

KI Embedded

KI-Grundlagenentwicklung mit Leitanwendungen
Virtuelle Sensorik und Brennstoffzellenregelung

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Förderkennzeichen	19I21043B
Projektlaufzeit	01.09.2021 – 31.12.2024

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren

Stefan Keller
Janka Friese
Steve Dietze

Inhalt

I.	Kurze Darstellung	3
1	Aufgabenstellung	3
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
3.1	Projektaufbau	4
3.2	Veränderungen gegenüber der ursprünglichen Planung	6
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	6
	Auswahl eines Kurzstapels, Integration in einen Teststand und Charakterisierung.....	6
	Charakterisierung der Einzelzeldurchströmung	7
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
II.	Eingehende Darstellung	8
1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses	8
1.1	UAP5.3.ISE.1 Auswahl eines repräsentativen, (auto-)mobilen Kurzstapels, Beschaffung und Integration in einen Teststand	8
1.2	UAP5.3.ISE.2. Sensitivitätsanalyse im stationären Betrieb.....	10
1.3	UAP5.3.ISE.3. Charakterisierung des dynamischen Betriebsverhaltens des Brennstoffzellenstapels	12
1.4	UAP5.3.ISE.4. Charakterisierung der Einzelzeldurchströmung.....	17
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	22
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	23
4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	23
5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	24
6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	24
7	Literaturverzeichnis.....	24

I. Kurze Darstellung

Ziel des Projekts KI Embedded war es, neuartige KI-Verfahren zur Modellierung und Regelung zu entwickeln, die speziell für den Einsatz auf Embedded System Architekturen ausgelegt sind. Prototypisch wurde dabei der vom Konsortialführer Bosch entwickelte Hardwarebeschleuniger „DataFlow Architecture“ (DFA) verwendet und eine unterstützende Werkzeugkette bestehend aus Editor, Compiler, Simulationstools und Debugger entwickelt. Zur Demonstration des Potentials der entwickelten KI-Methoden wurden zwei Anwendungsfälle definiert von dem einer die modellbasierte Regelung des Brennstoffzellenstapels behandelte.

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE) übernahm hierbei die Beschaffung, Teststandintegration und Charakterisierung des Brennstoffzellenstapels, um die für die KI-Modelle notwendigen Realdaten zu generieren. Auch wurde das physikalische Modell des Konsortialpartners Otto von Guericke Universität Magdeburg (OvGU) mit den Messdaten validiert. Parallel entwickelte das Fraunhofer ISE eine neue Charakterisierungsmethode, bei der die Luft-Durchströmungsverteilung der einzelnen Zellen innerhalb eines Brennstoffzellenstapels mit Hilfe der elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) abgeschätzt werden kann.

1 Aufgabenstellung

Eine Brennstoffzelle stellt ein sehr komplexes, elektrochemisches System dar: Die Reaktionsgase müssen zu- und abgeführt werden. Dabei haben Stöchiometrie, Temperatur und Feuchte sowie Diffusionsverhalten erheblichen Einfluss auf das Betriebsverhalten (Thermodynamik). Die Reaktion selbst erfolgt elektrochemisch an der 3-Phasen-Grenze von Katalysator, Katalysatorsupport und Ionomer (Elektrochemie). Zugleich müssen Elektronen- und Protonentransport gewährleistet werden (Elektrik/Physik). Außerdem muss ein gutes Wasser- und Wärmemanagement gegeben sein (Thermodynamik).

Die genannten Prozesse finden über mehrere Größenskalen hinsichtlich der Dimension statt: Ein Katalysatorpartikel ist wenige Nanometer groß, während der gesamte Zellstapel ca. 0,5 m hoch ist. Gleichzeitig finden die Prozesse in unterschiedlichen Geschwindigkeiten statt: Von Elektronentransport im Bereich von Nanosekunden bis hin zu Degradationsvorgängen über viele Monate.

Daher war es eine Aufgabe im Vorhaben, einen Brennstoffzellenstapel hinsichtlich seines Betriebsverhaltens wissenschaftlich zu charakterisieren. Dies sollte im Sinne einer Sensitivitätsanalyse erfolgen, wobei der Einfluss von Kenngrößen wie Gasstöchiometrie, Gastemperatur, Gasfeuchte, Gasdruck jeweils auf Kathode und Anode und der Betriebstemperatur in Abhängigkeit des Lastpunktes untersucht wird. Diese Sensitivitätsanalyse erfolgte in stationären Betriebspunkten. Des Weiteren sollte das dynamische Verhalten des Brennstoffzellenstapels charakterisiert werden, in dem bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen Lastwechsel gefahren werden und die Antwort des Stapels erfasst wird. Ziel war die Erzeugung von Messdaten eines realen Brennstoffzellenstapels in verschiedenen Betriebszuständen. Die Daten sollten sowohl als Rohdaten an die Projektpartnern übergeben, als auch in Form von Berichten dargestellt und ausgewertet werden. Diese Daten sollten einerseits zum Training der KI-Modelle der Projektpartner und andererseits zur Validierung der von den Verbundpartnern entwickelten Modelle dienen.

Darüber hinaus sollte zusätzlich eine neue Charakterisierungsmethode entwickelt werden, die mit Hilfe der Impedanzspektroskopie Einschätzungen zur Strömungsverteilung des Luftvolumenstroms auf einzelne Zellen innerhalb eines Brennstoffzellenstapels erlaubt.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Mobile Anwendungen befinden sich in einer rasanten Transformation. Die Auswirkungen des Klimawandels ergeben die Notwendigkeit neuer, emissionsfreier Antriebslösungen in der Mobilität. Hier kann die Brennstoffzelle durch Ihre effiziente Umwandlung chemischer in elektrische Energie einen wesentlichen Beitrag leisten.

Entsprechend könnte vielerorts Wasserstoff in Zukunft eine wichtige Rolle spielen und insb. im Bereich des Schwerlastverkehrs ist die technologische Konkurrenzfähigkeit und das ökonomische Potential von Brennstoffzellensystemen sehr hoch. Allerdings sind Brennstoffzellen schwieriger zu modellieren und effizient zu regeln, da die physikalischen Prozesse einerseits langfristiger zusammenhängen, andererseits noch schwerer für Instrumentierung zugänglich sind.

Die hohe Komplexität einerseits, die benötigte Genauigkeit andererseits legen daher den Einsatz von KI-Verfahren nahe, die sich bereits in der Vergangenheit in der Modellierung und Steuerung von Verbrennungsmotoren bewährt haben. Im Unterschied zum Verbrennungsmotor liegen jedoch für die Brennstoffzelle bei weitem noch nicht so viele Daten und Erfahrungswerte vor, weshalb die wissenschaftliche Charakterisierung der Brennstoffzelle und die damit einhergehende Datengenerierung einen wichtigen Beitrag im Projekt darstellt.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung des Projekts KI Embedded erfolgte durch den Konsortialführer Robert Bosch GmbH. Das Projekt war auf eine Laufzeit von 34 Monaten konzipiert. Es startete am 1. September 2021. Durch Personalengpässe und Verzögerungen in der Lieferung des Brennstoffzellenstapels wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts notwendig. Nach Verlängerung endete es fristgemäß zum 31.12.2024.

3.1 Projektaufbau

Das Projekt KI Embedded wurde anhand zweier Dimensionen strukturiert. Zum einen wurde die logische Abfolge der Entwicklung berücksichtigt, wie sie in der Umsetzung in kommerziellen Anwendungen zum Einsatz kommen würden. Zum anderen wurden die Entwicklungsschritte anhand von beispielhaften Anwendungen zur Überprüfung und Plausibilisierung begleitet.

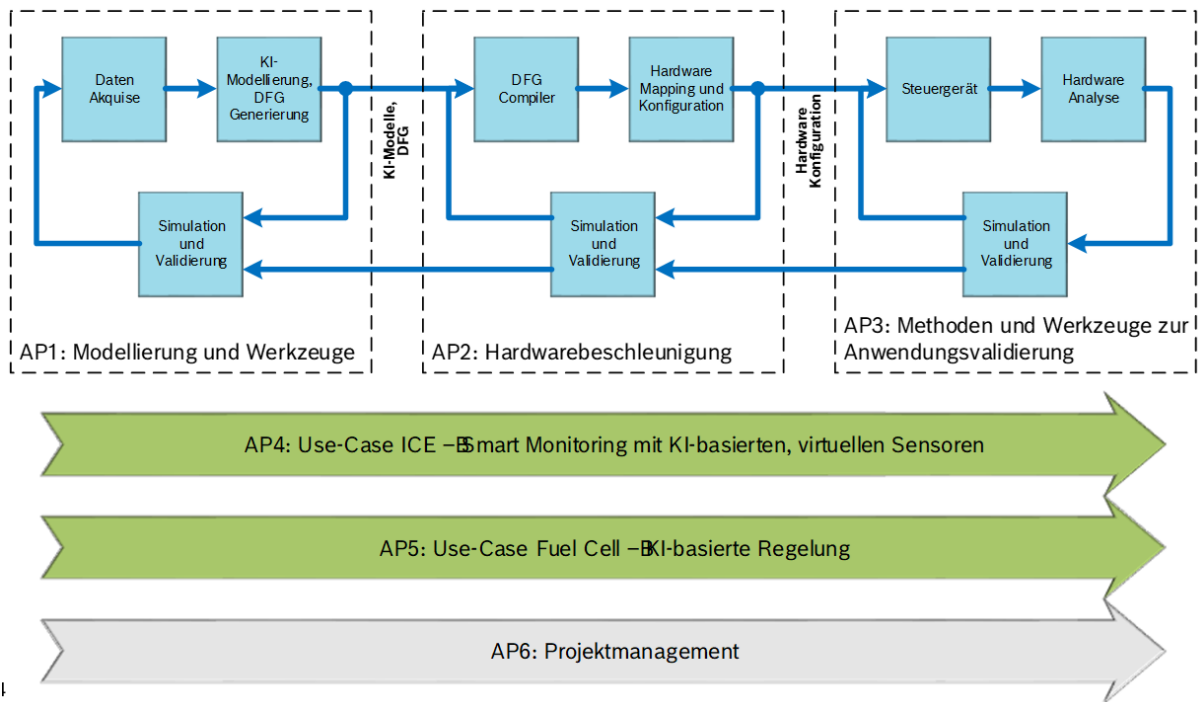


Abbildung 1: Gliederung des Projekts KI Embedded anhand von Arbeitspaketen

Die Beiträge der unterschiedlichen Partner erstrecken sich in der Gliederung in Abbildung 1 über mehrere Arbeitspakete (AP), so dass für eine inhaltliche Zuordnung der Beiträge Abbildung 2 dienlicher ist.

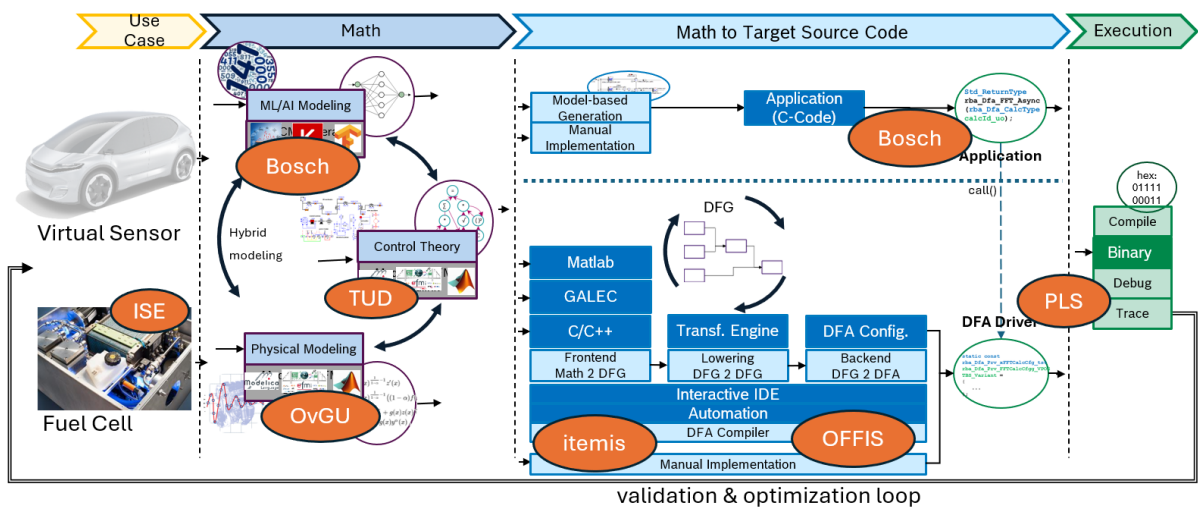


Abbildung 2: Bestandteile des Projekts KI Embedded und Zuordnung der Partner zu den Hauptinhalten ihrer Beiträge

Alle Beiträge des Fraunhofer ISE fanden innerhalb des AP 5: Use-Case Fuel Cell statt und wurden in vier Arbeitspakete aufgeteilt:

1. UAP5.3.ISE.1 Auswahl eines repräsentativen, (auto-)mobilen Kurzstapels, Beschaffung und Integration in einen Teststand.
2. UAP5.3.ISE.2 Sensitivitätsanalyse im stationären Betrieb (Durchführung im Rahmen eines Unterauftrags von Bosch).
3. UAP5.3.ISE.3 Charakterisierung des dynamischen Betriebsverhaltens des Brennstoffzellenstapels.
4. UAP5.3.ISE.4 Charakterisierung der Einzelzelldurchströmung

Darüber hinaus erfolgte in Arbeitspaket UAP5.1.ISE.1. die Unterstützung der Aktivitäten zur Modellierung der anderen Projektpartner.

3.2 Veränderungen gegenüber der ursprünglichen Planung

Während der Projektlaufzeit ergaben sich durch Lieferschwierigkeiten, Personalmangel und Entwicklungen im Bereich der KI-Verfahren Umstände, die zu leichten Abweichungen vom ursprünglichen Plan geführt haben. Diesen Abweichungen wurde in einer aktualisierten Vorhabenbeschreibung Rechnung getragen, welche zusammen mit dem kostenneutralen Verlängerungsantrag umgesetzt wurde.

Das Fraunhofer ISE übernahm im Konsortium die experimentellen Arbeiten an einem Brennstoffzellenstapel um reale Messdaten als Grundlage für die Softwaremodelle der Projektpartner zu liefern.

Aufgrund der zeitnahen Verfügbarkeit wurde hierzu zunächst ein Brennstoffzellenstapel des Projektpartners Bosch verwendet. Mit diesem Stapel erfolgten Testläufe zur Abstimmung der Regelkreise, Überprüfung der Sensorik und Aktorik sowie zur Definition der verfügbaren Datenkanäle. Ebenso erfolgten mit diesem Stapel Messungen zur Umsetzung erster Designs of Experiments im Rahmen von UAP5.3.ISE.2 welchem von Projekt-partner Bosch definiert wurden.

Durch die IP-Situation dieses Stapels konnten die Daten jedoch nicht vollumfänglich veröffentlicht werden. Daher wurde parallel die Beschaffung zweier Stapel einer Brennstoffzellenplattform angestoßen, welche ein sogenanntes generisches Design besitzt und deren Geometrie- und Materialdaten weitestgehend veröffentlicht werden können (generischer Stapel oder open design stack). Um im Konsortium und im Hinblick auf angestrebte Veröffentlichungen die Messdaten möglichst vollumfänglich teilen zu können, wurde mit allen betreffenden Partnern des AP 5 beschlossen, die Messungen der UAP5.3.ISE.2 bis UAP5.3.ISE.4 mit diesen Stapeln durchzuführen.

Gefertigt wurden sie vom Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) in Kooperation mit der EKPO Fuel Cell Technologies GmbH. Da es sich um eine neue Entwicklung handelt, verzögerte sich die Beschaffung der Stapel massiv weshalb die Meilensteine E5.3.ISE.c und E5.3.ISE.d nicht mehr zum ursprünglich geplanten Projektende 30.06.2024 erreicht werden konnten.

Daher wurde im Konsortium eine kostenneutrale Verlängerung um 6 Monate abgestimmt und beantragt. Dem Antrag wurde statt gegeben so endete das Projekt zum 31.12.2024 unter Erreichung der aller ursprünglich geplanter Meilensteine.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Auswahl eines Kurzstapels, Integration in einen Teststand und Charakterisierung

Am Fraunhofer ISE sind mehrere Teststände für Brennstoffzellen-Kurzstapel verfügbar. Diese wurden für die Charakterisierung der Brennstoffzellenstapel verwendet und können sämtliche relevanten Parameter wie z.B. Temperatur, Druck oder Feuchte im für Brennstoffzellen relevanten Bereich einstellen.

Als Brennstoffzellenstapel wurde der generische Stapel ausgewählt. Das Design dieses Stapels wurde im Rahmen des vom Umweltministerium Baden-Württemberg geförderten „HyFaB“-Projekts als offene Entwicklungsplattform vom ZSW in Ulm zusammen mit einem Industriepartner realisiert. Die Spezifikationen sind mit der Automobil- und Zulieferindustrie erarbeitet worden. Größe und Design

des Stack Konzepts entsprechen, was die Leistungsdichte angeht, den im Automobilbereich eingesetzten Brennstoffzellensystemen. Damit stand ein „State of the Art Stapel“ inklusive detaillierter Informationen zu wesentlichen Designmerkmalen für die Experimente zur Verfügung. Die Integration des Stapels in die Teststandumgebung ist in Abbildung 3 dargestellt:

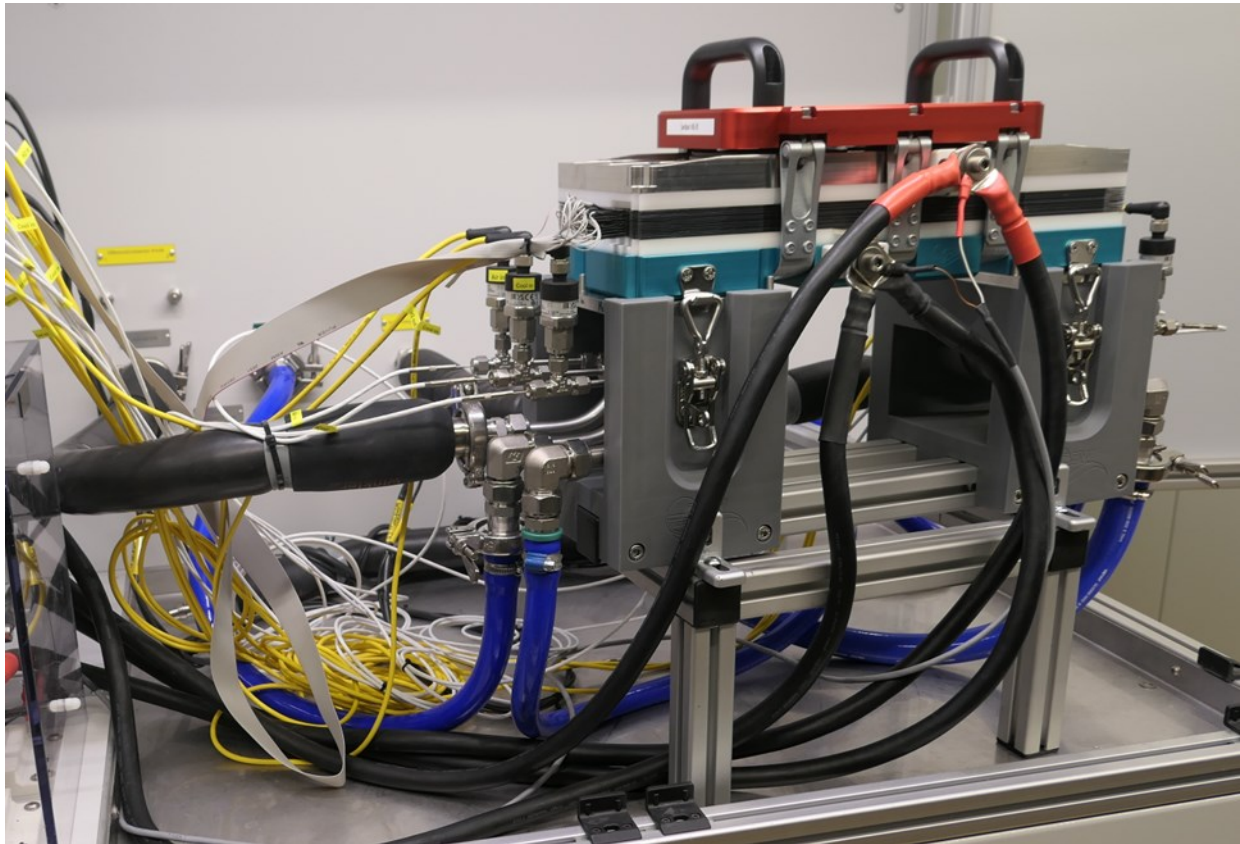


Abbildung 3: Integration des generischen Stapels mit 20 Zellen in den Teststand

Charakterisierung der Einzelzelldurchströmung

Ein Brennstoffzellenvollstapel kann aus bis zu 500 oder mehr Einzelzellen bestehen, die alle über eine zentrale Versorgungsöffnung angeströmt werden. Um eine robuste und effiziente Betriebsführung des Brennstoffzellenstapels zu erreichen, ist die gleichmäßige Durchströmen der einzelnen Zellen von großer Bedeutung: Die einzelnen Brennstoffzellen sind elektrisch in Reihe geschaltet, entsprechend müssen alle denselben elektrischen Strom liefern. Würde jedoch eine Zelle zu wenig Reaktionsgase bekommen, würde diese die Leistungsfähigkeit des ganzen Stapels begrenzen.

Mit der Einzelzelldurchströmung können somit die Effekte von Stapeldesign und Interaktion mit der Betriebsführungsstrategie bzw. der Regelung analysiert werden. Hierzu findet die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) Verwendung. Vorarbeiten zur Extraktion typischer Zeitkonstanten mit Hilfe der EIS-Spektren existierten bereits am Fraunhofer ISE und wurden für diese Arbeiten genutzt, vgl. (Keller Stefan, 2018)

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Beiträge des Fraunhofer ISE beschränkten sich auf AP 5 mit den Partnern Bosch, OvGU und TU Darmstadt. Absprachen zur Entwicklung der Arbeiten zum Anwendungsfall Brennstoffzellenstapel wurden dabei in Teams-Meetings im Zwei-Wochen-Turnus getroffen. Die Gesamtkoordination ergab

sich durch monatliche Teams-Meetings der jeweiligen Projektleiter und durch halbjährige Treffen vor Ort an einem der Projektstandorte.

Der Austausch der Messdaten mit den Projektpartnern erfolgte über den vom Konsortialführer Bosch eingerichteten SharePoint welcher den Up- und Download auch großer Datenmengen erlaubte. Die Messdaten wurden in lesbarer Form als *.csv Dateien abgelegt und ihre Struktur unter den beteiligten Partnern abgestimmt, so dass trotz unterschiedlicher Datenverarbeitungssoftware jeder die Daten nutzen konnte.

II. Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

Die Arbeiten des Fraunhofer ISE fanden innerhalb des AP 5 zur Generierung von Messdaten und Etablierung einer neuartigen Charakterisierungsmethode statt. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag dabei auf folgenden Themen:

Die Integration eines Brennstoffzellenstapels des Projektpartners Bosch in den Teststand wurde erfolgreich abgeschlossen. Es fanden Validierungsmessungen für die Design of Experiment Modellierungen des Projektpartners Bosch statt.

Ein generischer Brennstoffzellenstapel wurde beschafft und in den Teststand integriert. Die Charakterisierung des Stapels erfolgte unter Verwendung einer Sensitivitätsanalyse bei statischen Bedingungen.

Messungen unter speziellen Bedingungen wurden durchgeführt, um das physikalische Modell des Projektpartners OvGU zu validieren. Darüber hinaus fanden Messungen unter dynamischen Bedingungen statt, um die Vorhersagen eines datenbasierten Modells des Projektpartners Bosch mit dem realen Verhalten des Prüflings zu korrelieren.

Eine Methode zur Abschätzung der Einzelzeldurchströmung wurde entwickelt, die auf der elektrochemischen Impedanzspektroskopie basiert.

Die Arbeiten werden im Folgenden anhand der in der Vorhabensbeschreibung des Projektes definierten Unterarbeitspakete detailliert dargestellt:

1.1 UAP5.3.ISE.1 Auswahl eines repräsentativen, (auto-)mobilen Kurzstapels, Beschaffung und Integration in einen Teststand

Definition geeigneter Brennstoffzellenstapel und vorbereitende Integration

Für die geplanten Messungen wurde ein Teststand mit einer Auslegungsgröße von 10 kW verwendet. Gleichzeitig sollte ein Brennstoffzellenstapel dem aktuellen Stand der Technik entsprechend eingesetzt werden. Aus diesen Randbedingungen ergab sich eine sinnvolle Größe des Brennstoffzellenstapels von 20 Zellen.

Hinsichtlich möglicher Lieferanten fand eine Abstimmung zwischen Fraunhofer ISE und Bosch am 8. Dezember 2021 statt. Im Vorfeld hatte das Fraunhofer ISE die technischen Daten für in Frage kommende Stapel recherchiert. Die Auswahl fiel auf drei Stapellieferanten, die zu einer möglichen Beschaffung angefragt werden sollten, siehe Abbildung 4.

Brennstoffzellenstapel

Mögliche Kandidaten - Produkte

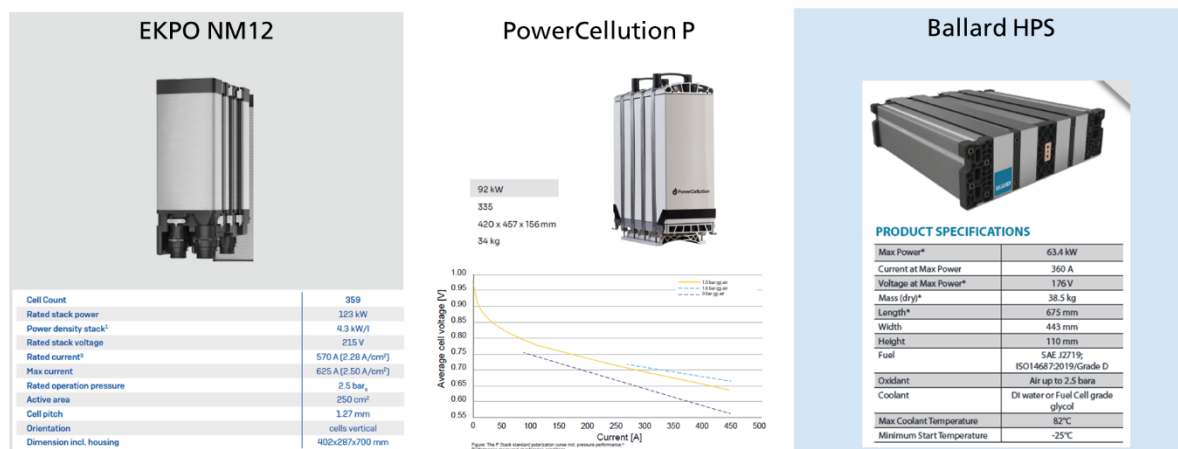


Abbildung 4: Auswahl möglicher Brennstoffzellenstapel

Aufgrund einer Fraunhofer-weiten Umstellung der Organisationssoftware auf SAP konnten im Dezember keine Bestellvorgänge mehr ausgelöst werden. Hierdurch verzögerte sich die Beschaffung des Zellstapels und dessen Integration in den Teststand, die Integration konnte jedoch schon vorbereitet werden:

Am Fraunhofer ISE stand ein 20-zelliger Brennstoffzellenstapel mit deutlichen Degradationsmerkmalen aus einem abgeschlossenen Projekt zur Verfügung. Mit diesem Stapel konnte die Integration in den Teststand getestet, die Grundabstimmung der Regelkreise vorgenommen und erste Algorithmen zur Automatisierungssoftware erstellt werden.

Beschaffung und Integration generischer Stapel, temporäre Nutzung eines kommerziellen Stapels:

Im weiteren Projektverlauf ergab sich die Möglichkeit, einen Brennstoffzellenstapel mit generischem Design zu verwenden. Entsprechend sollten für diesen Stapel sämtliche notwendigen technischen Daten erhältlich sein und veröffentlicht werden dürfen. Dies betraf insbesondere die Flussfeldgeometrie, welche für die Einzelzelldurchströmung und die physikalische Modellierung höchst interessant ist. Unerwartete Verzögerungen bei der Beschichtung der Bipolarplatten, Schwierigkeiten bei Teilschritten der Stapelfertigung beim Lieferanten sowie die hohe Nachfrage nach dieser Brennstoffzellenplattform führten zu einer deutlich späteren Lieferung der beiden bestellten Stapel als ursprünglich angenommen. Schlussendlich wurden sie in KW2 2024 ans Fraunhofer ISE geliefert und in die Teststandumgebung integriert, siehe Abbildung 3. Dabei zeigte sich, dass ein Stapel über eine defekte Zelle verfügte, der zweite Stapel konnte jedoch problemlos in Betrieb genommen werden.

Um die Zeit bis zur Lieferung der generischen Stapel sinnvoll zu nutzen, stellte der Projektpartner Bosch einen kommerziellen Stapel für Tests zur Verfügung, deren Messdaten auch ohne detaillierte Informationen über das Stapeldesign nutzbar waren. So konnten insbesondere Messungen für UAP5.3.ISE.3 bearbeitet werden. Der Stapel ist integriert in den Teststand in Abbildung 5 dargestellt.

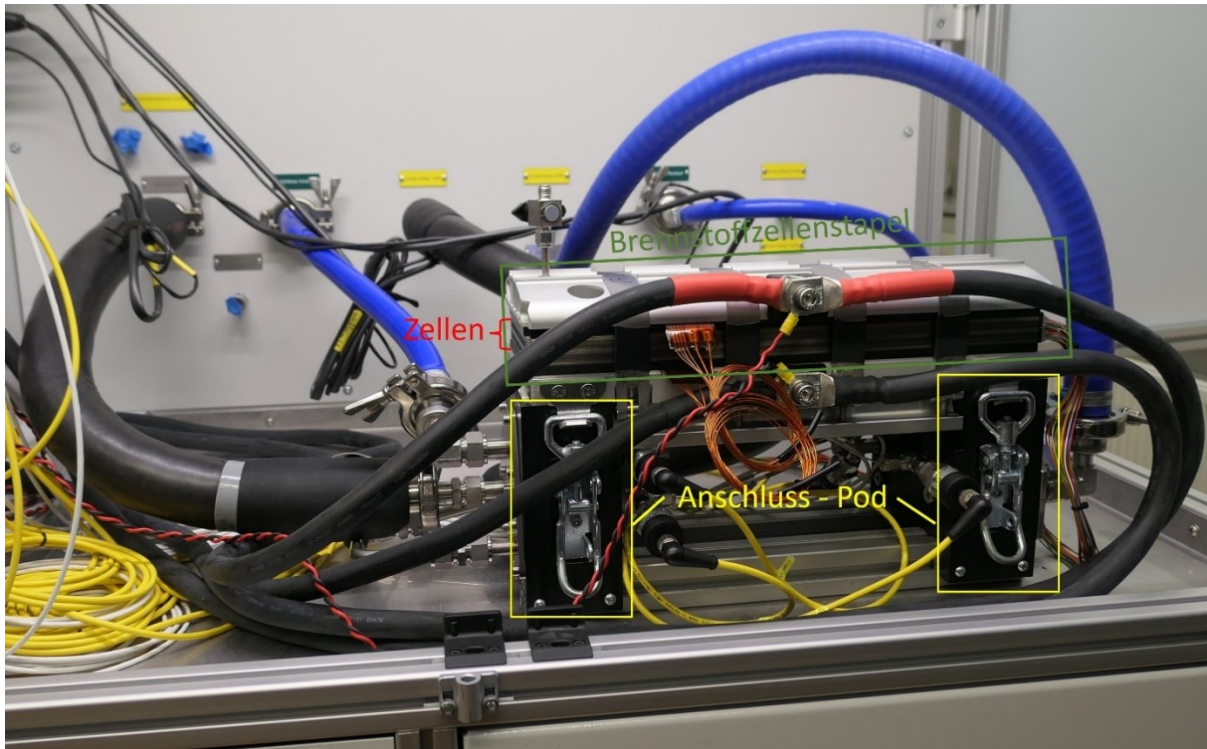


Abbildung 5: Temporäre Integration eines kommerziellen Brennstoffzellenstapels des Projektpartners Bosch für erste dynamische Messungen

1.2 UAP5.3.ISE.2. Sensitivitätsanalyse im stationären Betrieb

Testplanung

Die Leistungsfähigkeit eines Brennstoffzellenstapels wird wesentlich durch die vorherrschenden Betriebsbedingungen bestimmt. Ziel ist, für eine vorgegebene Strombelastung eine möglichst hohe Stapelspannung zu erreichen, um so die Leistung und die Effizienz des Stapels zu maximieren. Zu den wesentlichen Parametern gehören dabei:

- Druck Anode und Kathode (p.Si.A und. p.Si.C)
- Stöchiometrie Anode und Kathode (Stoic.S.A und Stoic.S.C)
- Feuchte Anode und Kathode (RH.Si.A und RH.Si.C)
- Kühlmitteltemperatur (T.Si.Cl)

Die Durchführung der Sensitivitätsanalyse erfolgte mit dem generischen Stapel. Er wurde zunächst in einem nominalen Arbeitspunkt entsprechend den Herstellervorgaben betrieben. Anschließend wurde einer der oben genannten Parameter variiert, während die restlichen Parameter konstant blieben. Dies geschah für vier unterschiedliche Lastpunkte und bei drei unterschiedlichen Kühlmittleingangstemperaturen. Somit entsprach dieses Vorgehen den Empfehlungen, wie sie im Rahmen des EU-Projektes „StackTest“ zur industrieweit einheitlichen Testung von PEM Brennstoffzellenstapeln erarbeitet wurden (ZSW, 2015). Die Testplanung ist in Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1: Ursprünglich geplante Versuchsdurchführung der Sensitivitätsanalyse und nicht erreichte bzw. abgeänderte Betriebspunkte

T.Si.Cl °C	I.S A	p.Si.A bara	p.Si.C bara	Stoic.S.A	Stoic.S.C	RH.Si.A %	RH.Si.C %	Test points
50	85	p.Si.C + 0.2	1.1, 1.8, 2.3, 2.8, 3.2	9.0, 6.0, 3.0, 2.4, 1.8	6.0, 3.3, 2.6, 2.0, 1.5	35,50, 75,100	35,50, 75,100	23
50	284	p.Si.C + 0.2	1.3, 1.8, 2.3, 2.8, 3.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.6, 1.3	35,50, 75,100	35,50, 75,100	23
50	426	p.Si.C + 0.2	1.3, 1.8, 2.3, 2.8, 3.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.6, 1.3	35,50, 75,100	35,50, 75,100	23
50	568	p.Si.C + 0.2	1.6, 1.8, 2.3, 2.8, 3.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.2	3.0, 2.4, 2.0, 1.6, 1.3	35,50, 75,100	35,50, 75,100	22
65	85	p.Si.C + 0.2	1.1, 1.8, 2.3, 2.8, 3.2	9.0, 6.0, 3.0, 2.4, 1.8	6.0, 3.3, 2.6, 2.0, 1.5	35,50, 75,100	35,50, 75,100	23
65	284	p.Si.C + 0.2	1.3, 1.8, 2.3, 2.8, 3.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.6, 1.3	35,50, 75,100	35,50, 75,100	23
65	426	p.Si.C + 0.2	1.3, 1.8, 2.3, 2.8, 3.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.6, 1.3	35,50, 75,100	35,50, 75,100	23
65	568	p.Si.C + 0.2	1.6, 1.8, 2.3, 2.8, 3.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.2	3.0, 2.4, 2.0, 1.6, 1.3	35,50, 75,100	35,50, 75,100	22
80	85	p.Si.C + 0.2	1.1, 1.8, 2.3, 2.8, 3.2	9.0, 6.0, 3.0, 2.4, 1.8	6.0, 3.3, 2.6, 2.0, 1.5	35,50, 75,100	35,50, 75,100	23
80	284	p.Si.C + 0.2	1.3, 1.8, 2.3, 2.8, 3.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.6, 1.3	35,50, 75,100	35,50, 75,100	23
80	426	p.Si.C + 0.2	1.3, 1.8, 2.3, 2.8, 3.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.6, 1.3	35,50, 75,100	35,50, 75,100	22
80	568	p.Si.C + 0.2	1.6, 1.8, 2.3, 2.8, 3.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.2	3.0, 2.5, 2.0, 1.6, 1.3	35,50, 75,100	35,50, 75,100	18

Ergebnisse

Die ursprüngliche Versuchsplanung musste zur Laufzeit angepasst werden, da einige Punkte aufgrund eines zu hohen Druckabfalls bzw. eines instabilen Betriebs nicht realisiert werden konnten. Diese Punkte sind in Tabelle 1 weiß markiert. Insgesamt ergaben sich 268 verschiedene Betriebspunkte des Stapels die in ca. 30 h vermessen wurden und aufgrund der Datenerfassungsrate von 1 Hz mehr als 100.000 Zeitpunkte mit allen relevanten Sensordaten generierten. Damit wurde eine gute Datenbasis für das Verhalten des Brennstoffzellenstapels geschaffen.

Im Laufe des UAP5.3.ISE.2 wurde eine ergänzende Messkampagne durchgeführt, bei der zusätzlich zu den oben aufgeführten Messwerten auch der Hochfrequenzwiderstand des Stapels gemessen wurde. Dieser Wert spiegelt sehr gut die Protonenleitung der Membran wider und ist damit ein Indikator für die Stapelfeuchtigkeit, eine interne Größe, die nicht direkt gemessen werden kann, für die Modellierung jedoch sehr wichtig ist. Um die Datenbasis zu vergrößern, wurden hierzu zwei neue Temperaturbereiche 60 °C und 70 °C bei sonst gleicher Vorgehensweise abgedeckt. Dies erfolgte in Abstimmung mit den Projektpartnern Bosch und OVGU, die Ergebnisse beider Messungen sind zusammengefasst in Abbildung 6 dargestellt:

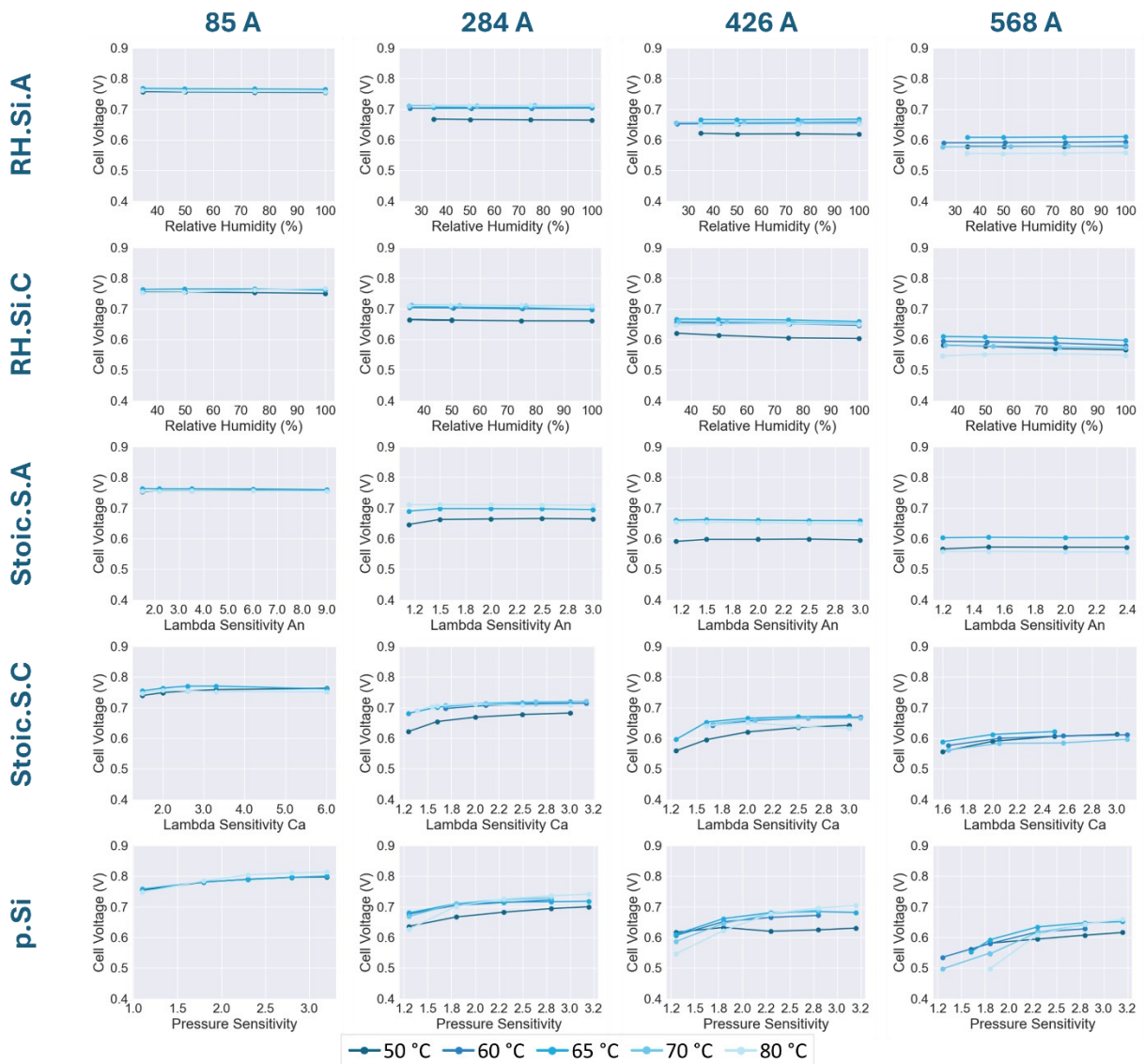


Abbildung 6: Zusammenfassende Darstellung der Sensitivitätsanalyse mit den Zusatzmessungen bei 60 °C und 70 °C

Wie erwähnt ist für eine gegebene Strombelastung die Stapelspannung der wesentliche Indikator für die Leistung und die Effizienz des Brennstoffzellenstapels. Um die Normierung auf eine einzelne Zelle und damit eine bessere Vergleichbarkeit verschiedener Stapel zu erreichen, wurde für die weitere Auswertung die Stapelspannung durch die Anzahl der Zellen im Stapel (20) geteilt und der Verlauf der mittleren Zellspannung über die Parametervariation dargestellt. So konnte schnell ermittelt werden, welcher Parameter den größten Einfluss hat. Aus Abbildung 6 lässt sich gut erkennen, dass die Parameter Druck (p.Si) und Stöchiometrie der Kathode (Stoic.S.C) die größten Auswirkungen auf die Leistung und Effizienz des Brennstoffzellenstapels hatten.

1.3 UAP5.3.ISE.3. Charakterisierung des dynamischen Betriebsverhaltens des Brennstoffzellenstapels

In diesem Arbeitspaket wurden die Messungen in Abstimmung mit dem Konsortialpartner Bosch durchgeführt und die Messdaten den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Designs of Experiments

Diese Arbeitsschritte dienten der Erzeugung von realen Messdaten, welche zur Validierung der Designs of Experiments (DoE) des Partner Bosch verwendet werden konnten. Hierzu erstellte Bosch mehrere DoEs welche im Teststand umgesetzt und mit dem Brennstoffzellenprüfling abgefahren wurden. Aufgrund der Lieferverzögerungen des generischen Stapels kam für die in diesem Unterkapitel beschriebenen Messungen ein von Bosch zur Verfügung gestellter kommerzieller Stapel zum Einsatz, siehe auch UAP5.3.ISE.1 Auswahl eines repräsentativen, (auto-)mobilen Kurzstapels, Beschaffung und Integration in einen Teststand.

Ziel der DoEs war die Prozessoptimierung, um möglichst viele Informationen in einer gegebenen Testzeit über den Prüfling zu erhalten. Hierzu lieferte ein spezieller Algorithmus die Sollwerte für Drücke, Massenströme, Befeuchtung, Temperaturen und elektrische Belastung sowie deren zeitlichen Verlauf. Durch dieses optimierte Abfahren bestimmter Sollwertkombinationen kann ein breiter Parameterraum in möglichst kurzer Zeit erfasst werden. Abbildung 7 zeigt einen umgesetzten Verlauf. Oben im Bild ist die Vorgabe für die einzelnen Parameter durch das DoE zu sehen, unten die Messdaten der experimentellen Umsetzung.

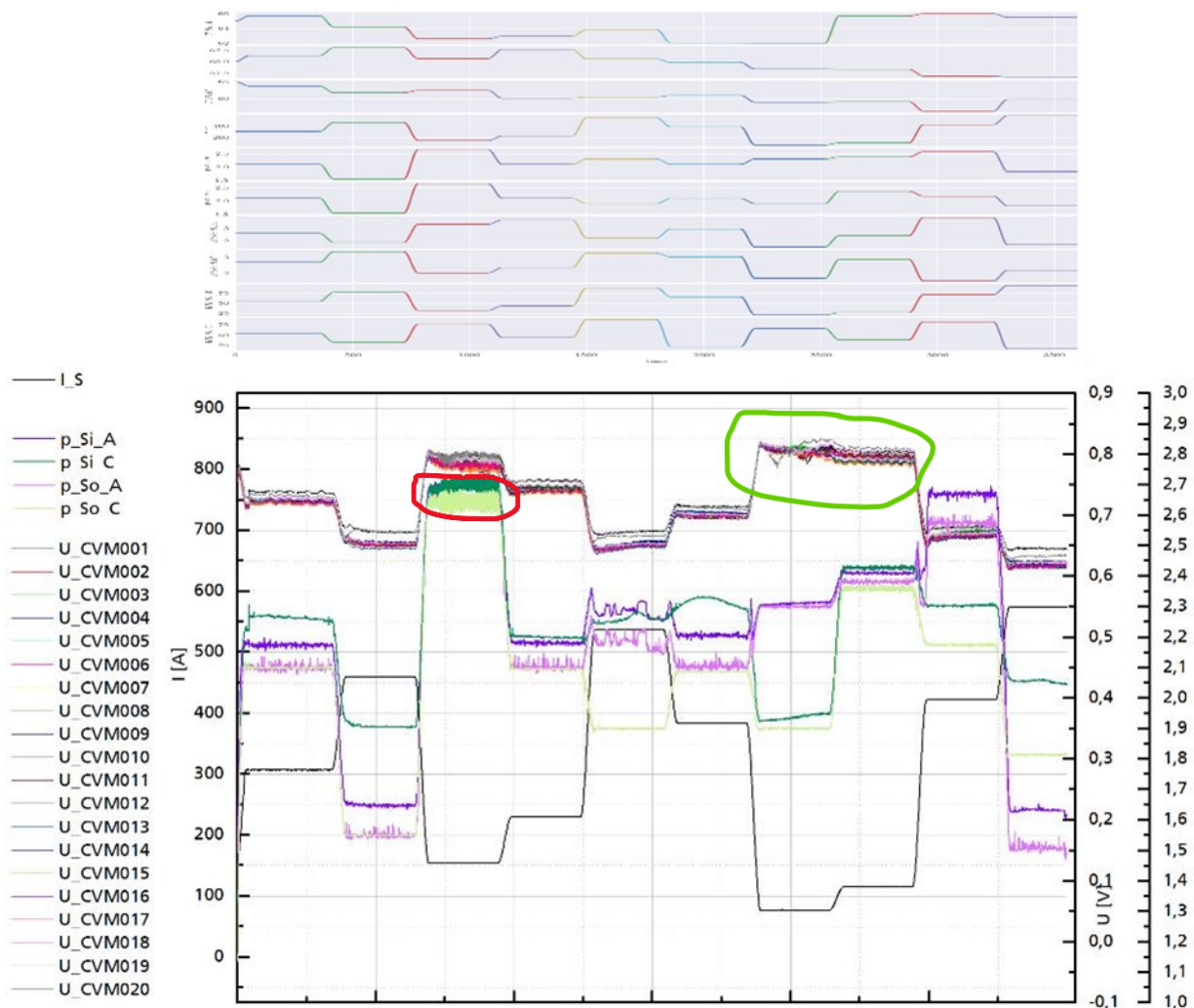


Abbildung 7: Umsetzung eines DoE, oben Vorgabe, unten experimentelle Umsetzung

Die Messergebnisse wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt und zwischen Bosch, Fraunhofer ISE und OvGU intensiv diskutiert. So ist z.B. im rot markierten Bereich eine Schwingung der Druckregelung ersichtlich, während im grün markierten Bereich die Zellspannungen auffällige

Verläufe aufweisen. Die Erkenntnisse aus den ersten experimentellen Umsetzungen und den darauf basierenden Diskussionen flossen fortlaufend in die Weiterentwicklung der Arbeiten ein. Dies betraf das Zusammenspiel zwischen Teststand und Prüfling am Fraunhofer ISE, Variation der DoEs bei Bosch sowie die Verwendung der Messdaten zur Modellparametrierung durch OvGU.

Weitere von Bosch generierte DoEs wurden im Teststand umgesetzt und mit dem Brennstoffzellenprüfling abgefahren. Hierbei handelte es sich um die DoE Versionen V3 und V4. Die Messergebnisse wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Dabei entstand der Bedarf einer besseren Gastemperaturregelung, die in Form der Ermittlung besserer Regelparameter realisiert wurde. Das Ergebnis dieser verbesserten Testbedingungen ist für einen Ausschnitt des DoE V4 in Abbildung 8 illustriert:

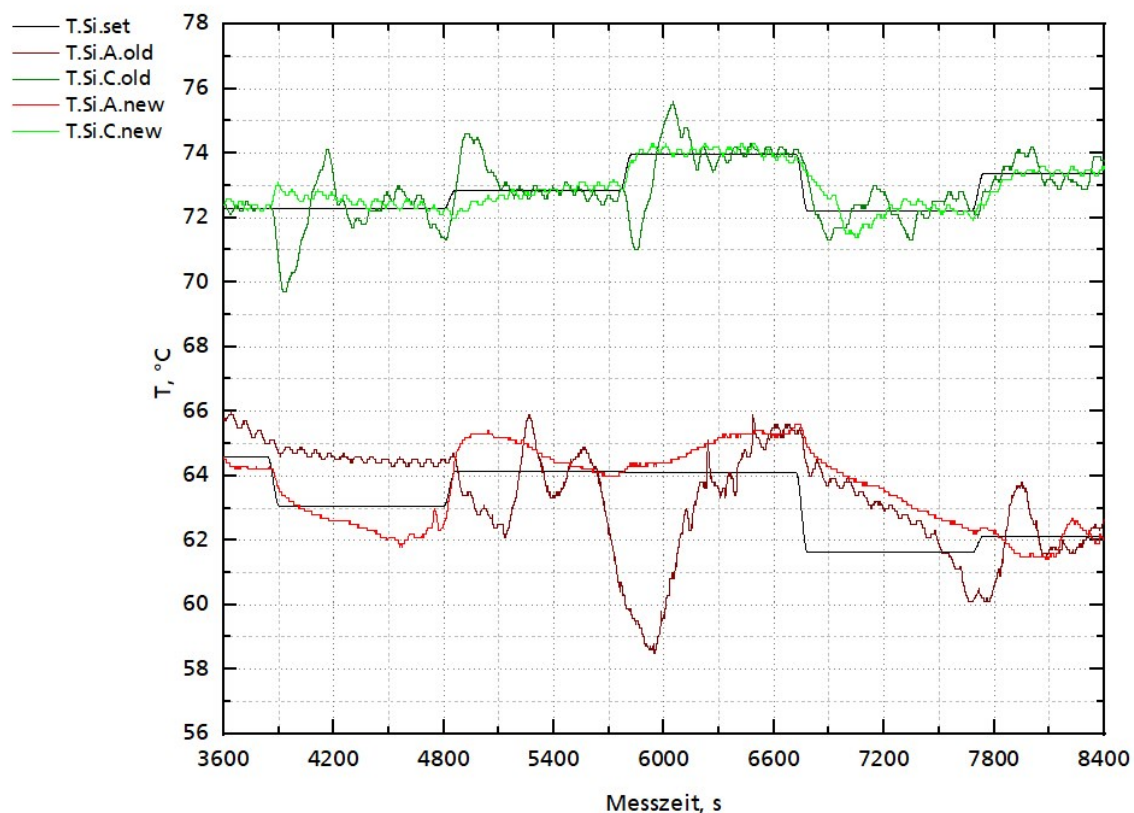


Abbildung 8: Optimierung der Gastemperaturregelung für Anode (Wasserstoff, rot) und Kathode (Luft, grün)

Dargestellt ist der Sollwert T.Si.set für Kathode (im oberen Bildbereich, ca. 72 – 74 °C) und Anode (im unteren Bildbereich, ca. 62 – 65 °C) und die gemessenen Ist-Werte. Dabei ist gut zu erkennen, dass mit den optimierten Reglereinstellungen die Abweichungen von mehreren Kelvin im Falle der alten Einstellungen auf größtenteils < 1K im Falle der neuen Einstellungen verbessert werden konnte. Dies galt insbesondere für die Kathodengastemperatur, wobei diese aufgrund der höheren Massenströme der Kathode grundsätzlich besser zu Regeln ist als die Anodengastemperatur.

Im weiteren Verlauf wurden die von Bosch generierten Designs of Experiments (DoE) Version 5 und 6 übermittelt. Für Version 5 erfolgte eine Umsetzung im Teststand wie vorgegeben. Bei diesem Versuch wurde der Stapel jedoch aufgrund einer ungünstigen Parameterwahl beschädigt und konnte im

Folgenden nicht weiter für Tests verwendet werden. Die Verläufe verschiedener Parameter, die zur Beschädigung führten, sowie der Zellspannungen sind in Abbildung 9 dargestellt:

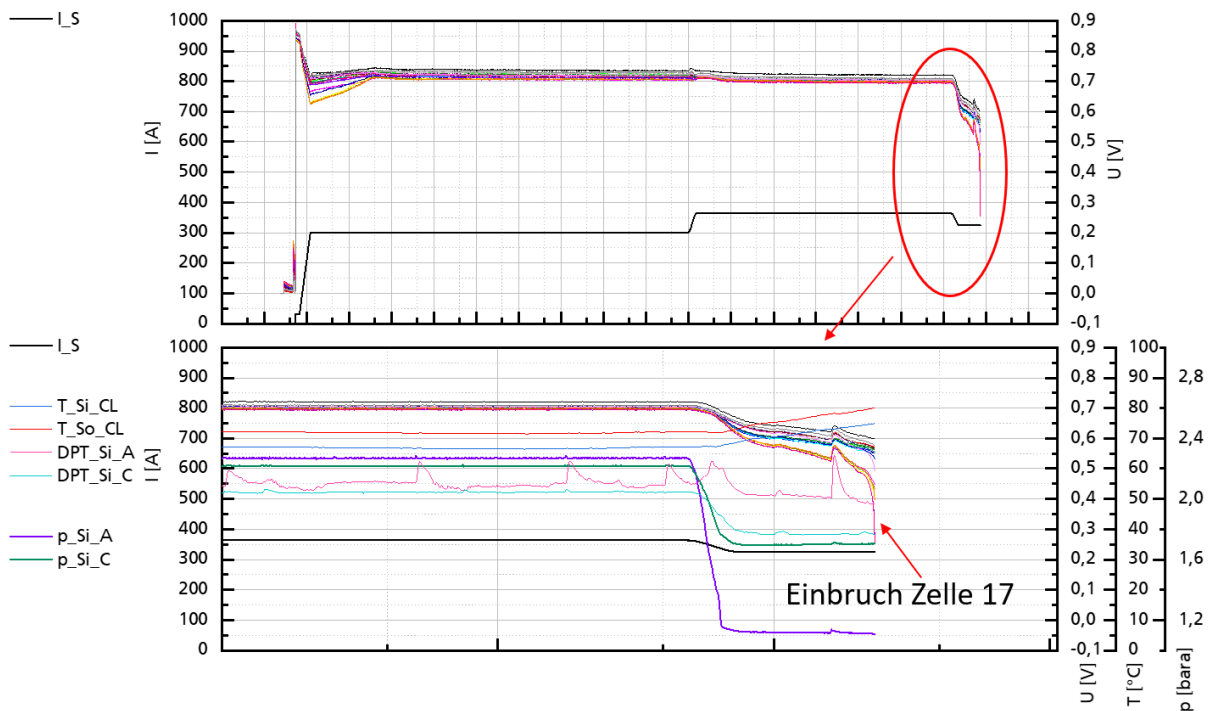


Abbildung 9: Verläufe verschiedener Parameter sowie der Zellspannungen bei DoE V5 welche zur Beschädigung des verwendeten Brennstoffzellenstapels führten.

Beim markierten Testpunkt-Übergang führte die Kombination aus geringem Druck (p_{Si_x}), geringer Befeuchtung (niedrige Taupunkte DPT_{Si_x} im Vergleich zur Stapeltemperatur T_{Sx_CL}) und hohen Gasströmen zu einer Austrocknung des Stapels.

Diese Austrocknung war so stark, dass schlussendlich auch die Zellspannungen einbrachen, insbesondere ist das für Zelle 17 ersichtlich. Die Unterschreitung der Zellspannung von 0,3 V löste den automatischen Abbruch des Testlaufs aus. Allerdings zeigten folgende Startversuche, dass sich eine dauerhafte Beschädigung innerhalb des Stapels etabliert hatte.

Die weiteren Messungen für dieses Arbeitspaket erfolgtem mit dem generischen Stapel und einer Neudefinition der Operationsgrenzen zur Vermeidung weiterer Zwischenfälle.

Charakterisierung des Feuchtehaushaltes

Nach der Integration des generischen Stapels wurden zusätzliche Sensoren für eine umfassendere Qualifizierung des Feuchtehaushaltes bei statischen und dynamischen Vorgängen installiert. Hierzu zählten insbesondere zwei zusätzliche Feuchtesensoren an den Gasauslässen von Kathode und Anode, um den Zustand der austretenden Gase genauer zu spezifizieren.

Diese Modifikationen wurden zunächst für statische Lastpunkte erprobt und mit den simulierten Werten des physischen Modells des Projektpartners OvGU verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Messwerte eine tendenziell höhere Feuchte speziell am Anodenausgang anzeigten, als die Simulation ergab. Entsprechend konnten die Modellparameter angepasst werden. Gleichzeitig gestaltete sich die Feuchtemessung an den Gasauslässen schwierig, da es oft zu Kondensation und damit Flüssigwasseranteilen kam, welche die Sensoren beeinflussten. Entsprechende Muster in den Sensordaten konnten identifiziert und als Hinweis für eine solche Beeinflussung ermittelt werden.

Weiterhin wurden Versuche zur Erfassung der Hochfrequenzimpedanz (High Frequency Resistance, HFR) durchgeführt. Der HFR diente als Indikator für die Membranfeuchte innerhalb der einzelnen Zellen und wurde zum einen als weitere Größe zur Charakterisierung des Feuchtehaushaltes genutzt zum anderen auch um starke Austrocknungszustände und damit Beschädigungen des Stapels zu vermeiden.

Messkampagne mit realem Fahrzyklus

Die im Zuge des Projekts erstellten Modelle sollten auch anhand eines realistischen Belastungszyklus mit Messdaten des generischen Stapels validiert werden. Um Daten zu erstellen, die ein realistisches dynamisches Betriebsszenario widerspiegeln, wurde der World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC) verwendet bei dem es sich um ein Geschwindigkeits-über-Zeit Profil für schwere Nutzfahrzeuge handelt. Mit einem einfachen Fahrzeugmodell eines 40 Tonnen Sattelzuges wurde die erforderliche Antriebsleistung zur Erfüllung der Fahranforderungen bestimmt. Anschließend wurde diese Leistung mit Hilfe eines einfachen Antriebsstrangmodells bestehend aus Brennstoffzellensystem und parallel geschalteter Pufferbatterie auf Brennstoffzelle und Batterie aufgeteilt. Schließlich konnte der Leistungsbedarf des Brennstoffzellensystems mit Hilfe eines I-P-Kennfelds ermittelt, in ein Strom-Zeit-Profil umgesetzt und auf den 20-zelligen generischen Stapel im Teststand skaliert werden, siehe Abbildung 10.

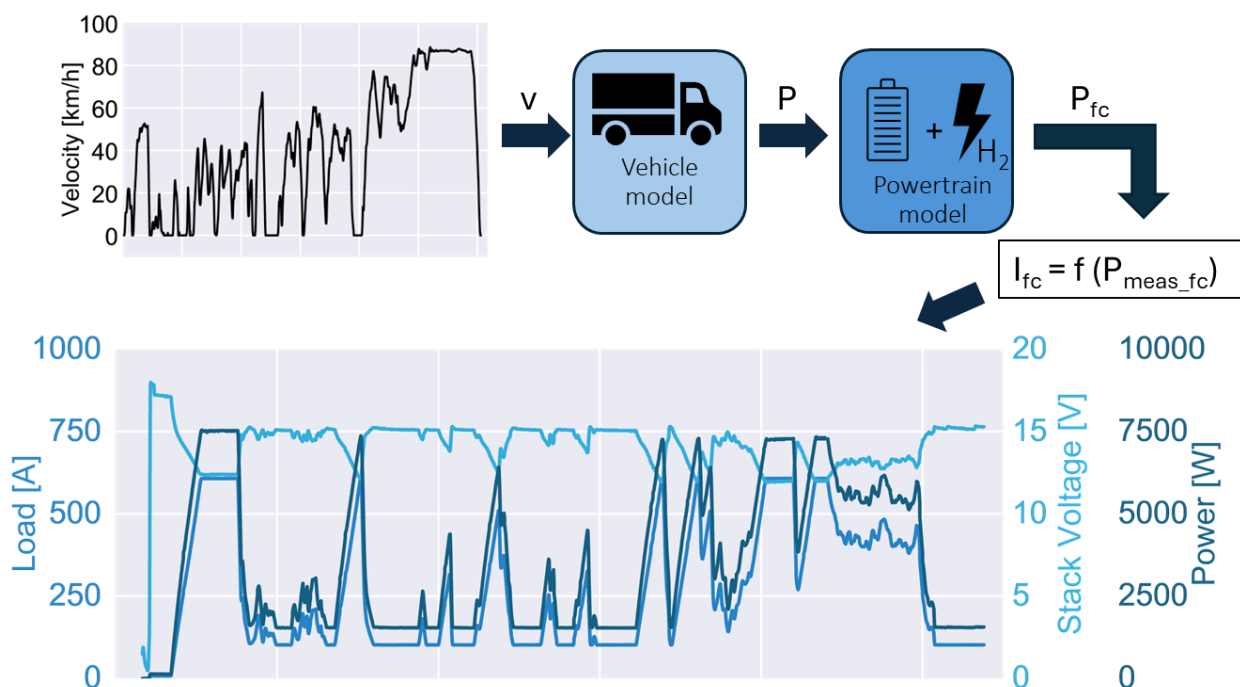


Abbildung 10: Umsetzung eines realen Fahrzyklus in ein Strom-Zeitprofil und Ergebnisse der messtechnischen Umsetzung des Profils auf dem Teststand mit dem 20-zelligen generischen Stapel.

Neben der schematischen Darstellung des Übergangs von Fahrprofil zu Lastprofil für den Stapel ist im unteren Bereich ein Ausschnitt der Messdaten in Form der resultierenden Stackspannung bei vorgegebener Strombelastung gezeigt. Weiterhin ist die berechnete elektrische Leistung des Stapels dargestellt. Diese Messdaten wurden dem Projektpartner Bosch für die datenbasierte Modellierung dynamischer Systeme unter Ressourcenbeschränkungen zur Verfügung gestellt.

verwendet. Diese Daten waren mit demselben Impedanz-Messsystem aufgenommen worden, wie es später in KI-Embedded genutzt wurde. Entsprechend handelte es sich um dieselbe Datenstruktur. Damit war eine effektive Vorbereitung der Auswertesoftware gewährleistet.

Das Ergebnis eines Modell-Fits zu gegebenen Messdaten ist in Abbildung 12 dargestellt. Das Modell basiert auf einem elektrischen Ersatzschaltbild mit dem wesentliche Prozesse innerhalb der Brennstoffzelle beschrieben werden, eine Methode die in der Wissenschaft etabliert ist. Bei diesen Modellen werden für langsamere Prozesse im mittleren bis tiefen Frequenzbereich typischerweise Elemente verwendet, die einen Diffusionsprozess abbilden, z.B. eine Warburg Impedanz. Wissenschaftliche Veröffentlichungen wie z.B. (Schneider, et al., 2006) haben aber gezeigt, dass die Oszillationen der Sauerstoffkonzentration nicht vernachlässigt werden können. Genau dieser Effekt kann zur Bestimmung der Strömungsverteilung herangezogen werden. In dem elektrischen Ersatzschaltbild wurden die Komponenten, die mittlere bis langsame Prozesse abbilden, so adaptiert, dass Konzentrationsoszillation beschrieben werden können. Dabei wurde insbesondere (Kulikovsky, 2019) herangezogen.

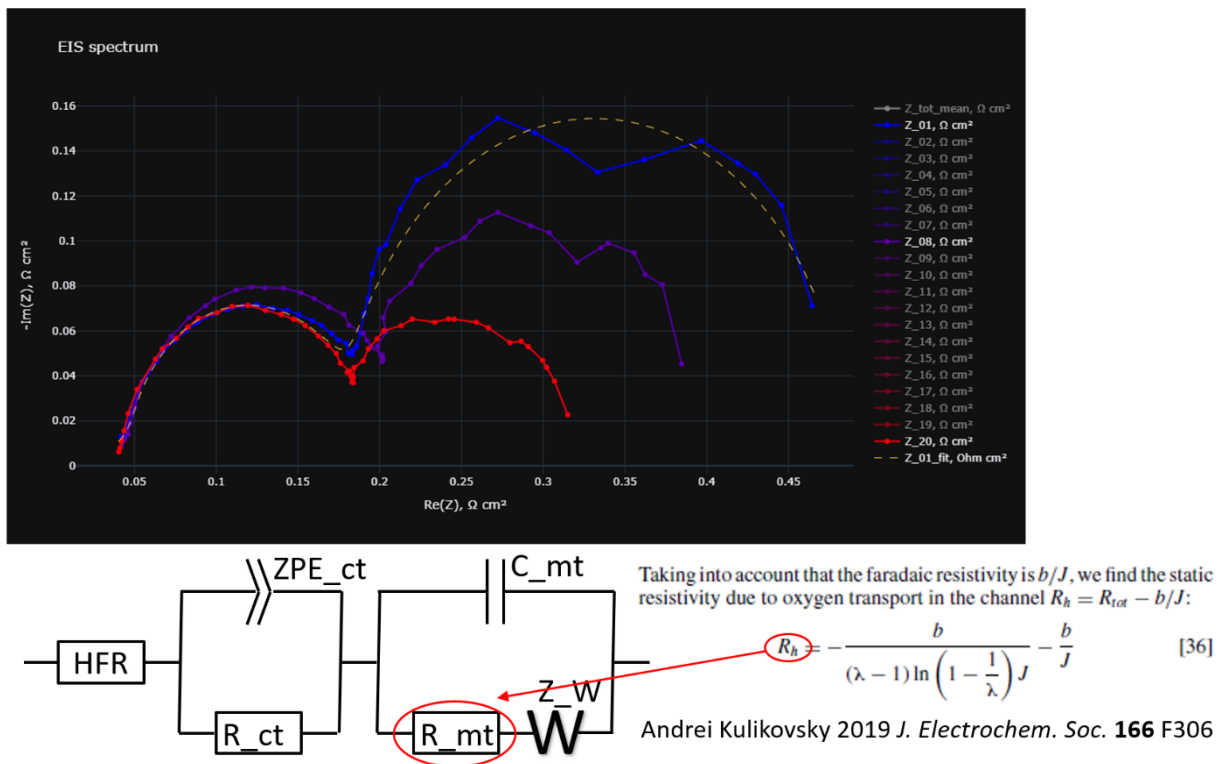


Abbildung 12: GUI der Software zur Analyse von Impedanzdaten mittels Modellierung und Darstellung des verwendeten Ersatzschaltbildes mit der Adaption aus Literaturergebnissen.

Experimente zur messtechnischen Erfassung der Impedanzspektren am generischen Stapel

Nachdem der generische Stapel verfügbar war, wurde das Mehrkanal-Impedanzsystem an den Stapel angeschlossen und die Kombination aus Prüfstand, Impedanzsystem und Stapel in Betrieb genommen. Zusätzlich erfolgten Arbeiten zur Justierung des Systems und schließlich die ersten Messungen zur wissenschaftlichen Auswertung.

Hier wurden die Durchflüsse an der Kathode angepasst, um verschiedene Stöchiometrien zu untersuchen und deren Einfluss auf die Impedanzdaten zu analysieren. Für jede Variation der Stöchiometrie wurden die Impedanzdaten bei 29 Frequenzen im Bereich von 500 Hz bis 1 Hz erfasst. Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 als Nyquist-Plot und flächennormiert dargestellt.

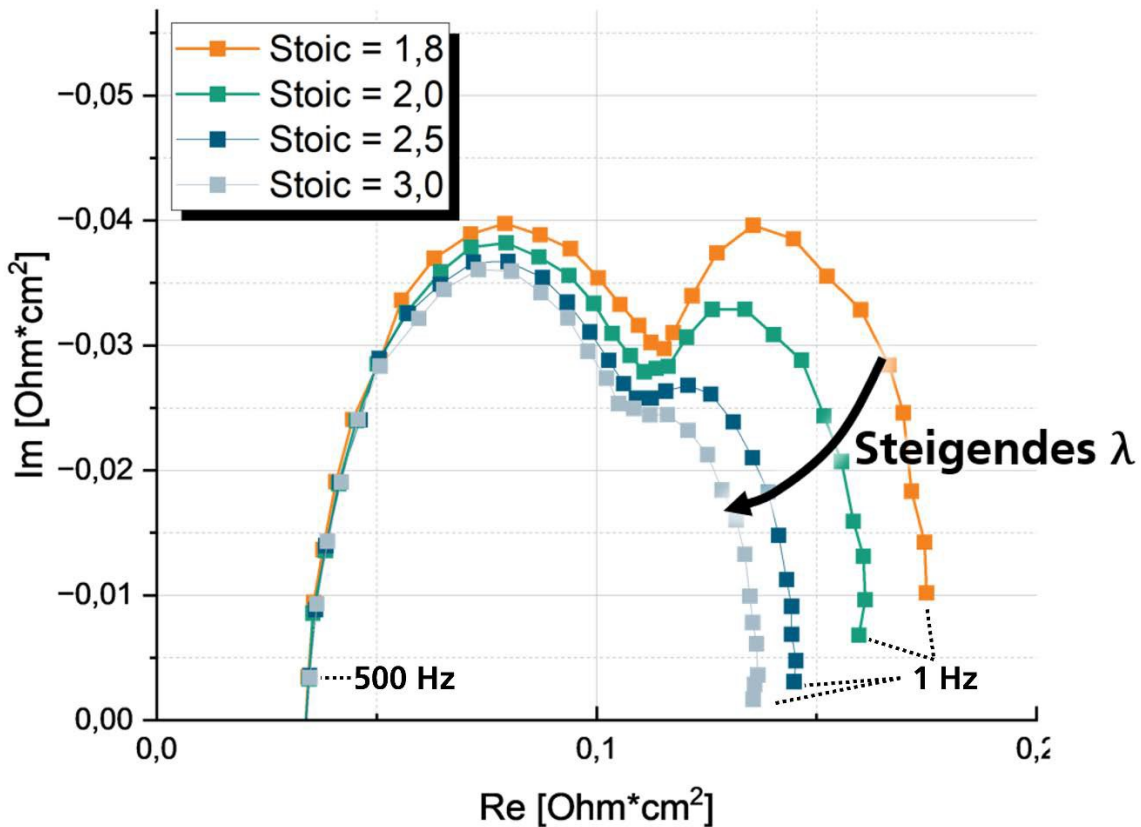


Abbildung 13: Gemessene Impedanz Daten des Stacks im Frequenzbereich 600 Hz bis 1 Hz bei unterschiedlichen Stöchiometrien (λ) und mittlerer Last von 210 A

Es zeigt sich das aus der Literatur erwartete Verhalten: Mit steigender Stöchiometrie λ verringert sich der niederfrequente Anteil der Impedanz. Dieser niederfrequente Anteil wird den Diffusionsprozessen in Katalysator- und Gasdiffusionsschicht zugeschrieben und beinhaltet auch einen Beitrag der Konzentrationsoszillationen des Sauerstoffs in den Kanälen des Flussfeldes von Einlass nach Auslass. Diese Konzentrationsoszillationen hängen von der Verweildauer des Gases im Flussfeld und damit vom Volumenstrom ab. Sie bilden eine charakteristische Zeitkonstante (Keller Stefan, 2018), die im Verlauf der weiteren Messungen aus den Impedanzdaten extrahiert werden sollte. In Abbildung 13 ist beispielhaft nur die Gesamtimpedanz des Stapels dargestellt. Mit der Mehrkanal-Impedanzanlage war es aber möglich die Impedanzen jeder einzelnen Zelle gleichzeitig aufzunehmen. So konnten die Impedanzspektren jeder einzelnen Zelle separat ausgewertet werden. Für diese Auswertung wurden zwei unterschiedliche Methoden herangezogen.

Impedanzauswertung über „Nyquist“ – Methode

Für die Auswertung nach dieser Methode wurden die Impedanzdaten der einzelnen Zelle mit einem modifizierten elektrischen Ersatzschaltbild ausgewertet. Hierzu wurde die in Abbildung 11 dargestellte Software verwendet, das Analysemodell jedoch leicht vereinfacht (Entfall des Warburg-Elements Z_W) um einen besseren Modellfit zu ermöglichen. Das resultierende Ersatzschaltbild mit den zu bestimmenden Parametern ist in Abbildung 14 dargestellt

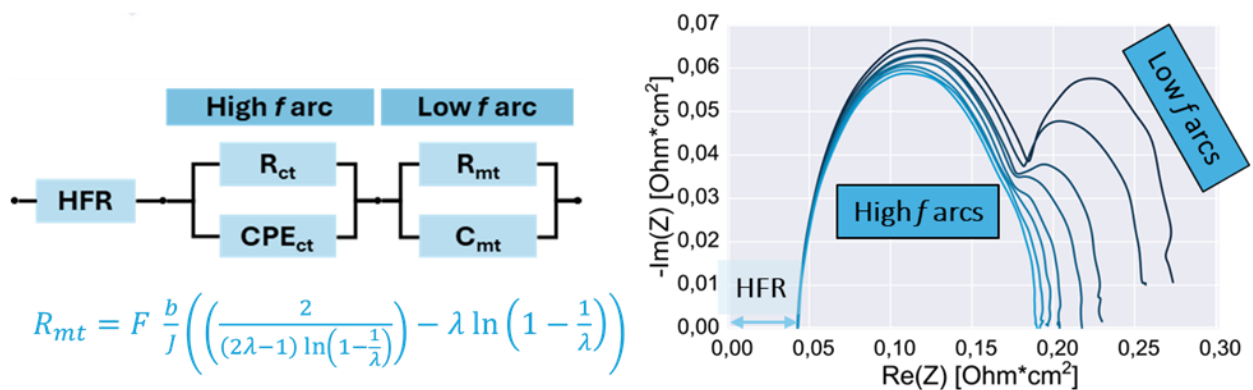


Abbildung 14: Zur Auswertung verwendetes Ersatzschaltbild mit Modellparametern und Korrelation zu den gemessenen Impedanzdaten. Ableitung der Stöchiometrie λ aus dem Parameterfit für R_{mt} nach (Kulikovsky, 2021)

Um die Freiheitsgrade der Parameteranpassung sinnvoll einzugrenzen, wurden die Ausdrücke aus den physikalischen Modellierungsansätzen der Literatur und die Informationen aus den experimentellen Betriebsbedingungen verwendet. So floss z.B. die im Experiment eingestellte Stromdichte j in die Bestimmung des Parameters R_{ct} ein. Auf diese Weise konnte der Fit der Modellparameter optimiert und für jede einzelne Zelle separat bestimmt werden. Mit der in Abbildung 14 dargestellten Gleichung für R_{mt} wurde für jede Zelle der spezifische Stöchiometriefaktor λ_{Zelle} berechnet. Über die Reaktionsgleichung der Sauerstoffreduktionsreaktion der Kathode konnte bei bekanntem Gesamtstrom und unter Annahme 21% O_2 in Luft der kathodenseitige Luftvolumenstrom für $\lambda = 1$ (V_{Luft1}) ermittelt werden. Damit ergab sich mit $\lambda_{Zelle} * V_{Luft1}$ der zellspezifische, kathodenseitige Volumenstrom als Zielwert.

Impedanzauswertung über „Bode“ – Methode

Ein weiterer Ansatz war die Analyse des Imaginäranteils der Impedanzdaten über die Frequenz in Anlehnung an einen Bode Plot. Die unterschiedlichen Prozesse in der Brennstoffzelle führen zu charakteristischen Frequenzen die sich im Bode-Plot als Peaks des Imaginäranteils zeigen. Die dominanten Prozesse bei den eingestellten Testbedingungen waren im hochfrequenten Bereich der Ladungsdurchtritt, im niederfrequenten Bereich die Oszillationen der Sauerstoffkonzentration sowie Diffusionsprozesse z.B. durch die Gasdiffusionslage (GDL) oder das Ionomer in der Katalysatorschicht. In Abbildung 15 a) ist ein solcher Verlauf dargestellt und der Gesamtverlauf Z_{tot} auf die Subprozesse Ladungsdurchtritt $Z_{charge\ transfer}$, Diffusion in der GDL Z_{GDL} und Oszillation der Sauerstoffkonzentration im Kanal $Z_{channel}$ zugeordnet. Damit konnte die charakteristische Frequenz für die Kanalimpedanz extrahiert werden.

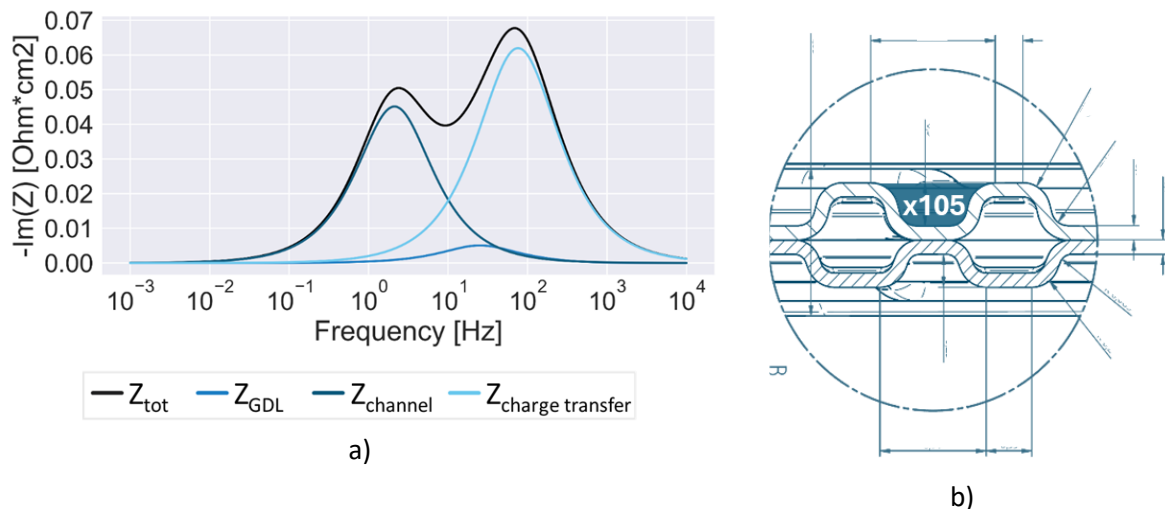


Abbildung 15: a) Beispielhafte Darstellung des Imaginäranteils der Impedanz über den Frequenzbereich und Zuordnung zu verschiedenen Prozessen. b) Darstellung der ermittelten Querschnittsfläche für einen der insgesamt 105 kathodenseitigen Strömungskanäle einer Zelle des generischen Stapels

In (Bao, et al., 2015) wurde gezeigt, dass die Zeitkonstante der Kanalimpedanz mit der Durchströmgeschwindigkeit der Gase und der Länge der Gaskanäle berechnet werden kann, vgl. Gleichung 12: $\tau_{ch} = \frac{L_{ch}}{u_{in,c}}$. Die Länge der Gaskanäle L_{ch} war dank der verfügbaren Geometriedaten des generischen Stapels bekannt und die Zeitkonstante τ_{ch} lies sich mit der gemessenen charakteristischen Frequenz für die Kanalimpedanz über $\tau = \frac{1}{2\pi f}$ berechnen. Somit war auch die Geschwindigkeit der Gase im Kanal bekannt. Weiterhin konnte aufgrund der verfügbaren Geometriedaten des generischen Stapels die Querschnittsfläche der einzelnen Gaskanäle ermittelt und mit der Anzahl der Kanäle zur gesamten Querschnittsfläche einer Zelle multipliziert werden, siehe Abbildung 15 b). Diese Querschnittsfläche multipliziert mit der zuvor ermittelten Gasgeschwindigkeit ergab den zellspezifischen, kathodenseitigen Volumenstrom als Zielwert.

Ergebnisse der Einzelzelldurchströmung

Um die Methoden zu validieren, wurden die in Abbildung 13 dargestellten und dort beschriebenen Messdaten verwendet. Mit dem genannten Frequenzbereich konnten alle wichtigen Bereiche des Impedanzspektrums wie Hochfrequenzwiderstand (HFR), hochfrequenter Bogen und niederfrequenter Bogen erfasst werden.

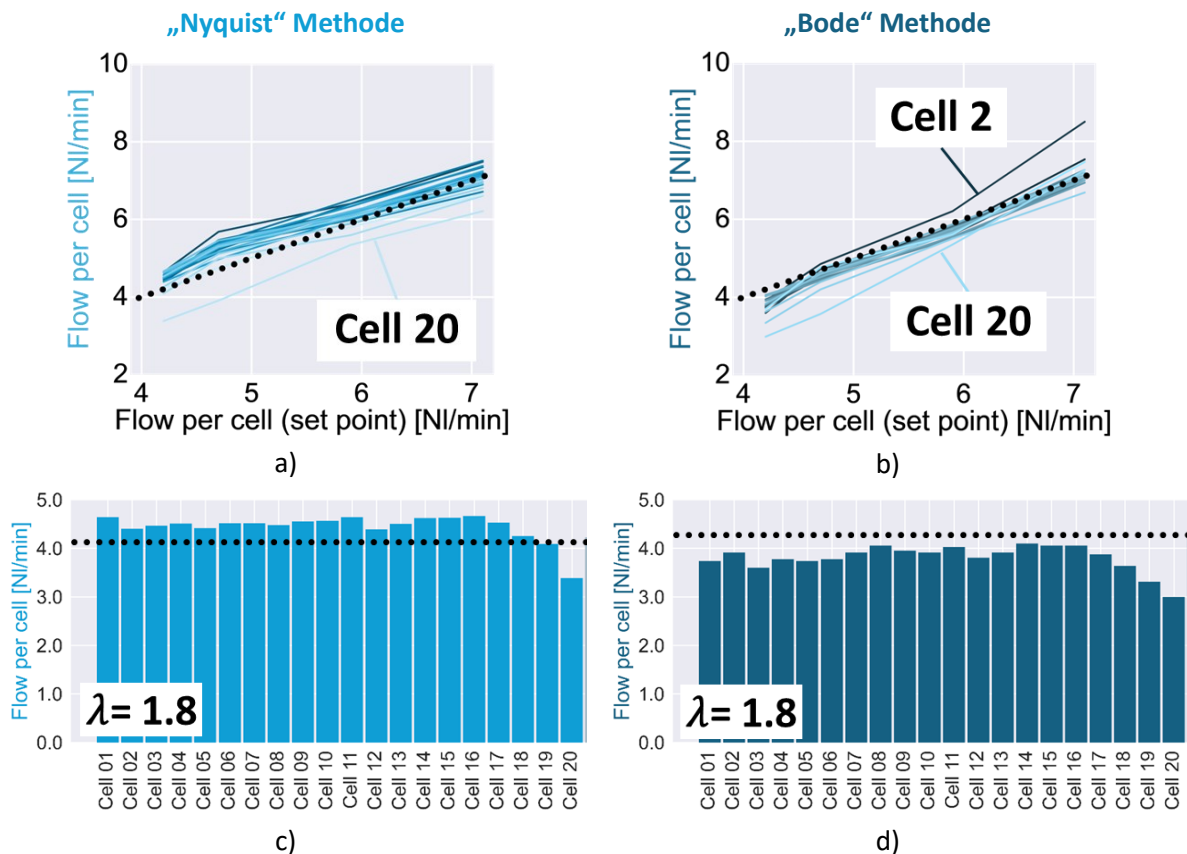


Abbildung 16: Darstellung der ermittelten Volumenströme der einzelnen Zellen im Stapel im Vergleich zu dem am Teststand eingestellten Gesamtvolumenstrom (gestrichelte Linie). a) Auswertung der Durchströmungen nach „Nyquist“-Methode, b) Auswertung nach „Bode“-Methode. Kalkulierte Volumenströme der einzelnen Zellen bei Stöchiometrie 1,8 nach c) „Nyquist“-Methode und d) „Bode“-Methode.

Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse der berechneten Volumenströme für die 20 Zellen im generischen Stapel. Als Vergleich dient dabei der eingestellte Gesamtvolumenstrom für den Stapel geteilt durch die Anzahl der Zellen (gestrichelte Linie). Dieser müsste sich bei einer Idealverteilung innerhalb des Stapels für jede Zelle gleich ergeben.

Grundsätzlich liegen die Volumenströme ausgewertet nach der „Nyquist“-Methode etwas oberhalb des erwarteten Mittelwertes und ausgewertet nach der „Bode“-Methode etwas darunter. Die Verläufe der Strömungsverteilungen sind jedoch sehr ähnlich, siehe Abbildung 16 c) und d). So fallen die Strömungen in beiden Fällen von Zelle 16 nach Zelle 20 kontinuierlich ab und beide Methoden deuten auf eine geringere Durchströmung der Zellen 19 und 20 hin.

Damit konnte die Entwicklung einer Methode zur Charakterisierung der Einzelzeldurchströmung mit zwei unterschiedlichen Ansätzen erfolgreich validiert werden.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wesentlichen Kosten im Projekt waren Personalkosten in Forschung und Entwicklung. Diese Personalmittel wurden für die Integration der Brennstoffzellen, Programmierung der Testroutinen, Durchführung der Charakterisierungsmessungen, Programmierung der Modelle zur Auswertung der Impedanzdaten sowie zur Entwicklung von Analysemethoden der Messdaten zur Bestimmung der Einzelzeldurchströmung verwendet.

Ein weiterer wesentlicher Kostenpunkt bildeten die Sachkosten zur Beschaffung und Teststandintegration zweier Brennstoffzellenstapel mit generischem Design. Hierfür wurden die Stapel selbst sowie Kleinmaterial wie Fittings, Kabel und Schläuche zur Integration in den Teststand beschafft.

Das Fraunhofer ISE nahm an allen Projekttreffen teil, hinsichtlich Personenzahl, Reisemittel und Unterkunft wurde hierbei besonders auf die wirtschaftliche Mittelverwendung geachtet.

Die Verzögerungen des Projektfortschritts durch die späte Lieferung der generischen Brennstoffzellenstapel konnten durch die kostenneutrale Verlängerung zu großen Teilen wieder aufgeholt werden. Die Überlassung eines kommerziellen Brennstoffzellenstapels des Projektpartners Bosch für erste Integrationsarbeiten und Charakterisierungsmessungen ermöglichte eine sinnvolle Überbrückung der langen Lieferzeiten ohne zusätzliche Mittelbedarf.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten folgten – wenn auch mit Verzögerungen – dem Projektantrag. Die Verzögerungen entstanden am Fraunhofer ISE durch die späte Verfügbarkeit der generischen Brennstoffzellenstapel. Durch die kostenneutrale Verlängerung konnten die Projektziele vollumfänglich erfüllt werden.

Die gewonnenen Daten aus den Messkampagnen mit realen Brennstoffzellenstapeln waren fundamental für die Validierung der im Projekt eingesetzten Modelle, insbesondere der Projektpartner Bosch und OvGU. Die langjährige Erfahrung des Fraunhofer ISE im Bereich der Charakterisierung von Brennstoffzellenstapeln ermöglichte einen effektiven Einsatz der Arbeitsstunden und eine steile Lernkurve für die Projektpartner. Weiterhin trug die sehr gute Zusammenarbeit und Flexibilität bspw. bei der Bereitstellung eines temporär nutzbaren Brennstoffzellenstapel seitens Bosch zur effektiven Bearbeitung bei.

Hinsichtlich der Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Einzelzeldurchströmung konnten zwei verschiedene Ansätze entwickelt, umgesetzt und verglichen werden. Dies erweitert das Angebot des Fraunhofer ISE hinsichtlich der Charakterisierung von Brennstoffzellenstapeln wesentlich und wäre ohne das Projekt KI-Embedded nicht möglich gewesen.

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

Durch das Projekt konnten bedeutende Erfahrungen mit der generischen Stapelplattform gesammelt werden. Dank der umfassenden Charakterisierung dieser Plattform und der neu entwickelten Methoden ist das Fraunhofer ISE in der Lage, Messungen mit herausragendem Informationsgehalt durchzuführen.

Die Automatisierung der Sensitivitätsanalyse ermöglicht es, zukünftige Messungen ressourceneffizient und mit hoher Reproduzierbarkeit durchzuführen. Hierdurch ergibt sich ein wesentlicher Mehrwert für Partner aus Industrie und Forschung, die im Bereich Brennstoffzellenstapel bzw. -komponenten aktiv sind.

Die im Projekt neu entwickelte Methode zur Charakterisierung der Einzelzeldurchströmung stellt eine wesentliche Erweiterung der Methodenkompetenz zur Charakterisierung von Brennstoffzellenstapel dar.

Durch die mit Bosch und OvGU geplante Veröffentlichung des Datensatzes aus der Brennstoffzellenstapel Charakterisierung ergibt sich die für die KI-Wissenschaftsgemeinschaft die Möglichkeit, die hybride Modellierung des Brennstoffzellenstapels mit diesen Referenzdaten Daten als Standardfall innerhalb der jeweiligen Fachgruppen zu etablieren.

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

Hinsichtlich des übergeordneten Themas KI-Verfahren wird an dieser Stelle auf die Berichte der anderen Partner, insbesondere des Konsortialführers Bosch verwiesen.

Der generische Stapel wurde innerhalb des vom Umweltministerium Baden-Württemberg geförderten Projekts „HyFaB“ entwickelt, um als industriennahe, aber offene Plattform ein Standardvehikel für die Forschungs- und Entwicklungsgemeinschaft zu werden. Entsprechend gibt es viele Arbeiten mit dieser Stapelplattform insbesondere des ZSW. Diese haben einen erfreulich kooperativen Charakter. So wurden z.B. Membran-Elektroden-Einheiten welche am Fraunhofer ISE hergestellt wurden zusammen mit anderen MEAs in einen generischen Stapel eingebaut und vom ZSW vermessen (Häußler, et al., 2024).

Zu den Arbeiten der Einzelzeldurchströmung wird der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Impedanz und Sauerstofftransport entlang des Gaskanals mehrfach diskutiert, z.B. (Kulikovsky, 2019), (Kangfu, et al., 2022). Diese Veröffentlichungen wurden als wissenschaftliche Grundlage zur Erarbeitung der Methode herangezogen.

6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Ergebnisse aus UAP5.3.ISE.4 mit dem Titel „Charakterisierung der Einzelzeldurchströmung“ werden auf dem „76th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry“ in Form eines Vortrages präsentiert.

Die Resultate aus UAP5.3.ISE.2, „Sensitivitätsanalyse im stationären Betrieb“, sollen in einer gemeinsamen Publikation mit den anderen Projektpartnern des Arbeitspakets 5 in Form eines Konferenzaufsatzes veröffentlicht werden. Der Datensatz mit den Messungen des generischen Stapels soll in diesem Rahmen als Referenzdatensatz für die Nutzung mit datenbasierten Modellen in Brennstoffzellenanwendungen dienen.

7 Literaturverzeichnis

Bao C and Bessler W.G Two-dimensional modeling of a polymer electrolyte membrane fuel cell with long flow channel. Part II. Physics-based electrochemical impedance analysis [Journal] // Journal of Power Sources. - 2015. - pp. 675-682.

Häußler Frank and Jörissen Ludwig HyFaB: Generischer Stack [Conference] // H2-Kolloquium Baden Württemberg. - Baden-Baden : [s.n.], 2024. - pp. 1-30.

Kangfu Ruan [et al.] Distribution of relaxation times: A method for measuring air flow distribution in high-temperature proton exchange membrane fuel cell stacks [Journal] // Journal of Power Sources. - 2022.

Keller Stefan Özel Tansu, Scherzer Anne-Christine, Gerteisen Dietmar, Groos Ulf, Manoli Yiannos, Hebling Christopher Characteristic Time Constants Derived from the Low-Frequency Arc of Impedance Spectra of Fuel Cell Stacks [Journal] // Journal of electrochemical energy conversion and storage. - Stockholm : [s.n.], 2018.

Kulikovsky Andrei Analytical Impedance of Oxygen Transport in a PEM Fuel Cell Channel [Journal] // Journal of The Electrochemical Society. - 2019. - pp. 306-311.

Kulikovsky Andrei Analytical Impedance of Oxygen Transport in the Channel and Gas Diffusion Layer of a PEM Fuel Cell [Journal] // Journal of The Electrochemical Society. - 2021. - p. 114520.

Schneider I. A. [et al.] Oscillations in the Gas Channels - The Forgotten Player in Impedance Spectroscopy in Polymer Electrolyte Fuel Cells A. Exploring the Wave [Journal] // Journal of The Electrochemical Society. - 2006. - pp. 1001-1010.

ZSW STACK-TEST Test Modules [Online] // STACK-TEST Work Packages. - 08 31, 2015. - <http://stacktest.zsw-bw.de/media-centre/test-modules.html>.