

Sachbericht (Schlussbericht)

zum Verwendungsnachweis zu FuE Vorhaben

Reg.-Nr.: 49VF190028

FuE-Einrichtung: Zentrum für Brennstoffzellentechnik ZBT GmbH

Kurztitel: μ PEMh-Brennstoffzellensystem

Laufzeit des Projekts vom: 01.09.2019

bis: 28.02.2022

Dipl.-Ing. Georg Dura, 0203/7598-2344

(Name und Telefon Projektleiter)



Duisburg

(Ort)

(Datum)

(Rechtsverbindliche Unterschrift)

1) Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens

In diesem Vorhaben wurden die Vorteile einer Powerbank um die Vorteile eines Brennstoffzellensystems ergänzt und zu einem neuartigen Hybridsystem zusammengeführt. So kann künftig die netzunabhängige Betriebsdauer einer Powerbank und somit des mobilen Endgerätes unabhängig vom Stromnetz verlängert werden. Das entwicklungsstechnische Ziel bestand dabei in der Realisierung eines vollintegrierten Brennstoffzellenhybridsystems (μ BZh-System) für portable Elektronik- und stationäre Kleinanwendungen als Funktionsmuster. Neben einem leistungsstarken Akkumulator als primärem Energiespeicher beinhaltet das System Brennstoffzellen als Langzeitenergiewandler, einen Wasserstoffspeicher und ein Purge-Ventil, das eine passive Betriebsartweise durch ein innovatives Gehäusekonzept auf 3D-Druck Basis ermöglicht. Abbildung 1.1 zeigt eine schematische Darstellung des Systemaufbaus mit den jeweiligen Komponenten.

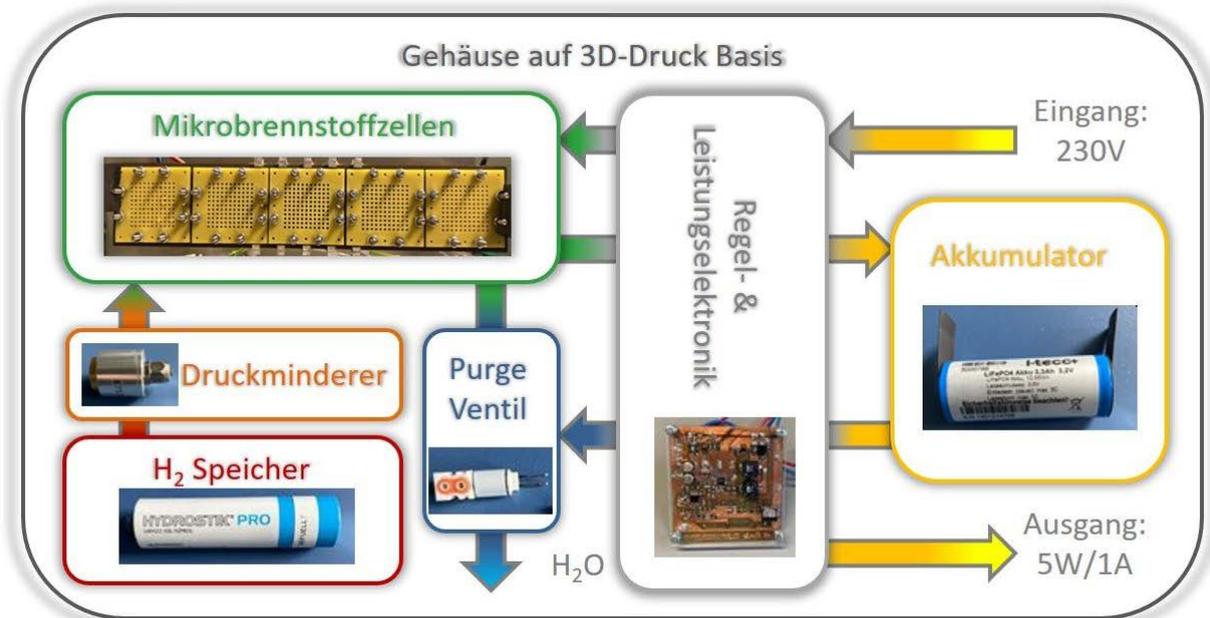


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung des portablen Brennstoffzellenhybridsystems

Für die Forschungsstelle bestand ein weiteres wesentliches Ziel des Vorhabens in der Konzeptionierung und dem Aufbau eines Mikrobrennstoffzellen-System-Teststandes. Diese Anlage diene während des Vorhabens und künftig als Entwicklungsplattform für Brennstoffzellenhybridsysteme im Leistungsbereich von 2-10 Watt. Mit dem Teststand können sowohl einzelne Systemkomponenten individuell wie auch im Verbund vermessen und evaluiert werden. Er deckt dabei auch die Grundfunktionen eines herkömmlichen Mikrobrennstoffzellenteststandes wie z.B. Brennstoffzellenvermessungen und Einfahrprozeduren ab. Ebenfalls verfügt er über Messmöglichkeiten in Bezug auf Zell-Innenwiderstände und -Dichtigkeit, womit sich neue Brennstoffzellen ebenfalls in dieser Anlage funktional angemessen assemblieren lassen. Abgerundet werden die technologischen Möglichkeiten des neuen Teststandes in Form eines Elektrolyseurs, mit dem sich Wasserstoff generieren und mit Brennstoffzellen- bzw. Brennstoffzellensystemen verstromen lässt.

2) Darstellung der erzielten Vorhabensergebnisse

2.1) Arbeitspaket 1: Anforderungsprofil und Systemauslegung des Brennstoffzellenhybridsystems

Ausgangspunkt für das zu entwickelnde Hybridsystem stellten passive, selbstatmende Brennstoffzellen des Zentrums für Brennstoffzellentechnik dar. Diese werden auf Basis von Leiterplattenkomponenten assembliert und betrieben. Über die zentralen Zellbauteile, bestehend aus anoden- und kathodenseitigen Bipolarelementen, wurden die aktiven Brennstoffzellenflächen von ca. 4 cm^2 pro Zelle definiert. Die Zellen lassen sich dabei beliebig elektrisch in Reihe oder parallel schalten, um wahlweise die Spannung oder den Strom einer Schaltung zu erhöhen. Hierdurch ergab sich ein Freiheitsgrad in Bezug auf die in Auftrag gegebene Entwicklung der System- und Leistungselektronik in Kombination mit dem Akkumulator. Es war gemäß Antragsstellung vorgesehen an dem brennstoffzellenseitigen Teil des Systems eine Schaltung von 3-5 Brennstoffzellen zugrunde zu legen. Abbildung 2.1.1 zeigt auf der linken Seite den Demonstrator einer 5-zelligen Brennstoffzellenschaltung, welche hier noch ohne externes Gehäuse innerhalb einer Teststandumgebung betrieben wird. Die Wasserstoffversorgung wird im Teststandbetrieb generell von Massendurchflussreglern übernommen.

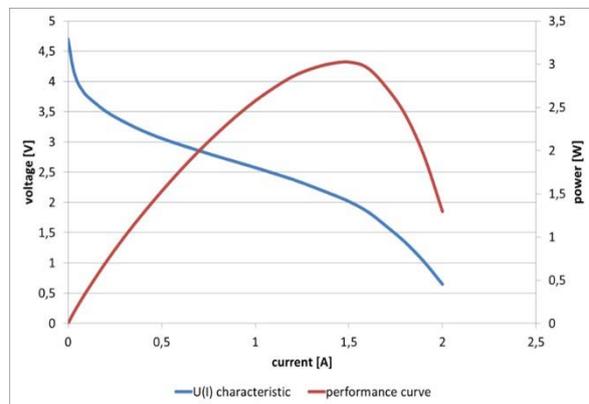
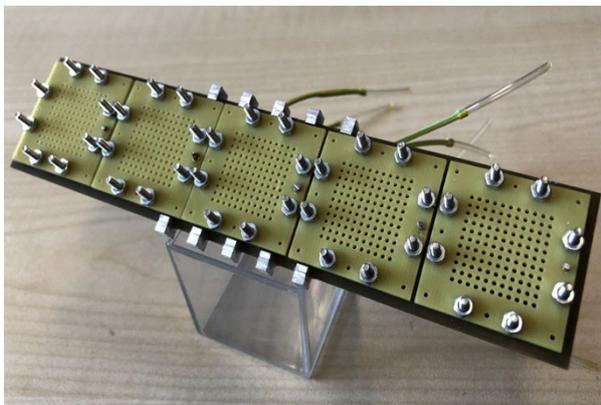


Abbildung 2.1.1: Planare, selbstatmende Brennstoffzellenschaltung auf Basis von Leiterplattenkomponenten (links). $U(I)$ Kennlinie und Leistungskurve dieser Zellschaltung (rechts).

Im vorliegenden Vorhaben wurden die auf der Abbildung noch offenliegenden Brennstoffzellenkomponenten durch eine funktionsintegrierte Gehäusetechnik auf 3D-Druckbasis erweitert. Hierfür wurde eine Recherche in Bezug auf geeignete Druckverfahren durchgeführt, als deren Ergebnis die Multi Jet Fusion Technologie (MJF) von HP für diesen Einsatzbereich identifiziert wurde. Dieses Verfahren hat viele Vorteile gegenüber dem konventionellen Lasersintern. Mit HP MJF gefertigte Teile aus PA12 Kunststoff weisen eine höhere Dichte auf, sie verfügen über eine raue Oberflächenstruktur und besitzen für NT Brennstoffzellenapplikationen eine hinreichende Temperaturstabilität. Sie können in kürzesten Produktionszeiträumen hergestellt werden und eignen sich somit für iterative Entwicklungsschritte im vorliegenden Vorhaben. Prototypenerstellung sowie Kleinserienproduktion von Kunststoffteilen und Baugruppen finden bereits im industriellen Maßstab statt, was unmittelbar zu fest kalkulierbaren und sinnigen Preisen für die vorgesehene Anwendung führt. Vielversprechend und letzten Endes derzeit noch Alleinstellungsmerkmal dieser Technologie ist die Dichtigkeit der generierten Bauteile unter Druck, welche bereits für andere Anwendungsfelder, z.B. die Herstellung von Druckbehältern nachgewiesen wurde. Im Rahmen des Arbeitspakets 1 wurde daher zunächst die Wasserstoffdichtigkeit der mittels MJF hergestellter Gehäuseteile experimentell verifiziert. Zu diesem

Zweck wurden Prüflinge entsprechend der Form von Einzelzellgehäusen beschafft und in den Wasserstoffkreislauf eingebunden (Abbildung 2.1.2). Anfängliche Undichtigkeiten in Verbindung mit der gängigen Dichtungstechnik über O-Ringe konnten auf eine verhältnismäßig raue Oberfläche der mittels MJF hergestellten Bauteile zurückgeführt werden. Um diesem Problem entgegenzuwirken wird nach dem Herstellungsprozess eine chemische Nachbehandlung der PA12 Komponenten durchgeführt. Diese glättet die Oberfläche hinreichend, so dass die O-Ring Dichtungen greifen. Das gleiche gilt für Flachdichtungen gängiger Steck- und Schraubsysteme für fluide und pneumatische Anwendungen von Anbietern wie z.B. SMC.

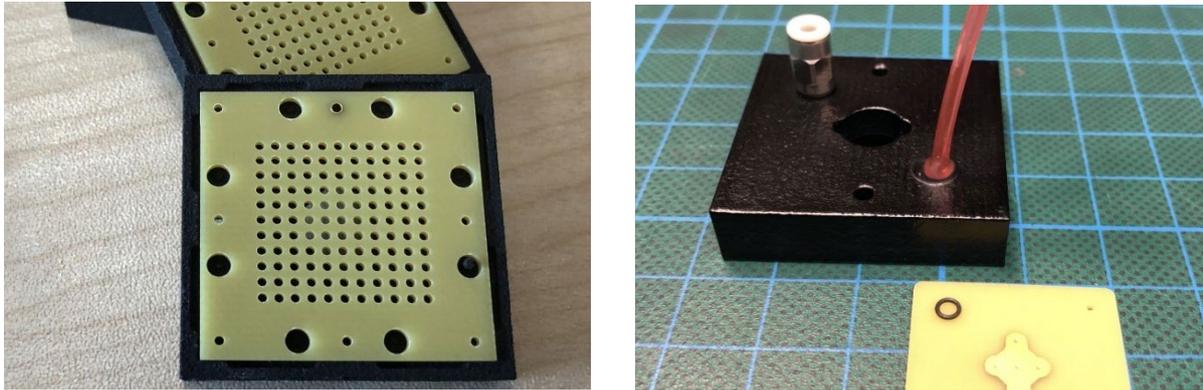


Abbildung 2.1.2: Einzelzellen mit gefügten Gehäusen auf PA12/MJF-Basis (links); Dichtigkeits-tests mit chemisch nachbearbeiteten PA12/MJF Gehäusen, O-Ringen, Steckverschraubungen und Klebeverbindungen (rechts)

Parallel zu diesen Dichtungstechniken wurden im Rahmen der Systemauslegung auch Klebeverbindungen evaluiert. In der Forschungsstelle werden wasserstoffdichte Klebstoffe der Unternehmen Wellmann Technologies und IGB Tech GmbH eingesetzt. Der UV-härtende VP 151003 Acrylat-Klebstoff wurde als geeignet ermittelt. Mit diesem ist es in den durchgeführten Versuchen gelungen, sowohl Verbindungen zwischen den Leiterplattenbauteilen (Anoden & Kathoden) und den PA12 Gehäusekomponenten sowie zwischen Schläuchen aus Polyurethan und den PA12 Gehäusekomponenten zu erzielen.

Der rechte Teil von Abbildung 2.1.1. zeigt eine U(I)-Kennlinie und Leistungskurve der vorgestellten Brennstoffzellenschaltung. Mit dieser lässt sich je nach Betriebsarbeitspunkt eine Leistung von ca. 3W und Ströme von bis zu 2A erzielen. Ausgehend von diesen Werten wurde für das System das Lasten- und Pflichtenheft erstellt. Tabelle 2.1.1 gibt einen Überblick über die technischen Parameter. Diese Parameter dienen während der Projektlaufzeit auch als Grundlage für die Entwicklung der System- und Leistungselektronik, welche als FuE-Auftrag an die Firma fink-electronics weitergegeben wurde.

Parameter	Zielwert
Elektrische Systemleistung am Ausgang:	Bis 5 W _{el} (5V, 1A)
Systemgröße 3D Druck Gehäuse (L x B x H):	Max: 180 mm x 90 mm x 25 mm
Systemgewicht:	< 0,5 kg
Schnittstelle:	USB 3.2
Leistung der integrierten Brennstoffzellen:	ca. 2 W _{el}
Zellanzahl:	3-5 Stück.

Aktive Einzelzellflächen:	4 cm ²
H ₂ -Speichervolumen (Metallhydridspeicher):	10 L
Betriebsdruck des Brennstoffzellensystems (Wasserstoffseite):	< 0,5 Bar
Primärer Energiespeicher	LiFePO ₄ -Akkumulator (ca. 3.000 mAh)

Tabelle 2.1.1: Systemparameter als Zielwerte für das Funktionsmuster des μ PEMFC Hybridsystems

Als primärer Energiespeicher des Systems galt es laut Antragsstellung, einen geeigneten Akkumulator einzusetzen. Aufgrund seiner positiven Eigenschaften fiel die Entscheidung auf einen LiFePO₄-Akkumulator. Er ermöglicht durch hohe Ladeströme eine schnelle erneute Systembereitschaft unter Nutzung des Stromnetzes. Die Vorteile liegen in einer relativ guten Umweltverträglichkeit im Vergleich zu anderen Lithium-Ionen-Akkumulatoren und einer guten chemischen Stabilität. Weitere große Vorteile liegen darin, dass ein LiFePO₄-Akku keinen Memory-Effekt aufweist und eine hohe Anzahl von Ladezyklen (bis zu 10.000) erreichbar ist. Es werden für die Elektroden keine Schwermetalle wie Nickel oder Cobalt verwendet, so dass die Technologie sowohl aus ökologischer Sicht als auch kostenrelevanten Gründen interessant ist. Im Projektverlauf wurden mehrere dieser Akkumulatoren evaluiert. Eine endgültige Entscheidung für einen bestimmten Anbieter für diese zentrale Systemkomponente wurde dann im Rahmen des Arbeitspaketes 2 getroffen.

2.2) Arbeitspaket 2: Auswahl und Beschaffung der zentralen Systembauteile des Hybridbrennstoffzellensystems

Akkumulator

Aufgrund diverser Vorteile im Vergleich mit anderen Li-Ionen Akkumulatoren wurden bereits bei Antragstellung LiFePO₄-Zellen als primärer Energiespeicher des Systems ins Auge gefasst. Dieser Akkumulator-Typ punktet im Hinblick auf die Anwendung mit geringen als auch hohen Ladeströmen, einer höheren Anzahl von Ladezyklen, einer erhöhten Sicherheit und einer höheren Umweltverträglichkeit im Vergleich zu herkömmlichen Li-Ion-Akkus. So eignet sich dieser Akkumulatortyp für eine Hybridanwendung mit der Brennstoffzellentechnik sowohl unter ökologischen Gesichtspunkten (Verzicht auf Einsatz von Schwermetallen) als auch für unvollständige Ladezyklen (kein Memory-Effekt). Im Projektverlauf konnten drei Anbieter dieser Akkumulatoren evaluiert werden. Im Hinblick auf geringe Gesamtkosten des Systems wurde sich zunächst für einen Akkumulator der Firma i-tecc entschieden. Mit einer Kapazität von 3,3 Ah und Ladeströmen bis zu 3 C (ca. 10 A) eignete sich dieser Akkumulator besonders für die Evaluierung des Gesamtsystems in der Testumgebung. Dieser Akkutyp (26650) ist von den Abmaßen genormt und konnte im Systemaufbau später ohne konstruktionstechnischen Mehraufwand gegen Akkumulatoren mit höherer Kapazität ausgetauscht werden. Der für die Systementwicklung und das Funktionsmuster eingesetzte Akkumulator wird auf dem linken Teil von Abbildung 2.2.1 gezeigt. Stecker für Messgeräteanbindung oder die Anbindung an die Leistungs-Elektronik können mittels Lötverbindung kontaktiert werden.

Purge-Ventil

Ein weiterer zentraler Systembestandteil für das Funktionsmuster ist ein Ventil am wasserstoffseitigen Ausgang, welches über die Regelelektronik des Systems gesteuert wird. Dieses Ventil wird im NC-Betrieb (normally closed) betrieben und soll zum einen ein unkontrolliertes Entweichen des Wasserstoffs verhindern und zum anderen einen Austrag des sich im Flowfield ansammelnden Produktwassers ermöglichen. Hierfür wurde ein Ventil der Firma Lee Company ausgewählt, was über eine sehr kompakte Bauweise (Länge 301 mm, Gewicht 2,5 g), eine sehr geringe Leistungsaufnahme < 1 W und eine geringe Leckage-Rate verfügt. Geöffnet wird dieses Ventil zum einen beim Systemstart. Hierüber wird dann der Wasserstoff aus dem Speicher erstmalig in die Brennstoffzellen geführt. Weitere Öffnungen sind dann im laufenden Betrieb erforderlich, um auf der Wasserstoffseite der Brennstoffzellen angesammeltes Produktwasser aus dem System zu tragen. Die entsprechenden Regelwerte wurden im späteren Testbetrieb ermittelt und müssen bei Systemveränderungen (Zellanzahl, Wasserstoffquelle) fortlaufend neu ermittelt bzw. angepasst werden. Je nach Füllstand des Wasserstoffspeichers herrschen unterschiedliche und für den Purge-Vorgang zu differenzierende Druckverhältnisse in den Brennstoffzellen, was über die zu entwickelnde Purge-Strategie ebenfalls zu berücksichtigen ist. Basierend auf diesen Werten wurde parallel eine Regel- & Leistungselektronik des Systems, welche den Ladeprozess des Akkus über die Brennstoffzellen steuert, entwickelt. Das Purgeventil für das Funktionsmuster wird auf dem rechten Teil von Abbildung 2.2.1 gezeigt.

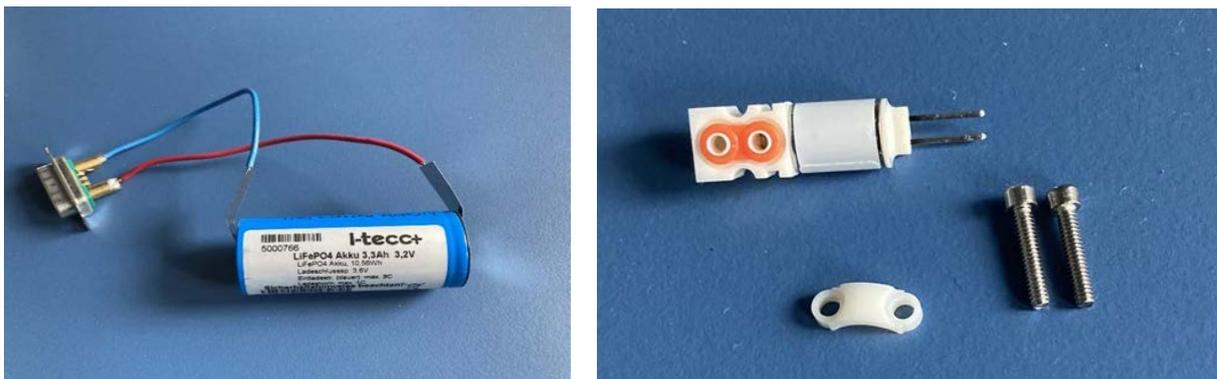


Abbildung 2.2.1: LiFePO₄ Akkumulator mit U-Lötfahne der Firma i-tecc; Standardisierte Steckerverbindung für die Leistungselektronik (links); Purge-Ventil der Lee Company mit Montage-Komponenten und Dichtung (rechts).

Wasserstoffspeicher und Druckminderer

Als sekundärer Energiespeicher des Hybridsystems dient Wasserstoff. Im vorliegenden Vorhaben sollte gemäß Antragsstellung ein Metallhydrid-Speicher nach dem Stand der Technik eingesetzt werden. Diese verfügen über die erforderlichen Sicherheits- und Zulassungszertifikate, sind erprobt und können zuverlässig und umgehend eingesetzt werden. Der für das Projekt ausgewählte HydroStik Pro der Firma Horizon Fuel Cell Europe ist kommerziell verfügbar und kann über eine Gasflasche oder mittels eines zugehörigen Elektrolyseurs (HydroFill Pro) erneut mit Wasserstoff befüllt werden. Durch die kompakten Abmaße von 22 mm Durchmesser und einer Höhe von 88 mm eignet sich der Metallhydridspeicher für die Verwendung im μ PEMh-Brennstoffzellensystem. Der Hydrostik verfügt über ein M6-Außengewinde, an das zur genauen Entnahmemenge des Wasserstoffs ein Druckminderer angeschlossen wird. Der maximale Fülldruck beträgt 3,0 MPa (20°C). Die Füllmenge reicht hierbei von 5l (Hydrofill) bis zu 10 l (Wasserstoff-Gasflasche), was ca. 0,45-0,9 g H₂ entspricht. Im angestrebten Arbeitspunkt der Brennstoffzellen wurde auf Basis vorhandener Kennwerte davon ausgegangen, dass bei einem

Verbrauch von ca. 10 ml H₂ pro Minute das BZ-System ca. 8 Stunden betrieben werden kann. Danach erfolgt ein Wechsel der Kartuschen. Alternativ können auch mehrere Kartuschen parallelgeschaltet werden, um die Systemlaufzeit zu verlängern. Abbildung 2.2.2 zeigt den Hydrostik Pro auf der linken und das zugehörige Regulierventil bzw. den Druckminderer auf der rechten Seite.



Abbildung 2.2.2: Hydrostik (links) und zugehöriges Regulierventil (rechts)

Regel- und Leistungselektronik

Die Entwicklung und Anfertigung der Regel- und Leistungselektronik für das System wurde als Dienstleistung an die Firma fink-electronics vergeben, die über umfangreiche Vorkenntnisse im Bereich der Brennstoffzellentechnik und entsprechender Systemelektronik verfügt. Diese basierte auf der Erstellung des Pflichtenheftes. Die Elektronik verfügt ausschließlich über Komponenten nach dem Stand der Technik wobei einzelne Steuerelemente vom ZBT frei programmier- und für die Zukunft anpassbar verbleiben. Als Ausgangsport dient aufgrund seines universell einsetzbaren Charakters eine USB-Schnittstelle. Im ersten Entwicklungsschritt wurde von fink-electronics ein Step-Up-Converter (Aufwärtswandler) aufgebaut, der die Spannung des Brennstoffzellen-Stacks auf die Ladeschluss-Spannung (3,6V) des LiFePO₄-Akkus hochsetzt. Hierfür wurde ein PWM-Controller-IC (LTC3124) angepasst und auf Basis von LTSpice Simulationen ein Demo-Board gebaut.

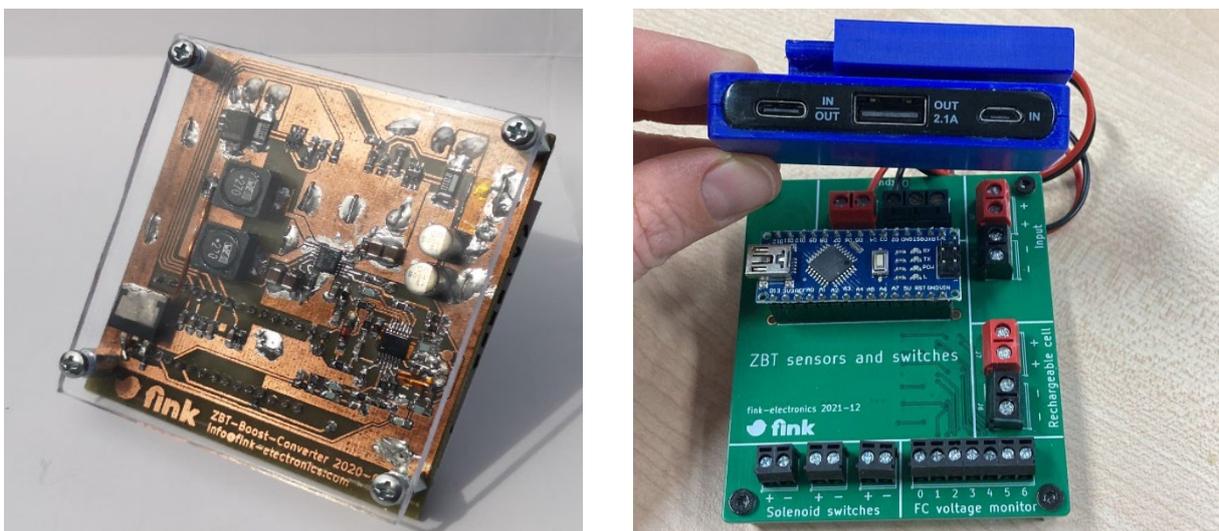


Abbildung 2.2.3: Boostkonverter, DC/DC-Wandler und Regelelektronik (links) sowie elektrischer Systemausgang (rechts) als Ergebnis des Entwicklungsauftrags an fink-electronics

Die Simulationen wiesen von vorne rein auf ein geeignetes Regelverhalten hin. Am ZBT wurde der Converter getestet und auf Basis der Ergebnisse von fink-electronics angepasst. Im zweiten Entwicklungsschritt folgte dann ein weiteres Board von fink-electronics als elektrischer und

anzusteuender medialer Systemausgang. Dieses ermöglicht die Einbindung des Nutzers (also der zu ladenden Anwendung) mittels USB und die Steuerung des Purgeventils. Zusätzlich realisiert das zweite Board auch eine Einzelzellspannungserfassung der Brennstoffzellen des Systems. Die beiden Boards werden auf Abbildungen 2.2.3 gezeigt.

2.3) Arbeitspaket 3: Auslegung und Aufbau einer Testumgebung

Für die Entwicklung des portablen Hybridsystems war die Auslegung und der Aufbau einer neuen Testumgebung erforderlich, welche sowohl den herkömmlichen Betrieb von portablen PEM Brennstoffzellen als auch die Funktionsüberprüfung und den Betrieb aller Systemkomponenten ermöglichen muss. Bedingt durch die zur Verfügung stehende Laborfläche sowie die erforderliche Erarbeitung eines neuen Sicherheitskonzepts wurde entschieden, keine der bestehenden Anlagen zu erweitern, sondern für das vorliegende Vorhaben einen neuen Teststand aufzubauen. Die Anlage wurde von der Forschungsstelle im Labor errichtet und rechtzeitig fertig gestellt, um für die Arbeiten der Arbeitspakete 5 und 6 eingesetzt zu werden. Abbildung 2.3.1 zeigt den Teststand als Arbeitsplatz während einer Testung eines Akkumulators und des DC/DC-Wandlers.

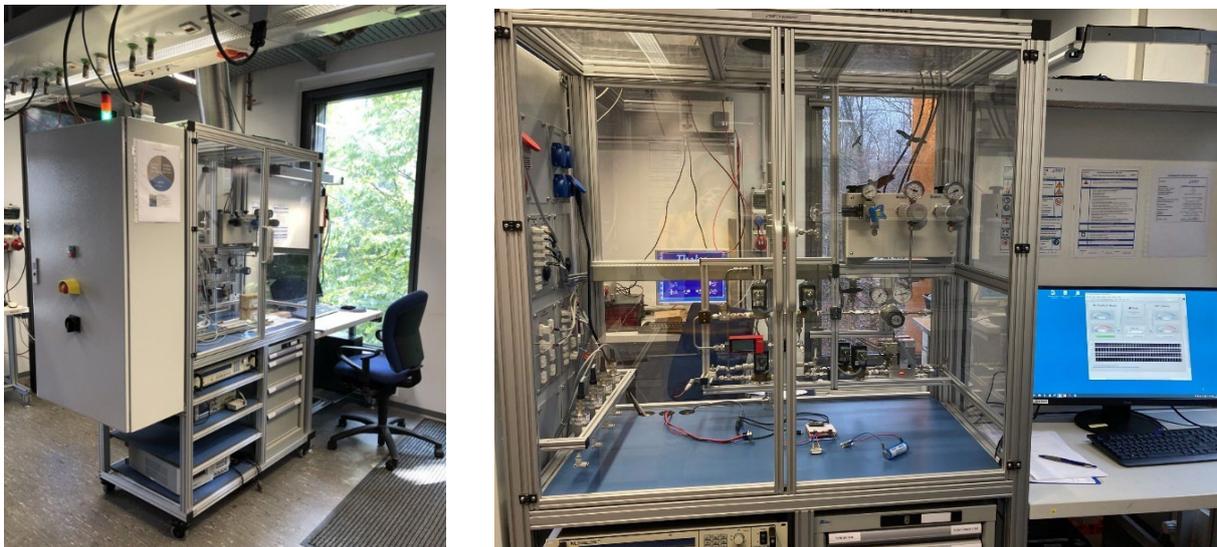


Abbildung 2.3.1: μ PEMFC Hybridsystem Teststand: Gesamtansicht (links) & Arbeitsbereich (rechts)

Das Zentrum für Brennstoffzellentechnik besitzt langjährige Erfahrung bei der Auslegung und dem Bau von Teststandeinrichtungen für den sicheren Betrieb von miniaturisierten und portablen Brennstoffzellen. Im vorliegenden Vorhaben sollten diese Zellen erstmalig innerhalb einer autarken Systemumgebung betrieben, ihr Verhalten untersucht und ihr Einsatz qualifiziert werden. Zu diesem Zweck besitzt der neue Teststand alle Komponenten für eine(n) reguläre(n) Zellbetrieb und Vermessung sowie eine Reihe neuer Elemente, welche eine individuelle Prüfung von Systemkomponenten für PEM-Brennstoffzellensysteme ermöglichen. Die Anlage unterscheidet sich in erster Linie bei den integrierten Betriebs- und Versorgungskomponenten von bisherigen Testständen. Die Brennstoffzellen wurden vorliegend nicht nur über herkömmliche Massedurchfluss-Regler betrieben, sondern auch über Metallhydridspeicher im Dead-End Betrieb. Hierfür wurde der Versorgungsabschnitt des Teststandes in Bezug auf die Wasserstoffversorgung von Brennstoffzellen in zwei Bereiche gegliedert. Der erste Bereich dient zur Inbetriebnahme der Zellen und versorgt diese konventionell über Massedurchfluss-Regler. Der zweite Abschnitt ermöglicht einen direkten Anschluss der in Arbeitspaket 2 ermittelten und

beschafften Metallhydridspeicher von Horizon. Für das Versuchsprogramm kann hier der Betriebsdruck über einen Druckregler manuell festgelegt und überwacht werden. Der resultierende Durchfluss an Wasserstoff und somit der Verbrauch im Dead-End Betrieb wird über ein ebenfalls integriertes Messgerät von Voegtlin angezeigt. Fast alle Komponenten der Anlage sind über Ethernet mit einem CompactDAQ von National Instruments verbunden und erlauben eine Auslesung und Ansteuerung über LabVIEW. Die einzelnen Komponenten des neuen Teststandes lassen sich in die drei Teilbereiche Sicherheitstechnik, Ersatzsystem und Vermessung einteilen. Diese werden nachfolgend vorgestellt:

Sicherheitstechnik:

Vor dem Aufbau des Teststandes war die Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung inklusive Explosionsschutzdokument erforderlich, aus der die zu ergreifenden technischen und organisatorischen Schutzmaßnahmen resultieren. Diese schließen die neu eingesetzten Metallhydridspeicher und den Wasserstoffelektrolyseur zum wieder befüllen der Speicher mit ein. Die Laboratorien der Forschungsstelle verfügen über eine Lüftungsanlage, welche eine hinreichende Absaugleistung für die Versuchsstände besitzt. Wasserstoff tritt aus dem zu entwickelnden System in Form von kontrollierten Purge-Intervallen aus. Ein unkontrollierter Austritt ist bei Defekten der mit Wasserstoff in Kontakt stehenden Systemkomponenten möglich und muss dann sicher abgesaugt werden. Zu diesem Zweck überprüft der neue Systemteststand fortlaufend den Abzug über Differenz- und Strömungswächter mit Messkreuz, welche in der Sicherheitskette redundant in Reihe geschaltet sind (Abbildung 2.3.2 -links).



Abbildung 2.3.2: Abluftüberwachung am μ PEMFC Hybridsystem Teststand (links); Redundante NC-Ventile innerhalb der Wasserstoffleitungen des Teststandes (rechts).

Für sicheren Betrieb der Brennstoffzellen des Systems war weiterhin die Integration von elektronischen Sicherheitsdruck- und Temperaturbegrenzern erforderlich. Diese registrieren innerhalb des Brennstoffzellensystems einen zuvor definierten Überdruck oder eine zu hohe Temperatur und schalten dann automatisch das System und die Wasserstoffzuführung ab. Letzteres wird über ein redundantes Magnetventilnetz bei beiden Versorgungssträngen gewährleistet (Abbildung 2.3.2 rechts). Darüber hinaus werden in die Rohrleitungen des Teststandes mechanische Abblaseventile integriert, um im Schadensfall entstehende Überdrücke in die Abluftleitung des Labors zu führen. Zusätzlich werden bei allen durchzuführenden Versuchen organisatorische Schutzmaßnahmen in Form von Unterweisungen zur Bedienung durch das Personal definiert sowie Personenwarngeräte mit Querempfindlichkeit für Wasserstoff eingesetzt.

Ersatzsystem:

Zur Qualifizierung der Einzelkomponenten des im Vorhaben zu entwickelnden Systems muss der Teststand über alle erforderlichen Betriebskomponenten für portable, selbsttätige PEM-Brennstoffzellensysteme verfügen. Diese müssen sich optional zuschalten lassen, um je nachdem welche der Systemkomponente genauer untersucht wird die Aufgabe der übrigen Systemkomponenten nachzustellen. Für die Inbetriebnahme und Vermessung der Brennstoffzellen wird der Wasserstoff über Massendurchfluss-Regler (MFCs) aus der Ringleitung des Labors versorgt. Hierfür sind 2 MFCs mit Durchflussraten von 100 & 15 ml/min integriert. Die Zellen können zudem für die Inbetriebnahme mit Stickstoff geflutet werden, um Restsauerstoff aus den Anodenleitungen zu entfernen. Bei einem Systembetrieb und den Untersuchungen im Hinblick auf das Purge-Ventil konnte der Wasserstoff aus den Horizon Metallhydridspeichern entnommen werden. Es wurde ein verstellbarer Druckminderer in die Anlage integriert, um die Nachdrücke der Speicher reproduzierbar für die Entwicklung der Purge-Strategie gewährleisten zu können. Abbildung 2.3.3 zeigt beide Versorgungsoptionen für die Zellen des Systems im aufgebauten Teststand.

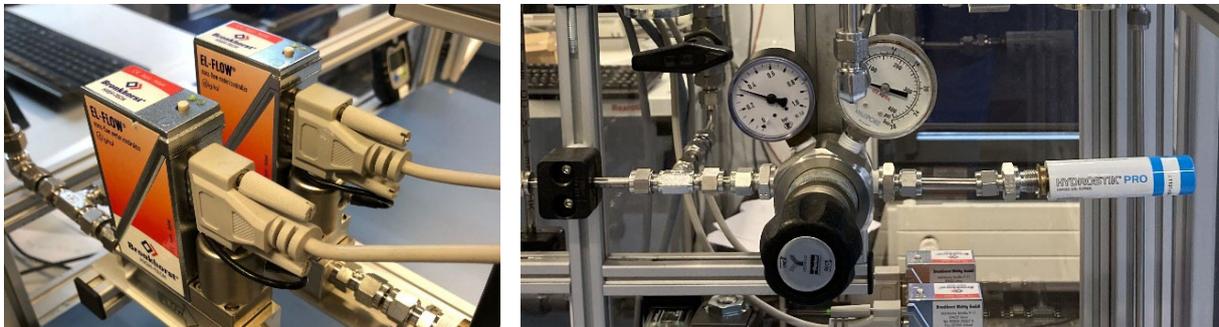


Abbildung 2.3.3: Massedurchfluss-Regler für Wasserstoff (links); Druckregler für Metallhydridspeicher (rechts)

Für die Inbetriebnahme sowie die Vermessung und Bewertung der Brennstoffzellen (z.B. der Aufnahme von U(I)- Kennlinien und Leistungskurven) wurde eine Quelle-Senke von H&H beschafft und in den Teststand mit eingebunden (Abbildung 2.3.4). Als Teil des äußeren Verbraucherstromkreises übernimmt diese die Aufgabe des Verbrauchers. Mit ihr können unterschiedliche Leistungsbereiche bei den Zellen direkt angesteuert und auf diesem Wege dann für das Versuchsprogramm die erforderlichen Purge-Routinen ermittelt werden. Mit der Last ist es möglich sowohl Einzelzellen sowie Reihenschaltungen mehrerer Zellen zu betreiben und zu vermessen. Die zweite Aufgabe der Quelle-Senke besteht in der Funktion als Akkubelade- und Entladegerät.



Abbildung 2.3.4: Elektronische Last für die Zellvermessung und zum Be- und Entladen von Akkus

Das im vorliegenden Vorhaben zu entwickelnde Hybridsystem beinhaltet Eisen-Phosphat Akkumulatoren, welche fortlaufend Be- und Entladen werden mussten. Die elektronische Last lässt sich über LabVIEW ansteuern und somit der Zellbetrieb oder Akkuladevorgänge durchführen.

Sensoren

Der Hybridsystemteststand verfügt über verschiedene Sensoren und Messgeräte für die Bewertung von Brennstoffzellen und des zu entwickelnden Systems. Durch die Überwachung der Betriebsdrücke über Druckmessdosens vor und hinter den Zell-Ein- und Ausgängen können zellinterne Druckabfallmessungen durchgeführt und mögliche Verstopfungen durch Produktwasser detektiert werden. Hierüber lassen sich Aussagen über das Betriebsverhalten der Zellen unter den jeweiligen Purge-Intervallen treffen und letztere fortlaufend neu bestimmen und optimieren. Des Weiteren stehen im Teststand Temperatur-Messfühler zur Verfügung. Diese werden über das 3D-Druck Zellgehäuse an die Metallkomponenten der Bipolarelemente geführt und ermöglichen so eine beständige Messung der Zelltemperaturen. Auch der Metallhydridspeicher besitzt während der Entnahme von Wasserstoff einen Temperaturgradienten, welcher eine Überwachung erforderlich macht.



Abbildung 2.3.5: Red-Y Wasserstoffdurchfluss-Messung (links) und Zellinnenwiderstandsmessgerät (rechts)

Während der Wasserstoffdurchfluss im regulären Betrieb mit offenen, anodenseitigen Zellausgängen über Massedurchfluss-Regler gemessen wird, macht der für die Systementwicklung vorgesehene Betrieb im Dead-End eine gesonderte Überwachung erforderlich. Bei dieser Betriebsführung stellt der Durchfluss bei geschlossenem Purge-Ventil den unmittelbaren Wasserstoffverbrauch der Brennstoffzellen dar; bei geöffnetem Purge-Ventil die entweichende Menge aus dem System. Hierfür wurde in den Versorgungskreislauf über den Metallhydridspeicher ein gesondertes Wasserstoff-Durchflussmessgerät (Abbildung 2.3.5 links) integriert, um über die jeweiligen Werte weitere Aussagen über die zu ermittelnden Purge-Intervalle zu treffen. Für die Assemblierung und Justierung von Brennstoffzellen auf Basis des neuartigen 3D-Druck Gehäuses ist eine Messung und Überprüfung von Zellinnenwiderständen regelmäßig erforderlich. Diese gibt einen Aufschluss über ein hinreichendes Übertragen von Anpressdrücken über das Gehäuse in Bezug auf innenliegende Zellkomponenten. Der Teststand wurde hierfür um ein entsprechendes Innenwiderstandsmessgerät ergänzt (Abbildung 2.3.5 rechts).

Elektrolyseur

Abbildung 3.7 zeigt als finale Komponente des Teststandes einen Elektrolyseur, welcher von der Fa. Horizon beschafft wurde. Dieser erzeugt unter Verwendung von VE Wasser und Strom Wasserstoff, der dann unter 30 bar Druck die Metallhydrid-Speicher nachlädt.



Abbildung 3.7: Hydrofill Pro VE Wasser-Tank (links) & Aufladung eines Metallhydridspeichers (rechts)

2.4) Arbeitspaket 4: Konstruktion, Herstellung und Beschaffung von portablen Brennstoffzellenkomponenten für den Systemeinsatz

In Arbeitspaket 4 wurden zunächst anodenseitige Brennstoffzellegehäuse für selbstatmende PEM Brennstoffzellen sowie alle erforderlichen Systemgehäusekomponenten auf Basis von 3D-Druck Komponenten konstruiert. Ziel war hier ein modularer Aufbau sowohl in Bezug auf mögliche Zellschaltungen sowie die in Arbeitspaket 2 identifizierten Systemkomponenten. Auf Basis der Konstruktionsarbeiten konnten dann die Gehäusebauteile mittels 3D-Druck hergestellt werden. Das favorisierte Verfahren während der Laufzeit des Vorhabens verblieb die Multi Jet Fusion Technologie von HP. Diese wurde im Jahr 2020 um eine neue Generation weiterentwickelt und verfügt seitdem über die Option einer Glaskugerverstärkung. Neben den bisherigen Vorteilen wie Temperaturstabilität und Druckdichtigkeit gegenüber Wasserstoff & Wasser besitzen die Bauteile basierend auf diesem neuen Verfahren eine deutlich erhöhte mechanische Stabilität. Diese macht sie für die vorliegende Anwendung noch geeigneter, da die volumetrischen Dimensionen der Baukörper reduziert werden können, ohne dass diese ihre funktionale Angemessenheit verlieren.

Das im Rahmen des Vorhabens konstruierte Systemgehäuse gliedert sich in fünf Unterbaugruppen, welche die jeweiligen Systemkomponenten modular erfassen. Diese werden nachfolgend im Einzelnen vorgestellt:

Brennstoffzellen- und Gehäusekonstruktion

PEM Brennstoffzellen dienen im System als Energiewandler und stellen die erste Unterbaugruppe dar. Selbstatmend, mit offener Kathode ausgeführt, ist hier der anodenseitige Gehäuseteil die kritische Komponente. Diese erforderte eine druckdichten Medienaustausch, eine elektrische Überführung des produzierten Stroms, einen Zugang für Temperatur und Drucksensoren sowie eine hinreichende mechanische Stabilität für die Übertragung von Anpressdrücken. Letztere sind für die elektrische Zellkontaktierung sowie die eingesetzte Dichttechnik erforderlich. Abb. 2.4.1 zeigt das konstruierte Zellgehäuse als Teil eines vollständigen Bauteilensembles einer Brennstoffzelle. Alle erforderlichen

Funktionen können über das gewählte 3D-Druckverfahren konstruktiv abgebildet werden. Das Gehäuse wurde in Bezug auf die Verbindungstechnik so gestaltet, dass sowohl Klebe- als auch Schraubverbindungen zur Fügung und Dichtung gewählt werden können. Das Gleiche gilt für die Überführung der Medien. So können Schläuche wahlweise an das 3D-Druck Gehäuse geklebt oder mittels SMC Standardanschlüssen verbunden werden.

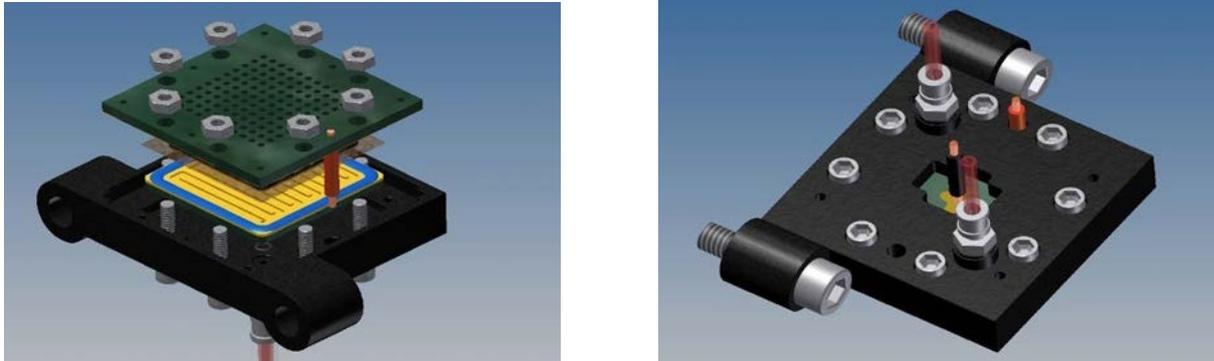


Abbildung 2.4.1: CAD Modell des anodenseitigen Zellgehäuses als Teil der Brennstoffzellenbaugruppe (links: Explosionsansicht - Zelleseite; rechts: Montageansicht - Außenseite)

Die zweite Unterbaugruppe adressiert die Integration von Druckminderer und Metallhydridspeicher an das Systemgehäuse. Beide Bauteile werden im Vorhaben von Horizon bezogen und stellen für die entsprechende Gehäusekonstruktion die geometrischen Parameter. Der Druckminderer besitzt ein integriertes Verschraub-System für den Anschluss von Schläuchen mit 6 mm Durchmesser. Um den Einsatz von sowohl geringeren Schlauchdurchmessern zu als auch eine gehäuseinterne Gasverteilung zu implementieren ist wurde unmittelbare Klebung des Druckminderer mit dem 3D-Druck Gehäuse vorgesehen. Die von der Forschungsstelle in vorherigen Vorhaben entwickelnden Klebstoffe erfordern einen optischen Zugang für den Aushärtevorgang, welcher bei der Konstruktion berücksichtigt wurde. Der Metallhydridspeicher wird bei Nutzung mit dem Druckminderer verschraubt. Er muss einfach zugänglich und jederzeit austauschbar verbleiben. Dies wurde über das Gehäuse in Form einer Fassung mit Führung realisiert. Eine feste mechanische Verbindung mit dem Systemgehäuse ist an dieser Stelle nicht zweckdienlich. Der linke Teil von Abbildung 2.4.2 zeigt die Versorgungsunterbaugruppe des Systems bestehend aus Druckminderer, Metallhydridspeicher und 3D-Druckgehäuse.

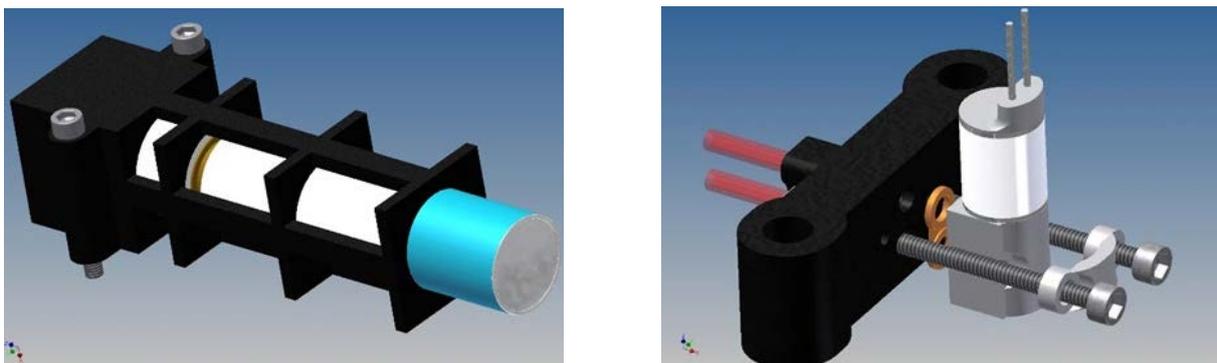


Abbildung 2.4.2: CAD Modell der Versorgungsunterbaugruppe des Brennstoffzellensystems (links); CAD Modell der Purge-Unterbaugruppe des Brennstoffzellensystems (rechts)

Ein Purge Ventil der Lee Company fungiert bei dem zu entwickelnden System als medialer Ausgang und stellt in Bezug auf das 3D-Druck Gehäuse die dritte Unterbaugruppe dar. Herstellerseitig stellt das Unternehmen passend zur Geometrie des Ventils einen doppelten Dichtring als Anschlussmöglichkeit an Festkörper zur Verfügung. Bei der Konstruktion der entsprechenden Gehäusekomponente wurde

dies zugrunde gelegt und findet Einsatz. Eine für die Dichtung erforderliche Gewindeverbindung wurde integriert. Systemseitig wurde das Gehäuse so ausgelegt, dass erneut wahlweise Schlauchverbindungen verklebt oder auf Standard Schraubverbinder von SMC zurückgegriffen werden können. Die Purge-Baugruppe mit ihren Einzelkomponenten Ventil, Dichtung, Verschraubung Gehäuse sind auf Abbildung 2.4.2 dargestellt.

Bei der vierten Unterbaugruppe des Systemgehäuses handelt es sich um die Leistungs- und Regelungselektronik bestehend aus Akkumulator und Platinen. Die Komponenten sind nicht in die Medienkreisläufe des Gesamtsystems zu integrieren (Wasserstoff & Wasser), so dass an dieser Stelle keine Dichtansprüche an die konstruierten 3D-Druck Komponenten zu stellen sind. Sowohl der I-tecc+ Lithium-Eisenphosphat Akku als auch die im Entwicklungsunterauftrag von fink-electronics beschaffte Regelelektronik können somit auf rein mechanischem Wege in das Gehäuse integriert werden. Abbildung 2.4.3 zeigt die Leistungs- und Regelungsbaugruppe, welche mit entsprechenden Schraub- und Klemm-Verbindungen ausgeführt sind.

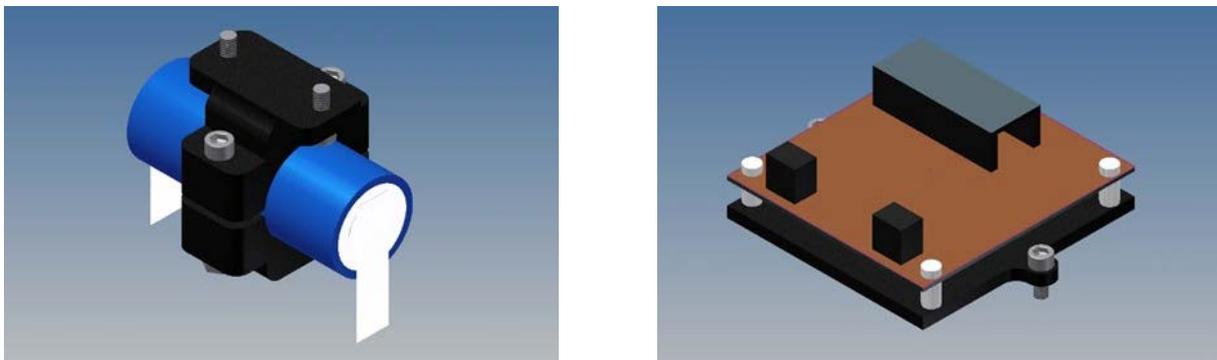


Abbildung 2.4.3: CAD Modell der Leistungs- und Regelungselektronik Unterbaugruppe (links: Akkumulator; rechts: Regelelektronik)

Die fünfte Unterbaugruppe stellt die Wasserstoffverteilstuktur der Brennstoffzellen dar. Bisher wurde diese über Kapillar-Verschlauchungen zwischen Wasserstoffversorger und Brennstoffzellen sowie zwischen Brennstoffzellen und Systemausgang (Kondensat-Abscheider) realisiert. Nunmehr erfolgt eine unmittelbare Integration entsprechender Wegstrecken in das mittels 3D-Druck herzustellende Systemgehäuse. Das konstruierte CAD Modell der Verteilerbaugruppe wird auf Abbildung 2.4.4 gezeigt und ist hierfür in drei Einzelkomponenten gegliedert, welche gegenüber der Außenwelt zuverlässig gedichtet werden müssen. Die an der kritischen Dichtung beteiligten Komponenten übernehmen dabei die zwei außen gelegenen Bauteile bestehend aus unterer Schale und Deckel. Beide werden über die favorisierte Multi Jet Fusion Technologie gedruckt wodurch die Wasserstoff Dichtigkeit gewährleistet wird. Sie sind mit einem Nutensystem versehen und besitzen hierüber einen optischen Zugang für den zur Fügung vorgesehen UV-aushärtenden Brennstoffzellen-Klebstoff. Das dritte, mittig angeordnete Bauteil verfügt über die eigentliche Gasverteilstuktur in feiner Mäanderform. Es wird von der unteren Schale und dem Deckel vollständig umkapselt. Auf diesem Weg gelingt es auch auf 3D-Druckbauteile bzw. Techniken zurückzugreifen, welche über eine höhere Strukturauflösung, nicht aber über eine hinreichend geringe Permeation gegenüber Wasserstoff verfügen. Somit realisiert die Konstruktion den höchst möglichen Freiheitsgrad für das Versuchsprogramm und gewährleistet dennoch eine zuverlässige Dichtung. Muss nicht auf alternative 3D-Druck Verfahren für die Feinverteilung zurückgegriffen werden, lassen sich die untere Schale und die Gasverteilstuktur auch auf einem Bauteil zusammenfassen, wodurch der Aufbau vereinfacht wird.

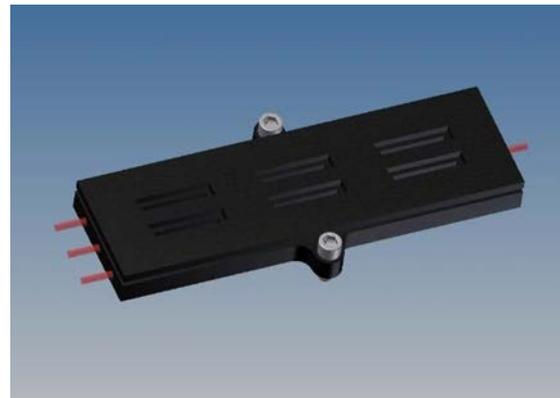
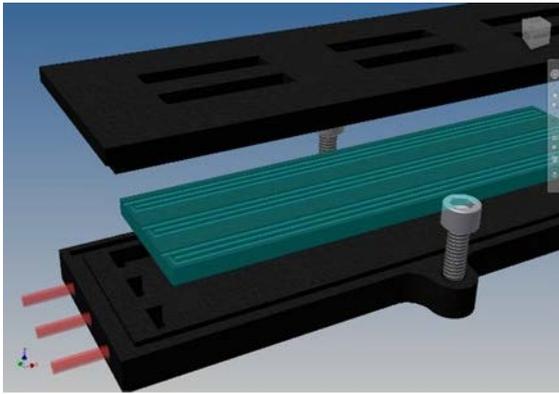


Abbildung 2.4.4: CAD Modell der Verteiler-Unterbaugruppe für drei parallel betriebene Brennstoffzellen (links: Explosionsansicht – Mäanderwegstrecken; rechts: Montageansicht)

Es war vorgesehen die fünf Unterbaugruppen innerhalb des Systemteststandes zunächst einzeln und dann im Zusammenspiel zu qualifizieren und ggfs. weiter zu optimieren. Zu diesem Zweck wurden alle Komponenten mit Industrieprofilen verbunden, so dass diese strikt modular und jederzeit individuell austauschbar verbleiben. Abbildung 2.4.5 zeigt den Versuchsaufbau für den Systemteststand als Gesamtbaugruppe. Das Rack aus Industrieprofilen der Serie 5 von Item besitzt drei Brennstoffzellen der ersten Unterbaugruppe und zwei Verteiler- Unterbaugruppen für die Zell-Ein- und Ausgänge. Die Zellanzahl kann je nach Bedarf variiert werden. Eine Anpassung der Konstruktion ist hierbei dann nur für die Verteiler-Unterbaugruppe erforderlich und bleibt auf die 3D-Druckkomponenten beschränkt.

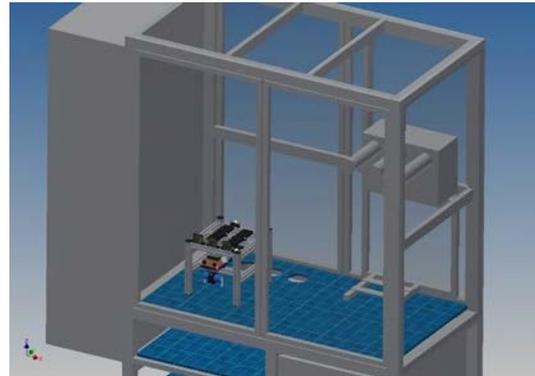
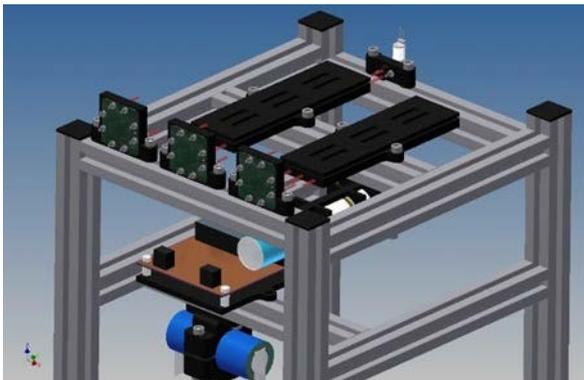


Abbildung 2.4.5: CAD Modell der Gesamtbaugruppe(links) innerhalb der Systemteststandumgebung (rechts)

Herstellung und Beschaffung der Zell- und Gehäusekomponenten

Für die benötigten metallischen Mikrobipolarelemente wurden die entsprechend konstruierten Komponenten (Anode & Kathode) aus der Leiterplattentechnik vom Unternehmen ILFA beschafft. Diese wurden mittels galvanotechnischer Prozesse veredelt, um einen hinreichenden Korrosionsschutz für den Brennstoffzellenbetrieb und eine optimale elektrische Kontaktfläche zu den Gasdiffusionslagen zu gewährleisten. Bei dem Schichtaufbau handelt es sich, ausgehend von dem für Leiterplatten nativen Kupfer als idealer Stromleiter, um eine Nickelschicht als Diffusionsschutzlayer und eine dünne Goldschicht als Kontaktfläche. Die anodenseitigen Bipolarelemente besitzen eine Mäanderstruktur für die zellinterne Wasserstoffverteilung. Die Kathoden verfügen über offene Lochstrukturen für die natürliche Konvektion mit der Umgebungsluft. Abbildung 2.4.6 zeigt die Mikrobipolarelemente, welche im vorliegenden Vorhaben Einsatz finden. Zur zellinternen Dichtung werden angepasste Silikondichtungen an den Randbereichen der Elemente dispensiert. Die Bauteile verfügen über

Lötstellen, an denen Kabelführungen und/oder Stecker fest verlötet werden, um mehrere Zellen elektrisch miteinander zu verschalten und sie in den äußeren Verbraucherstromkreis zu integrieren.

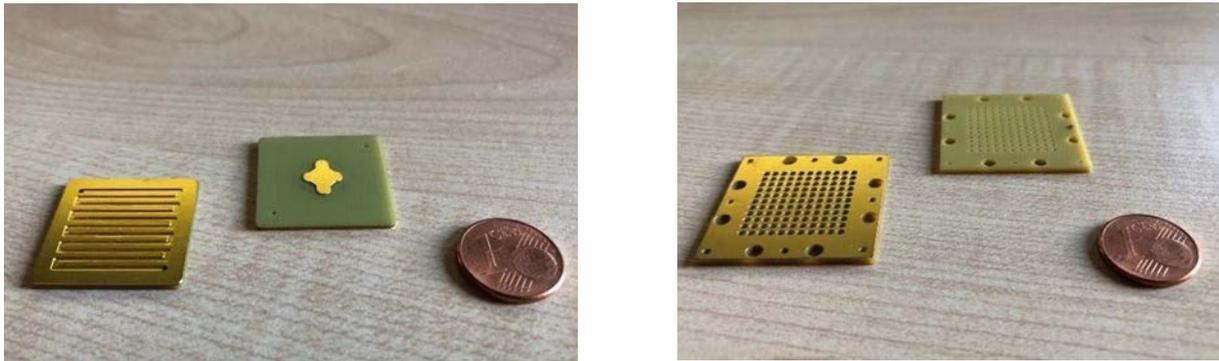


Abbildung 2.4.6: Anodenseitige (links) und kathodenseitige (rechts) Bipolarelemente der Brennstoffzellen auf Leiterplattenbasis

Die Brennstoffzellenmembran (MEA) wurde von W.L. Gore & Associates GmbH bezogen. Es handelt sich um das Modell PRIMEA CCM 3-Layer A510.1/M815/C580.4 Membran-Elektroden-Subgasket-Assembly mit einer Membranstärke von 15 μm und einer Katalysatorbeladung von 0.1mg/cm² PT / 0.4mg/cm². Für die Konfektionierung auf den Zellmaßstab des vorliegenden Vorhabens wurden Schneid- und Stanzwerkzeuge angepasst und eingesetzt. Auf den elektrisch passiven Randbereichen wurde vorab mittels Glasfaserstift die Katalysatorschicht der MEA entfernt, um Zellkurzschlüsse zu vermeiden. Als Gasdiffusionslage (GDL) wurde die SIGRACET GDL 39 BC von der SGL Carbon GmbH ausgesucht. Diese ist für portable PEMFC Anwendungen mit den dort vorherrschenden, geringen Druckverhältnissen favorisiert. Es handelt sich hierbei um eine zweilagige Struktur bestehend aus einer mikroporösen, kohlenstoffbasierten Lage und dem tragenden Fasergewebe, welches sich für die mechanischen Eigenschaften verantwortlich zeigt. Für die Gasdiffusionslagen war es neben der Laserstrukturierung auch erforderlich, angepasste Schneid- und Stanzwerkzeuge anzufertigen mit deren Hilfe die Gasdiffusionslagen als Rollware auf das benötigte Abmaß der portablen Zellen endkonfektioniert werden konnten. Abbildungen 2.4.7 zeigen MEA und GDL vor und nach ihrer Konfektionierung auf den Zellmaßstab.



Abbildung 2.4.7: Membransheet von Gore (links) und auf Zellmaßstab konfektionierte Gasdiffusionslagen und Membranen (rechts)

Für die Gehäusetechnik für das System werden alle in Arbeitspaket 4.1 konstruierten Komponenten über den 3D-Druck gefertigt und beschafft. Die Forschungsstelle arbeitet hier mit dem Dienstleister Rapid Object zusammen, der über alle in Frage kommenden Druckverfahren für das zu entwickelnde Brennstoffzellengehäuse verfügt. Seit der Begutachtungsphase wurde das favorisierte Verfahren Multijet Fusion von HP weiterentwickelt und verfügt nunmehr neben der Temperaturstabilität von bis zu 90° C und der Druckdichtigkeit auch über die Option der Glaskugelverstärkung zur weiteren Steigerung der mechanischen Stabilität. Zur Ausbildung der feinen Kapillarkanäle der Verteilerunterbaugruppe bietet das Unternehmen ein Verfahren aus der Stereolithografie an mit dem minimale Wandstärken von 0,5 mm in Schichtstärken von nur 0,05 mm abgebildet werden können. Bei den gedruckten Bauteilen von HP ist bei dem Brennstoffzellengehäuse eine chemische Nachbearbeitung erforderlich, um bei den zellinternen O-Ring Dichtungen eine hinreichend glatte Oberfläche zu gewährleisten. Neben den Einzelkomponenten des Zellgehäuses wurden für die Montage in Arbeitspaket 4.3 noch weitere Assemblierungshilfsmittel benötigt. Diese gliedern sich in Anpress-, Schneid- und Klebehilfen und wurden im Vorhaben ebenfalls erstmalig über den 3D-Druck beschafft. Abbildung 2.4.8 zeigt das Brennstoffzellengehäuse sowie einen Bausatz für die Klebung der Brennstoffzellenmembran mit den Gasdiffusionslagen. Die zwei übrigen Komponenten stellen Verschlauchungen und Schraub-Verbinder dar, welche von SMC bezogen werden. Über diese verbleiben die jeweiligen Unterbaugruppen individuell testbar und können im Zusammenspiel verschaltet werden.

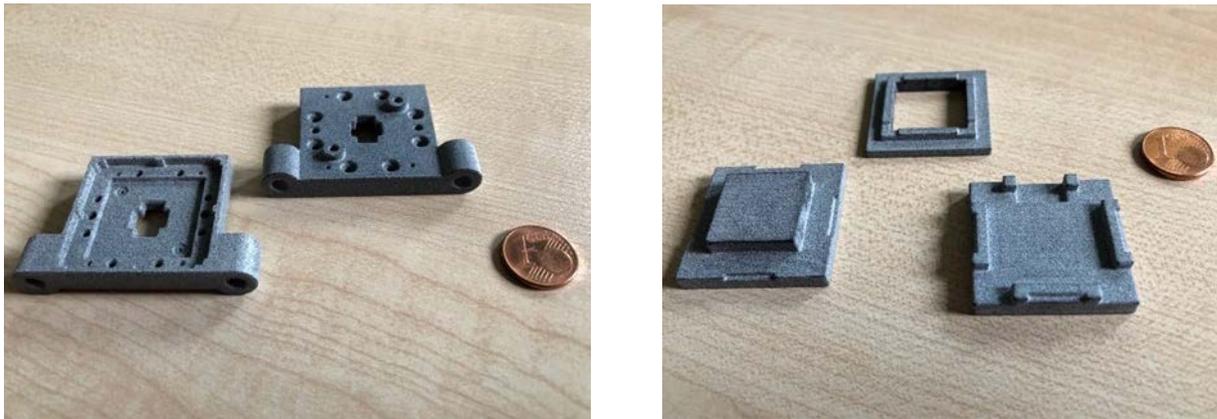


Abbildung 2.4.8: 3D-Druck Zellgehäuse (links) und Montagehilfe MEA-GDL (rechts)

Assemblierung und Dichtung von Brennstoffzellen- und Fügung von 3D-Druck Erzeugnissen

Die beschafften Einzelkomponenten von Brennstoffzellen wurden mit den 3D-Druck Erzeugnissen zu Mikrobrennstoffzellen analog zu den Konstruktionsvorgaben aus Arbeitspaket 4 montiert. Alle Komponenten der Brennstoffzellenunterbaugruppe wurden dabei zuverlässig gefügt und gedichtet. Zur Assemblierung der Brennstoffzellen wurde eine zu den neuen Gehäusekomponenten passende Montagehilfe konstruiert und gefertigt, mit der es gelingt unter Ausübung diskreter Anpressdrücke Dichtigkeitsmessungen sowie Impedanzmessungen zur Bestimmung und Anpassung der Zellinnenwiderstände durchzuführen. Abbildung 2.4.9 zeigt die Montagehilfe während der

Zellassemblierung sowie eine assemblierte Mikrobrennstoffzelle für den Systemeinsatz.

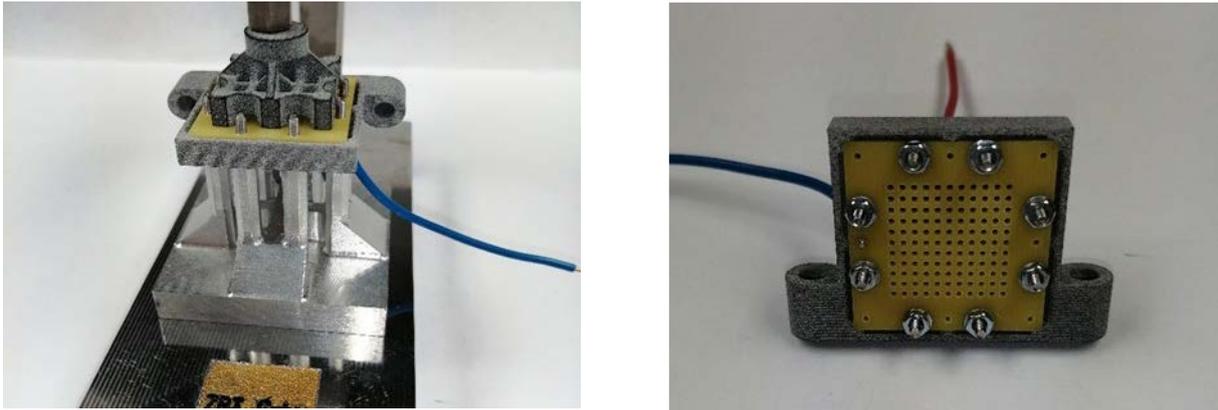


Abbildung 2.4.9: Mikrobrennstoffzelle während der Assemblierung (links) und assemblierte Zelle (rechts)

Für die die übrigen Gehäusebauteile wurden vor der Assemblierung des Funktionsmusters (siehe Arbeitspaket 6) Montageversuche im Hinblick auf eine wasserstoffdichte Medienverteilung durchgeführt. Aus den in Arbeitspaket 4.1 vorgestellten Unterbaugruppen ergaben sich die folgenden Dichtansprüche und eingeschlagene Lösungswege:

- MJ Fusion 3D-Druck Bauteile (PA 12 Kunststoff, Glaskugel-gefüllt) untereinander:
-> Direkte Klebeverbindung mit UV aushärtendem Brennstoffzellenklebstoff
- MJ Fusion 3D-Druck Bauteil mit Wasserstoffdruckminderer aus Edelstahl:
-> Direkte Klebeverbindung mit UV aushärtendem Brennstoffzellenklebstoff
- MJ Fusion 3D-Druck Bauteil mit Polyurethanschlauch mit 2 mm Außendurchmesser:
-> Direkte Klebeverbindung mit UV aushärtendem Brennstoffzellenklebstoff
- MJ Fusion 3D-Druck Bauteil mit Purge-Ventil der Fa. Lee Company:
-> Chemisches glätten des 3D-Druck Bauteils -> Einsatz des mitgelieferten Doppeldichtrings des Ventils
- MJ Fusion 3D-Druck Bauteil mit SMC Verbinder mit M3 Innengewindeverschraubung:
-> Chemisches glätten des 3D-Druck Bauteils -> Einsatz eines regulären SMC Dichtringes für Schraubverbindungen

Alle Dichtigkeitstests konnten mit Hilfe von Druckabfall-Messungen durchgeführt werden, da konstruktions- und aufbaubedingt geschlossene Probekörper vorlagen.

2.5) Arbeitspaket 5: Charakterisierung der Einzelkomponenten und Identifikation der Betriebsparameter für das Brennstoffzellenhybridsystem

Wie in Arbeitspaket 3 beschrieben wurde für dieses Vorhaben eine neue Testumgebung ausgelegt und aufgebaut, welche sowohl den herkömmlichen Betrieb von miniaturisierten PEM Brennstoffzellen, die Funktionsüberprüfung aller Systemkomponenten und die Ermittlung der steuerungsrelevanten Systemparameter ermöglicht. Mit der grafischen Programmierumgebung LabVIEW wurde eine Benutzeroberfläche (Abbildung 2.5.1) erzeugt, deren modularer Aufbau alle Anforderungen an die in diesem Arbeitspaket durchzuführenden Versuche erfüllt.

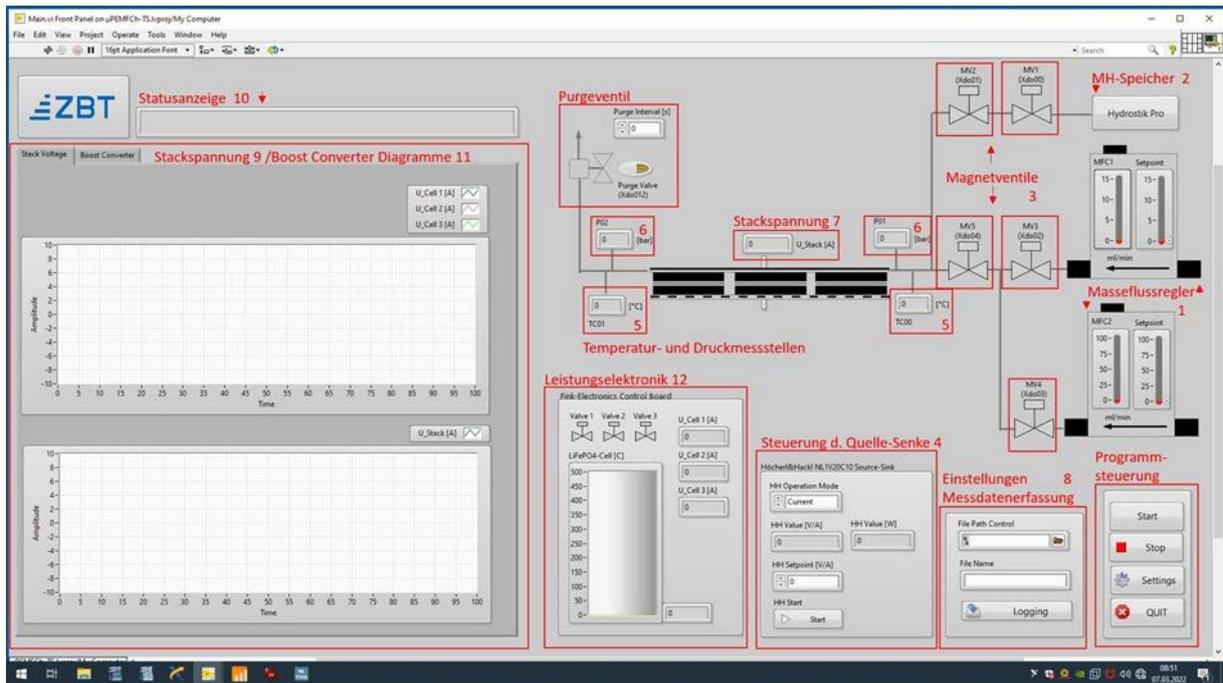


Abbildung 2.5.1: Benutzeroberfläche des PEMFCh-Teststandes in LabVIEW

Die Versorgung der Brennstoffzellen kann zum einen über Masseflussregler (1), die den Wasserstoff aus der Ringleitung des Labors beziehen, als auch aus dem Metallhydridspeicher (nur Visualisierung, 2) erfolgen. Die entsprechenden Leitungswege können über Magnetventile (3) individuell geschaltet werden. Als repräsentativer Verbraucher und gleichzeitiges Messinstrument wurde für die in diesem Arbeitsschritt durchzuführenden Versuchsprogramme eine Quelle/Senke (4) eingebunden. Alle relevanten Messdaten, wie Temperaturen (5), Drücke (6) und Spannung (7) werden ebenfalls erfasst und optional gespeichert (8). Messdaten, die besonders überwacht und visualisiert werden müssen, wie zum Beispiel die einzelnen Zellspannungen, werden noch einmal in größeren Diagrammen (9) dargestellt. Eine Anzeige (10) gibt Auskunft über den aktuellen Programmstatus und erleichtert das Finden von Fehlern, wenn iterative Programmänderungen oder -Erweiterungen vorgenommen werden. Die für den Aufbau und den Test des Funktionsmusters relevanten Systemkomponenten Boost Converter (11) und Leistungselektronik (12) wurden zur Funktionsüberprüfung und Parameterermittlung ebenfalls in die das Mess- und Steuerprogramm integriert. Die Bedienmaske des Boost Converters befindet sich auf dem zweiten Reiter bei den Diagrammen links. Funktionsweise dieser Systemkomponente wird im weiteren Verlauf dieses Berichtes erklärt.

Betrieb von Einzelzellen und Reihen-/Parallelschaltungen von Zellen in iterativer Parametervariation

Um sicherzustellen, dass nur zuverlässig laufende und betriebstüchtige Zellen in dem Hybridsystem verbaut werden, erfolgte zunächst eine am ZBT etablierte Einfahrprozedur der neu gebauten Zellen, bei der die PEM Brennstoffzellen für einen längeren Zeitraum bei abwechselnden Lastzuständen „gefahren“ werden. Für die weitere Charakterisierung der Mikrobrennstoffzellen wurden diese bei für das System relevanten Betriebspunkten unter Raumtemperatur betrieben. Für diesen ersten Abschnitt des Testverfahrens wurde die Brennstoffzellen über die Masseflussregler mit Wasserstoff aus der Ringleitung des Labors der Forschungsstelle versorgt. Die im Testaufbau eingesetzte Quelle/Senke wird während den Einfahrprozeduren als elektrische Last betrieben. Hier können definierte Strom- und/oder Spannungswerte eingestellt und variiert sowie der später im System einzusetzende Verbraucher

simuliert werden. So wurden die Leerlaufspannung, und durch kontinuierliches Erhöhen der Stromstärke die Strom-/Spannungskennlinien (UI-Kennlinien) und daraus ergebend die Leistungen der jeweiligen Zellen ermittelt. Zur Vergleichbarkeit der Daten und Analyse der Zellqualität erfolgte ebenfalls eine kontinuierliche Erfassung der Messwerte aus den Druck- und Temperatursensoren. Dies ermöglicht die Qualitätssicherung der im System zu verbauenden Zellen. Mikrobrennstoffzellen, deren Kenndaten signifikant von denen der anderen abweichen, konnten auf diesem Wege vor dem Systemeinsatz aussortiert werden.

Zellbetrieb unter Einsatz von System-Wasserstoffspeicher und Purge-Ventil

Im zweiten Abschnitt der Testprozedur wurden sukzessive die Komponenten des herkömmlichen Laborbetriebs durch die Systemkomponenten ersetzt. Das Monitoring der Messdaten und die Steuerung der Systemkomponenten erfolgte zunächst weiterhin über die LabVIEW-Benutzeroberfläche. Zunächst wurde der Masseflussregler ersetzt und das Reaktionsmedium Wasserstoff aus dem Metallhydridspeicher (Hydrostik) bezogen. Hierfür mussten nur die Leitungswege durch Veränderung der Magnetventilzustände verändert werden. Die Wasserstoffzufuhr wird durch einen fest mit dem Hydrostik verbundenen Druckminderer nur bezüglich des maximalen Drucks begrenzt. Der Betrieb der Zellen erfolgte nun im Dead-End Betrieb. Das heißt, dass der Ausgang der Wasserstoffleitung der Zellen nicht frei in die Umgebung, bzw. im Laborbetrieb in den Abzug mündet, sondern durch das Purge-Ventil im Normally-Closed Zustand geschlossen ist. Wie bereits beschrieben stellt der Dead-End Betrieb, dass nicht mehr Wasserstoff aus dem System entweicht als benötigt wird. Für den Austrag des sich im Flowfield ansammelnden Produktwassers, welches einen negativen Einfluss auf die Zellperformance hat, wird das Purge-Ventil geöffnet. Da je nach aktuellem Füllstand des Speichers unterschiedliche Druckverhältnisse in den Zellen und im System vorherrschen, müssen Purge-Parameter fortlaufend ermittelt werden, mit der das Reaktionsprodukt zuverlässig aus dem anodenseitigen Kreislauf des Systems ausgetragen werden können. Die ermittelten Purge-Routinen können dann über den Microcontroller des Systems auch autark umgesetzt werden.

In einem weiteren Schritt wurde die nächste System-Komponente, der von fink-electronics entwickelte Boost-Converter integriert. Dieser setzt die Spannung des 3-zelligen Brennstoffzellschaltung (ca. 1,5 V Betriebsspannung) auf die Spannung des Akkumulators (3,3 V) hoch. Die Anbindung dieses Aufwärtswandlers an den Laborrechner erfolgt über ein Mini-USB-Kabel. Der eingesetzte Microcontroller „Arduino Nano“ wurde über eine Schnittstellenerweiterung für LabVIEW (LINX) in die LabVIEW-Software eingebunden (Abbildung 2.5.2). Der Brennstoffzellenstapel wurde an den Spannungseingang und der LiFePO₄-Akkumulator an den Ausgang des Converters angeschlossen. Um die Ausgangsspannung auf den gewünschten Wert zu regeln wird über die Bedienmaske der „Voltage Control“ Regler (rechts, „Out Akku“) auf die maximale Ausgangsspannung eingestellt. Dann wird mit dem Schieberegler („Current Control“) langsam der Strom erhöht, bis, wie im unteren Diagramm zu erkennen, der Eingangsstrom langsam ansteigt. So lässt sich die Ausgangsspannung auf den gewünschten Wert regeln. Um möglichst viele Erfahrungen, bezüglich des Einstellverhaltens des Boost Converters und des Ladeverhaltens des Akkumulators zu erhalten wurde die Quelle/Senke zur Simulation des Brennstoffzellenstapels als auch des Akkumulators verwendet und dieser wieder auf einen definierten Wert aufgeladen werden.

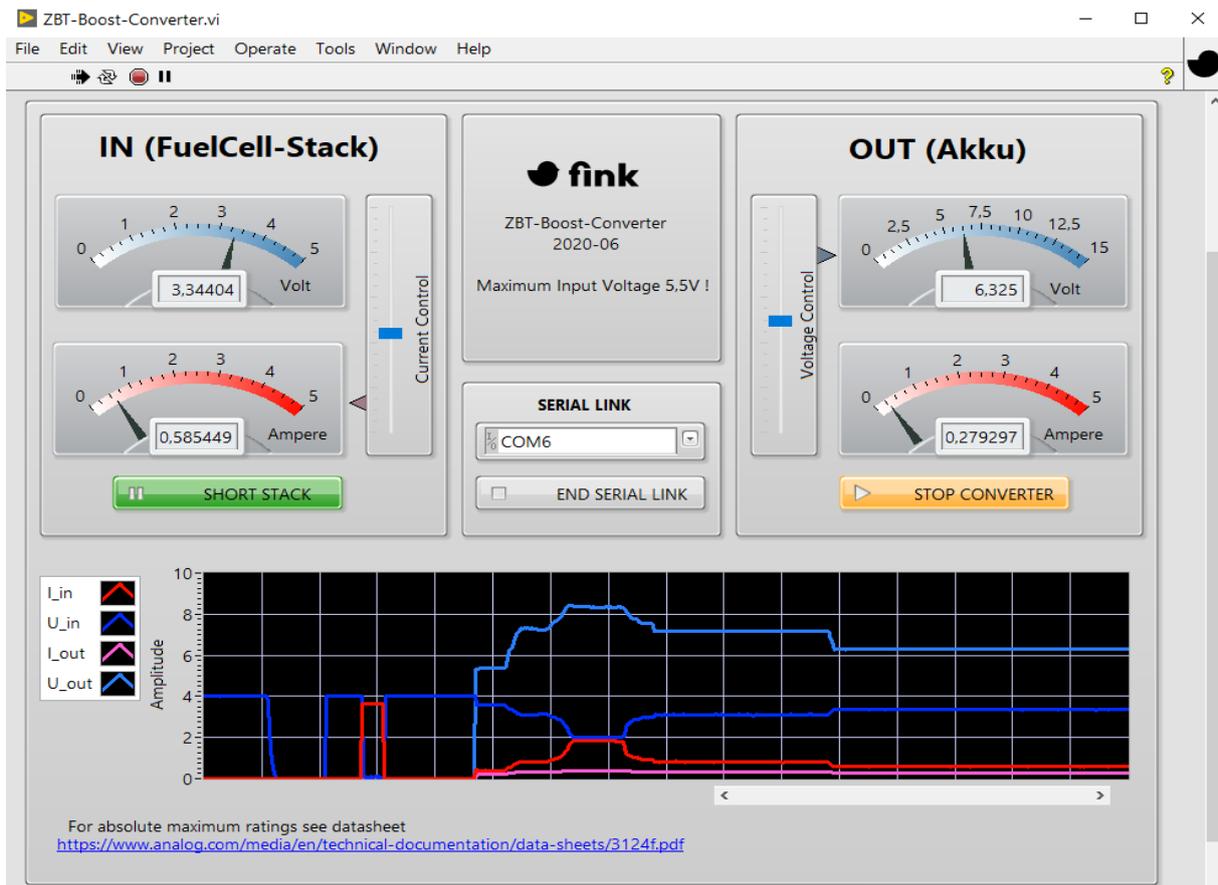


Abbildung 2.5.2: Boost Converter Benutzeroberfläche in LabVIEW

Die zweite steuerungs- und regelungstechnische Systemkomponenten ist die ebenfalls über fink-electronics bezogene Leistungselektronik. Der Ausgang des Boost Converters wird über die INPUT Terminals an die Leistungselektronik angeschlossen. Der LiFePO₄-Akkumulator wird über die Ausgangsterminals RECHARGEABLE CELL in das System integriert. Die Ladefunktion für den späteren Verbraucher wird über die Verbindung der USB Terminals mit den OUTPUT Anschlüssen realisiert. Ebenfalls wurde die Platine so vorbereitet, dass in einer weiteren Entwicklungsstufe der Akku über die USB-Schnittstelle aus dem Stromnetz geladen werden kann. Das Purge-Ventil wird mit einem der drei Anschlüsse für die Ventilsteuerung verbunden. Es können bei Bedarf zwei weitere Ventile in das System eingebunden werden, ohne dass Änderungen an der Hardware der Regelelektronik notwendig wären. Auf der Platine ist eine Einzelspannungserfassung für bis zu sechs Brennstoffzellen vorbereitet. Programmatisch wurde in Anlehnung an die Anforderungen des Projektes nur das Monitoring von drei Einzelspannungen umgesetzt. Abbildung 2.5.3 zeigt auf der linken Seite das Frontpanel bzw. die Benutzeroberfläche des in LabVIEW erstellten Programms für die Leistungselektronik. Das Purgeventil lässt sich über das entsprechende Kontrollsymbol ein- und ausschalten. Im Diagramm wird die Akkuspannung angezeigt. Des weiteren sind die drei Anzeigen für die Einzelzellspannungen abgebildet. Im unteren Bereich wird sowohl über eine bildliche Anzeige als auch als Digitalwert der Ladezustand des Akkumulators angezeigt. Zur Überwachung des Ladezustands des Akkus wurde von fink-electronics ein Coulomb Counter IC (LTC 4150) auf der Platine verbaut. Ein interner Integrator summiert kontinuierlich den gemessenen Lade- und Entlade-Strom und produziert regelmäßig Überläufe, die durch einen Impuls an den Mikrocontroller und damit an das VI weitergegeben werden.

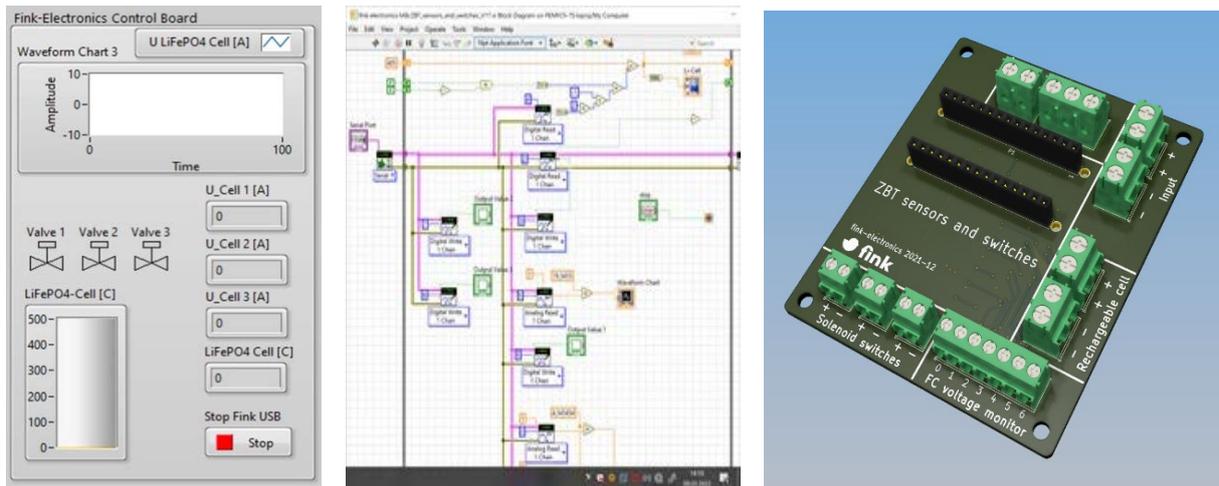


Abbildung 2.5.3.: Frontpanel des VIs für die Leistungselektronik in LabVIEW (links), Auszug aus dem Blockdiagramm des VIs für die Steuerelektronik (mitte) und CAD der Platine (rechts)

2.6) Arbeitspaket 6: Aufbau und Inbetriebnahme des Funktionsmusters

Im finalen Arbeitspaket wurden alle Systemkomponenten zu einem Funktionsmuster zusammengefügt. Als Halterung für das μ PEMFC Hybridsystem dienen zugeschnittene Industrieprofile der Serie 5 von ITEM. Auf diesem Weg bleiben alle Unterkomponenten und Baugruppen zugänglich und können bei Bedarf ad hoc gewechselt werden. In Bezug auf die entwickelten Klebprozesse stellt die Unterbaugruppe der Wasserstoffverteilung (Verteilerbaugruppe) den komplexesten Teil dar, da er an mehreren Stellen zu verkleben ist, bevor er im System integriert wird.

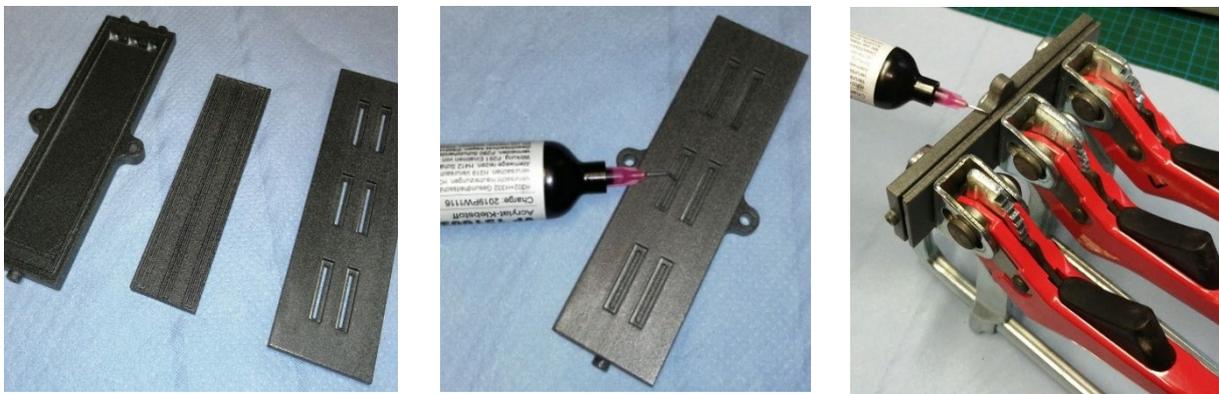


Abbildung 2.6.1: 3D-gedruckte Unterbaugruppe der Wasserstoffverteilung (links) bei Klebung des Deckels mit der Verteilerebene (Mitte) sowie Deckel und unterer Schale (rechts)

Abbildung 2.6.1 zeigt die 3D-gedruckten Einzelkomponenten vor und während des Klebprozesses. Die Verklebung erfolgte mittels UV-Kleber der Firma Wellmann Technologies unter Aufbringung von Anpressdruck vor und während der Aushärtung der Bauteile. Der UV-Klebstoff wurde mittels einer UV-Lampe, deren Wellenlänge bei 256 nm liegt, ausgehärtet. Im Anschluss wurden an den Stirnseiten, in die dazu vorgesehenen Anschlussmuffen, Einschraubverbinder von SMC eingeschraubt. Diese dienen dazu, dass dort die Versorgungsschläuche eingesteckt werden können. Versuchsweise wurde die zweite Verteilerbaugruppe konstruktiv so gestaltet, dass die Versorgungsschläuche auch direkt am Gehäuse

angeklebt werden können. Beide Varianten dichten erfolgreich und sind auf Abbildung 2.6.2 zu sehen.

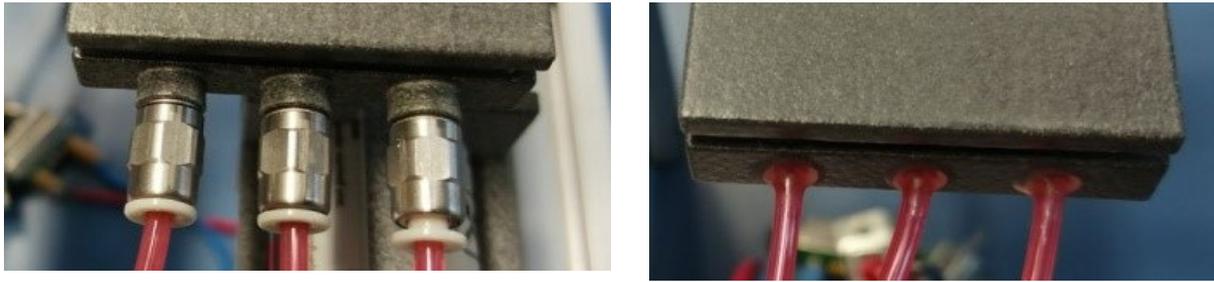


Abbildung 2.6.2: Schlauchverbindung an die gefügte Gasverteilungsbaugruppe mittels Steck-Verbindung (links) oder direkte Verklebung (rechts)

Analog verklebt wurde der Druckminderer mit der Versorgungsbaugruppe des 3D-druck Gehäuses. Der Druckminderer besitzt ein integriertes Verschraub-System für den Anschluss von Schläuchen mit 6mm Durchmesser. Der Metallhydridspeicher wird mit dem Druckminderer verschraubt. Das 3D-Druckbauteil führt und hält dabei den Metallhydridspeicher fixiert, so dass eine Vergantung ausgeschlossen werden kann. Der linke Teil von Abbildung 2.6.3 zeigt die Versorgungsunterbaugruppe montiert am Profil. Die Verbindung der Versorgungsunterbaugruppe und der Wasserstoffverteilung wurden mittels Silikonschlauch realisiert. Die gleiche Modularität über Schlauchverbindungen wurde für die Verbindung zwischen Verteiler und Zellbaugruppen des 3D-Druck Gehäuses gewählt. Somit können vorab geprüfte Zellen an das System angebunden und bei Bedarf auch auf einfachem Wege gewechselt werden. Eine auf diesem Weg an das System angebundene Zelle wird auf dem rechten Teil von Abbildung 2.6.3 gezeigt.



Abbildung 2.6.3: Am System montierte, und in die Wasserstoffversorgung integrierte Versorgungsbaugruppe (links) sowie Zellbaugruppen (rechts).

Der Restwasserstoff am Zellausgang wird mittels Schlauchverbindung in eine zweite Verteiler-Unterbaugruppe geleitet und gelangt dann final zur Purge-Unterbaugruppe, die auf dem linken und mittleren Teil von Abbildung 2.6.4 zu sehen ist. Diese Unterbaugruppe besteht aus einem Purge-Ventil als medialer Ausgang dieses Systems sowie dem zugehörigen ein 3D-Druckbauteil. Herstellerseitig stellt das Unternehmen passend zur Geometrie des Ventils einen doppelten Dichtring als Anschlussmöglichkeit an Festkörper zur Verfügung welcher wie vorgesehen eingesetzt wurde. Das 3D-Druckbauteil wurde vorab chemisch geglättet. Somit ist nach der Verschraubung des Ventils mit dem 3D-Druckbauteil die Dichtigkeit gegenüber der Umgebung gegeben. Systemseitig sind an das Gehäuse der Purge-Unterbaugruppe die Schläuche zur Medien Zu- und Abführung angeklebt worden. Als Teil der Unterbaugruppe der Leistung- und Regelungselektronik sind Akkumulatoren mittels den 3D-Druckbauteilen an das Industrieprofil angebracht wurden.

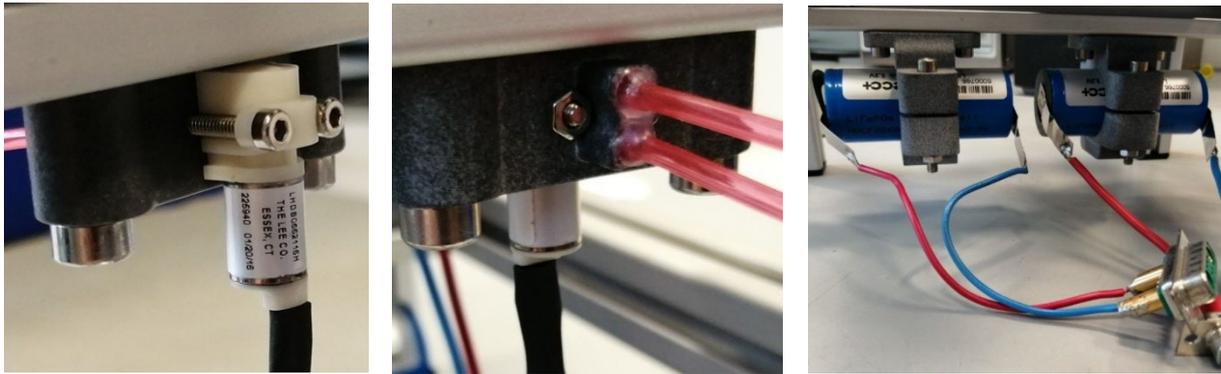


Abbildung 2.6.4: Am System montierte, und in die Wasserstoffversorgung integrierte Versorgungsbaugruppe (links) sowie Zellbaugruppen (rechts).

Der rechte Teil von Abbildung 2.6.4 zeigt diese I-tecc+ Lithium-Eisenphosphat Akkus mit Halterungen. Keine der Komponenten der Leistungs- und Regelungselektronik sind an Medienkreisläufe des Gesamtsystems integriert und müssen somit in Bezug auf die 3D-Druck Komponenten Dichtansprüche erfüllen. Die Elektrische Systemeinbindung erfolgte ausschließlich über Löt- und Steckverbindungen. Auch diese erlauben eine Reversibilität so dass die Unterkomponenten gewechselt werden können. Alle Unterbaugruppen des Systems wurden vorab in der Teststands-Umgebung geprüft, so dass nach Assemblierung des Funktionsmusters die Komponenten zusammen in Betrieb genommen werden konnten ohne das etwaige Undichtigkeiten im Wasserstoffkreislauf auftraten. Gegen Ende des Vorhabens stand auch der letzte Teil der im Entwicklungsunterauftrag an fink-electronics vergebene Dienstleistungsauftrag der Leistungselektronik zur Verfügung. Diese stellt den elektrischen Systemausgang dar und kann über den Akkumulator eine beliebige 5V Anwendungen aufladen. Ebenfalls wird über diesen Teil der Leistungselektronik das Purge-Ventil systemseitig angesteuert sowie Einzelzellspannungen der Brennstoffzellen erfasst. Letzteres besitzt für einen fortlaufenden, autarken Systembetrieb Bedeutung, da nur so ermittelt werden kann, ob etwaige Defekte and den Brennstoffzellen auftreten. Abbildungen 2.6.5 zeigt das μ PEMFC-Hybridssystem als Funktionsmuster während der Assemblierung und der Inbetriebnahme der zwei Elektronikboards zur Steuerung und Regelung.

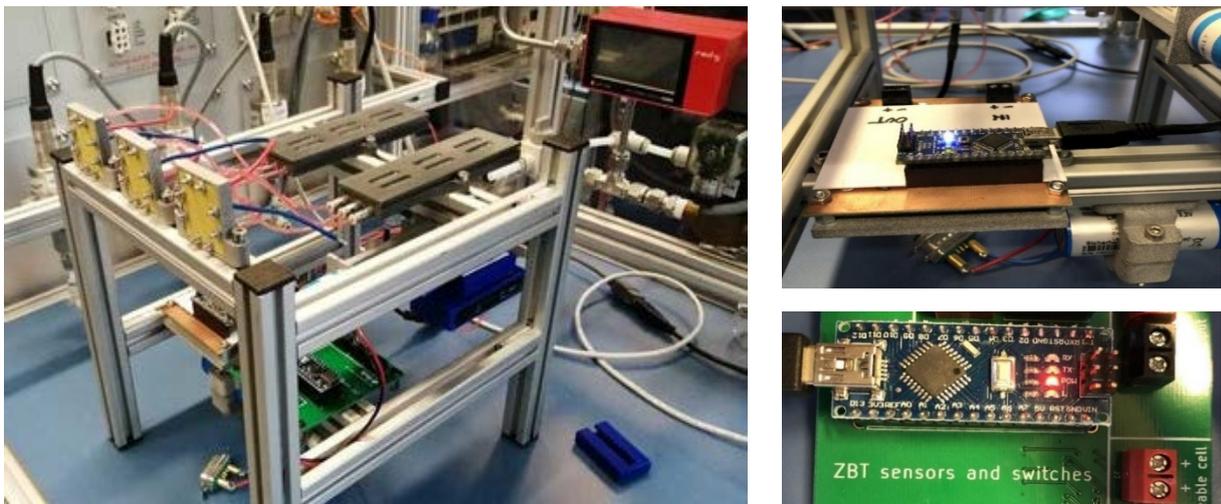


Abbildung 2.6.5: Funktionsmuster des Hybridsystems mit allen Komponenten (links) sowie Inbetriebnahme des Boost Konverters (rechts oben) und des Systemausgangsboards (rechts unten).

3) Bewertung der erzielten Ergebnisse in Gegenüberstellung mit den Zielsetzungen des Antrages

Nachfolgend werden anhand der Kontrollmeilensteine aus der Antragsstellung die erzielten Ergebnisse des Vorhabens mit den ursprünglichen Zielsetzungen verglichen. Folgenden Meilensteine wurden definiert:

- M1: - Das Brennstoffzellensystem wurde im Sinne der Zielstellung ausgelegt.
- Geeignete 3D-Druck Verfahren wurden für die Gehäusekomponenten ermittelt.
- M2: - Alle Systemkomponenten wurden identifiziert und beschafft.
- Dichtungstechnik ermöglicht eine H₂-dichte Verbindung zwischen Gehäuse und Systemkomponenten (dispensierte Dichtungen und/oder Klebstoff).
- M3: - Teststandumgebung für den Test der Systemkomponenten wurde aufgebaut.
- Funktionsfähige Brennstoffzellen mit 3D-Druck Gehäuse wurden für das System assembliert.
- Betriebsarbeitspunkte für den Systembetrieb der Brennstoffzellen wurden ermittelt.
- Die Zellen ermöglichen die Leistungsspezifikationen für die Zielstellung.
- M4: - Regelparameter für den Systembetrieb mit H₂-Speicher und Purge-Ventil wurden ermittelt.
- Funktionsmuster des Systems aufgebaut; Formfaktoren entsprechen Zielstellung.
- Inbetriebnahme zeigt Arbeitsweise des Systems im Sinne der Zielstellung.

Zu Meilenstein 1 (Drei Monate nach Start des Vorhabens):

Für die Auslegung des Brennstoffzellensystems als Funktionsmuster wurde unmittelbar zu Beginn des Vorhabens ein enger Austausch mit dem Unternehmen fink-electronics begonnen, der während der gesamten Projektlaufzeit aufrechterhalten wurde. Hierdurch konnten bereits in Arbeitspaket 1 in Form von strikten Lasten und Pflichten an das System im Dialog abgesteckt werden, welche Möglichkeiten der Steuer- und Regelungstechnik sich als sinnvoll gestalten und umgesetzt werden können. Das zu entwickelnde Funktionsmuster soll zum einen potentiellen Anwendern und Kunden die Vorteile einer hybriden Systemführung von Brennstoffzellen und Akkumulator demonstrieren. Zum anderen dient es für die Forschungsstelle als Ausgangsplattform für künftige Komponentenentwicklungen von portablen Brennstoffzellensystemkomponenten. Beide Kernaufgaben des Funktionsmuster konnten durch die vorgenommene Auslegung gewahrt bleiben. Die Einbindung von fink-electronics als Dienstleister für die Systemelektronikentwicklung war vom Arbeitsumfang her sinnvoll und angemessen.

Ein weiteres Kriterium des ersten Meilensteins war die erfolgreiche Identifikation eines geeigneten 3D-Druck Verfahrens für die Gehäuseentwicklung. Von den in Betracht gezogen Verfahren hat sich die bereits in der Beantragungsphase favorisierte Multi Jet Fusion Technik von HP bestätigt. Während der Projektphase wurde die Technologie von HP erweitert, indem über Glaskugeln im verdruckten Material die Steifigkeit erhöht wird. Dieses Feature war für das vorliegende Vorhaben zweckdienlich und wurde übernommen, um die Gehäusekomponenten in den nachfolgenden Arbeitspaketen so dünn und platzsparend wie möglich auszuführen.

Ein wesentlicher Aufgabenschwerpunkt aus der Beantragung bestand in der Ablösung der bisherigen Kapillar-Verschlauchungen in Form einer Feinverteilung für den Wasserstoff, unmittelbar realisiert vom Systemgehäuse selber. Somit mussten feine Kanalstrukturen direkt mittels 3D Druck abgebildet werden. Die ursprüngliche Idee, dies aufgrund der hohen Rauigkeit der MJF Erzeugnisse über weitere 3D-Druck Materialien anderer Verfahren umzusetzen, konnte verworfen werden. Stattdessen waren die trotz chemischer Nachbearbeitungen verwendeten MJF Erzeugnisse hinreichend präzise, um die

angedachten kapillaren Kanalstrukturen direkt mit auszubilden. Hierfür wurden diese unter einem konfokalen Mikroskop vermessen bevor sie im Betrieb Einsatz fanden. Als Ergebnis zeigt Abbildung 3.1 Aufnahmen des Mikroskops über einen beliebigen Ausschnitt der gedruckten Kanalstrukturen nach dem chemischen Glättungsprozess. Die drei Kapillarkanäle versorgen jeweils im Betrieb eine Brennstoffzelle mit Wasserstoff. Alle Arbeiten zur Erreichung der Entwicklungsziele des ersten Projektmeilensteins wurden im Einklang mit der bewilligten Zeit- und Personalplanung durchgeführt. Die Ziele wurden innerhalb von drei Monaten nach Start des Vorhabens erreicht.

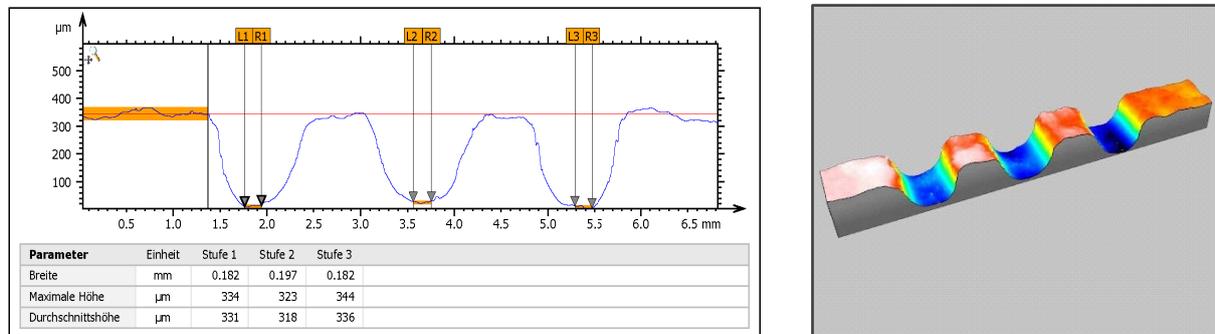


Abbildung 3.1: Oberflächen- und Kanalvermessung der 3D-gedruckten Kapillarkanäle für die Gasfeinverteilung.

Zu Meilenstein 2 (Ein Jahr nach Start des Vorhabens):

Die Auswahl und Beschaffung aller Systemkomponenten erfolgte in Arbeitspaket 2 und wurde in Kapitel 2.2 beschrieben. Die Komponenten Akkumulator, Wasserstoffspeicher (inkl. Druckminderer) und Purge-Ventil stellen Betriebsmittel nach dem Stand der Technik dar und wurden nach funktionalen sowie kostentechnischen Aspekten ausgewählt und beschafft. Sie sind herstellerseitig zertifiziert und stellen für den Systembetrieb des Funktionsmusters eine vorläufige Konstante dar, welche prinzipiell nur über erneuten Entwicklungsaufwand verändert werden kann. Dieser hält sich jedoch bedingt durch Funktionalität der Bauteile in Grenzen. Sofern z.B. die elektrischen Eigenschaften der Akkumulatoren und Ventile analog verbleiben, so können z.B. auch die Produkte anderer Anbieter eingesetzt werden. In Bezug auf den Akkumulator und Metallhydridspeicher ist dies von besonderem Interesse, da sowohl die Batterietechnik als auch die Wasserstoffspeicherung Entwicklungsfelder darstellen, die von einem rasanten Fortschritt gekennzeichnet sind. Die Arbeiten mit fink-electronics als Entwicklungsdienstleister für die Elektronik des Funktionsmusters wurde im zweiten Arbeitspaket fortgeführt und dahingehend vertieft, dass wie vorgesehen zum Erzielen des zweiten Meilensteins eine autarke Regelung für den Beladungsprozess des Akkumulators über Brennstoffzellen des Systems vorlag. Mit dieser konnte nachfolgend die Funktionalität der Zellen sowie das Zusammenspiel zwischen Akku und Brennstoffzellen dann untersucht und bewertet werden.

Der zweite erzielte Aspekt des Meilensteins zwei bestand in der Implementierung einer funktionalen Dichtung zwischen allen an den Medienkreisläufen des Systems beteiligten Komponenten. Schwerpunktmäßig adressiert dies die Verbindung zwischen Purge-Ventil und Gehäuse, zwischen Druckminderer und Gehäuse sowie zwischen Gehäusebauteilen untereinander. Erstere konnte über die zum Ventil zugehörige Flachdichtung realisiert werden. Aufgrund der Rauigkeit der 3D-gedruckten Gehäusebauteile ist es hier zwingend erforderlich eine chemische Glättung der Gehäusebauteile durchzuführen, damit die Flachdichtung seine Funktion erfüllen kann. Für die übrigen Komponenten wurden Klebprozesse auf Basis von brennstoffzellentauglichen Klebstoffen entwickelt. Es ist konstruktiv gelungen bei allen Klebestellen einen optischen Zugang für die Dispensierung und UV-

aushärtung der Klebstoffe zu wahren. Alle Dichtstellen wurden mittels Messungen des Druckabfalls unter Einsatz von Druckluft und Wasserstoff vor Inbetriebnahme der jeweiligen Systemkomponenten geprüft. Die zur Erzielung des Projektmeilenstein zwei erforderlichen Arbeiten konnten wie in der Antragstellung geplant innerhalb des ersten Jahres des Vorhabens durchgeführt werden. Abbildung 3.2 zeigt die beschafften Systemkomponenten nach dem Stand der Technik sowie eine Verteiler Unterbaugruppe während der Klebstoffaushärtung unter einer UV-Lichtquelle.

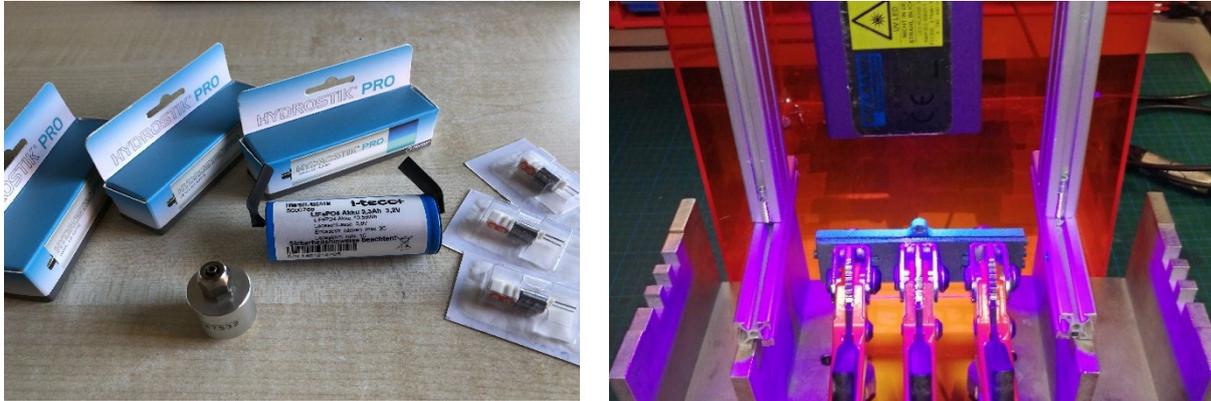


Abbildung 3.2: Systemkomponenten Metallhydridspeicher, Akkumulator und Purge-Ventil nach dem Stand der Technik (links). Systemgehäusebauteil Wasserstoffverteiler während der Klebprozessentwicklung (rechts).

Zu Meilenstein 3 (Ende des siebten Quartals nach Start des Vorhabens):

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben wurde im Rahmen des Arbeitspakets 3 eine neue Testumgebung aufgebaut. Als Hybridsystemteststand ist diese dazu in der Lage alle an der Systementwicklung beteiligten Komponenten individuell zu betreiben und für einen Systemeinsatz zu evaluieren. Die Anlage verfügt über jedwede hierfür erforderliche Sicherheits-, Betriebs- und Sensortechnik und kann darüber hinaus durch die Einbindung eines Elektrolyseurs Wasserstoff für portable Anwendungen produzieren. Die Inbetriebnahme konnte sukzessiv mit Vorlage der jeweiligen Systemkomponenten erfolgen und wurde rechtzeitig zur Erzielung des Meilensteins 3 abgeschlossen. Somit konnten auch wie geplant die in Arbeitspaket 5 in Betrieb genommenen Leistungs- und Regelelektronik auf ihre Funktionstauglichkeit hin in der neuen Teststandumgebung untersucht werden.

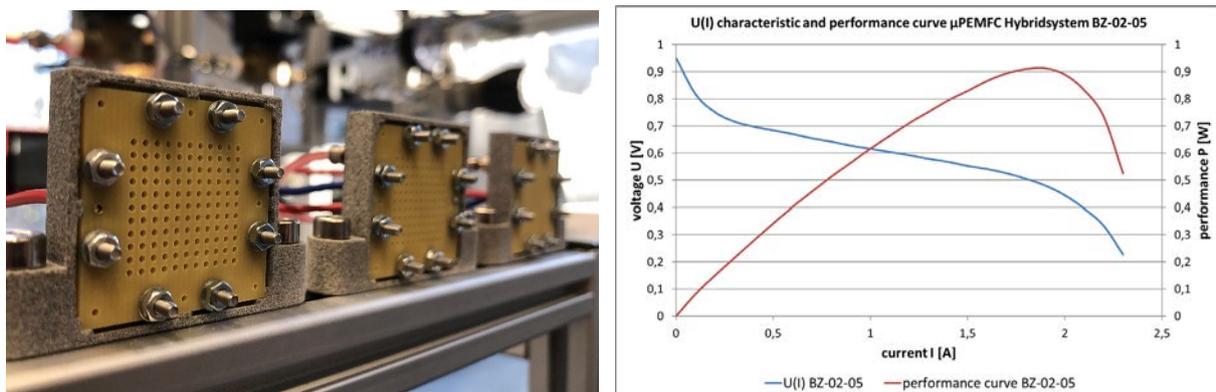


Abbildung 3.3. Assemblierte Mikrobrennstoffzellen mit 3D-Druck Gehäuse (links). U(I) Kennlinie und Leistungskurve einer Mikrobrennstoffzelle mit 3D-Druck Gehäuse (rechts).

Der linke Teil von Abbildung 3.3 zeigt assemblierte Brennstoffzellen mit 3D-Druck Gehäuse auf Basis der MJF Technologie mit Glaskugelverstärkung von HP. Die Zellen wurden im Rahmen des Arbeitspaketes

2.4 unter Verwendung des Impedanz-Messgerätes des Hybridsystemteststandes assembliert und standen für die Systementwicklung des Vorhabens rechtzeitig zur Verfügung. Abbildung 3.3 – rechts zeigt die U(I) Kennlinie und Leistungskurve von einer der Zellen. Anoden, Kathoden sowie Membran und GDL wurden vom bisherigen Stand der Technik in das neue 3D-Druck Gehäuse überführt. Die Aufbau- und Verbindungstechnik ermöglicht dabei eine zuverlässige Fügung aller Zellbauteile. Die gedruckten Zellgehäuse sind gegenüber Wasserstoff druckdicht. Sie erlauben eine hinreichende Übertragung von Anpressdrücken sowohl für die dispensierte Dichtung als auch für die Justierung der Zellinnenwiderstände zum Erreichen der anvisierten Leistungswerte. Durch die Weiterentwicklung der Multijet Fusion Technik können die Gehäuse künftig platzsparender als ursprünglich angenommen ausgeführt werden, was die volumetrische Leistungsdichte der Zellen weiter erhöht. Alle Arbeiten zur Erreichung der in Meilenstein 4 definierten Ziele konnten im Einklang mit der bewilligten Zeit- und Personalplanung durchgeführt werden.

Zu Meilenstein 4 (30 Monate nach Start des Vorhabens):

In den beiden letzte Arbeitspaketen wurden wie vorgesehen die zunächst individuell in der Testumgebung in Betrieb genommenen Systemkomponenten zu einem Funktionsmuster zusammengesetzt. Dieses wird auf Abbildung 3.4 gezeigt und umfasst alle in diesem Bericht vorgestellten Unterbaugruppen.

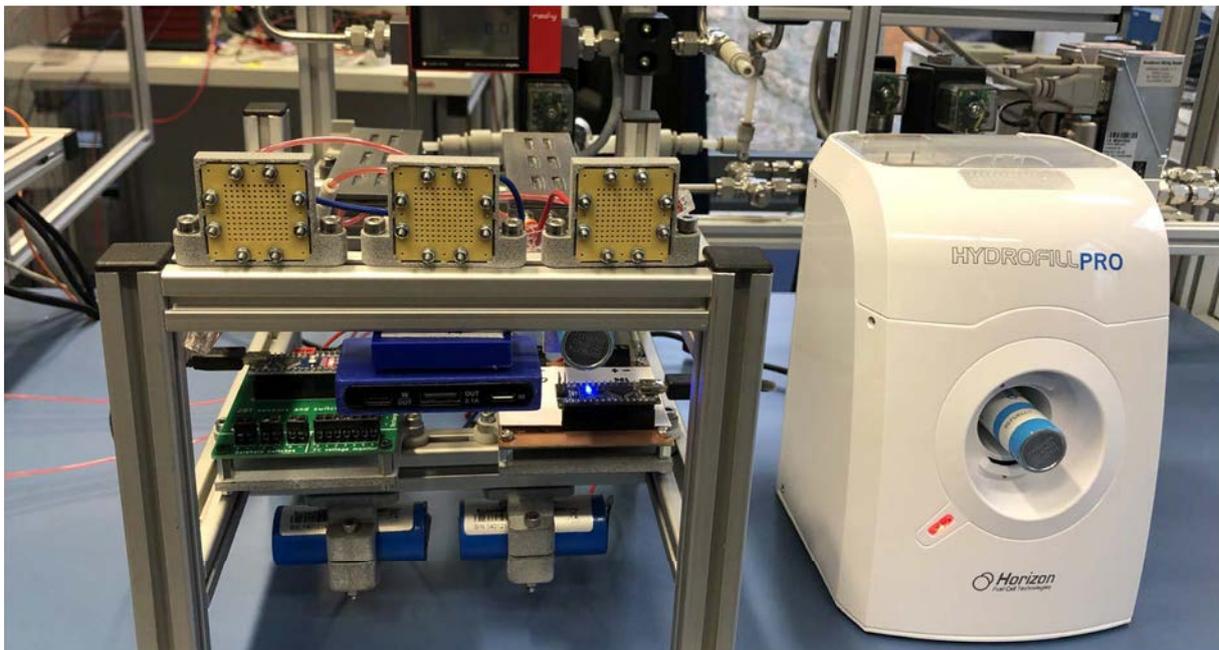


Abbildung 3.4: Funktionsmuster des portablen PEM-Hybridbrennstoffzellensystems auf Basis einer 3D-Druck Gehäuselösung.

Es erfüllt in Bezug auf Volumen ($< 405 \text{ cm}^3$) und Gewicht ($< 0,5 \text{ kg}$) der 3D-Druck Gehäusekomponenten, die elektrische Leistung der drei integrierten Brennstoffzellen ($> 2 \text{ W}$) sowie die Gesamtleistung des Systems nach der Hybridisierung mit den Akkumulatoren (5V bei 1A) den spezifizierten Anforderungen. Durch die Korrespondenz mit fink-electronics ist es während der Projektlaufzeit gelungen das Wissen im Bereich der Mikrobrennstoffzelleotechnik auch auf die Steuer- und Regelungstechnik bei der Hybridisierung mit der Akkumulator-Technik auszuweiten. So kann nun z.B. im Gegensatz zu reinen Zellsystemen (ohne Akkumulator) dank des Einsatzes des Boostkonverters auf eine genaue Festlegung von Betriebsarbeitspunkten verzichtet werden. Stattdessen liegt nun ein dynamischer Arbeitsbereich

der Zellen von ca. 0,3 - 0,6 V pro Zelle vor, in der die Elektronik regeln kann und den Systemakkumulator wieder auflädt. Purge-Intervalle am Systemausgang können über die Ansteuerung in LabView je nach Einsatz von Wasserstoffquelle und vorliegendem Druckverhältnis über das Funktionsmuster individuell bestimmt und angepasst werden. Das System erlaubt künftig eine Ausweitung auf bis zu 6 Brennstoffzellen und den Einsatz mehrerer Akkumulatoren und Metallhydridspeicher zur Verlängerung der Betriebszeiten. Die geleisteten Arbeiten der Forschungsstelle entsprachen innerhalb des Zeitraums der Berichtserstattung dem begutachteten und bewilligten Forschungsantrag und waren für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen. Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.

4) Darstellung der Innovationspotenziale und Applikationsmöglichkeiten

Die in Anhang 7 zur Vorhabensbeschreibung erläuterten Applikationsmöglichkeiten der F&E-Ergebnisse dieses Vorhabens im Bereich netzunabhängiger Energiewandlungssysteme verbleiben für das Zentrum für Brennstoffzellentechnik und seinen Partnern aus Forschung und Industrie von fortlaufendem Interesse. Die Ergebnisse adressieren vorrangig den Markt der Power Banks zur wieder Aufladung von portablen Geräten wie zum Beispiel Smartphones und Tablets sowie den dazugehörigen Industriezweigen.

Während der Projektlaufzeit wurden die Ergebnisse dieses Vorhabens zudem mit weiteren Entwicklungsfeldern des Zentrums für Brennstoffzellentechnik verknüpft, welche künftig bisher noch nicht berücksichtigte Applikationsmöglichkeiten aufzeigen. Der in diesem Vorhaben eingeschlagene Weg, Gehäusekomponenten für kleine Brennstoffzellensysteme über 3D-Druck abzubilden, findet inzwischen auch jenseits von portablen Anwendungen bei der Brennstoffzellentechnik in großen Umfang Anklang. Es werden fortlaufend neue Materialien und Herstellungsverfahren auf dem Markt geworfen, die auch von den Entwicklern von Brennstoffzellen- und Brennstoffzellensystemkomponenten genutzt werden wollen, um die Produktionskosten von Systemen zu senken und/oder die volumetrische Leistungsdichte solcher Systeme zu steigern. Für die Brennstoffzellentechnik ist jedoch noch weitestgehend unbekannt ob und welche dieser neuen Materialien und Verfahren sich für einen nachhaltigen Einsatz überhaupt eignen. Neben bekannten Faktoren wie Temperaturstabilität und Permeabilität gegenüber Wasserstoff stellen insbesondere unbekannte Faktoren wie zum Beispiel produktionsbedingte Verunreinigungen oder schädliche chemische Rückstandsstoffe ein großes Problem da.

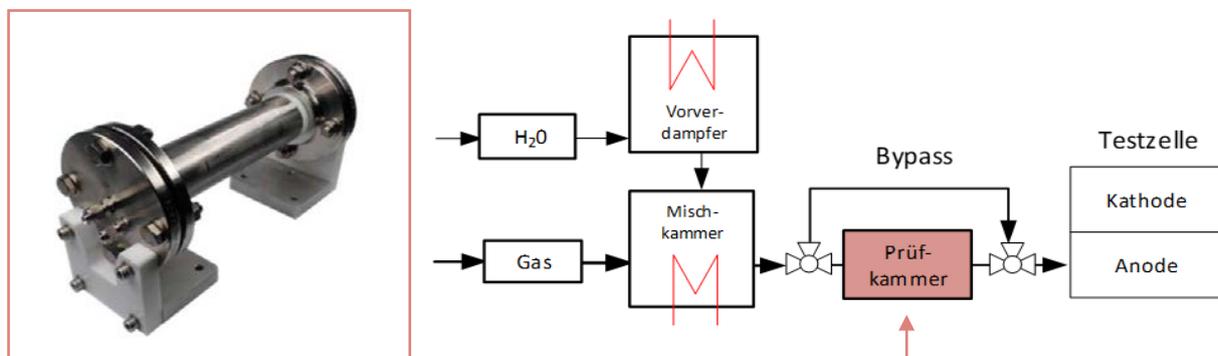


Abbildung 4.1: ZBT Prüfkammer für die Materialqualifizierung aus dem Verbundprojekt VALIDATE (links) und schematische Integration der Kammer innerhalb eines Brennstoffzellensystems mit einer Testzelle (rechts)

Diese können nämlich bereits in geringen Mengen Brennstoffzellen dauerhaft schädigen, was die entsprechenden Materialien und Herstellungsverfahren für die Brennstoffzellentechnik ausschließt oder weiteren Entwicklungsbedarf aufzeigt. Besonders erschwerend ist der Umstand, dass insbesondere im Bereich des 3D-Drucks sowohl die Anbieter als auch die von ihnen entwickelten Materialien und Verfahren extrem mannigfaltig sind. Dieser Zustand wird sich in Zukunft zudem noch verschärfen. Aus diesem Grund beschäftigt sich ein Forschungszweig des Zentrums für Brennstoffzellentechnik mit der Materialqualifizierung für Brennstoffzellensysteme. Hier werden z.B. in Prüfkammern Brennstoffzellen gegenüber fraglichen Materialien und somit möglichen Schadstoffquellen exponiert und deren Auswirkungen untersucht. Abbildung 4.1 zeigt diesbezüglich eine Prüfkammer aus dem Verbundprojekt VALIDATE, welche der Medienzuführung von Brennstoffzellen vorgeschaltet wird. Benötigt wird hier stets noch ein Brennstoffzellenteststand, mit dem die entsprechenden Testzellen dann betrieben und überwacht werden. Auch wenn es sich von der ursprünglich angedachten Applikation unterscheidet, bietet sich an dieser Stelle eine wie in diesem Vorhaben entwickelte autarke Betriebslösung von Brennstoffzellen an. So können kompakte Systeme auch unabhängig von Laboratorien betrieben werden und allen Entwicklern rund um die Brennstoffzelle die Möglichkeit geben ad hoc zu prüfen, welche neuen Materialien sich für ihre jeweilige Brennstoffzellenapplikation eignen. Auch werden es portable oder kleine stationäre Systeme sein, die künftig die Reinheit von Wasserstoff an Tankstellen oder nach den jeweiligen Prozessstufen zur Aufbereitung von Wasserstoff aus anderen Energieträgern wie z.B. grünem Ammoniak fortlaufend garantieren. Eine entsprechende Weiterentwicklung des in diesem Vorhaben entwickelten PEM-Hybridbrennstoffzellensystems zu einem autarken Brennstoffzellenbetriebssystem zur Erfüllung von derartigen Qualitätsüberwachungsaufgaben wird daher vom Zentrum für Brennstoffzellentechnik angestrebt.

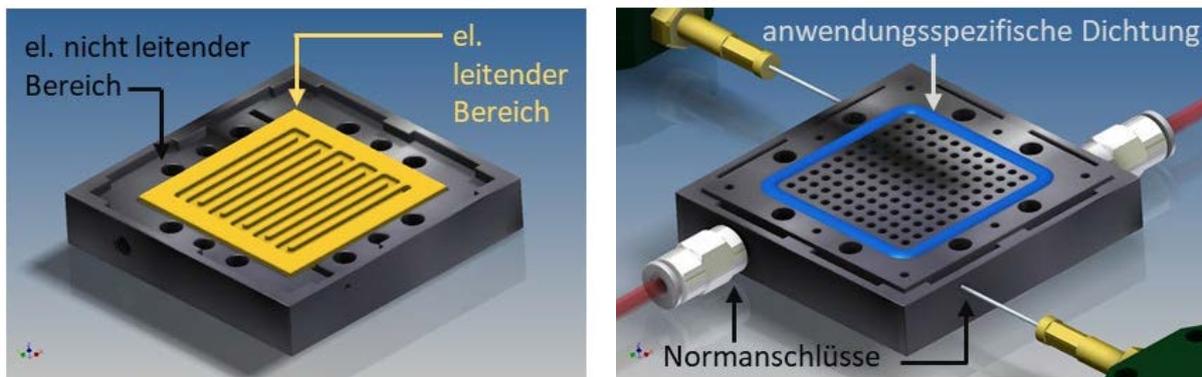


Abbildung 4.2: Idee einer Erweiterung von 3D-Druck Kunststoffbauteilen um definierte elektrische Komponenten (links) zur Bereitstellung von Mikro- und Sensorbrennstoffzellen (rechts).

Ein weiteres Innovationspotential des vorliegenden Vorhabens birgt die dichte Verknüpfung vom 3D-Druck als formwerkloses, von vielen Freiheitsgraden gekennzeichnetes, Herstellungsverfahren mit der klassischen Leiterplattentechnik. Letztere hat die Bipolarelemente der Mikrobrennstoffzellen dieses Vorhabens bereitgestellt und eignet sich aufgrund der definierten Handhabung von elektrisch leitenden und nichtleitenden Komponenten. Limitierungen liegen hier in der geometrischen Gestaltung vor, da die Leiterplattentechnik auf zwei Dimensionen beschränkt bleibt. Für die Brennstoffzellentechnik ist es jedoch erforderlich auch die dritte Dimension frei nutzen zu können um z.B. Gasanschlüsse und Verteilstrukturen zu realisieren. Wünschenswert wäre daher künftig eine Implementierung von definierten, elektrisch leitenden Parzellen unmittelbar auf den 3D-gedruckten Kunststoffbauteilen. Auf

diesem Weg können die Aufgabe von Bipolarelementen und Brennstoffzellengehäusen weiter zusammengefasst und im Idealfall auf nur einem Bauteil abgebildet werden (Abbildungen 4.2). Neben einer kompakteren Bauweise für portable Brennstoffzellenanwendungen verringert sich hierüber weiterhin auch der Assemblierungsaufwand und die Produktionskosten. Letztere besitzen insbesondere im Bereich von Brennstoffzellen für Qualitätsuntersuchungen eine übergeordnete Bedeutung, da im Falle von Schadstoffuntersuchungen die eingesetzten Test- bzw. Sensorzellen selber ein Verbrauchsmittel darstellen und fortlaufend erneuert werden müssen.

Ableitet aus den beschriebenen Applikationsmöglichkeiten der in diesem Vorhaben erzielten Ergebnisse werden vom Zentrum für Brennstoffzellentechnik derzeit drei Folgeprojekte konkretisiert:

- Entwicklung eines Brennstoffzellen-Akku-Hybridsystems für portable Anwendungen: ZIM Vorhaben mit Gramm Technik & Schwind Elektronik
- Entwicklung einer Prozessführung zur Erzeugung von definierter Metallstrukturen auf 3D-gedruckten Kunststoffbauteilen am Beispiel von Sensorbrennstoffzellen: IGF Vorhaben mit dem Karlsruher Institut für Technologie und dem Forschungsinstitut für Edelmetalle und Metallchemie
- Entwicklung eines autarken Sensorbrennstoffzellensystems für die Materialqualifizierung und Wasserstoffreinheitsüberwachung für Brennstoffzellenapplikationen: INNO-KOM Vorhaben Modul VF

5) Zusammenstellung aller erfolgten bzw. geplanten Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Projektes wurden und werden fortlaufend veröffentlicht. Das Interesse an den Ergebnissen insbesondere in Bezug auf die Eignung von 3D-Druck Erzeugnisse innerhalb von Brennstoffzellensystemen ist bei der Industrie so hoch, dass an der Thematik auch nach Projektabschluss weitergearbeitet und entwickelt wird, sodass die Projektergebnisse auch in den nächsten Jahren immer wieder als Basisarbeiten präsentiert werden. Folgende Veröffentlichungen erfolgen während des Projektverlaufes bzw. kurz nach Abschluss des Projektes:

- Artikel „Speeddating für Brennstoffzellen - Entwicklung von standardisierten Qualifizierungsmethoden für den Einsatz von Kunststoffen bei innovativen Antriebstechnologien“ in der Zeitschrift *Kunststoffe* (10.03.2020)
- Austausch mit dem Gramm Technik GmbH über die Erzeugung metallischer Schichten auf 3D-Druck Komponenten zur Erfassung von Spannungssignalen – Treffen am ZBT (23.07.2020)
- Austausch mit dem Schwind Elektronik über den Einsatz von 3D-Druck Komponenten und Leiterplatten innerhalb der Brennstoffzellentechnik – Treffen am ZBT (2.10.2020)
- Entwicklung und Einsatz von Portablen Brennstoffzellen – Vortrag der Projektergebnisse beim Verein für Lebens Langes Lernen e.V. im Sommersemester 2021 der UDE (05.07.2021)
- Austausch über definierte Oberflächenbearbeitung von 3D-Druck Erzeugnissen für künftige Gehäuseentwicklungen mit dem Institut für Mikrostrukturtechnik des Karlsruher Instituts für Technologie– GoToMeeting Videokonferenz (29.11.2021)
- Austausch über metallische Oberflächenveredelung von 3D-Druck Erzeugnissen für künftige Gehäuseentwicklungen mit dem Forschungsinstitut für Edelmetalle und Metallchemie – GoToMeeting Videokonferenz (16.12.2021)
- VDI Seminar: Crashkurs Brennstoffzellensysteme - Anforderungen an Systemkomponenten (Pumpen, Kompressoren, Ventile etc.) (08.-09.02.2022)