

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# **RWTH Aachen University**

## **HynnoPEM**

**Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger, Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, Prof. Dr.-Ing. Heike Vallery, Prof. Dr.-Ing. Peter Jeschke, Daniel Sallach, M.Sc., Nikolai Weber, M.Sc., Niels Hinrichs, M.Sc., Jonas Cäsar, M.Sc.**

### **03ZU1115EC**

**„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03ZU1115EC gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.“**

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	iii
1. Stand der Technik .....	4
2. Wesentliche Projektergebnisse.....	5
3. Eingehende Darstellung der Ergebnisse.....	7
3.1. AP 1 – Prüfstands Aufbau und -betrieb .....	7
3.1.1. AP 1.1 – Prüfstandeinbindung der Systemkomponenten .....	7
3.1.2. AP 1.2 – Effizienz und Alterungsuntersuchungen .....	7
3.1.3. AP 1.3 – Validierung der Modellprädiktiven Regelung .....	9
3.2. AP 2 – Modellbildung des Brennstoffzellensystems.....	10
3.3. AP 3 – Modellbildung der Komponententalterung.....	15
3.3.1. AP 3.1 – Definition der zu verwendenden Alterungsmodelle.....	15
3.3.2. AP 3.2 - Erstellung und Validierung der Alterungsmodelle.....	15
3.3.3. AP 3.3 - Bewertung der Alterungsmodelle .....	16
3.4. AP 4 – Entwicklung der modellprädiktiven Regelung .....	16
3.4.1. AP 4.1 – Auslegung eines Zustandsbeobachters .....	17
3.4.2. AP 4.2 – Entwicklung der modellprädiktiven Regelung .....	17
3.4.3. AP 4.3 – Simulative Erprobung.....	19
3.5. AP 5 – Prognose des State-of-Health .....	21
3.5.1. AP 5.1 – Konzeptionierung der Zustandsüberwachung und Lebensdauer-prognose .21	
3.5.2. AP 5.2 - Verwendung von SoH & Lebensdauerprognose in MPR .....	21
3.6. AP 6 – TCO-Analyse und Gesamtsystembewertung .....	22
3.6.1. AP 6.1 - TCO Analyse im Nutzfahrzeugbereich .....	22
3.6.2. AP 6.1 - TCO Analyse für Luftfahrtanwendungen .....	25
4. Angemessenheit und Notwendigkeit der geleisteten Aufwände .....	28
5. Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	28
6. Fortschritt des Stands der Technik während der Projektlaufzeit.....	29
7. Veröffentlichung der Ergebnisse.....	30
8. Literaturverzeichnis .....	31

## Abkürzungsverzeichnis (Erweiterung)

ACAC	Aachen Accelerated Ageing Cycle
BoL	Begin of Lifetime
BoP	Balance of Plant
BZS	Brennstoffzellensystem
CAN	Controller Area Network
EKF	Extended Kalman Filter
EOD	Electro-osmotic drag
HiL	Hardware-in-the-Loop
IFG	Interdisziplinäre Forschergruppen
IRT	Institut für Regelungstechnik
KPI	Key Performance Indicator
MEA	Membran-Elektroden-Einheit
MiL	Model in the loop
MPR	Modellprädiktive Regelung
MS	Meilenstein
NLP	Nicht-lineares Optimierungsproblem
PEM	Polymerelektrolytmembran
PI	Proportional-Integral
QP	Quadratic Program
RTI	Real-Time Iteration
SQP	Sequential Quadratic Programming
TME	Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme
VECTO	Vehicle Energy Consumption Calculation Tool

## 1. Stand der Technik

Der Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich mobiler PEM-Brennstoffzellensysteme (BZS) zeigt, dass diese aufgrund ihrer hohen Betriebsdynamik und schnellen Nachtankfähigkeit ein enormes Potenzial für zukunftsweisende Antriebskonzepte besitzen, jedoch bislang durch hohe Systemkosten sowie vergleichsweise geringe Lebensdauern (weniger als 5.000 bis 20.000 Betriebsstunden) noch keinen kommerziellen Durchbruch erlangen konnten.

Zur Charakterisierung des Zellverhaltens werden umfangreiche experimentelle Prüfstandsaufbauten und Messkampagnen eingesetzt, die sowohl dynamische als auch stationäre Vorgänge erfassen und umfassende Datensätze zur Verhaltensanalyse liefern, wobei diese in Simulationsansätzen wie Computational Fluid Dynamics (CFD)-, Finite element method (FEM)-- sowie vereinfachten 0D/1D-Modelle zur simulativen Auslegung Anwendung finden.

Zudem belegen zahlreiche Studien, dass Alterungs- und Degradationseffekte einen maßgeblichen Einfluss auf die Effizienz und Lebensdauer der Brennstoffzellen haben, wobei diese Prozesse bislang noch nicht vollständig in regelungstechnische Konzepte integriert wurden. Erste modellprädiktive Regelungsansätze sind bereits in verwandten Anwendungsfeldern zum Einsatz gekommen, jedoch fehlt ihnen bislang die explizite Berücksichtigung der durch den Betrieb bedingten Degradation. Die Berücksichtigung dieser Effekte schränkt bei aktuell üblichen Ansätzen jedoch die Echtzeitfähigkeit und Robustheit der Regelalgorithmen ein.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich als zentrale Aufgabe des Projekts die Entwicklung eines integrierten, echtzeitfähigen modellprädiktiven Regelungskonzepts, das nicht nur den optimalen transienten Betrieb ermöglicht, sondern auch die Alterungsprozesse der Brennstoffzellensysteme berücksichtigt.

Hierzu wurde zunächst ein physikalisch motiviertes Gesamtmodell des Brennstoffzellensystems erstellt und anschließend in eine regelungsoptimierte, vereinfachte Form überführt, die alle wesentlichen Dynamik- und Degradationsaspekte adäquat abbildet.

Der weitere Entwicklungsschritt umfasste die Implementierung eines Zustandsbeobachters, der alle nicht messbaren Variablen erfasst, um somit eine Lebensdauerprognose und eine zustandsbasierte Wartungsstrategie abzuleiten.

Schließlich zielte das Vorhaben darauf ab, mit dem integrierten Regelungskonzept die Effizienz unter Berücksichtigung der Degradation der Brennstoffzelle zu maximieren und damit die Wirtschaftlichkeit sowie die Marktreife mobiler Brennstoffzellensysteme entscheidend zu verbessern, wodurch eine nachhaltige Alternative zu rein elektrischen Antrieben geschaffen wird.

## 2. Wesentliche Projektergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurden bedeutende Fortschritte in der Modellbildung, Regelungstechnik und wirtschaftlichen Bewertung von Brennstoffzellensystemen erzielt.

Im Arbeitspaket 1 (AP1) wurde die Inbetriebnahme und Vermessung eines Brennstoffzellenstacks vorgenommen. Neben der umfänglichen DoE-basierten Vermessung konnte eine Alterungsanalyse mit einem eigens entwickeltem Accelerated stress test (AST) erfolgreich für mehrere hundert Betriebsstunden durchgeführt und die Alterung des Stacks sowie der BoP-Komponenten und Sensoren aufgezeichnet werden. Die Ergebnisse liefern Erkenntnisse die direkt auf die weitere Alterungsmodellierung rückwirken.

Im Arbeitspaket 2 (AP2) wurde ein segmentiertes Brennstoffzellen-Stackmodell entwickelt, das eine präzise Simulation der Systemdynamik ermöglicht. Dieses Modell berücksichtigt lokale Prozesse innerhalb einzelner Zellen und erlaubt die Anpassung an verschiedene Betriebsbedingungen sowie Flussfeldgeometrien, wodurch die Flexibilität und Genauigkeit der Simulationen erheblich verbessert wurde.

Arbeitspaket 3 (AP3) fokussierte sich auf die Modellbildung der Komponententalerung. Es wurden sowohl physikalisch basierte als auch empirische Alterungsmodelle entwickelt und erfolgreich validiert. Diese Modelle ermöglichen eine genaue Vorhersage der Degradationsprozesse im Brennstoffzellensystem und tragen maßgeblich zur Verlängerung der Lebensdauer der Komponenten bei.

In Arbeitspaket 4 (AP4) wurde eine modellprädiktive Regelung (MPR) entwickelt, die darauf abzielt, die Alterungsrate der Brennstoffzellensysteme zu minimieren. Die MPC optimiert die Leistungsabgabe und gibt die Betriebsbedingungen dynamisch vor, um die Belastung der Komponenten zu reduzieren. Simulative Tests und experimentelle Tests bestätigten die Effektivität dieser Regelungsstrategie, wodurch die Effizienz unter Berücksichtigung der Alterung optimiert wurde.

Arbeitspaket 5 (AP5) beschäftigte sich mit der Prognose des State-of-Health (SoH). Durch die kontinuierliche Überwachung der Membrandicke und der elektrochemisch aktiven Oberfläche (ECSA) wurden präzise SoH-Indikatoren entwickelt. Diese Indikatoren ermöglichen eine zuverlässige Lebensdauerprognose des Brennstoffzellensystems, was eine vorausschauende Wartung und Optimierung der Betriebsstrategie erlaubt.

Schließlich wurde in Arbeitspaket 6 (AP6) eine umfassende Total Cost of Ownership (TCO)-Analyse durchgeführt. Die TCO-Analysen zeigten, dass Brennstoffzellensysteme in spezifischen Anwendungen, wie schweren Nutzfahrzeugen und der Luftfahrt, wirtschaftliche Vorteile gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen und Verbrennungsmotoren bieten. Diese

Erkenntnisse unterstützen die strategische Entscheidungsfindung und fördern die wirtschaftliche Implementierung von Brennstoffzellentechnologien in Deutschland.

Zusammenfassend haben die Projektergebnisse wesentliche Fortschritte in der technischen Modellierung, der Entwicklung effektiver Regelungsstrategien und der wirtschaftlichen Bewertung von Brennstoffzellensystemen erbracht. Diese Ergebnisse bilden eine solide Grundlage für die erfolgreiche Markteinführung und weitere Forschung im Bereich der Brennstoffzellentechnologie.

### 3. Eingehende Darstellung der Ergebnisse

Das Projekt setzt sich aus Folgenden 6 Arbeitspaketen zusammen:

#### 3.1. AP 1 – Prüfstands Aufbau und -betrieb

Das erste Arbeitspaket hatte als erstes Teilziel die erfolgreiche Zusammenstellung und Inbetriebnahme des Prüfstandes. Aufgrund der hohen Dynamikanforderungen des im Projekt entwickelten Alterungszyklus waren umfangreiche Maßnahmen zur Befähigung des Prüfstandes notwendig. Im abschließenden Projektjahr konnte nun auch mit dem finalen Zielstack die Alterungsvermessung durchgeführt werden. Neben einer umfangreichen Messkampagne zur Alterung konnte auch die modellprädiktive Regelung am Prüfstand erprobt werden.

##### 3.1.1. AP 1.1 – Prüfstandeinbindung der Systemkomponenten

Über die bisherigen Prüfstandsergebnisse hinaus konnte der finale Zielstack des Herstellers EKPO zum „Begin of Lifetime“ (BoL) umfangreich vermessen werden. Neben einer Polarisationskurve wurden 40 ausgewählte Betriebspunkte im gesamten zulässigen Betriebsbereich vermessen. Das Messprogramm wurde Design of Experiments(DoE)-basiert in enger Abstimmung mit EKPO entwickelt. Diese Messergebnisse konnten zusätzlich zu den bestehenden Vermessungen zur Modellkalibrierung eingesetzt werden und bieten einen wertvollen Beitrag zu den bestehenden Messdatensätzen der Partner. Einerseits konnte die Performance am Prüfstand des TME mit Messungen des Stackherstellers verglichen werden und weiterhin der Betriebsbereich außerhalb der üblichen Betriebsbereichs erprobt werden. Die Messergebnisse werden auszugweise als BoL-Vermessung im AP 1.2 vergleichend mit besonderem Fokus auf die Alterung grafisch dargestellt.

##### 3.1.2. AP 1.2 – Effizienz und Alterungsuntersuchungen

Im Projekt wurde ein hochtransienter beschleunigter Alterungszyklus (ACAC) entwickelt. Neben der Stromänderungsbegrenzung von 300 A/s wurde auch ein Vorwärmepunkt zur Homogenisierung zwischen den einzelnen Zyklen eingeführt. Damit entsteht eine Zyklusdauer von 1450s. Ein Überblick über die Messkampagne liefert Abbildung 1. Man erkennt anhand der kurzen Zyklen zu Beginn mehrere Unterbrechungen, welche eine verlängerte Vorsteuerung notwendig gemacht haben. Nach der Änderung an der prüfstandsseitigen Vorsteuerung wurde eine erneute Polarisationskurve gefahren. Um den Einfluss reversibler Alterung zu untersuchen wurden nach 375 Zyklen mehrere Polarisationskurven aufgenommen. Spätere Unterbrechungen haben den Zweck reversible Alterungsphänomene aufzuheben. Insgesamt wurden 750 Zyklen erfolgreich durchlaufen was einer Zykluszeit von 300 Stunden entspricht.

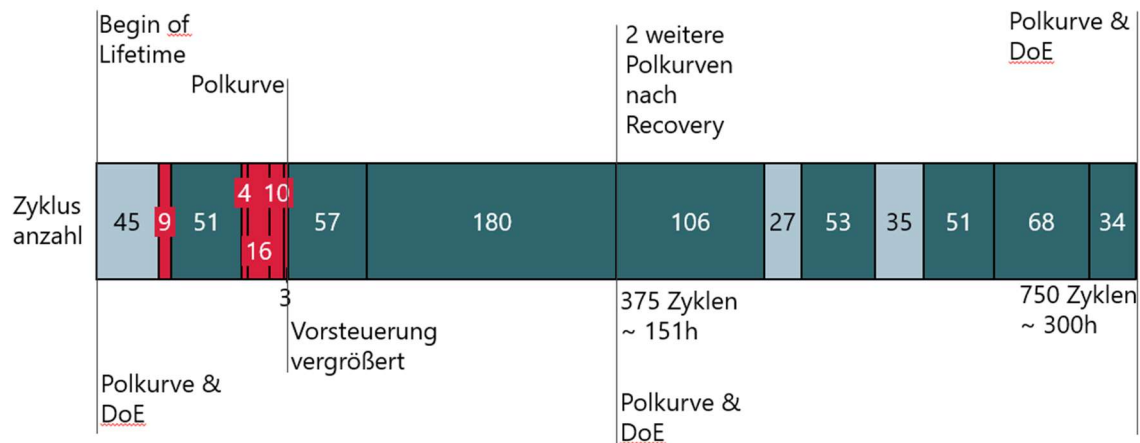


Abbildung 1 Übersicht über die durchgeführte Messkampagne und der Zyklenzahl

Zu Beginn eines jeden Zyklus erfolgt ein Konstantlastpunkt worauf der eigentliche Lastzyklus folgt. Die Lastfolge der elektrischen Senke ist nahezu verzögerungsfrei. Die Drücke laufen den Sollwerten bei großen Sprüngen etwas nach, um eine zu geringe Strömung durch den Stack zu vermeiden. Die Temperaturen haben eine etwas höhere Zeitkonstante und folgen dem Zyklus mit einer größeren Totzeit.

Die Massenströme eilen der Lastanforderung mit der Zeit der Vorsteuerung vor und folgen ansonsten nahezu Verzögerungsfrei den Vorgabewerten. Die Einlassfeuchte ist aufgrund der dynamischen Änderung der Bezugstemperatur (Kühlmittel-Einlass) sowie aufgrund der stark dynamischen Massenströme in Ihrem Messwert inkonstant, schwingt aber um den Sollwert. Der Kühlmittelvolumenstrom folgt im wesentlichen vorsteuerungsbasiert der Last.

Während der Durchführung wurden wie bereits in Abbildung 1 gezeigt mehrere Vermessungen durchgeführt und analysiert.

Es lässt sich erkennen, dass die Alterungseffekte sich mit zunehmender Zyklenzahl verstärken. Die Degradationsrate liegt in einem hohen, aber in der Literatur durchaus berichteten Bereich zwischen 100 und 300  $\mu\text{V}/\text{h}$ [12, 13]. Insgesamt kann damit die beschleunigende Wirkung des ACAC bestätigt werden.

Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse wollen die Partner weiter an der Bestimmung des Raffungsfaktors zu dem Zyklus zusammenarbeiten und künftig von einem effizienten Alterungszyklus profitieren. Der Zyklus konnte die weitere Ausrichtung der Alterungsvermessung und der Alterungsmodellierung bei den Partnern maßgeblich mitbestimmen.

### MS 1: Identifikationsmessung abgeschlossen

Es wurden umfangreiche Vermessungen der Prüflinge durchgeführt. Hierzu zählen Polarisationskurven, Messpläne über den gesamten Betriebsbereich sowie eine umfangreiche Alterungsvermessung.

#### 3.1.3. AP 1.3 – Validierung der Modellprädiktiven Regelung

In der zweiten und abschließenden Prüfstandsphase wurde die modellprädiktive Regelung (MPR), welche zuvor bereits simulativ in einer Hardware-in-the-Loop (HiL) Umgebung getestet wurde (siehe dazu 3.4.3), auf dem Brennstoffzellenprüfstand des TME experimentell validiert. Dazu wurde in einem ersten Schritt die Controller Area Network (CAN) Busverbindung zwischen Echtzeithardware und Prüfstandssoftware hergestellt und getestet, bevor die MPR in Betrieb genommen wurde.

Zur experimentellen Validierung der Regelung wurden verschiedene Referenzzyklen vom IRT erstellt im geregelten Betrieb abgefahren. Neben dem hochdynamischen ACAC wurden verschiedene, stückweise konstante Referenzzyklen mit unterschiedlichen Leistungssprüngen verwendet, um die Regelung vollumfänglich zu testen. Zudem wurde der Long Haul Fahrzyklus des Vehicle Energy Consumption Calculation Tool (VECTO), welcher auf die Nennleistung des Prüflings skaliert wurde, über eine Zeit von 75 Minuten erfolgreich abgefahren. Der Zyklus spiegelt das Fahrprofil von schweren Nutzfahrzeugen über 100 Kilometern dar. Der Lastzyklus wurde sowohl mit der MPR als auch mit einem konventionellen Proportional-Integral (PI) Regler mit Feedforward Lookup-Tabellen abgefahren.

Beide Regelungskonzepte führen zu einem akkuraten Tracking der Leistungsreferenz. Die Regelungsergebnisse sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt. Die MPR erzielt ein besseres Leistungstracking und kann die Leistungsreferenz nach sprunghaften Änderungen schneller einregeln. Zusätzlich hält die MPR alle eingeführten Betriebsgrenzen sicher ein und kann somit einen dynamischen, sicheren und effizienten Betrieb ermöglichen. Durch die gleichzeitige Berücksichtigung der internen Zustände von Membranfeuchte und Membrantemperatur und deren Halten in einem definierten Bereich ( $\lambda_{mem} > \lambda_{min}; T_{mem} < T_{max}$ ) wurde ein degradationsberücksichtigender Betrieb durch die MPR sichergestellt.

Tabelle 1: Erzielter mittlerer absoluter Fehler (engl. Mean Absolute Error, MAE) und integrierter quadrierter Fehler (engl. Integrated Squared Error, ISE) der Leistungsnachführung für MPR und PI-Regler.

	MAE / kW	ISE / kW <sup>2</sup> s
MPR	0.02	299.80
PI	0.06	310.44

Tabelle 2: Erzielte Einschwingzeiten nach einer Änderung der Leistungsreferenz für MPR und PI-Regler.

Sprung	Einschwingzeit / s										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
MPR	4.74	2.54	4.34	8.04	2.44	1.94	1.64	1.74	7.74	6.44	1.64
PI	4.20	11.00	4.70	34.80	9.90	0.60	8.10	7.50	8.00	14.20	14.30

Zum Nachweis der Echtzeitfähigkeit des Regelungsalgorithmus ist in Abbildung 2 die benötigte Ausführungszeit der MPR auf dem dSPACE SCALEXIO AutoBox System über die Betriebszeit dargestellt. Die Rechenzeit ist konstant unterhalb von 10 Millisekunden und damit deutlich unterhalb der Abtastzeit der MPR von  $T_s = 50$  ms. Aus der Differenz von Ausführungszeit und Abtastzeit lässt sich schließen, dass Potenziale für die Berücksichtigung von weiteren Degradationseffekten oder die Verwendung von detaillierteren Modellen in der MPR vorhanden sind. Es zeigt aber auch die Effizienz der entwickelten Implementierung und Approximation des nicht-linearen Optimierungsproblems (NLP).

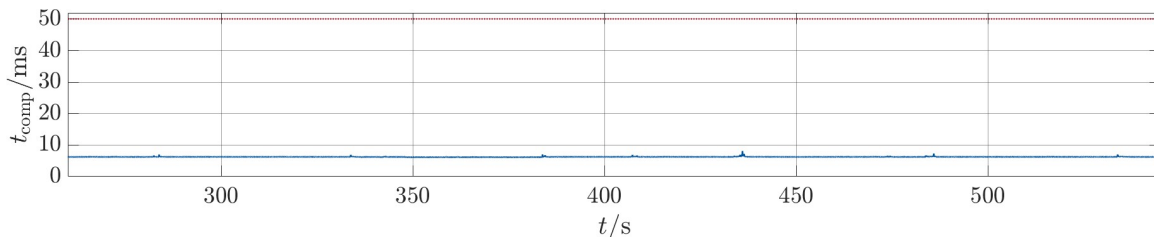


Abbildung 2: Benötigte Rechenzeit der MPR auf dem dSPACE SCALEXIO AutoBox System. In rot ist die Abtastzeit der MPR von  $T_s = 50$  ms dargestellt.

Mit Abschluss der zweiten Prüfstandsphase konnte MS 4 zum Ende der Projektlaufzeit erfolgreich erreicht werden.

#### MS 4: MPR validiert am Prüfstand

Die entwickelte MPR wurde erfolgreich am Brennstoffzellenprüfstand des TME validiert. Damit konnte gezeigt werden, dass die MPR echtzeitfähig ist und den effizienten und sicheren, hoch-transienten Betrieb eines Brennstoffzellen-Stacks unter Berücksichtigung von Degradation ermöglicht

### 3.2. AP 2 – Modellbildung des Brennstoffzellensystems

In der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern hat das TME erfolgreich komplexe Komponentenmodelle entwickelt, die das physikalische Verhalten und insbesondere die Dynamik der verschiedenen Komponenten sowie des Gesamtsystems abbilden. Die mit Abstand komplexeste Komponente des Brennstoffzellensystems ist der Brennstoffzellenstack, bei dem eine große Anzahl unterschiedlicher elektrochemischer, mechanischer und physikalischer Effekte miteinander interagieren. Hierbei besteht eine große Schwierigkeit darin, sowohl die Phänomene einzeln mathematisch zu beschreiben als auch deren Zusammenwirken simulativ stabil abzubilden.

Für ein Großteil der auxiliären Komponenten, auch Balance of Plant (BoP) genannt, des Systemmodells, wie zum Beispiel die Kühlmittelpumpe oder das Wasserstoffrezirkulationsgebläse, wurden physikalisch motivierte Gleichungen teilweise durch vereinfachte datenbasierte Korrelationen ersetzt, um die Echtzeitfähigkeit der Modelle zu gewährleisten. Dies wurde im Wesentlichen durch die Überführung der stationären Betriebskennfelder in Lookup-Tabellen erreicht. Die Parameter dieser Modelle wurden anhand einer umfassenden Analyse der Messdaten sowie Komponentendaten identifiziert. Hierfür mussten auch Korrekturterme hinzugefügt werden, um den Einfluss von unterschiedlichen Parametern wie Temperatur oder Druck berücksichtigen zu können und die Modellpräzision zu erhöhen. Aufgrund der inhärenten Art der Modellierung einer direkten Anpassung der Ausgangsgröße bei einer Veränderung der Eingangswerte, wurden verschiedene Verzögerungsglieder hinzugefügt und kalibriert, um eine reale und dynamische Veränderung widerzuspiegeln.

Eine Modellierung mittels Kennfelder konnte das reale Verhalten einer Brennstoffzelle, insbesondere im Hinblick auf Degradationseffekte, nicht ausreichend dynamisch und akkurat abbilden. Aus diesem Grund wurde ein Zellmodell basierend auf physikalische und elektrochemische Gleichungen erstellt, dessen beispielhafte Struktur in Abbildung 3 dargestellt ist. Um die Genauigkeit zu erhöhen, besonders in Hinblick auf lokale Phänomene, wurde eine Segmentierung in den drei Raumrichtungen durchgeführt.

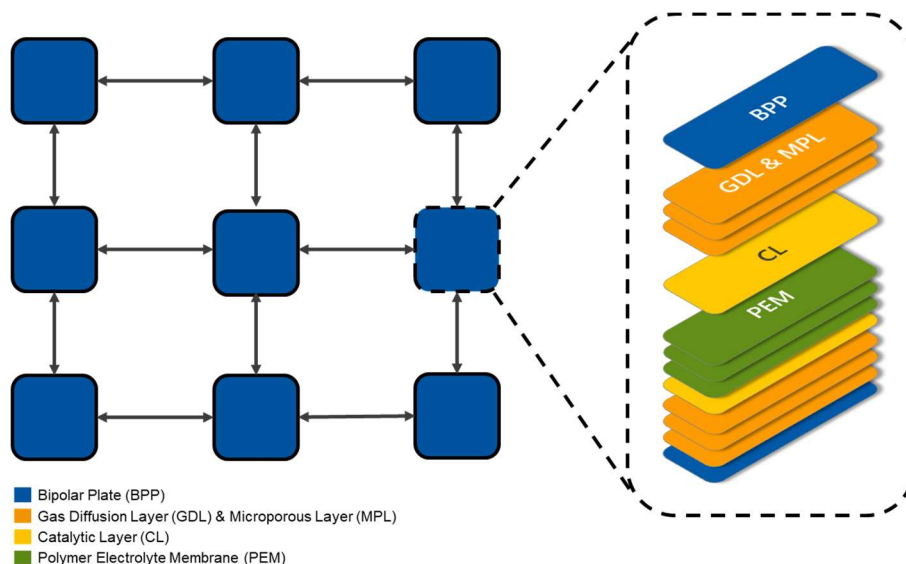


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Aufbaus und Segmentierung des Brennstoffzellenmodells

Ein Segment beschreibt in diesem Kontext einen Teil einer gesamten Zelle mit allen darin enthaltenen Schichten. Die Segmentanzahl kann bedarfsabhängig eingestellt werden, wobei im Rahmen des Projekts in Kanallänge die Segmentierung in neun Bereiche unterteilt wurde mit jeweils der Breite eines Kanals. Das sich auf der Zellebene ergebende Segment ist senkrecht dazu jeweils in vier Segmente für die PEM Membran und die zusammengesetzten GDL und MPL unterteilt, wobei für die Bipolarplatten und die katalytischen Schichten je ein

Segment zugewiesen wurde. Diese Struktur ermöglicht eine hohe Anpassbarkeit und Genauigkeit, wodurch mit geringem Aufwand die vorliegenden Flussrichtungen der eingebrachten Gasströme oder die Flussfeldgeometrie der Bipolarplatte angepasst werden kann.

In Abbildung 4 ist die Genauigkeit des Brennstoffzellenmodells basierend auf den am Prüfstand gemessenen Polarisations- und Druckverlustkurven. Besonders hervorzuheben ist hierbei die große Übereinstimmung des Modells bei der Berechnung der Polarisationskurven und des Druckverlustes auf der Anode. Die Abweichung der Druckverlustberechnung des Modells an der Kathode im hohen Lastbereich ist hierbei auf Phänomene zurückzuführen, welche mit der Bildung von flüssigem Wasser in Verbindung stehen und nicht akkurat genug im Simulationsmodell dargestellt werden.

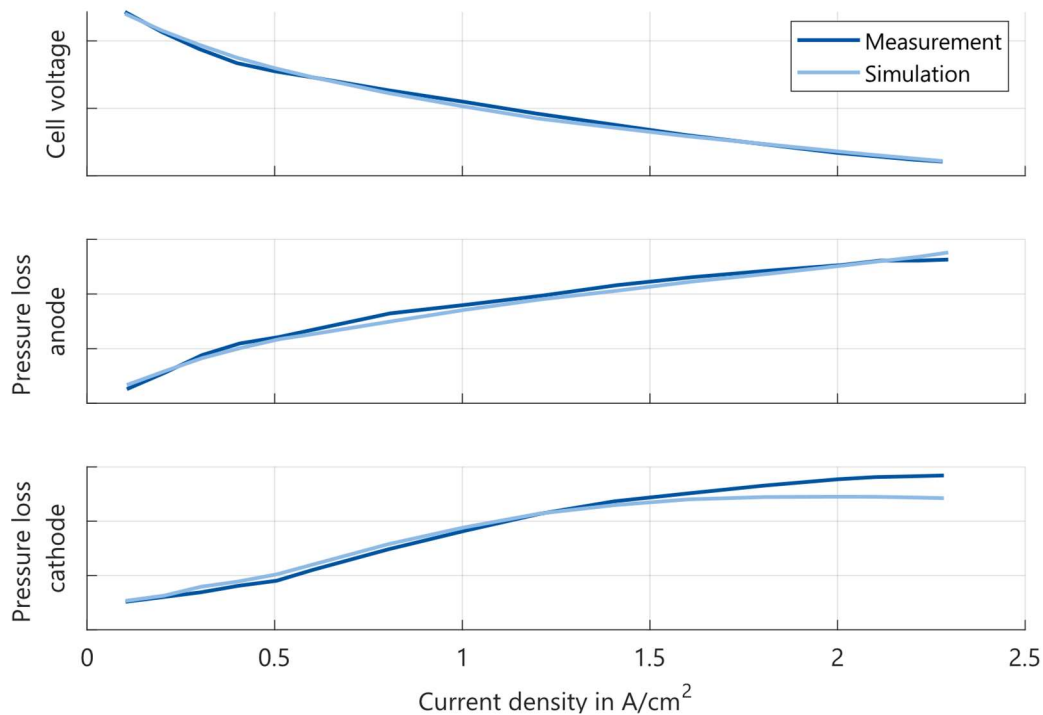


Abbildung 4: Gegenüberstellung der Zellspannung und der Mediendrücke zwischen gemessenen stationären Daten und Simulationsergebnissen

Aus den erzeugten komplexen Komponentenmodellen und physikalisch motivierten Gleichungen wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern die für die Regelung relevanten Systemdynamiken identifiziert. Hierbei wurde großen Wert darauf gelegt besonders die Dynamik der Gasbewegungen und der Thermik zu bewerkstelligen. Zudem wurde im Brennstoffzellenmodell auch auf die Modellierung der zweiphasigen Wasserbewegung gesetzt. Im Vergleich zu den in der Literatur verwendeten Modellen gelang es, die Dynamik der Wasserbewegung in der Membran der Brennstoffzelle wesentlich realitätsnäher abzubilden. Gängige Literaturansätze weisen nur eine Pseudodynamik auf, indem sie abhängig von den Randbedingungen der Membranoberfläche direkt den stationären Zustand

der Membran berechnen [1]. Durch die Integration sowohl eines Sorptions- und Desorptionsverhaltens sowie einer Speicherfunktion, konnte eine tatsächliche Membrandynamik abgebildet werden. Dieses Verhalten ist in Abbildung 5 beispielhaft für die Wasseraufnahme veranschaulicht und ist gegenüber einer X-Ray Mikrotomographiemessung aus der Literatur validiert. Der Wassergehalt  $\lambda$  wurde hier über eine in Sektionen eingeteilte Membran aufgetragen [2].

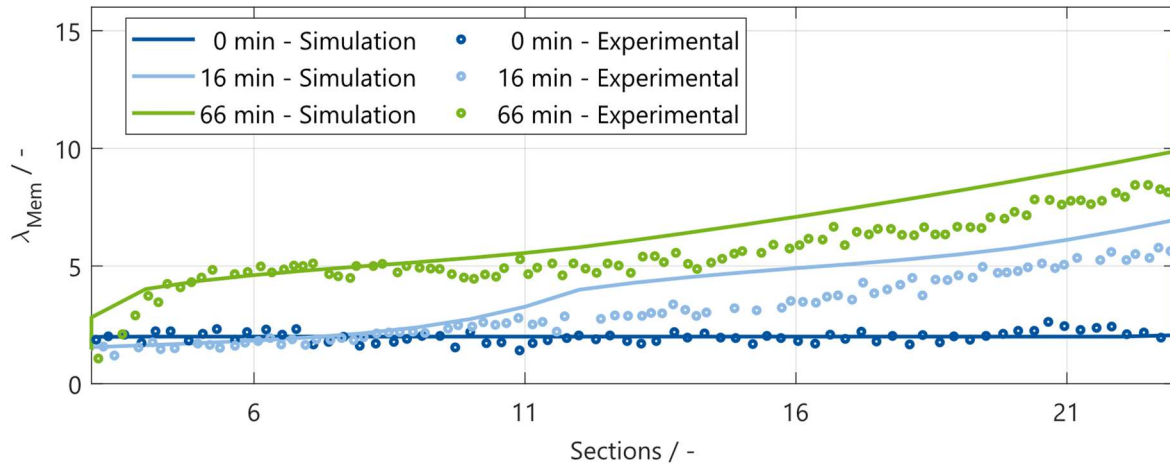


Abbildung 5: Zeitliche und örtliche Validierung des Sorptionsverhalten einer PEM-Membran basierend auf experimentelle Literaturdaten aus [2]

Aufbauend auf den Erkenntnissen, gewonnen durch Simulationen mit dem dynamischen und detaillierten Brennstoffzellen-Stackmodell, wurden nicht-lineare, physikalisch-motivierte Modellierungsansätze aus der Literatur als Ausgangspunkt für die Entwicklung des reduzierten Reglermodells in einer Literaturrecherche herausgearbeitet. Hierbei wurde aufgrund der strengen Anforderungen an die echtzeitfähige Ausführung des Modells in einer MPR auf eine Zell-zu-Zell-Variation verzichtet. In einer ausführlichen Gegenüberstellung verschiedener Modellansätze (0D, 1D, Pseudo-2D, 2D) wurde aufgrund des Rechenaufwands und einer möglichen Validierung ein 1D-Modellansatz gewählt, welcher den besten Trade-off zwischen Modellkomplexität und Ausführungszeit darstellt. Des Weiteren müssen Ein- und Ausgangsgrößen auf ein reduziertes und reales Aktoren- und Sensorset, welches am Prüfstand verfügbar ist, abgestimmt sein.

Das reduzierte Modell ist orts aufgelöst und berücksichtigt dynamische Zustände in den Gaskanälen, den Katalysatorschichten und der PEM. Die Diffusionsschichten (Gasdiffusionsschichten und mikroporöse Schichten) sind lediglich in der Diffusion der Medien und der Wärme zwischen Gaskanal und Katalysatorschicht berücksichtigt. Es wird vereinfacht angenommen, dass kein Flüssigwasser in den Schichten existiert und kein Gasaustausch durch die PEM stattfindet. Das reduzierte Modell ist als nicht-lineares, zeitdiskretes Zustandsraummodell in folgender Form implementiert

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{d}_k, \boldsymbol{\theta}) \\ \mathbf{y}_k &= g(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{d}_k, \boldsymbol{\theta}) \end{aligned}$$

wobei  $\mathbf{d}_k$  der Störgrößenvektor,  $\mathbf{u}_k$  der Eingangsgrößenvektor,  $\mathbf{x}_k$  der Zustandsvektor und  $\mathbf{y}_k$  der Ausgangsgrößenvektor zum Zeitschritt  $k$  und  $\boldsymbol{\theta}$  der Parametervektor ist. In dieser Form kann das reduzierte Modell direkt in regelungstechnischen Konzepten in Form eines Prozessmodell verwendet werden. Als Störgrößen werden der eingangsseitige Anodenmassenstrom und die relative Feuchte gemessen. Zur zeitlichen Diskretisierung der gewöhnlichen Differentialgleichungen wird ein implizites Integrationsverfahren erster Ordnung mit einer Zeitschrittweite von  $T_s = 0.05$  s verwendet. Das Modell kann auf der Echtzeithardware *dSPACE SCALEXIO AutoBox* in etwa mit 50-facher Echtzeit ausgeführt werden. Zur Identifizierung der Modellparameter wurde eine Analyse der Messdaten eines Dummy-Stacks durchgeführt.

Für das Fitting der Parameter wurde eine nicht-lineare Optimierung entworfen. Ziel des Optimierungsproblems

$$\boldsymbol{\theta}^* = \min_{\boldsymbol{\theta}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{y}_{i,\text{sim}}(\boldsymbol{\theta}) - \mathbf{y}_{i,\text{meas}})^2$$

ist das Finden eines optimalen Parametervektors  $\boldsymbol{\theta}^*$ , welcher die quadratische Abweichung zwischen Messdaten  $\mathbf{y}_{\text{meas}}$  und Simulation  $\mathbf{y}_{\text{sim}}$  minimiert, wobei  $N$  die Anzahl der Messdatenpunkte ist. Die Ergebnisse für die erzielte Genauigkeit des reduzierten Modells mit optimiertem Parametervektor für die Messdaten des Dummy-Stacks sind in Tabelle 3 angegeben. Durch das vollständige automatisierte Fitting des reduzierten Modells an experimentelle Prüfstandsdaten ist das Anpassen der Modellparameter an beliebige Zielstacks, bspw. an den EKPO-Stack, direkt möglich.

Tabelle 3: Modellabweichungen zwischen Trainingsdaten- und dem Validierungsdatensatz.

	Trainingsdaten		Validierungsdaten	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE
$U_{\text{cell}} / \text{V}$	0.0280	0.0195	0.0180	0.0118
$p_{\text{sm},c} / \text{bar}$	0.0414	0.0322	0.0601	0.0313
$p_{\text{sm},a} / \text{bar}$	0.0437	0.0399	0.0746	0.0554
$T_{\text{cool,out}} / \text{K}$	0.9343	0.6877	1.2253	0.7000

### **MS 2: Brennstoffzellenmodellierung für MPR abgeschlossen**

Es wurde ein echtzeitfähiges, reduziertes Brennstoffzellen-Stackmodell entwickelt und implementiert, welches mit Messdaten parametrisiert und validiert ist und in der MPR verwendet werden kann. Damit ist MS 2 erfolgreich erreicht. Aufgrund der starken Verzögerungen von MS 1.3 konnte MS 2 nicht gemäß dem ursprünglichen Zeitplan erreicht werden, sondern wurde erst im Jahr 2024 abgeschlossen.

### **3.3. AP 3 – Modellbildung der Komponententalterung**

Um Ansätze zur detaillierten Modellierung der Degradation für die Regelung anwendbar zu machen, wurden vom TME und IRT mit Hilfe von EKPO, Pierburg und FEV Alterungsmodelle des BZS entwickelt.

#### **3.3.1. AP 3.1 – Definition der zu verwendenden Alterungsmodelle**

Zu Beginn dieses Prozesses wurde eine umfassende Definition der zu verwendenden Alterungsmodelle in Abstimmung mit allen Projektpartnern (AP 3.1) vorgenommen. Dieser Schritt stellte sicher, dass alle relevanten Aspekte berücksichtigt werden und das Wissen aller Partner gebündelt wird. Hierbei kann spezifisch zwischen einer auf physikalischen Gleichungen basierenden Modellierung und einer Alterungsmodellierung basierend auf empirischen Gleichungen unterschieden werden. Wie bei der Modellierung des Brennstoffzellensystems wurde in diesem Aspekt auf eine physikalische Beschreibung der Prozesse zurückgegriffen, während für die BoP-Komponenten und Sensoren die Alterungsphänomene anhand von empirischen Zusammenhängen modelliert wurde.

#### **3.3.2. AP 3.2 - Erstellung und Validierung der Alterungsmodelle**

Bei der physikalischen Alterung des Brennstoffzellenstacks kann die Alterung, die eine veränderte Leistung der Brennstoffzelle bedingt, dabei grundlegend in verschiedene Aspekte unterteilt werden. Einerseits ist die Reduktion der aktiven elektrochemischen Oberfläche an der Dreiphasengrenze durch Platin Dissolution oder Kohlenstoffkorrosion zu nennen. Zum anderen führt eine Verringerung der Membrandicke durch verschiedene physikalische Effekte zu einer Verschlechterung der Brennstoffzellenleistung. Diese Effekte konnten mit Hilfe eines Alterungsmodells modelliert werden. Die in Abbildung 6 dargestellte Simulation des Verhaltens der Membranverdünnung wurde mit Literaturdaten verglichen. Dies ist dadurch bedingt, dass während die Prüfstandsmessungen keine fortlaufenden in-situ Informationen des Brennstoffzellenzustands ermöglichten. Hierbei ist zu erkennen, dass die simulierte Dicke über die gesamte Simulationszeit keine signifikante Abweichung von den gemessenen Werten aufweist.

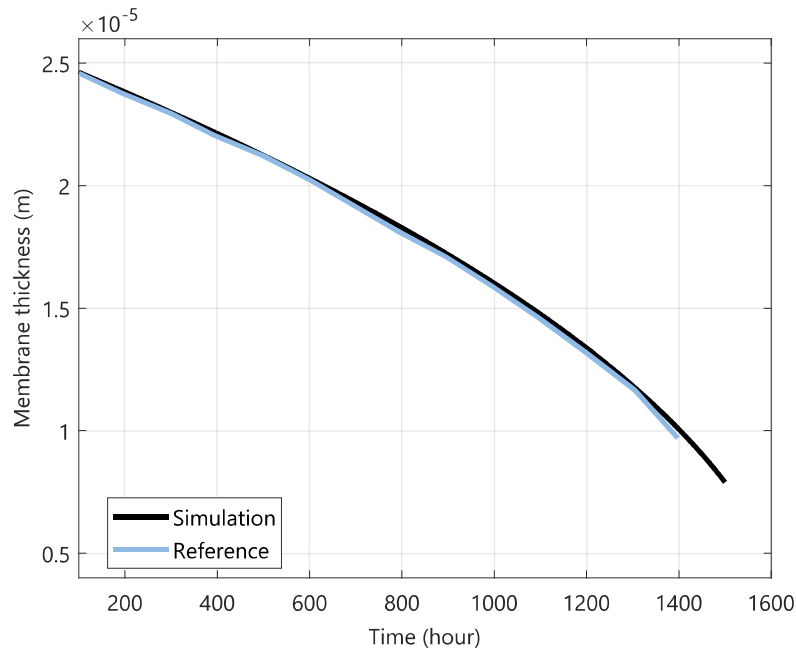


Abbildung 6: Gegenüberstellung der gemessenen Membranausdünnung mit Literaturdaten aus [3] und der simulierten Membrandicke

Darüber hinaus wurden vom TME vereinfachte Alterungsmodelle für Nebenaggregate sowie Sensorik erstellt. Hierbei stellten die Forschungspartner (EKPO, Pierburg) wertvolle Ressourcen zur Verfügung. Bestehende Alterungsmessungen sowie gealterte Komponenten ermöglichten es, mittels zeitlich aufgelöster Kennfelder die Alterung der verschiedenen Komponenten abzubilden.

### 3.3.3. AP 3.3 - Bewertung der Alterungsmodelle

Im Anschluss daran hat die FEV die Alterungsmodelle des Brennstoffzellenstacks sowie der Balance-of-Plant-Komponenten (BoP) und der Sensorik eingehend bewertet.

Als Ergebnis stehen reduzierte Alterungsmodelle der relevanten Komponenten des Brennstoffzellensystems zur Verfügung. Aufgrund von Verzögerungen in AP 1.2 konnten diese detaillierten Modelle nicht während der Projektlaufzeit mit den Messdaten validiert werden. Die erzielte Genauigkeit mit Literaturdaten lassen jedoch auf eine gute Übertragbarkeit der Modelle auf das reale System schließen.

#### **MS 3: Alterungsmodellierung für MPR abgeschlossen**

Es wurde ein physikalisch basiertes Stackalterungsmodell und empirische Komponentenmodelle entwickelt und implementiert. Aufgrund der Verzögerungen von MS 1.3 wurde MS 3 mit Literaturdaten und vergleichbaren Messdaten validiert.

### 3.4. AP 4 – Entwicklung der modellprädiktiven Regelung

AP 4 umfasst die Entwicklung der MPR sowie die simulative Validierung der Regelung. Da es sich bei der MPR um einen Zustandsregler handelt, müssen alle Systemzustände bekannt sein. Da nicht alle Zustände messbar sind, wurde ein Zustandsbeobachter implementiert.

### 3.4.1. AP 4.1 – Auslegung eines Zustandsbeobachters

Aufgrund der Verwendung eines nicht-linearen Zustandsraummodells, welches in AP 2 zur reduzierten Nachbildung des Systemverhaltens entwickelt wurde, kommen nur Konzepte von Zustandsbeobachtern in Frage, die nicht-lineare Dynamiken handhaben können. Aufgrund der geringen benötigten Rechenleistung und der bereits weit verbreiteten Anwendung, wurde das Extended Kalman Filter (EKF) als vielversprechender Ansatz ausgewählt und implementiert. Neben der Schätzung und Korrektur des aktuellen Zustands wird das Filter erweitert, um additive Störgrößenzustände für die Ausgangsgrößen zu schätzen. Die Störgrößen schätzen den Fehler zwischen Modellverhalten und realer Strecke. Das dadurch eingeführte integrierende Verhalten ermöglicht eine Offset-freie Formulierung der MPR ohne bleibende Regelabweichung. Das entwickelte reduzierte Prozessmodell der Brennstoffzelle dient dem EKF-Algorithmus als Prozessinformation. Im Rahmen des Projektes wurde zudem ein Moving Horizon Schätzer (engl. Moving Horizon Estimator) implementiert und getestet. Die Schätzung basiert auf einem Optimierungsansatz, der Messungen über ein vergangenes Zeitfenster verwendet, um die dynamischen Zustände des hinterlegten Modells zu berechnen. Aufgrund der im Vergleich zum EKF größeren Komplexität und benötigten Rechenleistung wurde dieser Ansatz allerdings nicht in der Regelung verwendet.

### 3.4.2. AP 4.2 – Entwicklung der modellprädiktiven Regelung

Die für den Brennstoffzellenbetrieb entwickelte MPR besteht aus mehreren Bestandteilen. Die schematische Übersicht des Regelkreises ist Abbildung 7 zu entnehmen, wobei die Referenzleistung  $P_k^{\text{ref}}$ , der stationäre Zustands- und Stellgrößenvektor  $\mathbf{x}_k^\infty$  bzw.  $\mathbf{u}_k^\infty$ , der geschätzte Zustandsvektor und Störgrößenvektor  $\hat{\mathbf{x}}_k$  bzw.  $\hat{\mathbf{x}}_k^d$ , die applizierten Stellgrößen  $\mathbf{u}_k$ , die Messgrößen  $\mathbf{y}_k$  und gemessenen Störgrößen  $\mathbf{d}_k$  aufgetragen sind. Neben dem Zustandsbeobachter (siehe Abschnitt 0) wurde eine Totzeit-Kompensation der Stellgrößen implementiert. Dies zeigte sich als notwendig, da eine allgemeine Totzeit von  $T_t = 450$  ms im Stellgrößenpfad am Prüfstand aufgrund von Kommunikationszeit und Rechenzeit der MPR als auch der Prüfstandregelung auftrat. Dazu wurde ein zirkulärer Speicher für  $\mathbf{u}_k$  implementiert, in dem die berechneten Stellgrößen bis zur eigentlichen Applizierung am Prüfstand zwischengespeichert werden. Mit Hilfe der zwischengespeicherten Stellgrößen und dem nicht-linearen Zustandsraummodell wird der Zustandsvektor über die Totzeit prädiziert und an die MPR übergeben. Damit kann die MPR totzeitfrei ausgelegt und ausgeführt werden. Die eigentliche Umsetzung der MPR ist in einer Two-Stage Formulierung realisiert. In dieser wird das Optimierungsproblem in einen ökonomischen Teil (Target Selector) und einen dynamischen Regler (Dynamic Controller) aufgeteilt. Beide Optimierungen werden in jedem Zeitschritt ausgeführt. Vorteile einer Two-Stage Formulierung sind die Auflösung der Überaktuatorisierung des Regelungsproblems, als auch eine vereinfachte Parametrierung der Kostenfunktionen.

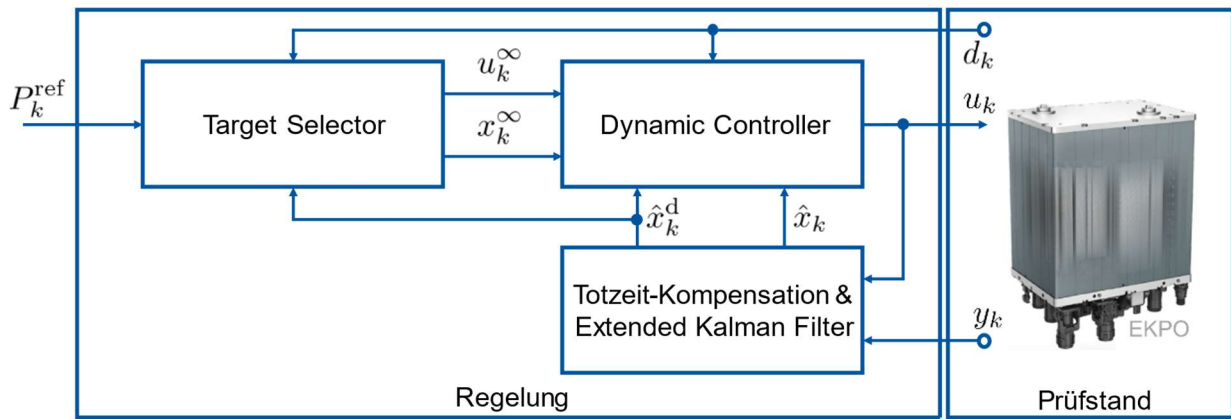


Abbildung 7: Regelkreisstruktur der entwickelten Two-Stage MPR. Der Regelkreis besteht aus der Strecke inkl. Sensorik (Prüfstand), Beobachter (EKF) und der Totzeit-Kompensation, sowie der ökonomischen Optimierung (Target Selector) und der MPR (Dynamic Regulator).

In der ökonomischen Optimierung wird, basierend auf dem Zustandsraummodell aus AP 2, die geforderte Referenzleistung bereitgestellt und die Stack-Effizienz maximiert, d.h. die Verluste der Zellspannung minimiert. Gleichzeitig werden die eingehenden Massenströme der Reaktanten und des Kühlmittels sowie die anliegenden Drücke auf der Kathodenseite minimiert. Die Nebenbedingungen der ökonomischen Optimierung berücksichtigen zusätzlich die physikalischen Beschränkungen der Stellgrößen, die durch die Aktuatoren vorgegeben sind. Zudem werden obere und untere Grenzen für die Zellspannung, die Stöchiometrie der Kathode, die Spreizung der Kühlmitteltemperatur und die Druckdifferenz zwischen Anoden- und Kathodenseite beschränkt, um einen sicheren Betrieb zu ermöglichen. Der dynamische Regler ist Form einer klassischen MPR formuliert, d.h. als ein Optimierungsproblem mit fortschreitendem Zeithorizont. Hiermit wird eine Sollwertfolgeregelung des ökonomisch-optimalen und stationären Zustands ( $x_k^\infty$  &  $u_k^\infty$ ) umgesetzt. Dieser dient der Regelung als Referenz. Dabei wird neben den bereits aufgelisteten Grenzen die maximale Änderung der Stellgrößen berücksichtigt und somit ein sicherer und effizienter hochdynamischer Betrieb des Brennstoffzellen-Stacks ermöglicht. Zur Vermeidung von Degradation während des Betriebs, wird wie bereits in AP 2 der Fokus auf den Wasserhaushalt und die Temperaturverteilung in der MEA gelegt. Dabei soll vor allem die Degradation der Membran reduziert werden, indem die Membrantemperatur und der Wassergehalt der Membran in der MPR berücksichtigt werden. Die jeweiligen dynamischen Zustände werden in der ökonomischen und dynamischen Optimierung mit einer oberen und unteren Schranke versehen, um eine Austrocknung und Überhitzung der Membran zu vermeiden.

Damit eine echtzeitfähige Ausführung der nicht-linearen MPR gewährleistet ist, wird diese im *Real-Time Iteration* (RTI) Schema [4] implementiert. Beide nicht-linearen Optimierungsprobleme (NLPs) werden dabei sequenziell quadratisch approximiert, d.h. iterativ mithilfe des *Sequential Quadratic Programming* (SQP) Ansatzes [5] gelöst. Die Hesse-Matrix der resultierenden quadratischen Optimierungsprobleme (QP) wird mithilfe des generalisierten

Gauß-Newton-Verfahrens [5] effizient angenähert. In einem weiteren Vorverarbeitungsschritt des NLPs, dem sogenannten *Condensing*, werden in den entstandenen QPs die Gleichheitsnebenbedingungen der Zustandsdynamik in die Kostenfunktion kondensiert und damit die Zustandsvektoren als Optimierungsvariablen eliminiert. Dies führt zu einer deutlichen Reduzierung der Problemgröße. Des Weiteren können kondensierte QPs aufgrund ihrer Struktur effizienter von Active-Set Solvern verarbeitet werden. Im Vergleich zu Interior-Point Solvern übertreffen herkömmliche Active-Set Solver diese bzgl. der Rechenzeit vor allem bei Prädiktionshorizonten mit kleiner und mittlerer Länge [6]. Die Implementierung wurde in MATLAB Simulink mit der Toolbox CasADi [7], welche zur algorithmischen Differenzierung verwendet wurde, umgesetzt. Die resultierenden QPs werden mit dem mpcActiveSetSolver der MATLAB Model Predictive Control Toolbox [8], aufbauend auf dem QPKWIK Algorithmus, gelöst.

### 3.4.3. AP 4.3 – Simulative Erprobung

Zur simulativen HiL-Erprobung der MPR aus 3.4.2 wurde diese in eine Gesamtsimulation integriert. Als Streckenmodell wurde das Prozessmodell verwendet. Um eine Modell-Strecken-Abweichung zu erzeugen und so die Robustheit des entwickelten Regelungsalgorithmus bewerten zu können, wurde eine variable relative Parameterabweichung des Streckenmodells von  $\pm 10\%$  implementiert. Zusätzlich wird eine gemeinsame Totzeit der Stellgrößen im Streckenmodell berücksichtigt. Zur Applizierung der MPR auf dem Steuergerät wurde die Code-Generierung und Kompilierung für die Zielhardware dSPACE SCALEXIO AutoBox in MATLAB/Simulink mittels der bereits vorhandenen Toolchain von dSPACE durchgeführt. Damit dies mit dem Simulink Coder möglich ist, wurde der erstellte Algorithmus für das Differenzieren verschiedener Funktionen mit CasADi vorab in C-Code überführt und anschließend als *s-Functions* in MATLAB/Simulink eingebunden. Das Ergebnis der Code-Generierung ist eine ausführbare Datei für die Zielhardware. Mittels dieses Vorgehens wurden zunächst Komponententests für die einzelnen Bestandteile der MPR durchgeführt. Des Weiteren wurde im Zuge des Aufbaus des HiL-Setups in enger Absprache von IRT und TME die Kommunikationsschnittstelle zwischen Prüfstand und Echtzeithardware erstellt. Die Kommunikationsstruktur des CAN-Busses wurde in einem gemeinsamen DBC-File definiert und die entsprechende CAN-Schnittstelle auf der Echtzeithardware implementiert und getestet. In einer simulativen Parameterstudie wurde das Regler-tuning auf Basis der erzielten Regelungsergebnisse durchgeführt. Zudem wurde ein PI-Regler mit Eingangskennlinien als Referenzregelung ausgelegt. Ausgewählte Ergebnisse des erfolgreich absolvierten HiL-Tests sind exemplarisch Abbildung 8 und Abbildung 9 zu entnehmen.

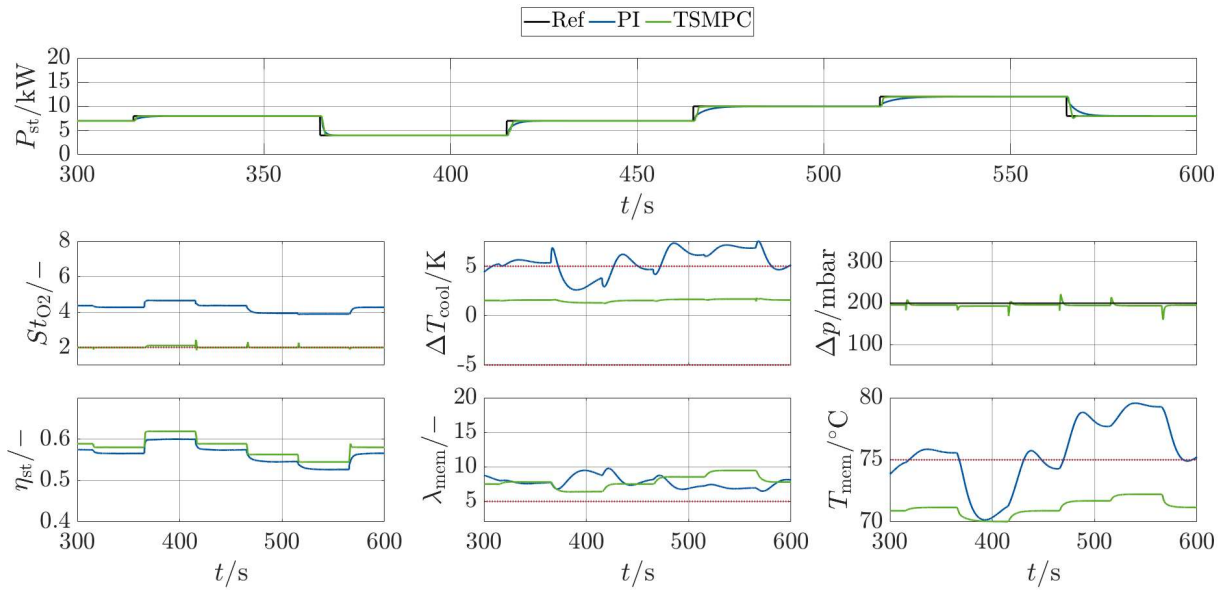


Abbildung 8: Simulationsergebnisse der Leistung, der begrenzten Ausgangs- und Zustandsgrößen bei einer stufenförmigen Änderung der Referenzleistung für MPR und PI-Regler. Die rot gestrichelten Linien stellen die Systembegrenzungen dar, welche in der MPR berücksichtigt wurden.

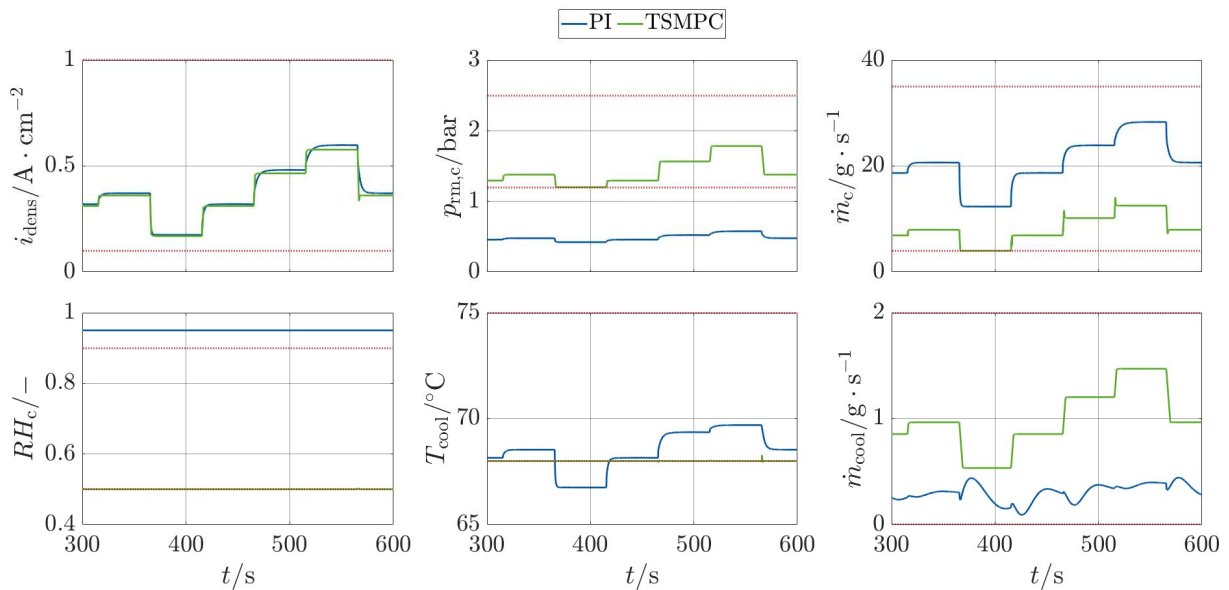


Abbildung 9: Verlauf der Stellgrößen für die Referenzvorgabe in Abbildung 8 von MPR und PI-Regler. Die Begrenzungen der Aktortik, welche in der MPR berücksichtigt wurden, sind mit roten gestrichelten Linien dargestellt.

Abbildung 8 zeigt den Verlauf der Referenzleistung und die Leistungsnachführung. Die MPR und der PI-Regler ermöglichen ein akkurates Folgen der Referenzleistung. Die MPR ermöglicht zusätzlich das Einhalten aller vorgegebenen System- und Zustandsbeschränkungen. Die Echtzeitausführbarkeit der MPR konnte dank des HiL-Aufbaus erfolgreich nachgewiesen werden und ein grundlegender Konzeptnachweis wurde somit erbracht. Die zur Einregelung der Leistungsreferenz (Abbildung 8) applizierten Stellgrößen sind in Abbildung 9 dargestellt. Mit Abschluss des APs liegt ein echtzeitfähiges und simulativ validiertes Regelungskonzept für den effizienten, transienten Betrieb von BZS vor, welches

dynamische Lastprofile unter Berücksichtigung aller Beschränkungen und der Degradation einregeln kann.

### **3.5. AP 5 – Prognose des State-of-Health**

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde ein umfassendes Konzept zur Zustandsüberwachung und Lebensdauerprognose der Komponenten des Brennstoffzellensystems entwickelt und dessen Implementierung in die modellprädiktive Regelung untersucht.

#### **3.5.1. AP 5.1 – Konzeptionierung der Zustandsüberwachung und Lebensdauerprognose**

Zentral für die Bestimmung des State-of-Health (SoH) auf Brennstoffzellenebene sind die simulierte Membrandicke und die elektrochemisch aktive Oberfläche (ECSA), welche aus dem Brennstoffzellensystemmodell abgeleitet wurden. Die Membrandicke dient als kritischer Indikator für den Zustand der Brennstoffzelle, da eine zunehmende Verdünnung auf eine Alterung und damit auf eine Verschlechterung der Leistungsfähigkeit hinweist. Gleichzeitig reflektiert die ECSA die effektive Oberfläche, die für elektrochemische Reaktionen zur Verfügung steht. Eine Reduktion der ECSA deutet somit auf eine Abnahme der Reaktionsstellen und eine Verschlechterung der Zelleistung hin. Durch die kontinuierliche Simulation dieser beiden Parameter im Brennstoffzellensystemmodell mit einem gleichzeitigen Vergleich der virtuellen und gemessenen Stapelspannung, konnten die tatsächliche verbleibende Membrandicke und ECSA geschätzt werden. Durch die Verschmelzung beider Größen und in Relation zu deren Betrag zum Lebensstart konnte ein SoH-Indikator auf der Ebene der Brennstoffzelle ermittelt werden, der eine Erfassung des aktuellen Zustands in einer Kennzahl sowie eine Prognose der verbleibenden Lebensdauer ermöglicht.

Neben den Brennstoffzellen wurden auch die NebenkompONENTEN des Systems in die Zustandsüberwachung einbezogen. Hierfür wurde der SoH der NebenkompONENTEN mittels Kennfelder ermittelt, die die geschätzte Alterung mit den initialen Referenzwerten zum Projektstart vergleichen. Durch den Vergleich der simulierten Alterungsdaten mit den ursprünglichen Referenzwerten konnte der aktuelle Zustand dieser Komponenten bestimmt werden. Die gesammelten Alterungsdaten der Sensoren und Hilfskomponenten zeigten keinen signifikanten Einfluss auf die Veränderung der Systemlebensdauer und des Leistungsbedarfs.

#### **3.5.2. AP 5.2 - Verwendung von SoH & Lebensdauerprognose in MPR**

In AP 5.2 wurden Untersuchungen zur Verwendung des erfassten SoH als auch der Lebensdauerprognose in der MPR angestellt und Konzepte in enger Absprache mit den Projektpartnern diskutiert und skizziert. Aufgrund der Verzögerungen in den Vorgänger-APs konnte die Verwendung von SoH-Informationen und Lebensdauerprognosen in der MPR nicht während der Projektlaufzeit validiert werden.

### 3.6. AP 6 – TCO-Analyse und Gesamtsystembewertung

AP 6 umfasst Gesamtkostenanalysen bei der Anwendung von Brennstoffzellen als Antriebstechnologie. Dies wird separat für Nutzfahrzeuge und Luftfahrtanwendungen betrachtet.

#### 3.6.1. AP 6.1 - TCO Analyse im Nutzfahrzeugbereich

Der Kostenaspekt ist insbesondere mit Blick auf die Anwendung der Brennstoffzelle im Nutzfahrzeugsegment von hoher Relevanz. Die Aufgabe des PEM der RWTH Aachen liegt daher in der Entwicklung eines Modells zur Bestimmung der Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership, TCO), in dem insbesondere die einzelnen Kostenaspekte ausgewiesen werden. Um die unterschiedlichen Einsatzzwecke eines Brennstoffzellenfahrzeugs kostenseitig zu erfassen, soll das Modell darüber hinaus unterschiedliche Fahrzeugtypen beinhalten.

Das TCO-Modell wurde basierend auf einer Internetanwendung (Python) entwickelt – die dazugehörige Benutzeroberfläche ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Realisierung als Internetanwendung bringt insbesondere den Vorteil mit sich, dass Updates in Echtzeit umgesetzt werden und das Programm über jedes Endgerät verwendet werden kann.

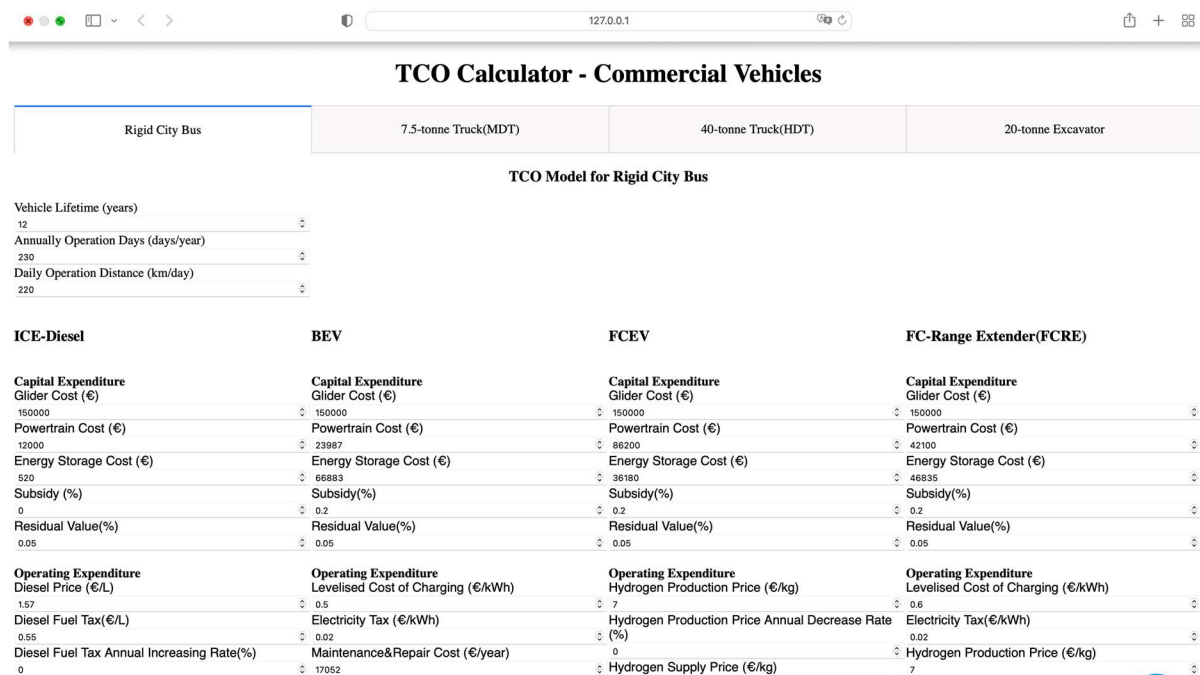


Abbildung 10: Überblick über das entwickelte TCO-Modell

Das entwickelte Modell wurde zunächst nur für die Fahrzeugklasse „Busanwendung“ entwickelt und schließlich auf 7,5 t- und 40 t-Fahrzeuge sowie auf 20 t-Baustellenfahrzeuge ausgeweitet. Die wesentlichen Eingabeparameter des Tools sind die etwaigen Subventionen, Fahrzeugkonfigurationen sowie die Betriebsbedingungen. Die Fahrzeugkonfiguration beinhaltet beispielsweise technische Parameter wie die Brennstoffzellenleistung. Über die Betriebsbedingungen werden die Fahrzyklen in das System eingegeben. Mit Hilfe der

genannten Subventionen und der Fahrzeugkonfiguration können schließlich die Investitionsausgaben (Capital Expenditure, CAPEX) berechnet werden. Zudem werden die Betriebskosten (Operation Expenditure, OPEX) unter Berücksichtigung der Fahrzeugkonfiguration sowie der Betriebsbedingungen bestimmt. Um innerhalb einer Fahrzeugklasse mehrere Fahrzeugtopologien vergleichen zu können, wird die Möglichkeit gegeben, Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine, ICE) sowie batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle, BEV) als Referenz zum Brennstoffzellenantrieb aufzuzeigen und zu berechnen. Innerhalb der Brennstoffzellenfahrzeuge wird zudem zwischen einem brennstoffzellendominanten (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) sowie einem Brennstoffzellen-Range-Extender (FCRE) unterschieden. Eine vom PEM der RWTH Aachen durchgeführte Studie zu veröffentlichten TCO-Modellen legt darüber hinaus offen, dass in den öffentlich zugänglichen Modellen nur begrenzt Optionen existieren, Antriebstechnologien zu vergleichen. Zudem können in den identifizierten Tools Anpassungen an den Eingabeparametern nur limitiert vorgenommen werden. Dieses abgeleitete Defizit wurde im Rahmen der Entwicklung des Modells berücksichtigt und hat zum Design des Modells beigetragen. Die betrachteten Antriebstechnologien sowie die Konfiguration dieser sind in Abbildung 11 dargestellt.

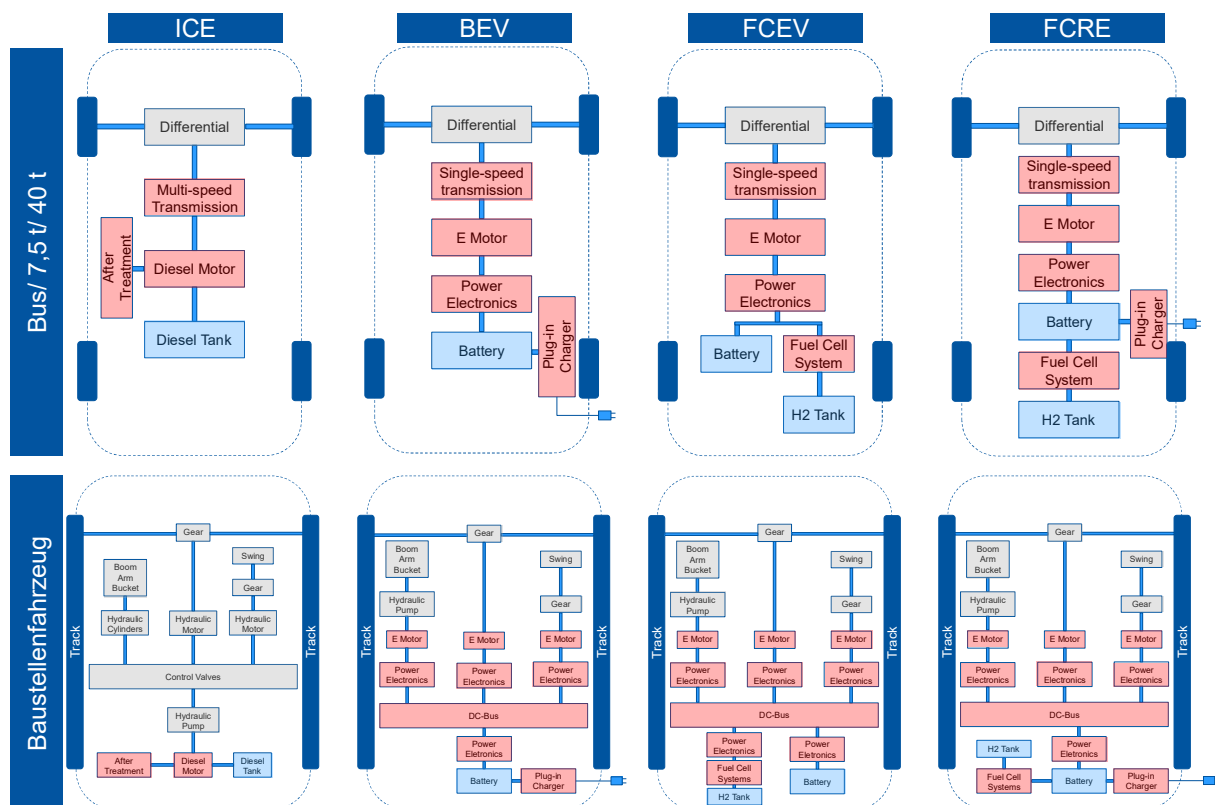


Abbildung 11: Antriebsstrangtopologien der ausgewählter Fahrzeuge

Da das TCO-Modell mit Blick auf die Bewertung von unterschiedlichen Betriebsstrategien entwickelt wurde, wird die Performance der Brennstoffzelle zudem dynamisch betrachtet. In diesem Zusammenhang wird die Degradation der Brennstoffzelle berücksichtigt, die als

Verschlechterung des Gesamtsystems bezeichnet wird und auf unterschiedliche Prinzipien zurückzuführen ist (z. B. Löcher in der Membran, Delamination der Katalysatorschicht, Ablösen von Metallionen). Die Degradation der Brennstoffzelle wird zeitbezogen berücksichtigt und nimmt mit zunehmender Betriebsdauer zu. Je genauer die zeitbezogene Auflösung der Degradation ist, umso genauer können die realen Einflüsse der Degradation in Form abnehmender Effizienz auf die Energiekosten bewertet werden.

Die Ergebnisse der TCO-Analyse mit den vom TME bereitgestellten Performancedaten einer Zelle sind in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellt. Für die Fahrzeugklasse „Bus“, „7,5 t-Fahrzeug“ und „40 t-Fahrzeug“ sind die Ergebnisse in ct/km dargestellt. Für die Klasse „Baustellenfahrzeug“ ist das Ergebnis in ct/Stunde gezeigt.

Bei der Busanwendung liegen die Kosten um 12 bzw. 10 ct/km oberhalb der ICE- und BEV-Referenz. Bei der Baustellenanwendung liegt die Brennstoffzellenvariante unterhalb der ICE-Referenz. Die FCRE-Variante sogar unterhalb der BEV-Variante. Hinsichtlich der Baustellenanwendung trägt insbesondere eine höhere mittlere Effizienz im FCRE-Betrieb dazu bei, dass die Kosten geringer sind.

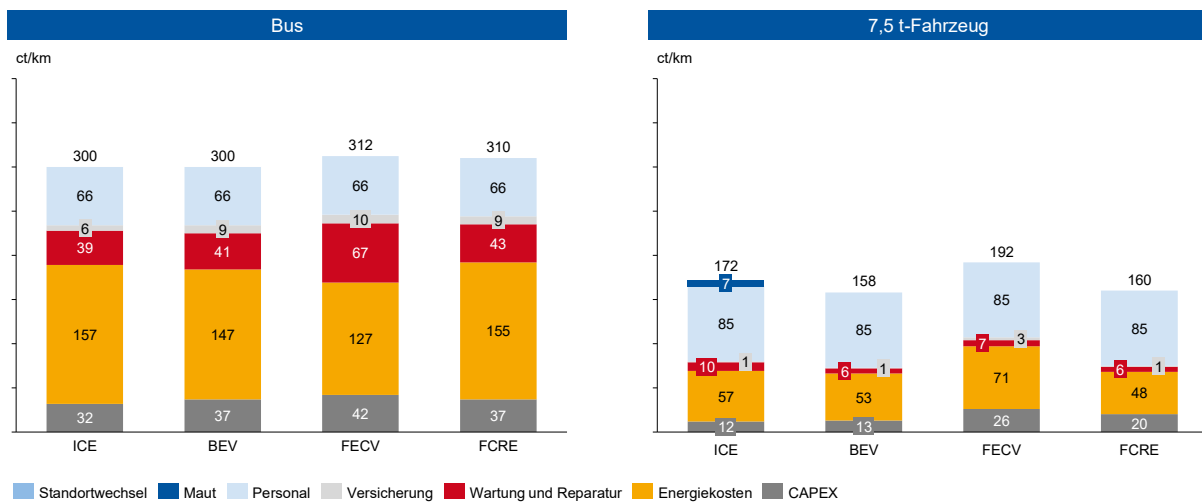


Abbildung 12: Darstellung der TCO für die Fahrzeugklasse Bus und 7,5 t

Mit Blick auf die Kategorien „7,5 t-Fahrzeug“ und „40 t-Fahrzeug“ sind die Brennstoffzellenvarianten etwas teurer. Bei dem 7,5 t-Fahrzeug liegt die maximale Differenz zwischen BEV und FCEV bei 34 ct/km, bei dem 40 t-Fahrzeug bei 96 ct/km. Insbesondere bei dem 40 t-Fahrzeug zeigt die FCRE-Variante Vorteile gegenüber der ICE-Variante, da der ergänzende Brennstoffzellenbetrieb die Energiekosten im Vergleich um 15 ct/km reduziert.

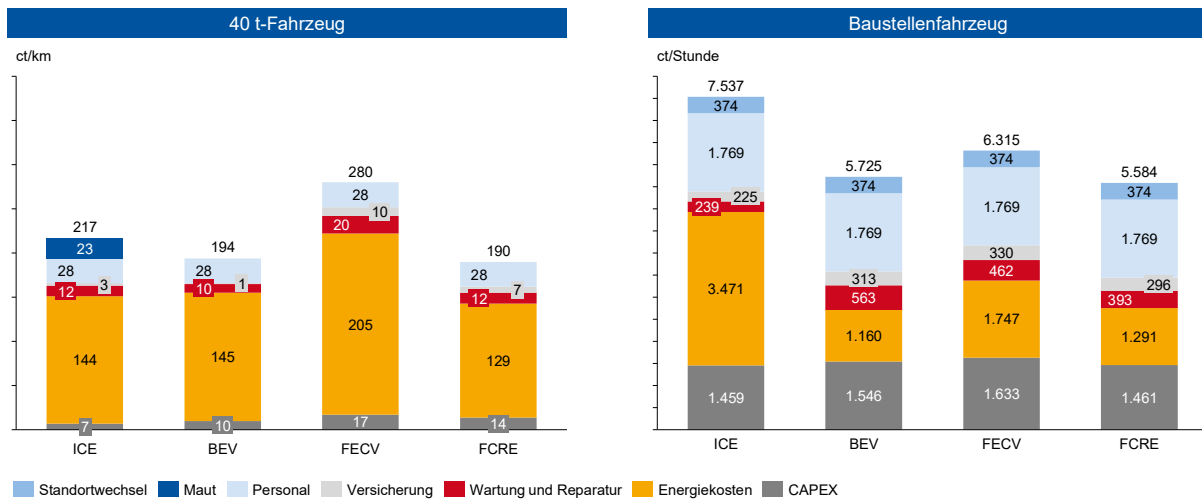


Abbildung 13: Darstellung der TCO für die Fahrzeugklasse 40 t und Baustellenfahrzeug

Eine Sensitivitätsanalyse zeigt zudem, dass insbesondere mit einer Reduzierung der Wasserstoffkosten bereits ein Beitrag zur Kostenparität der Brennstoffzelle mit der ICE- oder BEV-Variante geschaffen werden kann. Regulatorische Randbedingungen sowie die weitere Industrialisierung von Elektrolyseanlagen tragen maßgeblich dazu bei, entsprechende Kosten zu reduzieren.

### 3.6.2. AP 6.1 - TCO Analyse für Luftfahrtanwendungen

Um auch weitere mobile Anwendungen zu erforschen, hat das Institut für Strahlantriebe und Turbomaschinen (IST) den Einsatz von PEM-Brennstoffzellenantrieben in der Luftfahrt untersucht. Dazu wurde ein Brennstoffzellenantrieb für eine Kleinflugzeuganwendung vorausgelegt. Es erfolgte eine Bewertung hinsichtlich Masse und Energieverbrauch im Vergleich zu alternativen Antriebsmöglichkeiten (konventioneller Verbrennungsmotor, Wasserstoff-Verbrennungsmotor, Batterie-Antrieb) und eine Bewertung der Brennstoffzellen-Alterungseffekte für die luftfahrtspezifischen Belastungsszenarien. Zur Auslegung und Berechnung des Betriebsverhaltens des Brennstoffzellenantriebs wurde eine am IST etablierte Vorentwurfsumgebung für elektrische Flugantriebe angewendet und weiterentwickelt. Das Programm ermöglicht die Auslegung und Simulation des Betriebsverhaltens verschiedener Antriebskonzepte auf Basis physikbasierter und skalierbarer Modelle der Einzelkomponenten. Innerhalb des Projektes wurde das analytische Modell zur Abbildung der Betriebscharakteristik der Brennstoffzelle erweitert, sodass eine Kalibrierung auf Grundlage der Messergebnisse der Projektpartner möglich war.

Für die Bewertung des Gesamtsystems wurde die Flugmission eines kleinen Luftfahrzeugs mit zwei Verbrennungsmotor-betriebenen Propellern, einer Abflugmasse von 1750 kg, einer Nutzlast von 480 kg (4 PAX) einer Reichweite von mindestens 500 km und einer Reiseflughöhe von 3000 m herangezogen. In den Studien wurden die Verbrennungsmotoren jeweils durch einen Brennstoffzellenantrieb ersetzt. Das Antriebssystem wurde für die maximal

erforderliche kontinuierliche Leistung beim Start und beginnenden Steigflug ausgelegt. Zusätzliche Anforderungen der CS23 (mind. 1,5% Steiggradient bei Ausfall eines Propellers und Erhöhung der Propellerleistung von 15% auf 95 % innerhalb von fünf Sekunden [9]) wurden berücksichtigt. Die Lastwechsel zwischen den weiteren Betriebszyklen unterliegen keinen Zulassungsanforderungen und können entsprechend quasistationär angenommen werden. Die Leistungsanforderungen an das Antriebssystem sind in Abbildung 14 über die Dauer einer Mission aufgetragen. Diese Leistungsanforderungen wurden für die Gesamtsystembewertung konstant gehalten. Das bedeutet, dass höhere Schubanforderungen durch eine erhöhte Antriebsmasse nicht berücksichtigt wurden.

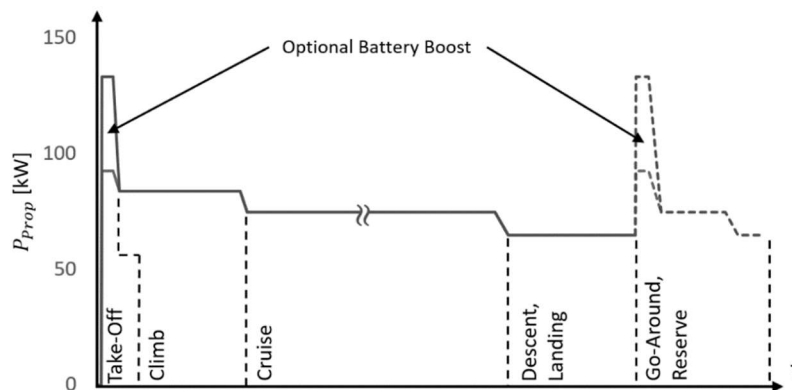


Abbildung 14: Leistungsanforderungen des Propellers innerhalb der betrachteten Flugmission

Basierend auf den Leistungsanforderungen wurden Parameterstudien zur Auslegung des Brennstoffzellensystems durchgeführt. Aufgrund des starken Einflusses der Flugzeugmasse auf die Leistungsanforderungen ist in der Luftfahrtanwendung die Antriebsmasse die wichtigste Optimierungsgröße. Die dafür wesentlichen Auslegungsparameter sind der Hybridisierungsgrad zwischen Brennstoffzelle und Batterie sowie die Dimensionierung des Brennstoffzellenstacks (Auslegungsstromdichte). In Parameterstudien wurde gezeigt, dass die Unterstützung des Starts mit einer Batterie zu einer Verringerung der Antriebsmasse führt. Die optimale Wahl des Hybridisierungsgrads ist von der Auslegungsreichweite abhängig (kleine Batterien für hohe Reichweiten, große Batterien bei geringen Reichweiten). Das Ergebnis einer Parameterstudie der Auslegungsstromdichte ist in Abbildung 15 dargestellt. Die geringste Masse des Antriebssystems wird bei einer Auslegung auf eine Stromdichte von 1,5 A/cm<sup>2</sup> erreicht (Überdimensionierung des Stacks mit einem Faktor von etwa 1,5). Für die weitere Analyse wird eine etwas geringere Auslegungsstromdichte von 1,25 A/cm<sup>2</sup> gewählt, da diese zwar nur zu einer um 0,6 % höheren Masse des Antriebssystems führt, jedoch einen um 1,5 % geringeren Wasserstoffverbrauch aufweist. Aus dem gewählten Auslegungspunkt ergeben sich die in Abbildung 15 gezeigten Betriebspunkte des Brennstoffzellenstacks innerhalb der Flugmission. Durch die Unterstützung des Starts mit einer Batterie liegen die Betriebspunkte in einem engen Betriebsbereich von 0,75-1,25 A/cm<sup>2</sup>. Durch den geringeren

Umgebungsdruck und geringere Druckverhältnisse des Luftverdichters in Teillast sinkt der Betriebsdruck der Brennstoffzelle im Reiseflug und im Sinkflug deutlich ab. Die Zellspannung liegt über die komplette Mission in einem engen Bereich von 0,7-0,75 V.

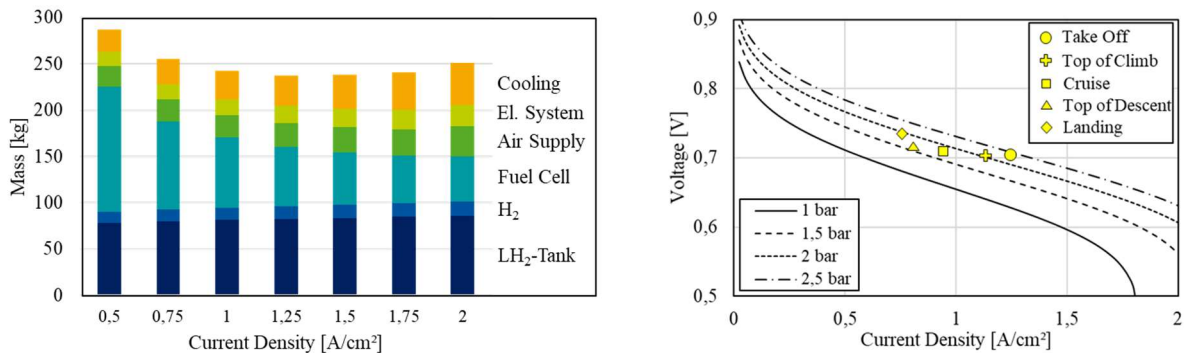


Abbildung 15: Einfluss der Auslegungsstromdichte auf die Masse des Brennstoffzellensystems und Betriebspunkte des Brennstoffzellenstacks innerhalb der Flugmission

Zur Bewertung des Brennstoffzellenantriebs wurden alternative Antriebskonzepte (Wasserstoff-Verbrennungsmotor und reiner Batterieantrieb) ausgelegt. Ein konventioneller Verbrennungsmotor-Antrieb dient als Referenz. In Abbildung 16 ist die Nutzlast des Luftfahrzeugs mit Brennstoffzellenantrieb in Abhängigkeit der Reichweite im Vergleich zu alternativen Antriebsmöglichkeiten dargestellt. Mit dem konventionellen Antrieb mit Verbrennungsmotor kann bei einer Reichweite von 500 km die vorgegebene Nutzlast von 480 kg erreicht werden. Durch die Nutzung der alternativen Wasserstoffantriebe muss die Nutzlast um etwa 80 kg reduziert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass Brennstoffzellenantriebe für Kleinflugzeuge technisch umsetzbar sind. Eine weitere Steigerung der Leistungsdichte ist jedoch notwendig, um die Leistungsfähigkeit konventioneller Verbrennungsmotoren zu erreichen.

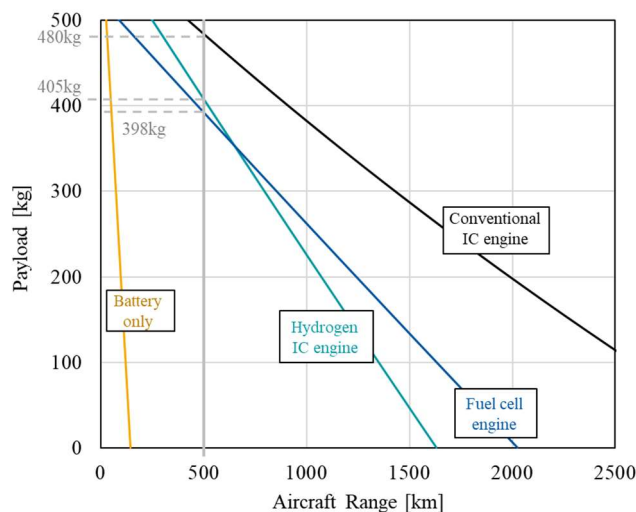


Abbildung 16: Vergleich der Leistungsfähigkeit des Luftfahrzeugs mit verschiedenen Antriebsoptionen im Nutzlast-Reichweiten-Diagramm

Die im Projekt durchgeführten Alterungsmessungen basieren auf dem automobilen Lastzyklus WLTP. Der Luftfahrt-Lastzyklus unterscheidet sich deutlich davon. Er beinhaltet weniger dynamische Lastwechsel und einen längeren stationären Betrieb. Die Ergebnisse der Alterungsmessungen sind daher nicht übertragbar. Die Bewertung von Alterungseffekten für die Luftfahrtanwendung erfolgte daher auf Grundlage von Literaturdaten. Für aktuelle Luftfahrtantriebe ist gewöhnlich eine Lebensdauer von 20.000 Betriebsstunden gefordert [10]. Ausgehend von einer End-of-Life (EoL)-Zellspannung von 90 % der Begin-of-Life (BoL)-Zellspannung ergibt sich eine maximale Degradationsrate von 3,5  $\mu\text{V/h}$  (Literatur für Luftfahrtanwendungen: ca. 2-10  $\mu\text{V/h}$  [11]). Wird die EoL-Zellspannung in der Auslegung des Brennstoffzellenantriebs berücksichtigt, verringert sich für eine 500 km Flugmission die Nutzlast um ca. 60 kg im Vergleich zur Auslegung bei BoL-Zellspannung. Die Festlegung der genauen EoL-Zellspannung ist damit ein zusätzlicher wesentlicher Auslegungsparameter, der bei der Bewertung von Brennstoffzellenantrieben berücksichtigt werden muss. Eine optimale Wahl der EoL-Zellspannung erfordert eine Abwägung der Wirtschaftlichkeit des Antriebskonzepts zwischen der verfügbaren Nutzlast des Luftfahrzeugs und der Lebensdauer des Triebwerks.

#### **4. Angemessenheit und Notwendigkeit der geleisteten Aufwände**

Die geleisteten Aufwände an den Lehrstühlen der RWTH Aachen waren sowohl angemessen als auch notwendig um die Entwicklung von Modellen für eine detaillierte simulative Untersuchung von Brennstoffzellensystem, sowie die Weiterentwicklung von Methoden zur alterungsoptimierten Vermessung von Komponenten eines Brennstoffzellensystems, im speziellen eines Brennstoffzellenstapels, durchführen zu können.

Personalkosten waren notwendig um die in beschriebenen Arbeiten durchführen zu können. Die dabei im Projekt entstandenen Kosten waren notwendig, um diese Arbeiten erstmalig exemplarisch durchführen zu können

#### **5. Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die Lehrstühle der RWTH konnten im Rahmen des Projekts echtzeitfähige Modelle erstellen welche eine detaillierte Untersuchung von Brennstoffzellen in mobilen Anwendungen auch unter dem Blickpunkt der Alterung des Systems ermöglicht. Durch eine Reduktion der entwickelten Modelle konnte eine echtzeitfähige modellprädiktive Regelung entwickelt werden, welche den Systemwirkungsgrad optimieren und Alterung reduzieren kann. Zusätzlich konnte eine Datengrundlage zur Quantifizierung der Alterung von Brennstoffzellen an einem im Projekt weiterentwickelten Prüfstand erzielt werden. Mit Hilfe dieser Ergebnisse können in Zukunft Brennstoffzellensysteme für den Betrieb optimal ausgelegt werden und gleichzeitig während des Betriebs kontinuierlich überwacht und betriebsoptimal eingestellt werden.

Mit Hilfe der erstellten Total-Cost of Ownership Analysen können Brennstoffzellensysteme in Zukunft gezielter und dedizierter für geeignete Anwendungen ausgelegt werden.

## 6. Fortschritt des Stands der Technik während der Projektlaufzeit

Im Rahmen des Projekts konnten besonders im Bereich der Modellentwicklung und MPR große Fortschritte im Vergleich zum Stand der Technik erzielt werden. Eine wichtige Entwicklung ist die Verbesserung und Entwicklung eines dynamischen PEM-Membranmodells. In der Literatur wird zumeist die relative Feuchte an der katalytischen Schicht herangezogen, mit der über eine empirische Gleichung wie beispielsweise dem Springer-Ansatz, der Membranwassergehalt an der Membranoberfläche im stationären Zustand abgeschätzt wird. Jedoch wurde durch verschiedene Experimente festgestellt, dass die Membrandynamik einer PEM-Brennstoffzelle träge ist und der Wassergehalt an der Membranoberfläche, bei einem transienten Wechsel von der äquivalenten Wassermenge an der katalytischen Schicht stark abweichen kann und sich eine Stationarität erst in einem Bereich von mehreren Minuten bildet. Dieses Verhalten konnte mit den entwickelten Modellen abgebildet werden. Zudem konnte mit dem neuen Modellierungsansatz auch die nicht-linearität des Wassergehalts in der Membran dargestellt werden, welches in der Literatur zumeist vereinfacht linearisiert wird. Weiterhin wurde die Wasseradsorption und -desorption mit unterschiedlicher Geschwindigkeit berücksichtigen, um auch in diesem Falle, das reale Verhalten mit größerer Genauigkeit abzubilden.

Im Gegensatz zum Stand der Technik konnte in diesem Projekt auch eine MPR entwickelt werden, welche eine Zellsegmentierung beinhaltet und somit lokale Phänomene mit hoher Genauigkeit abbilden kann. Zudem konnte ich mit der MPR die Systemeffizienz unter Betrachtung der Brennstoffzellendegradation optimiert werden.

## 7. Veröffentlichung der Ergebnisse

Es ist geplant, die Ergebnisse der regelungsorientierten Modellierung und validierten MPR von Brennstoffzellen-Stacks in einer begutachteten Fachzeitschrift im Jahr 2025 zu veröffentlichen. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse der gezeigten Prüfstandsmessungen sowie weitere Referenzmessungen der Partner zu Veröffentlichungen zum Alterungsverhalten von Brennstoffzellen unter Nutzung realistischer AST und zu Veröffentlichungen zur Brennstoffzellenmodellierung in den Jahren 2025 und 2026 führen.

### Liste der bereits erfolgten Veröffentlichungen:

- [1] Model predictive control for degradation reduction in PEM fuel cell stacks, D.Sallach, 2. Aachen Hydrogen Colloquium, 2023
- [2] Elaboration on the Need for Dynamic Total-Cost-of-Ownership Models in the Context of Fuel Cell Electric Vehicles, Heiner Heims, Achim Kammpker, Mario Kehrer, Sebastian Hagedorn, Niels Hinrichs, 2023 10<sup>th</sup> International Conference on Power and energy Systems Engineering (CPESE)

## 8. Literaturverzeichnis

- [1] E. Dickinson, "Modelling the Proton-Conductive Membrane in Practical Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Simulation: A Review", *Membranes*, 2020
- [2] G. Hwang, "Understanding Water Uptake and Transport in Nafion Using X-ray Microtomography", *American Chemical Society*, 2013
- [3] R. Ferreira, "Simulation of membrane chemical degradation in a proton exchange membrane fuel cell by computational fluid dynamics", *Hydrogen Energy Publications*, 2020
- [4] Diehl, Moritz, Hans Georg Bock, und Johannes P. Schlöder. „A Real-Time Iteration Scheme for Nonlinear Optimization in Optimal Feedback Control“. *SIAM Journal on Control and Optimization* 43, Nr. 5 (Januar 2005): 1714–36. <https://doi.org/10.1137/S0363012902400713>.
- [5] Rawlings, J, D.Q. Mayne, und M. Diehl. *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design*. 2nd Edition. Nob Hill Pub., 2009.
- [6] Vukov, Milan, Alexander Domahidi, Hans Joachim Ferreau, Manfred Morari, und Moritz Diehl. „Auto-generated algorithms for nonlinear model predictive control on long and on short horizons“. In *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, 5113–18, 2013. <https://doi.org/10.1109/CDC.2013.6760692>.
- [7] Andersson, Joel A. E., Joris Gillis, Greg Horn, James B. Rawlings, und Moritz Diehl. „CasADi: A Software Framework for Nonlinear Optimization and Optimal Control“. *Mathematical Programming Computation* 11, Nr. 1 (März 2019): 1–36. <https://doi.org/10.1007/s12532-018-0139-4>.
- [8] The MathWorks, Inc. *Model Predictive Control Toolbox*. Natick, Massachusetts, United States, 2025. <https://www.mathworks.com/products/mpc.html>
- [9] European Union Aviation Safety Agency, „Easy Access Rules for Normal, Utility, Aerobatic and Commuter Category Aeroplanes (CS-23) (Initial issue),“ 2018. [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/cs-23-initial-issue>. [Zugriff am 10 02 2022]
- [10] T. Hoff, F. Becker, A. Dadashi, K. Wicke und G. Wende, „Implementation of Fuel Cells in Aviation from a Maintenance, Repair and Overhaul Perspective,“ *Aerospace*, 2023.
- [11] N. Dyantyi, A. Parsons, C. Sita und S. Pasupathi, „PEMFC for aeronautic applications: A review on the durability aspects,“ *Open Engineering*, 7(1), pp. 287-302, 2017.

- [12] Paul Thiele, Yue Yang, Steffen Dirkes, Maximilian Wick, Stefan Pischinger,  
“Realistic accelerated stress tests for PEM fuel cells: Test procedure development  
based on standardized automotive driving cycles”,  
International Journal of Hydrogen Energy, Volume 52, Part D, 2024, Pages 1065-  
1080
- [13] Mingyang Liu, Cheng Wang, Fucheng Xie, Zongqiang Mao,  
“A polymer electrolyte fuel cell life test using accelerating degradation technique”,  
International Journal of Hydrogen Energy, Volume 38, Issue 25, 2013, Pages 11011-  
11016,