

# Abschlussbericht BWPLUS

## BasicBZ - Entwicklung eines portablen Brennstoffzellen- Stromerzeugers für kleingewerbliche und private Anwendungen

von

Marcus Schilling, Mark Bittmann, Markus Jenne

IGT Industrie GasE Technik GmbH,  
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg (ZSW)

Förderkennzeichen: BW ZPH2 22136 - 137

Laufzeit: 01. Januar 2022 bis 30. November 2024

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

Januar 2025



**Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

## Kurzfassung

Neben Klimaschutz, CO<sub>2</sub>-Neutralität und Ressourceneffizienz ist für die nachhaltige Akzeptanz von Wasserstoff die Verbesserung der Wirkungsgrade in der Erzeugungs- und Verbrauchskette ein unabdingbarer Baustein. Fahrzeuge, stationäre und portable Anwendungen mit wasserstoff-betriebenen Brennstoffzellen (BZ) sind dauerhaft mit regenerativer Energie betreibbar und weisen eine hohe Effizienz auf.

Im Projekt BasicBZ wurden mehrere Funktionsmuster eines kleinen, leichten und portablen Brennstoffzellen-Stromerzeugers mit dem Brennstoff Wasserstoff entwickelt. Der Stromerzeuger wurde vor Allem für die sichere Nutzung durch Anwender im Baustellengewerbe, Anlagenbau, Handwerk und im Privatbereich ausgelegt. Die Einsatzorte sind netzferne Gebäude, Baustellen oder sonstige Orte ohne Zugang zum Stromversorgungsnetz. Der Schwerpunkt der Entwicklung lag auf einem möglichst einfachen und robusten Systemaufbau sowie der einfachen Bedienung des Stromerzeugers.

Für eine weitere Neuheit, das Brennstoff-Versorgungskonzept mit grünem und regional erzeugtem Druckwasserstoff in Austauschflaschen, wurde die Erfahrung von IGT beim Befüllen und Vertrieb technischer Gase genutzt. Zugelassene Druckflaschen mit fix verbauten Armaturen und verwechslungssicheren, steckbaren Verbindungen wurden entwickelt und umgesetzt. Im Endausbau soll die Versorgung flächendeckend werden, z.B. mit Wasserstoff aus der gerade im Ausbau befindlichen Elektrolyse-Erzeugungsanlage in unmittelbarer Nähe des Partners IGT.

Der technische Ansatz des Brennstoffzellensystems war, auf Subsysteme wie Befeuchtung, Wasserkühlung und Anodenrezirkulation zu verzichten und somit Gewicht, Kosten und Baugröße einzusparen, wurde erfolgreich umgesetzt. Eine BZ-Stackentwicklung am ZSW sollte die Basis für eine komplette Wertschöpfungskette innerhalb Baden-Württembergs bieten, hat aber trotz umfangreicher Bemühungen noch Bedarf zur Fertigstellung. In den Funktionsmustern wurden deshalb kommerziell verfügbare BZ-Stacke eingesetzt.

Das Ziel des Projekts, aus den Erfahrungen im Testbetrieb der Funktionsmuster auch im Feld eine praktisch umsetzbare Vorlage für eine nachfolgende Kleinserienproduktion von Brennstoffzellen-Stromerzeugern zu schaffen, wurde erreicht.

# Inhalt

Kurzfassung.....	ii
Inhalt.....	iii
Abbildungsverzeichnis.....	iv
Tabellenverzeichnis.....	v
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	1
1.3 Vorgehen.....	1
2 Brennstoffzellen-Systementwicklung.....	4
2.1 Sicherheitsbetrachtungen: Risikoanalysen FMEA und HAZOP.....	5
2.2 Systemarchitektur und Sicherheitskonzept.....	7
2.3 Umsetzung in Funktionsmustern.....	10
2.4 Bedienung und Steuerung.....	12
3 Brennstoffzellen-Stapelentwicklung.....	14
3.1 Beispiel Kathodenkonzept.....	15
3.2 Resultierendes Zell- und Stapelkonzept.....	18
4 Konzept H <sub>2</sub> -Druckflaschenversorgung.....	21
4.1 Auslegung und Beschaffung.....	21
4.2 Ergebnisse.....	21
5 Testbetrieb und Anwendung.....	23
6 Zusammenfassung.....	27
7 Verwertung.....	28
8 Ausblick.....	29
Anhang.....	A

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Subsysteme eines portablen Brennstoffzellen-Energiesystems. ....	4
Abbildung 2.2 erarbeitetes Vorgehen zur Risikobeurteilung .....	6
Abbildung 2.3 Ergebnis der HAZOP-Analyse vor Maßnahmen .....	6
Abbildung 2.4 Ergebnis der HAZOP-Analyse nach Maßnahmen.....	6
Abbildung 2.5 erarbeitetes elektrisches Verfahrensfliessbild, Funktionsmuster 1 .....	8
Abbildung 2.6 erarbeitetes Verfahrenstechnisches Fließbild, Funktionsmuster 1 .....	9
Abbildung 2.7 BZ-Stack mit 3D-gedruckten Anbauteilen und Sensorik/Aktorik .....	10
Abbildung 2.8 BasicBZ, innerer Aufbau Funktionsmuster-Systeme.....	11
Abbildung 2.9 BasicBZ, Schnittstellen und Bedienung Funktionsmuster-Systeme.....	11
Abbildung 2.10 Screenshot der Benutzeroberfläche der Webvisualisierung im Browser .....	12
Abbildung 2.11 Screenshot der Parametrieroberfläche der Webvisualisierung .....	13
Abbildung 3.1 typische Geometrien für Gasverteilerstrukturen .....	14
Abbildung 3.2 : Geschwindigkeit Luft am Austritt der Strömungsrohre .....	18
Abbildung 3.3 : Explosionszeichnung einer Zelle.....	18
Abbildung 3.4 : H <sub>2</sub> -Strömungsführung der entwickelten 3D-gedruckten Bipolarplatten .....	19
Abbildung 3.5 : Explosionszeichnung eines Stacks mit 2 Zellen.....	19
Abbildung 3.6 : Stapelkonzept inklusive Luftzufuhr mittels Niederdrucklüftern .....	20
Abbildung 3.7 : realisierter 5-Zellen-BZ-Stapel nach BasicBZ-Konzept.....	20
Abbildung 3.6: Wechselflaschen für den Einsatz .....	22
Abbildung 5.1 Funktionstest mit hoher Umgebungstemperatur .....	23
Abbildung 5.2 Datenverlauf zum Funktionstest mit hoher Umgebungstemperatur .....	24
Abbildung 5.3 BasicBZ-System am Herbstfest des botanischen Gartens Ulm, 6.10.24 .....	25
Abbildung 5.4 mobile Werkstatt von IGT mit integriertem BasicBZ-System und PV.....	26
Abbildung 8.1 Vorrichtung zur plastischen Verformung von Trennblechen .....	29

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Auszug aus „elektrische Eigenschaften“, Lastenheft BasicBZ .....	2
Tabelle 1.2: Auszug „Umgebungs- und Betriebsbedingungen“, Lastenheft BasicBZ .....	2
Tabelle 2.1: Auszug aus Analyse der Anforderungen der DIN EN IEC 62282-5-100 .....	5
Tabelle 3.1 Konzeptübersicht Kathode: Strangpressprofil .....	15
Tabelle 3.2 Konzeptübersicht Kathode: 3D-Druck .....	15
Tabelle 3.3 Konzeptübersicht Kathode: Rohrwabenprofil .....	16
Tabelle 3.4 Konzeptübersicht Kathode: Blech .....	16
Tabelle 3.5 Konzeptübersicht Kathode: Streckmetall.....	16
Tabelle 4.1 Reichweitenauslegung BasicBZ-System für Stack 1020ACS .....	21
Tabelle 6.1 Zielerreichung der Projektaufgaben zum Projektabschluss .....	27



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Herkömmliche portable Stromerzeuger werden größtenteils mit fossilen Brennstoffen betrieben und erzeugen durch den Betrieb einer Verbrennungskraftmaschine eine starke Geräuschkulisse und giftige Abgase. Deren Anwendung ist durch die entstehenden Abgase in geschlossenen Räumen oder Tunnels nur sehr eingeschränkt möglich.

Bisher kommerziell verfügbare, wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Stromerzeuger werden für den stationären Betrieb, den Betrieb als unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) oder im industriellen Umfeld eingesetzt. Der Leistungsbereich liegt typischerweise in Modulen  $>2000\text{W}$ . Portable Brennstoffzellensysteme für Methanolbetrieb sind im kleinen Leistungsbereich ( $<500\text{W}$ , vgl. <https://www.sfc.com/produkte/>), immer in Kombination mit einer Fahrzeugbatterie als „Ladegerät“, etabliert, werden aber in höheren Leistungsklassen durch die hohe Platin-Beladung der Elektroden kostenintensiv. Die genannten größeren Systeme sind verfahrenstechnisch recht aufwändig und kaum rentabel im Bereich von  $500\text{-}1000\text{W}$  herstell- und betreibbar.

Die bestehende Lücke, gerade für netzferne Einsatzorte und ohne die Notwendigkeit einer aufwändigen USV-Leistungselektronik oder verfahrenstechnischen Systemarchitektur, sollte durch die im Projekt entwickelte, einfache, leise und saubere Brennstoffzellen-Stromerzeuger ‚BasicBZ‘ geschlossen werden.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel des Projekts war es, einen Brennstoffzellen-Stromerzeuger im Bereich von  $500\text{ W}$  elektrischer Dauer(-netto)leistung zu entwickeln, der durch seine einfache Bedienung die Kommerzialisierung im Sektor Privatverbraucher und Kleingewerbe möglich macht. Das Thema Wasserstoff wird in der breiten Bevölkerung häufig als akademische Lösung für eine ferne Zukunft angesehen. Durch den einfachen, leisen und nicht gesundheitsgefährdenden Betrieb des Brennstoffzellen-Stromerzeugers wird dem Anwender die zeitlich unabhängige Verwendung von erneuerbaren Energie in Form von Wasserstoff spürbar positiv dargestellt. Die Anwendung im Privatbereich und im Kleingewerbe macht das Thema für eine breite Bevölkerungsgruppe anwendbar.

## 1.3 Vorgehen

Um das Gerät möglichst einfach zu halten, wurde die Anpassung eines am ZSW vorhandenen Stackdesigns für den luftgekühlten Betrieb eingeplant, aber im ersten Projekthabjahr, nach Rücksprache mit dem PTKA, auf eine Neukonstruktion des Stapels umgeschwenkt. Das thermische Management durch eine Flüssigkeitskühlung hätte nicht unerheblichen Instrumentierungs- und Wartungsaufwand zur Folge gehabt. Die Schnittstellen zwischen Betreiber und Stromerzeugungsgerät wurden möglichst einfach gestaltet.

In einem Lastenheft wurden zu Beginn des Projektes die konkreten technischen Anforderungen für die Funktionsmuster sowie, als vorläufigen Ausblick, für ein späteres Produkt gemeinsam von den Projektpartnern festgelegt. Die folgenden Auszüge geben eine Übersicht:

**Tabelle 1.1: Auszug aus „elektrische Eigenschaften“, Lastenheft BasicBZ**

Anforderung	Beschreibung der Anforderung	Funktionsmuster	Produkt
Nennausgangsleistung	Die vom Stromerzeuger kontinuierlich verfügbare maximale Leistung	400-500 W	600 W
Einschaltkriterien	Kenngößen, welche zur Einschaltung der Brennstoffzelle relevant sind	zzgl. manueller Start	Batterie-spannung
Abschaltkriterien	Kenngößen, welche zur Abschaltung der Brennstoffzelle relevant sind	zzgl. manueller Stop	Batterie-spannung
Nennausgangsspannung	CEE („Schuko“) Steckdosen, ohne Potentialausgleich gemäß DGUV 202-032	2 x 230V DGUV 202-032, 5.1	230V (12 V optional)
Extremwerte Versorgungsspannung	mögliche Versorgungsspannung am System (mögliche Überspannung von Batterieseite)	10 – 16 V DC	10 V – 16 V DC
Batterie- / Akkutyp	Anschließbare Akkutypen	Blei-Säure, Blei-Gel	Blei-Säure, Blei-Gel, AGM, LiFe
Eigenverbrauch im Betrieb	Leistungsverbrauch System unter Volllast	<< 150 Wel @500W	TBD

**Tabelle 1.2: Auszug „Umgebungs- und Betriebsbedingungen“, Lastenheft BasicBZ**

Anforderung	Beschreibung der Anforderung	Funktionsmuster	Produkt
Betriebstemperatur	Der T-Bereich, bei welchem das System ohne Einschränkung funktionieren muss (einschließlich Betriebsstoff und Akku).	-10°C bis +40°C BZ-Stack: -10°C bis +52°C	-20°C bis +50°C
Installations-/ Starttemperatur	Der T-Bereich, bei welchem das System ohne Einschränkung starten muss bei angeschlossenen Betriebsstoff und Akku.	-10°C bis +40°C	-20°C bis +50°C
Lagertemperatur	Lagerung des Systems ohne angeschlossenen Betriebsstoff und ohne Akku	0°C bis +50°C	0°C bis +70°C
...	...	...	...
IP-Schutzklasse	Schutz von System gegen potentielle Gefährdung bei deren Benutzung	IP 10	IP 22
Staubbelastung (Mensch/Umwelt)	Der Stromerzeuger muss auch unter rauen Umgebungsbedingungen betriebsbereit bleiben (für Baustellenanwendung)	wechselbare automotive Luftfilter	Auslegung für erhöhte Staubbelastung
Lageunabhängigkeit Betrieb	Bei bestimmungsgemäßer Betriebsposition muss das System kontinuierlich betreibbar sein.	Ziel: Berücksichtigung	Neigung max. 45°



Die Gasversorgung des Brennstoffzellen-Stromerzeugers mit Wasserstoff wird mittels optimierter Druckgasflaschen dargestellt. Die Druckgasflaschen sind mit einer zertifizierten und verwechslungssicheren Schnellverschluss-Kupplung ausgerüstet, auf die der voreingestellte Druckregler mit Druckanzeige-Manometer (jedem BasicBZ-System beigelegt) durch den Benutzer aufgesteckt wird.

Die Versorgung mit Wasserstoff erfolgt über einen Tausch der Druckgasflasche. Für die (später flächendeckende) Versorgung mit Flaschenwasserstoff wird die Erfahrung des Koordinators IGT beim Vertrieb technischer Gase genutzt. Die Lösung gleicht dem heutigen Vertrieb von, an jeder Tankstelle und Baumarkt erhältlichen Flüssiggasflaschen und kommt ohne spezielle Vorkenntnisse und Werkzeug aus.

Durch die einfache Handhabung wird dem Anwender das Thema Wasserstoff und Brennstoffzelle leicht begreiflich zur Verfügung gestellt. Die Druckgasflasche soll mittelfristig beim ‚Gasversorger um die Ecke‘ getauscht werden können. Auch andere Anwendungen sind mit diesem System versorgbar.

Für den Anspruch der dauerhaften Stromversorgung ist ein Akkumulator integriert, der die Zeit des Gasflaschen-Wechsels und kurzfristige Spitzenleistungen überbrückt.

#### *Bedienung des Stromerzeugers*

Die Bedienung des Brennstoffzellen-Stromerzeugers beschränkt sich auf den Brennstoffanschluss und das Ein- und Ausschalten. Die automatisierte Steuerung des Geräts übernimmt alle notwendigen Vorgänge zum Betrieb. Die Rückmeldungen an den Betreiber sind reduziert auf eine Betriebsanzeige und die Meldung eines etwaigen Fehlers. Für den interessierten Betreiber ist die Anzeige des internen Betriebszustandes via Browser eines PCs/Notebooks via USB möglich.

#### *Anbindung der Stromverbraucher*

Die Verbindung der Stromverbraucher findet über handelsübliche Schutzkontakt-Steckdosen bei (230VAC) statt. Der Anwender kann seine Verbraucher wie gewohnt einstecken und wird bei dauerhafter Überlastung des Stromerzeugers auf mögliche Unterbrechungen hingewiesen.

#### *Versorgungssicherheit und –dauer*

Das Brennstoffzellen-Stromversorgungs-Gerät bringt pro Druckgasflasche eine Versorgungssicherheit (bei Volllast!) von mindestens 10h. Die Versorgungsdauer wird durch Wechsel der Druckgasflaschen multipliziert. Durch die integrierte Sicherheitsüberwachung des Systems ist laut durchgeführter Risikobewertung ein Betrieb auch innerhalb geschlossener (belüfteter und ausreichend großer) Räume möglich. Die geplante wird die konkret möglichen Einsatzbereiche ergeben.

Das System wird leicht und portabel gestaltet. Ziel ist es, dass eine Person das System durch eigene Körperkraft zum Einsatzort transportieren kann.

## 2 Brennstoffzellen-Systementwicklung

Um einen Brennstoffzellen-Stapel (engl.: Stack) sicher und zuverlässig betreiben zu können, sind etliche Komponenten notwendig. Die DIN IEC 62282-1-100 portable Brennstoffzellensystem definiert die in folgender Grafik aufgeführten Subsysteme, die je nach Brennstoffart und Anwendung in ein portables Brennstoffzellen-System integriert sein können.

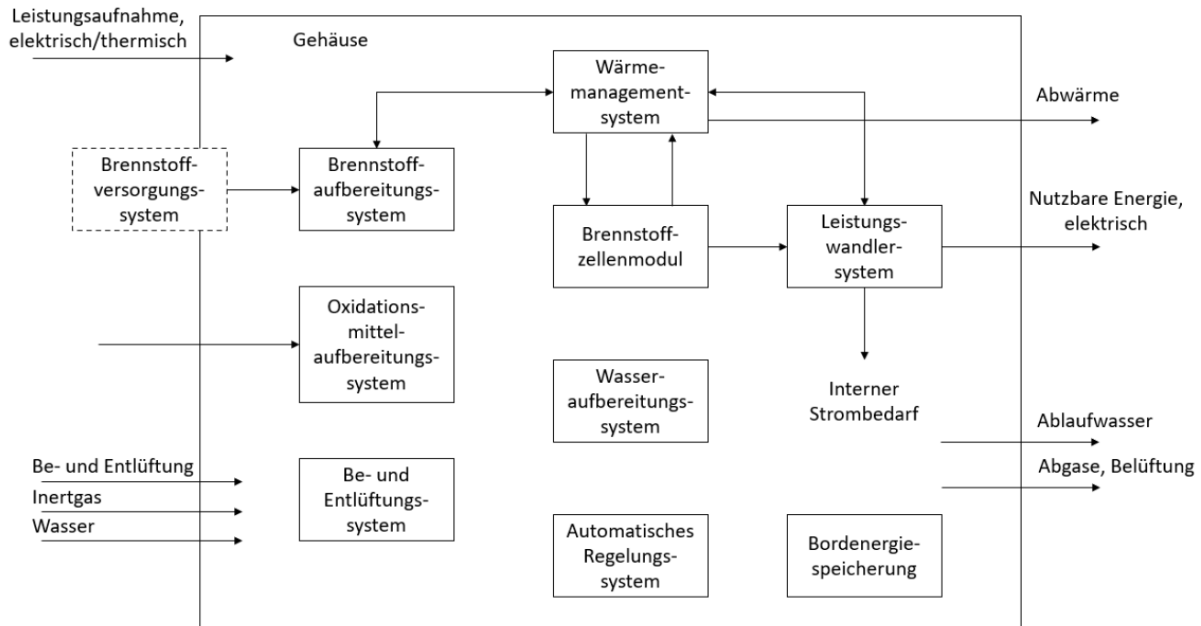


Abbildung 2.1 Subsysteme eines portablen Brennstoffzellen-Energiesystems.

Quelle: eigene Darstellung an Anlehnung an DIN EN IEC 62282-5-100

2020 wurden etwa 4.000 portable Brennstoffzellensysteme (an Kunden ausgeliefert). Vor allem die Firma SFC Energy ist in diesem Bereich führend. In 20 Jahren Firmenbestehen wurden von SFC Energy etwa 45.000 Einheiten verkauft, einige davon als Ladegeräte für Freizeitwecke oder auch dezentrale Netzteile, teilweise für militärische Zwecke. Die meisten SFC-Systeme haben eine Ausgangsleistung von 100-150WDC und werden als Batterieladegeräte – ohne Wechselstrom-Ausgang für den Benutzer – eingesetzt.

Für das BasicBZ-System wurden die folgenden Subsysteme (vgl. Abbildung 2.1) definiert:

- Brennstoffversorgungssystem (Gasflasche, Druckkontrolle, *keine* Aufbereitung)
- Oxidationsmittelsystem (Prozessluftzufuhr für BZ-Stack, Luftfilter, Luftheizer)
- Be- und Entlüftungssystem (Gehäuselüfter)
- Wärmemanagementsystem (Kühlluft = Prozessluft, Temperaturregelung)
- Brennstoffzellenmodul (PEM-Zellenstapel)
- Automatisches Regelungssystem (Industriesteuerung SPS)
- Bord-Energiespeicherung (Bleiakku)
- Leistungswandlersystem (DC-AC-Wechselrichter, *kein* DC-DC-Gleichrichter)

## 2.1 Sicherheitsbetrachtungen: Risikoanalysen FMEA und HAZOP

Eine Recherche ergab, dass durch die Einhaltung der DIN EN IEC 62282-5-100 „Portable Brennstoffzellen-Energiesysteme-Sicherheit“ und die Verwendung konformer Komponenten die relevanten europäischen Richtlinien für ihren Inverkehrbringen im europäischen Markt (Niederspannung, Druckgeräte, EMV, ATEX, REACH) weitestgehend erfüllt werden.

Die Analyse der Anforderungen der DIN EN IEC 62282-5-100 ergab, dass als Teil des Sicherheitskonzeptes eine vollständige Risikobeurteilung gefordert wird:

Tabelle 2.1: Auszug aus Analyse der Anforderungen der DIN EN IEC 62282-5-100

Kategorie	Anforderungen	Verweise	erfüllt?
<b>4 Anforderungen an Auslegung und Konstruktion</b>			
<b>4.11 Gefährdungs- und Risikobewertung</b>			
<b>4.11.1 Allgemeine Anforderungen an die Gefährdungs- und Risikobewertung</b>			
gesamtes portable Brennstoffzellen-System	a) <b>Identifizierung</b> aller während der vorgesehenen Lebensdauer vorhersehbaren <b>Gefährdungen</b> , Gefährdungssituationen und Gefährdungsereignisse		
	b) <b>Abschätzung</b> des Risikos für jede dieser Gefährdungen - Kombination der <b>Wahrscheinlichkeit</b> des Eintretens der Gefährdung und des vorhersehbaren <b>Schweregrades</b> nach IEC 61882 und IEC 61511-3 oder vergl. Verfahren	IEC 61882 und IEC 61511-3	
	c) Beseitigung der beiden <b>Einflussgrößen</b> (Wahrscheinlichkeit und Schweregrad) durch die <b>Konstruktion</b> - oder zumindest Reduzierung so weit wie möglich (inhärent sichere Auslegung und Konstruktion)		
	d) notwendigen <b>Schutzmaßnahmen</b> bezüglich Risiken treffen, die nicht beseitigt wurden (Bereitstellung von Warn- und Sicherheitseinrichtungen)		
	e) Informierung der <b>Benutzer</b> über jegliche zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen, die sie gegebenenfalls umzusetzen haben		
<b>4.11.2 Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse</b>			
	Nachweis, dass erforderliche <b>Schutzmaßnahmen</b> in Bezug auf Risiken, die nicht eliminiert wurden, durch Durchführung einer Sicherheits- und <b>Zuverlässigkeitsanalyse</b> ergriffen wurden (nach IEC 60812, IEC 61025 oder Vergleichbarem) -um Ausfälle mit erheblichen Folgen für die Sicherheit des Systems zu erkennen	IEC 60812 und IEC 61025	

Gemäß den Vorgaben wurden die Methoden evaluiert und Risikoanalysen durchgeführt.

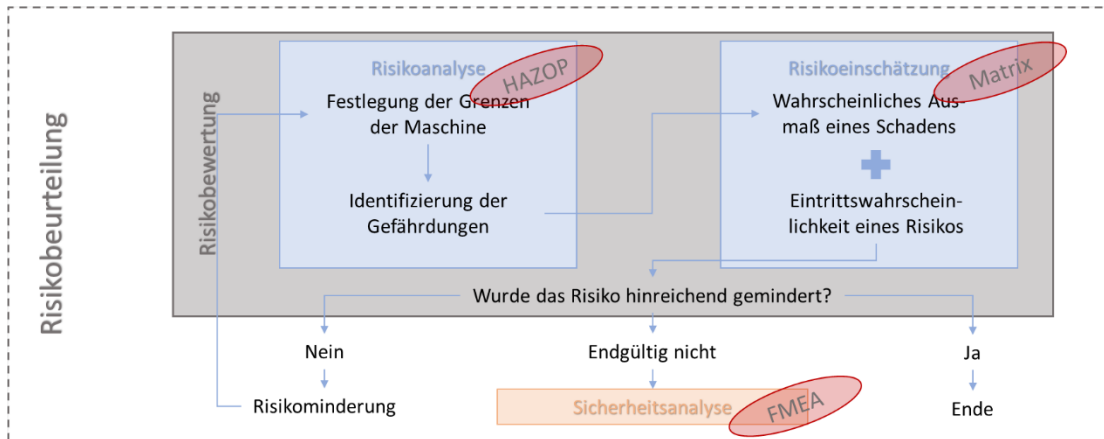


Abbildung 2.2 erarbeitetes Vorgehen zur Risikobeurteilung

Zur Risikoeinschätzung wurde die Risikomatrix nach DIN EN 61511-3 herangezogen.

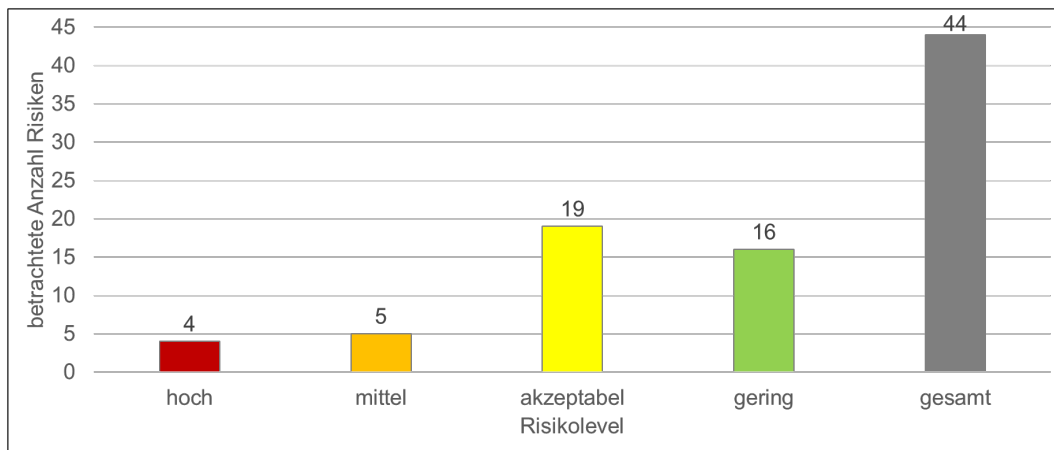


Abbildung 2.3 Ergebnis der HAZOP-Analyse vor Maßnahmen

Bereits durch die nach HAZOP-Analyse gewählten Maßnahmen wurde ein akzeptables Risikolevel erreicht:

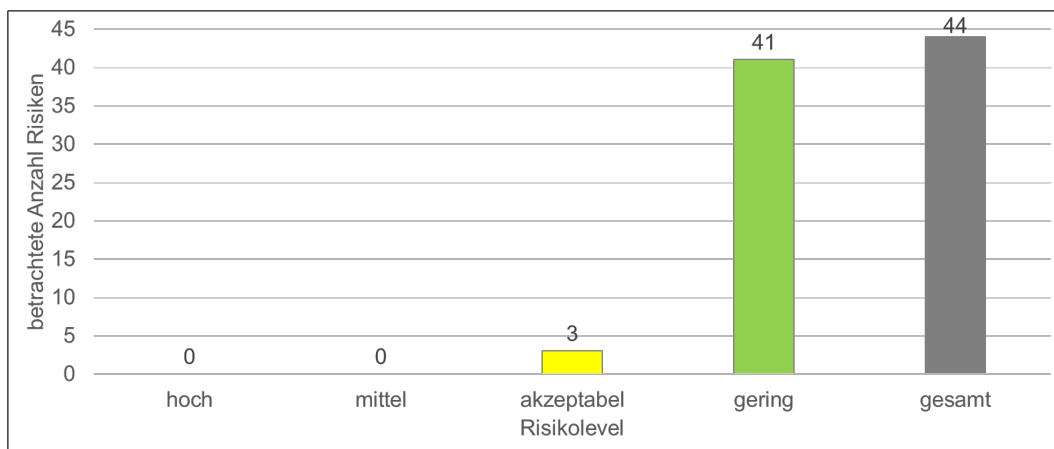


Abbildung 2.4 Ergebnis der HAZOP-Analyse nach Maßnahmen

Weiterhin wurde das notwendige Vorgehen für die Zertifizierung und Inverkehrbringen des Produkts recherchiert. Da das Brennstoffzellensystem BasicBZ nicht unter die Druckgeräterichtlinie fällt (Drücke < 0,5 bar<sub>g</sub> bzw. Druck-Volumen-Produkt auf

Versorgungsseite unterhalb 50 bar x Liter) kann die Zertifizierung und Konformitätserklärung ohne eine zugelassene Überwachungsstelle (ZüS) durch den Hersteller erfolgen. Voraussetzungen sind bestandene Prüfungen nach DIN EN IEC 62282-5-100, die Verwendung CE-konformer Einzelkomponenten und die Ausarbeitung einer den Anforderungen genügenden Dokumentation. Gefordert sind:

1. Anleitung für den Zusammenbau,
2. Anleitung für die Installation,
3. Anleitung für die Wartung und die Gebrauchsdauer,
4. Warnhinweise,
5. Gebrauchs- und Bedienungsanleitung,
6. Angaben zur Beseitigung und
7. alle sonstigen produktbezogenen Angaben (vgl. § 3 Abs. 2 ProdSG)

Die oben gezeigten Ergebnisse der Risikobeurteilung bestimmten das übergreifende Sicherheitskonzept und damit die ausgearbeitete Systemarchitektur.

## 2.2 Systemarchitektur und Sicherheitskonzept

Für einen portablen Stromerzeuger werden Hardwarekomponenten benötigt, die einen Rahmen an Anforderungen erfüllen müssen. Dies betrifft vor allem die Aspekte der Sicherheit und Effizienz. Aber auch die Baugröße spielt für das System eine entscheidende Rolle. Anschließend werden einige Anforderungen vorgestellt. Eine Tabelle mit allen Anforderungen aus dem Lastenheft befinden sich im Anhang.

Obwohl die BasicBZ-Konzipierung eine Trennung von Gasführung und Elektronik vorsieht, muss jede Komponente im Hinblick auf die Verwendung in einer explosionsgefährdeten Umgebung geprüft werden. Die Anforderungen an elektrische Betriebsmittel für derartige Bereiche sind vielfältig. Um eine hohe Sicherheit zu gewährleisten, bieten nationale und internationale Bestimmungen, Richtlinien und Normen einen Rahmen, den es einzuhalten gilt. Werden keine explizit für ATEX (Atmosphäre Explosive) gekennzeichnete Geräte verbaut, müssen unbedingt alternative Maßnahmen ergriffen werden, um eine Explosion und einen damit verbundenen Personen- und Materialschäden zu vermeiden. [J. M. Mario Gabrielli Cossellu, „ATEX 2014/34/EU Leitlinien,“ Europäischen Kommission, 2020] Dies beinhaltet im vorliegenden Fall eine Überwachung der unteren Explosionsgrenze (UEG) und eine Abschaltung bei Überschreitung dieses Grenzwertes.

Die SPS muss einige Aufgaben erfüllen, die den stabilen Betrieb des Systems, aber auch eine Datenerfassung für den Benutzer beinhalten. So müssen diese Messwerte und Zustände erfassen und verarbeiten. Ein- und Ausgangssignale führen zum Steuern und Regeln von Aktoren und Prozessen. Weiterhin muss eine Schnittstelle zwischen dem Benutzer und dem Prozess bestehen. Einige Zustände und Messdaten sollen visualisiert werden. Während des Betriebs ist ein Protokoll zu führen, welches Ereignisse und Alarmer temporär abspeichert.

Ein Systemverhalten muss genau definiert sein. Alle Vorgänge und Abläufe, die einen genau bestimmten und erfassbaren Anfangs- und Endzustand aufweisen, werden zeitlich überwacht. Dies dient der Erkennung von auftretenden Störungen, welche physikalisch nicht erfasst werden können. Eine derartige Überwachung dient dem Schutz der Aktoren und des Benutzers. Eine Störung sollte daher immer zu einem Stopp der betroffenen Einrichtung führen.

Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Randbedingungen und des Lastenhefts wurden die folgenden Systemarchitektur erarbeitet:

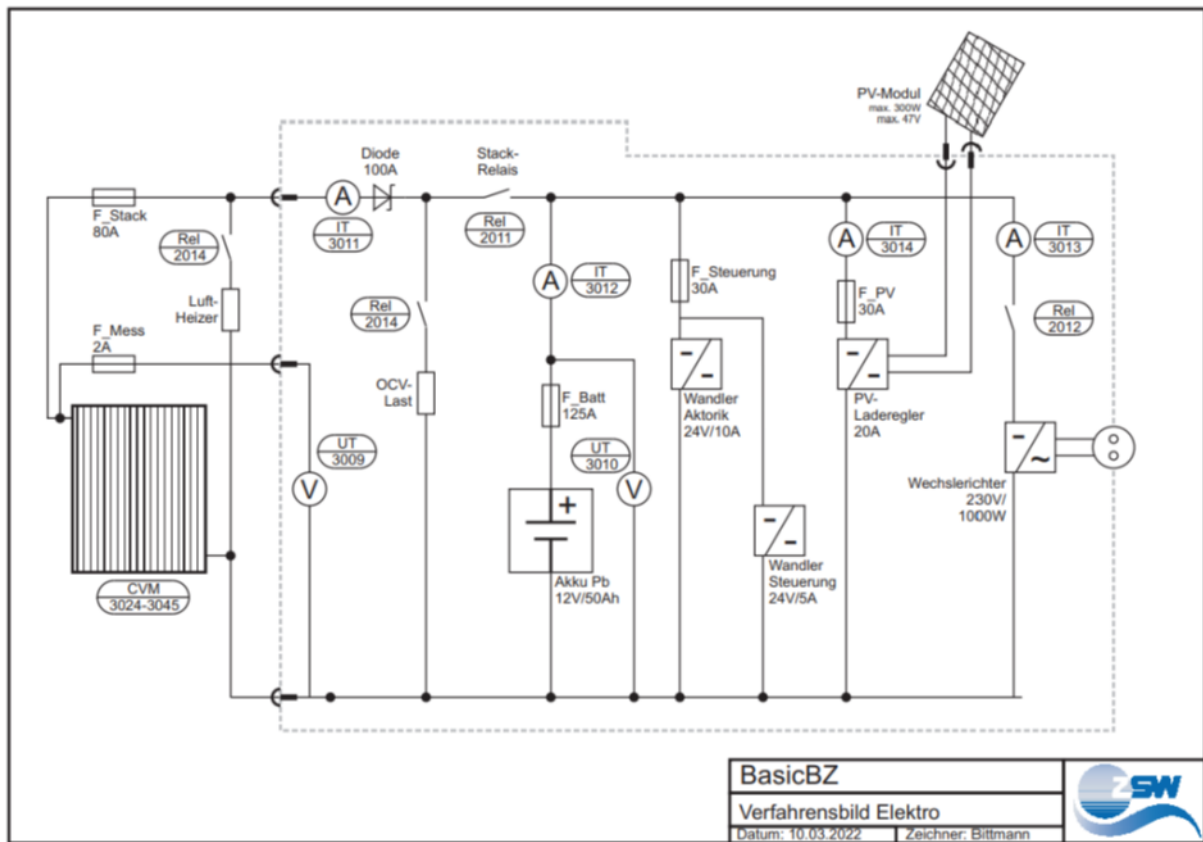


Abbildung 2.5 erarbeitetes elektrisches Verfahrensfliessbild, Funktionsmuster 1

Auf der linken Seite zeigt die Abbildung 2.5 den Brennstoffzellenstapel (Stack) mit der dazugehörigen Zellspannungserfassung (CVM3024-3045). Alle mit „F“ gekennzeichneten Bauteile stellen Sicherungen dar. Es folgt die Diode, die einen Rückstrom von der Batterie zum Stack verhindert und eine Stackstrommessung (IT3011). Das Stackrelais (REL2011) trennt bzw. verbindet den Stack mit dem restlichen System. Der Luftvorheizer erwärmt die angesaugte Luft, wenn die Umgebungstemperatur unter einen Grenzwert sinkt und wird durch ein weiteres Relais (REL2014) zugeschaltet. Die Open-Circuit-Voltage-Last (kurz: OCV-Last) dient dem Zellspannungsabbau bei Abschaltung des Systems. Längere Phasen mit anstehender hoher OCV-Spannung schädigen die Elektroden, weshalb diese Maßnahme lebensdauerverringend wirkt. Die OCV-Last (ein el. Widerstand) wird mit einem Relais (REL2013) bei Bedarf zuschalten. Der Zustand der 12V, 50Ah Bleibatterie wird durch die Strom-(IT3012) und Spannungsmessung (UT3010) überprüft. Alle Aktoren werden mit 24V von DC-DC-Wandlern kleiner Leistung versorgt. Im Verfahrensbild ist zu erkennen, dass zwei dieser Wandler verbaut sind. Optional kann ein PV-Modul ( $P=300\text{W}$ ,  $47\text{V}$ ) an das System angeschlossen werden, um den Wasserstoffverbrauch zu senken. Ein passender Laderegler wird im System verbaut. Der PV-Strom wird durch das Amperemeter (IT3014) gemessen. Zuletzt zeigt das Verfahrensbild „Elektro“ den Wechselrichter, der einen Anschluss von 230V Wechselstromgeräten mit max.  $1000\text{W}_{AC}$  ermöglicht. Der Laststrom wird in der Software erfasst (IT3013) und durch ein Relais (REL2012) geschaltet.

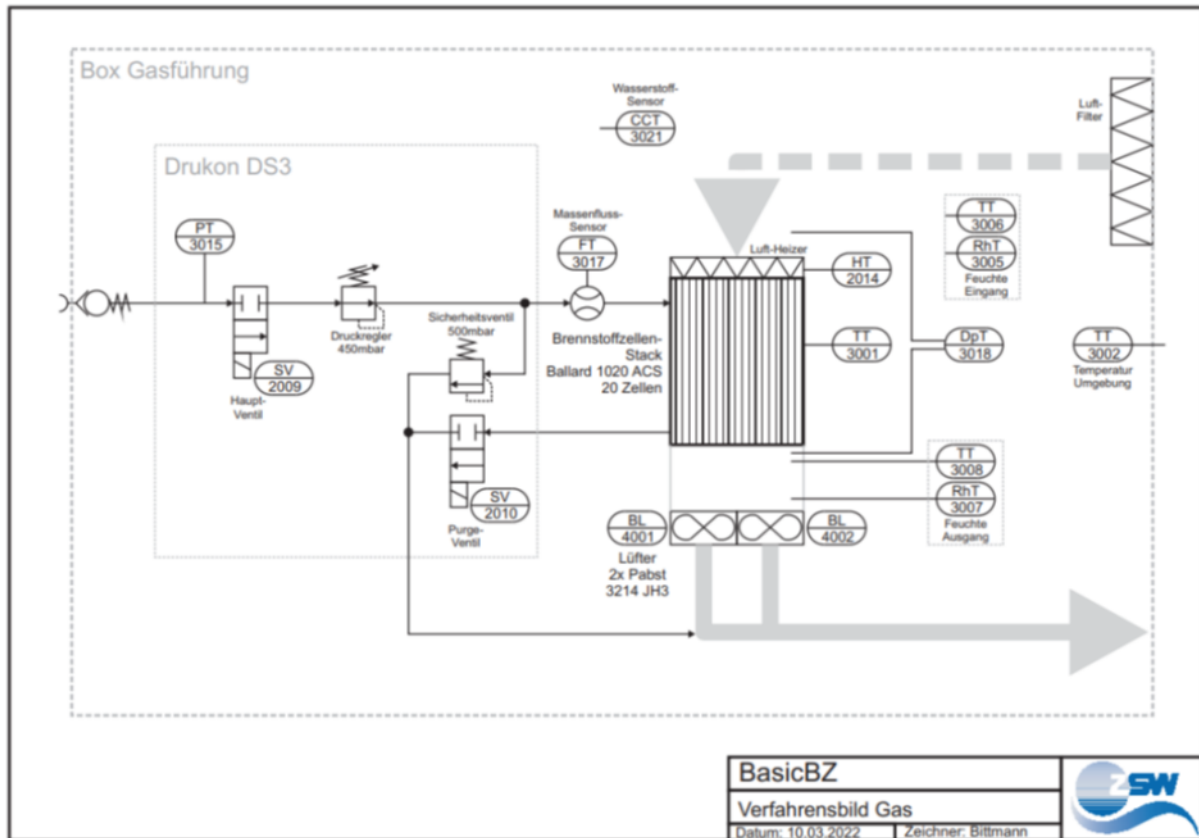


Abbildung 2.6 erarbeitetes Verfahrenstechnisches Fließbild, Funktionsmuster 1

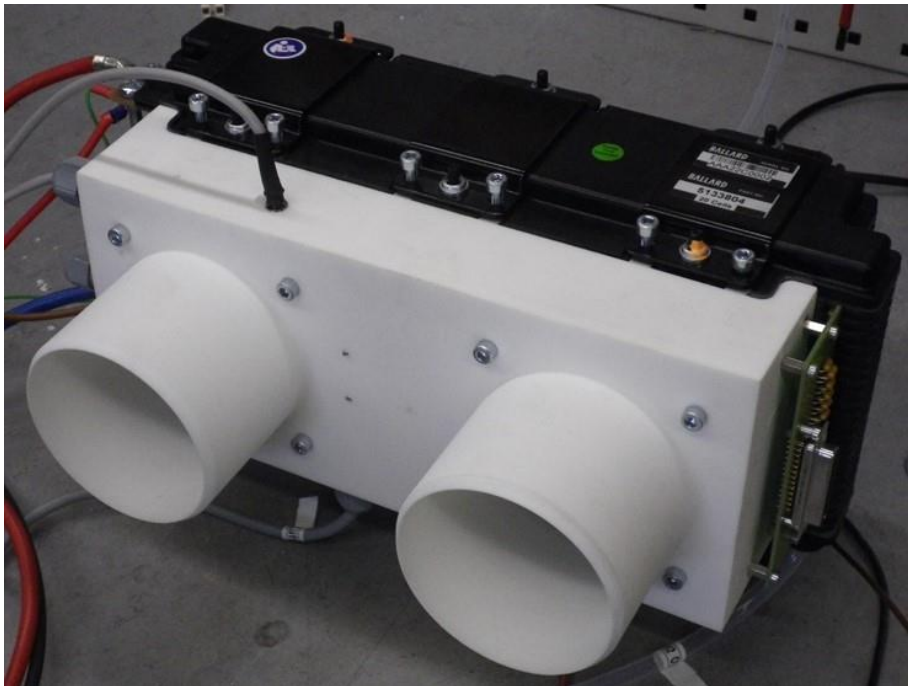
Das Verfahrensbild „Gas“ ist ähnlich aufgebaut, wie das vorangegangene Schaubild. Es zeigt die Gasführung des BasicBZ-Systems. Das Rückschlagventil auf der linken Seite verhindert einen Gasrückstrom hin zur Druckflasche. Es folgt eine Eingangsdruckmessung (PT3015) in Kombination mit der Druck-Kontrolleinheit „Drukcon DS3“ mit integriertem Haupt- (SV2009) und Purgeventil (SV2010). Des Weiteren befindet sich hier ein Druckregelventil, um den Eingangsdruck von 5 bar<sub>g</sub> auf etwa 0,45 bar<sub>g</sub> zu begrenzen. Ein Sicherheitsventil verhindert eine Beschädigung des Stacks bei Fehlfunktion des Druckregelventils und einen daraus resultierenden Überdruck (vgl. Abschnitt 2.1. Das sogenannte Purgeventil lässt beim regelmäßigen Purgevorgang Feuchte und kumulierte Inertgase von der Anodenseite in den Abgasstrang ab. Um ein übermäßiges Ablassen zu verhindern, wird softwareseitig die Funktion Ventils bei jedem Systemstart mit einer zu bestehenden Funktionsfolge überprüft. Der Massenflusssensor (FT3017) wird benötigt, um den Wasserstoffverbrauch unter verschiedenen Bedingungen zu messen und den daraus resultierenden Wirkungsgrad zu errechnen. Jegliche Leckagen am System werden durch den Wasserstoffsensoren (CCT3021) detektiert. Dieser ist ein Teil der Sicherheitskette. Ein Öffnen dieser, unabhängig von der Steuerung elektromechanisch ausgeführten Sicherheitskette, bestehend aus Not-Aus, H<sub>2</sub>-Sensor und Watchdogrelais zur Überprüfung der Steuerungsfunktion, führt zu einer sofortigen Abschaltung des Systems. Der Ballard Stack 1020ACS wird mit gefilterter Luft versorgt, welche durch die beiden Lüfter (BL4001, BL4002) angesaugt wird. Um optimale Bedingungen für den Stackbetrieb zu schaffen, wird beim Betrieb fortlaufend die Ansaugluft-(HT2014), Umgebungsluft-(TT3002), Stack-(TT3001) und Auslasslufttemperatur (TT3008) gemessen. Außerdem wird die Ein- (RhT3005) und Ausgangsfeuchte (RhT3007) ermittelt. Der Sensor (DpT3018) misst die Druckdifferenz zwischen Ein- und Ausgang des Stacks, um den Luftstrom zu ermitteln.

## 2.3 Umsetzung in Funktionsmustern

Die oben beschriebene Systemarchitektur wurde in einem ersten Funktionsmuster in den Werkstätten am ZSW umgesetzt. Umfangreiche Recherchen zu Komponenten und Subsystemen wurden in einer Stückliste zusammengefasst. Teilweise wurden mögliche Komponenten mehrfach in unterschiedlicher Ausführung bestellt und „auf dem Labortisch“ getestet, um eine zielführende Auswahl treffen zu können. Lieferverzögerungen einiger Hauptkomponenten (wie Steuerungszubehör) führten im Jahr 2022 zu ersten Verzögerungen im Projektablauf, waren aber dank der internationalen Lieferkettenthematik zu dieser Zeit nicht zu beschleunigen.

Benötigte Befestigungs- und strömungsführungs-Teile wurden konstruiert und auch mit dem aus Projektmitteln beschafften 3D-Drucker hergestellt.

Bei der Erstinbetriebnahme eines von einem externen Hersteller zugekauften Brennstoffzellen-Stapels (bereits mit einfacher Steuerung „auf dem Labortisch“) wurden bereits 3D-gedruckte Teile mit mehrfacher Funktion verwendet:



*Abbildung 2.7 BZ-Stack mit 3D-gedruckten Anbauteilen und Sensorik/Aktorik*

Die Funktionen der in Abbildung 2.7 zu sehenden gedruckten Einheit sind:

- Befestigung der Lüfter für Prozess- und Kühlluft des BZ-Stacks (innen)
- Strömungsführung: Ansaugen aus Umgebung durch den Stack nach außen
- Befestigung der Einzelzellspannungserfassung (rechts)
- Wasserstoff-Sensor zur Feststellung von Membranbruch oder zu hohem H<sub>2</sub>-Purgevolumen (oben links)

In einem ersten vollständigen Funktionsmuster wurde die aus dem Lastenheft und den Vorgaben des Sicherheitskonzepts folgende Systemarchitektur umgesetzt.



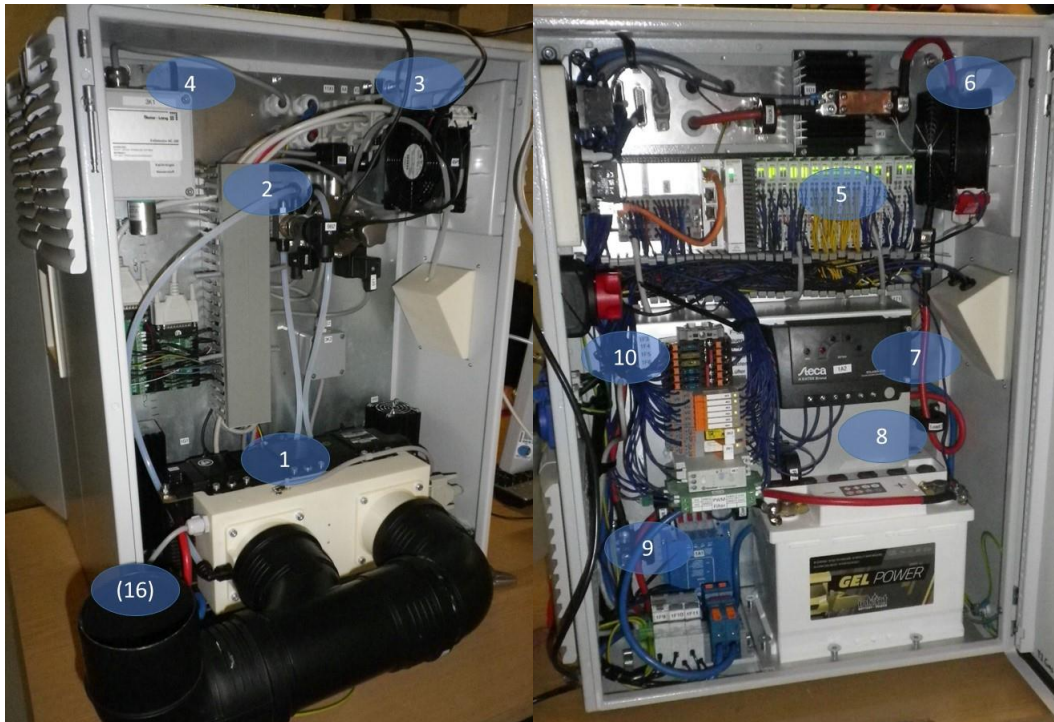


Abbildung 2.8 BasicBZ, innerer Aufbau Funktionsmuster-Systeme



Abbildung 2.9 BasicBZ, Schnittstellen und Bedienung Funktionsmuster-Systeme

Nr	Komponente / Subsystem	Nr	Komponente / Subsystem
1	BZ-Stack inklusive Luftzu-/Abfuhr	9	Fehlerstrom-Schutzschalter, Fuse
2	H <sub>2</sub> Managementeinheit	10	Hauptschalter *
3	Gehäuse Verfahrenstechnik Zuluft	11	Schnittstelle H <sub>2</sub> -Anschluss
4	Wasserstoff UEG-Sensor	12	Bedienpanel, 3D-gedruckt **
5	Steuerung SPS	13	Nutzersteckdose 230VAC
6	Gehäuse Elektronik Zuluft	14	Abluft Gehäuse Verfahrenstechnik
7	PV Laderegler	15	Abluft Gehäuse Elektronik
8	DC-AC-Wechselrichter	16	Schnittstelle Abluft

\* Hauptschalter beim ersten Funktionsmuster außen-, bei FuMu 2-5 innenliegend.

\*\* Funktionen Bedienpanel: Ein/Aus-Taster. Betriebsanzeigen. Not-Austaster. Ethernet-Schnittstelle für Datenvisualisierung und Programmierung. Hauptschalter (nur FuMu1)

Der innere Aufbau sieht die weitgehende Trennung der verfahrenstechnischen von der elektrischen Instrumentierung vor, was für die Funktionsmuster in zwei Schaltschrankgehäusen umgesetzt wurde. Links in Abbildung 2.8 und Abbildung 2.9 die Wasserstoff- und Luftdosierung, der BZ-Stapel und die notwendige Sensorik. Rechts die elektrischen Steuerungsbauteile, die Leistungselektronik und der Batteriespeicher.

Bei der Konstruktion wurde weniger auf ein Volumen- und Gewichtsoptimiertes Packaging, sondern mehr auf gute Zugänglichkeit und, gerade bei der Steuerung, auf möglichst umfangreiche Datenerfassung und Flexibilität Wert gelegt. Bei der Inbetriebnahme der ersten Stückzahlen bei Funktionsmustern kommt es aus Erfahrung zu Änderungsbedarfen, die ohne allzu großen Aufwand umgesetzt werden müssen.

Eine spätere Optimierung hinsichtlich Gewicht und Baugröße mit den Erfahrungen aus Inbetriebnahmen und Feldtests ist unabdingbar und erscheint mit vertretbarem Entwicklungsaufwand umsetzbar.

## 2.4 Bedienung und Steuerung

Der Einsatz des BasicBZ Systems als netzunabhängiger Stromversorger aus Wasserstoff ist, bei angeschlossener Brennstoffversorgung, über das Bedienpanel (vgl. Abbildung 2.9) möglich. Die Taster geben durch Dauerleuchten oder Blinksignale den Zustand des Gerätes (Start- oder Stoppvorgang, Normalbetrieb, Fehler) bekannt. In der Bedienungsanleitung ist die Bedeutung der Blinkfolgen beschrieben.

Zusätzlich kann über die RJ45-Schnittstelle ein Ethernet-Kabel an einen PC oder Notebook angeschlossen werden und, über die IP Adresse, via Browser ausgewählte Parameter der Steuerung visualisiert werden.

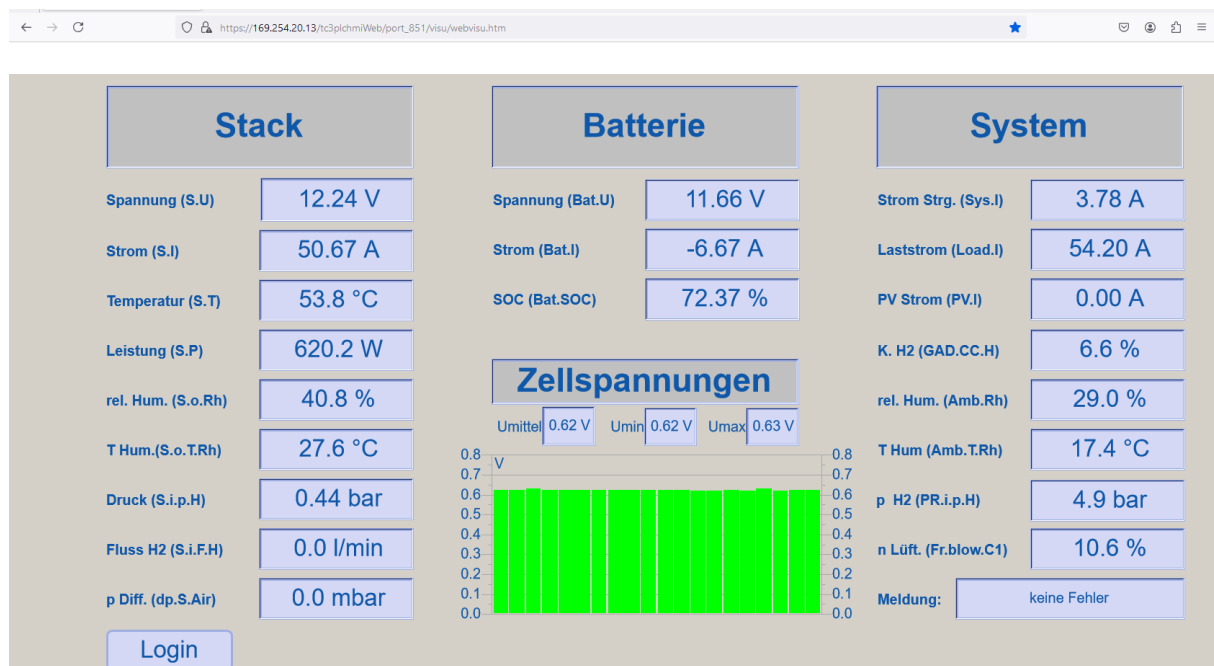


Abbildung 2.10 Screenshot der Benutzeroberfläche der Webvisualisierung im Browser

Die wesentlichen Messwerte der Sensoren in den Bereichen Brennstoffzellen-Stapel (Stack), Akkumulator (Batterie) und System werden als Zahlenwerte und, für die Zellspannungen, als Grafik dargestellt.

Passwortgeschützt können über den Login-Button weitere Fenster im Browser geöffnet werden, über die Systemsteuerung parametrierbar und kalibriert werden kann.

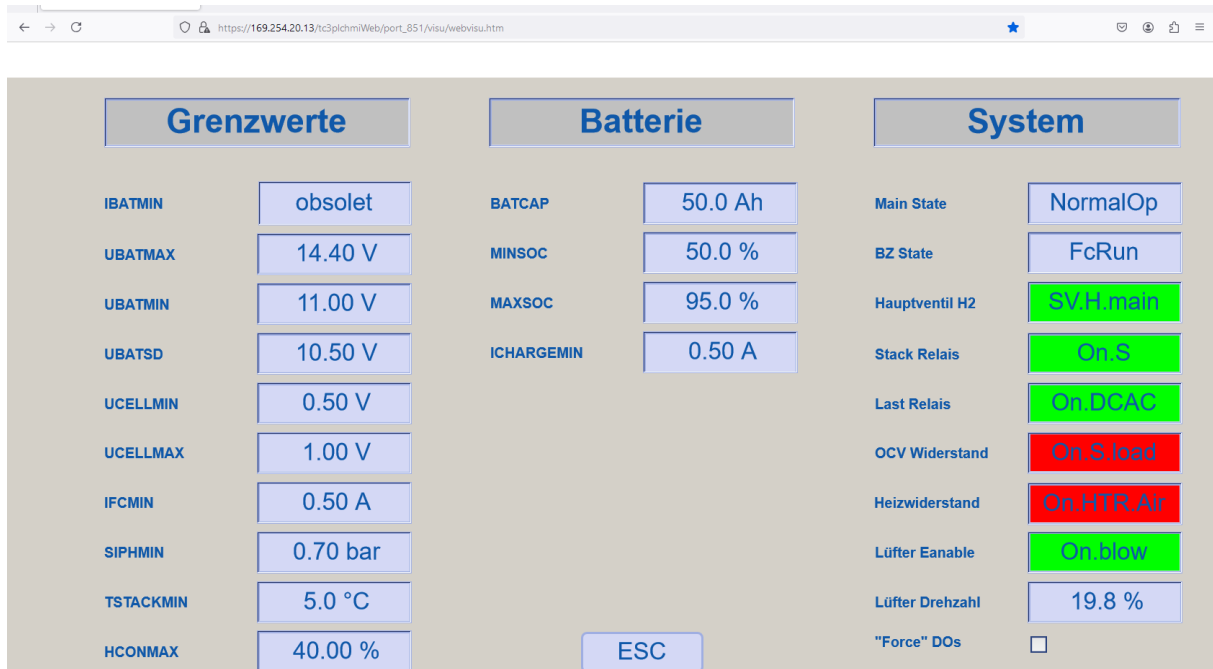


Abbildung 2.11 Screenshot der Parametrieroberfläche der Webvisualisierung

Eine Übersicht zum Aufbau des Steuerprogramms und der Fehlermatrix befindet sich im Anhang.

### 3 Brennstoffzellen-Stapelentwicklung

Das BasicBZ-System soll eine möglichst einfache Systemarchitektur erhalten. Der Ansatz war, auf Subsysteme wie Befeuchtung, Wasserkühlung und Anodenrezirkulation zu verzichten und somit Gewicht, Kosten und Baugröße einzusparen. Eine Stackentwicklung am ZSW sollte diese Randbedingungen erfüllen. Die ursprüngliche Planung sah vor, ein am ZSW existierendes graphitisches, wassergekühltes Brennstoffzellen-Stapelkonzept auf Luftkühlung umzukonstruieren und dafür auch die benötigten Herstellungswerkzeuge zu beschaffen.

Bereits zu Beginn wurde dieser Ansatz aus Zielkostengründen – es erschien unwahrscheinlich, mit einem angepassten Konzept bereits in mittleren Stückzahlen konkurrenzfähige Herstellkosten zu erreichen – geändert und gemeinsam zwischen den Projektpartnern entschieden, ein völlig neues, flexibel anpassbares Stapelkonzept mit möglichst einfachen Herstellschritten zu entwickeln. Ohne gefräste oder geprägte Bipolarplatten sollten so bereits in mittleren Stückzahlen kostengünstige BZ-Stacks hergestellt werden können. Der Projektträger ging diese Entscheidung dankenswerterweise mit.

Die wichtigsten Komponenten eines Brennstoffzellenstapels wurden analysiert und teils bestehende, teils neue Ideen für Konzepte zur Darstellung dieser Einzelkomponenten entwickelt. Im Einzelnen sind dies:

- Endplatten
- Membran-Elektroden-Anordnung
- Bipolarplatten
- Dichtungen
- Kühlflächen
- Stromabnehmer
- Verspannungssystem

Grundsätzliche Lösungsansätze wurden skizziert und diskutiert, wie beispielsweise die Gasverteilung:

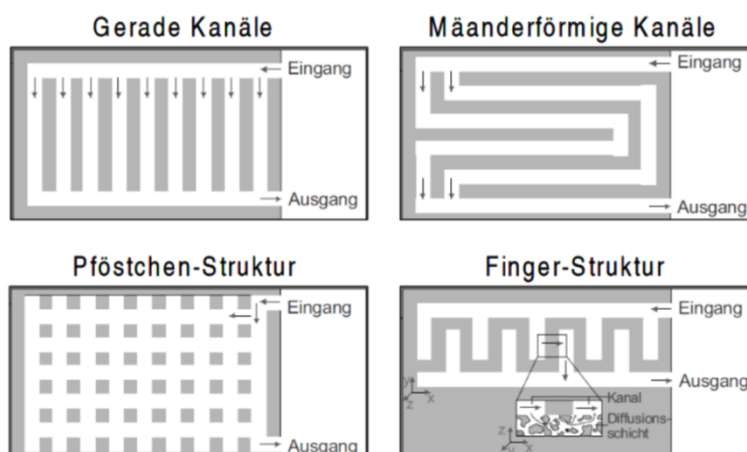


Abbildung 3.1 typische Geometrien für Gasverteilerstrukturen

### 3.1 Beispiel Kathodenkonzept

Am Beispiel der Kathoden-Luftversorgung, die gleichzeitig das Temperaturmanagement darstellt, soll das Vorgehen im Projekt skizziert werden. Bei Luftkühlung der Brennstoffzelle durchströmt Umgebungsluft den Stack und dient sowohl als Kühlluft, sowie durch den in der Luft enthaltene Sauerstoff als Reaktionsgas. Die Kathode muss aufgrund dessen eine Geometrie aufweisen, durch welche genügend Umgebungsluft durch den Stack strömen kann. Das Projekt fordert eine möglichst einfache und kostengünstige Realisierung, weshalb auch dies bei der Beurteilung der Konzepte berücksichtigt werden soll. Sowohl die Materialauswahl wie auch die Ver- bzw. Bearbeitungsmethode werden hierdurch beeinflusst. Die Kathode muss mechanischen Belastungen standhalten, welche vor allem in Form von Druck auftauchen. Der fertige Brennstoffzellen-Stack wird nach Stapelung der Einzelzellen mit ca. 12 kN verpresst, welchem die Kathodenstruktur verformungsfrei standhalten muss. Der kathodenseitig geführte Sauerstoff wirkt korrosiv, weshalb ein nicht korrosives Material gewählt werden muss, bzw. eine Beschichtung notwendig ist. Eine weitere Anforderung an die kathodenseitige Bipolarplatte mit Strömungskanälen ist die notwendige elektrische Leitfähigkeit.

Randbedingungen im Detail erarbeitet und bewertet wurden die folgenden Ansätze.

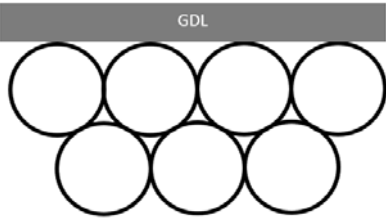
*Tabelle 3.1 Konzeptübersicht Kathode: Strangpressprofil*

BESCHREIBUNG	METALL GEPRESST DURCH 2D QUERSCHNITTSFORM DER STRÖMUNGSPLATTE
<b>STRÖMUNGSFÜHRUNG</b>	Getrennter Kühl- und Prozessluftstrom
<b>MATERIAL</b>	Aluminium, Beschichtung notwendig
<b>GEOMETRIE</b>	Rippenprofil, 2D Querschnitt -> verschiedene Möglichkeiten
<b>BEARBEITUNG</b>	Stempelherstellung, Pressung und Schnitt
<b>KOSTEN</b>	Einmalige Werkzeugkosten 5.000-6.000 € + Kosten Meterware
<b>BILD (QUERSCHNITT)</b>	 <p>Das Diagramm zeigt einen Querschnitt einer Kathode. Oben ist eine graue Schicht als 'GDL' (Gas Diffusion Layer) beschriftet. Darunter befindet sich eine schwarze, strukturierte Bipolarplatte mit einer Reihe von rechteckigen Aussparungen, die als Strömungskanäle dienen.</p>

*Tabelle 3.2 Konzeptübersicht Kathode: 3D-Druck*

BESCHREIBUNG	3D- GEDRUCKTE BIPOLARPLATTE MIT STRÖMUNGSKANÄLEN AUS LEITFÄHIGEM FILAMENT
<b>STRÖMUNGSFÜHRUNG</b>	Getrennter Kühl- und Prozessluftstrom
<b>MATERIAL</b>	Leitfähigen (Graphen-) Filament, keine Beschichtung notwendig (nicht korrosiv)
<b>GEOMETRIE</b>	Freie Formgebung
<b>BEARBEITUNG</b>	Erstellung eines CAD-Modells der Strömungsplatte und Druck
<b>KOSTEN</b>	Ca. 100€/100g Filament und Druckauftrag

*Tabelle 3.3 Konzeptübersicht Kathode: Rohrwabenprofil*

BESCHREIBUNG	ANORDNUNG VON METALLRÖHRCHEN ANEINANDER
<b>STRÖMUNGSFÜHRUNG</b>	Getrennter Kühl- und Prozessluftstrom
<b>MATERIAL</b>	Edelstahl, Beschichtung notwendig
<b>GEOMETRIE</b>	Kreisanordnung, Wabenförmig bei mehreren Schichten
<b>BEARBEITUNG</b>	Zuschnitt der Röhren und Entgradung
<b>KOSTEN</b>	Ca. 2-7 €/m Röhren
<b>BILD (QUERSCHNITT)</b>	

*Tabelle 3.4 Konzeptübersicht Kathode: Blech*

BESCHREIBUNG	FORMGEPRESSTES METALLBLECH ZU
<b>STRÖMUNGSFÜHRUNG</b>	Getrennter Kühl- und Prozessluftstrom
<b>MATERIAL</b>	Edelstahl, Beschichtung notwendig
<b>GEOMETRIE</b>	Wellen- oder Trapezförmig
<b>BEARBEITUNG</b>	Blechzuschnitt und Formgebung über Pressung mittels zweier Stempel
<b>KOSTEN</b>	Ca. 100 €/m <sup>2</sup>
<b>BILD (QUERSCHNITT)</b>	

*Tabelle 3.5 Konzeptübersicht Kathode: Streckmetall*

BESCHREIBUNG	EINZEL- ODER MEHRSCHICHTSTAPELUNG VON STRECKMETALLEN
<b>STRÖMUNGSFÜHRUNG</b>	Zusammengeführter Kühl- und Prozessluftstrom
<b>MATERIAL</b>	Aluminium, Stahlblech, Edelstahl, Beschichtung/Verzinkung notwendig
<b>GEOMETRIE</b>	Gitterstruktur mit wählbarer Maschenweite und -breite
<b>BEARBEITUNG</b>	Zuschnitt des Metalls, Entschärfung der Streckkanten (Verletzung der MEA)
<b>KOSTEN</b>	Ca. 200-500 €/m <sup>2</sup>

Die Kathodenseite wird von Sauerstoff durchströmt, welcher sowohl für die Reaktion als auch für die in diesem Projekt beförderte Luftkühlung benötigt wird. Die Geometrie kann nach getrennter und zusammengeführter Strömung des Prozess- und Kühlstroms unterschieden werden. Die Geometrie des Stacks, im Besonderen die Zuführkanäle des Wasserstoffs erschweren die Realisierung einer queren Strömungsrichtung von Kühl- und Prozessluftstrom. Ebenso spricht für eine parallele Strömungsrichtung, dass die zur Umsetzung des nötigen Massenstroms benötigten Lüfter nur auf einer Seite angebracht werden müssen. Aufgrund dessen wurden lediglich Konzepte mit einer parallelen Strömungsführung erstellt. Für die beiden Varianten der Strömungstrennung getrennt und nicht getrennt gibt es jeweils Vor- und Nachteile. Die nicht getrennte Option bietet den Vorteil der einfachen Realisierung und des einfachen Designs. Der Luftmassenstrom für die Luftkühlung ist im Verhältnis zum benötigten Prozessluftstrom deutlich größer. Werden Prozess- und Kühlstrom zusammen geführt besteht die Gefahr der Austrocknung der MEA, da beide Ströme zusammen Zuviel Feuchtigkeit aus der Reaktionsschicht mit hinaustransportieren. Auch wenn es eine Vielzahl verschiedener MEAs gibt, welche sich in ihren Eigenschaften wie Hydrophobizität und Toleranz verschiedener Feuchtebereiche unterscheiden, sind diese alle im Bereich des benötigten Massenstroms der Prozessluft ausgelegt. Dieses Kriterium bestimmt die Wahl der Strömungstrennung zur Variante getrennter Prozess- und Kühlkanäle. Das Konzept „Streckmetall“ lässt sich aufgrund dessen, sowie der Gefahr der Beschädigung der MEA durch scharfe Kanten der Geometrie ausschließen. Der hohe Verpressdruck des Stacks grenzt die Möglichkeiten der Geometrieauslegung des Ansatzes „Metallblech“ deutlich ein, weshalb dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wird.

Die Anforderung der elektrischen Leitfähigkeit ist für alle metallischen Materialien ausreichend gegeben. Das graphenhaltige Filament für das Konzept „3D-Druck“ wurde mittels Leitfähigkeitsmessung überprüft und wies dabei einen deutlich zu niedrigen tatsächlichen Wert von ca. 30 S/m auf. Diese Leitfähigkeit ist nicht ausreichend für die Anforderungen an die kathodische Bipolarplatte, weshalb das Konzept „3D-Druck“ ausschied.

Die zwei verbleibenden Varianten „Strangpressprofil“ und „Rohrwabenprofil“ eignen sich nach Beurteilung der Parameter elektrische Leitfähigkeit, Strömungsrichtung, bzw. -trennung und geometrischer Verträglichkeit mit umgebenden Komponenten. Für eine weitere Beurteilung der Konzepte wurden Preisanfragen zu Materialien und Umformungen getätigt. Die Eignung der Ansätze nach Strömungsauslegung wurden parallel geprüft und ergeben die Tauglichkeit beider Konzepte. Die laufenden Preisanfragen ergaben jedoch, hohe Kosten für Werkzeuge zur Herstellung des Strangpressprofils. Für die Konzeptüberprüfung wurde deshalb der in Einzelstücken günstigere Ansatz „Rohrwabenprofil“ weiterverfolgt. Für mittlere Stückzahlen sollte jedoch das Potential gerade von Strangpressprofilen berücksichtigt werden.

Eine nachfolgende Auslegung und Simulation ergab die folgende Strömungs- und Geschwindigkeitsverteilung:



Abbildung 3.2 : Geschwindigkeit Luft am Austritt der Strömungsrohre

### 3.2 Resultierendes Zell- und Stapelkonzept

Aus den Analysen und Bewertungen aller Einzelkomponenten wurde das folgende Konzept mit 3D-gedruckten Rahmenbauteilen mit Einlegekomponenten entwickelt:

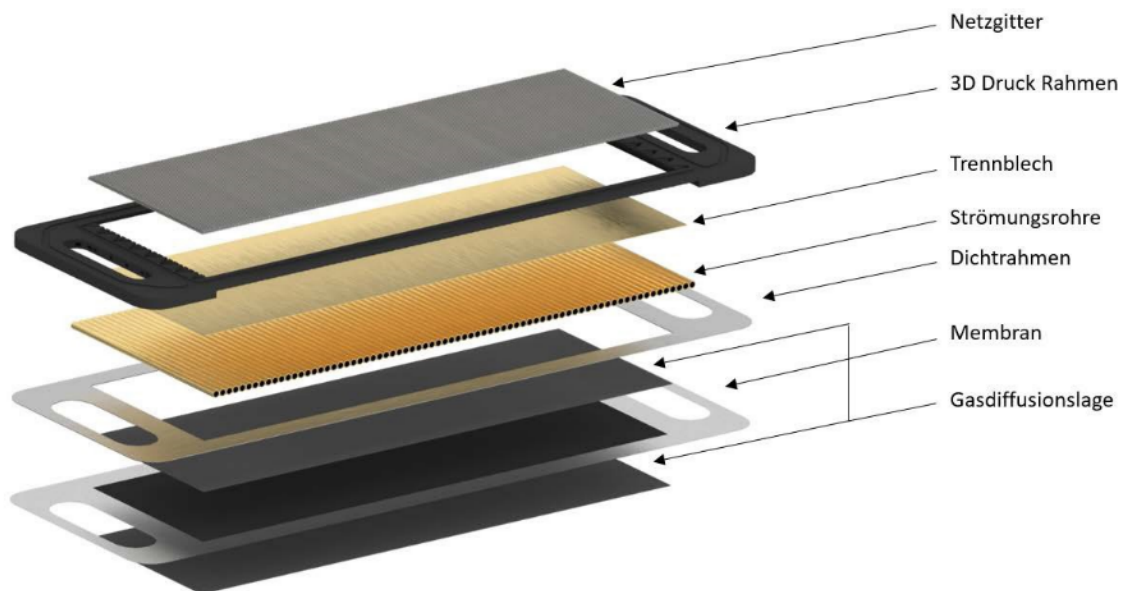


Abbildung 3.3 : Explosionszeichnung einer Zelle

Für die Strömungsführung wurde ein, in kleinen und mittleren Stückzahlen wirtschaftlich nur über 3D-Druck realisierbares, Rahmenkonzept konstruiert.

Zum Test wurden zunächst kleinere Bauteile mit einem am ZSW verfügbaren 3D-Drucker hergestellt. Aufgrund der Ergebnisse wurde dann mit den ursprünglich für die Anschaffung von Prägewerkzeugen vorgesehenen Mittel verwendet, um einen 3D-Drucker beschaffen, mit dem

- Rahmenbauteile und Endplatten in der benötigten Größe gedruckt,
- Bauteile auch mit zug-/druckfesteren Kunststoff-Materialien hergestellt,
- Bauteile in mittleren Stückzahlen (bis ca. 1000) bereits kostengünstig hergestellt sowie
- geometrische und materialtechnische Optimierungen zügig im Hause angepasst werden konnten.



Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft die 3D-gedruckte Strömungsführung, um den Wasserstoff in jeder Einzelzelle auf die aktive Anoden-Elektrodenfläche zu verteilen.

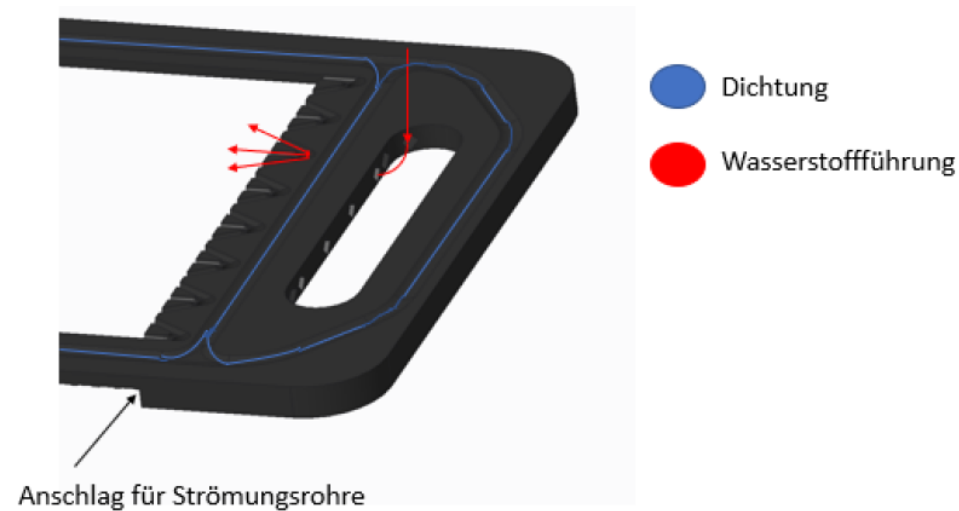


Abbildung 3.4 :  $H_2$ -Strömungsführung der entwickelten 3D-gedruckten Bipolarplatten

Zu Verspannung, Medienanschluss, Aufstapelung und Stromabnahme wurde nach einem vergleichbaren Vorgehen wie unter 3.1 Einzelkomponenten evaluiert, konstruiert und umgesetzt.

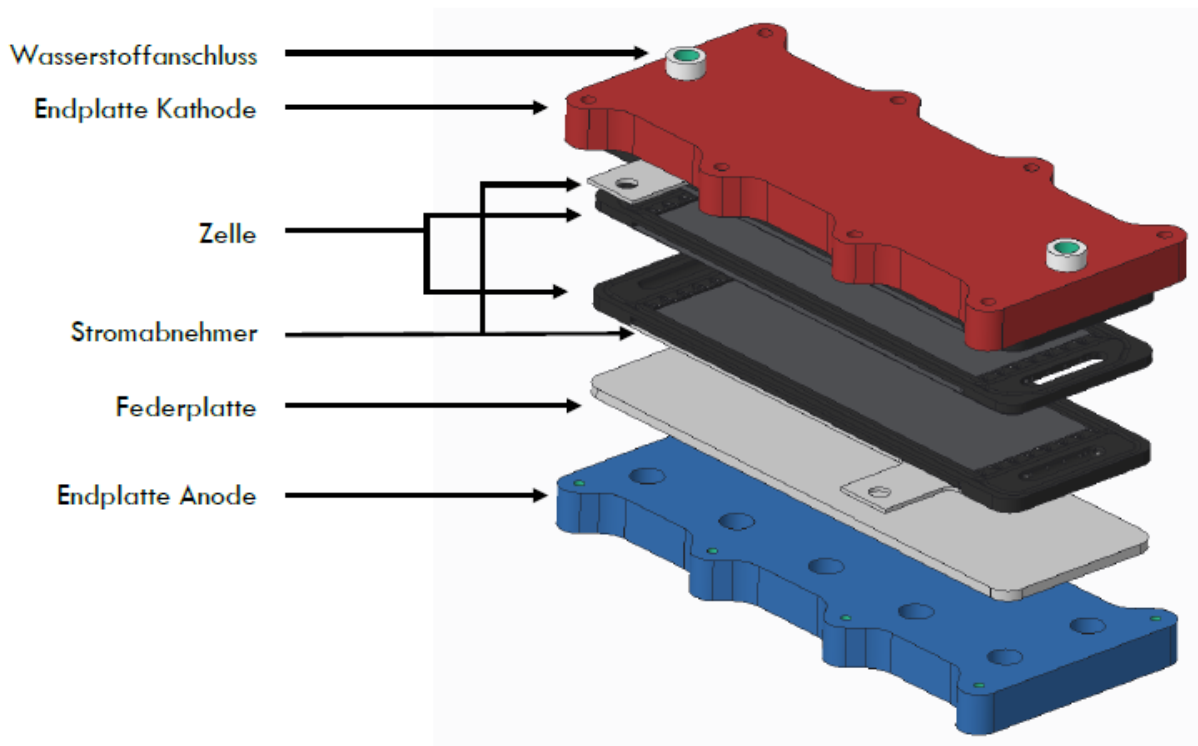
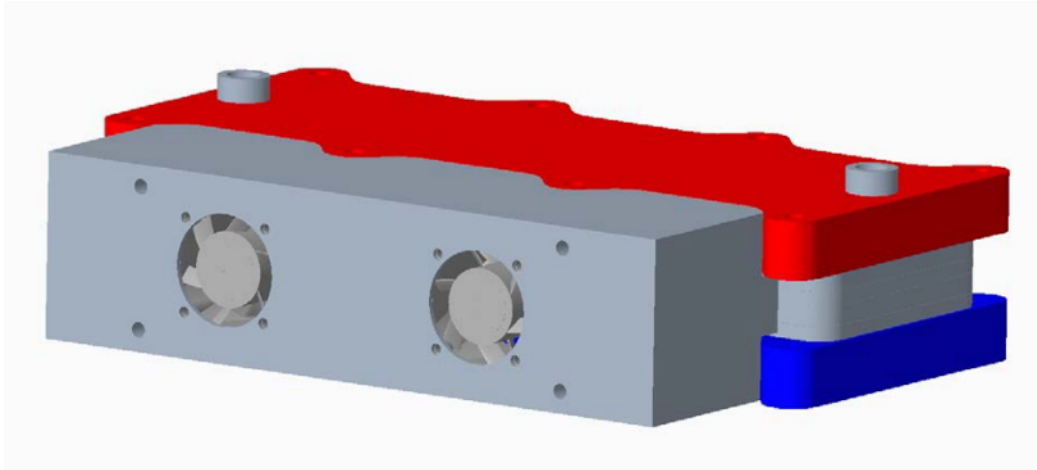
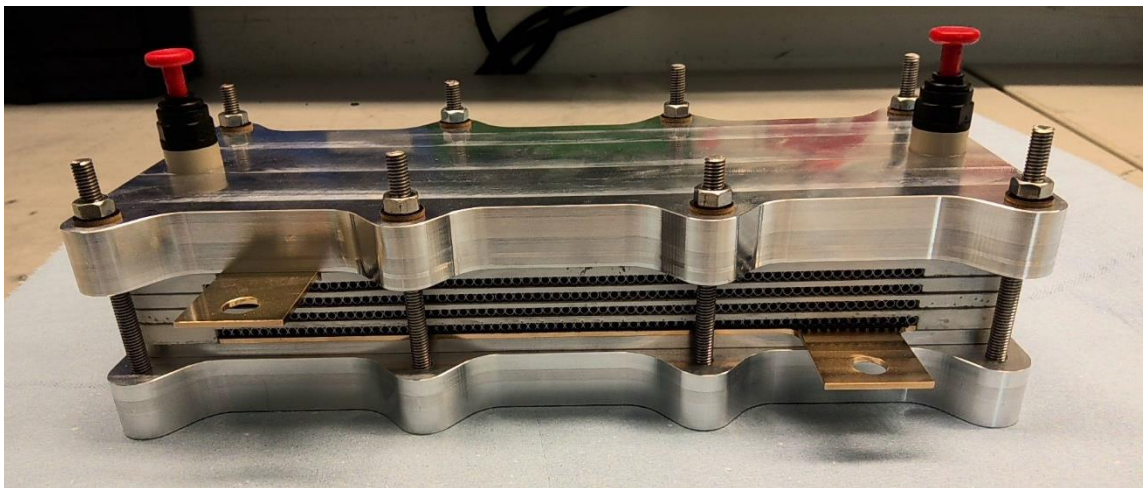


Abbildung 3.5 : Explosionszeichnung eines Stacks mit 2 Zellen



*Abbildung 3.6 : Stapelkonzept inklusive Luftzufuhr mittels Niederdrucklüftern*

Das Konzept zur aktiven Luftzufuhr – die drehzahlgesteuerten Niederdrucklüfter ziehen die Gehäuseluft geführt durch die Kathodenseite des Stapels nach außen – wurde mit ebenfalls 3D-gedruckten Anschlusssteilen auch in den Funktionsmustern umgesetzt (vgl. Abbildung 2.7 f.)



*Abbildung 3.7 : realisierter 5-Zellen-BZ-Stapel nach BasicBZ-Konzept*

Es wurden mehrere Kurzstapel aufgebaut. Das für die Machbarkeitsprüfung gewählte Kathodenkonzept mit den eingelegten beschichteten Röhrchen erwies sich erwartungsgemäß als zeitintensiv aber machbar. Die Prüfung und iterative Weiterentwicklung des Dichtungskonzeptes erwies sich unerwartet aufwändig. Sowohl eingelegte als auch feucht dispenste Dichtungen und unterschiedliche Geometrien der Dichtungssicken wurden untersucht. Für ein Konzept wurde nach einigen Wiederholschleifen in Einzelzellen eine befriedigende Dichtigkeit nachgewiesen. Allen Versuchen gemeinsam war, dass nach Aufbau und Verpressung von Mehrzeller-Kurzstapeln Undichtigkeiten sowohl intern als auch nach außen auftraten. Konstruktive Schwachstellen wurden identifiziert, konnten aber aus Kapazitätsgründen bis zum Ende des Projektes nicht behoben werden. In den Funktionsmustern 1 bis 5 wurden deshalb ausschließlich kommerziell erhältliche, zugekaufte Brennstoffzellenstapel verwendet.

## 4 Konzept H<sub>2</sub>-Druckflaschenversorgung

Die Gasversorgung des Brennstoffzellen-Stromerzeugers mit Wasserstoff wurde mittels Druckgasflaschen dargestellt. Die Druckgasflaschen sollten (und wurden) in der ersten Auslegung mit Druckminderer und Druckanzeige-Manometer ausgerüstet und durch geeignete Maßnahmen (selbtsichernde verwechslungssichere Anschlusskupplung) vor Fehlbedienung durch den Anwender geschützt.

Die Versorgung mit Wasserstoff sollte über ein Tauschsystem der Druckgasflasche mittelfristig beim ‚Gasversorger um die Ecke‘ getauscht werden können. Für die (im Zielausbau flächendeckende) Versorgung mit Flaschenwasserstoff wurde die Erfahrung des Koordinators IGT beim Vertrieb technischer Gase genutzt. Eine Lösung, die ähnlich der Verwendung von Flüssiggasflaschen, ohne spezielle Vorkenntnisse und Werkzeug auskommt, wurde erarbeitet.

### 4.1 Auslegung und Beschaffung

Im Lastenheft wurde eine Betriebsdauer von mindestens 10h bei Vollast für eine Flaschenfüllung spezifiziert. Verschiedene Lösungen wurden recherchiert und technisch und wirtschaftlich bewertet. Zur Abschätzung, ob kommerziell zur Verfügung stehende Druckgasflaschen von Rheingas mit einem Wasservolumen von 26 Liter und einem Nenndruck von 300bar<sub>g</sub> (Entleerung im Betrieb bis 5bar<sub>g</sub>) diese Anforderung erfüllen können, wurde die folgende Berechnung vorgenommen:

*Tabelle 4.1 Reichweitenauslegung BasicBZ-System für Stack 1020ACS*

Betriebspkt	65,3 Ampere			
H <sub>2</sub>	0,486 NormLiter/min/Zelle bei 75A und Stöchiometrie 1,07, ohne Purge			
Zellen	20 Stück			
H <sub>2</sub> -Fluss	9,73 NormLiter/min			
Heizwert H <sub>2</sub>	3,0 kWh/m <sup>3</sup>			
H <sub>2</sub> -Fluss	9,73 NormLiter/min			
H <sub>2</sub> -Fluss	0,584 Norm-m <sup>3</sup> /h			
Leistung H <sub>2</sub>	1,751 kW			
Leistung Stack	862 W	(1020ACS, 2.3.1, Seite 21)		
η	49,2% bei Vollast (>50% in Teillast)			
Faktor	1,075 "h für 1 kWh"			
Verbrauch	627 NormLiter/kWh			
Vol H <sub>2</sub>	6410 Norm-Liter (Flasche 300bar <sub>g</sub> , 26 Liter, nutzbar bis 5bar <sub>g</sub> )			
Reichweite	10,98 h			

Im Ergebnis steht selbst bei dauerhaftem Betrieb unter Vollast des Stapels - abzüglich des Eigenverbrauchs entspräche dies einer Nettoleistung von über 650W - Brennstoff für knapp 11h Betrieb zur Verfügung. Die Anforderung ist für den Realbetrieb somit in jedem Fall erfüllt.

### 4.2 Ergebnisse

Für die Versorgung der Funktionsmuster im Feldbetrieb und auch der späteren Produktsysteme wurde entschieden, die Tauschflaschen mit einem selbstsichernden Schnellverbinder zu versehen, an den die jeweilige, am Funktionsmuster verbleibende Druckreduzierventil-Schlauch-Einheit angesteckt wird.

In einer ersten Version wurde das Druckreduzierventil und die Schnellanschlusskupplung fest an der Flasche verbaut. Dieser Ansatz hatte den Vorteil, dass der Kunde lediglich den Schnellverbinder der H<sub>2</sub>-Zuleitung (5bar<sub>g</sub>) zum BasicBZ-System anschließen musste. Die Nachteile waren, dass Sonderbauteile verbaut werden mussten, damit die gesamte Baugruppe in den Schutzkragen der Flasche passte und bei jeder Wiederbefüllung der Flasche die Baugruppe demontiert und vor Auslieferung wieder montiert und druckgeprüft werden musste.



*Abbildung 4.1: Wechselflaschen für den Einsatz*

In der obigen Abbildung ist eine mit 300bar Druckwasserstoff befüllte Tauschflasche mit 26 L Rauminhalt und einer nutzbaren Wasserstoffmenge von 0,55 kg dargestellt. Der Schnellanschluss für das Druckreduzierventil bleibt sowohl für die Befüllung als auch die Entnahme montiert. Rechts unten eine Beispielanordnung eines Druckreduzierventils mit Schnellverschlusskupplung zum BZ-System.

Die nun gewählte Lösung ist ebenfalls einfach, hat den Vorteil geringerer Kosten (weil weniger Bauteile) bei minimal umständlicherer Handhabung aufgrund der größeren Schnellverschlusskupplung.

## 5 Testbetrieb und Anwendung

Im Rahmen des Projektes wurden Teile für insgesamt 5 Funktionsmuster beschafft und diese bei den Partnern aufgebaut. Ablauf und Status für die Systeme:

Funktionsmuster 1 (ZSW, 2022/23):

- Auslegung, Komponentenauswahl, Beschaffung
- Sicherheitskonzept, Risikoanalyse (HAZOP)
- Steuerungskonzept und Programmierung
- Inbetriebnahme, Betrieb, Stresstests

Optimierte Funktionsmuster 2-3 (ZSW, 2023/24):

- Aufbau bei und durch ZSW
- Inbetriebnahme abgeschlossen, Realbetrieb

Optimierte Funktionsmuster 4-5 (IGT 2024):

- Aufbau bei und durch IGT
- Inbetriebnahme abgeschlossen

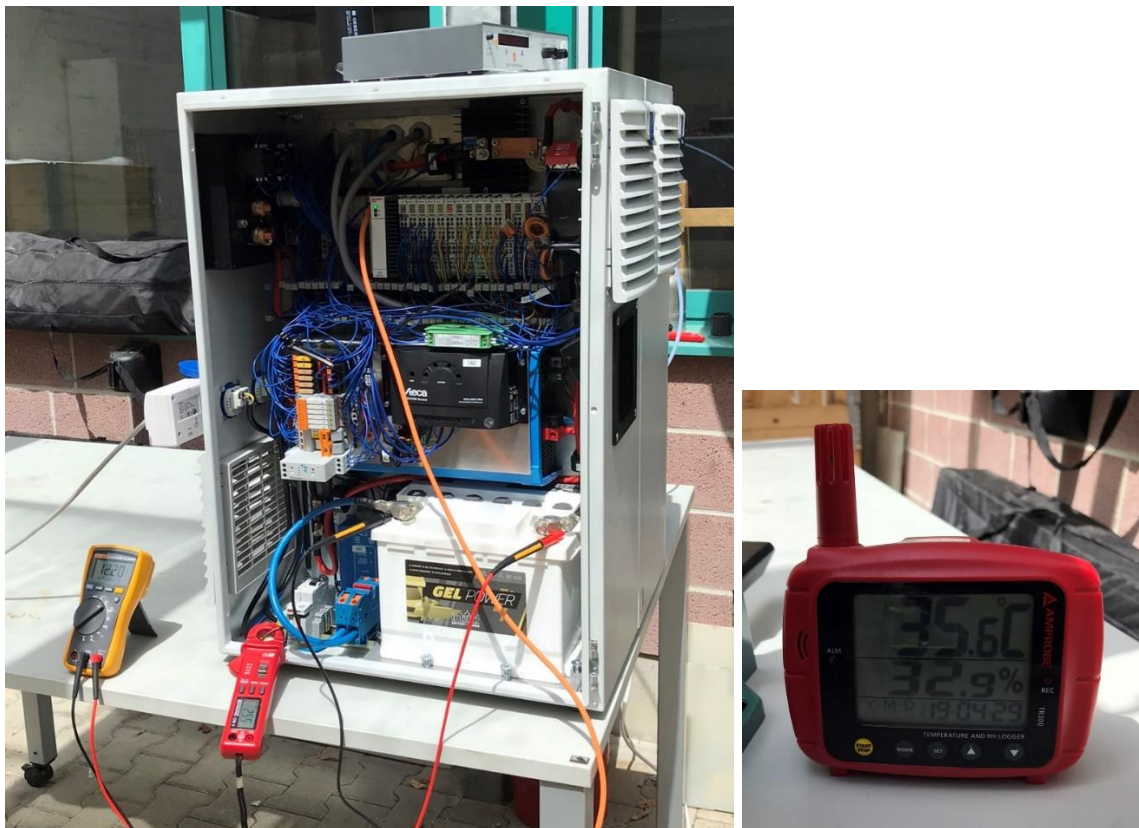


Abbildung 5.1 Funktionstest mit hoher Umgebungstemperatur

Mit dem ersten Funktionsmuster wurden nach erfolgter Inbetriebnahme unter anderem auch Testbetriebe durchgeführt, um das Temperaturmanagement des Stapels zu überprüfen. Gerade bei hohen Außentemperaturen muss für luftgekühlte Systeme sichergestellt sein, dass die Abwärme des BZ-Stapels zuverlässig an die Umgebung abgeführt wird. In einem geeigneten, zwar belüfteten, aber vor allem aus Glaselementen bestehenden Anbau an ein Gebäude des ZSW Ulm in Südausrichtung,

wurden Tests durchgeführt und der experimentelle Nachweis eines funktionierenden Temperaturmanagements auch in herausfordernden Betriebsituationen erbracht.

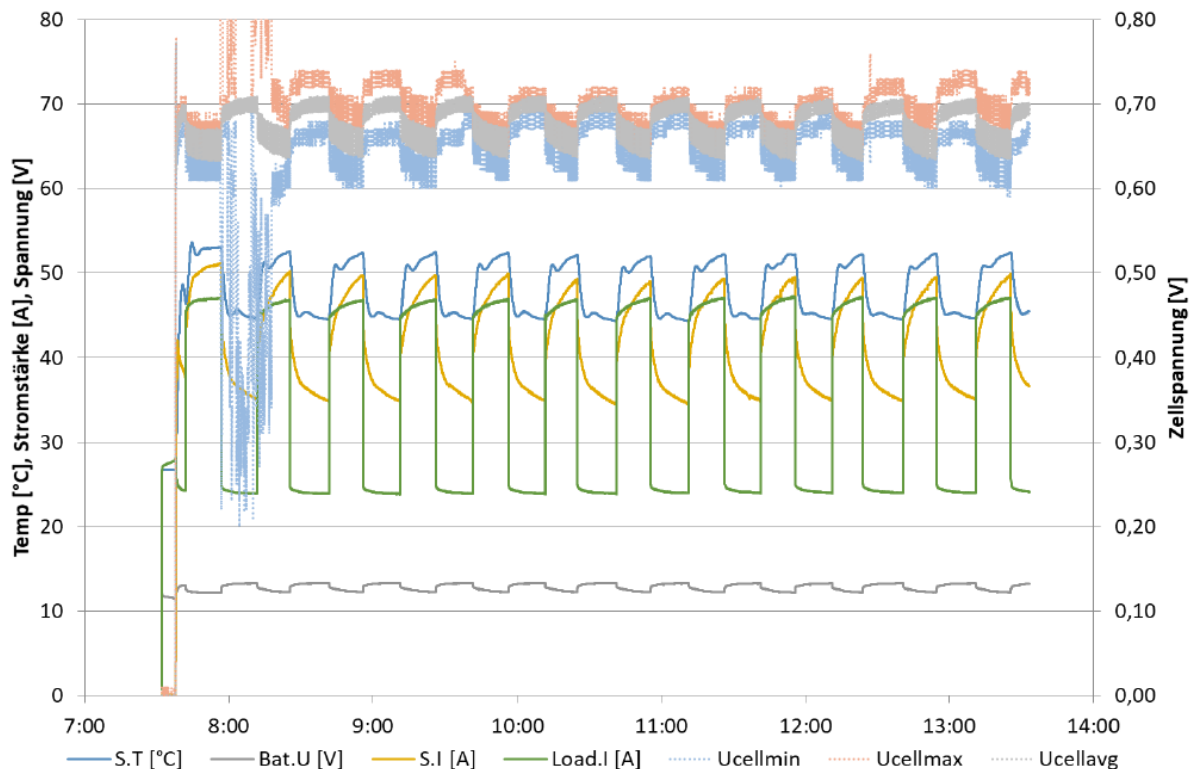


Abbildung 5.2 Datenverlauf zum Funktionstest mit hoher Umgebungstemperatur

Für den Test wurde die elektrische Last an den 230V<sub>AC</sub>-Steckdosen zyklisch zwischen 300 und 540W geschaltet. Im Ergebnis sieht man ein relativ stabiles Temperatur- und Spannungsverhalten.

In weiteren Betriebszeiten mit dem ersten Funktionsmuster wurden Grundfunktionen, Abschalt- und Sicherheitsroutinen, Bedienbarkeit mit und ohne angeschlossenen Notebook (vgl. 2.4) und die Reaktion auf herbeigeführte Fehlerzustände überprüft.

Diese Tests wurden in essentiellen Auszügen mit den weiteren Funktionsmustern wiederholt.

Erfahrungen mit potentiellen Anwendern wurden beispielsweise beim jährlichen Herbstfest am 6. Oktober 2024 im botanischen Garten der Universität Ulm gemacht. Der botanische Garten Ulm ist mit 28ha Größe, einem beachtlichen Höhenprofil und vielen im Gelände verteilten Arbeitsorten ein geeigneter Partner für Tests netzunabhängiger Stromversorgung. Beim Herbstfest wird traditionell die Ernte des laufenden Jahres vorgestellt und verarbeitet.

Mit der Stromversorgung durch das BasicBZ-System wurde der Betrieb einer Getreidemühle ermöglicht, die den eigenen Ertrag an Dinkelkorn zu Vollkornmehl verarbeitete. In den Vorjahren war hierzu die Verlegung von über 150m Kabel quer durch das Gelände nötig.



*Abbildung 5.3 BasicBZ-System am Herbstfest des botanischen Gartens Ulm, 6.10.24*

Das System lieferte über mehrere Stunden zuverlässig elektrischen Strom aus der angeschlossenen 300bar-Wasserstoffflasche.

Für die Anwendung auf Kurzzeit-Baustellen oder anderen netzfernen Einsatzorten ohne eigenen Elektrizitätsanschluss, die gerade im Anlagenbau bei Erweiterungen oder Anpassungen vorkommen, wurde durch die IGT GmbH im Projektverlauf eine mobile Werkstatt konzipiert und gebaut. Diese hat die Grundmasse einer Europalette und kann von Speditionen mit gängiger Verladetechnik zum Einsatzort transportiert und wieder abgeholt werden. Die Werkstatt ist für den Einbau und die Nutzung der BasicBZ-Systeme bereits im Funktionsmusterstadium ausgelegt. Spätere Volumen- und gewichtsoptimierte Evolutionsstufen können in jedem Fall integriert werden. Ein auf dem Dach vormontierte PV-Panel wird über die vorgesehene Schnittstelle (vgl. Abbildung 2.9) an den Laderegler des BasicBZ Systems angeschlossen und verlängert so bei guten Wetterverhältnissen die maximale Vollast-Laufzeit pro Wasserstoff-Tauschflasche über 10 Stunden bzw. verringert den Wasserstoffverbrauch.



*Abbildung 5.4 mobile Werkstatt von IGT mit integriertem BasicBZ-System und PV*

Im oberen Bereich der mobilen Werkstatt ist ein Arbeitsplatz als Werkbank und / oder als „Büroschreibtisch“ vorgesehen. Regal- oder Schrankeinbauten sind bedarfsgerecht möglich. Elektrische Geräte, PCs mit bis ca. 1 kW Kurzzeitleistung oder 0,5 kW Dauerleistung können betrieben und Akkus geladen werden.

Im unteren Bereich ist etwa die Hälfte des Volumens für das BasicBZ-System und bis zu vier Wasserstoff-Tauschflaschen belegt. Die andere Hälfte kann für Baustellenmaterial und Ähnliches verwendet werden.

Diese Art der Anwendung hat den Vorteil, dass die Systeme bereits im Entwicklungsstand der Funktionsmuster – flexibel, hochwertige Datenerfassung, aber: hohes Gewicht und Volumen – problemlos transportiert und eingesetzt werden können, da ohnehin nur mit technischen Hilfsmitteln wie Hubwagen be-, entladen und positioniert wird.



## 6 Zusammenfassung

Im Projekt BasicBZ, FkZ BW ZPH2 22136-137 wurde ein portabler Stromerzeuger entwickelt und in insgesamt fünf Funktionsmustern umgesetzt. Ein Sicherheits- und Zertifizierungskonzept war die Basis der erarbeiteten, einfachen und robusten Systemarchitektur. Die Beschaffungssituation während der Projektlaufzeit - Lieferketten waren insbesondere im Jahr 2022 unterbrochen - sorgte für Verzögerungen im Ablauf. Wie geplant wurden die wesentlichen Funktionen zunächst in einem ersten System-Funktionsmuster am ZSW bei Inbetrieb- und Abnahmetests nachgewiesen. Das erarbeitete, auf Industriesteuerungskomponenten beruhende Steuerungskonzept wurde erfolgreich programmiert und implementiert. Die Architektur und die unabhängig von der SPS arbeitende Sicherheitskette erfüllen die Anforderungen europäischer und nationaler Regelwerke, insbesondere der harmonisierten Norm DIN EN IEC 62282-5-100 „Portable Brennstoffzellen-Energiesysteme-Sicherheit“.

Komponenten für bereits leicht optimierte weitere Funktionsmuster wurden beschafft bzw. hergestellt und diese aufgebaut. In allen Systemen wurden zugekaufte, kommerziell erhältliche luftgekühlte Brennstoffzellenstapel integriert. Die Brennstoffzellenentwicklung eines völlig neuen, im Wesentlichen auf Einlegebauteilen „Made in Baden Württemberg“ beruhenden Konzepts konnte bis zu einem vielversprechenden Punkt vorangetrieben, aber nicht fertiggestellt werden. Unvorhergesehene Herausforderungen bei der Dichtigkeit der Stapel wurden aus personellen Kapazitätsgründen letztlich nicht gelöst.

In der Tabelle 6.1 wird der Status der wichtigsten Projektinhalte eingeordnet:

*Tabelle 6.1 Zielerreichung der Projektaufgaben zum Projektabschluss*

Status	Aufgabe	Partner
++	Konzept Wechselflaschen umgesetzt	IGT
++	Funktionsmuster 1 in Betrieb	ZSW
+	BZ-Stack-Konzept entwickelt, F&E pausiert. Plan B umgesetzt	ZSW
++	Aufbau und Inbetriebnahme Funktionsmuster 2 – 5 umgesetzt	IGT, ZSW
+	Dokumentation erstellt	ZSW, IGT
+	Testbetrieb bei Anwendern teilweise erfolgt → Fortführung nach Projektende 31.12.2024	IGT, ZSW
+	Verwertung der Ergebnisse: Mietmodell für Anwender, auch Kurzzeitmiete	IGT

Die potentielle Weiterentwicklung und Vermarktung der Systeme wird in den folgenden Abschnitten „Ausblick“ und „Verwertung“ behandelt.

## 7 Verwertung

Das Vorhaben stellte einen weiteren wichtigen Schritt hin zur Marktreife portabler Brennstoffzellensysteme in Netto-Leistungsbereichen bis ca. 1,5 kW<sub>el</sub> dar. Das am ZSW bestehende Grundkonzept einer einfachen Brennstoffzellen-Systemarchitektur wurde erfolgreich in ein Systemkonzept zur portablen Bereitstellung von Strom umgesetzt. Die Anforderungen – fertigungs- und systemtechnisch sowie die Orientierung an einer klaren, finanziell attraktiven Applikation einschließlich der zugehörigen Brennstofflogistik – wurden von den Partnern im Vorhaben erfolgreich bearbeitet.

Die vollumfänglichen Arbeiten am System, von Konzeptionierung über Design, Fertigung, Assemblierung, Prüfung auf Systemebene, Sicherheitstechnik bis hin zum Systembetrieb und Fehleranalyse, erweiterten bei beiden Partnern, der IGT GmbH und dem ZSW, die Kompetenzen. Die erarbeitete Methodik und der Komponentenpool lassen sich auf zukünftige Entwicklungsaufgaben anwenden.

Neben der Lösung der technischen Herausforderungen ergaben sich Fragestellungen der Schnittstellen zum Kunden, der Sicherheitsaspekte und der Marktsituation. Der potenzielle Verwerter konnte in diesem Punkt wesentliche Erkenntnisse zur Situation der Applikationen im Leistungsbereich bis 1,5 kW<sub>el</sub> gewinnen.

Nach einem weiteren Entwicklungsschritt zur Volumen- und Gewichtsreduzierung der Brennstoffzellensysteme im Vergleich zu den bestehenden Funktionsmustern, ist die Umsetzung der Technologie in einer Kleinserie möglich und angestrebt.

Folgende Anwendungen sind im Fokus:

- Stromversorgung für Montageboxen zur Versorgung der elektrischen Handwerkzeugen
- Bürocontainer für netzferne Arbeitseinsätze
- Freizeitnutzung Stromversorgung elektrischer Landschafts-Bearbeitungswerkzeuge
- Freizeitnutzung Outdoor-Camping

Eine Marktrecherche ergab, dass ein Brennstoffzellensystem durch den **leisen und sauberen Betrieb** im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Aggregaten zu höheren Preisen vertrieben werden kann. Voraussetzungen sind eine hohe Produktqualität, ein schneller Service und eine unkomplizierte Bereitstellung des Brennstoffs. Ein portabler Brennstoffzellen-Stromerzeuger sollte laut der Vergleichsrecherche zu Verkaufspreisen von 4.000 bis 10.000 € Käufer finden. Um die Einstiegsschwelle für Kunden/Anwender möglichst gering zu halten, setzt IGT zusätzlich auf Leasing- und Mietkonzepte für den Vertrieb.

Die entwickelte (und in kleiner Stückzahl bereits beschaffte) Tausch-Druckflaschentechnologie zur Distribution von grünem, regional erzeugtem Wasserstoff steht für die Anwendung mit BasicBZ Systemen wie auch beliebigen andere Anwendungen zur Verfügung.

## 8 Ausblick

Entwicklung, Aufbau und Nachweis der Machbarkeit des BasicBZ-Konzepts wurden anhand der Funktionsmuster erbracht. Ein notwendiger nächster Schritt ist, neben der weiteren Sammlung von Betriebserfahrungen (siehe unten) eine Volumen- und Gewichtsreduzierung der Systeme hin zu tragbaren Größenordnungen. Dies kann durch die Verwendung seriennaher Komponenten erzielt werden. Ein wesentlicher Hebel wäre die Verwendung eines fixierten Steuergeräts / Platine anstatt der für die Entwicklungsphase flexiblen, aber bauraumintensiven und teuren Industrie-SPS. Auch die Leistungselektronik kann bereits in mittleren Stückzahlen wesentlich vereinfacht dargestellt werden. Die bisher verwendete Sensorik kann auf die für einen Produktbetrieb notwendige Anzahl reduziert und ebenfalls gewichts- und volumenreduziert ausgeführt werden.

Zur Fertigungsentwicklung und Optimierung des Brennstoffzellen-Stapelkonzepts „Made in Baden Württemberg“ stehen bereits verschiedene Ansätze im Raum. Das Dichtigkeitskonzept soll iterativ durch Anpassungen der Geometrie der Rahmenbauteile (vgl. Abbildung 3.3) funktionsfähig gemacht werden. Auf Stackprüfständen aufgenommene Kennfelder von Kurzstacks bis zu 5 Zellen sollen den Funktionsnachweis, möglicherweise nach weiteren iterativen Verbesserungen, erbringen. Zur Kosten- und Aufbauoptimierung wurde anstatt der im Projekt eingesetzten Einzelröhrchen zur Aufteilung von Kühl- und Prozessluft eine Vorrichtung entwickelt, die Stahlbleche zu einer entsprechenden Struktur umformen kann.



*Abbildung 8.1 Vorrichtung zur plastischen Verformung von Trennblechen*

Durch weiteren Betrieb der bestehenden Funktionsmuster bei Anwendern sollen praktische Betriebserfahrungen gesammelt werden, die in eine spätere Produktentwicklung einfließen kann. Als potentielle Anwendungsfälle zu nennen sind hier der botanische Garten Ulm, Kunden der IGT GmbH aus dem Anlagenbau sowie der Einsatz bei externen Tätigkeiten der beiden Partner (H<sub>2</sub>-Tankstellenaufbau- und Abnahme).



# Anhang

## Anhang 1: Programmstruktur Steuerprogramm TwinCat, BasicBZ

Main Loop	Main State	Procedure	Change Main State to	Change FC State to	Remark
TriggerWD					Trigger Watchdog
SystemCheck					Hardware Check of System
ReadInputs					Read current Values of Inputs
Check EmergencyShutdown			EmergencyOff		Check if Emergency Button is pressed or Safety Chain is broken
Check SystemLock or SystemOff			SystemOff		Check if System is locked or Shutdown is requested
State Machine	1 FirstCycle	GetSOC			Execute once after System Start
		ControllerInit			Write Parameters to Fan Controller (Temp and Air Controlling)
		VisuInit	INIT	StandBy	Init Visualisation
	2 INIT	InitSOC			Calculate current SOC of Battery
		OnBlowGas			Start Blower Gas Department
		Close Valves			Close Main and Purge Valve
		StartupCheck (if active)	SystemOff		If Check fails
		CheckStackVoltage		Shutdown	Start Shutdown procedure if FC-Voltage too high
		CheckRectifier	SystemOff		If Check fails
		RTCinit			Set RTC Clock
		InitDataLogging			Create or Check Logging File
		InitErrorLogging			Create or Check Logging File
		InitAlarmLogging			Create or Check Logging File
		CheckSafetyChain	Error		If Check fails
			IDLE		If Check passes
	3 IDLE	OnDCAC			If SOC > SOCMIN
		Watch Ubat, pH2	NormalOperation	Startup	If Ubat < UBATMIN and pH2 > SIPHMIN
		Watch manual Trigger	NormalOperation	Startup	If triggered by User
	4 NormalOperation	Check Systemidle	IDLE	Standby	If value true
	5 SystemOff	Check SysOffState		Standby	Shut System down if FC Shutdown is finished
	6 EmergencyOff	StartupCheck = TRUE		Standby	Activate StartupCheck for next Start
		Watch SysButOn	IDLE		If Safety Chain is closed
	7 Error	Check FC State	IDLE	Standby	Shutdown FC if still in RUN Mode
		Check Error	IDLE		If no more Error active
		Check Timer	SystemOff		Shut System down, if there are still Errors after 30min
HandleFC					Handle FC State Machine
DataLogger					Write Data to Logging Files
AlarmAndErrorHandling			Error		If Error detected
WriteOutputs					Write current Values to Outputs
Visu					Handle Visualization