NIPII – Verbundvorhaben:

„cleanEngine – Plattform zur Entwicklung dynamisch-energetisch optimierter BZ-Antriebe für leichte NFZ unter Berücksichtigung von Skalierungseffekten“

Kurzbericht

Förderkennzeichen FKZ 03B10407B
01.12.2020 – 30.11.2024

Autoren: Prof. Dr. Birgit Scheppat, Maximilian Kleber, Georg Derscheid, Dr. Matthias Enders, Matthias Werner, Dr. Berit Kirchhoff

Kurzbericht: CleanEngine – Plattform zur Entwicklung dynamisch-energetisch optimierter BZ-Antriebe für leichte NFZ unter Berücksichtigung von Skalierungseffekten© 2025 by Prof. Dr. Scheppat, Kleber, Derscheid, Enders, Werner, Kirchhoff is licensed under CC BY-SA 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts wurde eine Entwicklungsplattform zur dynamisch-energetischen Optimierung von Brennstoffzellenantrieben für leichte Nutzfahrzeuge geschaffen. Bei der Verifikation sollten technische und physikalische Skalierungseffekte sowie virtuelle und reale Testverfahren berücksichtigt werden.

Zu diesem Zweck sollte ein Modellteststand für Brennstoffzellensysteme errichtet werden, der eine maximale Leistung von bis zu 10 kW ermöglicht. Die Erstellung und Validierung von Simulationsmodellen sollten anhand entsprechender Untersuchungen erfolgen. Die Zielsetzung der Plattform bestand darin, Brennstoffzellen (BZ) als dynamische Primärquelle für Fahrenergie zu nutzen und somit die erforderliche Kapazität des elektrischen Energiespeichers zu minimieren.
Ein weiteres Ziel bestand darin, die Entwicklungszeit für Brennstoffzellenantriebsstränge zu verkürzen und eine Datenbank mit Kenndaten der Komponenten und Konstruktionsparametern aufzubauen.

1.1 Wissenschaftlich technischer Stand zu Beginn des Projektes

Zu Projektbeginn wurde ein Ansatz zur modellbasierten Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben verfolgt, der in der wissenschaftlichen Literatur nur ansatzweise behandelt wurde, wie beispielsweise im EU-Projekt Giantleap[1]. A. Moore et al.[2] entwickelten ein Modell für Brennstoffzellensysteme, das stationäre Zustände beschreibt, jedoch das dynamische Verhalten nicht erklären kann. A. L. Dicks et al.[3] untersuchten Balance of Plant-Komponenten (BoP) - Komponenten im statischen Betrieb, während J. M. Andujar et al.[4] eine vereinfachte Simulation für Echtzeit-Monitoring entwickelten. Der von der IAV[5] entwickelte Prüfstand ermöglicht die Messung dynamischer Eigenschaften von Polymerelektrolytmembran (PEM) - Brennstoffzellen. Untersuchungen am kompletten Antriebsstrang oder die Simulation realer Fahrbedingungen waren jedoch nicht möglich.

2 Ablauf des Vorhabens

Um die Projektziele zu erreichen, wurde ein Teststand für Brennstoffzellensysteme (Stapel und BoP) mit einer maximal möglichen Leistung des BZ-Stapels von 10 kW entwickelt. Dieser ermöglicht schnelle Komponentenwechsel sowie flexible Anpassungen der Systemtopologie.

Zur Steuerung der Systeme und zur Messdatenerfassung wird eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) genutzt. Sie ermöglicht eine modulare und flexible Anpassung an unterschiedliche Systemanforderungen. Die Prüfstandssoftware und die Steuerung der BZ-Systeme wurde in TwinCAT 3 entwickelt.

Die Erstinbetriebnahme erfolgte mit einem BZ-System mit einem 24 Zellen BZ-Stapel. Anhand dieses Systems wurden verschiedene Testszenarien durchgeführt, um die Regelungskreise für Temperatur, Volumenstrom und Befeuchtung zu optimieren. Zur Untersuchung der physikalischen und technischen Effekte in den Systemen, die aus einer Leistungsskalierung resultieren, wurden anschließend weitere Systeme getestet. Für diese Systeme wurden BZ-Stapel mit 48 Zellen und 72 Zellen desselben Fabrikats genutzt. Im Rahmen der Untersuchung wurden zudem die Energieeigenbedarfe und Wechselwirkungen der BoP untersucht.

---

[1] Giantleap: https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-dashboard/projects-repository/giantleap_en

[2] Moore, A. H. (2018). High Fidelity Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Power Module Considering Internal Power Losses.

[3] A. L. Dicks, P. (1998). A fuel cell balance of plant test facility. *Journal of Power Sources 71*.

[4] J. M. Andújar, F. S. (2015). PEFC Simulator and Real Time Monitoring System. *Fuel Cells 15*.

[5] *https://www.iav.com/automotion-magazine/automotion-01-2018/hochmoderner-brennstoffzellen-pruefstand-fuer-die*. (2019).

Anhand der Messdaten wurde ein auf physikalischen und mathematischen Zusammenhängen basierendes Modell in Matlab-Simulink erstellt. Die Simulationen dienen der Bestimmung physikalischer Parameter sowie der Validierung der Skalierbarkeit der Systeme.

Abschließend wurden verschiedene Fahrzyklen durchgeführt, um die Effizienz der verschiedenen leistungsskalierten Brennstoffzellensysteme im realitätsnahen Betrieb zu vergleichen. Die Ergebnisse wurden anschließend mit vergleichbaren Versuchen an den Systemen der Hochschule Kempten und der ABT e-Line GmbH verglichen.

3 Wesentliche Ergebnisse

Im Rahmen des Vergleichs unterschiedlicher Brennstoffzellensysteme wurden statische und dynamische Messungen an drei Systemen mit variierender Zellanzahl der jeweiligen BZ-Stapel durchgeführt. Dabei wurden die Leistungen der BZ-Stapel, -Systeme und BoP-Komponenten sowie der Einfluss von Betriebsparametern auf Effizienz und Leistung analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Skalierung mit Effizienzabweichungen von maximal ±5% möglich ist – vorausgesetzt, Betriebsparameter und Systemtopologie bleiben konstant.

Für die Alterungsuntersuchungen wurde ein BZ-System mit 24 Zellen BZ-Stapel genutzt. Im Rahmen des Projekts wurden zwei Strategien zur beschleunigten Alterung getestet:

- eine Dauerbelastung mit einer Stromdichte von 1,2 A/cm² über 50 Stunden, bei der keine signifikante Spannungsabnahme beobachtet wurde.
- eine dynamische Belastung mit wechselnden Stromstärken zwischen 10 und 234 A über mehr als 125 Stunden.

Letztere führte zu einem messbaren Spannungsabfall von etwa 18 mV der gemittelten Einzelzellspannung. Trotz der hohen Belastung kam es zu keinen Ausfällen an den BoP-Komponenten des Systems oder dem BZ-Stapel.

Die maximale Leistung, die Effizienz und weitere physikalische Parameter der BZ-Systeme der Hochschule RheinMain (2-6,5 kW) wurden mit dem BZ-System der Hochschule Kempten (80 kW) anhand eines realen Fahrzyklus verglichen. Für den Systemvergleich wurde ein Fahrzyklus mit etwa 12 % Stadt-, 64 % Überland- und 32 % Autobahnanteil genutzt. Das Ergebnis zeigte eine hohe Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufs der Systemleistungen: Die Standardfehler der Regression (engl.: Root Mean Square Error; kurz: RMSE) betrugen weniger als 5 %.

Bei hochdynamischen Zyklen wie dem „EPA US06“ traten jedoch Unterschiede in Dynamik und Effizienz auf, bedingt u. a. durch unterschiedliche Regelungssysteme. Insgesamt bleibt eine Skalierung zwischen den Systemen der Hochschule RheinMain mit Systemleistungen von 2 - 6,5 kW zu den Systemen der Hochschule Kempten (80 kW) und ABT e-Line GmbH (60 kW) mit Abweichungen der Systemeffizienz von ± 10 % realistisch.

3.1 Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF wurden Teile der Simulationsumgebung im Zuge einer Masterthesis entwickelt. Des Weiteren wurden am Prüfstand der HSRM BZ-Stapel eines anderen Herstellers erfolgreich getestet. Weitere Zusammenarbeiten sind in Planung. In Kooperation mit der Archigas GmbH wurde erfolgreich ihr innovativer Sensor zur Bestimmung der H2-Konzentration in feuchten Gasgemischen getestet.

NIPII – Verbundvorhaben:

„cleanEngine – Plattform zur Entwicklung dynamisch-energetisch optimierter BZ-Antriebe für leichte NFZ unter Berücksichtigung von Skalierungseffekten“

Eingehende Darstellung

---

hsrm Hochschule RheinMain

Förderkennzeichen FKZ 03B10407B
01.12.2020 – 30.11.2024

Autoren: Prof. Dr. Birgit Scheppat, Maximilian Kleber, Georg Derscheid, Dr. Matthias Enders, Matthias Werner, Dr. Berit Kirchhoff

Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie | nip
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
Koordiniert durch: NOW GMBH.DE
ptj projektträger jülich

Inhalt

Abkürzungen 1

1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 2

1.1 Entwicklung des Modellteststandes 2

1.1.1 Beschaffung und Integration von Komponenten 2

1.1.2 Aufbau des Teststandes 3

1.1.3 Regelungssystem und Messdatenerfassung 4

1.1.4 Inbetriebnahme und erste Tests 5

1.2 Entwicklung der Simulationsumgebung 6

1.3 Untersuchung der Balance of Plant – Komponenten von Brennstoffzellensystemen 9

1.3.1 Systemtopologie und Variabilität essenzieller Betriebsparameter 10

1.3.2 Vergleich der BZ-Systeme 12

1.4 Entwicklung von Methodikansätzen für Predictive Maintenance an BZ-Systemen 15

1.4.1 Alterungseffekte 15

1.5 Fahrversuche mit dem Testfahrzeug zur Validierung der Funktionstüchtigkeit der gefundenen Entwicklungsmethode 17

1.5.1 Fahrzyklus „Ulm“ 18

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 20

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 21

4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 21

5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 23

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses 23

6.1 Abschlussarbeiten und Projektarbeiten, die im Zuge des Projektes an der HSRM durchgeführt wurden 23

6.2 Geplante Veröffentlichungen 24

Literatur 24

Anhang A - R&I Diagramm 25

Eingehende Darstellung: CleanEngine – Plattform zur Entwicklung dynamisch-energetisch optimierter BZ-Antriebe für leichte NFZ unter Berücksichtigung von Skalierungseffekten© 2025 by Prof. Dr. Scheppat, Kleber, Derscheid, Enders, Werner, Kirchhoff is licensed under CC BY-SA 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

Abkürzungen

BoP	Balance of Plant
BZ	Brennstoffzelle
BZ-Stapel	Brennstoffzellenstapel
EIS	Elektrochemische Impedanzspektroskopie
EPA US06	Environmental Protection Agency US06 Drive Cycle
HKE	Hochschule Kempten
HSRM	Hochschule RheinMain
MEMS	Mikro-elektromechanisches System
NT-PEM	Niedertemperatur-Polymerelektrolytmembran (-Brennstoffzelle)
SOH	State of Health
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TRL	Technology Readiness Level
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure
R&I	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema
PEM	Protonen-Austauschmembran
RMSE	Engl. Root Mean Square Error, Standardfehler der Regression

1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Rahmen des Projektes cleanEngine sollte eine Entwicklungsplattform zur dynamisch-energetischen Optimierung von Brennstoffzellenantrieben für leichte Nutzfahrzeuge geschaffen werden. Dabei sollten technische und physikalische Skalierungseffekte sowie virtuelle und reale Testverfahren zur Verifikation berücksichtigt werden.

An der Hochschule RheinMain wurde ein Prüfstand für Brennstoffzellensysteme (BZ-Systeme) mit variierenden Ausgangsleistungen errichtet und die zu testenden BZ-Systeme entwickelt. In den folgenden Abschnitten werden die nötigen Schritte im Zuge des Aufbaus des Teststandes, der BZ-Systeme und die Ergebnisse der Untersuchungen an den Messobjekten dargestellt.

1.1 Entwicklung des Modellteststandes

Für den Aufbau des Modellteststandes der Hochschule RheinMain (HSRM) musste ein Grundgerüst für alle zu testenden Komponenten entworfen werden. Der ursprüngliche Plan, einen am Markt verfügbaren Teststand zu beschaffen, wurde aufgrund mangelnder Verfügbarkeit von Prüfständen für vollständige BZ-Systeme und zugunsten höherer Flexibilität verworfen. Der entworfene Teststand ermöglicht die Steuerung aller „Balance of Plant“ Komponenten (BoP), des Brennstoffzellenstapels (BZ-Stapel) sowie der umfangreichen Sensorik in einer räumlich variablen Anordnung. Dies dient dem Projektziel variierende BZ-Systeme mit unterschiedlichen Ausgangsleistungen hinsichtlich möglicher technischer und physikalischer Skalierungseffekte zu untersuchen.

Der Modellteststand wurde für Leistungen der BZ-Stapel von bis zu 10 kW ausgelegt. Er ermöglicht einen raschen Tausch von Systemkomponenten und die Variation der Systemtopologie. Hinzu kommt die Möglichkeit der Erprobung unterschiedlicher Komponenten für die Eignung in BZ-Systemen und die Untersuchung der Wasserstofftauglichkeit.

1.1.1 Beschaffung und Integration von Komponenten

Die am Markt verfügbaren Bauteile umfassen:

Kathodenstrang: Hierfür wurden Luftverdichter, Befeuchter und Wasserabscheider beschafft. Eine wesentliche Herausforderung bestand darin, geeignete Komponenten zu identifizieren, im Hinblick auf einen ölfreien Betrieb und den geforderten Leistungsbereich. Dies erforderte umfangreiche Analysen und Vergleiche zwischen verschiedenen Anbietern.

Anodenkreislauf: Um Schadgase abzuführen und den Wasserstoff effizient zu nutzen, wurde ein Rezirkulationskreislauf implementiert. Dies erforderte die Erprobung verschiedener Rezirkulationspumpen, um die beste Leistung zu gewährleisten.

Thermomanagement: Untersuchungen zur Materialverträglichkeit führten zur Auswahl geeigneter Konstruktionsmaterialien für den Kühlkreislauf. Die Herausforderung bestand darin, Materialien zu identifizieren, die sowohl thermisch stabil als auch chemisch beständig sind. Ergebnisse dazu finden sich in Tabelle 1. Kühlmittelpumpen und Wärmetauscher wurden ebenfalls beschafft, wobei die Auswahl auf den Ergebnissen der Forschung zur Materialverträglichkeit basierte.

Tabelle 1: Ergebnisse der Materialuntersuchungen zu den Kühlmittelverträglichkeiten [1]

Beständig	Bedingt beständig	Nicht beständig
PTFE	POM-C (C)	ABS (T)
HDPE (als Lagermaterial)		PLA (L, T, C, M)
PP		Druckharz (T)
PPS		PA6.6 (L, C, M)
Al_2O_3 (wenn C799 Standard erfüllt)		NBR (L, M)
Messing		EPDM (L, C)
Kupfer		
1.4404		
1.4401		
1.4301		

T = thermisch unbeständig; L = signifikante Leifähigkeitsbeeinflussung; C = chemisch unbeständig; M = mechanisch unbeständig

1.1.2 Aufbau des Teststandes

Der Teststand ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Grundgerüst besteht aus Aluminiumprofilen. Diese Konstruktion erlaubt eine effiziente Integration der Systemkomponenten und gewährleistet zugleich eine benutzerfreundliche Führung von Kabeln und Rohrleitungen. Dadurch wird der Austausch einzelner Bauteile vereinfacht.

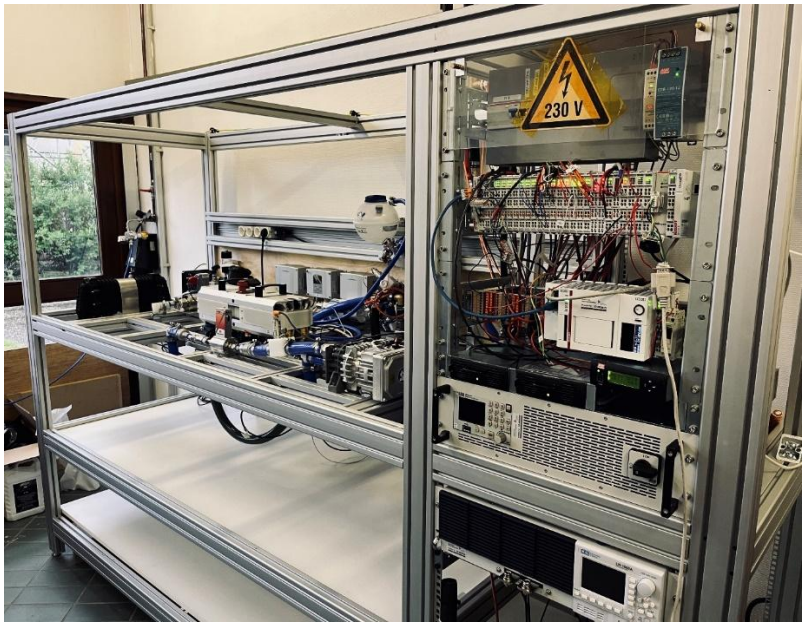


Abbildung 1: Teststand im Aufbau

Herausforderungen traten insbesondere bei der Montage der Verrohrung für die verschiedenen Medienflüsse auf, da diese präzise positioniert werden mussten, um für akkurate Messungen Strömungswiderstände und Wasseransammlungen an unerwünschten Stellen zu vermeiden. Engpässe in der Verfügbarkeit von spezifischen Bauteilen führten dazu, dass einige Komponenten kurzfristig umgeplant oder durch alternative Lösungen ersetzt werden mussten. So wurden beispielsweise

Komponenten getestet und benutzt, die ursprünglich für den Einsatz in Dampf- und Druckluftkonstruktionen gedacht waren.

Die Prüfstandskomponenten, einschließlich elektronischer Lasten und Messelektronik, sind vollständig integriert. Der Messrechner, auf dem das Steuerungsprogramm läuft, ermöglicht eine präzise Steuerung und Überwachung des Systems.

1.1.3 Regelungssystem und Messdatenerfassung

Die Steuerung des Teststandes wurde in modularer Bauweise realisiert, um die unterschiedlichen und austauschbaren Bauteile optimal ansteuern zu können.

Aus diesem Grund fiel die Entscheidung auf den Einsatz einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS). Diese zeichnet sich durch ihre hohe Flexibilität aus, da eine breite Auswahl an Mess- und Steuerkarten verfügbar ist, die bei Bedarf nahezu unbegrenzt erweitert werden können. Dadurch konnte auf sich ändernde Anforderungen an die Mess- und Regelungstechnik im Verlauf des Projekts effizient reagiert werden.

Abbildung 1 zeigt den initialen Systemaufbau. Im linken Bereich ist der überwiegende Teil der Komponenten für Anoden- und Kathodenstrang dargestellt. Zentral angeordnet befindet sich ein Brennstoffzellenstapel mit 24 Einzelzellen und einer nominellen elektrischen Leistung von 3 kW, umgeben von den Subsystemen zur Luft- und Wasserstoffversorgung, Befeuchtung, Kühlung, Rezirkulation sowie der zugehörigen Sensorik. Der rechte Abschnitt zeigt die elektronischen Lasten sowie die speicherprogrammierbare Steuerung, welche für die Steuerung und Überwachung des Gesamtsystems verantwortlich ist. Die SPS ermöglicht eine einfache und schnelle Anbindung der Aktuatoren und Sensoren, was eine flexible Anpassung an Änderungen am Prüfstand und am BZ-System erlaubt.

Im Bereich der Druck- und Feuchteregelung wurden mehrere studentische Arbeiten durchgeführt, mit dem Ergebnis einer flexibel anpassbaren Einstellung und Regelung dieser Parameter an die jeweiligen Anforderungen unterschiedlicher BZ-Stapel (siehe Abschnitt 6.1: Demir, Wechler, Seidenfaden).

Im Kühlkreislauf wurde ein zusätzliches Heizelement installiert, um die erforderlichen Betriebstemperaturen schneller zu erreichen und die Variationen der Eingangstemperatur des BZ-Stapels zu minimieren. Diese Anpassung war notwendig, da die ursprüngliche Konzeption des Kühlkreislaufs bei niedrigen Außentemperaturen zu einer langsamen Reaktionszeit des Systems führte.

Die Entwicklung der Prüfstandsoftware erfolgte mittels der vom Lieferanten der SPS (Beckhoff Automation GmbH & Co. KG) bereitgestellten Programmierumgebung TwinCAT 3. Als Programmiersprache wurde größtenteils strukturierter Text nach IEC 61131 benutzt. Die grafische Benutzeroberfläche ist in Abbildung 2 dargestellt. Messdaten werden in einem offenen Dateiformat (.csv) gespeichert, um die Erfassung von zeitabhängigen Sensordaten zu ermöglichen und die Verarbeitung, Weitergabe und Veröffentlichung der Daten zu vereinfachen.

Zur Sicherstellung eines störungsfreien und stabilen Programmablaufs wurde der Hauptteil der Steuerungslogik in Form einer sogenannten State Machine implementiert. Diese erlaubt es dem Teststand, selbstständig und ohne externe Eingriffe in einem definierten Betriebszustand zu verbleiben und sich innerhalb dieses Zustands eigenständig zu regeln. Erst durch äußere Einflüsse oder gezielte Benutzereingriffe erfolgt ein Wechsel des Betriebsmodus, wodurch ein kontrollierter und sicherer Betrieb gewährleistet wird. So ist es möglich, dass der Benutzer eine bestimmte Regelstrategie, wie

z. B. einen simulierten Fahrzyklus vorgibt und die SPS diesen selbstständig ausführt. Sämtliche Medienflüsse und die elektronische Last werden automatisch nach diesen Vorgaben geregelt.

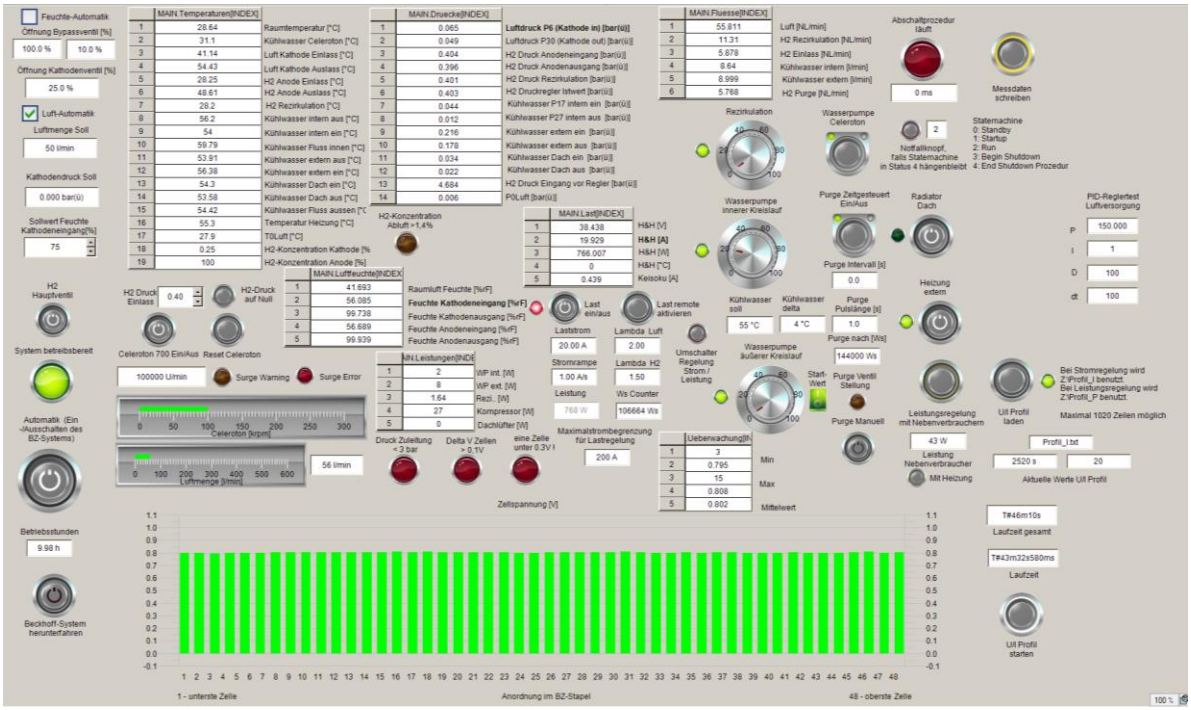


Abbildung 2: Prüfstandssoftware, grafische Benutzeroberfläche

1.1.4 Inbetriebnahme und erste Tests

Die Inbetriebnahme des Teststandes erfolgte am 10.07.2023 mit einem BZ-System mit 24 Zellen BZ-Stapel. In der Abbildung 3 ist der fertige Aufbau dargestellt (hier mit dem im weiteren Verlauf der Versuchsreihen umgerüsteten System, das einen BZ-Stapel mit 48 Zellen nutzt).

Nach dem erfolgreichen Aufbau des BZ-Teststandes wurden verschiedene Testszenarien durchgeführt und die Regelungskreisläufe für Temperatur, Volumenstrom und Befeuchtung angepasst, um die Einstellung eines effizienten Arbeitspunktes des BZ-Systems zu erreichen.

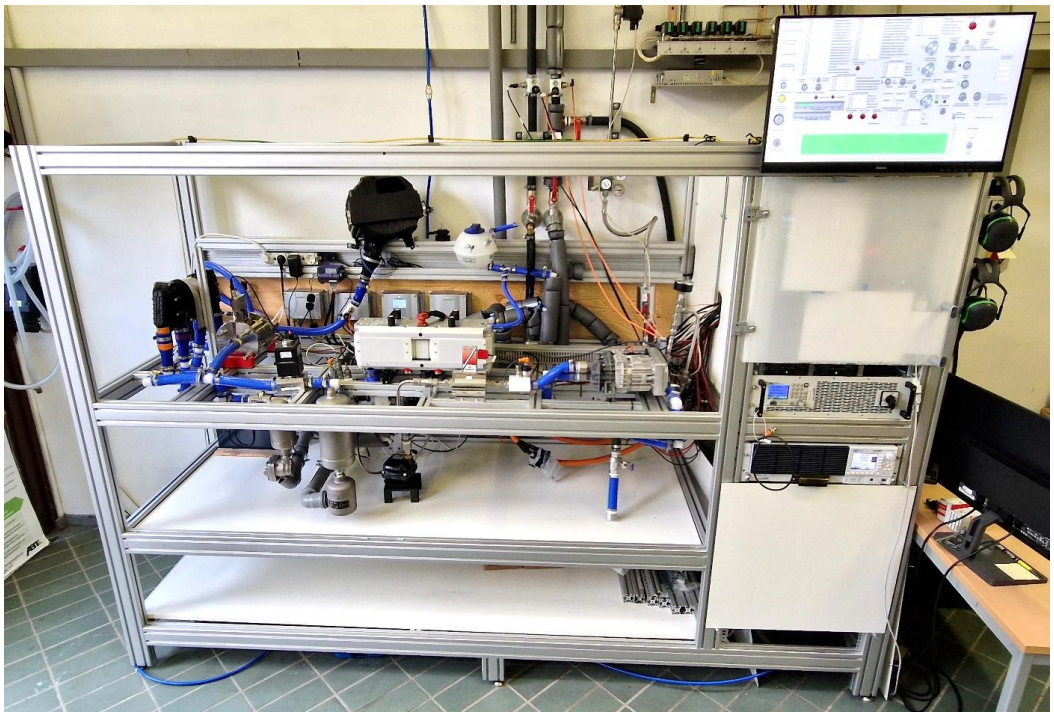


Abbildung 3: Teststand mit 48 Zellen BZ-Stapel im Betrieb

1.2 Entwicklung der Simulationsumgebung

Für die Entwicklung der Simulationsumgebung wurden zwei Ansätze zur Modellierung von Brennstoffzellensystemen (BZ-Systemen) verfolgt.

Der erste Ansatz basiert auf einem semi-empirischen Modell zur Simulation des BZ-Stapels, welches durch elektrochemische Impedanzmessungen (EIS) gestützt wird.

Dieses Modell erwies sich als nur begrenzt aussagekräftig und adaptierbar. Um die Simulation anpassungsfähiger zu gestalten, wären umfangreiche zusätzliche Messungen unter variierenden Betriebsparametern des BZ-Stapels erforderlich gewesen, die im Rahmen des Projekts nicht leistbar erschienen.

Der zweite Ansatz basiert auf der Anwendung verschiedener mathematischer und physikalischer Methoden, um datengestützt die Simulationen der Komponenten innerhalb des Brennstoffzellensystems aus den Parametern des Teststandes zu bestimmen.

Die Simulation ermöglicht es, geforderte Belastungsszenarien in Form von dynamischen und statischen elektrischen Leistungsvorgaben zu nutzen und die physikalischen Reaktionen des Systems zu bestimmen. So können unter anderem die Spannung der BZ-Stapel, die elektrischen Leistungsbedarfe der BoP, die Effizienz des Gesamtsystems und der BZ-Stapel sowie weitere physikalische Parameter (Temperaturen, Drücke, Volumenströme) im System ermittelt werden.

Das verwendete Modell ist anhand quasi-statischer Daten parametrisiert und validiert, mit moderatem Fehlerbereich (< 5 %) bezogen auf die mittlere Zellspannung. Die Modelle wurden mithilfe praxisnaher Fahrprofile parametrisiert und getestet. Diese Zielsetzung wurde weitgehend umgesetzt, wobei sich die bisherigen Arbeiten primär auf die Simulation der Anode und des BZ-Stapels konzentrieren. Herausforderungen in der Modellierung, insbesondere hinsichtlich der Druckdynamik und

Wärmeübertragung wurden identifiziert, wie auch auftretende Anomalien. Im folgenden Abschnitt werden einzelne Teilaspekte der Simulation dargestellt. Eine detaillierte Darstellung ist in [2] zu finden.

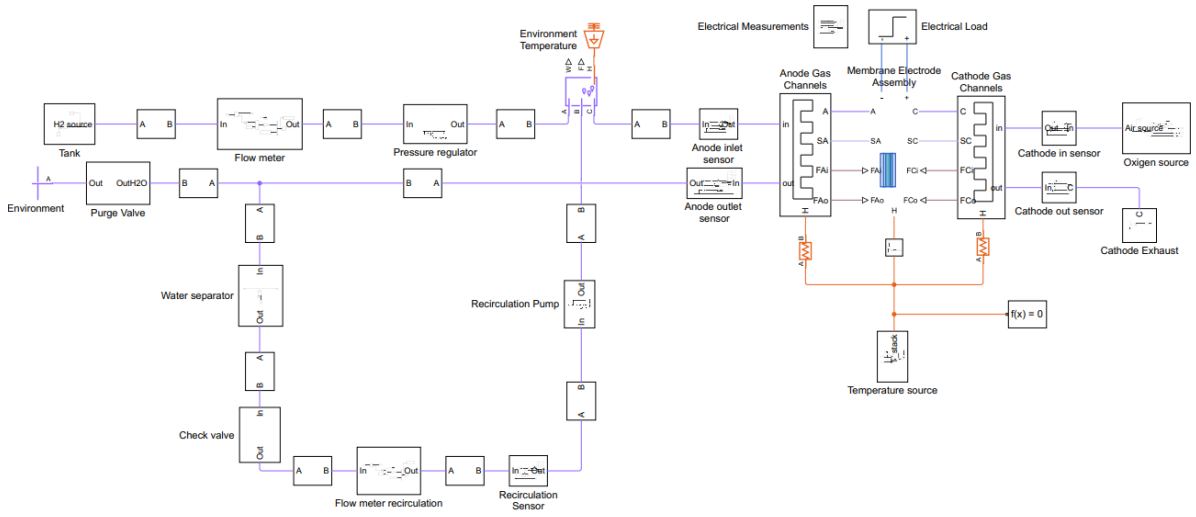


Abbildung 4: Integriertes BZ-Systemmodell in Simscape.

Die Simulation wurde in Matlab Simulink realisiert, basierend auf einem Beispielmodell von Matlab [3], das an die spezifische Systemtopologie angepasst und um fehlende Komponenten erweitert wurde. Eine Darstellung des entwickelten Modells ist in Abbildung 4 aufgezeigt. Auf der linken Seite der Abbildung sind die Komponenten zur Wasserstoffversorgung dargestellt, die mit dem Brennstoffzellenstapel in der Mitte verbunden sind. Das Simulationsmodell im Anodenkreislauf umfasst zudem die Ventile und die Rezirkulationspumpe, die auf Basis von Sensordaten aus geeigneten Prüfstandmessungen entwickelt wurden. Nicht modellierte Untersysteme, wurden durch reale Messdaten substituiert. Die elektronische Last oberhalb des Brennstoffzellenstapels erhält reale elektrische Stromdaten als zeitabhängige Eingangsgröße des Gesamtmodells. So ist es möglich, das Systemverhalten für verschiedene Strom- und Leistungsprofile bzw., Fahrzyklen zu simulieren. Neben der Spannung und Leistung des BZ-Stapels sind die Energiebedarfe der BoP-Komponenten, die Medienströme, Temperaturen und Drücke im Anodensystem simulierbar. Für den BZ-Stapel und den Anodenkreislauf sind die Validierungen anhand des Systems mit 24 Zellen und 48 Zellen BZ-Stapel abgeschlossen. Das Thermomanagementsystem (unterhalb des Stapels) wurde auf die Stapeltemperatur vereinfacht, d. h. mit der Temperatur des Kühlflüssigkeitsauslasses gleichgesetzt. Das Luftversorgungssystem rechts vom Brennstoffzellenstapel wurde auf die Sensordaten des Kathodeneinlasses hinsichtlich Temperatur, Druck und relativer Luftfeuchtigkeit vereinfacht. Wesentliche Datenquellen sind die Polarisationskennlinien, aus denen unter anderem Kennlinienfelder für die Rezirkulationspumpe abgeleitet wurden.

Das Simulationsmodell des BZ-Stapels wurde maßgeblich auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten aufgebaut. In wenigen Fällen waren Anpassungen über Vereinfachungen oder Korrekturfaktoren der physikalischen Formeln notwendig, um die Modellgenauigkeit zu optimieren. Diese Anpassungen resultierten aus dem beschränkten Zugang zu einigen für die Simulation erforderlichen Parametern des BZ-Stapels, da diese Betriebsgeheimnisse des Herstellers darstellen. Verschiedene Experimente mit 3 kW und 6 kW Brennstoffzellenstapeln (nom. Leistung) wurden durchgeführt, wobei die Daten des 3 kW Stapels zur Modellentwicklung und die des 6 kW Stapels zur Validierung der Skalierbarkeit verwendet wurden. Um die Aussagekraft der Modellierung zu validieren, wurde ein Vergleich mit realen dynamischen Messungen des Teststands und den Simulationsergebnissen durchgeführt.

Eine zentrale Erkenntnis war, dass signifikante Abweichungen für Simulationen mit generischen oder datenblattbasierten Werten auftreten können, wie insbesondere bei der Rezirkulationspumpe festgestellt wurde. Es wurde außerdem festgestellt, dass die Skalierung von der Simulation mit 24 Zellen auf 48 Zellen möglich ist, wie in Abbildung 5 dargestellt. Dennoch sind weitere Arbeiten erforderlich, um diese Skalierung zu optimieren und darauffolgende Ergebnisse zu validieren.

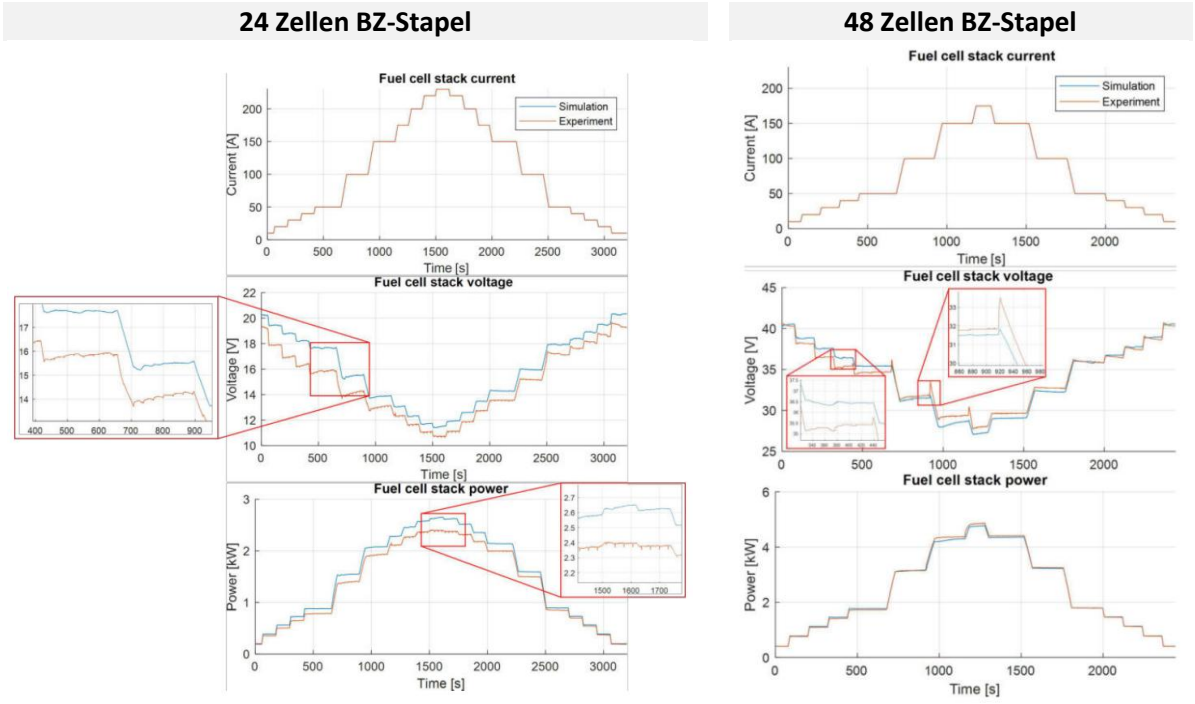


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Mess- und Simulationsergebnisse des elektrischen Verhaltens der Polarisationskurven für das BZ-System mit dem BZ-Stapel mit 24 Zellen (links) und 48 Zellen (rechts).

Die Simulationsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und experimentellen Leistungsdaten. Auch dynamische Nachfahrversuche (Drive Cycles) werden durch das Modell in hinreichender Qualität abgebildet, wie in Abbildung 6 demonstriert.

Die hervorgehobenen Bereiche zeigen starke dynamische Beanspruchungen, in denen das Modell das reale Verhalten nicht vollständig abbilden konnte. In diesem Kontext stößt das gewählte Modell des BZ-Stapels, welches als null-dimensionales statisches Polarisationskurvenmodell konzipiert ist, an seine Grenzen. Dieses Modell wurde einerseits umfassend in der Fachliteratur verwendet und validiert. Andererseits besteht die Möglichkeit, die Genauigkeit des Modells durch die Integration dynamischer Elemente, wie äquivalente Induktivitäten und Kapazitäten, erheblich zu verbessern. Eine solche Erweiterung könnte dazu beitragen, die dynamischen Anforderungen realer Betriebsbedingungen besser abzubilden und die Vorhersagegenauigkeit zu erhöhen.

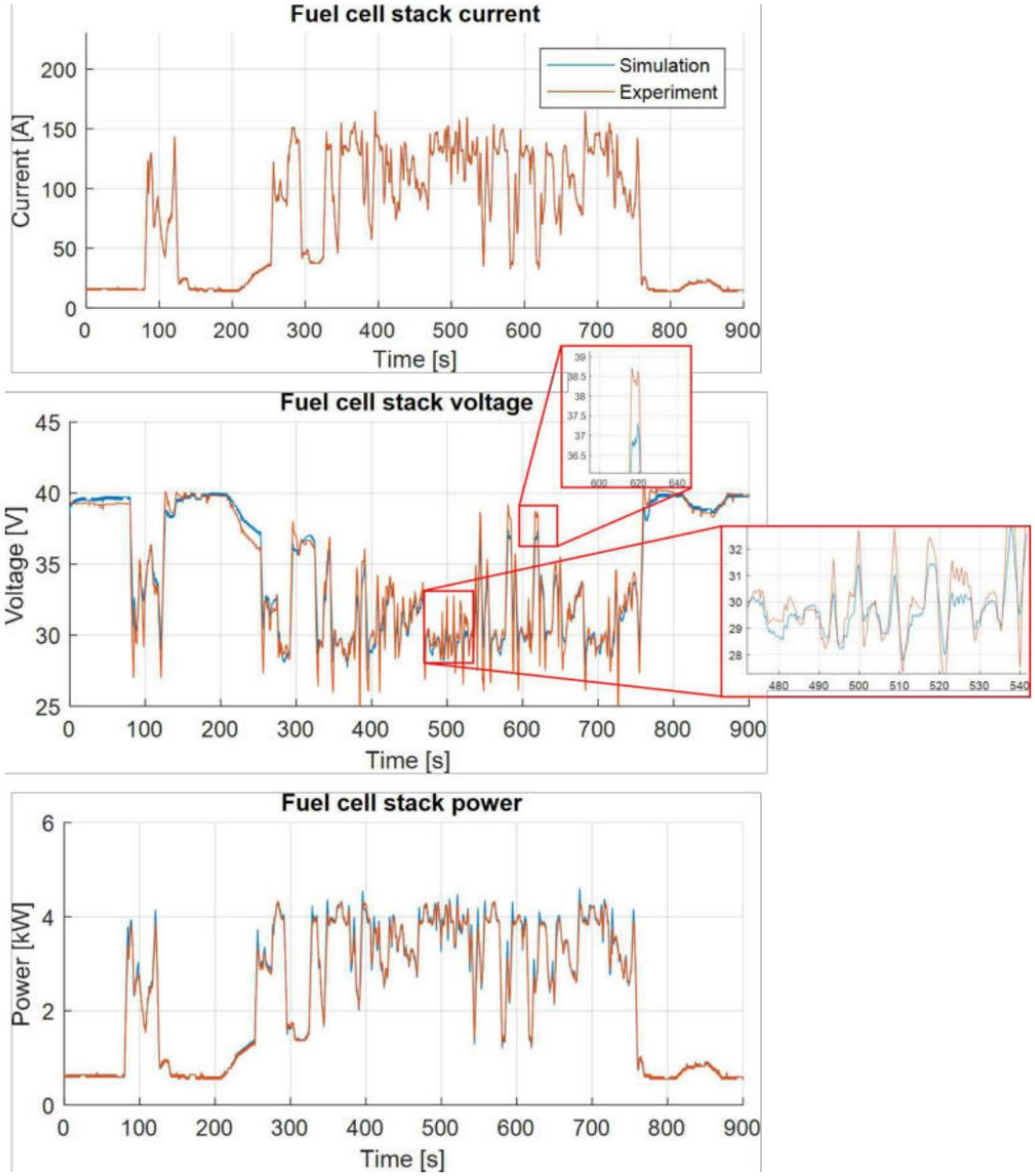


Abbildung 6: Gegenüberstellung der Mess- und Simulationsergebnisse des Nachfahrversuchs (Drive-Cycle mit 6 kW BZ-Stapel, 48 Zellen).

1.3 Untersuchung der Balance of Plant – Komponenten von Brennstoffzellensystemen

Das Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung der Energieeigenbedarfe und der individuellen physikalischen Parameter (Temperatur, Druck, Massenstrom etc.) der genutzten BoP-Komponenten, um eine Vorauswahl für die Nutzung im Brennstoffzellensystem zu ermöglichen. Die wesentlichen Parameter der Komponenten sollen in einer Datenbank festgehalten werden. Des Weiteren galt es die Wechselwirkungen zwischen den BoP-Komponenten und dem BZ-Stapel zu untersuchen, unter besonderer Berücksichtigung der physikalischen und technischen Effekte durch die Skalierung der Leistung.

1.3.1 Systemtopologie und Variabilität essenzieller Betriebsparameter

Zur Untersuchung der technischen und physikalischen Skaleneffekte von BZ-Systemen wurden drei unterschiedliche Systemgrößen betrachtet. Neben den BZ-Stapeln wurden in den drei Systemen auch die Verdichter getauscht, um die optimalen Betriebspunkte des jeweiligen Systems mit den am Markt verfügbaren Komponenten zu erreichen. Die BZ-Stapel nutzen Niedertemperatur-Polymerelektrolytmembranen (NT-PEM). Wie bereits in Abschnitt 1.1 beschrieben, wurde der Prüfstand eigens entwickelt, um die Ansteuerung der individuellen Komponenten der BZ-Systeme zu ermöglichen und eine hohe Flexibilität zu erreichen. Im Vergleich zu industriellen, am Markt erhältlichen Systemen wurden Modifikationen an der Systemstruktur vorgenommen. Diese Anpassungen ermöglichen eine Variation der essenziellen Betriebsparameter des BZ-Stapels im laufenden Betrieb. Hierzu zählen die Temperatur des Kühlkreislaufs, die Mediendrücke der Anode und Kathode und die Feuchte der Luftzufuhr des BZ-Stapels. In Abbildung 7 ist das Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema (R&I) dargestellt.

Im Kathodenkreislauf ist die Parallelschaltung aus Befeuchter (Membranbefeuchter) und einem elektrischen Proportionalventil zu erkennen, die eine geregelte Zufuhr trockener Luft zum Kathodeneingang ermöglicht. Hierdurch kann eine konstante Kathodeneingangsfeuchte über den gesamten Arbeitsbereich des BZ-Stapels eingestellt werden. Der Membranbefeuchter nutzt den Prozesswasserdampf im Ausgangsluftstrom des BZ-Stapels und gibt das darin enthaltene Wasser über eine Membran an den Eingangsluftstrom weiter. Dabei verhindert die Membran eine Durchmischung der übrigen Luftbestandteile.

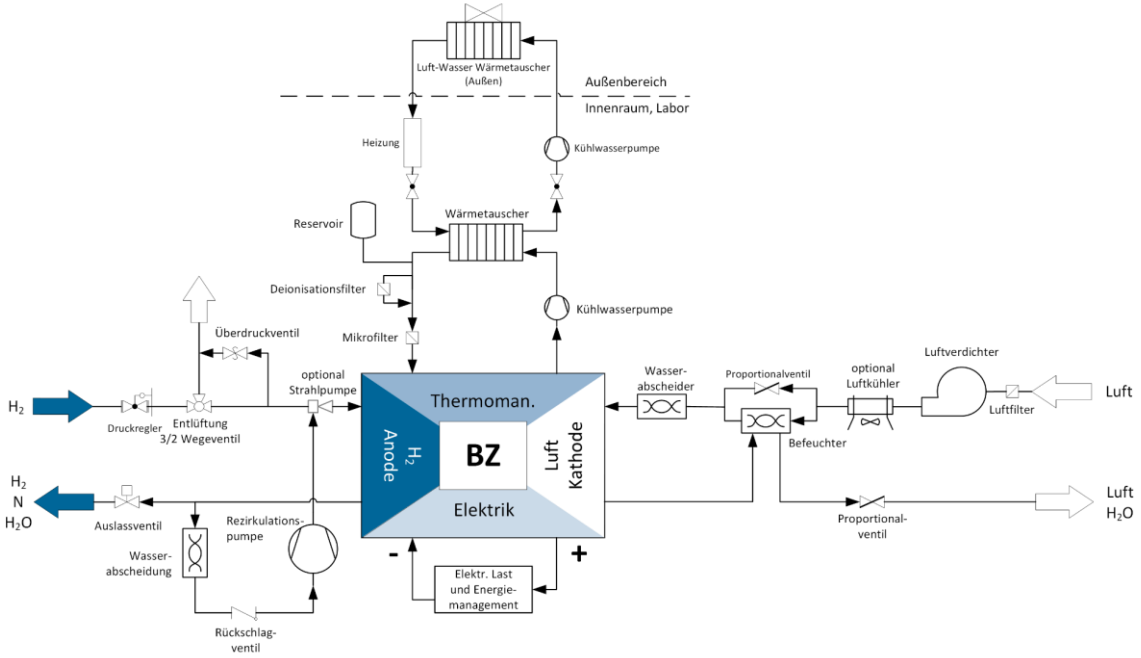


Abbildung 7: R&I der BZ-Systeme in vereinfachter Form. Die Sensoren und Komponenten, die nicht für die prinzipielle Funktion nötig sind, wurden zugunsten der Übersichtlichkeit ausgeblendet. Dem Anhang ist ein vollständiger R&I beigefügt.

Am Ausgang der Kathode befindet sich ebenfalls ein Proportionalventil. Es erfüllt die Funktion eines Vorderdruckventils, indem es zu einer Anstauung der Luft genutzt wird. Auf diesem Weg kann der Luftdruck im BZ-Stapel variiert werden. Das Ventil wird für den gesamten Leistungsbereich auf einer konstanten Öffnung gehalten, die für das jeweilige System so gewählt wurde, dass ein maximaler Luftdruck erreicht wird. Auf der Anodenseite wird ein Hinterdruckregler genutzt, der den Anodendruck an den jeweiligen Druck der Kathode (mit einer Differenz von 100 mbar) anpasst. Für die unterschiedlichen Systeme kann so der jeweils effizienteste Druck eingestellt werden.

Die Kühlung besteht aus zwei Kreisläufen, die über einen Plattenwärmetauscher gekoppelt sind. Dies ist nötig, um die beiden Regelungsgrößen für die unterschiedlichen Leistungen der BZ-Stapel variieren zu können: die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Ausgang und die absolute Eingangstemperatur. Die Nutzung zweier gekoppelter Kühlkreisläufe ermöglicht zudem, das Kühlmittelvolumen im Kreislauf, der mit dem BZ-Stapel verbunden ist, auf ein Mindestmaß zu begrenzen. Hier müssen Kühlmittel mit geringer Leitfähigkeit eingesetzt werden. Im zweiten Kühlkreislauf können für in der Fahrzeugtechnik gebräuchliche Komponenten und Kühlflüssigkeiten genutzt werden. Durch die Implementierung einer komplexen Regelstrategie für die Kühlmittelpumpen sowie den Lüfter des Luft-Wasser-Wärmetauschers konnte auf den sonst üblichen Einsatz einer Bypassleitung im äußeren Kühlkreislauf verzichtet werden. In automobilen Anwendungen wird der Volumenstrom des Bypasses durch ein Thermostat- oder Proportionalventil geregelt. Die gewählte Lösung ermöglicht eine bedarfsorientierte Temperaturregelung durch die gezielte Steuerung der Förderleistung und Luftdurchströmung ohne Effizienzeinbußen im System.

Die zuvor genannten Anpassungen ermöglichen den schlüssigen Vergleich der BZ-Systeme unterschiedlicher Leistungen.

Die Nutzung von Komponenten, die für den Einsatz in BZ-Systemen für automobile Anwendungen üblich sind, erhöht die Vergleichbarkeit mit fahrzeugspezifischen Systemen und entspricht dem Projektziel der Beachtung der Anforderungen für leichte Nutzfahrzeuge.

Hervorzuheben ist auch die Nutzung neuer Technologien, wie zum Beispiel den Wasserstoffkonzentrationssensoren am Ausgang der Kathode (Vitesco Technologies) und im Rezirkulationskreislauf der Anode (Archigas GmbH). Auf der Kathodenseite konnte ein Konzentrationssensor in unserem System getestet werden, der speziell für automobile BZ-Systeme entwickelt wurde. Die Anforderungen des Wasserstoff-Rezirkulationskreislaufes von Brennstoffzellensystemen, vor allem hinsichtlich der hohen Feuchte, sind üblicherweise ein Ausschlusskriterium für herkömmliche Konzentrationssensoren. Mit dem Partner Archigas GmbH war es möglich, einen neu entwickelten Sensor in unserem System zu testen und dessen Nutzbarkeit für den vorliegenden Anwendungsfall zu bestätigen. Der in Kooperation mit der HSRM entwickelte Wasserstoffsensor ist im Gegensatz zu anderen am Markt verfügbaren Sensoren in der Lage in feuchten Gasen 0 bis 100 % Wasserstoffkonzentration zu messen.

Die verwendeten Komponenten, mit relevanten Daten für die Auslegung, wurden in einem Repositorium[1] veröffentlicht.

[1] Repositorium der HSRM und der TU Darmstadt: https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/2546 Stichwort: cleanEngine

1.3.2 Vergleich der BZ-Systeme

Zum Vergleich der unterschiedlichen BZ-Systeme wurden zahlreiche Messungen durchgeführt. Darunter statische Messungen, wie Polarisationskennlinien oder Parametervariationen und dynamische Messungen, wie unter anderem Fahrzyklen. Vor Beginn der Vergleiche wurden zunächst die BZ-Stapel nach vergleichbaren Prozeduren eingefahren.

Für den Vergleich wurden drei Systeme mit BZ-Stapeln von desselben Modells mit variierenden Zellanzahlen genutzt. Die Membranfläche und damit die nutzbare maximale Stromstärke (234 A) der BZ-Stapel ist unabhängig von der Zellenanzahl und für die drei Stapel identisch. Die maximale nominelle Leistung der BZ-Stapel ist entsprechend 3 kW für den BZ-Stapel mit 24 Zellen, 6 kW für 48 Zellen und 9 kW für 72 Zellen. Die tatsächliche erreichbare maximale Leistung hängt von den im System vorliegenden Betriebsparametern ab. Für die Systeme mit 24 und 48 Zellen wurde ein Luftverdichter nach dem Prinzip eines Turboverdichters mit 700 W genutzt. Für das 72 Zellen-System wurde ein Turboverdichter mit 1000 W genutzt. Die übrigen Komponenten im System wurden beibehalten. Zuvor durchgeführte Versuche zeigten, dass der Luftverdichter der maßgebliche Verbraucher im BZ-System ist und die übrigen Komponenten einen geringeren Beitrag zur Systemleistung und der Effizienz haben.

Mit den Systemen wurden Polarisationskennlinien mit identischen Schrittweiten, Haltezeiten und maximalen Stromstärken durchgeführt. Währenddessen wurden sämtliche Sensordaten erfasst. Für die einzelnen Messpunkte des Diagramms (siehe Abbildung 8) wurden aus den im zeitlichen Verlauf aufgenommenen Messdaten die einzelnen Stromstärkeschritte gefiltert. Anschließend wurden die letzten 50 % der Messdaten eines Messschrittes gemittelt und die Standardabweichung bestimmt. Dies wurde für sämtliche Sensorwerte simultan durchgeführt. Das Verfahren zur Messdatenerhebung und -Auswertung ist angelehnt an Tsotrides et al. [4].

Für die dargestellten Messungen aus Abbildung 8 wurden jeweils identische Betriebsparameter gewählt, sofern diese einstellbar waren. Die Öffnung des Kathodenausgangsventils beträgt 25 % in den Systemen mit 24 und 48 Zellen und 75 % im System mit 72 Zellen und dem leistungsstärkeren Verdichter. Dieser unterscheidet sich auch im Verdichterkennfeld zu der Variante mit 700 W, wodurch es nötig war das Kathodenausgangsventil für einen zuverlässigen Betrieb weiter zu öffnen. Gleichzeitig konnte auf diesem Weg für alle Systeme der maximale Luftdruck im BZ-Stapel und damit auch die maximale Zellspannung und -effizienz erreicht werden. Die wesentlichen Betriebsparameter für den Vergleich sind in der Tabelle 2 verzeichnet.

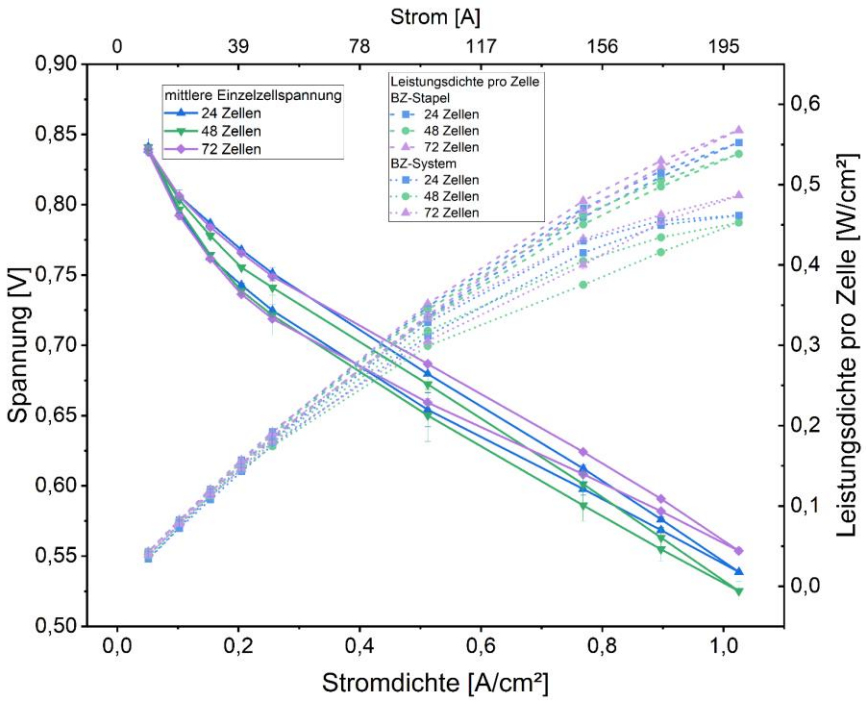


Abbildung 8: Polarisationskennline des BZ-Systems mit 24, 48, 72 Zellen. Darstellung der Spannung und der Leistungsdichte pro Zelle für den BZ-Stapel und das BZ-System.

Tabelle 2: Betriebsparameter bei der Aufnahme der Polarisationskennlinie

Parameter	Wert
Temperatur Kühlkreislaufeingang des BZ-Stapels	55 °C
Temperaturdifferenz	4 °C
Spülintervall	144 kWs
Dauer der Öffnung des Spülventils	1 s
Stöchiometrie Kathode	2
Stöchiometrie Anode	1,5
Kathodenausgangsventil	25 % (24, 48 Zellen) 75 % (72 Zellen)
Feuchte am Kathodeneingang	75 % rF
Stromänderungsrate	1 A/s

Aus den Sensordaten wurde für die jeweils aufgenommenen Kennlinien die Effizienz der BZ-Stapel und der jeweiligen Systeme bestimmt. Hierzu wurde der Wasserstoffbedarf anhand des Eingangsvolumenstroms ermittelt. Dieser enthält auch den Wasserstoffverbrauch durch die intervallmäßige Öffnung des Spülventils (engl. purge valve). Die Öffnung des Spülventils führt zu deutlichen Anstiegen des Wasserstoffvolumenstroms (bis zu Faktor 10), wodurch die Bestimmung der Standardabweichung der Mittelwerte der Effizienz zu sehr großen Werten führt. Diese wurden in der Abbildung 9 zugunsten der Übersichtlichkeit ausgeblendet. Um die Genauigkeit der Messung zu beurteilen, wurden wiederholt identische Messungen mit den gleichen Systemkonfigurationen und Betriebsbedingungen durchgeführt. Die Messergebnisse konnten so verifiziert werden. Durch die zeitabhängigen Spülvorgänge und die systembedingte mangelnde Möglichkeit, diese für jede Aufnahme der Polarisationskennlinie zu identischen Zeitpunkten stattfinden zu lassen, kommt es bei

der Effizienz teilweise zu deutlichen Unterschieden, die jedoch aufgrund der Höhe der Differenz leicht erkennbar sind. Die Ergebnisse aus der Effizienzbestimmung sind in Abbildung 9 dargestellt.

Wie auch bei den zuvor gezeigten Spannungs- und Leistungsdarstellungen zu erkennen, liegen die Effizienz-Kennlinien der Systeme bis auf wenige Ausnahmen übereinander. Vergleichbare Messungen mit unterschiedlichen Betriebsparametern desselben Systems führten zu größeren Unterschieden, als bei diesem Vergleich unterschiedlicher Systemleistungen zu beobachten ist.

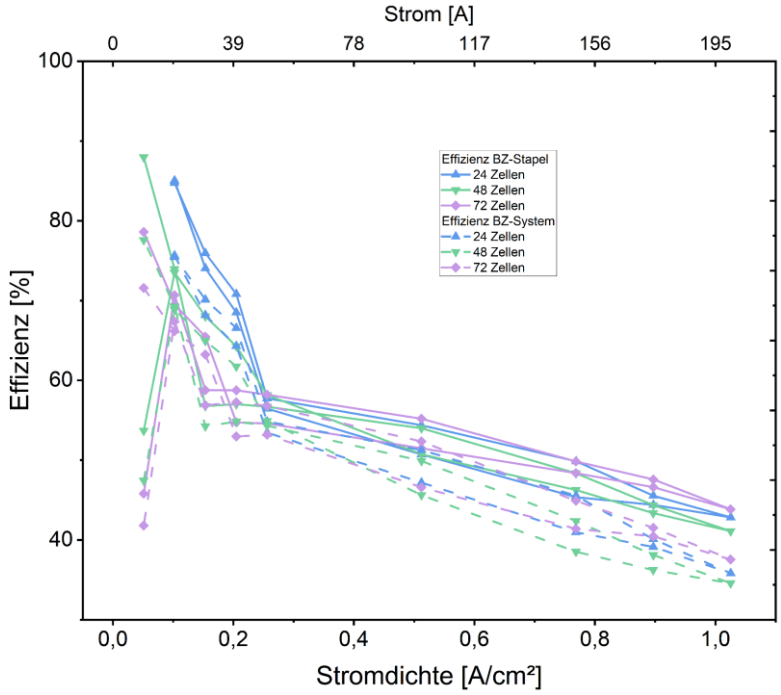


Abbildung 9: Gemessene Effizienzen des BZ-Systems mit 24, 48, 72 Zellen. Darstellung der Spannung und der Leistungsdichte pro Zelle für den BZ-Stapel und das BZ-System.

Für die Systemeffizienzen der verschiedenen statischen Kennlinien sind Abweichungen von unter 5 % zu beobachten. Es ist daraus zu schließen, dass eine Skalierung im vorliegenden Leistungsbereich ohne signifikante Effizienzeinbußen möglich ist, sofern die Betriebsparameter, Systemsteuerung und die Systemtopologie beibehalten werden. Daher ist durch diese Ergebnisse indiziert, dass Erkenntnisse und Anpassungen an einem System einer Leistung auf ein System abweichender Leistung übertragen werden kann, mit maximalen Effizienzabweichungen von $\pm$ 5 %.

In Abbildung 10 sind die einzelnen Leistungsbedarfe der verschiedenen BoP-Komponenten anhand des Messpunktes bei 150 A dargestellt. Der Messpunkt befindet sich im aufsteigenden Ast der Polarisationskennlinie und wurde im Verlauf der Kennlinienaufnahme für 4 Minuten gehalten. Zu erkennen ist, dass der Luftverdichter in allen drei Systemen die jeweils größte Leistung benötigt. Auffällig ist der geringe Unterschied der Leistung des Verdichters zwischen den Systemen mit 48 und 72 Zellen, der aus dem Wechsel des Verdichters und der veränderten Verdichterkennlinie resultiert. Weiterhin kann beobachtet werden, dass der Dachlüfter für den kleinsten BZ-Stapel (24 Zellen) für die betrachtete Messdauer nicht benötigt wird. Die passive Kühlung durch die Radiatoroberfläche ist ausreichend für die entstehende Wärme bei diesem Messpunkt. Der Leistungsbedarf der Rezirkulationspumpe ist im Vergleich zu den übrigen Verbrauchern vernachlässigbar. Die Leistung der genutzten Rezirkulationspumpe liegt bei allen Messpunkten unter 10 W. Die Standardabweichung der

Kühlmittelpumpe des äußeren Kühlkreislaufs ist vor allem in der Messung mit 72 Zellen deutlich größer. Dies resultiert aus der Regelung des Kühlkreislaufs, bei der die Drehzahl der Pumpe und somit die benötigte Leistung dynamisch variiert, um eine konstante Eingangstemperatur am BZ-Stapel zu gewährleisten.

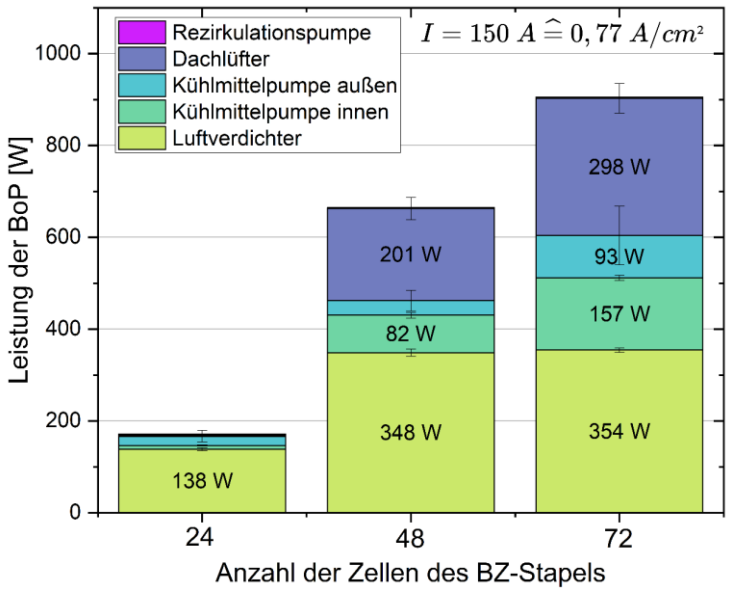


Abbildung 10: Vergleich der benötigten Leistung der BoP-Komponenten für den Messpunkt 150 A im aufsteigenden Bereich der Polarisationskennline. Die Leistung der Rezirkulationspumpe beträgt weniger als 5 W und kann im Diagramm nicht aufgelöst werden.

1.4 Entwicklung von Methodikansätzen für Predictive Maintenance an BZ-Systemen

Im Rahmen von Alterungsuntersuchungen ist es erforderlich, relevante Betriebsparameter zur Bestimmung des State of Health (SOH) der verschiedenen Balance of Plant - Komponenten zu erfassen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Untersuchung der Auswirkungen schneller Lastwechsel auf die Komponenten des Brennstoffzellensystems.

1.4.1 Alterungseffekte

Für die folgenden Versuche wurde ein BZ-System bestehend aus einem 24 Zellen BZ-Stapel und einem Turboverdichter mit 700 W maximaler Leistung genutzt, entsprechend der kleinsten Systemvariante aus dem vorangegangenen Kapitel. Der BZ-Stapel wurde zuvor genutzt, um die Einrichtung des BZ-Prüfstandes und sämtlicher Regelkreise zu testen und anzupassen. Er befand sich daher in einem undefinierten Zustand bezüglich der Alterung und schied somit für Vergleichsmessungen im Hinblick auf die Aspekte aus Abschnitt 1.3 aus.

Zur Bestimmung von Alterungseffekten wurden zwei verschiedenen Strategien betrachtet, um die Alterung der BZ-Stapel zu beschleunigen: Dauerbelastung mit Höchstlast und dynamische wechselnde Belastung.

Dauerbelastung mit Höchstlast

Die Belastung des BZ-Stapels mit der vom Hersteller angegebenen maximalen Stromdichte von 1,2 A/cm² (entsprechend 234 A) wurde als erste Methode untersucht, um Alterungseffekte des BZ-Stapels sowie der Systemkomponenten zu untersuchen. Dazu wurde das BZ-System an aufeinanderfolgenden Messtagen nach einer nächtlichen Erholungsphase über ca. 50 Stunden mit einer Stromstärke von 234 A betrieben. Zu Beginn und zu Ende des Messtages wurde eine Polarisationskennline nach dem in Abschnitt 1.3 beschriebenen Verfahren aufgenommen, um eventuelle Verringerungen der Zellspannung und somit der Effizienz zu bestimmen.

In Abbildung 11 sind ausgewählte Polarisationskennlinien aus den genannten Messungen dargestellt. Die Kennlinien zeigen im betrachteten Zeitverlauf keine signifikante Verringerung der Zellspannung. Es konnte somit keine Alterung bestimmt werden.

Auch an den übrigen BoP im System sind keine Ausfälle in diesem Zeitraum beobachtbar gewesen.

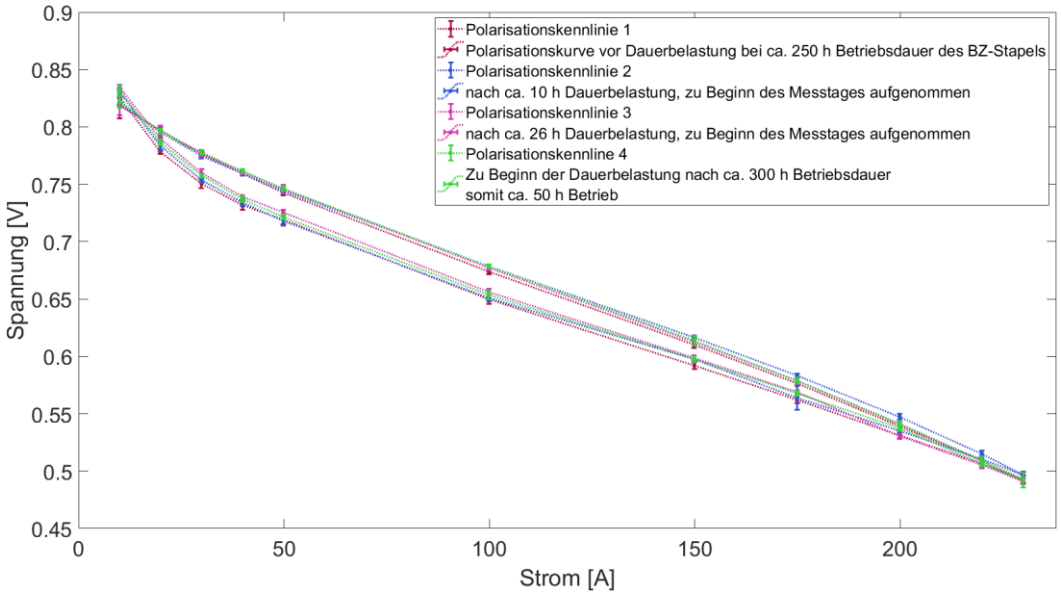


Abbildung 11: Darstellung mehrerer Polarisationskennlinien, aufgenommen im Verlauf der Dauerbelastung mit 234 A. Die Kennlinien wurden bis zu einem Maximalstrom von 230 A bei identischen Betriebsbedingungen aufgenommen. Die minimale Zellspannung liegt bei ca. 0,49 V.

Dynamische Belastung

Über einen Zeitraum von mehr als 125 h wurde der BZ-Stapel aus dem vorherigen Versuch mit einer zwischen 10 und 234 A wechselnden Stromstärke belastet. Dies entspricht der minimalen und maximalen Stromstärke, mit der der BZ-Stapel nach Herstellerangabe belastet werden darf. Die Stromänderungsrate betrug dabei 25 A/s. Auch bei diesem Dauerversuch wurde das System über Nacht heruntergefahren.

In Abbildung 12 ist der Verlauf der Zellspannung für die Stromstärke 150 A in diesem Zeitraum dargestellt. Die Spannungen wurden jeweils zu Beginn eines Messtages im Zuge der Aufnahme einer Polarisationskennlinie aufgenommen. Nach 125 h Betrieb ist mit diesem beschleunigten Alterungsverfahren ein Abfall der Zellspannung um ca. 18 mV bestimmbar. Die Vermutung liegt nahe, dass dies auf eine Alterung des BZ-Stapels zurückzuführen ist.

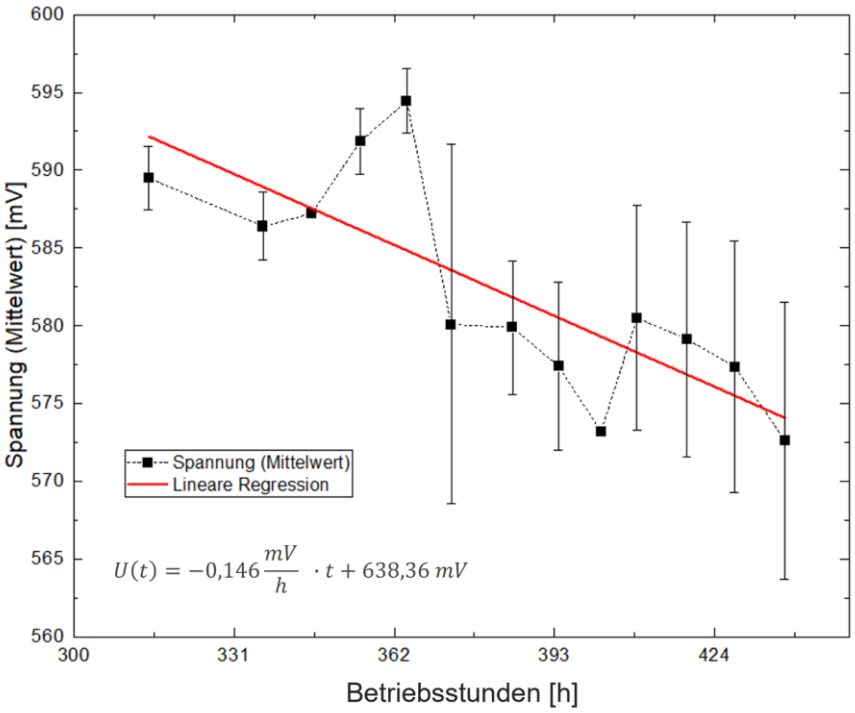


Abbildung 12: Entwicklung der mittleren Einzelzellspannung während der Untersuchung der beschleunigten Alterung durch dynamische Wechselbelastung des BZ-Stapels. Die Spannungen wurden bei einer Belastung des BZ-Stapels mit einer Stromstärke von 150 A aufgenommen.

Im betrachteten Zeitraum konnten weiterhin keine Ausfälle der BoP-Komponenten bestimmt werden. Bei langem Betrieb der BZ-Systeme hat sich in den Rohren und Schläuchen, sowie in dem Massendurchflussmesser im Rezirkulationskreislauf der Anode Wasser angesammelt, das zum Ausfall des Systems geführt hat. Diese Schwachstellen im Wassermanagement konnten durch Umordnung der Schlauchführung, einen zusätzlichen Kondensatableiter und die Beheizung des Massendurchflussmessers beseitigt werden.

Unter der Annahme, dass die gemessene Zellspannungsänderung auf die Alterung des BZ-Stapels zurückzuführen ist, war zu erwarten, dass eine weitere Betrachtung der Alterungseffekte durch die Nutzung beschleunigter Alterungszyklen innerhalb der Projektlaufzeit nicht zu verwertbaren Ergebnissen führen wird. In Anbetracht der weiteren Ziele des Projektes und des fortschreitenden Zeitplanes wurden weitere Untersuchungen anhand beschleunigter Alterungstests ausgesetzt. Im gesamten Zeitraum des Projektes konnte kein Ausfall und keine Degradation der BoP-Komponenten oder der Sensoren beobachtet werden, der oder die auf die Alterung der jeweiligen Komponente zurückzuführen ist.

1.5 Fahrversuche mit dem Testfahrzeug zur Validierung der Funktionstüchtigkeit der gefundenen Entwicklungsmethode

Die verschiedenen Antriebssysteme im Projekt sollen vergleichbare Fahrzyklen durchlaufen. Anhand der Fahrzyklen werden die Energieeigenbedarfe der einzelnen Systemkomponenten bestimmt und die Datenbank ergänzt. Der eigens entwickelte Fahrzyklus soll den Standards der Automobilindustrie entsprechen.

1.5.1 Fahrzyklus „Ulm“

Zum Vergleich der BZ-Systeme und zum Test des Erprobungsträgers wurde eine Fahrstrecke mit Start- und Endpunkt in Ulm ausgewählt. Der Fahrzyklus besteht aus ca. 12 % Stadt-, 64 % Überland- und 32 % Autobahnanteil. Die Gesamtstrecke beträgt ca. 100 km. Anhand der Messdaten aus der Fahrt des auf Basis eines VW T6 errichteten Wasserstoffhybridfahrzeugs, wurde am Antriebsstrangteststand der Hochschule Kempten (HKE) unter anderem die benötigte Motorleistung, die Leistung des BZ-Systems und der Batterie bestimmt.

Mit den Systemen der HSRM wurden dieser und weitere Fahrzyklen nachgefahren. Die Leistungsanforderungen an das BZ-System des Antriebsstrangs der HKE wurden herunterskaliert. Dazu wurde zunächst die maximale Systemleistung der BZ-Systeme der HSRM ermittelt und ins Verhältnis zu der maximalen Systemleistung des BZ-Systems der HKE (80 kW) gesetzt. In Tabelle 3 sind die Systemleistungen der drei bereits gezeigten Systemkonfigurationen zusammen mit den daraus resultierenden Skalierungsfaktoren aufgelistet.

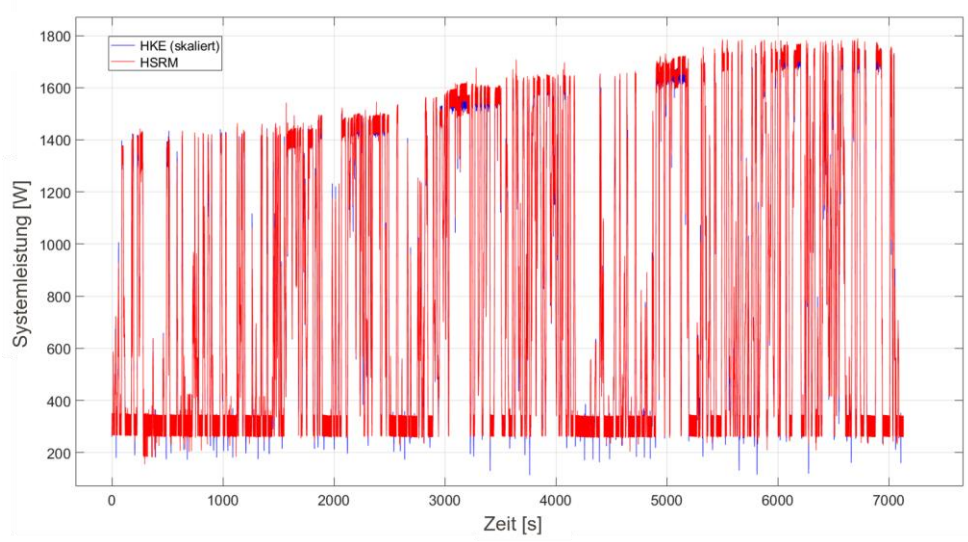
Tabelle 3: BZ-Systeme und Skalierungsfaktoren für den Vergleich der Leistungsbedarfe für die Fahrzyklen

Systemkonfiguration	Maximale Systemleistung	Skalierungsfaktor
24 Zellen BZ-Stapel 700 W Turboverdichter	2000 W	40,0
48 Zellen BZ-Stapel 700 W Turboverdichter	3500 W	22,9
72 Zellen BZ-Stapel 1000 W Turboverdichter	6500 W	12,3

Für den exemplarischen Vergleich der Kennlinien ist in Abbildung 13 die Systemleistung der HKE und des BZ-Systems mit 48 Zellen BZ-Stapel der HSRM im Verlauf des Fahrzyklus „Ulm“ dargestellt. Im Fahrzeug und am Prüfstand der HKE wird für die Fahrt des Zyklus eine maximale Systemleistung von 45 kW benötigt, weshalb in der Darstellung die maximal mögliche Systemleistung der HSRM in Höhe von 3500 W ebenfalls nicht erreicht wird.

Aus den Diagrammen in Abbildung 13 ist ersichtlich, dass die Leistungsanforderung aus dem BZ-System der HKE von dem System der HSRM mit hoher Genauigkeit abgebildet werden kann. Zur Quantifizierung der Abweichung wurde der Standardfehler der Regression (engl.: Root Mean Square Error; kurz: RMSE) aus beiden Kennlinien bestimmt. Der RMSE beträgt 43,9 W, was einer Abweichung von 5 % entspricht, bezogen auf den Mittelwert der jeweils gemittelten Leistungen des Systems der HKE und HSRM im Verlauf des Fahrzyklus. Der Unterschied der gesamten elektrischen Energie, die während des Zyklus erzeugt wurde, beträgt 35 Wh bzw. 2,32 % der Gesamtenergie (nach Skalierung auf die max. Systemleistung der HSRM).

a)



b)

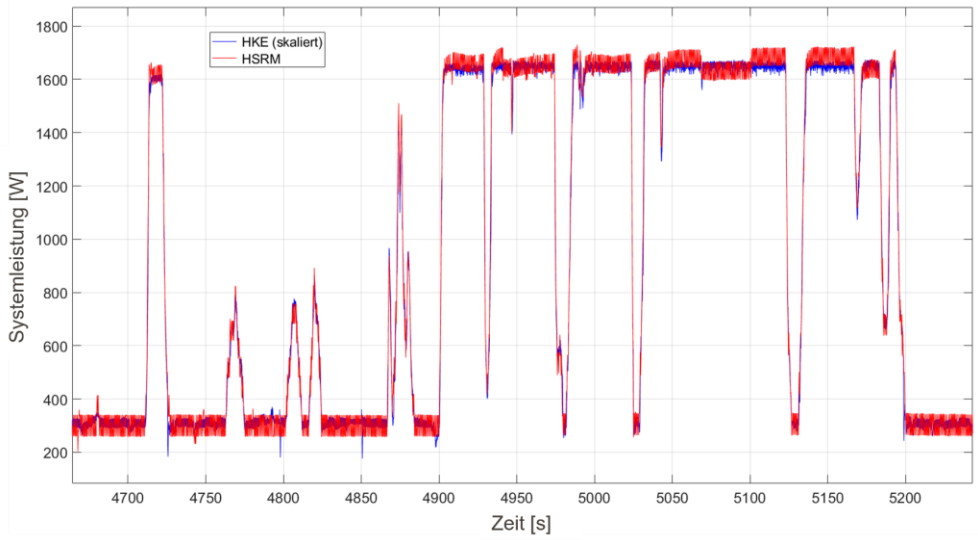


Abbildung 13: Dynamische Tests anhand des Fahrzyklus „Ulm". Vergleich der Systemleistung des BZ-Systems mit 48 Zellen-BZ-Stapel der Hochschule RheinMain (HSRM) und des BZ-Systems der Hochschule Kempten (HKE) herunterskaliert auf die maximale Systemleistung der HSRM. a) vollständiger Zyklus; b) Ausschnitt zur Verdeutlichung der Übereinstimmung der Kennlinien.

Der Unterschied der Systemwirkungsgrade zwischen dem System der HKE und der HSRM beträgt für diesen Zyklus 1,1 % bei einem absoluten Wirkungsgrad von 53,6 % der HKE und 52,5 % der HSRM.

Der Fahrzyklus „Ulm" entspricht vom Streckenprofil, der Maximalleistung und der geforderten Fahrdynamik den Anforderungen des Fahrzyklus nach dem „Worldwide harmonized light vehicles test Procedure" (WLTP). Der WLTP-Zyklus ist zum aktuellen Zeitpunkt der Industriestandard. Für die Anforderungen dieser Zyklen erreicht das System der HSRM vergleichbare Ergebnisse in Bezug auf die Dynamik, die Leistung und die Effizienz zu dem BZ-System der HKE.

Bei Versuchen mit dem hochdynamischen Zyklus „EPA US06[2]" sind deutliche Unterschiede in der Dynamik zu erkennen. Die Untersuchungen haben ergeben, dass dies auf die fortschrittlichere Regelung der Luftzufuhr und des Druckes der Toyota-BZ-Systeme zurückzuführen ist, die im

[2]EPA US06 Fahrzyklus: https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-us06-or-supplemental-federal-test-procedures-sftp

Antriebsstrangsystem der HKE und im Fahrzeug genutzt werden. Diese Unterschiede in der Luftregelung führen ebenfalls zu deutlicheren Abweichungen in der Gesamteffizienz.

Abschließend kann aus den gezeigten Daten und den erfolgten Untersuchungen geschlossen werden, dass eine Skalierung bezogen auf die Systemeffizienz mit Abweichungen von ± 10 % möglich ist. Dies wurde ermittelt anhand der Systeme der HSRM und der HKE die sich auch in der Topologie und vor allem im Funktionsprinzip der Luftverdichter unterscheiden. Im System der HKE wird ein Schraubenverdichter genutzt und im System der HSRM ein Turboverdichter. Da diese unterschiedliche Effizienz- und Leistungskennlinien besitzen, war ein höherer Effizienzunterschied im Vergleich zu den drei Systemgrößen der HSRM erwartbar.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für das Projekt CleanEngine wurden von der Hochschule RheinMain im Projektverlauf 619.132,65 € verausgabt. Davon bilden die Personalkosten mit 373.972,72 € den größten Kostenpunkt. Neben den Personalkosten sind vor allem die nötigen Investitionen zum Aufbau des Teststandes zu nennen. Insgesamt wurden 183.845,18 € an Komponenten zum Aufbau des Prüfstandes und der BZ-Systeme verwendet.

Neben den Personalkosten fielen die höchsten Kosten bei den Komponenten des Prüfstandes und der BZ-Systeme an. Hier sind vor allem die Kernkomponenten der BZ-Systeme zu nennen:

- Die verschiedenen Luftverdichter, darunter vor allem die Turboverdichter, die vergleichend getestet wurden, machten die größte Position aus. Aufgrund mangelnder Marktverfügbarkeit dieser Komponenten für den vorliegenden Leistungsbereich und die Anforderungen der BZ-Technologie, konnte hier nicht auf kosteneffizientere Modelle ausgewichen werden.
- Die BZ-Stapel sind ebenfalls kein Massenprodukt und für dieses Projekt war es wichtig, vergleichbare BZ-Stapel zu nutzen. Diese Anforderung führte neben der Beachtung des günstigsten Preises maßgeblich zur getroffenen Auswahl.
- Weitere nennenswerte Positionen sind die Rezirkulationspumpe zur effizienten Nutzung des Wasserstoffs im Anodenkreislauf, die Wasserabscheider und Kondensatableiter für ein optimiertes Feuchtigkeitsmanagement und die Proportionalventile für die Regelkreise der Befeuchtung und des Luftdruckes.

Weiterhin sind die Komponenten des Prüfstandes für die verschiedenen BZ-Systeme zu nennen:

- Die größte Einzelposition bildet hier die elektronische Last, die genutzt wird, um die Belastung des BZ-Systems zu simulieren, und so die Ermittlung der Systemantwort auf Fahrzyklen, dynamische und statische Belastungen ermöglicht.
- Zusammengenommen folgen darauf die Sensoren, darunter vor allem die Massendurchflussmesser, die Feuchtesensoren und die Einzelzell-Spannungsmessung. Sie werden benötigt, um die Energieflüsse im System zu ermitteln, die BZ-Systeme zu regeln und physikalische Zusammenhänge bestimmen zu können.
- Auch die SPS inklusive der benötigten Messkarten ist in diesem Zusammenhang eine nennenswerte Kostenposition. Zur Messdatenerfassung, der Steuerung der BZ-Systeme und der Prüfstandkomponenten wurde mit dieser SPS eine flexible und leistungsfähige Lösung gewählt.

- Weitere nennenswerte Positionen sind der Rechner zur Ansteuerung der SPS und zur flexiblen, mobilen Auswertung der verschiedenen Steuergeräte und Antriebe im Prüfstand, sowie der Rechner zur Simulation des BZ-Systems.

Für Verbrauchsmaterialien (0843) wurden insgesamt 35.907,81 € benötigt. Hiervon wurden der benötigte Wasserstoff und Kleinteile wie unter anderem Schlauch- und Rohrverbindungen, elektrische Komponenten sowie Halbzeuge beschafft, die im Zuge des Aufbaus des Teststandes und der BZ-Systeme benötigt wurden.

Die Kosten für Dienstreisen (0846) fielen mit 10.645,99 € deutlich geringer aus als geplant. Grund hierfür ist vor allem die Corona-Pandemie, die Reisetätigkeiten zu öffentlichen Veranstaltungen verhinderte.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die erfolgten Arbeiten wurden nach bestem Wissen und den Standards guter wissenschaftlicher Praxis durchgeführt, um die beantragten Ziele zu erfüllen. Die vorangegangenen Ausführungen beschreiben die erfolgten Arbeiten, erreichten Ziele und die Abweichungen von der ursprünglichen Planung, die aufgrund der im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse nötig waren. Die Untersuchung von vollständigen Brennstoffzellensystemen, wie hier in verschiedenen Ausführungen und Leistungsklassen geschehen, ist ein wenig erforschtes Gebiet. Die meisten veröffentlichten Untersuchungen im Bereich von Brennstoffzellen beziehen sich üblicherweise auf Einzelzellen und BZ-Stapel (meist mit wenigen Zellen). Reale Untersuchungen in vollständigen, vergleichbaren BZ-Systemen sind die Ausnahme, da diese Systeme viele Hürden durch die Anzahl und die Verfügbarkeit von BoP-Komponenten mit sich bringen. Ein Vergleich zwischen BZ-Systemen unterschiedlicher Leistungen, wie im vorliegenden Fall erfolgt, ist uns nicht bekannt. Für Unternehmen, die den Einstieg in diese Technologie suchen und Erfahrung an zunächst kleineren und folglich aus wirtschaftlicher Sicht mit geringerem Risiko behafteten BZ-Systemen sammeln möchten, sind Informationen über die Hochskalierung der Erkenntnisse von hoher Bedeutung.

Durch die weiterführende Anstellung von Herrn Kleber durch die Hochschule RheinMain ist sichergestellt, dass weitere Untersuchungen folgend auf die Projektergebnisse und weitere Veröffentlichungen folgen werden. Die Nutzung der Möglichkeiten des Systems in Kooperation mit den genannten Unternehmen und weiteren sich bereits andeutenden Kooperationen zeigt die Bedeutung und den Nutzen der erfolgten Förderung auf.

4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der Verwertungsplan wurde regelmäßig überprüft und aktualisiert.

Im Rahmen des Projektes kam es unter anderem zur Zusammenarbeit mit folgenden Unternehmen und Institutionen:

Archigas GmbH

Archigas GmbH ist ein Unternehmen, das sich auf Mikrosensorik (MEMS) und Gasanalyse spezialisiert hat. Im Rahmen des Projekts testete die Archigas GmbH seinen Sensor an dem Teststand, was zur Verbesserung ihrer Technologien beitrug. Die Erkenntnisse aus dem Projekt flossen in die Produktentwicklung ein, um die Effizienz und Nachhaltigkeit ihrer Systeme zu erhöhen.

Fraunhofer LBF

Im Rahmen des Projekts nutzte das Fraunhofer LBF den Teststand, um Versuche an Brennstoffzellenstapeln vorzubereiten, was zur Weiterentwicklung ihrer Technologien beitrug. In der Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer LBF konnte gezeigt werden, dass auch andere Brennstoffzellenstapel problemlos in das bestehende System integriert werden können. Die Veröffentlichung der Ergebnisse in Fachzeitschriften und die Teilnahme an Konferenzen erhöhten zudem die Sichtbarkeit und Reputation beider Institutionen. Weiterhin wurde die vorliegende Simulationsumgebung in Kooperation entwickelt und die Ergebnisse hieraus dienen zukünftig beiden Einrichtungen.

Lehre

Die im Projekt entwickelten Methoden und Ergebnisse wurden direkt in die Lehre an der Hochschule integriert. Neue Module und Praktika, die sich auf Brennstoffzellentechnologien konzentrierten, wurden eingeführt. Studierende profitierten in Abschluss- und Projektarbeiten von praxisnahen Projekten und konnten so ihre Kenntnisse in einem zukunftsträchtigen Bereich erweitern. Darüber hinaus bot die Zusammenarbeit mit Unternehmen wie Archigas GmbH und Fraunhofer LBF die Möglichkeit, theoretische Konzepte mit praktischen Anwendungen zu verbinden.

Konferenzen

Ergebnisse des Projektes konnten im Zuge des Workshops „Integration of Hydrogen Technologies into Regional Energy Systems“ (2025) des Zentrums für Energietechnik der Universität Bayreuth präsentiert werden. Durch die Fortführung der Anstellung von Herrn Maximilian Kleber als wissenschaftlicher Mitarbeiter finanziert aus Mitteln der Hochschule RheinMain, kann eine weitere Verwertung der Ergebnisse sichergestellt werden. In diesem Rahmen werden weitere Ergebnisse auf zwei weiteren Konferenzen präsentiert: dem Hydrogen Summit 2025 der Hochschule Kempten und der Hochschule RheinMain und dem Workshop „Brennstoffzelle, Batterie, elektrischer Antrieb – Anforderungen und Absicherung“ (2025) des Deutschen Verband für Materialforschung und -prüfung e. V.

Technologie-Reifegrad (engl. Technology Readiness Level, kurz: TRL)

Der entwickelte Modellteststand wurde erprobt und angepasst an die wechselnden Bedingungen durch die variierenden Komponenten der BZ-Systeme. Der Reifegrad des Modellteststandes wird mit 6-7 (TRL[3]) bewertet.

Die BZ-Systeme sind Testobjekte, die auf den Betrieb im Modellteststand ausgelegt sind. Der Reifegrad der entwickelten BZ-Systeme kann mit 4 (TRL) bewertet werden.

[3] Die Bewertungen erfolgen angelehnt an die DIN EN 16603-11:2020-02 Raumfahrttechnik - Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien (ISO 16290:2013, modifiziert).

5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Bereich der technischen und physikalischen Skalierungseffekte auf der Systemebene von Brennstoffzellen sind dem Zuwendungsempfänger keine Fortschritte an anderen Stellen bekannt geworden.

Im Bereich der Degradation von BZ-Stapeln und -Systemen erfolgen zahlreiche Arbeiten, mit dem Fokus auf BZ-Stapel, interne Degradationsmechanismen und die Bestimmung der Degradation bei dynamischen Belastungen, wie beispielsweise von Zhang X et al. [5] und Huang et al. [6].

Auch der Themenkomplex der Simulation von BZ-Stapeln und -Systemen ist hochdynamisch. Hier werden die meisten Veröffentlichungen getätigt. Vollständige Validierungen der einzelnen Systemkomponenten anhand realer Messdaten im resultierenden System, wie in diesem Projekt geschehen, konnte jedoch in keiner Veröffentlichung beobachtet werden.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Bisher erfolgte Veröffentlichungen:

- M. Kleber, *Performance Study of Fuel Cell Systems with Scaled Power Outputs.* Präsentation im Zuge des Workshops „Integration of Hydrogen Technologies into Regional Energy Systems“ der Universität Bayreuth, Zentrum für Energietechnik. Bayreuth, 2025.

6.1 Abschlussarbeiten und Projektarbeiten, die im Zuge des Projektes an der HSRM durchgeführt wurden

- L. Becker, *Erstellung eines semi-empirischen Modells eines Brennstoffzellenstacks mithilfe der elektrochemischen Impedanzspektroskopie.* Masterthesis. Rüsselsheim, 2022.
- J. Moormann, *Alterungsuntersuchung von Kühlmitteln und Materialien in BZ-Kühlsystemen.* Bachelorthesis. Rüsselsheim, 2022.
- M. L. Haber, *Simulation eines batterieelektrischen Antriebsstrangs.* Bachelorthesis. Rüsselsheim, 2023.
- A. Demir, *Auslegung von Ladeluftkühlern für Brennstoffzellensysteme.* Bachelorthesis. Rüsselsheim, 2023.
- T. J. Wechler, *Bewertung der Anwendbarkeit einer Drosselklappe oder eines Magnetventils zur Druckregulierung für die Kathodenseite eines PEM-BZ-Systems.* Projektarbeit. Rüsselsheim, 2024.
- J. Seidenfaden, *Entwicklung einer Feuchtigkeitsregelung für ein Brennstoffzellensystem.* Masterthesis. Rüsselsheim, 2024.
- F. F. Wahbe Murad, *Entwicklung eines digitalen Zwillings eines Brennstoffzellensystems*. Masterthesis. Darmstadt, 2024. Kooperation HSRM, Fraunhofer LBF, TU Darmstadt, Universidade de São Paulo.

- J. Moormann, *Optimierung des Spülintervalls eines BZ-Systems und Bestimmung der Wasserstoffverluste während eines Spülvorgangs*. Forschungsprojekt. Rüsselsheim, 2025.

6.2 Geplante Veröffentlichungen

- M. Kleber et al., *Systemic analysis of operating parameter variation of a fuel cell system*, 2025.
- M. Kleber et al., *Physical and technical scaling effects at fuel cell system level*, 2025.
- M. Kleber, J. Moormann, M. Enders et al., *Material properties and material durability for PEM-fuel cell cooling cycles*, 2025.
- M. Kleber, *Bestimmung der technischen Skaleneffekte an Brennstoffzellensystemen (PEM) unter Beachtung der Anforderungen leichter Nutzfahrzeuge*, Dissertation, 2026.

Literatur

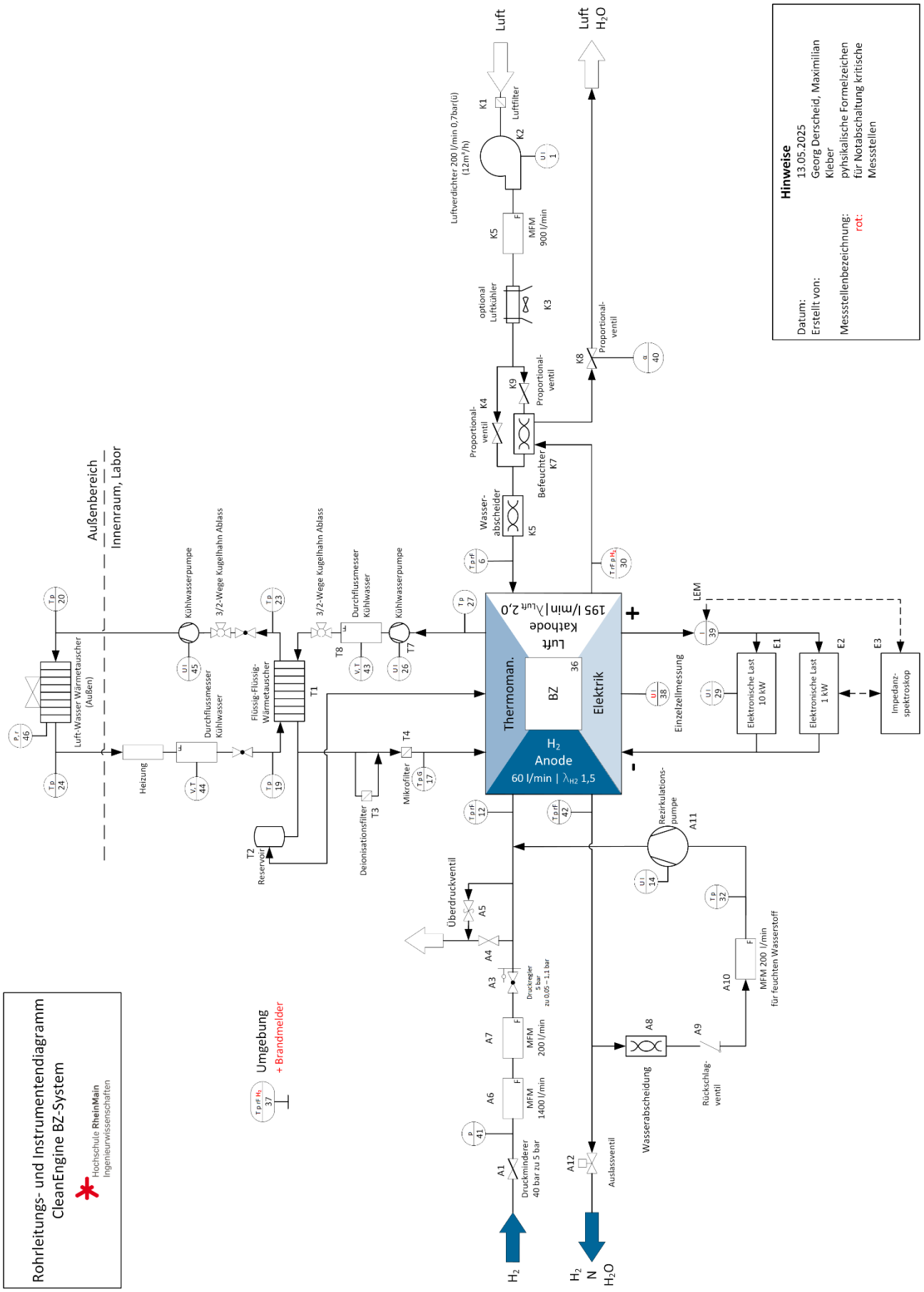
[1] J. Moormann, *Alterungsuntersuchung von Kühlmitteln und Materialien in BZ-Kühlsystemen.* Bachelorthesis. Rüsselsheim, 2022.

[2] F. F. Wahbe Murad, *Entwicklung eines digitalen Zwillings eines Brennstoffzellensystems*, Masterthesis, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2024.

[3] The MathWorks, Inc. https://de.mathworks.com/help/simscape/ug/pem-fuel-cell-system.html; Version 2024a, abgerufen am 13.05.2025.

[4] G. Tsotridis, A. Pilenga, G. de Marco und T. Malkow, *EU harmonised test protocols for PEMFC MEA testing in single cell configuration for automotive applications*, Europäische Gemeinschaften, Luxembourg, JRC science for policy report JRC99115, 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://op.europa.eu/s/nuzL, abgerufen am 13.05.2025.

[5] Zhang X, Huang L, Jiang Y, Lin L, Liao H, Liu W. Investigation of nonlinear accelerated degradation mechanism in fuel cell stack under dynamic driving cycles from polarization processes. Appl. Energy 2024;355:122286. https://doi.org/ 10.1016/j.apenergy.2023.122286.

[6] Lei Huang, Xuexia Zhang, Yu Jiang, Sidi Dong, Ruike Huang, Hongbo Liao, Shuangxi Tang. Degradation analysis of dynamic voltage response characteristics of proton exchange membrane fuel cells for health evaluation under dynamic load. Appl Energy 2025;389:125741. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125741.

Anhang A - R&I Diagramm