

Abschlussbericht

für das Verbundvorhaben

FC-RAT FUEL CELL REALISTIC AGING TREND MODELLING

Zuwendungs-Empfänger:

AVL Deutschland GmbH
Peter-Sander-Straße 32
55252 Mainz-Kastel

Förderkennzeichen:

03EW0011C

Vorhabensbezeichnung:

FC-RAT FUEL CELL REALISTIC AGING TREND MODELLING

Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2021 – 30.06.2024

Berichtszeitraum:

01.01.2021 – 30.06.2024

Autor:

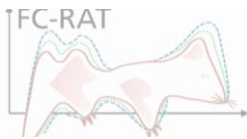
Dr.-Ing. Rainer Fiereder, M.Sc. Boyu Yang,
M.Sc. Gabriela Vaz, M.Sc. Michael Reichl

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**



Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzbericht.....	3
1.	Aufgabenstellung	3
1.1.	Motivation.....	3
1.2.	Gesamtziel des Vorhabens	4
1.3.	Voraussetzungen des Vorhabens.....	4
1.4.	Planung und Ablauf des Vorhabens, Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
2.	Stand von Wissenschaft und Technik.....	5
2.1.	Stand der Wissenschaft und Technik	5
2.2.	Abgrenzung zu anderen laufenden Forschungsvorhaben	5
II.	Sachbericht	6
1.	Ergebnisse	6
1.1.	AP 7 - Entwicklung 3D-CFD-Simulation.....	6
1.1.1	AP 7.1 Implementierung Pt-Auflösung und Pt-Oxidation	6
1.1.2	AP 7.2 Implementierung Kohlenstoff-Korrosion	6
1.1.3	AP 7.3 Implementierung Place-Exchange-Mechanismus	7
1.1.4	AP 7.4 Validierung der Schädigungsmodelle anhand differentieller Zellen	8
1.1.5	AP 7.5 Implementierung der erweiterten Schädigungsmodelle.....	10
1.1.6	AP 7.6 Validierung des Grundmodells anhand ATC-Zelle	10
1.1.7	AP 7.7 Validierung der verbesserten Degradationsmodelle anhand ATC-Zelle	11
1.1.8	AP 7.8 Implementierung der erweiterten Reaktionsmodelle	12
1.1.9	AP 7.9 Implementierung der erweiterten Transportmodelle	13
1.1.10	AP 7.10 Detaillierte Validierung des Leistungs- und des Alterungsmodells	14
1.1.11	AP 7.11 3D-Modellierung „O ₂ Starvation“ während des Abschaltvorgangs	15
1.1.12	AP 7.12 Untersuchung des „Starvation“ Verhaltens über Shutdown Manövern	19
1.2.	Schlussfolgerungen.....	22
2.	Anschlussfähigkeit	22
2.1.	Verwertbarkeit.....	22
2.1.1	Wissenschaftliche Verwertung	22
2.1.2	Nutzung und Verwertung.....	22
2.2.	Veröffentlichungen aus dem FC RAT-Projekt.....	23
3.	Zusammenfassung.....	23
4.	Literaturverzeichnis	24
5.	Danksagung.....	25
A.	Verwendete Abkürzungen	25

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

1.1. Motivation

Die Mobilität befindet sich in einem sehr dynamischen Wandlungsprozess hin zu emissionsfreien, elektrischen Antrieben. Diese Transformation erfasst den Individualverkehr genauso wie den ÖPNV und den Lastverkehr. Ebenso sind alle Verkehrsträger betroffen vom Auto, Bus, LKW, Zug, Schiff und Flugzeug.

Eine zukünftig bedeutende Antriebsform wird die Brennstoffzelle darstellen. Insbesondere die Vorteile der kurzen Tankzeiten und der hohen Energiespeicherdichte in Wasserstoff-Hochdrucktanks, welche zu langen Reichweiten führen, werden sich für Langstreckenfahrzeuge, Busse, LKW etc. durchsetzen. Alstom hat den ersten Brennstoffzellen-Zug in Deutschland in Betrieb gebracht, Siemens ist zusammen mit Ballard in einer entsprechenden Entwicklung. Nikola und Hyundai kündigen kurzfristig Brennstoffzellen-LKW in der Schweiz an. Bosch entwickelt zusammen mit PowerCell Brennstoffzellenantriebe für LKW. Daimler hat mit Volvo ein Joint Venture ebenfalls zur Entwicklung von Brennstoffzellen-LKW gegründet. Mahle kooperiert mit Ballard zur Entwicklung von Brennstoffzellensystemen für LKW. Citaro, Solaris und Van Hool entwickeln Brennstoffzellen-Busse.

Der Entwicklungsschwerpunkt hat sich somit deutlich von PKW in Richtung Güter- und Schwerlastverkehr verschoben. Dadurch erhöhen sich gleichzeitig die Erwartungen an die Lebensdauer von Brennstoffzellen um den Faktor 5 bis 10. Diesen Aspekt greift das FC-RAT-Konsortium auf: das Verständnis für die Alterungsvorgänge soll wesentlich erweitert und vertieft werden und darauf aufbauend durch die Entwicklung eines Alterungsmodells eine Lebensdauerabschätzung bei realen Lastprofilen ermöglicht werden. Gleichzeitig kann diese Alterungsmodellierung der Optimierung von Betriebsstrategien dienen.

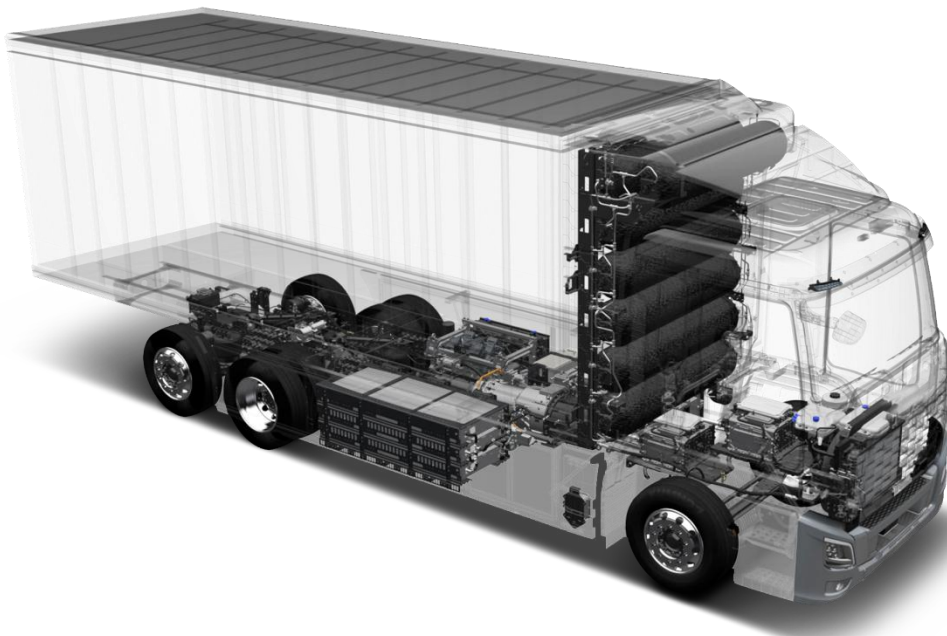


Abbildung 1: Hyundai Class 8 Hydrogen Truck. (Quelle: Hyundai)



1.2. Gesamtziel des Vorhabens

Im BMWi-geförderten Projekt SoHMuSDaSS ist es dem Fraunhofer ISE gelungen, die potenzialinduzierte Alterung von NT-PEM-Brennstoffzellen zu beschreiben. Dies wurde unterstützt durch umfangreiche Experimente zur Komponententalterung mit Hilfe einer Labor-Testzelle. Darüber konnte die Veränderung der Modellparameter im Lauf ihrer Alterung extrahiert werden. Insgesamt hat SoHMuSDaSS eine wissenschaftlich fundierte Analyse der Alterungseffekte geleistet, welche bereits in die angewandte Forschung und Entwicklung einfließen konnten (z.B. über den damaligen Projektpartner Bosch Engineering). Im hier beantragten Projekt FC-RAT steht der Übertrag dieser wissenschaftlichen Erkenntnisse auf die realen Zellabmessungen und hinsichtlich weiterer anwendungstypischer Betriebsbedingungen wie Start- und Abschaltvorgänge im Vordergrund.

Im BMBF-geförderten Projekt FC-CAT werden state-of-the-art Modelle zur Beschreibung der Brennstoffzellen-Leistung entwickelt. In FC-RAT sollen die Leistungsmodellierung aus FC-CAT mit der zu entwickelnden Alterungsmodellierung zusammengeführt werden. Beide Konsortien und das jeweilige Projektende sind identisch.

Der Industriepartner AVL wird die Projektergebnisse nutzen, um die Strömungs- und Fahrzeugsimulation von AVL um eine validierte Degradationsmodellierung zu erweitern. Da dieses Modell kommerziell verfügbar sein wird, profitiert somit die gesamte Brennstoffzellen-Branche vom Projektergebnis.

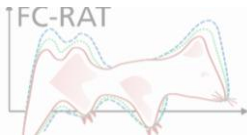
1.3. Voraussetzungen des Vorhabens

In der 2020 veröffentlichten Nationalen Wasserstoff-Strategie sowie der Ideenausschreibung des BMBF wird die Bedeutung der Wasserstoff-Technologien für den (exportorientierten) Industriestandort Deutschland sowie die Einhaltung der Klimaziele hervorgehoben. In der Mobilität hat die Brennstoffzelle zukünftig eine wesentliche Rolle. Dabei stehen vor allem die Anwendungen im Schwerlastverkehr (Bus, LKW, Zug) im Vordergrund. Diese Anwendungen erfordern sehr lange Lebensdauern der Komponenten im Antriebsstrang. Das Vorhaben FC-RAT greift diese Anforderungen auf und schafft ein tiefes Verständnis für die Alterungsphänomene in der Brennstoffzelle in Bezug auf aktuell eingesetzte Materialien. Dies ist die Voraussetzung, um dann modellbasiert Prognosen für die Lebenserwartung der Brennstoffzelle beim Betrieb mit spezifischen Lastprofilen zu erstellen. Umgekehrt bietet das in FC-RAT zu entwickelnde Alterungsmodell die Chance sowohl das Design der Brennstoffzelle hinsichtlich höherer Lebenserwartungen zu optimieren als auch die Betriebsweise der Brennstoffzelle hinsichtlich einer minimierten Degradation zu gestalten. Darüber hinaus kann die Modellierung aufzeigen, welche Materialien und Komponenten bei den gegebenen Lastprofilen den stärksten Einfluss auf den Leistungsverlust haben. Dies führt zu einer Priorisierung der Material- und Komponentenentwicklung, so dass die FuE-Aktivitäten auf die entscheidenden Aspekte fokussiert werden.

Die in FC-RAT entwickelte Methodik der Modellierung kann zukünftig auch auf andere Anwendungen, insbesondere die PEM-Elektrolyse zur Wasserstofferzeugung übertragen werden.

1.4. Planung und Ablauf des Vorhabens, Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die zu Beginn des Projekts initiierten Regelaustauschtermine mit den Partnern und den Hochschulen, welche alle 4 bzw. 6 Wochen per Teams-Meeting stattfinden, wurden fortgeführt. Zudem wurden verschiedene themenspezifische Termine eingerichtet, welche in kürzeren Abständen stattfinden. Darüber hinaus fand jede 2 Wochen ein kurzes Austauschmeeting mit den Projektpartnern statt. Durch diese Regelaustauschtermine und den direkten Support in der Anwendung der Simulationssoftware AVL FIRE M hat eine enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern stattgefunden.



Am 26.05.2025 fand das Projektabschlusstermin statt. Alle Industrie- und Hochschulpartnern haben an dem Termin teilgenommen.

Das Vorhaben ist weitestgehend nach der ursprünglich Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung gelaufen. Ein validiertes Simulationswerkzeug mit entsprechendem Workflow und Methoden liegt vor.

2. Stand von Wissenschaft und Technik

2.1. Stand der Wissenschaft und Technik

Das Projekt SoHMuSDaSS gibt mit seinen Ergebnissen sehr gut den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik wieder:

- Es wurde ein 0D-Modell entwickelt mit der Beschreibung der wesentlichen, potenzial-induzierten Alterungsphänomene in einer Katalysatorschicht (Pt-Auflösung, Pt-Agglomeration, PtOx-Bildung, Place-Exchange-Mechanismus).
- Ein neu entwickeltes Leistungsmodell wurde zur Analyse experimenteller Alterungsdaten genutzt. In Kombination mit Versuchen mit einer segmentierten Laborzelle konnte die lokale Alterung ausgewertet werden.
- Umfangreiche Schnellalterungstests haben die Mechanismen für die Alterung einzelner Materialien aufgezeigt.
- Die Untersuchungen wurden mit damals üblichen Platinbeladungen von 0,4 mg/cm² durchgeführt.
- Heute verfügbare Strömungsmodelle zur Auslegung von Brennstoffzellen-Bipolarplatten berücksichtigen Degradationseffekte noch nicht in belastbarer Weise.

2.2. Abgrenzung zu anderen laufenden Forschungsvorhaben

Es sind kein Vorhaben bekannt, die eine vollständig durchgängige Simulation von Alterungseffekten in Brennstoffzellen MEAs und den konsequenten Ansatz von 1D und 3D-Simulation in Zusammenspiel von Charakterisierung verfolgen, wie es in dem beantragten Vorhaben geschehen ist. FC-RAT wird sehr eng mit dem Projekt FC-CAT abgestimmt. Die in FC-RAT entwickelten Alterungsmodelle werden mit den Leistungsmodellen aus FC-CAT kombiniert und stellt somit eine sinnvolle Erweiterung von FC-CAT dar.

II. Sachbericht

1. Ergebnisse

1.1. AP 7 - Entwicklung 3D-CFD-Simulation

1.1.1 AP 7.1 Implementierung Pt-Auflösung und Pt-Oxidation

Nach einer eingehenden Literaturstudie und Einarbeitung in die Schädigungsmodelle für Pt-Auflösung und Pt-Oxidation wurden die erforderlichen Reaktionsgleichungen, s.a. Kregar et.al. [1], in das Degenerationsmodell von FIRE M implementiert [2].

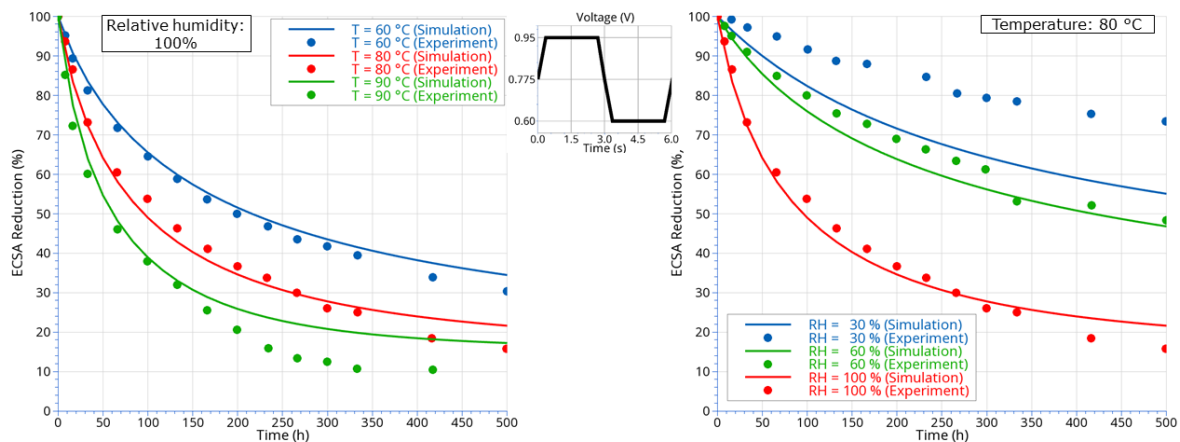


Abbildung 2: Vergleich zwischen gemessenen [3] und simulierten Reaktionen auf zyklische Spannungssprünge (300.000 Zyklen) für verschiedene Betriebszustände.

In Abbildung 2 ist die, für die zur Verifikation herangezogene Brennstoffzelle, gemessene Reduktion der elektrochemisch aktiven Oberfläche (ECSA) bei Beaufschlagung mit zyklischen Spannungssprüngen für verschiedenen Betriebstemperaturen und relativen Feuchten dargestellt. Diese sind Simulationen mit dem in FIRE M implementierten Modell gegenübergestellt. Die Verminderung der ECSA ist hierbei auf die Pt-Oxidation, Ostwald Reifung und der Agglomeration von Partikeln zurückzuführen, die vom Degenerationsmodell in FIRE M enthalten sind.

Hierbei konnte die grundsätzliche Eignung des implementierten Modells die relevanten physikalischen Vorgänge richtig wiederzugeben aufgezeigt werden.

1.1.2 AP 7.2 Implementierung Kohlenstoff-Korrosion

Nach einer eingehenden Literaturstudie und Einarbeitung in die Schädigungsmodell für Kohlenstoffkorrosion wurde ein auf dem Modell von Pandey et. al. [4] basierendes Kohlenstoffkorrosionsmodell in das Degenerationsmodell von FIRE M implementiert [2].

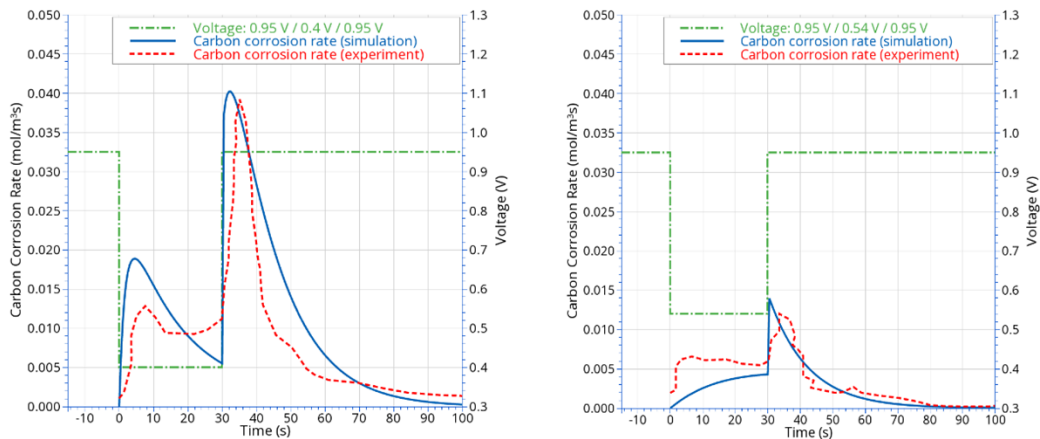


Abbildung 3: Vergleich zwischen gemessenen [5] und simulierten Kohlenstoff-Korrosionsraten für verschiedene Spannungssprünge bei 1bar, 80°C und 100% relativer Feuchte.

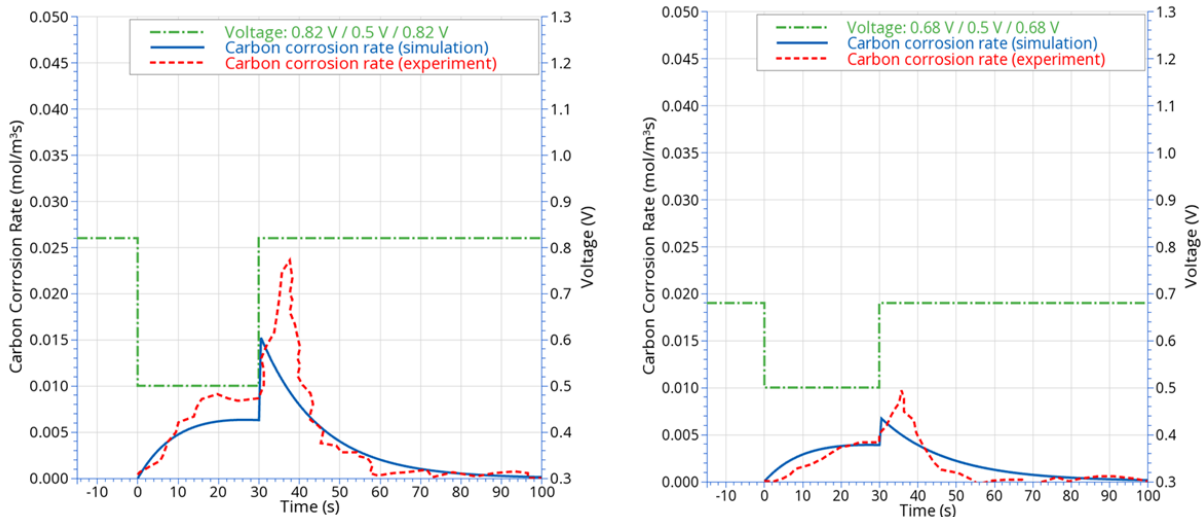


Abbildung 4: Vergleich zwischen gemessenen [5] und simulierten Kohlenstoff-Korrosionsraten für verschiedene Spannungssprünge bei 1bar, 80°C und 100% relativer Feuchte.

In Abbildung 3 und Abbildung 4 ist beispielhaft die Reaktion des Modells auf Spannungssprünge dargestellt, die für die Verifikation des Modells und der Implementierung herangezogen wurde. Hierbei konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und den experimentell ermittelten Kohlenstoff-Korrosionsraten erzielt werden.

1.1.3 AP 7.3 Implementierung Place-Exchange-Mechanismus

Nach einer eingehenden Literaturstudie und Einarbeitung in die Wirkmechanismus des Schädigungsprozesses Place Exchange wurden das Degenerationsmodell von Schneider et al. [3] in FIRE M implementiert.

Hierbei wurden Modifikationen an der Definition der Partikelgrößenverteilung der Platinpartikel vorgenommen, vgl. [6].

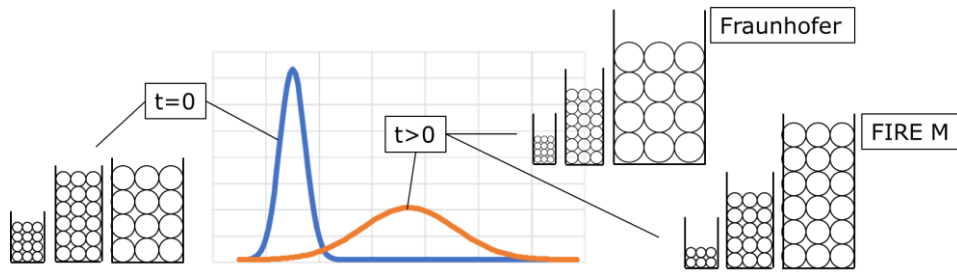


Abbildung 5: Schematische Darstellung der zeitlichen Veränderung der Platinpartikelgröße und -klassen

Im ursprünglichen Modell wird von einer konstanten Anzahl von Partikeln pro Klasse ausgegangen, die lediglich ihre Größe verändern. Da durch Kohlenstoffkorrosion jedoch mit einer Veränderung der Anzahl der Partikel pro Klasse gerechnet werden muss und der besseren numerischen Abbildbarkeit von konstanten Partikelgrößen in den Klassen wird in FIRE M auf diese Modellierung zurückgegriffen. Hierbei können die Partikel die Klasse wechseln, was zu einer Änderung der Anzahl der Partikel pro Klasse führt, s. Abbildung 5.

1.1.4 AP 7.4 Validierung der Schädigungsmodelle anhand differentieller Zellen

Nach einer der Implementierung der Schädigungsmodelle in den Arbeitspaketen 7.1-7.3 wurde eine Methode für die Berechnung von großen Zyklenzahlen, und damit sehr langen Realzeiten, entwickelt.

Hierfür wird eine initialen Transienten 3D-CFD Simulation mit einem vorgeschriebenen Spannungs- oder Stromprofil durchgeführt. Diese Simulation bildet alle dynamischen Prozesse mit den erforderlichen kleinen Zeitschritten ab. Je nach Komplexität des Rechnernetzes können mit diesem Verfahren Zeiträume bis 100 Sekunden Sinnvoll abgebildet werden. Während dieser Simulation werden die lokale Spannung, Temperatur, Feuchtigkeit, Sauerstoffkonzentration und Quellen über mehrere Zyklen aufgezeichnet. Nach einer bestimmten Zeit wird die Aufzeichnung gestoppt und die aufgezeichneten Zyklen werden viele Male wiederholt, indem Teilzeitschritte innerhalb eines großen globalen Zeitschritts verwendet werden. Zum Beginn des globalen Zeitschritts kann die Rückkopplung auf die Leistung berechnet werden und die Zyklen können aktualisiert, d. h. neu berechnet werden. Mit dieser Methode können sehr große physikalische Zeiten von mehreren 100 - 1000 Stunden bis hin zur gesamten Lebensdauer der Brennstoffzelle mit 3D CFD berechnet werden [2].

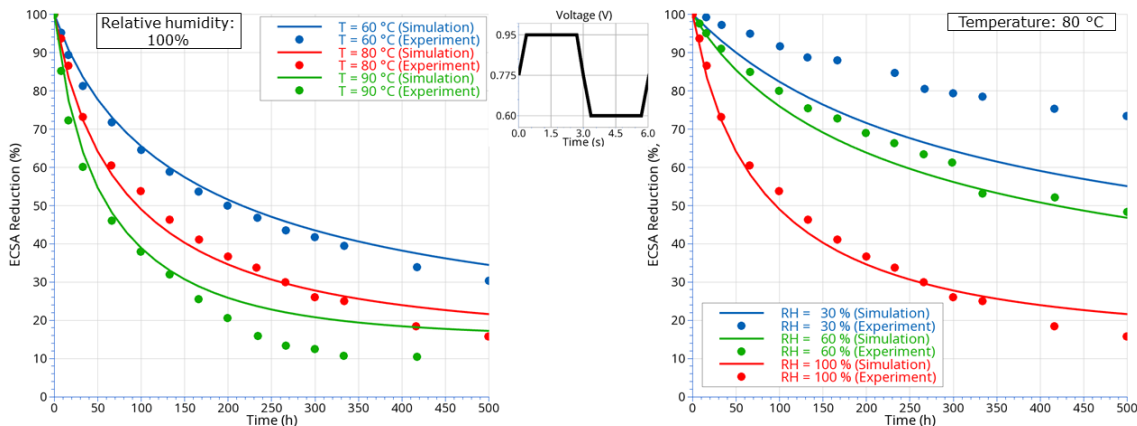


Abbildung 6: Vergleich zwischen gemessenen [3] und simulierten ECSA-Reduktionen für verschiedene Temperaturen und relative Feuchten bei 1 bar

In Abbildung 3 sind die mit dem beschriebenen Verfahren ermittelten ECSA-Reduktionen für verschiedene Temperaturen und relative Feuchten beim Beaufschlagen der Testzelle mit einem zyklischen Spannungsprofil über 300.000 Zyklen (500 Stunden) dargestellt. Hierbei konnte für den Temperatureinfluss eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten erzielt werden. Der Einfluss der relativen Feuchtigkeit auf die Degeneration der Testzelle wird im Bereich von hohen relativen Feuchten ebenfalls sehr gut getroffen. Lediglich bei den trockenen Betriebspunkt mit 30% relativer Feuchte konnten die Messungen nur qualitativ wiedergegeben werden.

Abbildung 7 zeigt die die Reaktion des Modells auf verschiedene Spannungszyklen. Es konnte hierbei nicht die gleiche Vorhersagegüte wie bei der Temperatur und Feuchtevariation erzielt werden, jedoch immer noch eine gute qualitative Übereinstimmung mit den experimentellen Daten.

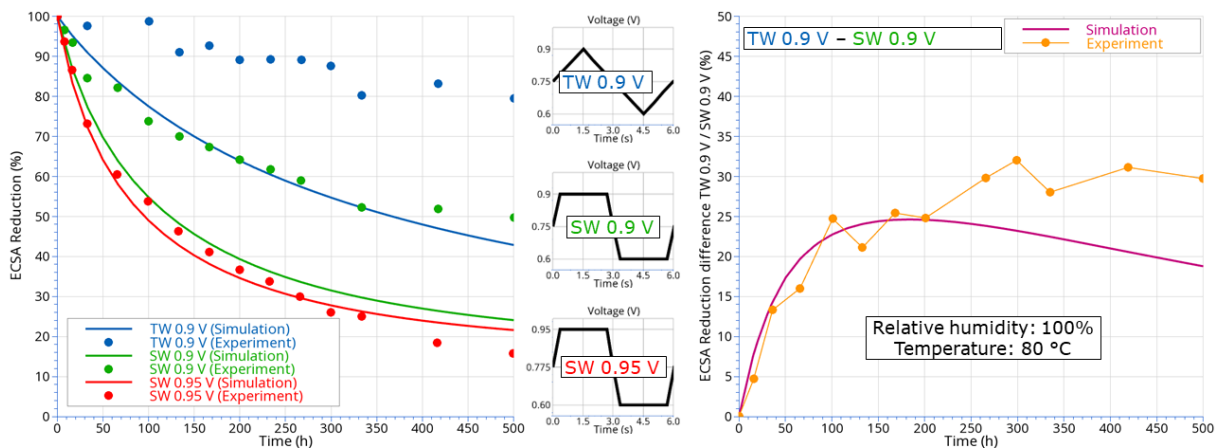


Abbildung 7: Vergleich zwischen gemessenen [3] und simulierten ECSA-Reduktionen für verschiedene Spannungszyklen (links) und die prozentuale Differenz zwischen den TW 0.9 V und SW 0.9 V Zyklus (rechts)

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse eines Validierungsfalls bei höherem Druck dargestellt. Hierbei wurde das von Kneer et al. [7] beschriebene Setup untersucht. Es konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und die experimentell ermittelte Reduktion der normalisierten Stromdichte über 300 Stunden erzielt werden.



Abbildung 8: Vergleich zwischen gemessenen [7] und simulierten ECSA-Reduktion für Spannungssprünge bei 2.7 bar an der Anode und 2.5 bar an der Kathode, 90°C und 100% relativer Feuchte.

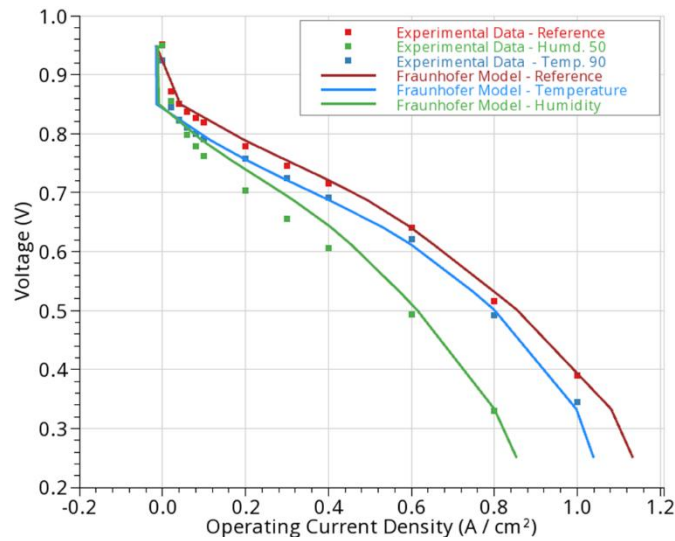


Abbildung 10: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Polarisationskurven für den Referenzfall (Reference), einen Betriebspunkt mit erhöhter Temperatur (Temp. 90) und reduzierte relative Feuchte (Humd. 50). Linien repräsentieren die Simulation, Symbole die Messung.

In Abbildung 3 sind exemplarisch die Polarisationskurve der ungealterten Zelle und in Abbildung 11 die Gegenüberstellung der experimentell und numerisch ermittelten Stromdichteverteilung für drei Betriebspunkte dargestellt. Hierbei zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation.

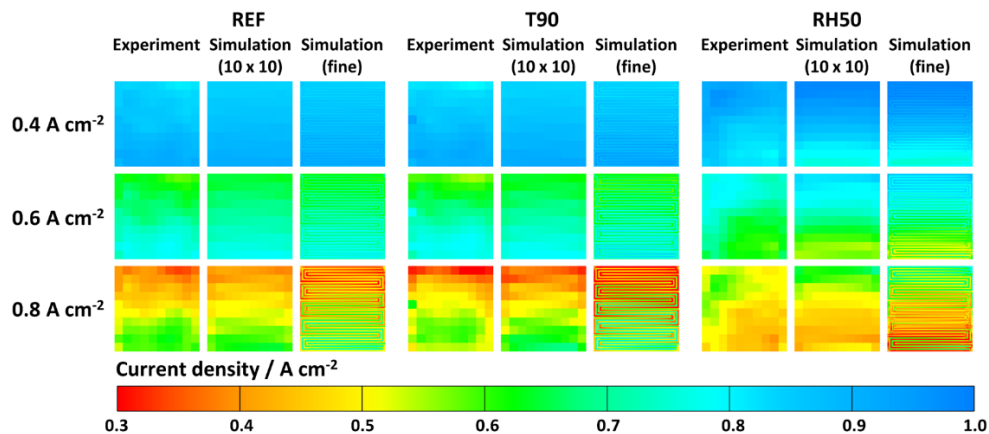


Abbildung 11: Stromdichteverteilung in Simulation und Experiment

1.1.7 AP 7.7 Validierung der verbesserten Degradationsmodelle anhand ATC-Zelle

Da aufgrund von Verzögerungen im Projekt noch nicht ausreichend Daten für die ATC-Zelle vorlagen wurden bisher lediglich vorarbeiten wie Aufbereitung der Geometriedaten für die Vernetzung und Studien zur Vernetzungsstrategie durchgeführt.

Um die notwendige Modellvalidierung durchführen zu können und Verzögerungen im Projekt zu reduzieren wurden gleichwertige Untersuchungen an der segmentierten Zellhardware von S++ (Deutschland) mit der kommerzielle Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen-Membran-elektrode vom Typ CCM-H25-N212 von Quintech (Deutschland), vgl. 5. Zwischenbericht FC-CAT AP 8.8, durchgeführt.

Hierbei wird die Zelle für drei unterschiedliche Betriebspunkte für je 50h (30000 Zyklen) gealtert. Hierbei kommt das im Abschnitt 1.1.4 beschriebene Verfahren zum Einsatz.

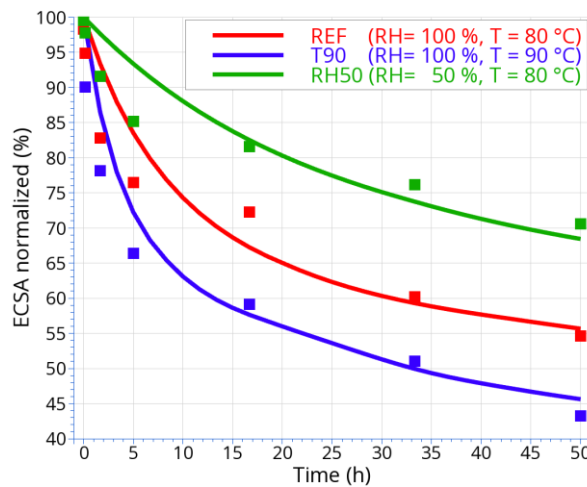


Abbildung 12: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten ECSA-Reduktionen für verschiedene Betriebspunkte über der Zeit

Abbildung 13 zeigt die berechneten und gemessenen Polarisationskurven für die frischen und gealterten Zellen, wiederum für drei Betriebspunkte dargestellt. Wie erwartet führt die höhere Temperatur zu einem größeren Leistungsverlust, während die niedrigere Luftfeuchtigkeit zu geringeren Verlusten führt. Die Zunahme der negativen Steigung der Kurve der gealterten Zelle im Vergleich zur frischen Zelle ist höchstwahrscheinlich auf die Verringerung der Ionenleitfähigkeit im CL zurückzuführen.

Abgesehen von geringfügigen Abweichungen im Niederspannungsbereich wird die Leistung der degradierten Zelle mit hoher Genauigkeit vorhergesagt.

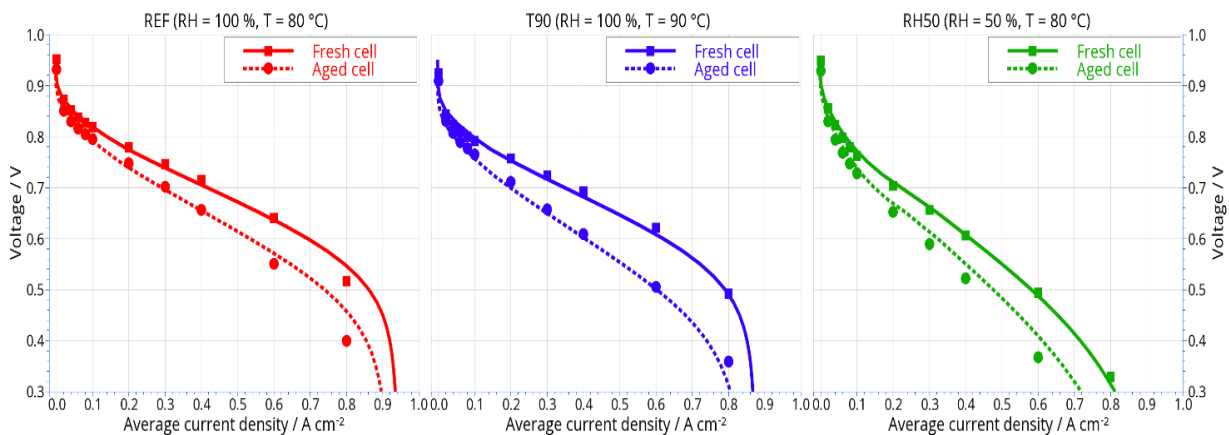


Abbildung 13: Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Polarisationskurven für die frischen und gealterten Zellen bei den untersuchten Betriebszuständen

1.1.8 AP 7.8 Implementierung der erweiterten Reaktionsmodelle

Das chemische Degradationsmodell für die Katalysatordomäne greift auf ein Reaktionsnetzwerk zurück und berücksichtigt die folgenden in Abbildung 14 dargestellten Elementarvorgänge:

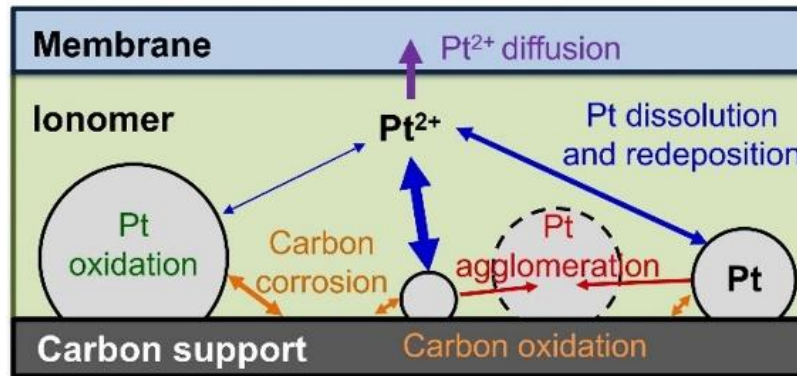


Abbildung 14: Berücksichtigte Elementarreaktionen im Schädigungsmodell

Hierbei fungieren als Precursorreaktionen die Kohlenstoffträgerkorrosion und die Platin-Oxidation. Die Kohlenstoffträgerkorrosion katalysiert den Ablöse- und den Agglomerationsvorgang von Platinpartikeln. Die durch den Oxidationsvorgang erzeugten Pt^{2+} -Ionen werden in der Ionomermatrix aufgelöst und können anschließend in die Membranschicht diffundieren. Als Ergebnis sinkt die Anzahl der katalytisch aktiven Platinpartikel, ebenso verändert sich die Größenverteilung der Partikel. Dies wirkt sich negativ auf die Aktivität des Katalysators aus. Zwischen dem Brennstoffzellen-Performancemodell und dem Schädigungsmodell findet die Kopplung zeitlich und eindimensional räumlich aufgelöst statt: zu jedem Simulationszeitschritt wird der lokale Zustand im MEA für jedes diskrete Element, darunter die Wasserstoffkonzentration im anodenseitigen Katalysator, an das Schädigungsmodell übermittelt und die resultierende Reduzierung der elektrochemisch aktiven Oberfläche an das Performancemodell zurückübermittelt. Dieser Aufbau wurde in den Quellcode von AVL CRUISE M implementiert und soll im nächsten Schritt hinsichtlich der Modellgüte bewertet werden.

1.1.9 AP 7.9 Implementierung der erweiterten Transportmodelle

Ein transientes und eindimensional aufgelöstes Wassertransportmodell wurde im CRUISE M Quellcode implementiert. Das Modellprinzip ist in Abbildung 9 dargestellt:

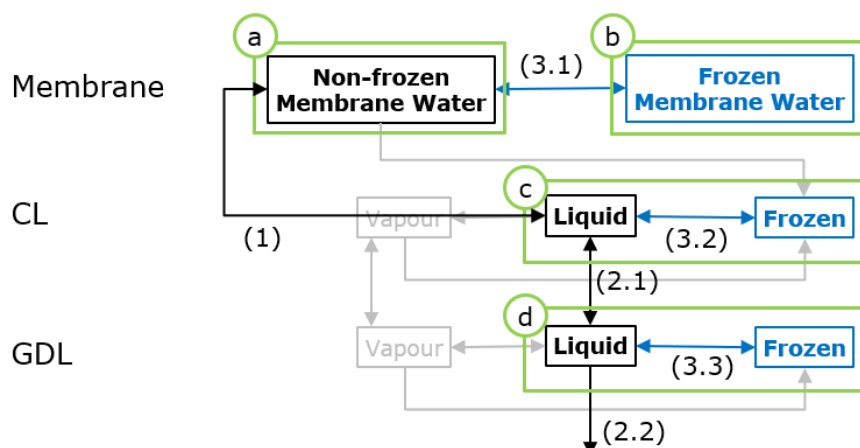


Abbildung 15: Wassertransportmodell für Brennstoffzellen-Performancemodell

Der Wassergehalt wird in jedem diskreten Element für Membran-, Katalysator- und Gasdiffusionsschichtdomäne ermittelt, wobei Transportphänomene zwischen den Domänen und Phasenübergang innerhalb einer Domäne berücksichtigt werden. Steigende Wassermenge in der Membran beeinflusst die ionische Leitfähigkeit der Membran auf positiver Weise, wohingegen die Anwesenheit von flüssigem Wasser und Eis sowohl in



AVL Deutschland GmbH

der Katalysatorschicht als auch der Gasdiffusionsschicht den diffusiven Stofftransport behindern.

Dieser Aufbau wurde in den Quellcode von AVL CRUISE M implementiert und soll im nächsten Schritt hinsichtlich der Modellgüte bewertet werden.

1.1.10 AP 7.10 Detaillierte Validierung des Leistungs- und des Alterungsmodells

Für die Leistungsvalidierung wurde das Verhalten anhand eines Brennstoffzellenstapels im industriellen Maßstab untersucht. Für die Modellparametrierung wurden Konstruktions- und Betriebsdaten des tatsächlichen Systems, wie z. B. geometrische Abmessungen, Materialeigenschaften und Betriebsbedingungen herangezogen. Diese Daten werden dann verwendet, um ein mathematisches Modell zu entwickeln, das das Verhalten des tatsächlichen Systems nachbildet. Das Modell wird anhand von experimentellen Daten kalibriert, die aus dem tatsächlichen System gewonnen wurden, wie z. B. Spannungs-/Stromkurven und Wasserbilanzmessungen. Die Validierung des Modells erfolgt anschließend durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten eines transienten Leistungszyklus mit dem Ziel, das Maß der Übereinstimmung zwischen den beiden zu bewerten. Der Validierungsprozess kann die Anpassung von Modellparametern oder Annahmen beinhalten, um die Genauigkeit der Simulationsergebnisse zu verbessern.

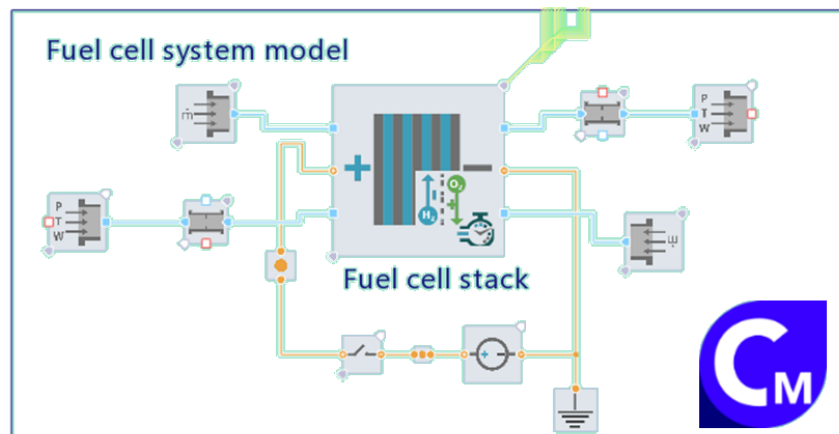


Abbildung 16: Kalibrierungs- und Validierungsmodellsetup in CRUISE™ M

Auf der Alterungsmodellierungsseite wurde zur Vorbereitung der Validierung ein Kalibrierungsworkflow entwickelt, um das mechanistische Alterungsmodell und das elektrochemische Brennstoffzellenstapel-Leistungsmodell zu konfigurieren. Dieser Arbeitsablauf zielt darauf ab, ein Simulationsergebnis zu erzielen, das mit den gemessenen Daten übereinstimmt, insbesondere im Hinblick auf den Verlust der Stromdichte, die als primäre Messgröße für die Quantifizierung des chemischen Aktivitätsverlusts dienen. Erste Vergleiche zwischen den gemessenen und simulierten Daten haben zufriedenstellende Ergebnisse erbracht. Der Kalibrierungsworkflow wird weiter verfeinert und getestet, sobald ein Validierungsdatensatz verfügbar ist.

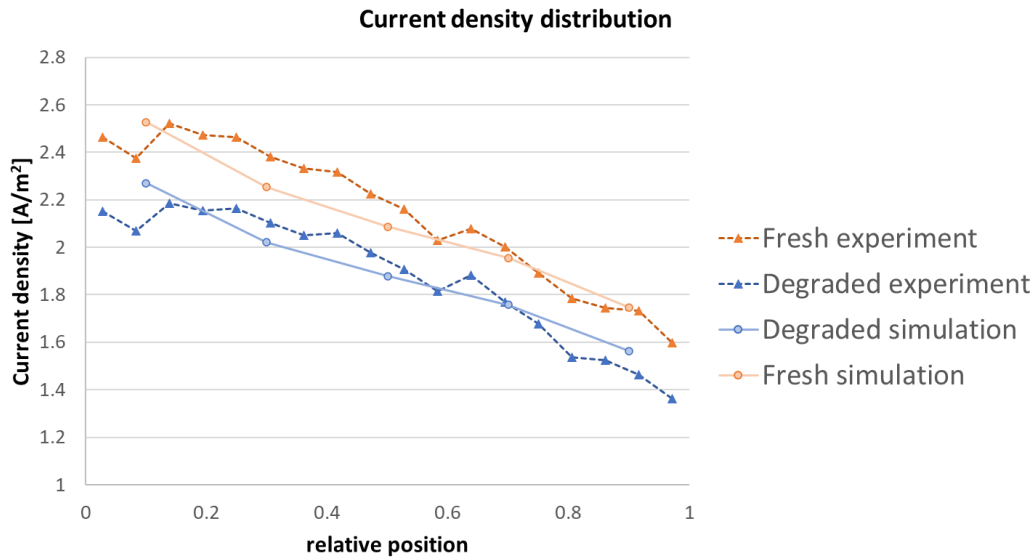


Abbildung 17: Referenz-Simulation-Abgleich von Verlust der Stromdichte als Folge der Degradation

1.1.11 AP 7.11 3D-Modellierung „O₂ Starvation“ während des Abschaltvorgangs

Im Normalbetrieb der PEM-Brennstoffzelle wird an der Anode Wasserstoff für die Wasserstoffoxidiationsreaktion und an der Kathode Sauerstoff für die Sauerstoffreduktionsreaktion zugeführt. Dabei werden Strom und Wasser erzeugt. Unter der Bedingung von Luftmangel für die Reduktionsreaktion, sinkt das Kathodenpotenzial. Unter extremen Bedingungen wird die Sauerstoffreduktionsreaktion durch die Wasserstoffentwicklungsreaktion ersetzt und Wasserstoff wird auf der Kathodenseite erzeugt [8]. Abbildung 18 zeigt einen schematischen Vergleich zwischen dem Normalbetrieb und der Luftmangelreaktion.

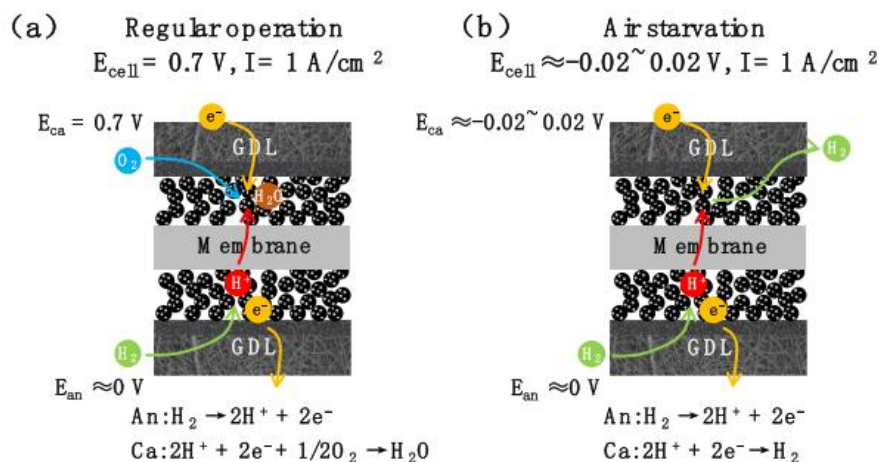


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Reaktion der Zelle bei normalem Betrieb; (b) Schematische Darstellung des Zellbetriebs während einer vollständigen Luftverarmung [8]

Die Verknappung kann lokal oder vollständig sein und ist in der meisten Situation auf folgende Gründe zurückzuführen: ungleichmäßige Verteilung der Reaktanten im Strömungsfeld, dynamische Belastungen und/oder plötzliche An- und Abfahrvorgänge, nicht optimales stöchiometrisches Verhältnis zwischen eingesetztem Brennstoff und Oxidationsmittel, Probleme beim Wassermanagement, Versagen der Kompressorsteuerung und Wasserstoffübergang aufgrund von MEA-Degradation [9]. Erkennbar ist dies an einem starken

Abfall der Zellenspannung, der in schwerwiegenden Fällen eine heiße Stelle auf der Oberfläche einer Membranzelle verursachen kann. In dieser Arbeit werden die Regulierung des Sauerstoffverhältnisses in der Kathode und ihre Auswirkungen in Bezug auf die sogenannte Starvation untersucht.

1.1.11.1. Aufbau der Simulation

Um die Auswirkungen des Sauerstoffverhältnisses zu verstehen, wurde eine Sensitivitätsanalyse für eine Zelle mit einem geraden Kanal und einer aktiven Fläche von 50 mm² durchgeführt, wie in Abbildung 19 dargestellt. Das Berechnungsnetz besteht aus Kathodenkanal, Anodenkanal, Gasdiffusionsschichten, Katalysatorschichten und der Membran. Die Lage der Kanalein- und auslässe weist auf eine Gegenstromkonfiguration hin. Das Berechnungsnetz enthält 28.500 hexaedrische Berechnungselemente.

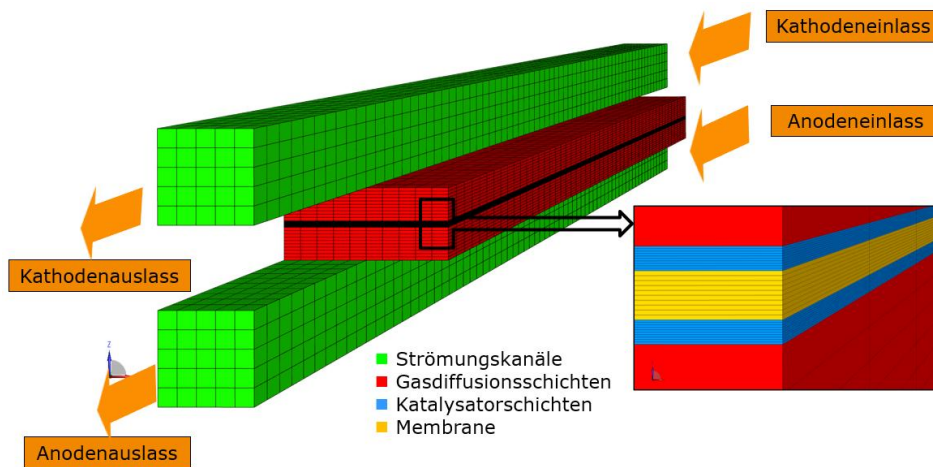


Abbildung 19: Geometrie der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Einzelkanal-Brennstoffzelle

In Tabelle 1 sind die Randbedingungen und Betriebsbedingungen aufgeführt. Die Berechnung mit diesen Werten wurde als Referenz definiert und die folgenden Simulationen wurden unter Variation des stöchiometrischen Sauerstoffverhältnisses vom Überschussniveau, das einen ordnungsgemäßen Betrieb gewährleistet, bis zur stöchiometrischen Definition durchgeführt. Insgesamt wurden 7 Fälle in FIRE M [2] analysiert. Die Berechnungszeit für einen Fall beträgt etwa 3 Stunden mit 20 CPUs für 8 Lastpunkte.

Tabelle 1: Randbedingungen und Betriebsbedingungen

Beschreibung		Wert
Zelltemperatur		80 °C
Elektrischer Zustand	Zellspannung	0,25 V - 0,95 V
Kathode	Relative Luftfeuchtigkeit	0,30
	Stöchiometrie	1,50
	Auslassdruck	2,30 bar
	Relative Luftfeuchtigkeit	0,50
Anode	Stöchiometrie	1,30
	Auslassdruck	2,50 bar

1.1.11.2. Der Einfluss der Regulierung des stöchiometrischen Sauerstoffverhältnisses

Die berechneten Polarisationskurven sind in Abbildung 20 dargestellt. Die Unterschiede in der Brennstoffzellenleistung zwischen den Fällen beruhen hauptsächlich auf Aspekten im Zusammenhang mit der Sauerstoffversorgung und dem Sauerstofftransport. In den Fällen, mit einem stöchiometrischen Verhältnis vom Referenzverhältnis (1,5) bis zu einem ähnlichen wie beim Wasserstoffverhältnis (1,3), wird der Leistungsverlust hauptsächlich durch den Verlust durch den Massentransport bei hoher Stromdichte (Konzentrationsverlust) dominiert. Unterhalb 1,3 verlangsamt sich die Sauerstoffreduktionsreaktion an der Kathode stärker, was zu einem erheblichen Leistungsabfall führt. Der ohmsche Verlust und der Konzentrationsverlust nehmen bis zum völligen Stillstand deutlich zu, wie aus der orangefarbenen Kurve hervorgeht (stöchiometrisches Verhältnis gleich 1,00).

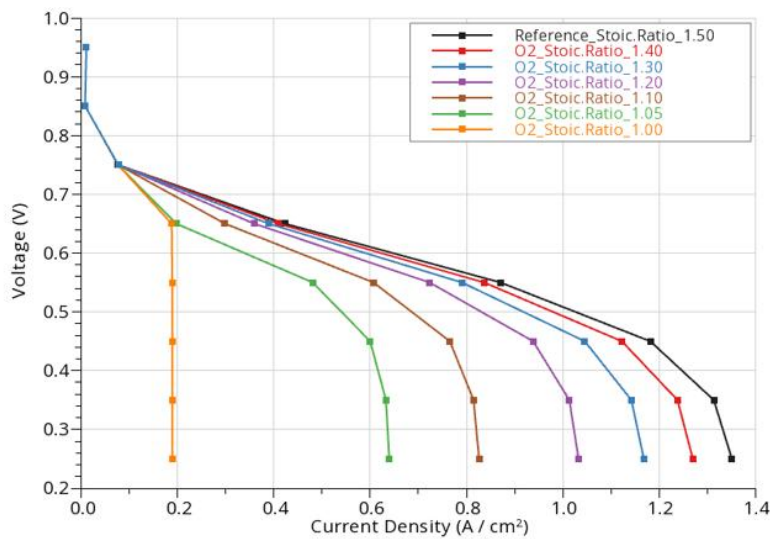


Abbildung 20: Polarisationskurve für verschiedene stöchiometrische Sauerstoffverhältnisse

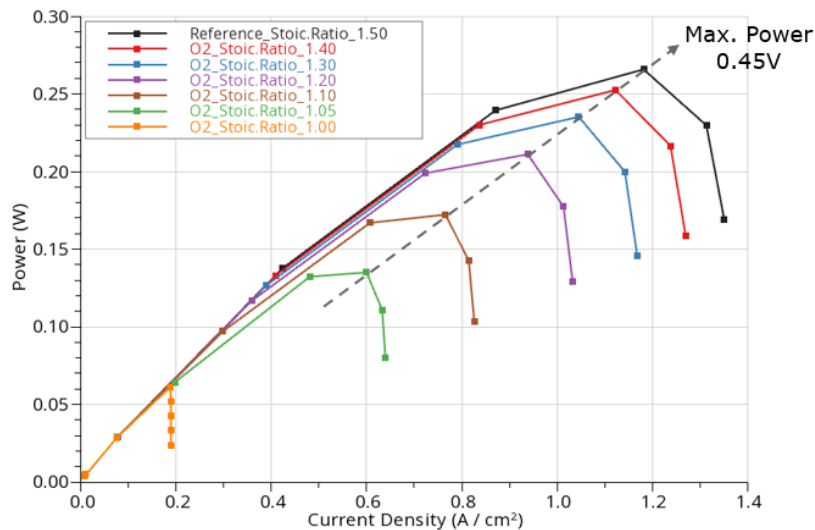


Abbildung 21: Leistungskurve für verschiedene stöchiometrische Sauerstoffverhältnisse

Ergänzend dazu ist in Abbildung 21 die Leistungskurve dargestellt. In allen Kurven ist die maximale Leistung im Arbeitspunkt von 0,45 V zu erkennen. Ähnlich wie bei den Polarisationskurven ist der Leistungsabfall zwischen den Kurven bis zu einem

stöchiometrischen Verhältnis von 1,3 (blaue Kurve) geringer. Unterhalb dieses Wertes verschlechtert sich die Leistung mit jeder Verringerung des stöchiometrischen Verhältnisses um 0,1 deutlich stärker.

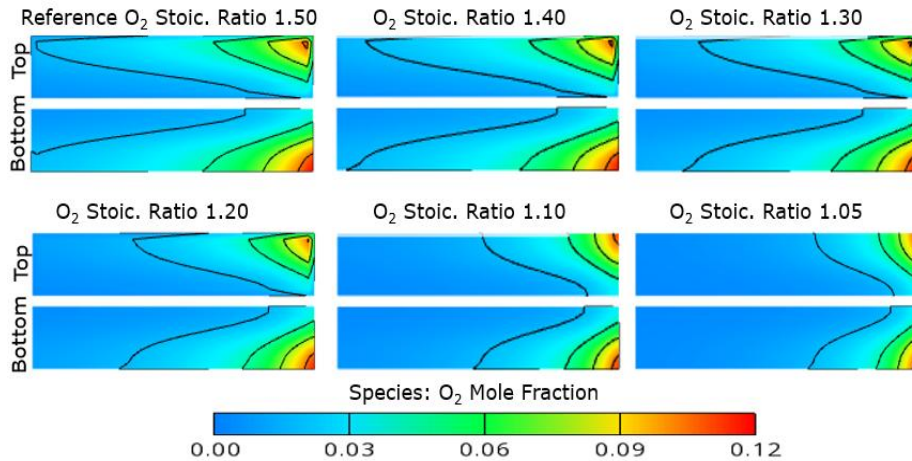


Abbildung 22: Verteilung der Sauerstoffmolfraktion mit Iso-Linie in der Kathodenkatalysatorschicht neben der GDL (oben) und der Membran (unten) bei 0,45 V (maximale Leistung)

Von *Abbildung 22* bis *Abbildung 24* sind die 3D-Simulationsergebnisse für eine Betriebsspannung von 0,45 V dargestellt. Die Ergebnisse des stöchiometrischen Verhältnisses von 1,00 wurden bei dieser Analyse nicht berücksichtigt, da die Zelle bei dieser Konzentration völlig funktionsunfähig war. Außerdem wurden die 3D-Ergebnisse zur besseren Visualisierung skaliert und geben einen tieferen Einblick in das Zellverhalten.

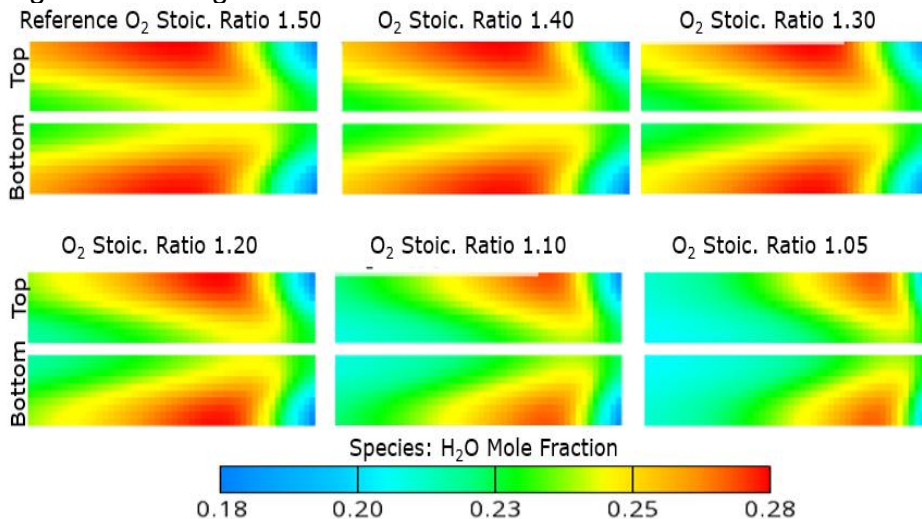


Abbildung 23: Verteilung des Wassermolekularanteils in der Kathodenkatalysatorschicht neben der GDL (oben) und der Membran (unten) bei 0,45 V (maximale Leistung)

Abbildung 22 zeigt die Verteilung des Sauerstoffmolanteils mit der entsprechenden Iso-Linie in der Kathodenkatalysatorschicht (CCL). Das obere Bild für jedes der Verhältnisse zeigt die Verteilung auf der CCL-Seite neben der Gasverteilungsschicht und das untere Bild für jedes der Verhältnisse die CCL-Seite neben der Membran. In allen Bildern ist der Sauerstofffluss von rechts (Einlassposition) nach links (Auslassposition) gerichtet. Die Verringerung des stöchiometrischen Verhältnisses führt zu einer fortschreitenden Verringerung der Sauerstoffverteilungsfläche. Bei Verhältnissen unterhalb 1,3 ist die Zelle bei niedrigem stöchiometrischem Verhältnis von der Mitte bis zum Auslass sauerstoffarm.

Ergänzend dazu kann die Auswirkung von Sauerstoffmangel auf das Vorhandensein von Wasser in der CCL betrachtet werden, wie in Abbildung 23 dargestellt.

Aufgrund der Oxidations- und Reduktionsreaktionen bildet sich Wasser in der CCL, was ein guter Indikator für die Reaktionsgeschwindigkeit der Zelle ist. In geringer Entfernung vom Einlass weist die Wasserkonzentration einen höheren Wert auf und breitet sich in der Zelle bis zum Auslass im Referenzfall aus.

Das Vorhandensein von Wasser wird mit der Verringerung des stöchiometrischen Verhältnisses ebenfalls reduziert. Bei einem stöchiometrischen O₂-Verhältnis von 1,05 verringern sich die Wassermolekülanteile beträchtlich, wobei in der Nähe des Einlasses ein kleiner aktiver Bereich vorhanden ist.

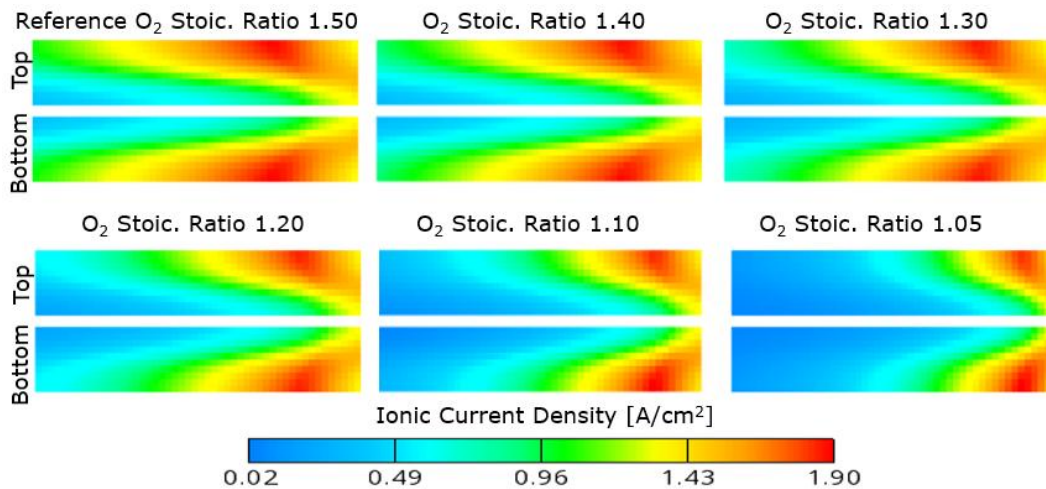


Abbildung 24: Verteilung der Ionenstromdichte neben der Kathodenkatalysatorschicht (oben) und der Anodenkatalysatorschicht (unten) bei 0,45 V (maximale Leistung)

Abbildung 24 stellt die Verteilung der Ionenstromdichte dar. Das obere Bild zeigt die Verteilung auf der Membranseite neben dem CCL und das untere Bild neben der Anodenkatalysatorschicht. Die maximale Dichte befindet sich in der Nähe des Einlasses und breitet sich entlang des Kanals entsprechend dem Sauerstoffzugang aus. Die Region der hohen Dichte, deren Fläche sich mit dem Absinken des stöchiometrischen Verhältnisses ebenfalls reduziert, verursachen eine Stromreduzierung die im direkten Zusammenhang mit der Sauerstoffverfügbarkeit steht. Hervorzuheben ist die Ähnlichkeit zwischen Bereichen mit hoher Sauerstoffkonzentration (Abbildung 22) und der hohen Stromdichte der Membran (Abbildung 24).

1.1.12 AP 7.12 Untersuchung des „Starvation“ Verhaltens über Shutdown Manövern

Im vergangenen Berichtszeitraum wurde erfolgreich das Kathodensystemmodell aufgebaut, um die luftseitige Mediumversorgung darzustellen. Dies schließt die Darstellung der wichtigen Hauptaggregate, Kompressor und Befeuchter, mit ein. Künftig könnten Feinabstimmungen und Kalibrierungen einzelner Komponenten mit dem aufgebauten Modell aus Ausgangsbasis durchgeführt werden, vorausgesetzt, entsprechende Referenzdaten sind verfügbar.

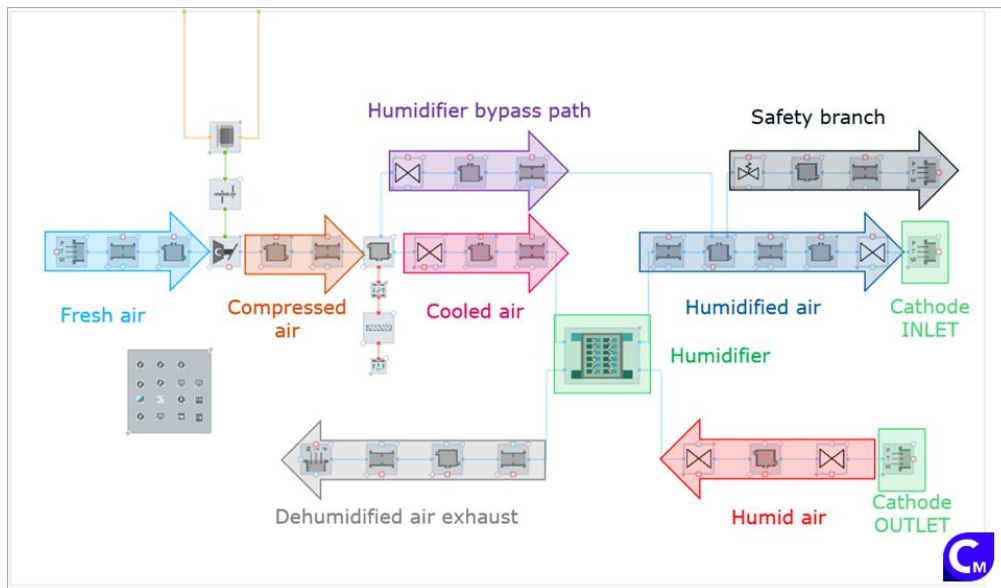


Abbildung 25: Modell des Kathodensystems in CRUISE™ M

Dabei haben vergangene Studien für Kathodensystemmodelle gleichen Umfangs und gleicher Komplexität eine Genauigkeit von durchschnittlich 1,5% Fehlerabweichung über transiente Performancezyklen aufgezeigt. Dabei wird verdeutlicht, dass präzise Ergebnisse unter verschiedenen Betriebsbedingungen angestrebt werden. Die nächsten Schritte werden darauf abzielen, diese Ergebnisse weiter zu verfeinern und zu validieren, um die Gesamtleistung und Effizienz des Kathodensystems zu optimieren.

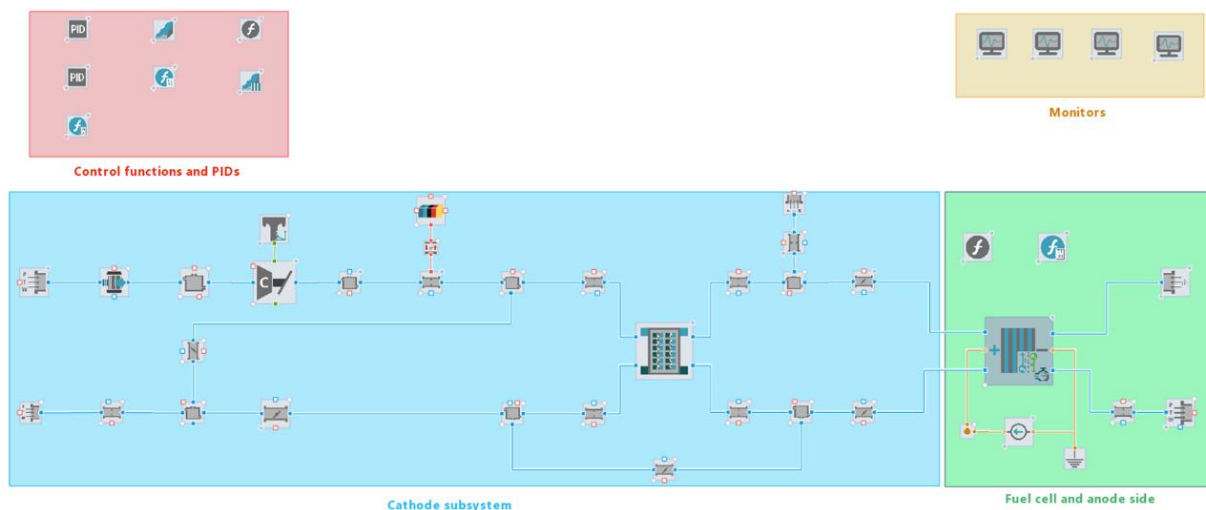


Abbildung 26: Integriertes Systemmodell mit Kathode und Brennstoffzellenstapel in CRUISE™ M

Die Integration des Kathodenmodells mit dem zuvor entwickelten Stackmodell zu einem umfassenden Systemmodell ermöglicht es, das Zusammenwirken zwischen den Betriebsweisen des Stacks, den Nebenaggregaten und dem Zustand des Gasmediums direkt zu veranschaulichen und zu analysieren.

Hinsichtlich der Sensitivität der Performance- und Degradationsberechnungen in Bezug auf den Sauerstoffgehalt im Gas werden die Mechanismen im Katalysator und in der Membran detailliert betrachtet. Diese Reaktionen sind Teil komplexer Netzwerke, deren Verständnis essenziell für die Optimierung der Elektrochemie und der Langzeitstabilität des Systems ist.

Auf Seiten des Performancemodells beeinflusst die Sauerstoffkonzentration die Verlustanteile infolge des Aktivierungsverlusts und des Transportverlusts.

Der Aktivierungsverlust ist dabei durch folgende Gesetzmäßigkeit im Performancemodell beschrieben und berücksichtigt die Sauerstoffkonzentration auf der Kathodenseite wie folgt:

$$U_{act}^c = -\frac{k_B \cdot T}{e_0 \cdot Z^c} \cdot \operatorname{arcsinh} \left(\frac{i + i_{H_2, rco}^c}{2 \cdot C_{act}^c \cdot \nu(c_{l/f, ACL})} \cdot e^{\frac{E_0^c}{k_B \cdot T}} \cdot \frac{1}{\sqrt{X_{O_2}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{X_{H_2O}}} \right) \quad (1)$$

Der Transportverlust wird durch die Grenzstromdichte bestimmt, letztere wird wie folgt berechnet und berücksichtigt ebenfalls die Sauerstoffkonzentration auf der Kathodenseite:

$$i_L^c = C_D^c \cdot D_{eff, O_2} \cdot C_{O_2} \cdot Z^c \cdot F \cdot f_c(c_{l/f, CL}) \cdot R_{CL}^a \cdot g_c(c_{l/f, GDL}) \cdot R_{GDL}^c \quad (2)$$

Erste Simulationen mit variabler Sauerstoffkonzentration weisen qualitativ plausible Korrelationen zwischen Spannungskurvevolution und Sauerstoffkonzentration auf (siehe Abbildung 27). Eine quantitative Evaluierung der Modellgüte wird angestrebt, sobald Referenzdaten vorliegen.

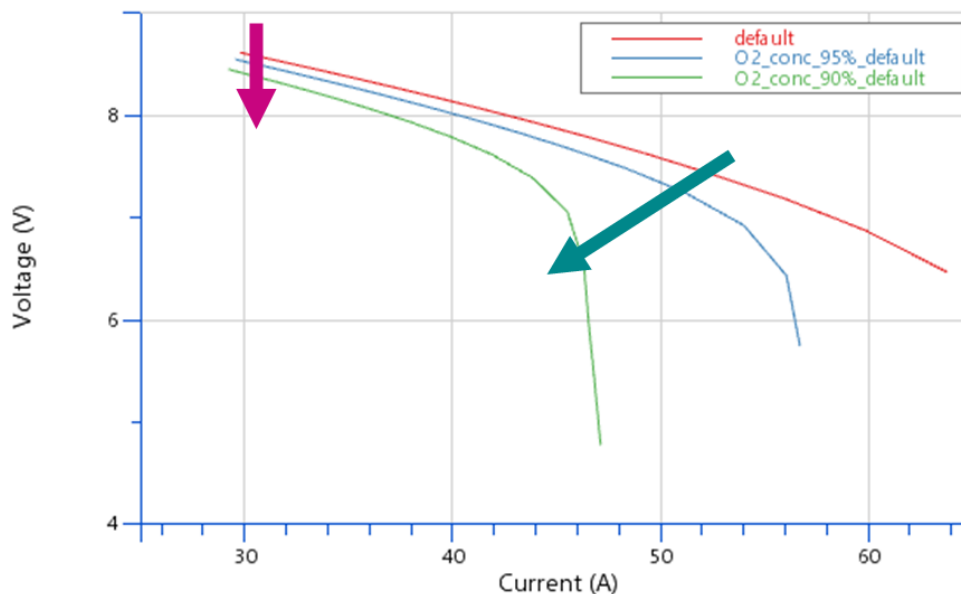


Abbildung 27: Einfluss der Sauerstoffverarmung auf der Kathodeneinlassseite auf die Polarisationskurve in der Simulation

Die Sensitivität der Degradationsberechnung im Katalysator wird durch Carbon-Korrosion und Pt-Oxidation beeinflusst, was zu einer Abnahme der Konzentration aktiver Zentren führt und letztendlich die Katalysatorfunktion beeinträchtigt.

Die Sensitivität der Degradationsberechnung in der Membran wird durch Peroxidbildung, Pt-Diffusion und OH-Radikale beeinflusst, was zu einem Abbau der Membran führen kann.

Derzeit werden die Randbedingungen für die zu untersuchende Degradationsphase noch festgelegt. Nach diesem Schritt wird eine qualitative Untersuchung zur Sensitivität der Alterung bzgl. Sauerstoffkonzentration in der Kathode durchgeführt und bei Verfügbarkeit von Referenzdaten eine quantitative Analyse durchgeführt.

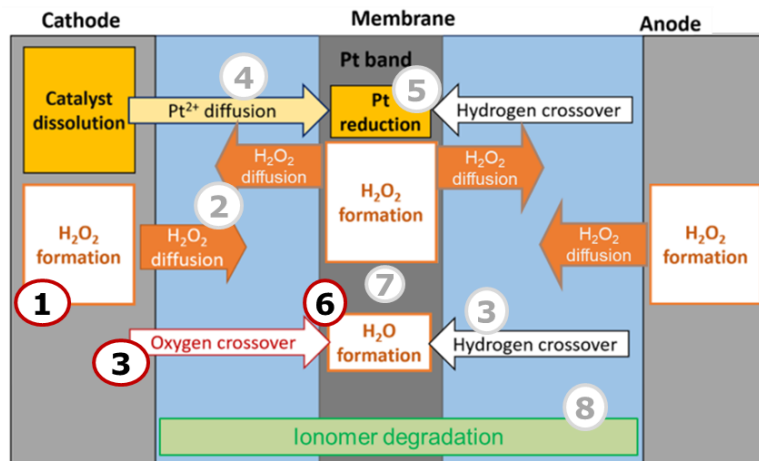


Abbildung 28: Degradationsreaktionen mit Sauerstoffbeteiligung im Membrandegradationsmodell

1.2. Schlussfolgerungen

Das Ziel des Vorhabens war die Analyse und quantitative Beschreibung der funktionalen Schichten mit neuen Materialien durch experimentelle ex-situ und in-situ Charakterisierung, sowie die Entwicklung neuer Modelle (1D, 2D) zur Beschreibung der dynamischen Prozesse in diesen neuen Strukturen/Schichten bzw. die Erweiterung eines bestehenden stationären 3D-Modells für eine verbesserte realitätsnahe Abbildung der stattfindenden Prozesse, im Besonderen die der Alterungsprozesse im Betrieb.

Teilaufgabe der AVL Deutschland GmbH war hierbei die Entwicklung und Erprobung der industriell einsetzbaren Alterungsmodellen und damit die Verbesserung und Ertüchtigung der Simulationsmethoden zur Brennstoffzellenentwicklung, basierend auf dem Simulationswerkzeugen AVL FIRE® M und CRUISE® M. Durch die signifikanten Erweiterungen der Degradationsmodellierung konnte die Genauigkeit der Simulationsmethode entscheidend verbessert werden. Dies wurde auch durch die im Projekt durchgeführten Validierungsrechnungen anhand experimenteller Untersuchungen bestätigt.

2. Anschlussfähigkeit

2.1. Verwertbarkeit

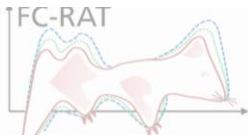
2.1.1 Wissenschaftliche Verwertung

Die Analyse der und quantitative Beschreibung der funktionalen Schichten mit neuen Materialien und im Wissensaufbau zur Charakterisierung und Modellierung von Degradationsprozessen hat bereits zu Projektlaufzeit zu einer wissenschaftlichen Verwertung geführt.

Neben Veröffentlichungen des ISE zu experimentellen Untersuchungen zur Alterung und nachfolgender Charakterisierung von Elektroden [10] sowie Analysen zu den Start-up und Shut-Down (SUSD) Prozessen in der ISE ATC-Zelle [11] konnten auch bereits erste Ergebnisse des im Rahmen des FC RAT Projekts entwickelten Simulationsmodelle und die dazugehörigen Simulationsmethoden bei Fachtagungen vorgestellt werden.

2.1.2 Nutzung und Verwertung

Die im Rahmen des FC RAT Projekts entwickelten Simulationsmodelle und die dazugehörigen Simulationsmethoden dienen der Erweiterung der Modellierungsqualität des CFD-Codes AVL FIRE® M und AVL CRUISE® M für die Entwicklung von Brennstoffzellen. Im Rahmen des Projekts wurden diese Modelle und Methoden weiterentwickelt und anhand experimenteller Daten verifiziert. Die entwickelten Modelle und Methoden können so bei der Entwicklung von PEM Brennstoffzellensystemen eingesetzt werden. Ein Teil der entwickelten Neuerungen werden mit zukünftigen Versionen von AVL FIRE® M und AVL CRUISE® M einsetzbar sein



AVL Deutschland GmbH

und können zusammen mit den AVL-Simulationswerkzeugen vermarktet werden. Ein Markterfolg dieser Entwicklungen ist demnach mittelfristig möglich. Die im Projekt gewonnenen Erfahrungen bei der Simulation der komplexen Strömungs- und chemischen Prozesse in PEM-Brennstoffzellen können von der AVL Deutschland auch bei Dienstleistungsprojekten genutzt werden. Der unmittelbare Nutzen für AVL Deutschland besteht darin, die bei der Entwicklung derartiger Technologien gewonnene Kompetenz über kommerzielle Simulationsdienstleistungen zu vermarkten.

2.2. Veröffentlichungen aus dem FC RAT-Projekt

Im Rahmen des Projekts entstanden folgende Veröffentlichungen:

- [10] P. Schneider et al., "Impact of Platinum Loading and Layer Thickness on Cathode Catalyst Degradation in PEM Fuel Cells", Journal of The Electrochemical Society, Volume 170, (2), 2023
- [11] Y. Hou et. al., „An experimental and numerical study of spatial and temporal catalyst degradation during start-up and shut-down of PEM fuel cells“, Journal of Power Sources, Volume 591, 30 January 2024

Für 2025 sind weitere Veröffentlichungen der Ergebnisse des Projekts und Beiträge auf Fachtagungen und Workshops geplant.

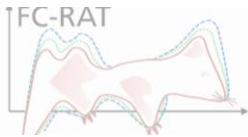
3. Zusammenfassung

Das FC RAT Projekt ist weitestgehend nach der ursprünglich Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung gelaufen. Durch die enge Zusammenarbeit zwischen Industrie-, und Hochschulpartnern hat das Projekt die meisten Projektziele erfolgreich erreicht.



4. Literaturverzeichnis

- [1] A. Kregar und et. al., „Mathematical Modeling of Temperature Dependent Degradation of Supported Pt-based Electrocatalyst in Voltage Cycling Experiment,“ in *71st annual meeting of the international society of electrochemistry*, 2020.
- [2] AVL List GmbH, FIRE M User Manual - Fuel Cell, Graz, 2022.
- [3] P. Schneider, C. Sadeler, A.-C. Scherzer, N. Zamel und D. Gerdeisen, „Fast and Reliable State-of-Health Model of a PEM Cathode Catalyst Layer,“ *Journal Of The Electrochemical Society*, Nr. 166, 2019.
- [4] A. Pandey und et. al., „A Carbon Corrosion Model to Evaluate the Effect of Steady State and Transient Operation of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell,“ *Journal of The Electrochemical Society*, pp. F972-F979, 2013.
- [5] N. Macauley und et.al., „Carbon Corrosion in PEM Fuel Cells and the Development of Accelerated Stress Tests,“ *Journal of The Electrochemical Society*, 2018.
- [6] D. Gerteisen, „NUMERICAL ANALYSIS OF THE IMPACT OF PT PARTICLE POSITION RESPECTIVE CARBON SUPPORT STRUCTURE ON PEMFC PERFORMANCE,“ Intern, Freiburg, 2020.
- [7] A. Kneer und N. Wagner, „A Semi-Empirical Catalyst Degradation Model Based on Voltage Cycling under Automotive Operating Conditions in PEM Fuel Cells,“ *Journal of The Electrochemical Society*, Bd. 160, Nr. 2, pp. F120-F127, 2019.
- [8] S. Hang , Y. Donghao, C. Yuanqi und G. Wei, „Air starvation of proton exchange membrane fuel cells and its beneficial effects on performance,“ *Applied Energy*, 2019.
- [9] H. Chen, X. Zhao, T. Zhang und P. Pei, „The reactant starvation of the proton exchange membrane fuel cells for vehicular applications: A review,“ *Energy Conversion Management*, 2019.
- [10] P. Schneider und et al., „Impact of Platinum Loading and Layer Thickness on Cathode Catalyst Degradation in PEM Fuel Cells,“ *Journal of The Electrochemical Society*, Bd. 2, Nr. 170, 2023.
- [11] Y. Hou und et al., „An experimental and numerical study of spatial and temporal catalyst degradation during start-up and shut-down of PEM fuel cells,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 594, 2024.
- [12] A. Kusoglu und A. Z. Weber, „New insights into perfluorinated sulfonic-acid ionomers.,“ *Chemical reviews*, Bd. 117, Nr. 3, pp. 987-1104, 2017.
- [13] S. Thiele, S. Vierrath, M. Klingele und R. Zengerle, „Tomographic Analysis of Polymer Electrolyte Fuel Cell Catalyst Layers: Methods, Validity and Challenges,“ *ECS Transactions*, Bd. 69, Nr. 17, pp. 409-418, 2015.
- [14] M. H. Shojaeefard, G. R. Molaeimanesh, M. Nazemian und M. R. Moqaddari, „A review on microstructure reconstruction of PEM fuel cells porous electrodes for pore scale simulation,“ *international journal of hydrogen energy*, Bd. 41, Nr. 44, pp. 20276-20293, 2016.
- [15] T. Böhm, R. Moroni, M. Breitwieser, S. Thiele und S. Vierrath, „Spatially Resolved Quantification of Ionomer Degradation in Fuel Cells by Confocal Raman Microscopy,“ *Journal of The Electrochemical Society*, Bd. 166, Nr. 7, pp. F3044-F3051, 2019.
- [16] C. Fink, S. Gössling und L. Karpenko-Jereb, „CFD Simulation of Industrial PEM Fuel Cells with Local Degradation Effects,“ in *EFCF 2019: Low-Temp. FUEL CELLS, ELECTROLYSERS & H2 Processing*, Luzern, 2019.
- [17] AVL List GmbH, FIRE Electrification/Hybridization Manual, Graz, 2019.



AVL Deutschland GmbH

5. Danksagung

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie gefördert. Besonderer Dank gilt der Unterstützung und der konstruktiven Begleitung durch den Projektträger Forschungszentrum Jülich GmbH.

A. Verwendete Abkürzungen

BZ	Brennstoffzelle
BMWi	Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie
CFD	Computational Fluid Dynamics = Strömungssimulation
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl
CL	Catalytic Layer
FEM	Finite Elemente Methode
GDL	Gas Diffusion Layer
MEA	Membrane Electrode Assembly
MPL	Micro Porous Layer
PEM	Polymerelektrolyt-Membrane