffgenerator und Kühlsystem eng miteinander verknüpft. Die Steuerungssoftware ermöglichte eine dynamische Anpassung an wechselnde Lastanforderungen und stellte sicher, dass die Betriebsparameter aller Systemteile stets im optimalen Bereich gehalten wurden.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Integration von Sicherheits- und Diagnosefunktionen. Die Steuerung überwachte kontinuierlich alle sicherheitsrelevanten Systemgrößen und reagierte bei Abweichungen mit vordefinierten Maßnahmen. Dies war insbesondere für den Betrieb mit Wasserstoff von zentraler Bedeutung, um die Betriebssicherheit jederzeit zu gewährleisten.

Die im Projekt entwickelte Systemsteuerung ermöglichte einen robusten, effizienten und sicheren Betrieb des modularen Brennstoffzellensystems. Die Kombination aus stufenweiser Leistungsregelung, integriertem Thermomanagement und leistungsfähiger Automotive-Hardware bildete die Grundlage für die erfolgreiche Demonstration und weitere Skalierbarkeit des Systems.

2.2 Bipolarplattenherstellung

Für die Fertigung der metallischen Bipolarplatten im Rahmen des Projekts wurden verschiedene allgemeine Rahmenbedingungen festgelegt, um eine wirtschaftliche, skalierbare und qualitativ hochwertige Produktion sicherzustellen. Zunächst wurde die gesamte Konstruktion der Bipolarplatten in enger Zusammenarbeit zwischen Vitesco Technologies und dem Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT) auf eine fertigungsgerechte Umsetzung ausgerichtet. Dabei stand die Nutzung von Produktionsverfahren im Vordergrund, die eine Volumenproduktion ermöglichen und gleichzeitig die spezifischen Anforderungen der Automobilindustrie hinsichtlich Zuverlässigkeit, Langlebigkeit und Kosten erfüllen.

Ein zentrales Kriterium war die Auswahl geeigneter Materialien, die sowohl eine hohe elektrische Leitfähigkeit als auch eine gute Korrosionsbeständigkeit gewährleisten. Die eingesetzten Halbzeuge mussten sich für eine teilautomatisierte Verarbeitung eignen und sollten möglichst ressourcenschonend und effizient zu bearbeiten sein. Die Formgebung der Platten wurde so gestaltet, dass sie mit bestehenden Großserienprozessen wie Prägen, Stanzen oder Laserbearbeitung kompatibel ist. Anstelle der Entwicklung eigener Beschichtungsverfahren wurde für die Fertigung der Bipolarplatten auf bereits vorbeschichtetes Material (pre-coated Material / Firma Sandvik) zurückgegriffen. Die Beschichtung selbst war somit nicht Gegenstand des Projektschwerpunkts. Dadurch konnten sowohl der Korrosionsschutz als auch die Minimierung der Kontaktwiderstände durch die industriell aufbrachte Beschichtung des eingesetzten Vormaterials sichergestellt werden.

Auch der Fügeprozess, also das Verbinden der einzelnen Platten zu einem dichten und stabilen Stack, wurde unter industriellen Gesichtspunkten betrachtet. Hierbei sollten Verfahren gewählt werden, die eine hohe Prozesssicherheit und Reproduzierbarkeit bieten. Ergänzend wurden umfassende Qualitätskontrollmaßnahmen definiert, um eine gleichbleibend hohe Produktqualität sicherzustellen.

Nachfolgend wird in den Unterkapiteln auf die einzelnen Fertigungsschritte eingegangen und die gesammelten Erkenntnisse dargelegt

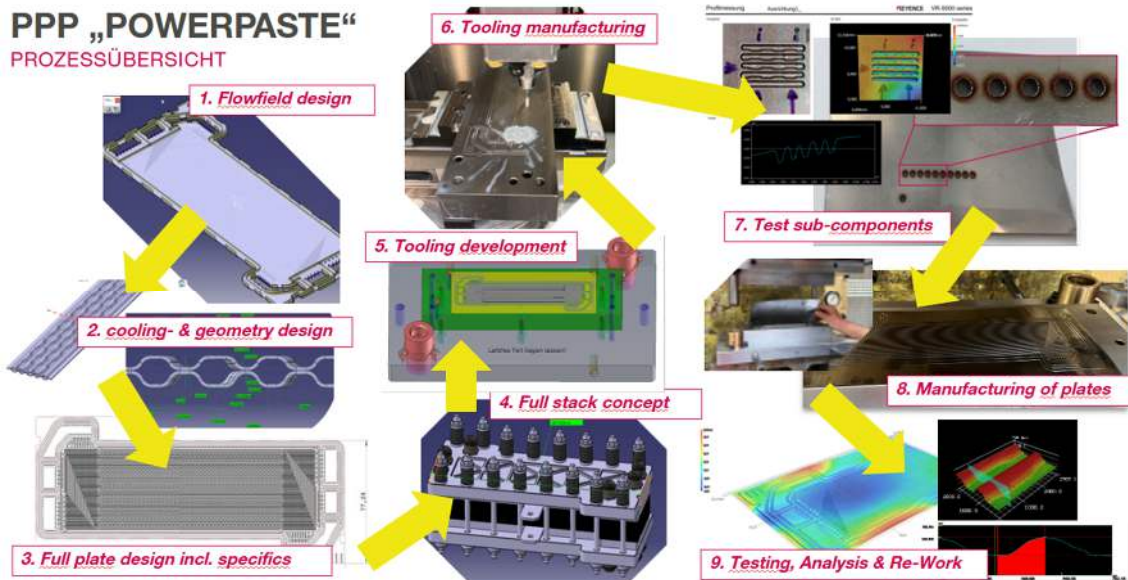


Abbildung 2: Prozessablaufplan Bipolarplattenfertigung

2.2.1 Vorversuchsmuster

Im Rahmen des Projekts wurden gezielt Vorversuchsmuster zur Entwicklung und Erprobung metallischer Bipolarplatten gefertigt. Ziel dieser Arbeiten war es, die Eignung unterschiedlicher Materialien und Fertigungsparameter unter realen Bedingungen zu validieren und damit eine fundierte Basis für die spätere „Serienfertigung“ zu schaffen.

Als Basismaterial für die Vorserienmuster kamen rostfreie, austenitische Edelstähle zum Einsatz, wobei insbesondere der Werkstoff 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) verwendet wurde. Dieser Edelstahl zeichnet sich durch eine hohe Korrosionsbeständigkeit und eine gute elektrische Leitfähigkeit aus, was für die Anwendung in PEM-Brennstoffzellen von zentraler Bedeutung ist. Zur Optimierung der Platteneigenschaften wurden keine eigenen Beschichtungsverfahren erprobt. Stattdessen kam für die Fertigung der Bipolarplatten ausschließlich bereits industriell vorbeschichtetes Material zum Einsatz. Somit standen physikalische oder chemische Beschichtungen, wie beispielsweise DLC (Diamond-Like-Carbon), nicht im Fokus der Arbeiten. Die Anforderungen an Kontaktwiderstand und Langzeitbeständigkeit unter den elektrochemischen Bedingungen im Stack wurden durch die Eigenschaften des eingesetzten pre-coated Materials erfüllt.

Die Fertigung der Vorversuchsmuster erfolgte mittels Prägetechnik. Dabei wurden zwei verschiedene Strukturen – repräsentativ für das Flussfeld sowie für den Bereich der größten Umformungen – einstufig in das Blech eingebracht. Die Rohmaterialdicke wurde auf 75 µm festgelegt, um sowohl die mechanische Stabilität als auch die elektrische Performance der Bipolarplatten zu testen und zu bewerten.

Alle hergestellten Muster wurden einer umfassenden messtechnischen Analyse unterzogen. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Einhaltung der geforderten Maße, da diese direkt die voreinzustellende Prägetiefe beeinflussen. Zudem wurde gezielt überprüft, ob während des Umformprozesses Risse oder andere mechanische Defekte in die Muster eingebracht wurden, um eine hohe Bauteilqualität sicherzustellen.

Für das Fügen der Halbplatten wurden verschiedene Laserschweißprozesse erprobt. Ziel war es, eine dichte und langlebige Verbindung der Halbplatten zu gewährleisten. Im Rahmen der Versuche wurden relevante Parameter wie Schweißenergie, Fügedruck und Temperatur systematisch variiert, um die optimalen Prozessfenster für eine spätere Serienfertigung zu definieren.

Die Vorversuchsmuster wurden abschließend einer Reihe von Prüfungen unterzogen, darunter elektrische Leitfähigkeitsmessungen, Korrosions- und Lebensdauertests sowie Dichtigkeitsprüfungen. Die aus diesen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse flossen direkt in die Weiterentwicklung der Bipolarplattenkonstruktion ein. Insgesamt leisteten die Vorversuchsmuster einen entscheidenden Beitrag zur Risikominimierung und zur Absicherung des technischen Konzepts, indem sie die Praxistauglichkeit der gewählten Werkstoffe und Fertigungsprozesse belegten und somit die Grundlage für eine spätere industrielle Umsetzung schufen.

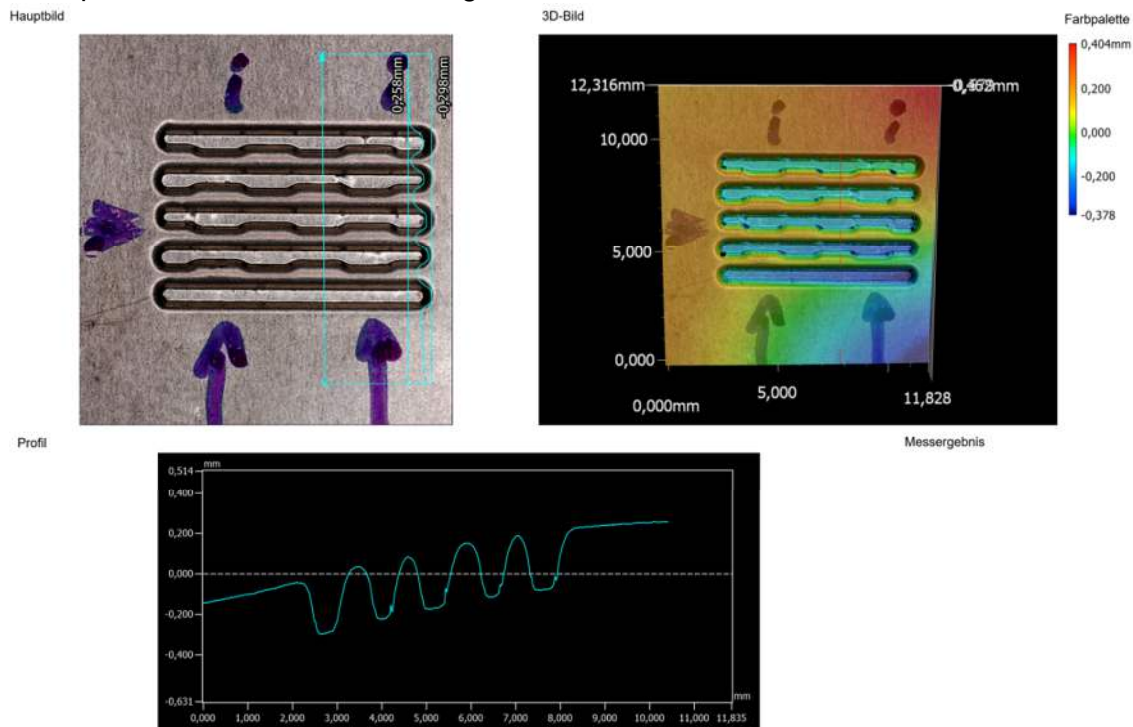


Abbildung 3: Messtechnische Überprüfung der Vorversuchsmuster



Abbildung 4: Foto Vorversuchsmuster 2

2.2.2 Tiefziehen

Im Rahmen der Entwicklung der finalen Bipolarplatten wurde ein einstufiger Tiefziehprozess etabliert, um die komplexen Flussfeldstrukturen präzise und effizient in das 75 µm dünne Edelstahlblech einzubringen. Die Vorversuche wurden zunächst auf einer Presse mit einer maximalen Presskraft von 80 t durchgeführt. Ziel dieser Phase war es, die grundlegende Umformbarkeit des Materials zu bewerten, die Prozessparameter zu definieren und erste Rückschlüsse auf die Formgebung und die Maßhaltigkeit der Strukturen zu gewinnen.

Die Entscheidung für einen einstufigen Tiefziehprozess wurde auf Basis mehrerer technischer und wirtschaftlicher Überlegungen getroffen. Zum einen ermöglicht dieses Verfahren eine kontrollierte und gleichmäßige Umformung des dünnen Edelstahlblechs, wodurch das Risiko von Materialschädigungen wie Rissen oder Faltenbildung minimiert wird. Die gesamte Flussfeldstruktur kann in einem einzigen Presshub hergestellt werden, was die Reproduzierbarkeit und Maßhaltigkeit der Bauteile deutlich verbessert. Darüber hinaus reduziert ein einstufiger Prozess die Anzahl der erforderlichen Arbeitsschritte und damit die Durchlaufzeit in der Fertigung, was sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit und Effizienz des Gesamtprozesses auswirkt.

2.2.2.1 Einstufiger Tiefziehprozess

Für die Fertigung der finalen Muster kam eine leistungsfähigere Presse mit einer Presskraft von 250 t zum Einsatz. Die erhöhte Presskraft ermöglichte es, auch anspruchsvolle Geometrien und größere Umformgrade prozesssicher und ohne Materialschädigung zu realisieren. Entscheidende Prozessparameter im einstufigen Tiefziehprozess waren die exakt eingestellte Presskraft sowie die Haltezeit im Umformwerkzeug. Beide Größen wurden systematisch variiert, um die optimalen Bedingungen für eine rissfreie und maßhaltige Umformung zu bestimmen. Die Haltezeit diente insbesondere dazu, das Material unter Spannung zu entspannen und eine gleichmäßige Verteilung der Umformung über die gesamte Struktur zu gewährleisten.

Ein weiteres zentrales Element des Prozesses war die gezielte Überstreckung des Materials in der Tiefziehform. Diese wurde konstruktiv im Werkzeug hinterlegt, um die Rückfederung des Blechs nach dem Umformen zu kompensieren und die geforderten Endmaße sicherzustellen. Für die finalen Tiefziehgesenke wurde eine Überstreckung von 10 % realisiert, wodurch die Maßhaltigkeit der komplexen Geometrien auch nach dem Rückfedern des Materials zuverlässig gewährleistet werden konnte. Im Zuge der Werkzeugentwicklung waren mehrere Iterationen notwendig: Die Tiefziehformen wurden nach jedem Versuch anhand der Messergebnisse angepasst, um sowohl die Geometrie als auch die Oberflächenqualität der Bipolarplatten kontinuierlich zu optimieren.



Abbildung 5: Herstellung der Tiefziehgesenke

Für den Tiefziehprozess wurde zudem ein spezielles Säulengestell entwickelt, das die Tiefziehgesenke exakt aufnimmt und eine präzise Führung sowie eine gleichmäßige Kraftverteilung während des Umformvorgangs gewährleistet. Dieses Gestell trug wesentlich zur Prozesssicherheit und zur Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität bei.



Abbildung 6: Säulengestell mit Tiefziehgesenken in Hydraulikpresse

Insgesamt ermöglichte der einstufige Tiefziehprozess, unterstützt durch gezielte Versuchsreihen, die kontinuierliche Anpassung der Werkzeuge und die Entwicklung des Säulengestells, die wirtschaftliche und qualitativ hochwertige Herstellung der finalen Bipolarplatten für den Einsatz im PEM-Brennstoffzellensystem.



Abbildung 7: Tiefgezogene Anoden- und Kathodenplatten

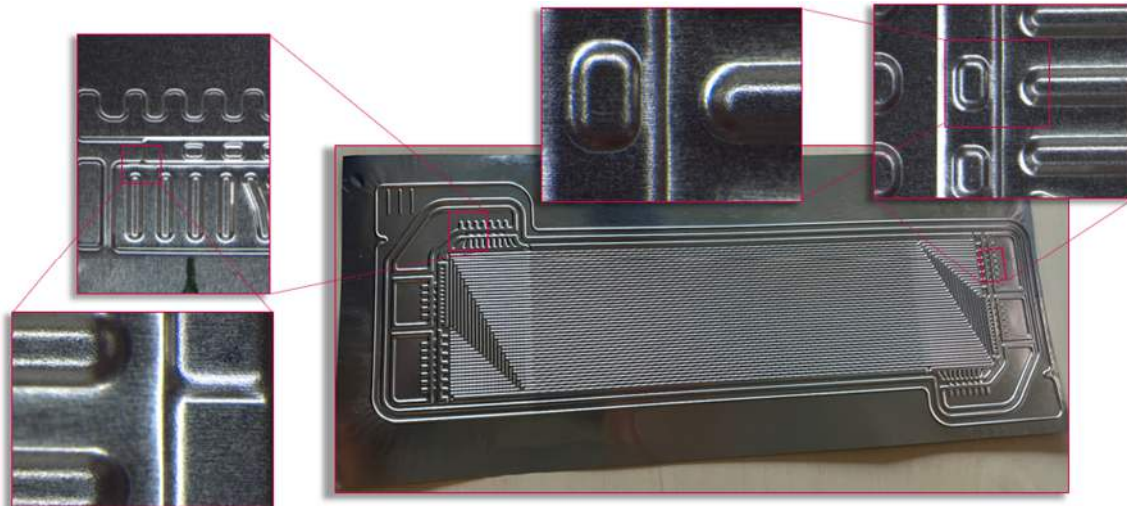


Abbildung 8: Detailansichten der hergestellten Strukturen

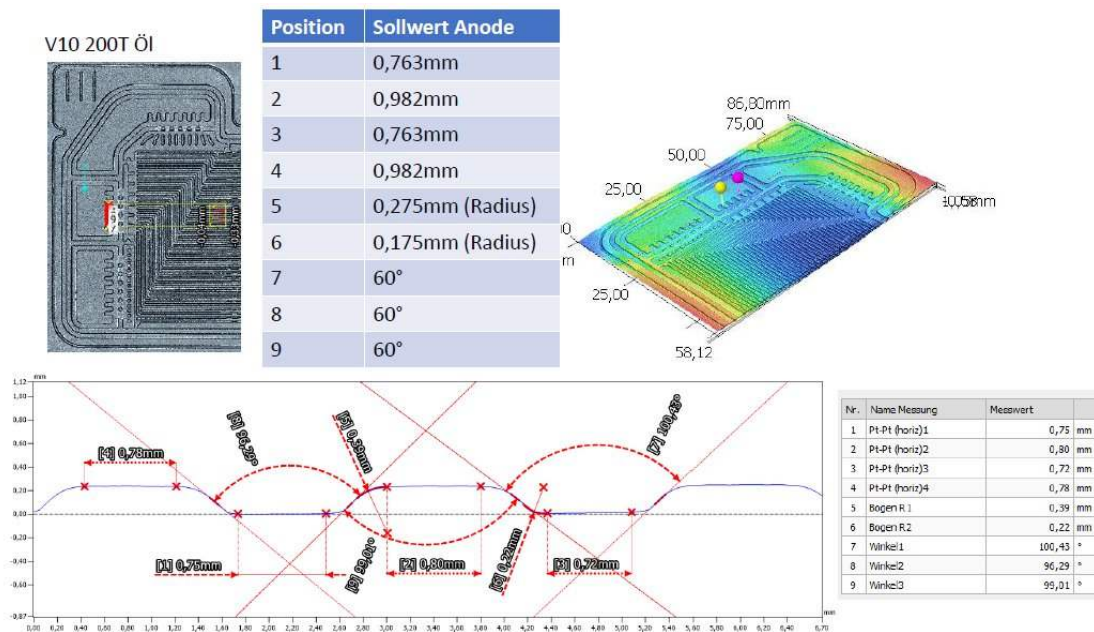


Abbildung 9: Messtechnische Überprüfung der hergestellten Halbplatten

2.2.3 Laserschweißen

Die Entwicklung und Fertigung metallischer Bipolarplatten für PEM-Brennstoffzellen stellt höchste Anforderungen an die eingesetzten Fügetechnologien. Im Rahmen des Projekts wurde das Laserschweißen als zentrales Verfahren für das Fügen der Bipolarplatten ausgewählt. Diese Entscheidung basiert auf einer Vielzahl technischer und wirtschaftlicher Vorteile, die das Laserschweißen im Vergleich zu alternativen Fügeverfahren bietet.

Das Laserschweißen zeichnet sich insbesondere durch eine sehr präzise und lokal begrenzte Wärmeeinbringung aus. Gerade bei der Verarbeitung von Edelstahlblechen mit einer Materialdicke von lediglich 75 µm ist dies von entscheidender Bedeutung. Die punktgenaue Energieeinbringung minimiert das Risiko von Verzug, Materialschädigungen oder unerwünschten Veränderungen der Oberflächenbeschichtung, wie sie bei konventionellen Schweißverfahren auftreten können. Diese Eigenschaften sind für die im Projekt entwickelten Bipolarplatten mit ihren filigranen Flussfeldstrukturen und hohen Anforderungen an Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität essenziell.

Ein weiterer Vorteil des Laserschweißens ist die hohe Prozesssicherheit und Reproduzierbarkeit. Die relevanten Prozessparameter – wie Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit, Fokuslage und Nahtgeometrie – können exakt eingestellt und während des Prozesses kontinuierlich überwacht werden. Diese Kontrolle ist insbesondere für die Serienfertigung mit hohen Qualitätsanforderungen von großer Bedeutung. Die erzielbare Gasdichtigkeit der Schweißnähte ist für den Einsatz der Bipolarplatten im Brennstoffzellenstack zwingend erforderlich, da nur poren- und rissfreie Verbindungen die notwendige Dichtheit gegenüber Wasserstoff und damit die Betriebssicherheit und Effizienz des Gesamtsystems gewährleisten.

Nicht zuletzt ist das Laserschweißen ein wirtschaftlich attraktives und gut automatisierbares Verfahren, das sich für die industrielle Großserienfertigung eignet. Der Prozess ermöglicht kurze Taktzeiten und eine effiziente Integration in automatisierte Fertigungslinien. Die im Projekt durchgeführten Voruntersuchungen und Musterfertigungen bestätigten die Eignung des Laserschweißens für die spezifischen Anforderungen der Bipolarplattenfertigung. Die Möglichkeit, den Prozess flexibel an unterschiedliche Geometrien und Fertigungslose anzupassen, stellt einen weiteren Vorteil für die spätere Skalierung und Industrialisierung dar.

2.2.3.1 Auslegung des Schweißkonzeptes

Die Auslegung des Schweißkonzeptes für die metallischen Bipolarplatten erfolgte unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen an Dichtheit, mechanische Stabilität und die Schonung der aktiven Zellbereiche. Ziel war es, die Funktionalität der Bipolarplatten im Brennstoffzellenstack langfristig sicherzustellen und gleichzeitig eine wirtschaftliche und prozesssichere Fertigung zu ermöglichen.

Im Mittelpunkt der Auslegung stand die funktionale Trennung der Schweißnähte in Stützscheidungen und Dichtnahtscheidungen. Die Stützscheidungen wurden ausschließlich im Randbereich der Bipolarplatten vorgesehen, um die mechanische Stabilität sicherzustellen, ohne die Funktionalität der aktiven Bereiche oder der

Flussfeldstrukturen zu beeinträchtigen. Die Dichtnahtschweißung wurde so ausgelegt, dass eine absolute Leckagedichtheit gegenüber Wasserstoff erzielt werden konnte – eine grundlegende Voraussetzung für den sicheren und effizienten Betrieb des Brennstoffzellenstapels.

Sämtliche Schweißnähte wurden außerhalb der aktiven Bereiche platziert, um unerwünschte Veränderungen der Oberflächenbeschichtung zu vermeiden, die sich negativ auf die elektrochemische Performance und Lebensdauer der Zelle auswirken könnten. Diese Maßnahme trug zudem dazu bei, die Prozesszeiten zu reduzieren und die Qualitätssicherung zu erleichtern.

Ein weiterer zentraler Aspekt des Schweißkonzeptes war die exakte Ausrichtung der beiden Halbschalen vor dem Fügen. Aufgrund der sehr feinen Strukturen und der nur geringen Durchbrechungen in den Dichtungsbereichen war höchste Präzision erforderlich, um eine fehlerfreie und dichte Verbindung sicherzustellen. Die Positionierung der Bauteile wurde durch speziell entwickelte Vorrichtungen und Kontrollmechanismen unterstützt, um eine wiederholgenaue und prozesssichere Ausführung der Schweißungen zu gewährleisten.

Die Auswahl und Anordnung der Schweißnähte sowie die Festlegung der Schweißparameter – insbesondere Nahtgeometrie, Abstand zu den aktiven Bereichen und Überlappung der Dichtbereiche – wurden im Projektverlauf systematisch optimiert. Ziel war es, sowohl die mechanische Stabilität als auch die Dichtheit der Bipolarplatten zuverlässig zu gewährleisten, ohne die Funktionalität der aktiven Zellbereiche zu beeinträchtigen. Die genaue Ausführung und die erzielten Ergebnisse der Stütz- und Dichtschweißungen wurden fortlaufend dokumentiert und in die weitere Prozessoptimierung integriert.

Im Rahmen der Auslegung wurde auch die spätere Skalierbarkeit und Integration in eine industrielle Serienfertigung berücksichtigt. Die Schweißkonzepte wurden so gestaltet, dass sie mit gängigen Automatisierungslösungen kompatibel sind und eine hohe Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher Plattendesigns bieten. Die Erfahrungen aus den Musterfertigungen und den begleitenden Qualitätsprüfungen flossen kontinuierlich in die Optimierung des Schweißkonzeptes ein. Damit wurde eine solide Basis für die wirtschaftliche und qualitativ hochwertige Herstellung metallischer Bipolarplatten geschaffen, die auch zukünftigen Anforderungen an Skalierbarkeit und Industrialisierung gerecht wird.

2.2.3.2 Stützschnweißungen

Die Stützschnweißungen bildeten einen essenziellen Bestandteil des Schweißkonzeptes und wurden gezielt im Randbereich der metallischen Bipolarplatten angeordnet. Diese Positionierung stellte sicher, dass die beiden dünnen Halbschalen zuverlässig miteinander verbunden wurden und die Platten auch unter mechanischen und thermischen Belastungen im Stack formstabil blieben. Besonders bei der geringen Materialdicke von 75 µm und den filigranen Strukturen war es entscheidend, Verformungen oder Schädigungen im aktiven Bereich zu vermeiden.

Ein zentrales Element bei der Umsetzung der Stützschnweißungen war die exakte Ausrichtung der beiden Halbschalen. Die feinen Strukturen und die nur geringen Durchbrechungen in den Dichtungsbereichen stellten hohe Anforderungen an die

Präzision der Positionierung. Um eine fehlerfreie und dauerhafte Verbindung zu erzielen, wurde ein speziell entwickeltes Werkzeug eingesetzt, das als Maske auf die Bipolarplatte aufgelegt wurde. Diese Maske stellte einen exakten Nullspalt zwischen den Halbschalen sicher und definierte die genauen Bereiche, in denen die Stüttschweißungen gesetzt wurden. Dadurch konnte eine gleichmäßige, wiederholgenaue und prozesssichere Anordnung der Schweißpunkte gewährleistet werden.

Die Stüttschweißungen wurden bewusst außerhalb der Bereiche platziert, in denen Beschichtungsveränderungen die elektrochemische Performance der Zelle hätten beeinträchtigen können. Die Stüttschweißungen bildeten somit eine wichtige Grundlage für die anschließende Dichtnahtschweißung und trugen maßgeblich zur Gesamtqualität und Zuverlässigkeit der gefertigten Bipolarplatten bei, ohne die Funktionalität der aktiven Zellbereiche zu beeinträchtigen.

Im Rahmen der Qualitätskontrolle wurden die Stüttschweißungen regelmäßig auf ihre Maßhaltigkeit, Festigkeit und Position überprüft. Hierbei kamen optische Messsysteme und zerstörungsfreie Prüfverfahren zum Einsatz, um eine gleichbleibend hohe Qualität sicherzustellen.

2.2.3.3 Dichtnahtschweißungen

Die Dichtnahtschweißung stellte das zentrale Element zur Sicherstellung der Gasdichtigkeit der Bipolarplatten dar. Im Projekt wurde die Dichtnaht so konzipiert, dass sie eine absolute Leckagedichtheit gegenüber Wasserstoff gewährleistet – eine Grundvoraussetzung für den sicheren und effizienten Betrieb des Brennstoffzellenstapels. Die Anforderungen an die Dichtnaht waren dabei besonders hoch: Sie musste nicht nur poren- und rissfrei sein, sondern auch dauerhaft den im Stack herrschenden Drücken und Temperaturwechseln standhalten.

Im Verlauf der Prozessentwicklung wurde von einem Schweißverfahren mit konstantem Energieeintrag auf ein gepulstes Verfahren umgestellt. Dabei wurden einzelne Schweißpunkte mit einem Durchmesser von 60 μm erzeugt, die sich jeweils zu einem Drittel überlappten. Durch diese Überlappung entstand eine durchgehende, dichte Naht, die sowohl die Anforderungen an die Dichtheit als auch an die Maßhaltigkeit erfüllte.

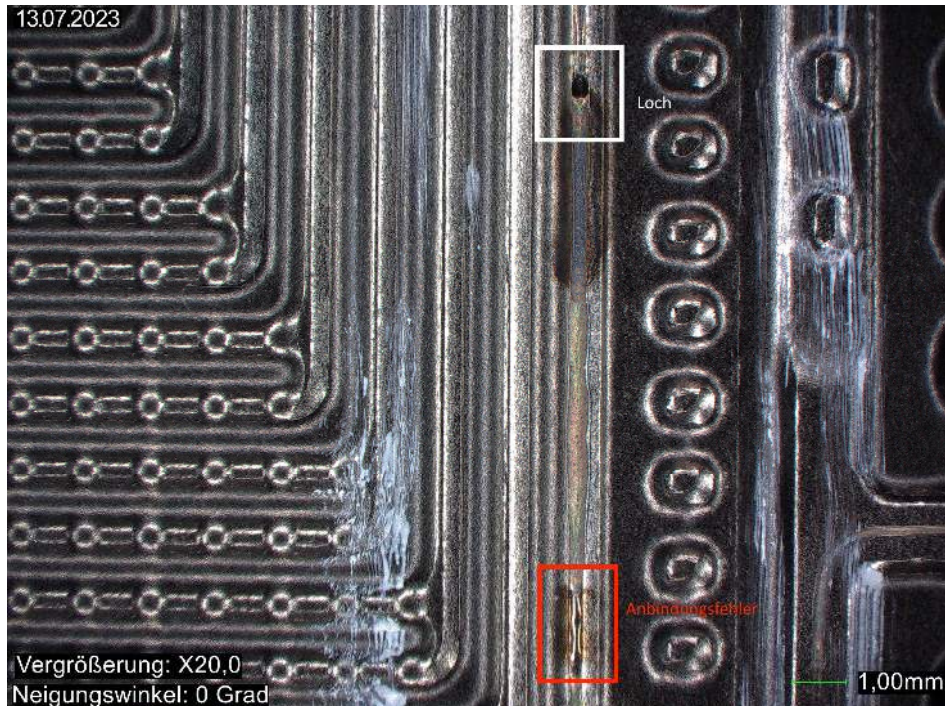


Abbildung 10: konstanter Energieeintrag führte zu Schweißfehlern

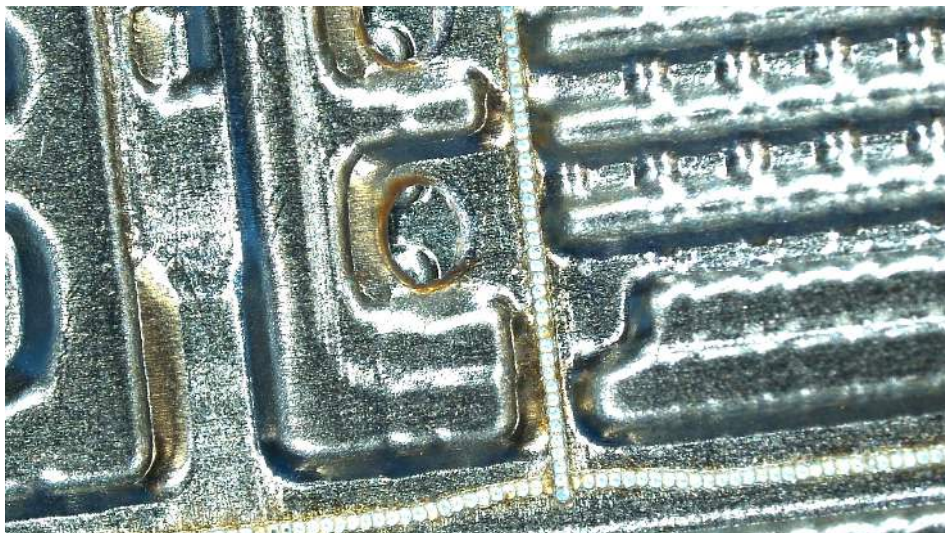


Abbildung 11: gepulstes Verfahren für Dichtnahtschweißung

Die Dichtnahtschweißung wurde so positioniert, dass sie die beiden Halbschalen der Bipolarplatte unterhalb der nachfolgenden Silikondichtung zuverlässig miteinander verband. Dabei wurde besonders auf eine gleichmäßige Nahtführung und eine konstante Nahtbreite geachtet, um lokale Schwachstellen zu vermeiden. Die Schweißparameter – insbesondere Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit und

Fokuslage – wurden in umfangreichen Versuchsreihen gezielt auf die Anforderungen der Dichtnaht abgestimmt. Ziel war es, eine optimale Balance zwischen Nahtdurchschweißung und Wärmeeintrag zu finden, um sowohl die Dichtheit als auch die Maßhaltigkeit der Platten zu gewährleisten.

Ein weiterer wichtiger Aspekt war die exakte Ausrichtung der beiden Halbschalen vor dem Schweißen. Aufgrund der sehr feinen Strukturen und der geringen Durchbrechungen in den Dichtungsbereichen war höchste Präzision erforderlich, um eine fehlerfreie und dichte Verbindung sicherzustellen. Die Positionierung der Bauteile wurde durch speziell entwickelte Vorrichtungen und Kontrollmechanismen unterstützt, die eine wiederholgenaue und prozesssichere Ausführung der Dichtnahtschweißung ermöglichen.

Zur Qualitätssicherung der Dichtnaht wurden verschiedene Prüfverfahren eingesetzt. Neben visuellen und mikroskopischen Untersuchungen der Schweißnaht kamen insbesondere Druckhaltetests zum Einsatz. Diese Tests ermöglichten den Nachweis, dass die Dichtnahtschweißung den Anforderungen an die Wasserstoffdichtheit dauerhaft gerecht wird. Die im Rahmen des Projekts erzielten Ergebnisse zeigten, dass mit dem gewählten Schweißkonzept und den optimierten Prozessparametern eine reproduzierbare, prozesssichere und qualitativ hochwertige Dichtnaht realisiert werden konnte.

Die Dichtnahtschweißung wurde zudem so ausgelegt, dass sie sich problemlos in einen automatisierten Fertigungsprozess integrieren lässt. Die gewählten Nahtgeometrien und die Positionierung der Schweißnähte sind mit gängigen Automatisierungslösungen kompatibel und ermöglichen eine hohe Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher Plattendesigns. Die Erfahrungen aus den Musterfertigungen und den begleitenden Qualitätsprüfungen fließen kontinuierlich in die Optimierung der Dichtnahtschweißung ein.

Ein besonderes Augenmerk lag auf der Reduzierung potenzieller Fehlerquellen im Schweißprozess. Durch die konsequente Vermeidung von Schweißungen im aktiven Bereich und die gezielte Positionierung der Dichtnaht im Randbereich konnten Risiken wie lokale Überhitzung, Verzug oder Beschädigung der Oberflächenbeschichtung minimiert werden. Die im Projekt entwickelten Kontrollmechanismen und Prüfverfahren trugen maßgeblich dazu bei, die Prozesssicherheit und die Qualität der Dichtnahtschweißung zu gewährleisten. Damit konnte sichergestellt werden, dass die gefertigten Bipolarplatten den anspruchsvollen Anforderungen im Brennstoffzellenbetrieb dauerhaft gerecht werden und eine wirtschaftliche sowie skalierbare Serienfertigung möglich ist.

2.2.4 Bipolarplattenbeschnitt

Die Herstellung der metallischen Bipolarplatten für das Brennstoffzellensystem erforderte eine präzise und flexible Bearbeitung der Plattenkontur sowie der funktionsrelevanten Öffnungen. Im Projekt wurde der gesamte Beschnittprozess mittels Laserschneiden realisiert, um den hohen Anforderungen an Maßhaltigkeit, Kantenqualität und Reproduzierbarkeit gerecht zu werden. Das Laserschneiden bot zudem die notwendige Flexibilität, um unterschiedliche Geometrien und komplexe Strukturen effizient zu fertigen.

Der Beschnitt erfolgte in zwei klar voneinander getrennten Arbeitsschritten, die auf den jeweiligen Fertigungszustand der Bipolarplatten abgestimmt waren. Im ersten Schritt wurden die sogenannten Submanifolds, also die Einströmöffnungen für die Medienführung in den aktiven Bereich der Brennstoffzelle, aus den einzelnen Halbplatten herausgetrennt. Dieser Arbeitsschritt wurde bewusst vor dem Fügen der Halbplatten durchgeführt, da die Positionen der Submanifolds auf der Anoden- und Kathodenseite unterschiedlich lagen und eine präzise Bearbeitung im Einzelzustand eine höhere Genauigkeit ermöglichte. Im zweiten Arbeitsschritt erfolgte der Konturbeschnitt, nachdem die Halbplatten bereits gefügt waren. Hierbei wurde die endgültige Außenkontur der Bipolarplatte erzeugt und gleichzeitig die Durchbrüche für die Medienführung in den dreidimensionalen, bereits verschweißten Platten geöffnet.

Durch die Aufteilung des Beschnittprozesses auf zwei aufeinanderfolgende Fertigungsschritte konnte eine optimale Bearbeitungsqualität erzielt werden. Die Trennung der Aufgaben ermöglichte es, sowohl die filigranen Submanifold-Öffnungen als auch die komplexen Konturen und Durchdringungen der Dichtungsstrukturen prozesssicher und in hoher Qualität herzustellen. Die Kombination aus modernster Lasertechnologie und einer durchdachten Prozessabfolge stellte somit einen wichtigen Baustein für die erfolgreiche Fertigung der Bipolarplatten dar.

2.2.4.1 Submanifolds ausschneiden

Für das Ausschneiden der Submanifolds wurde ein Beschriftungslaser eingesetzt, der mit einem gezielten Energieeintrag die Herstellung der benötigten Öffnungen in den Halbplatten ermöglichte. Die Wahl dieses Verfahrens beruhte auf der Fähigkeit des Lasers, sehr feine und präzise Schnitte in dünnem Edelstahl zu realisieren, ohne das umliegende Material thermisch oder mechanisch zu beeinträchtigen. Mit Hilfe des Lasers konnten die Submanifolds exakt an den vorgesehenen Positionen auf der Anoden- beziehungsweise Kathodenseite eingebracht werden, wobei die unterschiedlichen Anforderungen beider Seiten individuell berücksichtigt wurden.

Die Submanifolds selbst stellen die Einströmöffnungen für die Reaktionsgase in den aktiven Bereich der Brennstoffzelle dar. Ihre präzise Platzierung und Abmessung war entscheidend für die gleichmäßige Gasverteilung und damit für die Leistungsfähigkeit und Effizienz des gesamten Brennstoffzellenstapels. Die im Projekt realisierten Öffnungen wiesen Abmessungen von 0,9 mm × 1,4 mm auf und wurden mit hoher

Wiederholgenauigkeit gefertigt. Die geringe Größe und die exakte Form der Submanifolds stellten hohe Anforderungen an die Prozessführung, die jedoch durch den Einsatz des Lasers zuverlässig erfüllt werden konnten.

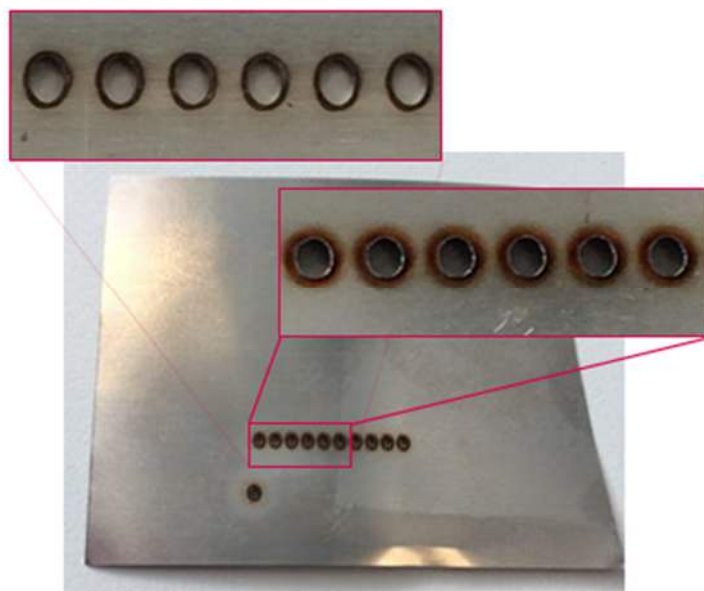


Abbildung 12: Vorversuchsmuster zur Herstellung der Submanifolds

Der Laserschnitt ermöglichte zudem eine sehr saubere Schnittkante, wodurch nachfolgende Bearbeitungsschritte wie Entgraten oder Nachschleifen weitgehend entfallen konnten. Dies trug zur Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses bei. Die Bearbeitung der Submanifolds im Einzelzustand der Halbplatten erleichterte darüber hinaus die Handhabung und Positionierung in den nachfolgenden Prozessschritten, insbesondere beim Fügen und Verschweißen der Plattenhälften.

2.2.4.2 Konturbeschnitt

Nach dem Fügen der beiden Halbplatten, also im Zustand der bereits verschweißten Bipolarplatte, wurde der finale Konturbeschnitt durchgeführt. In diesem Schritt lag die Herausforderung darin, die nun doppelte Materialdicke sowie die dreidimensionalen Strukturen der gefügten Platten präzise zu trennen. Der Laserschneidprozess musste dabei nicht nur die Außenkontur der Bipolarplatte exakt herstellen, sondern auch die Durchdringungen und Einströmöffnungen in den Bereichen der Tunnelungen der Dichtungsstrukturen öffnen.

Durch den Konturbeschnitt im gefügten Zustand wurde sichergestellt, dass alle funktionsrelevanten Öffnungen und die endgültige Plattenkontur exakt übereinstimmten und keine Versätze zwischen den beiden Halbschalen entstanden.

Der Laserschneidprozess wurde entsprechend angepasst, um die erhöhte Materialdicke und die komplexe Geometrie der verschweißten Platten zuverlässig zu bearbeiten. Die hohe Präzision des Laserschneidens ermöglichte es, auch die Übergänge zwischen den verschiedenen Bereichen der Bipolarplatte sauber und ohne Gratbildung auszubilden.

Ein besonderer Fokus lag auf der Öffnung der Einströmungen in die Tunnelungen beziehungsweise Durchdringungen der Dichtungsstrukturen. Diese Bereiche sind für die Medienführung innerhalb des Brennstoffzellenstapels von zentraler Bedeutung und müssen mit höchster Genauigkeit gefertigt werden, um eine optimale Abdichtung und einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Der Laserschneidprozess wurde daher so abgestimmt, dass auch diese komplexen Strukturen prozesssicher und mit hoher Maßhaltigkeit realisiert werden konnten.

Die Kombination aus Submanifold-Beschnitt und Konturbeschnitt mittels Lasertechnologie stellte im Projekt einen wesentlichen Erfolgsfaktor für die Fertigung der metallischen Bipolarplatten dar. Die gewählte Prozessabfolge ermöglichte eine flexible, wirtschaftliche und qualitativ hochwertige Herstellung, die den hohen Anforderungen an die Funktionalität und Zuverlässigkeit der Brennstoffzellenkomponenten gerecht wurde. Die Erfahrungen aus dem Projektverlauf bestätigten, dass das Laserschneiden sowohl im Einzel- als auch im gefügten Zustand der Platten eine optimale Lösung für die komplexen Bearbeitungsaufgaben im Rahmen der Bipolarplattenfertigung darstellt.



Abbildung 13: Final beschnittene Bipolarplatte

2.2.5 Dichtheitsprüfung

Die Dichtheitsprüfung wurde im Projekt als finaler Qualitätstest fest in den Fertigungsprozess der metallischen Bipolarplatten integriert. Diese Maßnahme war entscheidend, um die hohen Anforderungen an die Gasdichtigkeit der Platten zu erfüllen, die für den zuverlässigen und sicheren Betrieb des Brennstoffzellenstapels unerlässlich ist. Die Dichtheit gegenüber Wasserstoff stellt eine der zentralen Voraussetzungen für die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer des Gesamtsystems dar. Entsprechend wurde die Dichtheitsprüfung nicht nur als abschließender Kontrollschritt betrachtet, sondern als integraler Bestandteil der Qualitätssicherung während der gesamten Fertigungskette etabliert.

Bereits im Vorfeld der „Serienfertigung“ wurden verschiedene Prüfmethoden evaluiert, um eine reproduzierbare und praxisnahe Dichtheitsprüfung zu gewährleisten. Im Austausch mit dem Projektpartner ZBT wurden dabei sowohl die Anforderungen an die Prüfgenauigkeit als auch die praktische Umsetzbarkeit im Produktionsumfeld betrachtet. Die im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse und die enge Zusammenarbeit mit dem ZBT führten zur Auswahl eines automatisierten Druckhalteverfahrens als Mittel der Wahl für die Dichtheitsprüfung der Bipolarplatten.

2.2.5.1 Versuchsaufbau Dichtheitstest

Für die Dichtheitsprüfung der gefertigten Bipolarplatten wurde ein automatisierter Druckhalteversuch entwickelt und implementiert. Ziel dieses Verfahrens war es, eine objektive und wiederholgenaue Bewertung der Gasdichtigkeit jeder einzelnen Platte zu ermöglichen. Der Versuchsaufbau sah vor, dass die Bipolarplatten im Bereich der späteren Dichtungsflächen zwischen zwei speziell angefertigten Silikonplatten eingespannt wurden. Diese flexible und gleichzeitig dichte Einspannung simulierte die realen Einbaubedingungen im Stack und ermöglichte eine zuverlässige Abdichtung während der Prüfung.

Nach dem Einspannen der Platte wurde ein definierter Prüfdruck aufgebracht. Die Wahl des Prüfdrucks und die zulässigen Grenzwerte für den maximalen Druckabfall wurden in enger Abstimmung mit dem ZBT festgelegt, sodass die Prüfergebnisse direkt mit den Anforderungen für den späteren Einsatz im Brennstoffzellenstapel korrespondierten. Während des Prüfablaufs wurde der Druckabfall über eine festgelegte Zeitspanne kontinuierlich dokumentiert. Ein signifikanter Druckverlust innerhalb des Prüfintervalls deutete auf eine Undichtigkeit der Platte hin und führte zur Aussortierung des betroffenen Bauteils.

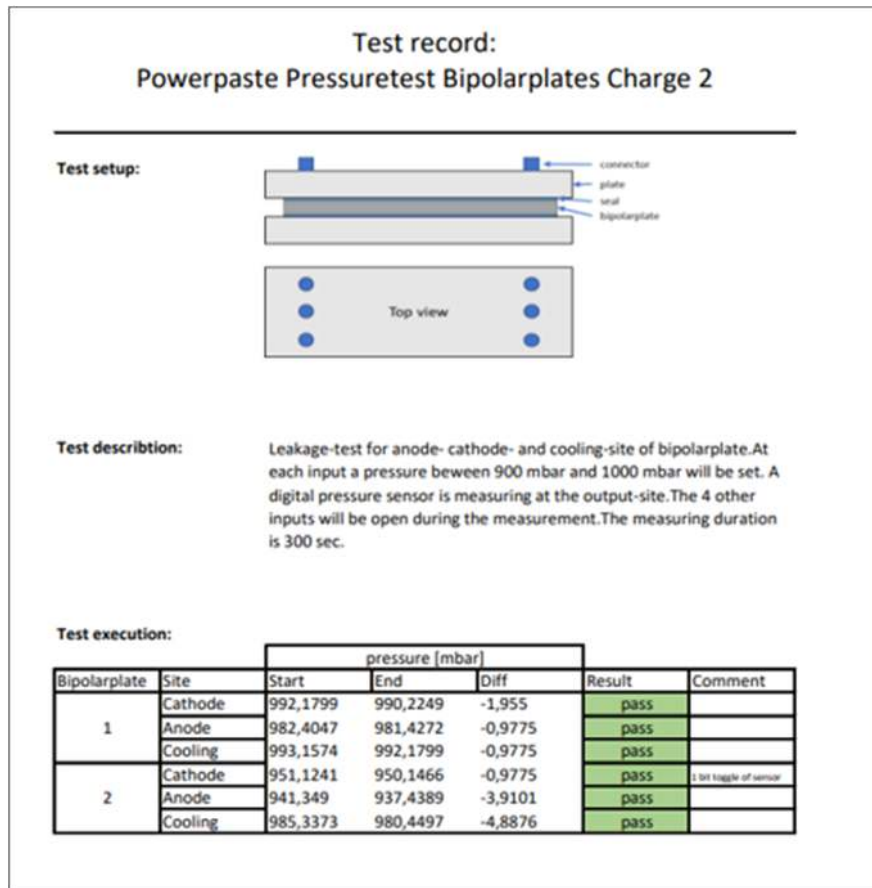


Abbildung 14: Exemplarische Darstellung des Dichtheitsprüfprotokolls

Besonderes Augenmerk wurde auf die Automatisierung des gesamten Prüfprozesses gelegt. Durch den Einsatz automatisierter Prüfstände konnte eine hohe Wiederholgenauigkeit und Prozesssicherheit erreicht werden. Die Ergebnisse der Dichtheitsprüfung wurden digital erfasst und für jede einzelne Platte dokumentiert. Dies ermöglichte eine lückenlose Rückverfolgbarkeit und diente als wichtige Grundlage für die kontinuierliche Optimierung der Fertigungs- und Fügeverfahren.

Allerdings zeigte sich im Projektverlauf, dass ein erheblicher Anteil der gefertigten Bipolarplatten die strengen Vorgaben hinsichtlich der maximal zulässigen Leckagerate nicht erfüllte. Die Durchfallquote lag deutlich über den ursprünglich erwarteten Werten. Viele Platten wiesen nach dem Fügen und Verschweißen Undichtigkeiten auf, die sich im Druckhalteversuch als signifikanter Druckverlust manifestierten. Die Ursachen hierfür waren vielfältig und reichten von minimalen Fertigungsfehlern über Schweißnahtunregelmäßigkeiten bis hin zu kleinsten Materialschäden, die im Verlauf der Umform- und Fugeschritte entstanden waren.

Platten, die die Grenzwerte überschritten, wurden einer detaillierten Fehleranalyse unterzogen, um Schwachstellen im Fertigungsprozess frühzeitig zu erkennen und gezielt zu beheben. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen direkt in die Anpassung der Schweiß- und Fügeverfahren ein und trugen dazu bei, die Ausbeute an gasdichten

Platten schrittweise zu steigern. Dennoch blieb die Quote der positiv geprüften Bipolarplatten hinter den Erwartungen zurück.

2.2.5.2 Dichtungsauftrag

Nach erfolgreicher Dichtheitsprüfung erfolgte der abschließende Dichtungsauftrag, der die Fertigung der Bipolarplatten komplettierte. Dieser Schritt wurde am Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT) mittels eines Dispensverfahrens realisiert. Das Dispensverfahren ermöglichte eine präzise und reproduzierbare Applikation der Dichtungsmasse entlang der zuvor definierten Dichtflächen der Bipolarplatten. Die exakte Dosierung und Positionierung der Dichtungsbahnen war dabei von zentraler Bedeutung, um eine zuverlässige Abdichtung im späteren Stackaufbau sicherzustellen.

Der Dichtungsauftrag stellte den letzten Schritt in der Fertigungskette der Bipolarplatten dar und war maßgeblich für die Gesamtqualität und die Betriebszuverlässigkeit des Brennstoffzellenstapels verantwortlich. Nach dem Aufbringen der Dichtung wurden die Platten einer abschließenden Sichtkontrolle unterzogen, um die Qualität und die vollständige Abdeckung der Dichtflächen zu überprüfen. Nur Bipolarplatten, die sowohl die Dichtheitsprüfung als auch den Dichtungsauftrag erfolgreich durchlaufen hatten, wurden für den Einbau in dem Stack freigegeben.

Die Kombination aus automatisierter Dichtheitsprüfung und präzisiertem Dichtungsauftrag bildete somit ein robustes Qualitätskonzept, das die hohen Anforderungen an die Gasdichtigkeit und Zuverlässigkeit metallischer Bipolarplatten im Brennstoffzellenbetrieb erfüllen sollte. Die im Projektverlauf gesammelten Erfahrungen und die kontinuierliche Optimierung der Prüf- und Fertigungsprozesse zeigten jedoch, dass insbesondere die Sicherstellung der Gasdichtigkeit eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung und Fertigung dieser Komponenten darstellte und auch für die weitere Prozessentwicklung von zentraler Bedeutung bleibt.

2.2.6 Übersicht gelieferter Komponenten

Im Verlauf des Projekts stand die Fertigung der zentralen Stack-Komponenten, insbesondere der metallischen Bipolarplatten, im Fokus. Ursprünglich wurden 150 Anodenplatten und 150 Kathodenplatten gefertigt, mit dem Ziel, daraus eine ausreichende Anzahl an Bipolarplatten für den Brennstoffzellenstack zu gewinnen. Aufgrund unerwartet hoher Ausschussquoten konnten aus diesem Fertigungslos jedoch lediglich 24 funktionsfähige Bipolarplatten hergestellt werden. Die Hauptursachen für diese hohe Ausschussrate lagen in Umformfehlern während der Blechbearbeitung sowie in erheblichen Schwierigkeiten bei der Herstellung der notwendigen Dichtschweißungen. Beide Fertigungsschritte erwiesen sich als besonders anspruchsvoll und führten zu einem erheblichen Anteil nicht verwendbarer Platten.

Zusätzlich zu den Bipolarplatten wurden auch jeweils zwei Abschlussplatten des Stapels gefertigt. Diese sogenannten Endplatten – für Anode und Kathode – unterscheiden sich von den regulären Bipolarplatten dadurch, dass sie keine Einströmöffnungen (Submanifolds) ins Flussfeld aufweisen. Sie bilden die äußeren Abschlüsse des Stapels und sind für die Abdichtung des Gesamtsystems von zentraler Bedeutung.

Die wiederholt auftretenden Fertigungsprobleme und die damit verbundenen Verzögerungen führten dazu, dass die Herstellung der Bipolarplatten mehrfach ungeplant iteriert werden musste. Hinzu kamen Lieferschwierigkeiten bei einzelnen Zulieferteilen, sodass sich der gesamte Fertigungsprozess deutlich verlängerte. Um den Fortschritt des Gesamtprojekts nicht weiter zu gefährden und die termingerechte Integration des Systems ins Fahrzeug sicherzustellen, wurde schließlich entschieden, für die Fahrzeugintegration auf einen zugekauften Stack zurückzugreifen. Diese pragmatische Lösung ermöglichte es, die geplanten Systemtests und die Demonstration im Fahrzeug fristgerecht durchzuführen, ohne den Zeitplan des Projekts weiter zu gefährden.



Abbildung 15: Powerpaste Stack

2.3 Systemaufbau und Integration

2.3.1 Brennstoffzellensystemauslegung

Die konkrete Leistungsfestlegung für das entwickelte Brennstoffzellensystem erfolgte auf eine elektrische Ausgangsleistung von 1 kW. Diese Zielgröße wurde im Konsortium auf Basis der Anforderungen für Klein- und Leichtfahrzeuge im Flotten- und Logistikeinsatz definiert und bildet das technische Rückgrat für die gesamte Systemarchitektur¹. Die Wahl dieser Leistungsklasse ermöglicht eine praxisgerechte Reichweite, eine hohe Energieeffizienz und eine kompakte Bauweise, die sowohl für Demonstratoren als auch für spätere Serienprodukte im urbanen Fahrzeugbereich geeignet ist.

Die auf 1 kW ausgelegte Systemarchitektur erleichtert zudem die Skalierbarkeit für größere Leistungsklassen und eröffnet Optionen für die Adaption an unterschiedliche Anwendungen, etwa als Range-Extender oder als Hauptantrieb in kleinen Nutzfahrzeugen. Die Kopplung mit dem PowerPaste-Wasserstoffgenerator und das gemeinsame Thermomanagement mit flüssiger Kühlung wurden speziell auf diese Leistungsklasse abgestimmt, um eine bestmögliche Integration und Effizienz zu erzielen. [4] [7] [8] Damit ist das System technisch und wirtschaftlich auf die Anforderungen der Zielmärkte zugeschnitten und bietet zugleich eine solide Basis für zukünftige Weiterentwicklungen und Skalierungen.

2.3.1.1 Kathodenpfad

Im Rahmen der Entwicklung des Kathodenpfades für das Brennstoffzellensystem wurde zunächst eine umfassende Analyse der zu erwartenden Betriebspunkte durchgeführt. Auf Basis dieser Annahmen erfolgte eine systematische Vermessung verschiedener Verdichter, um die für das System erforderlichen Luftmengen und Drücke zuverlässig bereitstellen zu können. Hierbei wurden sowohl Gebläse der Firma Micronel als auch Verdichter der Firma Celeroton untersucht. Die Micronel-Gebläse zeigten im Verlauf der Tests jedoch deutliche Schwächen im Hinblick auf die im System auftretenden erhöhten Betriebstemperaturen. Insbesondere bei längerer Laufzeit unter realistischen Bedingungen erwiesen sich die Micronel-Geräte als nicht ausreichend temperaturbeständig, was sich negativ auf die Lebensdauer und die Betriebssicherheit ausgewirkt hätte. Aufgrund dieser Einschränkungen fiel die Wahl auf einen Verdichter der Firma Celeroton, der speziell für den Einsatz in anspruchsvollen Brennstoffzellenanwendungen entwickelt wurde und auch bei höheren Temperaturen eine stabile und zuverlässige Luftförderung gewährleisten konnte.

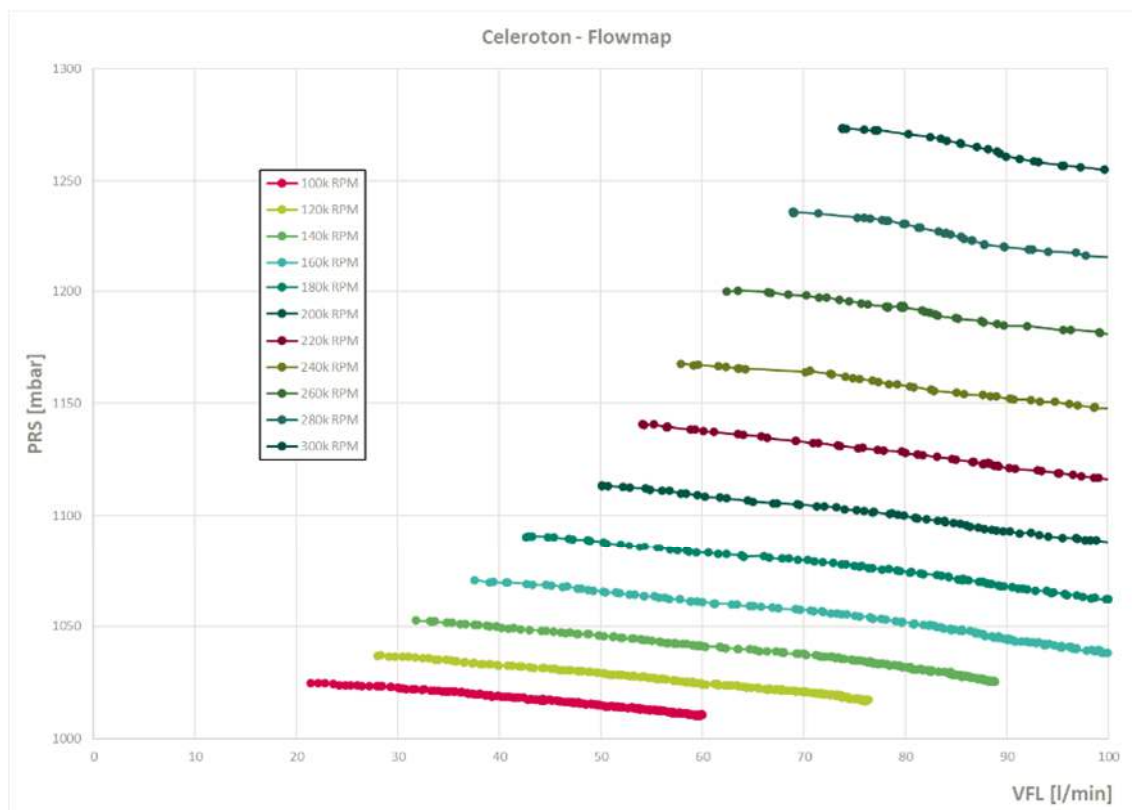


Abbildung 16: Kennfeld des im Projekt eingesetzten Verdichters

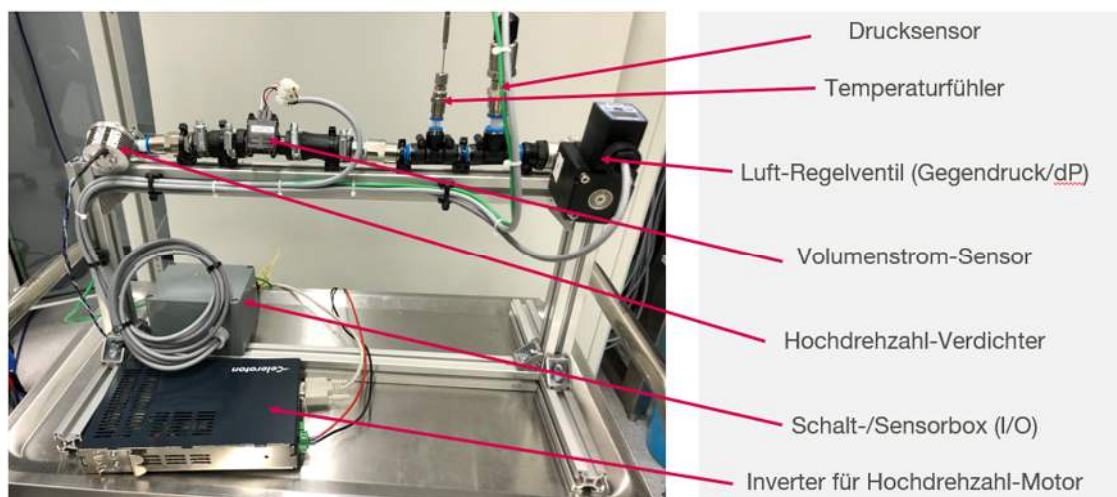


Abbildung 17: Prüfaufbau des Systempfades der Kathode

Das erste technische Konzept für die Luftversorgung sah eine aktive Druckregelung des Systems vor. Ziel war es, über den Verdichter eine konstante Druckdifferenz zwischen Anode und Kathode zu realisieren und so die Gasversorgung optimal an die

jeweiligen Betriebsbedingungen anzupassen. Im Rahmen erster Voruntersuchungen und Testreihen zeigte sich jedoch, dass mit den verfügbaren Verdichtern nur sehr geringe Druckdifferenzen erzielt werden konnten. Die erreichbaren Werte lagen deutlich unter den ursprünglich angestrebten Sollgrößen, sodass das Konzept einer aktiven Druckregelung verworfen wurde. Stattdessen wurde die Systemauslegung dahingehend angepasst, dass der Kathodenpfad mit einer festen Luftförderate betrieben wird und die Druckverhältnisse innerhalb des Stacks durch das Zusammenspiel von Luftförderung und Medienmanagement geregelt werden.

Parallel zu den Untersuchungen der Luftförderung wurde im Rahmen von Vorversuchen an einem Referenzstack festgestellt, dass auf eine gezielte Befeuchtung der Zuluft nicht verzichtet werden kann. Die ursprünglich angedachte rein passive Befeuchtung über die im Stack anfallende Prozessfeuchte erwies sich als unzureichend, um die Membranhydratation und damit die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der Brennstoffzelle dauerhaft sicherzustellen. Daher wurde ein passiver Befeuchter in den Kathodenpfad integriert, der die einströmende Luft mit Feuchtigkeit anreichert und so für stabile Betriebsbedingungen sorgt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Systementwicklung war das Management der im Kathodenpfad anfallenden Flüssigkeit. Im Betrieb der Brennstoffzelle fällt auf der Kathodenseite kontinuierlich Wasser an, das einerseits für die Befeuchtung der Membran notwendig ist, andererseits aber auch aus dem System entfernt werden muss, um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Zu diesem Zweck wurde ein Wasserabscheider im Kathodenpfad installiert, der die ausfallende Flüssigkeit sammelt. Das abgeschiedene Wasser wird anschließend in den zentralen Wassertank zurückgeführt, wo es für die Erzeugung von Wasserstoff aus PowerPaste erneut zur Verfügung steht. Durch diese Rückführung konnte ein geschlossener Wasserkreislauf im System realisiert werden, der sowohl die Effizienz als auch die Nachhaltigkeit des Gesamtsystems verbessert.

Die im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse zur Auslegung des Kathodenpfades, zur Auswahl und Integration geeigneter Verdichter sowie zum Management von Feuchtigkeit und Flüssigkeit bildeten eine wesentliche Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung eines robusten, effizienten und langlebigen Brennstoffzellensystems. Die enge Abstimmung zwischen Luftversorgung, Befeuchtung und Wasserabscheidung erwies sich als entscheidend für die Gesamtpformance und Zuverlässigkeit des Systems. Die Erfahrungen aus den Voruntersuchungen und Testläufen flossen kontinuierlich in die Optimierung des Kathodenpfades ein und trugen dazu bei, die Systemarchitektur gezielt auf die spezifischen Anforderungen der Zielanwendung auszurichten.

2.3.1.2 Anodenpfad

Im Rahmen der Entwicklung des Anodenpfades wurde eine aktive Rezirkulation des Wasserstoffs durch den Einsatz einer Pumpe der Firma Schwarzer Precision umgesetzt. Ziel dieser Maßnahme war es, den nicht umgesetzten Wasserstoff effizient im Kreislauf zu halten und so den Brennstoffverbrauch zu optimieren. Bereits bei den ersten Systemversuchen zeigte sich, dass im Anodenpfad eine ungewöhnlich hohe Menge an Feuchtigkeit anfiel. Diese hohe Feuchtebelastung ist auf die spezifischen

Betriebsbedingungen mit feuchtem Wasserstoff aus der PowerPaste-Hydrolyse zurückzuführen.

Um den Herausforderungen der Feuchtebewältigung zu begegnen, wurden dem System – ähnlich wie auf der Kathodenseite – zusätzliche Wasserabscheider sowohl vor als auch hinter der Rezirkulationspumpe hinzugefügt. Diese Wasserabscheider sorgen dafür, dass anfallende Flüssigkeit zuverlässig aus dem Gasstrom entfernt wird, bevor sie in die Pumpe gelangt oder nach der Pumpe weitertransportiert wird. Die Vermeidung von Tröpfchenbildung in der Pumpe ist dabei essenziell, da andernfalls Volumenstromverluste auftreten können, die die Effizienz der Rezirkulation und damit die gesamte Brennstoffzellensystemleistung beeinträchtigen würden. Das abgeschiedene Wasser wird dem zentralen Wassertank zugeführt und steht dort für die kontinuierliche Wasserstoffherzeugung aus PowerPaste wieder zur Verfügung.

Zusätzlich wurde im System ein für die Anwendung typisches Purge-Ventil verbaut. Dieses Ventil dient der gezielten Entlüftung und Entfernung von Inertgasen sowie überschüssiger Feuchtigkeit aus dem Rezirkulationskreislauf. Die Regelung des Purge-Ventils erfolgt zeitgesteuert. Die optimalen Intervalle und Öffnungszeiten wurden in umfangreichen Voruntersuchungen ermittelt, um sowohl die Wasserstoffausnutzung als auch die Stack-Performance zu sichern. Gerade bei wechselnden Lastpunkten und unterschiedlichen Feuchtegehalten im Kreislauf ist ein zuverlässiges Purge-Management entscheidend für einen störungsfreien Betrieb.

Eine besondere Herausforderung stellte das Temperaturmanagement im relativ großvolumigen Rezirkulationspfad dar. Insbesondere bei niedrigen Leistungspunkten, wenn weniger Abwärme durch die Brennstoffzelle produziert wird, neigen die Gase im Pfad zur Auskühlung. Dies begünstigt die Kondensation von Feuchtigkeit und erhöht die Gefahr von Wasseransammlungen, die wiederum die Funktion der Pumpe und die Systemstabilität beeinträchtigen könnten. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wurde das Temperaturmanagement gezielt optimiert und zusätzliche Sensorik zur Temperaturüberwachung integriert. Die enge Abstimmung mit dem zentralen Kühlsystem war dabei ein wesentlicher Faktor, um die Betriebsbedingungen im Rezirkulationspfad stabil zu halten und die Lebensdauer der Systemkomponenten zu verlängern.

Die Kombination aus einer leistungsfähigen Rezirkulationspumpe, einem ausgeklügelten Wasserabscheiderkonzept und einer bedarfsgerecht gesteuerten Purge-Funktion stellt sicher, dass das Brennstoffzellensystem auch unter anspruchsvollen Betriebsbedingungen zuverlässig, effizient und langlebig arbeitet. Das Management der Feuchtigkeit und die Kontrolle der Betriebsparameter im Anodenpfad sind dabei entscheidend für die Gesamtleistung und Praxistauglichkeit des Systems.

2.3.1.3 Kühlkreislauf

Im Zuge der Entwicklung des Brennstoffzellensystems wurde ein besonders effizientes und kompaktes Kühlkonzept realisiert, das sich durch die vollständige Integration des Kühlkreislaufs des Wasserstoffgenerators in das Brennstoffzellensystem auszeichnet. Diese Kopplung beider Hauptwärmequellen ermöglichte es, das Thermomanagement zentral zu steuern und die Systemarchitektur deutlich zu vereinfachen. Durch die

gemeinsame Nutzung des Kühlkreislaufs konnte nicht nur Bauraum eingespart, sondern auch die Skalierbarkeit des Gesamtsystems verbessert werden, da zusätzliche Komponenten wie separate Kühler oder Pumpen entfallen konnten.

Ein zentrales Entwicklungsziel bestand darin, die Temperaturdifferenz über dem gesamten Stack hinweg auf maximal fünf Kelvin zu begrenzen. Um diese anspruchsvolle Anforderung zu erfüllen, waren mehrere Iterationen zur Entwicklung und Feinabstimmung des Kühlreglers notwendig. In jeder Entwicklungsstufe wurden die Regelalgorithmen weiter optimiert, um eine möglichst konstante und gleichmäßige Kühlung zu gewährleisten. Dabei galt es, sowohl die Reaktionsgeschwindigkeit des Reglers als auch die Präzision der Temperaturführung in Einklang zu bringen. Die Herausforderung lag darin, auf wechselnde Betriebsbedingungen und Lastanforderungen flexibel zu reagieren, ohne die Temperaturdifferenz über dem Stack zu vergrößern.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Systementwicklung war die Auswahl und Vermessung geeigneter Radiatoren. Da für den angestrebten Leistungsbereich von etwa 1 kW keine exakt spezifizierten Komponenten am Markt verfügbar waren, wurden verschiedene Radiatormodelle im Versuchsbetrieb getestet. Ziel war es, die Effizienz der Wärmeabfuhr unter realen Betriebsbedingungen zu ermitteln und die optimale Komponente für das System auszuwählen. Parallel dazu wurden passende Lüfter adaptiert und ebenfalls vermessen, um das Zusammenspiel zwischen Kühlmittelvolumenstrom und Luftdurchsatz optimal aufeinander abzustimmen. Die Versuche umfassten unterschiedliche Randbedingungen, insbesondere verschiedene Außentemperaturen, um die Leistungsfähigkeit des Kühlsystems auch unter extremen Bedingungen sicherzustellen.

Die Abstimmung zwischen Radiator und Lüfter war von entscheidender Bedeutung, da die Effizienz der Wärmeabfuhr maßgeblich vom Zusammenspiel beider Komponenten abhängt. Es zeigte sich, dass eine zu geringe Luftmenge zu einer unzureichenden Kühlung führen kann, während ein zu hoher Luftdurchsatz den Energieverbrauch der Hilfskomponenten unnötig steigert. Daher wurde in mehreren Testreihen das Verhältnis zwischen Kühlmittelstrom und Luftmenge systematisch variiert, um ein Optimum hinsichtlich Effizienz, Bauraum und Energiebedarf zu finden.

Im Rahmen der Versuche wurde zudem die Diskrepanz zwischen der Genauigkeit des Reglers und seiner Dynamik untersucht. Eine sehr präzise Temperaturregelung kann dazu führen, dass der Regler zu träge auf schnelle Lastwechsel reagiert, während eine zu hohe Dynamik die Temperaturführung destabilisieren kann. Durch gezielte Anpassungen der Regelparameter und den Einsatz moderner Sensorik gelang es, ein Optimum zu erarbeiten, das sowohl eine hohe Genauigkeit als auch eine ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit gewährleistet. So konnte sichergestellt werden, dass das Kühlsystem sowohl bei schnellen Lastwechseln als auch im stationären Betrieb zuverlässig arbeitet und die Temperaturdifferenz über dem Stack stets im gewünschten Bereich bleibt.

Die Erfahrungen aus den umfangreichen Versuchsreihen und die kontinuierliche Optimierung der Regelstrategie trugen maßgeblich dazu bei, ein Kühlsystem zu realisieren, das den besonderen Anforderungen eines kompakten, modularen Brennstoffzellensystems gerecht wird. Die Integration des Kühlkreislaufs des Gasgenerators, die sorgfältige Auswahl und Vermessung der Komponenten sowie die

gezielte Entwicklung des Reglers bilden die Grundlage für ein effizientes, robustes und zukunftsfähiges Thermomanagement, das sowohl für die aktuelle Anwendung als auch für zukünftige, größere Leistungsklassen geeignet ist.

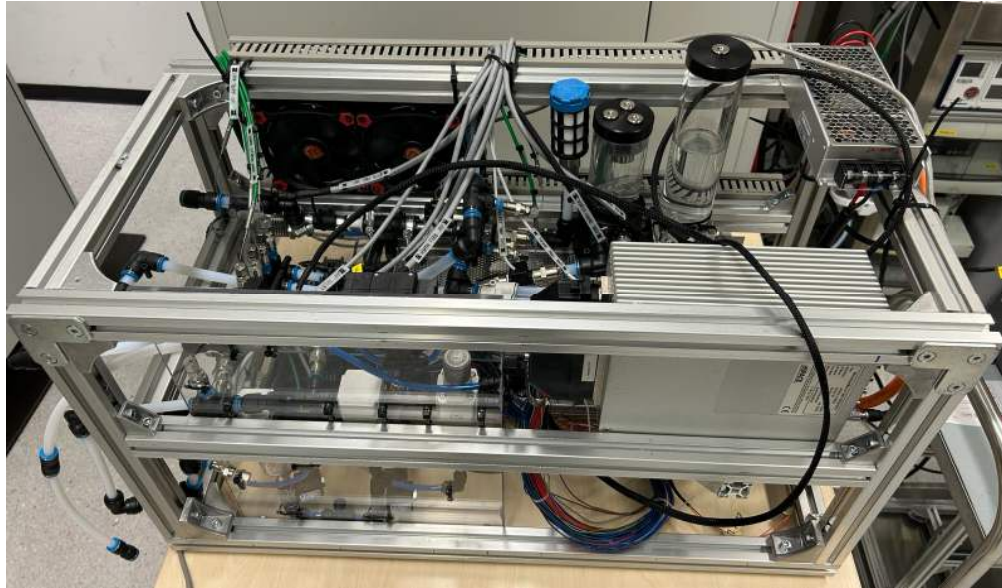


Abbildung 18: Gesamtaufbau der Systempfade

2.3.2 Systemaufbau

Im Rahmen des Projekts wurden die zuvor einzeln getesteten Systempfade zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem zusammengeführt. Für die Anbindung der verschiedenen Sensoren und Aktuatoren an den zentralen Controller erfolgte der Aufbau eines Schnittstellenmoduls, das es ermöglichte, auch die notwendigen Leistungstreiber der Komponenten zu integrieren. Besonderes Augenmerk wurde daraufgelegt, dass der gesamte Systemaufbau den baulichen Vorgaben des Demonstratorfahrzeugs entspricht und somit in den vorhandenen Bauraum passt.

Die Schnittstellen zu den weiteren Gesamtsystemkomponenten – insbesondere zum Fahrzeug und zum Gasgenerator – wurden im Rahmen eines Workshops gemeinsam mit den beteiligten Partnern festgelegt und abgestimmt. Dadurch konnte eine reibungslose Integration und Kommunikation zwischen den Teilsystemen sichergestellt werden.

Das Gesamtsystem wurde so konzipiert und aufgebaut, dass es zunächst unter Laborbedingungen getestet und sukzessive optimiert werden konnte, bevor die finale Integration ins Demonstratorfahrzeug erfolgte. Dies ermöglichte eine frühzeitige Identifikation und Behebung möglicher Schwachstellen und trug maßgeblich zur Erhöhung der Systemzuverlässigkeit bei.

2.3.3 Kommunikation

Im Rahmen des Projekts wurde die Kommunikationsarchitektur als zentraler Bestandteil des Gesamtsystems von Beginn an mit besonderer Sorgfalt geplant und umgesetzt. Vor dem Hintergrund der Anforderungen an Zuverlässigkeit, Echtzeitfähigkeit und Interoperabilität, wie sie insbesondere in der Automobilindustrie üblich sind, fiel die Entscheidung, die gesamte Systemkommunikation auf dem etablierten CAN-Bus-Standard aufzubauen. Dieses Bussystem war nicht nur weit verbreitet und bewährt, sondern bot auch die notwendige Flexibilität, um unterschiedlichste Systemkomponenten effizient miteinander zu vernetzen und einen sicheren Datenaustausch zu gewährleisten. Um die spezifischen Anforderungen des Projekts abzubilden, wurde eine auf das Gesamtsystem zugeschnittene CAN-Struktur entwickelt. Im Zuge dessen entstand ein detailliertes .dbc-File, das sämtliche zu übertragenden Nachrichten, Signale und deren Codierung beschrieb. Dieses File bildete die Grundlage für die Implementierung der Kommunikationsschnittstellen in Hard- und Software und stellte sicher, dass alle Projektpartner auf einen einheitlichen Datenrahmen zugreifen konnten.

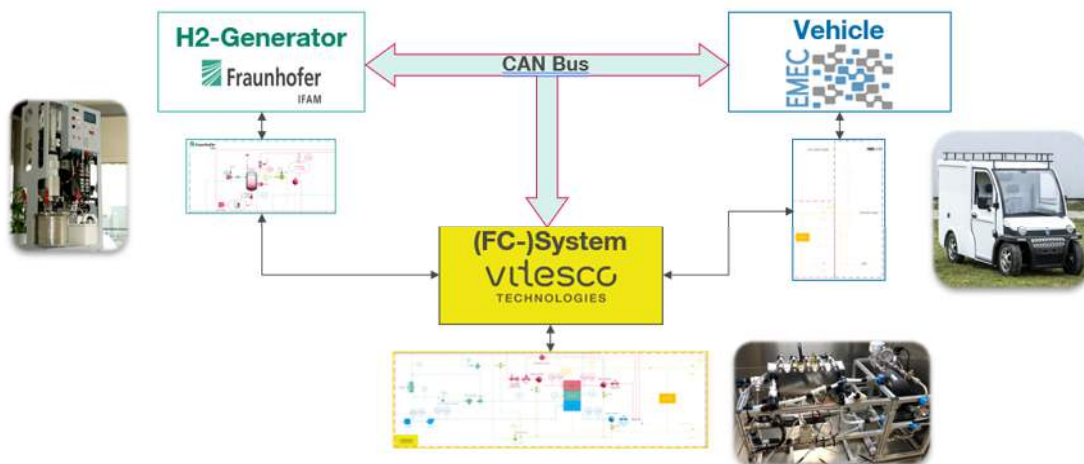


Abbildung 19: Übergeordnete Kommunikationsstruktur

Forschungsprojekt
PowerPaste – Mobile Wasserstoffversorgung
der nächsten Generation

ID Familie	MSG ID	MSG Name	Timing	Global Name	Sender	Lenzth	Data Code	Value To	Initial Val	Factor	Offset	Min	Max	Unit
Werkzeuge														
040	WU_SYSTEM	WU_SYSTEM	300ms	Genus: WU2TM nach Werränder	0	8	normal	0	0	1	0	0	0	255.7
040	WU_MASSEN	WU_MASSEN	300ms	Genus: WU2TM nach Werränder	0	8	normal	0	0	1	0	0	0	255.7
040	WU_VERHILFE	WU_VERHILFE	300ms	Genus: WU2TM nach Werränder	0	8	normal	0	0	1	0	0	0	255.7
H2U														
Batterie-Regelung														
040	H2U_MASSEN_Lamp_Gesamt	H2U_MASSEN_Lamp_Gesamt	300ms	T: WU2TM see charging_inlet I: WU2TM see charging_status	0	10	normal	0	0.01	-50	-50	0.01	50	0.01 %
040	H2U_SYSTEM_H2_Menge	H2U_SYSTEM_H2_Menge	300ms	STATUS: LOGFB emergency charging	0	1	normal	0	0	0	0	0	0	1.7
040	H2U_SYSTEM_Status_MASSEN	H2U_SYSTEM_Status_MASSEN	300ms	T: WU2TM see I-2	0	10	normal	0	0.001	0	0	0	0	0.1500 %
040	H2U_SYSTEM_Status_MASSEN	H2U_SYSTEM_Status_MASSEN	300ms	STATUS: LOGFB error	0	1	normal	0	1	0	0	0	0	1.7
040	H2U_SYSTEM_Status_MASSEN	H2U_SYSTEM_Status_MASSEN	300ms	STATUS: LOGFB emergency charging	0	1	normal	0	0	0	0	0	0	1.7
040	H2U_SYSTEM_Status_MASSEN	H2U_SYSTEM_Status_MASSEN	300ms	STATUS: LOGFB normal charging	0	1	normal	0	1	0	0	0	0	1.7
040	H2U_SYSTEM_Status_MASSEN	H2U_SYSTEM_Status_MASSEN	300ms	STATUS: LOGFB emergency charging	0	1	normal	0	0	0	0	0	0	1.7
Sensor-Signale														
040	SEN_20518M_Deckel_Luft	SEN_20518M_Deckel_Luft	300ms	T: WU2TM see charging_inlet I: WU2TM see charging_status	0	10	normal	0	0.01	-50	-50	0.01	50	0.01 %
040	SEN_20518M_Wasserstoff	SEN_20518M_Wasserstoff	300ms	T: WU2TM see charging_inlet I: WU2TM see charging_status	0	10	normal	0	0.001	0	0	0	0	0.1500 %
040	SEN_100FB_Sensoren	SEN_100FB_Sensoren	300ms	T: WU2TM see Werränder I: WU2TM see Werränder	0	10	normal	0	0.01	-50	-50	0.01	50	0.01 %
040	SEN_100FB_Temp_Rakete	SEN_100FB_Temp_Rakete	300ms	T: WU2TM see Werränder I: WU2TM see Werränder	0	10	normal	0	1	-100	-100	0.01	100	0.01 %
040	SEN_100FB_Temp_Gas	SEN_100FB_Temp_Gas	300ms	T: WU2TM see Werränder I: WU2TM see Werränder	0	10	normal	0	0.01	-50	-50	0.01	50	0.01 %

Abbildung 20: Auszug aus der CAN- Gesamtstruktur

Die gewählte Kommunikationsstruktur erfüllte dabei mehrere zentrale Aufgaben: Zum einen ermöglichte sie die Übertragung aller relevanten Steuer- und Statusinformationen zwischen den verschiedenen Systemkomponenten, wie Sensoren, Aktuatoren, Controller, Fahrzeug und Gasgenerator. Zum anderen diente sie der kontinuierlichen Aufzeichnung und Analyse der Systemdaten. Diese Funktion war insbesondere für die Erprobung und Optimierung des Gesamtsystems von großer Bedeutung, da sie eine lückenlose Nachverfolgung von Betriebszuständen, Fehlern und Leistungsparametern erlaubte. Durch die standardisierte Datenaufzeichnung im CAN-Format konnten im Rahmen der Labor- und Feldtests gezielt Anpassungen vorgenommen und die Systemperformance sukzessive verbessert werden.

Die sukzessive Erweiterung und Anpassung der Kommunikationsschnittstellen erfolgte in enger Abstimmung mit allen Projektpartnern. In regelmäßigen Workshops und Abstimmungsrunden wurden die zu übertragenden Parameter, die Nachrichtenstruktur sowie die Priorisierung und das Timing der Datenübertragung gemeinsam festgelegt. Dies stellte sicher, dass alle systemrelevanten Informationen – von Sensordaten über Steuerbefehle bis hin zu Diagnosedaten – zuverlässig und in der geforderten Qualität übermittelt wurden. Die enge Zusammenarbeit ermöglichte es zudem, flexibel auf neue Anforderungen zu reagieren und die Kommunikationsarchitektur bei Bedarf zu erweitern, etwa wenn zusätzliche Sensoren oder Aktuatoren in das System integriert wurden.

Insgesamt trug die auf dem CAN-Bus basierende Kommunikationslösung maßgeblich zur Robustheit, Skalierbarkeit und Zukunftsfähigkeit des Gesamtsystems bei. Sie bildete das Rückgrat für die effiziente Zusammenarbeit aller Systemkomponenten und schuf die Voraussetzung für eine erfolgreiche Integration in das Demonstratorfahrzeug. Durch die konsequente Ausrichtung an Industriestandards und

die enge Abstimmung im Projektteam wurde eine Kommunikationsinfrastruktur geschaffen, die nicht nur den aktuellen Anforderungen gerecht wurde, sondern auch für zukünftige Erweiterungen und Anpassungen bestens gerüstet war.

2.3.3.1 Errorhandling

Im Verlauf des Projekts wurde ein umfassendes Konzept zum Error Handling entwickelt und implementiert, um die Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit des Gesamtsystems sicherzustellen. Zunächst erfolgte eine systematische Identifikation und Analyse potenzieller Fehlerquellen, wobei alle erfassten Systemfehler in verschiedene Klassen unterteilt wurden. Diese Kategorisierung ermöglichte es, für jede Art von Fehler eine angemessene Reaktion zu definieren und so das Risiko von Systemausfällen oder sicherheitskritischen Situationen zu minimieren.

Die erste Fehlerklasse umfasste solche Fehler, die lediglich zu einer Warnung führten, den Betrieb des Systems jedoch nicht beeinträchtigten. Diese Warnungen wurden dem Nutzer angezeigt, sodass ein Bewusstsein für potenzielle Probleme geschaffen wurde, ohne dass der laufende Betrieb unterbrochen werden musste. Die zweite Fehlerklasse beinhaltete Fehler, die einen sicheren Weiterbetrieb des Systems nicht mehr zuließen und daher ein geregeltes Herunterfahren des Systems erforderlich machten. In diesen Fällen wurde das System kontrolliert in einen sicheren Zustand überführt, um Schäden an Komponenten zu vermeiden und die Sicherheit der Umgebung zu gewährleisten. Die dritte und kritischste Fehlerklasse bestand aus Fehlern, die zu einer Notabschaltung führten, da sie sicherheitsrelevant waren und eine unmittelbare Gefahr für Anwender oder System darstellen konnten. Hier erfolgte eine sofortige Unterbrechung des Betriebs, um mögliche Gefährdungen auszuschließen.

Insgesamt wurden im Rahmen der Risikoanalyse und in enger Abstimmung mit den Projektpartnern 68 verschiedene Error Cases definiert. Die Erarbeitung dieser Fehlerfälle erfolgte iterativ und wurde kontinuierlich erweitert, um auch im weiteren Projektverlauf neu identifizierte Risiken angemessen abzudecken. Grundlage für die Definition der Fehlerklassen und -fälle war eine umfassende Risikobewertung, bei der sowohl technische als auch sicherheitsrelevante Aspekte berücksichtigt wurden. Durch die enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern konnte sichergestellt werden, dass alle relevanten Systembereiche abgedeckt und die jeweiligen Gegenmaßnahmen optimal auf die spezifischen Anforderungen des Gesamtsystems abgestimmt wurden.

Ein wesentlicher Bestandteil des Error Handlings war die Emulation der definierten Fehlerfälle im Teststandsbetrieb. Hierzu wurden die einzelnen Fehler gezielt im Labor simuliert, um das Verhalten des Systems unter realistischen Bedingungen zu prüfen. Diese Vorgehensweise ermöglichte es, die Wirksamkeit der implementierten Fehlerreaktionen zu validieren und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen. So konnten beispielsweise die Abläufe für das geregelte Herunterfahren und die Notabschaltung im Vorfeld getestet und optimiert werden, bevor das System in den

realen Betrieb überführt wurde. Durch diese umfangreichen Tests wurde ein hohes Maß an Sicherheit und Zuverlässigkeit erreicht und die Grundlage für einen robusten Betrieb im späteren Einsatz geschaffen.

2.3.4 Prüfstands- und Systemversuchsergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurden umfangreiche Prüfstandsversuche durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit und das Betriebsverhalten des entwickelten Gesamtsystems unter verschiedenen Bedingungen zu validieren. Ziel war es, sämtliche vorausgelegten Leistungspunkte systematisch abzufahren und die Betriebsparameter so zu optimieren, dass stabile und effiziente Systemzustände erreicht werden konnten. Zu Beginn der Versuchsreihen lag der Schwerpunkt auf der Einstellung und Regelung des Systems, insbesondere auf der Optimierung der Kathodenfeuchte. Die Steuerung wurde zunächst auf ein rechnerisches Optimum ausgerichtet, das eine relative Luftfeuchtigkeit von 100 % am Kathodenauslass vorsah. Diese Einstellung basierte auf theoretischen Überlegungen, wonach eine maximale Feuchte an der Kathode die elektrochemischen Prozesse begünstigen und somit einen optimalen Zellbetrieb ermöglichen sollte.

Im Verlauf der Prüfstandsuntersuchungen zeigte sich jedoch, dass das rechnerische Optimum von 100 % relativer Feuchte am Kathodenauslass in der Praxis nicht zu einem stabilen Betriebspunkt führte. Vielmehr wurde beobachtet, dass die zusätzliche Befeuchtung, die durch die Anode in das System eingebracht wurde, zu einer Überflutung der Flussfeldstrukturen innerhalb der Brennstoffzelle führte. Diese Überflutung beeinträchtigte die Gasverteilung und führte zu Instabilitäten im Zellbetrieb, was sich negativ auf die Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer des Systems auswirken konnte. In mehreren iterativen Anpassungsschritten wurde daher der optimale Betriebspunkt neu ermittelt. Es stellte sich heraus, dass eine relative Feuchte im Bereich von 85–90 % am Kathodenauslass zu deutlich stabileren Betriebsbedingungen führte. In diesem Feuchtebereich konnten Überflutungseffekte vermieden und gleichzeitig eine ausreichende Membranbefeuchtung sichergestellt werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden unmittelbar in die Regelstrategie des Systems integriert und in weiteren Prüfstandsversuchen erfolgreich verifiziert.

Die Prüfstandstests umfassten neben der Feuchteoptimierung auch die Untersuchung der Systemleistung unter verschiedenen Lastbedingungen. Alle Vorversuche am Gesamtsystem wurden unter normalen Laborbedingungen durchgeführt, um reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Im Rahmen dieser Tests konnte am Prüfstand eine Systemleistung von 700 W nachgewiesen werden. Diese 700 W stellen die Ausgangsleistung des Gesamtsystems dar, also die Leistung, die nach Abzug aller parasitären Verbraucher und Wandlungsverluste zur Verfügung steht. Auf Stackebene, das heißt vor den Leistungsverlusten durch Nebenaggregate und Umwandlungsverluste, wurde eine elektrische Leistung von etwa 1 kW erzielt. Damit wurde das zentrale Ziel des Projektes, eine leistungsfähige und stabile

Stromversorgung für das anvisierte Fahrzeugkonzept zu realisieren, erfolgreich erreicht.

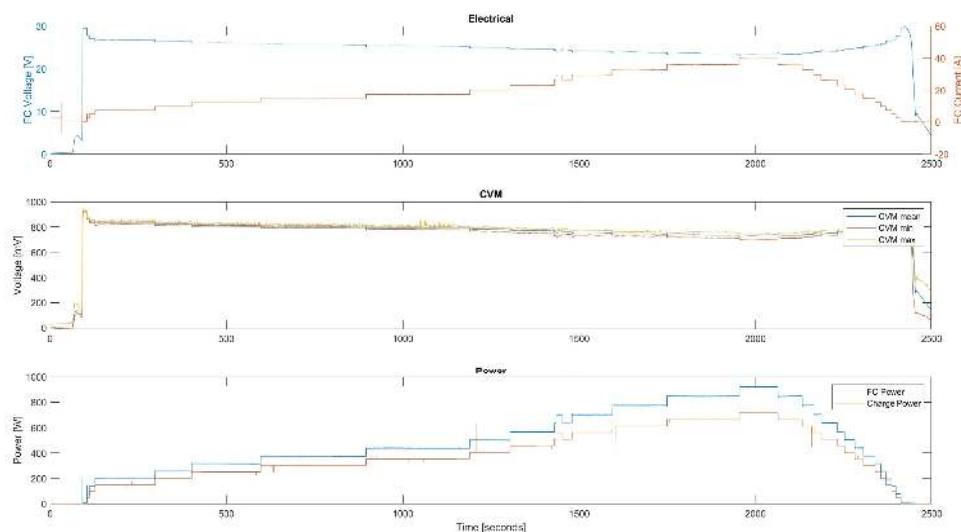


Abbildung 21: Darstellung der Erreichten Systemleistung bei Labortests

Die Integration des Systems ins Demonstratorfahrzeug stellte im Anschluss an die Laborversuche eine weitere Herausforderung dar. Im Gegensatz zu den konstanten Laborbedingungen wichen die Umgebungstemperaturen im Fahrzeugbetrieb deutlich von den zuvor getesteten Randbedingungen ab. Die Integration ins Fahrzeug sowie die ersten Fahrversuche wurden im Dezember 2024 durchgeführt. Während dieser Versuche traten insbesondere bei tiefen Umgebungstemperaturen Probleme beim spontanen Hochfahren der Systemleistung auf. Es zeigte sich, dass das System bei Kaltstartbedingungen nicht sofort die volle Leistung bereitstellen konnte, da die Komponenten zunächst auf Betriebstemperatur gebracht werden mussten. Als praktikable Lösung wurde ein gezieltes „Warmfahren“ des Systems eingeführt, um die erforderlichen Temperaturen für einen stabilen Betrieb zu erreichen. Im Rahmen der Fahrzeugtests wurde zudem erkannt, dass ein volumetrisch kleinerer Aufbau der Anode dazu beitragen könnte, die Kaltstartproblematik weiter zu minimieren und die Systemreaktion bei niedrigen Temperaturen zu verbessern. Die Umsetzung dieser Optimierung war jedoch nicht Gegenstand des aktuellen Projektes und könnte im Rahmen einer möglichen nächsten Ausbaustufe realisiert werden.

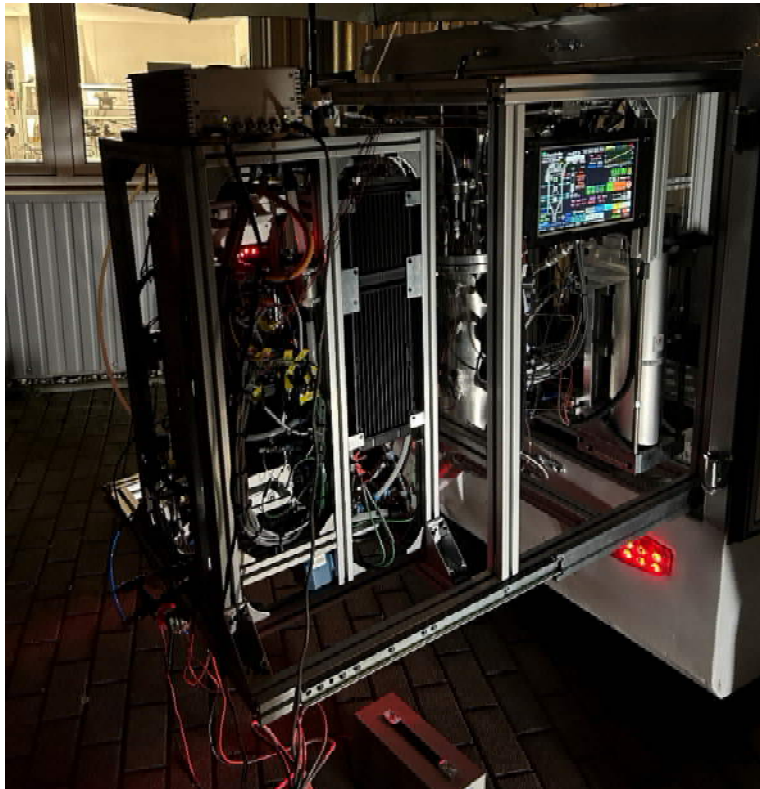


Abbildung 22: Integriertes System in Demonstratorfahrzeug

Insgesamt bestätigten die Prüfstands- und Systemversuchsergebnisse die grundsätzliche Funktionalität und Leistungsfähigkeit des entwickelten Systems. Die iterative Anpassung der Betriebsparameter, insbesondere der Kathodenfeuchte, führte zu einer signifikanten Verbesserung der Systemstabilität und Effizienz. Die erreichte Systemleistung von 700 W im Dauerbetrieb und die erfolgreiche Integration ins Fahrzeug demonstrierten eindrucksvoll die Praxistauglichkeit des entwickelten Brennstoffzellensystems. Gleichzeitig lieferten die Versuche wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Optimierungen, etwa im Hinblick auf das Anodendesign und das Kaltstartverhalten. Die enge Abstimmung und Zusammenarbeit mit den Projektpartnern während der gesamten Testphase trug maßgeblich dazu bei, die gesteckten Projektziele zu erreichen und das System für den realen Einsatz weiterzuentwickeln. Damit wurde gezeigt, dass das entwickelte System nicht nur die geforderten Leistungsdaten im Labor, sondern auch unter realen Bedingungen im Fahrzeugbetrieb zuverlässig erfüllen kann. Die gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse bilden eine solide Grundlage für weiterführende Entwicklungsarbeiten und mögliche nächste Innovationsschritte.

2.4 Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Im Bereich der stofflich gebundenen Wasserstoffspeicherung für mobile Anwendungen haben sich in der Projektlaufzeit bedeutende Fortschritte ergeben, insbesondere bei Metallhydridspeichern. Neue Entwicklungen ermöglichen eine verbesserte Handhabung und eine schnellere Freisetzung des Wasserstoffs aus diesen Speichern. [9] [10] [11] Trotz dieser Fortschritte bestehen weiterhin Herausforderungen, die den breiten Einsatz im Verkehrssektor einschränken. So sind die derzeitigen Speicherlösungen vor allem für spezielle Anwendungen wie Drohnen oder mobile Notstromgeräte geeignet, während für den Massenmarkt noch weitere Optimierungen erforderlich sind. Insbesondere die Materialentwicklung und die Integration in Fahrzeugkonzepte müssen noch verbessert werden, um die Technologie marktreif zu machen. Insgesamt befindet sich die stofflich gebundene Wasserstoffspeicherung für mobile Anwendungen auf einem vielversprechenden Weg, auch wenn der umfassende Durchbruch noch aussteht. Verschiedene Forschungs- und Industriepartner arbeiten kontinuierlich daran, die bestehenden Hürden zu überwinden und den Einsatzbereich zu erweitern.

2.5 Berichte, Vorträge und Veröffentlichungen

Während der gesamten Projektlaufzeit wurden von der Vitesco Technologies GmbH keine Berichte, Vorträge oder wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu den im Projekt erzielten Ergebnissen angefertigt oder veröffentlicht. Dies betraf sowohl externe Fachpublikationen als auch Präsentationen auf Konferenzen oder Tagungen. Die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse und Entwicklungen wurden somit ausschließlich intern genutzt und nicht öffentlich kommuniziert.

2.6 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Während der gesamten Projektlaufzeit wurden seitens der Vitesco Technologies GmbH keine neuen Schutzrechte oder Erfindungen angemeldet. Dementsprechend gab es auch keine entsprechenden Veröffentlichungen oder Mitteilungen in Bezug auf neue Patente oder Erfindungen, die aus den Projektarbeiten hervorgegangen wären. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Lösungen wurden stattdessen im Rahmen der internen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Unternehmens vertraulich behandelt und weitergenutzt, ohne dass es zu einer externen Offenlegung von Schutzrechten kam.

3 Referenzen

Nachfolgend sind die Literaturstellen aufgelistet.

- [1] A comprehensive review on metal hydrides-based hydrogen storage materials for mobile applications, ScienceDirect, 2024.
- [2] Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications, ScienceDirect, 2021.
- [3] Hydrogen-storage materials for mobile applications, Nature, 2001.
- [4] [PDF] Hydrogen-storage materials for mobile applications, Schlapbach & Züttel, 2001.
- [5] Recent developments of proton exchange membranes for PEMFC: A review, Frontiers in Energy Research, 2022.
- [6] Meet the material: PowerPaste, Fraunhofer IFAM, 2021.
- [7] POWERPASTE - Fraunhofer IFAM, 2021.
- [8] New Powerpaste for Hydrogen Storage, Renewable Energy Magazine, 2021.
- [9] Fuel cell technology review: Types, economy, applications, and challenges, ScienceDirect, 2025.
- [10] PEM Fuel cell and electrolysis cell technologies and hydrogen infrastructure, RSC, 2022.
- [11] Hydrogen Storage Materials for Mobile and Stationary Applications, Chemistry Europe, 2015.