

Schlussbericht zum Verbundvorhaben



Control algorithm and controller for increasing the efficiency of hybrid PEMFC systems in different applications

-

Steueralgorithmus und Steuerung zur Steigerung der Effizienz von Hybrid-PEMFC-Systemen in verschiedenen Anwendungen

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Projektmanagement: Projektträger DLR

Förderprogramm: STAIR - Polish-German Sustainability Research Call (II)

Laufzeit des Vorhabens/ Berichtszeitraum: 01.10.2016 – 31.03.2020

Verbundpartner und individuelle Förderkennzeichen:

Verbundpartner	Förderkennzeichen
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	01LX1601A
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)	01LX1601B
PowerCell Deutschland GmbH (PC)	01LX1601C
Gdansk University of Technology (GUT)	NCBR: STAIR/6/2016
Impact Clean Power Technology S. A. (ICPT)	NCBR: STAIR/6/2016

Autoren:

Jens Mitzel (DLR)
Jürgen Hunger (ZSW)
Per Ekdunge (PC)

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
1. Kurzdarstellung.....	4
1.1 Aufgabenstellung.....	4
1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4 Wissenschaftlichem und technische Anknüpfungspunkte.....	7
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2. Eingehende Darstellung:	9
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	9
2.1.1 AP1: Koordination und Management.....	9
2.1.2 AP2: Teilsystemuntersuchungen für Brennstoffzelle und LiC-Einheit.....	9
2.1.3 AP3: Methodenentwicklung zur Überwachung und Optimierung der Teilsysteme	17
2.1.4 AP4: Entwicklung des Kontrollalgorithmus	26
2.1.5 AP5: Bereitstellung des Hybridsystem-Kontrollers	33
2.1.6 Fazit und Ausblick.....	41
2.2 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschrittenen Verwertungsplans	42
2.2.1 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	43
2.2.2 Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)	45
2.2.3. PowerCell Deutschland GmbH (PC).....	46
2.2.4. Gdansk University of Technology (GUT).....	47
2.2.5. Impact Clean Power Technology S. A. (ICPT).....	48
2.3. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	49
2.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse aus dem Vorhaben	50
2.4.1 Wissenschaftliche Publikationen.....	50
2.4.2 Beiträge zu wissenschaftlichen Konferenzen	51

Abkürzungsverzeichnis

Deutsche Projektpartner:

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

PC PowerCell Germany GmbH

ZSW Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff Forschung Baden-Württemberg

Polnische Projektpartner:

GUT Politechnika Gdańska

ICPT Impact Clean Power Technology

Verwendete Abkürzungen:

AP Arbeitspaket

CAN Controller Area Network (serielles Bussystem zur Datenübertragung)

DEIS Dynamische, elektrochemische Impedanzspektroskopie

EIS Elektrochemische Impedanzspektroskopie

EU Europäische Union

FC-DLC Fuel Cell Dynamic Load Cycle (EU-weit harmonisierte Testprozedur für dynamischen Brennstoffzellenbetrieb)

LiC Lithium-Ionen-Kondensator (lithium ion capacitor)

LTO Lithium-Titanat-Oxid (Spezielle Technologie bei Lithium-Ionen-Batterien)

M Meilenstein

NCBR The National Centre for Research and Development

OOP Optimizing of OPerating conditions (automatisierter Algorithmus zur Optimierung der Betriebsbedingungen einer PEMFC)

PEMFC Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (polymer electrolyte membrane fuel cell)

SoC Ladezustand (State-of-Charge)

1. Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des COALA-Vorhabens wird eine Kontrollstrategie für PEMFC-Hybridsysteme entwickelt, welche die Überwachung der Teilsysteme und die Optimierung der Systemeffizienz ermöglicht sowie Vermeidungsstrategien für ungünstige Betriebsbedingungen nutzt. Die Steuerung wird durch ein innovatives, speziell auf Hybridsysteme ausgerichtetes Energiespeichersystem unterstützt. Ein Überwachungssystem gewährleistet die Messung der Stackleistung, der Stack- und Einzelzellenimpedanz sowie weitere typische Betriebsparameter. Ortsaufgelöste Sensoren verbessern die Sensitivität zur Detektion kritischer Ereignisse und ermöglichen ein schnelles Gegensteuern. Auch kritische Betriebsphasen während Start/Stop und Lastwechseln werden abgedeckt. Ein Steuergerät mit implementierter Kontrollstrategie wird entwickelt und bereitgestellt. Dieses nutzt einen Algorithmus, der die optimalen Betriebsbedingungen bestimmt und anpasst, um die Effizienz, die Lebensdauer und die Vielseitigkeit des Systems zu verbessern.

Zur Erfüllung der Ziele des Vorhabens haben die beteiligten Partner folgende Aufgaben übernommen:

- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR): Das DLR war der Koordinator des Vorhabens auf deutscher Seite. Zudem wurden Stackuntersuchungen zur Effizienzoptimierung, zu Parametereinflüssen und zur Langlebigkeit unter verschiedenen Lastzyklen mit Hilfe von lokalen Sensoren durchgeführt. Des Weiteren wurde die Überwachungsmethodik für Brennstoffzellen und die Strategie für schonende Lastwechselerarbeit. Zudem erfolgte am DLR die Erstellung des integrierten Kontrollalgorithmus sowie des Optimierungsalgorithmus, welche dann im Hybridsystem validiert wurden.
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW): Neben der Bereitstellung von Brennstoffzellenstacks für stationäre Anwendungen, führte das ZSW die Lebensdauer-Untersuchungen mit Lastwechsel- sowie Start/Stop-Zyklen durch. Zudem wurde der Effizienzoptimierungsalgorithmus auf Stackebene untersucht und verbessert. Des Weiteren wurden die Überwachungs- und Kontrollmethodik für verbesserte Lebensdauer erarbeitet und bei der Entwicklung des Managementsystems für das Brennstoffzellen-Teilsystem integriert.
- PowerCell Deutschland GmbH (PC): Neben der Bereitstellung von Brennstoffzellenstacks für automobiler Anwendungen, stellte PC die Spezifikationen des PEMFC-Teilsystems für eine zielgerichtete Methodenentwicklung bereit und definierte die Systemanforderungen, welche vom Controller erfüllt werden müssen. Des Weiteren war PC wesentlich an der Erarbeitung der Start/Stop-Prozeduren und des Kontrollalgorithmus beteiligt.
- Gdansk University of Technology (GUT): Die GUT war der Koordinator des Vorhabens auf polnischer Seite. Im Vorhaben war die GUT zudem für die

Entwicklung der Stacküberwachung mit Hilfe von Impedanzspektroskopie verantwortlich. Durch die Entwicklung einer dynamischen, sehr schnellen Impedanzspektroskopie an Einzelzellen und Brennstoffzellenstacks wurde die Überwachung unter Lastwechsel- sowie Start/Stop-Zyklen beschleunigt und verbessert. Algorithmen zur Datenerfassung und Auswertung der Methodik wurden entwickelt und in den Kontrollalgorithmus eingearbeitet.

- Impact Clean Power Technology S. A. (ICPT): ICPT war verantwortlich für die Herstellung und die Integration eines innovativen, speziell auf Hybridsysteme ausgerichteten Energiespeichersystem. Dabei handelt es sich um einen Lithium-Ionen-Kondensator (lithium ion capacitor). Das LiC-Modul wurde von ICPT entwickelt und seine Funktionalität und Leistung getestet. Des Weiteren wurde das Überwachungssystem für das LiC-Modul sowie das Steuerungskonzept zur Erhöhung der Lebensdauer des Hybridsystems entwickelt. Das resultierende LiC-Managementsystem wurde in den Kontrollalgorithmus des Hybridsystems implementiert.

1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat in September 2015 gemeinsam mit dem Ministry of Science and Higher Education of Poland (MNiSW) die Fördermaßnahme mit dem Titel "Second Call Announcement on Polish-German Sustainability Research (STAIR)" veröffentlicht.

Das COALA-Vorhaben wurde in diesem Rahmen als deutsch-polnisches Verbundvorhaben gefördert. Das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Stuttgart fungierte dabei als deutscher Koordinator und die Gdansk University of Technology (GUT) als polnischer Koordinator. Neben dem DLR waren auf deutscher Seite mit dem Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) ein weiteres Forschungsinstitut sowie das KMU PowerCell Deutschland GmbH (PC) am Vorhaben beteiligt. Neben der GUT nahm auf polnischer Seite noch das KMU Impact Clean Power Technology S. A. (ICPT) am Vorhaben teil.

Die Laufzeit von COALA erstreckte sich vom 01.10.2016 bis zum 31.03.2020. Als Projektträger fungierten auf deutscher Seite der Projektträger DLR (PT-DLR) und auf polnischer Seite das National Centre for Research and Development (NCBR).

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Zuwendungsbescheide der Projektträger gingen im September 2016 bei den Projektpartnern ein. Nach offiziellem Projektbeginn am 01.10.2016 fand das Kick-off Meeting aller Partner am 12.10.2016 im Rahmen der POL-ECO-SYSTEM 2016 in Posen statt. In etwa halbjährlichem Abstand fanden Treffen des Gesamtkonsortiums abwechselnd in Deutschland und in Polen statt, welche durch die teilnehmenden Projektpartner organisiert wurden. Diese Treffen wurden durch monatliche

Telefonkonferenzen direkte Abstimmungen auf Arbeitsebene innerhalb der Arbeitspakete ergänzt.

Aufgrund von unerwarteten technischen Schwierigkeiten und Verzögerungen bei Ausschreibungen und Materiallieferungen hat sich das Projekt leicht verzögert und der Arbeitsplan musste im Laufe des Vorhabens an diese Verzögerung angepasst werden. In Absprache mit dem Projektträgern wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts bis 31.03.2020 beantragt und bewilligt.

Die Planung des Vorhabens (Abbildung 1) umfasste neben der Koordination und dem Management in **AP1** vier weitere Arbeitspakete.

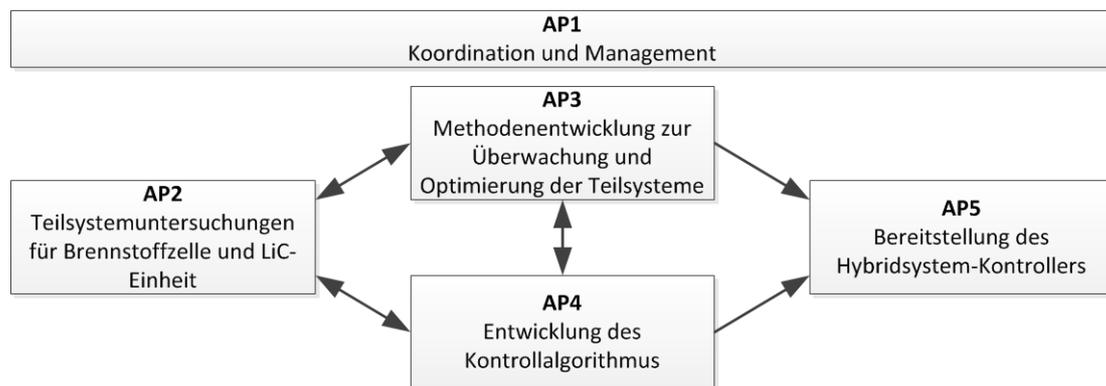


Abbildung 1: Arbeitspakete im COALA-Vorhaben

In **AP2** erfolgten die experimentellen Untersuchungen der Teilsysteme Brennstoffzelle und LiC-Einheit. Hier erfolgten Arbeiten zur Optimierung der Effizienz und Lebensdauer der Brennstoffzelle und zu den verwendeten lokalen Sensoren und weiteren Überwachungstechnologien. Lebensdauerbeanspruchenden Betriebszustände der Brennstoffzelle und der LiC-Einheit wurden hier ebenfalls untersucht. Alle Untersuchungen erfolgten unter Verwendung verschiedener anwendungsspezifischer Bedingungen und Lastzyklen um eine breite Datenbank für die Methoden- (AP3) und Algorithmen-Entwicklung (AP4) bereit zu stellen.

In **AP3** wurden Methoden entwickelt, um den Gesundheitszustand und die Effizienz des Hybridsystems, der Brennstoffzelle und des LiC-Moduls zu überwachen und zu optimieren. Dabei wurden sowohl die verwendeten Sensoren wie auch der Überwachungsalgorithmus untersucht und die verwendeten diagnostischen Methoden verbessert. Die Impedanzeigenschaften wurden hierbei durch lokale Sensoren physikalischen Vorgängen zugeordnet, welche den Stackbetrieb beeinflussen. Durch die Entwicklung eines Effizienzoptimierungsalgorithmus konnte die Brennstoffzelleneffizienz erhöht werden. Zudem wurden optimierte Lastwechsel- und Start/Stop-Verfahren erarbeitet. Es wurde ein Überwachungssystem entwickelt, um eine schnelle Reaktion des Kontrollalgorithmus auf kritische Betriebsbedingungen zu gewährleisten und so die Lebensdauer der Komponenten zu verlängern.

Die entwickelten Methoden und Teilalgorithmen wurden in **AP4** in den Kontrollalgorithmus für das Hybridsystem implementiert. Somit sind die praktische

Anwendbarkeit des Algorithmus sowie seine Anpassungsfähigkeit an verschiedene Anwendungen gewährleistet. Hierfür wurden zwei getrennte Managementsysteme für die Teilsysteme entwickelt und im Gesamtalgorithmus kombiniert. Weitere Algorithmen für die Optimierung der Betriebsbedingungen und die Interpretation der überwachten Parameter wurden ebenfalls implementiert.

Die Hardware und die Software des endgültigen Hybridsystem-Kontrollers wurden in **AP5** erarbeitet. Alle physikalischen Schnittstellen zur Überwachung und Optimierung wurden integriert. Eine externe Firma wurde im Vorhaben mit der Entwicklung und Bereitstellung der Controllerhardware beauftragt. Trotz enger Kooperation mit der polnischen Firma konnten nicht alle Teile des Controllers innerhalb des Vorhabens fertiggestellt und kombiniert werden. Aus diesem Grund wurden die entwickelten Algorithmen und Strategien erfolgreich in zwei alternativen Controllern am DLR und an der GUT validiert. Am DLR erfolgte die Validierung des Hybridsystems inklusive des neuentwickelten LiC-Systems, des Steuerungsalgorithmus und des Optimierungsalgorithmus. Bei der GUT erfolgte die Validierung des schnellen Überwachungsalgorithmus.

1.4 Wissenschaftlichem und technische Anknüpfungspunkte

Hauptziel des Vorhabens war die Entwicklung einer fortschrittlichen Hybridisierungsstrategie für Brennstoffzellensysteme unter Verwendung verbesserter Überwachungs- und Kontrollmethoden. Die technische Infrastruktur zur Umsetzung des Vorhabens war bei allen Partnern bereits vorhanden und bedurfte lediglich anwendungsbedingter Anpassungen. Um das Hauptziel zu erreichen, wurden verschiedene Vorkenntnisse der Partner genutzt.

Die Effizienz des Brennstoffzellenstacks wurde im laufenden System durch einen Algorithmus optimiert. Die beteiligten Partner hatten bereits einen Algorithmus zur Verbesserung der Effizienz auf dem Stacklevel erarbeitet, der nun auf den Systemlevel übertragen wurde:

- P. Piela, J. Mitzel; Polymer electrolyte membrane fuel cell efficiency at the stack level; J. Power Sources 292 (2015) 95
- P. Piela, J. Mitzel, E. Gülzow, J. Hunger, A. Kabza, L. Jörissen, F. Valle, A. Pilenga, T. Malkow, G. Tsotridis; Performance optimization of polymer electrolyte membrane fuel cells using the Nelder-Mead algorithm; Int. J. Hydrogen Energ 42 (2017) 20187

Die verbesserte Überwachung der Betriebsbedingungen wurde über dynamische Impedanzspektroskopie (DEIS) umgesetzt. Diese Variante der üblichen EIS-Methode wurde von dem Projektpartner GUT bereits im Vorfeld entwickelt und im Vorhaben auf die Anwendung der Brennstoffzellen übertragen:

- K. Darowicki; Theoretical description of the measuring method of instantaneous impedance spectra; J. Electroanal. Chem. 486 (2000) 101

- P. Ślepski, K. Darowicki, E. Janicka, G. Lentka; A complete impedance analysis of electrochemical cells used as energy sources; J. Solid State Electrochem. 16 (2012) 3539

Zum Besseren Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse bei der Brennstoffzellenüberwachung wurden lokale Stromdichtesensoren eingesetzt, welche vom DLR patentiert wurden:

- T. Kaz, H. Sander, S. Schönbauer; Device for measuring local current/heat distribution on electrochemical electrode has current flow direction to resistance element transverse to current flow direction to current conducting element; Patent DE10316117 B3 (2004)
- T. Kaz, H. Sander, S. Schönbauer; Measurement of the current distribution/heat distribution of an electrochemical electrode; Patent EP1618395 A1 (2006)

Zudem wurden die spezifischen Kenntnisse der beteiligten KMUs auf ihren Geschäftsfeldern im Vorhaben genutzt. Die betrifft bei PC die Gebiete Brennstoffzellenstacks und -systemen und bei ICPT die Gebiete Batterien und alternative Energiespeicher.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des Vorhabens wurde sich intensiv mit weiteren nationalen und europäischen Vorhaben und Projekten auf den Themengebieten Brennstoffzelle, Überwachungsmethoden und Kontrollstrategien ausgetauscht:

- Stack-Test (FCH-JU 303445): Europäisches Projekt zur Entwicklung von standardisierten Testprozeduren für Brennstoffzellen
- ID-Fast (FCH-JU 779565): Europäisches Projekt zur Untersuchung von Degradationsmechanismen in Brennstoffzellen
- INN-Ballance (FCH-JU 735969): Europäisches Projekt zur Optimierung von Systemkomponenten in Brennstoffzellensystemen
- AutoStack-Core (FCH-JU 325335): Europäisches Projekt zur Entwicklung eines automobilen Brennstoffzellenstacks
- AutoStack Industrie (NOW 03B10103): Deutsches Projekt zur Weiterentwicklung von Stacks für Brennstoffzellenfahrzeuge hin zur Industrialisierungsreife
- SoHMuSDaSS (BMW 03ET2007): Deutsches Projekt zur State-of-Health-Analyse von Brennstoffzellen
- Health Code (FCH-JU 671486): Europäisches Projekt zur Impedanzanalyse von Niedertemperatur-Brennstoffzellen
- Insight (FCH-JU 735918): Europäisches Projekt zur Diagnostik in Hochtemperatur-Brennstoffzellen.

2. Eingehende Darstellung:

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

In den folgenden Abschnitten werden die erzielten Ergebnisse der jeweiligen Arbeitspakete durch die Verbundpartner detailliert beschreiben.

2.1.1 AP1: Koordination und Management

Die Koordination und das Management des COALA-Vorhabens wurden vom DLR auf deutscher Seite und von der GUT auf polnischer Seite umgesetzt. An den einzelnen Aufgaben waren alle Partner beteiligt. Die Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele und der erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Ziele und Ergebnisse in AP1

Vorgegebenes Ziel	Erzielte Ergebnisse	Beteiligte Partner
Berichterstattung	Alle Zwischen- und Abschlussberichte eingereicht	DLR, GUT
Koordination der wissenschaftlichen Arbeit	<ul style="list-style-type: none">- 7 Projekttreffen- STAIR-Statuskonferenzen- Monatliche Telefonkonferenzen- Anpassung der Laufzeit des Vorhabens	DLR, GUT
Management der Ergebnisveröffentlichungen	<ul style="list-style-type: none">- 8 wissenschaftliche Publikationen- 8 Beiträge zu wissenschaftlichen Konferenzen	Alle Partner

Somit wurden alle Ziele in diesem AP erreicht. Die Meilensteine M1.1 bis M1.8 umfassen die Übermittlung der Zwischenberichte (M1.1 – M1.7) sowie des Abschlussberichtes (M1.8). Alle Meilensteine wurden erfüllt. Die aufgeführten wissenschaftlichen Publikationen und Beiträge zu wissenschaftlichen Konferenzen sind in Kapitel 2.4 detailliert aufgeführt.

2.1.2 AP2: Teilsystemuntersuchungen für Brennstoffzelle und LiC-Einheit

AP2 umfasst Untersuchungen der Teilsysteme Brennstoffzelle und LiC-Einheit und alle Partner waren an diesem AP beteiligt. Die Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele und der erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Ziele und Ergebnisse in AP2

Vorgegebenes Ziel	Erzielte Ergebnisse	Beteiligte Partner
Parameter tests bezüglich Stacksensitivität	<ul style="list-style-type: none">- Alle Tests durchgeführt- Liste der Parameter mit Einfluss auf die Stackeffizienz der Brennstoffzelle erstellt	DLR, GUT

Validierung des Effizienzoptimierungsalgorithmus auf Stack- und Systemlevel	<ul style="list-style-type: none"> - Validierung der Effizienz- und Lebensdauersteigerung auf Stacklevel - Validierung der Effizienzsteigerung auf Systemlevel 	DLR, ZSW DLR
Stressfaktortests zur Bestimmung und Detektion lebensdauerbeanspruchender Betriebszustände	<ul style="list-style-type: none"> - Lastzyklen-Tests an Stacks - Untersuchung von Feuchte, Druck, Temperatur und CO-Verunreinigung 	ZSW
Bestimmung entscheidender, lebensdauerbeanspruchender Betriebszustände während PEMFC-Lastzyklen	<ul style="list-style-type: none"> - Entscheidend für Lebensdauer ist das Verhältnis der Gasfeuchten - Anode sollte sehr feucht betrieben werden (Taupunkt 75°C). - Kathode kann recht trocken betrieben werden (Taupunkt 30°C). 	ZSW
Bestimmung zusätzlicher, lebensdauerbeanspruchender Betriebszustände während PEMFC-Start/Stop-Vorgängen	<ul style="list-style-type: none"> - Schnelle H₂-Spülung der Anode vor Start nötig - Vermeiden von Luft an Kathode und Bereitstellung von H₂ an Anode während Stopp-Phasen - Schnelle Temperatur- und Feuchte-Verringerung in Stopp-Phasen 	DLR, ZSW, PC
Bestimmung von dynamischer Lastwechselfähigkeit der LiC-Einheit	<ul style="list-style-type: none"> - Lastwechseltest mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt - LiC-Design optimiert - Gute Speichereffizienz 	ICPT
Bestimmung von dynamischer Lastzyklenbeständigkeit der LiC-Einheit	<ul style="list-style-type: none"> - Lebensdauertests durchgeführt - Keine merkliche Abnahme der Speicherkapazität und -effizienz 	ICPT

Somit wurden alle Ziele in diesem AP erreicht. In AP2 waren die folgenden Meilensteine vorgesehen, welche auch alle erfüllt wurden:

- M2.1: Liste der Parameter mit Einfluss auf die Stackeffizienz der Brennstoffzelle
- M2.2: Liste der lebensdauerbeanspruchenden Betriebszustände (Last- und Start/Stop-Zyklen)
- M2.3: Betriebsspezifikation der LiC-Einheit

Im Folgenden werden die Aufgaben und erzielten Ergebnisse der einzelnen deutschen Teilprojekte in diesem AP beschrieben:

A. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Das DLR war sowohl an den Untersuchungen auf Stack- und Teilsystemebene der Brennstoffzelle als auch des Hybridsystems beteiligt. Die vorhandenen Teststände wurden an die verwendeten Stacks angepasst und die Messplatinen mit lokalen Sensoren wurden an die Anforderungen im Projekt angepasst. Die benötigte Messtechnik wurde aufgebaut und die Platinen gefertigt. Die Kombination von lokaler Sensorik und Impedanzmessungen zur Überwachung von PEMFC-Stacks wurde umgesetzt und durch die Simulation von fehlerhaften Betriebsbedingungen an der Kathode, der Anode und der Membran validiert. Dabei wurden Zusammenhänge

zwischen der Detektion dieser Betriebsbedingungen mit Hilfe der lokalen Sensorik sowie über EIS-Signalen von Einzelzellen und vom Stack identifiziert (Abbildung 2). Zudem erfolgten Untersuchungen des Einflusses von Lastwechseln und Start/stopp-Zyklen durch die Kombination beider Techniken. Zudem wurde der weiterentwickelte Optimierungsalgorithmus auf Stackebene bezüglich der Effizienzsteigerung validiert.

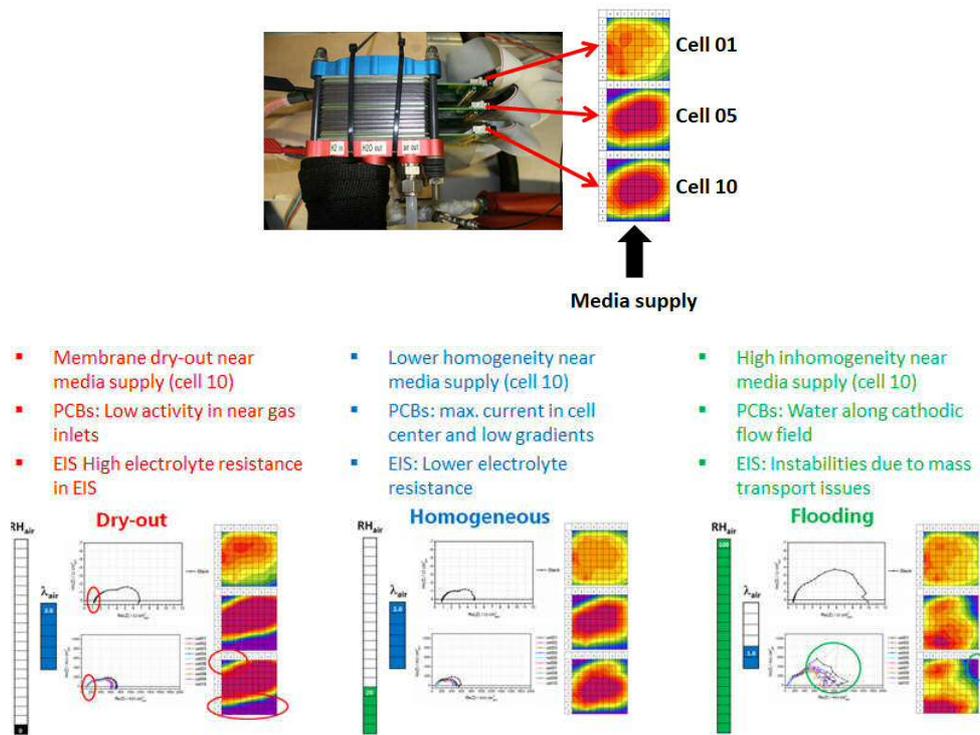


Abbildung 2: Kombination von lokalen Sensoren und EIS

An den Brennstoffzellenstacks wurden die Liste der Parameter mit Einfluss auf die Stackeffizienz der Brennstoffzelle erstellt (Abbildung 3). Hierzu wurden Parametertests durchgeführt, um Sensitivität und den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Effizienz der Brennstoffzelle genau zu untersuchen. Dabei wurden die Stacktemperatur und die Luftversorgung als besonders wichtige Parameter identifiziert. Auf diese Parameter wurde bei der Optimierung der Effizienz auf Stack- und Systemebene besonderen Wert gelegt.

Test Input Parameter	Lowest Set Point	Highest Set Point	Impact on Efficiency		
			Category	Values	Note
Hydrogen Humidity	25% RH	75% RH	low	<0.5%	avoid flooding
Air Humidity	25% RH	75% RH	significant	<1.5%	avoid flooding
Stack Temperature	65 °C	85 °C	high	<2.8%	high temperature beneficial
Hydrogen pressure	120 kPa _{abs}	200 kPa _{abs}	low	<0.7%	high pressure beneficial
Air pressure	120 kPa _{abs}	200 kPa _{abs}	significant	<1.0%	low pressure beneficial
Hydrogen stoichiometry	1.1	1.5	low	<0.5%	low flow at low load and high flow at high load beneficial
Air stoichiometry	1.5	2.5	high	<3.2%	low flow at low load and high flow at high load beneficial

Abbildung 3: Parameter mit Einfluss auf die Stackeffizienz

Auf Systemebene (Brennstoffzellen- und Hybridsystem) wurde ein Teststand nach CompactRio-Logik sowie ein komplettes Hybridsystem aufgebaut (Abbildung 4). Dazu wurden unter anderem die benötigten Sensoren und die DC/DC-Wandler für das

Hybridsystem beschafft sowie das Hardwarekonzept des Hybridsystems mit Versorgungsleitungen, Datenerfassung und der benötigten Leistungselektronik erstellt. Zudem wurde die CAN-Bus-Kommunikation mit dem Teilsystemen und den DC/DC-Wandlern etabliert. Mit Hilfe des aufgebauten Systems wurden der entwickelte Betriebsalgorithmus des Brennstoffzellensystems, der Lastwechselalgorithmus und der Optimierungsalgorithmus auf Systemebene validiert, wozu eine CompactRio-Einheit genutzt wurde, welche für den Laborbetrieb eingesetzt wird. Die Validierung mit dem im Projekt entwickelten Steuerungsgerät war leider nicht möglich und aus diesem Grund konnte auch die Validierung des Überwachungsalgorithmus nicht auf Systemebene erfolgen, sondern wurde auf der Stackebene durchgeführt.

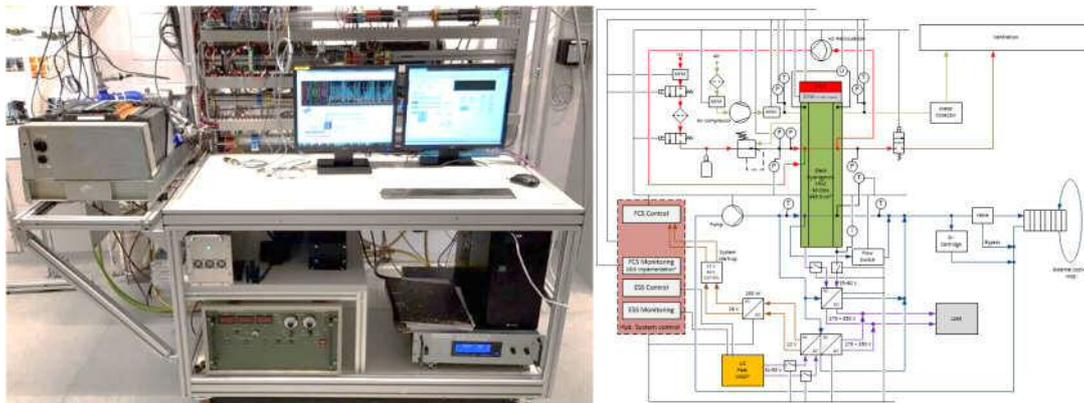


Abbildung 4: Hybridsystem-Teststand am DLR

B. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Das ZSW hat den Partnern PEMFC-Einzelzellen und Stacks (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) auf Basis eines stationären Designs zur Kraftwärmekopplung (ZSW BZ100) zur Verfügung gestellt. Unter anderem wurde für das DLR ein solcher Stack mit drei Platinen für lokale Stromdichtemessungen aufgebaut. Zudem wurden nötige Umbauten des Teststandes für schnellen Feuchte- und Druckwechsel umgesetzt.

Bei den Arbeiten zur Effizienzoptimierung wurde der bereits bestehende Nelder-Mead-Algorithmus in einen Teststand integriert um die Optimierung der Stack-Effizienz zu automatisieren und so den Algorithmus validieren (Abbildung 5). Die automatisierte Optimierung der Betriebsbedingungen über den implementierten Optimierungsalgorithmus (OOP) erfolgte alle 500 h. Dazwischen wurden dynamische Lastzyklen (FC-DLC) unter optimierten Bedingungen unter Verwendung der ebenfalls erarbeiteten Start/Stop-Verfahren verwendet. Durch die Optimierung erhöht sich die Leistung wesentlich und die Degradation sinkt deutlich um 25-30% (75 statt 105 $\mu\text{V/h}$ in ZSW BZ100 bei 1 A/cm^2). An einem automobilen Stack von PC wurden zudem die Betriebsbedingungen in verschiedenen Lastbereichen optimiert. Diese ändern sich je nach Lastbereich und kommen typischen Systembedingungen recht nahe, was die

Zuverlässigkeit der Optimierung nachweist. Durch die Optimierung erhöhte sich die Leistung unter Standardbedingungen deutlich was es ermöglicht den Stack in einem Bereich von 0-1,9 A/cm² anstatt der üblichen 0-1,5 A/cm² zu betreiben ohne dass die Zellspannungen unter 600 mV fallen. So konnte die Leistungsdichte des Stacks wesentlich erhöht werden.

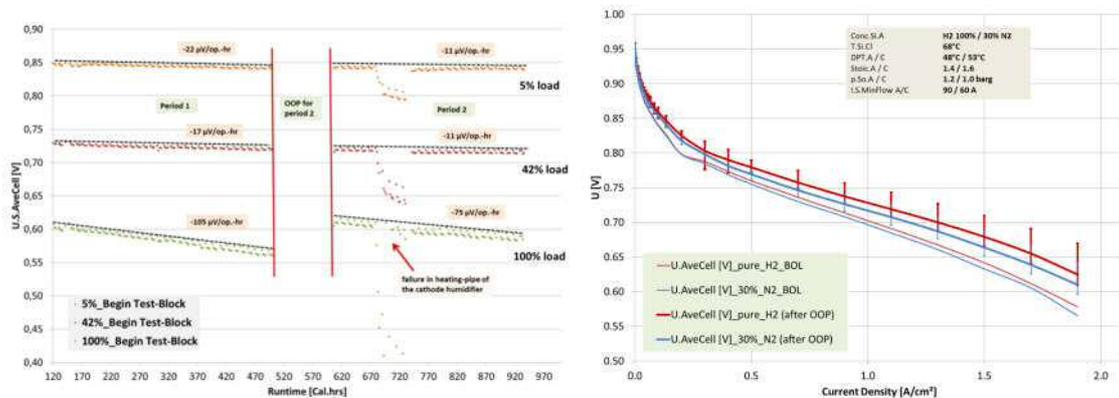


Abbildung 5: Ergebnisse des Optimierungsalgorithmus auf Stackebene

Erfahrungen bezüglich Start/Stop-Verfahren, welche in vorangehenden Projekten erlangt wurden, wurden vom ZSW zusammengefasst. Der Einfluss von verschiedenen, systemnahen Verfahren auf die Lebensdauer wurde an BZ100-Stacks untersucht. Bei diesen Untersuchungen wurden die wesentlichen lebensdauerbeanspruchenden Zustände bestimmt, die es zu vermeiden gilt und eine Start-Stop-Verfahren entwickelt, die eine möglichst hohe Lebensdauer garantiert (Abbildung 6). Diese umfasst eine schnelle H₂-Spülung der Anode vor Start, die Vermeidung von Luft an Kathode und Bereitstellung von H₂ an Anode während der Stopp-Phasen und schnelle Temperatur- und Feuchteverringern in Stopp-Phasen.

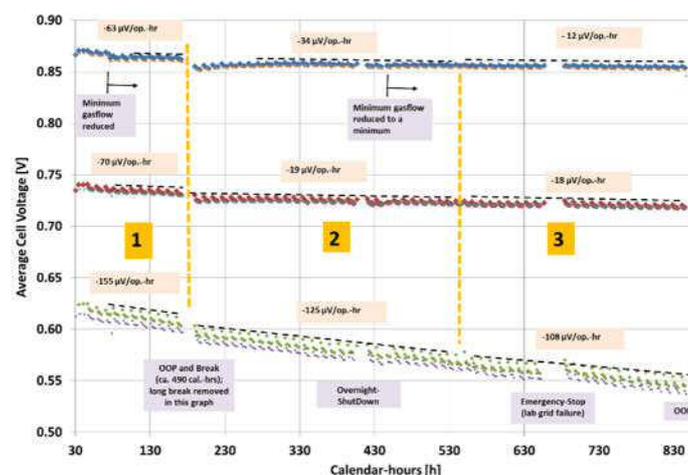


Abbildung 6: Untersuchung verschiedener Start/Stop-Verfahren

CO₂-Messungen an den Gasauslässen der PEMFC-Stacks wurden validiert, um die CO₂-Entwicklung als Indikator für fehlerhafte Betriebsbedingungen zu untersuchen (Abbildung 7). Es konnte gezeigt werden, dass der CO₂-Crossover von Kathode zur

Anode durch die Membran ein Indikator für Membranschädigungen sein kann. Zudem wurde nachgewiesen, dass in Lastzyklen vermehrt CO_2 in Phasen der Lastverringering auftritt. Dies ist vermutlich als Indikator für eine Schädigung des Katalysators durch Kohlenstoffkorrosion anwendbar. Diese Ergebnisse konnten zur Verbesserung der Betriebsstrategien mit langer Lebensdauer genutzt werden. Jedoch konnten diese nicht als mögliche Indikatoren auf das System übertragen werden, da die notwendigen, sehr sensitiven CO_2 -Sensoren zu teuer für den Systemeinsatz erscheinen.

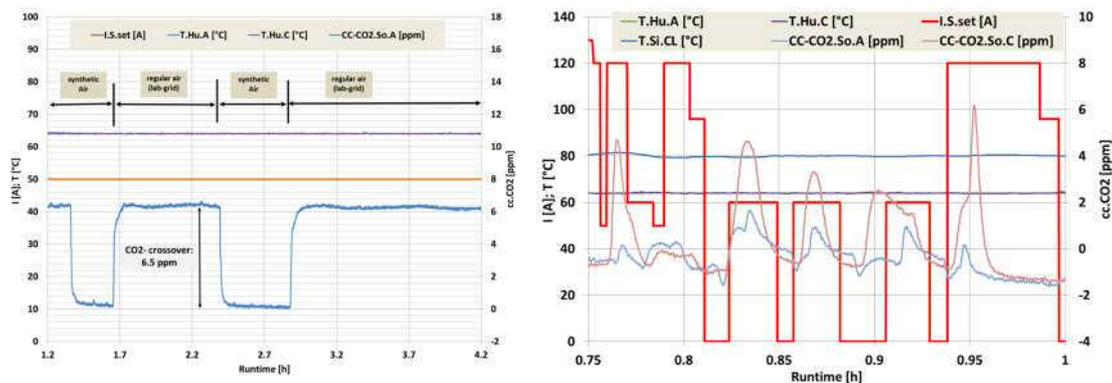


Abbildung 7: CO_2 -Messungen als Detektionsparameter

Zudem wurde mehrere Langzeittests umgesetzt, um die hauptsächlichen Stressfaktoren für lebensdauerreduzierende Betriebszustände zu identifizieren (Abbildung 8). Auch hier wurden dynamische Lastzyklen (FC-DLC) und die erarbeitete Start/Stop-Verfahren verwendet und der Einfluss von Feuchte, Druck, Temperatur und CO -Verunreinigungen untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass der entscheidende für die Lebensdauer der Stacks das Verhältnis der Gasfeuchten ist. Während die Anode mit sehr feuchtem Wasserstoff betrieben werden sollte (Taupunkt 75°C), kann die Kathode recht trocken mit einer Luft geringer Feuchte betrieben werden (Taupunkt 30°C).

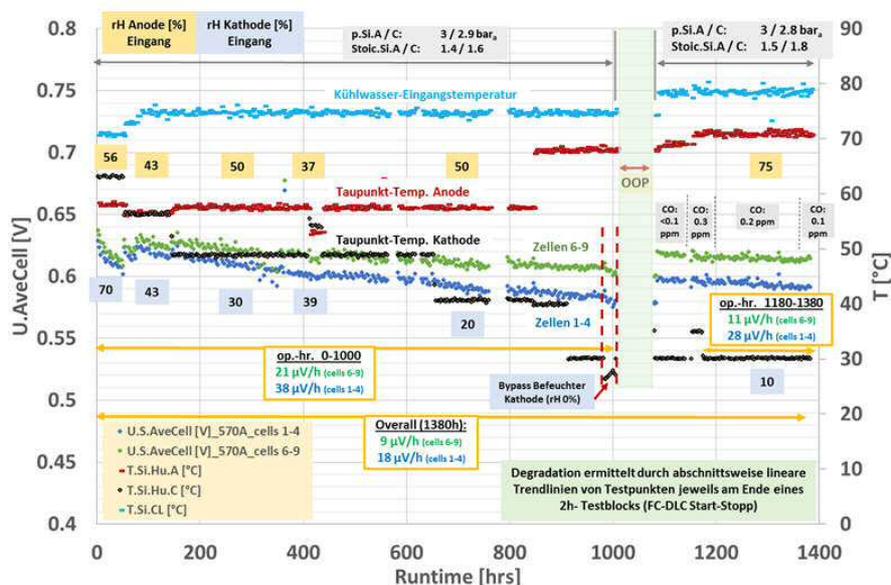


Abbildung 8: Langzeittest zur Untersuchung von Stressfaktoren

C. PowerCell Deutschland GmbH (PC)

PC hat den Partnern PEMFC-Stacks auf Basis eines automobilen Designs (PowerCell S3 Stack) inklusive der benötigten Daten- und Sicherheitsblatt zur Verfügung gestellt. Dazu hat PC die benötigten Materialien für den Aufbau der Stacks beschafft und die benötigten Ressourcen für den Aufbau der Stacks bereitgestellt. Auch ein Medienversorgungsmodul wurde von PC bereitgestellt, um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu gewährleisten. Die entsprechenden Stacks würden für das DLR und das ZSW bereitgestellt und nach Bedarf erneuert. Zudem wurde eine Platine zur lokalen Stromdichtemessung am ZSW in einen Stack integriert. Die Adapter zur Messung der Einzelzellspannung wurden modifiziert um lokale Spannungsmessung am DLR (H2 Einlass und Auslass) zu ermöglichen (Abbildung 9).

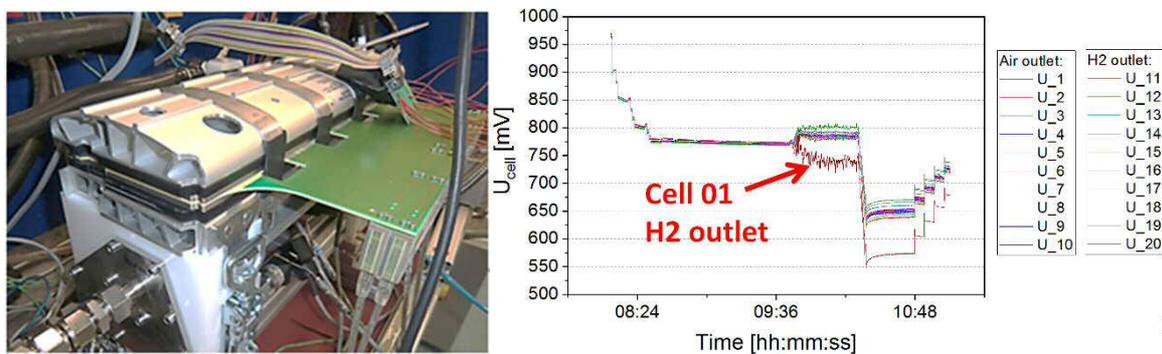


Abbildung 9: PowerCell S3 Stack

Zudem hat PC die spezifischen Kenntnisse auf dem Gebiet der PEMFC-Stacks und -Systeme genutzt und alle wichtigen Degradationsursachen in den Start/Stop-Phasen eines PEMFC-Systems zusammengefasst und zur Verfügung gestellt. Die Entwicklung der Start/Stop-Verfahren wurde des Weiteren beratend begleitet, um die Anforderungen im späteren System auch erfüllen zu können.

D. Gdansk University of Technology (GUT)

Der Hauptfokus der GUT lag in der Übertragung der dynamischen, elektrochemischen Impedanzspektroskopie (DEIS) auf die Brennstoffzellenanwendung. Zu diesem Zweck wurden verschiedenste Messungen in Einzelzellen und Stacks mit stationärem Design (ZSW BZ100) durchgeführt. Diese dienten sowohl zur Methodenentwicklung in AP3 als auch für Parametertests, um die Sensitivität verschiedener Parameter auf die Brennstoffzelle und auf die Messgrößen der DEIS-Diagnostik zu bestimmen. Hierzu wurde zunächst ein Brennstoffzellenteststand aufgebaut sowie die DEIS-Hardware an die neuen Anforderungen angepasst. Dabei erfolgten Validierung und Optimierung der DEIS-Methode zunächst an Einzelzellen um die Möglichkeit schneller Messungen zu demonstrieren. So wurde beispielsweise der Einfluss der Luftfeuchte auf das Impedanzsignal einer Einzelzelle untersucht und die Übereinstimmung klassischer Impedanzmessungen mit DEIS nachgewiesen (Abbildung 10).

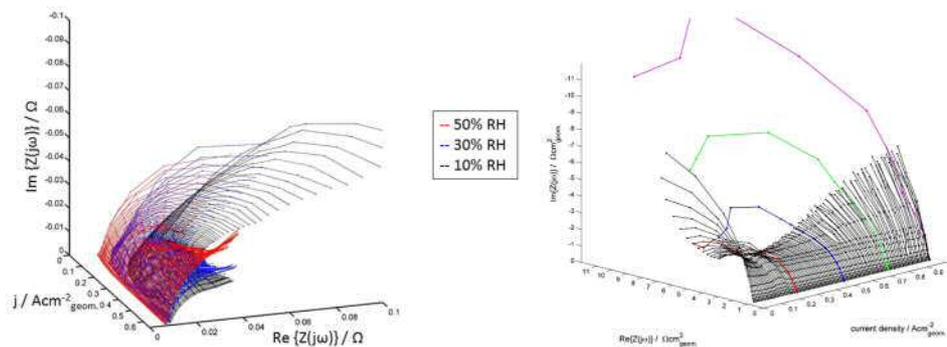
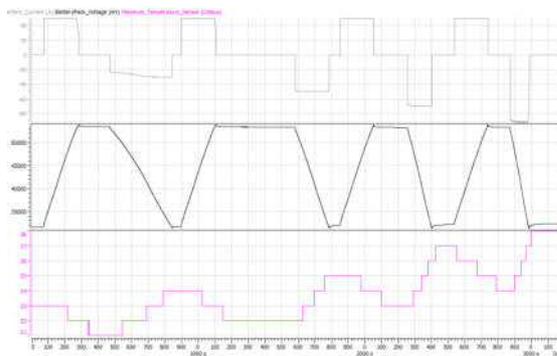


Abbildung 10: DEIS-Untersuchungen an Einzelzellen

E. Impact Clean Power Technology S. A. (ICPT)

ICPT hatte ein erstes Konzept der LiC-Einheit erstellt, um die Energiespeicheranforderungen im geplanten Hybridsystem zu erfüllen. Damit wurden zur Bestimmung von dynamischer Lastwechselfähigkeit der LiC-Einheit Lastwechseltest mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt und basierend auf den Ergebnissen das mechanische Design des LiC-Modules optimiert. Dazu gehörten Verbesserungen bezüglich der Sicherheit der eingesetzten Zellen und deren Kühlung durch Luftfluss über ausreichende Kühlflächen sowie die Verbesserung der Genauigkeit der Strommessung und der eingesetzten Hauptsicherung. Die optimierte Version des Moduls zeigt eine sehr gute Speichereffizienz und durch weitere Tests wurden die Spezifikationen des Moduls inklusive der Lastkapazität des Moduls bestimmt (Abbildung 11).



Parameter name	Value	Unit	Remark
Capacity	2	Ah	Depends on charge current
Operating voltage	53,9	V	Max
	31,5		Min
Energy	6600	F	Nominal (2 x 3300F)
Discharge current	600	A	Max (10s)
	300		Nominal
Discharge power	18,0	kW	Max (10s)
	14,7		Nominal
Charge current	300	A	Max (10s)
	200		Nominal
Charge power	18,0	kW	Max (10s)
	14,7		Nominal

Abbildung 11: Lastwechseltest am LiC-Modul

ICPT hat auch verschiedene Lade/Entlade-Tests zwischen 10 und 200 A durchgeführt. So konnte die LiC-Charakteristik inklusive Lade/Entlade-Kurven für verschiedene Lade/Entladeströme und in Abhängigkeit vom Ladezustand (SoC) erstellt werden. So war es möglich eine Schnellademöglichkeit für das LiC-Modul zu entwickeln, durch die keine Kapazität verloren geht. Zudem wurden zur Bestimmung der dynamischen Lastzyklenbeständigkeit Lebensdauertests durchgeführt, ohne eine merkliche Abnahme der Speicherkapazität und -effizienz feststellen zu können (Abbildung 12).

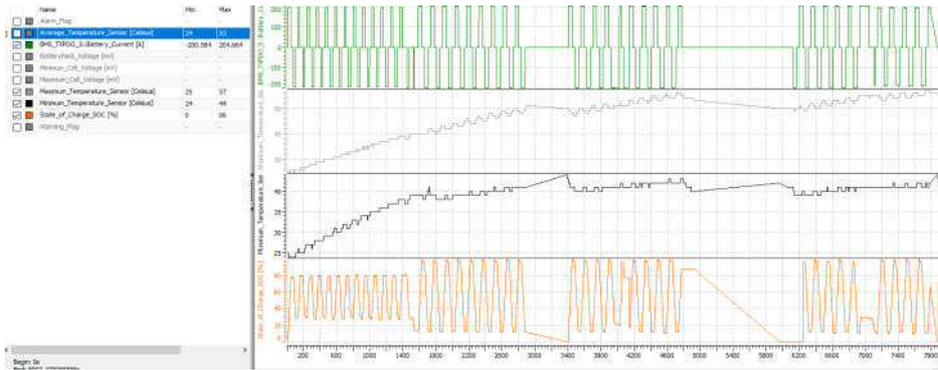


Abbildung 12: Lebensdauertest am LiC-Modul

2.1.3 AP3: Methodenentwicklung zur Überwachung und Optimierung der Teilsysteme
 AP3 betrifft die Überwachung und die Optimierung der Teilsysteme und auch an diesem AP waren alle Partner beteiligt. Die Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele und der erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Ziele und Ergebnisse in AP3

Vorgegebenes Ziel	Erzielte Ergebnisse	Beteiligte Partner
Optimierungsalgorithmus für Brennstoffzellen-Effizienz	<ul style="list-style-type: none"> - Weiterentwicklung des Algorithmus und Integration von Pumpenverlusten - Beschleunigung um Faktor 4 - Übertragung auf Systemebene 	DLR, ZSW
Methodik zur Überwachung der Brennstoffzelle	<ul style="list-style-type: none"> - Identifikation der Schwachstellen aktueller Systeme - Nutzung lokaler Sensoren um fehlerhafte Zustände zu erkennen - Methodik um DEIS zur schnellen Fehlerüberwachung zu nutzen - Isolierung von Fehlerursachen (Austrocknung, Flutung, Verarmung) - Einbindung in Betriebsstrategie 	DLR, PC, GUT
Lokale Sensoren mit verbesserter Sensitivität	<ul style="list-style-type: none"> - Verständnis auftretender Fehler verbessert - Kombination von Impedanz und lokaler Sensorik zur Erhöhung der Sensitivität 	DLR
Entwicklung von Kontrollstrategien für erhöhte Lebensdauer basierend auf verbessertem Verständnis der Degradationsvorgänge	<ul style="list-style-type: none"> - Erarbeitung von Start/Stop- Algorithmen - Simulation verschiedener Lastzyklen aus verschiedenen Anwendungen - Verringerte Dynamik des Brennstoffzellensystems und schnelle Reaktion durch LiC-Modul - Entwicklung der Methodik zur Lastverteilung zwischen den Teilsystemen 	DLR, ZSW, PC, ICPT
Methodik zur LiC-Überwachung	<ul style="list-style-type: none"> - Definition von Warnung, Alarm und Fehlerereignissen - Festlegung der überwachten Parameter (Temperaturen, Spannungen, Ladungszustände) 	ICPT

	<ul style="list-style-type: none"> - Verbesserte Methode zur Bestimmung des Ladungszustandes 	
Optimierung der DEIS-Methode	<ul style="list-style-type: none"> - Anpassung der Anregungssignale an Brennstoffzellenanwendung - Software zur schnellen Datenerfassung von bis zu 60 Einzelzellen - Software zur Datenauswertung und Interpretation 	GUT

Somit wurden alle Ziele in diesem AP erreicht. In AP3 waren die folgenden Meilensteine vorgesehen, welche auch alle erfüllt wurden:

- M3.1: Optimierungsalgorithmus für Brennstoffzelleneffizienz validiert
- M3.2: Brennstoffzellenüberwachungsmethodik spezifiziert (lokale Sensoren und DEIS)
- M3.3: LiC-Überwachungsmethodik spezifiziert
- M3.4: Steuerungsmethodik für erhöhte Brennstoffzellen-Lebensdauer definiert (Last- und Start/Stop-Zyklen)

Im Folgenden werden die Aufgaben und erzielten Ergebnisse der einzelnen deutschen Teilprojekte in diesem AP beschrieben.

A. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Die Effizienzberechnung zur Optimierung der Betriebsweise der Brennstoffzelle wurde weiterentwickelt und die Verluste durch die Luftkompression berücksichtigt. Der Einfluss dieser Veränderungen wurde systematisch untersucht und eine einheitliche Definition bei allen Partnern festgelegt. Zudem wurden die Schnittstellen im System definiert, um die Übertragung ins Hybridsystem zu ermöglichen.

Bei der Methodik zur Überwachung der Brennstoffzelle wurde es durch Nutzung lokaler Sensoren und der Kombination mit Impedanzmessungen möglich, fehlerhafte Zustände zu erkennen und zu isolieren. Bei der Erstellung der Methodik und der Einbindung in die Betriebsstrategie wurden in Zusammenarbeit mit ZSW und PC die zu überwachenden Parameter im System festgelegt und Gegenmaßnahmen im Systembetrieb identifiziert um fehlerhafte Betriebszustände zu vermeiden (Abbildung 13).

Fault	Location	Fault cause	Monitoring	Counter action	Control action
Hydrogen starvation	Anode	Insufficient hydrogen supply	<ul style="list-style-type: none"> • CVM drops and CVM instable • Significant increase in CVM spread • Pressure decrease in H₂ loop • Increase of anode impedance (polarization and diffusion) 	<ul style="list-style-type: none"> • Increase hydrogen flow • Increase hydrogen concentration 	<ul style="list-style-type: none"> • Increase input power of hydrogen recirculation pump • Higher purge frequency and/or longer purges
Anode flooding	Anode	Water accumulation in anodic flow field	<ul style="list-style-type: none"> • Increased pressure drop from anode inlet to anode outlet • CVM oscillation • Increase of anode impedance (diffusion) 	<ul style="list-style-type: none"> • Remove water by short increase of hydrogen flow • Lower hydrogen inlet humidity 	<ul style="list-style-type: none"> • Higher purge frequency and/or longer purges • Decrease hydrogen recirculation rate (lower humidification)

Abbildung 13: Erarbeitung der Überwachungsparameter für das Brennstoffzellensystem

Zudem wurde für das PEMFC-System die Überwachungsstrategie und die Fehlererkennung entwickelt und Zustandsdiagramme erstellt, auf denen der Betriebsalgorithmus basiert. Die Hybridisierungsstrategie und das Betriebskonzept wurden aus PEMFC-Sicht simulativ erarbeitet, um eine längere Lebensdauer des PEMFC-Stacks zu erreichen. Zusammen mit ICPT und PC wurden diese für die Lastaufteilung zwischen LiC und PEMFC entwickelt. Hierzu wurden verschiedene, repräsentative Lastzyklen betrachtet. Diese umfassten den NEDC (New European Driving Cycle), den WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles test procedure) und einen Lastzyklus einer Straßenbahn, welches von ICPT zur Verfügung gestellt wurde. Ziel war eine Hybridisierungsstrategie, welche den PEMFC-Stack schont und möglichst wenig dynamisch belastet, während die LiC-Einheit den Großteil der schnellen Lastwechsel abdeckt. So wurde ein Betriebsfenster für die verschiedenen Parameter im Systembetrieb identifiziert, um eine möglichst hohe Effizienz und eine möglichst lange Lebensdauer zu ermöglichen (Abbildung 14). Zu diesem Ziel wurden auch die entwickelten Start-Stopp-Prozeduren in Algorithmen zur Implementierung in den Kontrollalgorithmus überführt.

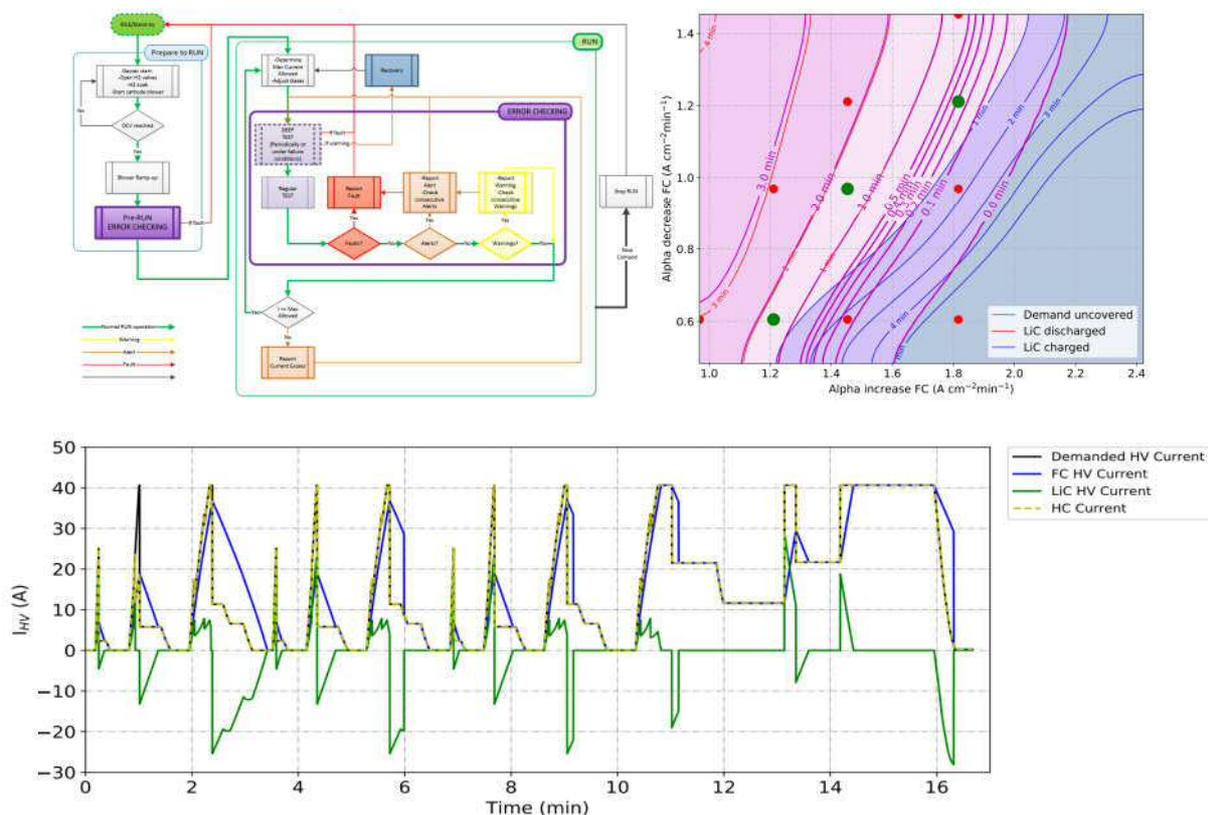


Abbildung 14: Hybridisierungsstrategie in COALA

B. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Das ZSW hat sich in AP3 mit der Erweiterung des Optimierungsalgorithmus (OOP) um nicht zu vermeidende Kompressionsverluste auf der Luftseite (Kathode) beschäftigt (Abbildung 15). Diese wurden bisher nur unzureichend berücksichtigt, beeinflussen die Effizienzoptimierung aber deutlich. Hierzu wurden Daten von typischen Kompressoren aus automobilen Anwendungen betrachtet und deren Effizienzen in der Berechnung der Gesamteffizienz berücksichtigt. Zudem konnte gezeigt werden, dass der Optimierungsalgorithmus auch deutlich schneller als bisher ausgeführt werden kann. Dieser erreicht auch die optimalen Betriebsparameter, wenn nicht in jedem Betriebspunkt des Algorithmus auf eine vollständige Systemstabilisierung gewartet wird. So konnte die Dauer des OOP um den Faktor 4 verringert werden.

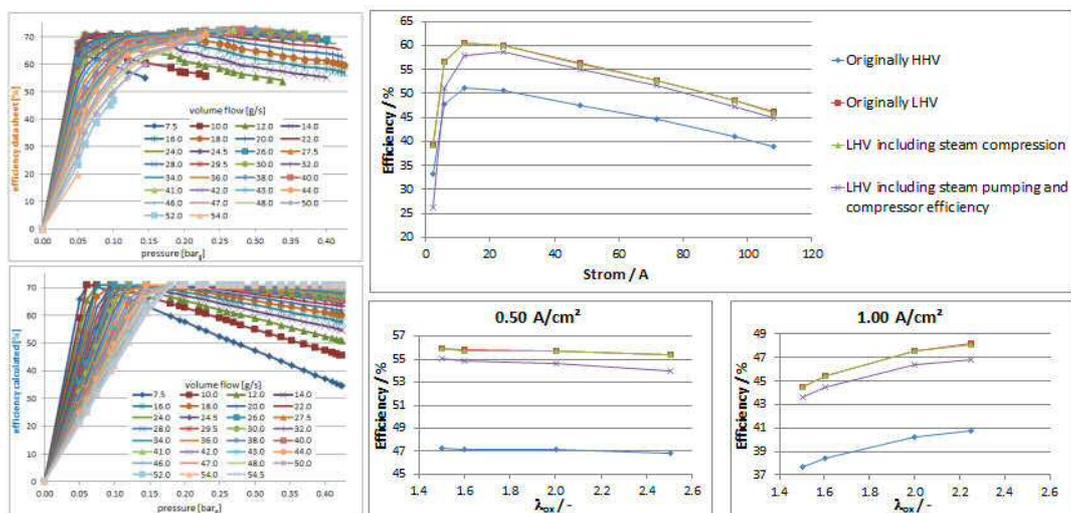


Abbildung 15: Integration der Luftkompressionsverluste in Effizienzberechnung

Zudem wurde gemeinsam mit dem DLR die Übertragung des OOP auf die Systemebene erarbeitet. Die entsprechenden Betriebsparameter und die Möglichkeiten zur Effizienz- und Lebensdauersteigerung wurden identifiziert und die notwendige Algorithmenentwicklung erfolgte dann in AP4. Basierend auf dem OOP wurde zudem verbesserte Einlaufprozedur für neuwertige PC-Stack erarbeitet.

Bei der Entwicklung der Kontrollstrategie für das Brennstoffzellensystem hat das ZSW die Start/Stop-Verfahren und die benötigten Algorithmen mitentwickelt. Die Verfahren wurden zunächst für den Stacklevel definiert (Abbildung 16) und dann auf die Anwendung im System übertragen. Beispielhaft ist im Folgenden die Prozedur für lange Stopp-Phasen des PEMFC-Stacks gezeigt.

6 Shut-Down Test Procedure for Long Stop

(stack is cooled down)

- Reduce stack load to a load according to 0.1 A/cm^2 using a load-ramp of $0.1 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ and set reactant flows corresponding to minimum values, e.g. 0.2 A/cm^2 ; stoichiometries according to regular operating conditions (e.g., 1.5 / 2.0);
In parallel: Reduce simultaneously reactant pressures to ambient; keep the maximum differential pressure between anode and cathode
- Set load to 0 A and disconnect load (the test bench should be equipped with a shut-off load-relays)
- Stop air-flow, maintain minimum hydrogen-flow until all cell voltages reached a level below 0.05 V (approx. 1 – 3 min)
- Stop hydrogen flow
- Close stack inlet valves on anode and cathode (to avoid unintentional gas flows from the test bench to the stack)
- Set coolant temperature to ambient temperature and cool down as fast as possible (e.g. 20°C)
- When the stack has reached ambient temperature conditions, close also the outlet valve of the anode compartment, leave the cathode outlet valve open.
- Wait fixed time for long stop (e.g., 4 h)

Abbildung 16: Prozedur für lange Stopp-Phasen des Brennstoffzellensystems

Die wesentlichen Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei schnellen Lastwechseln muss auf eine Verarmung an Wasserstoff und Luft geachtet werden.
- Steile Lastrampen mit Lastverringern sollten möglichst vermieden werden.
- Austrocknungseffekte bei geringer Last sollten durch geringen Gasfluss vermeiden werden.
- Schließen von Ventilen am Stackeingang während der Stopp-Phasen verringert die Degradation
- Hohe anfängliche Gasströme während des Startvorgangs gewährleisten.
- In Stopp-Phasen Zellenspannung am besten durch Wasserstoff-Cross-Over verringern und nicht durch kleine Ströme.
- Eine schrittweise Erhöhung der Kathodenstöchiometrie über die Lebensdauer kann die Belastung erheblich reduzieren und die Effizienz steigern.

C. PowerCell Deutschland GmbH (PC)

Zusammen mit dem ZSW wurden von PC die Prozeduren für kurze und lange Stopp-Phasen sowie Neustart und Erholungsphasen entwickelt und überarbeitet, um Prozeduren zu gewährleisten, die möglichst ähnlich zum späteren Systembetrieb sind und so leicht übertragen werden können. Dazu wurden wichtige Degradationsquellen während der Start/Stopp-Phasen zusammengefasst und eine Strategie erarbeitet um diese zu vermeiden (Abbildung 17).

STARTUP

- Fast release of H₂ to minimize the time H₂/air is present on anode
- Anode N₂ purge if applicable
 - Note: Not feasible in most applications
- Low stack temperature and low-humidity conditions during H₂ intro for slow reaction kinetics (= no stack preheating, dry-out in every SD?)
- Ensure high H₂ concentration before drawing high current
- (Small) external load during startup?
 - Note: Avoiding local H₂ starvation may be a challenge
- Introducing H₂ before air in the stack to avoid unnecessary air/air situation in case of stack still being in "H₂ soak" state?

SHUTDOWN

- Low stack temperature for slow reaction kinetics (cool down fast after SD)
- Closing cathode with valves to prevent O₂ diffusion to anode (and prevent impurities from entering cathode)
 - Note: Occasional air soaks needed on anode to remove CO, but not in every SD
- Ensuring enough H₂ on anode to allow cathode "H₂ soaking" (buffer volume or H₂ priming after SD)
- Drawing small current to consume oxygen from cathode (draw down CV and deplete oxygen)
 - Note: Sufficient H₂ on anode has to be guaranteed

Abbildung 17: Strategie zur Vermeidung von Degradation in Start/Stop-Phasen

Des Weiteren wurde die Entwicklung der Überwachungsstrategie, der Fehlererkennung und des Zustandsdiagramms beratend begleitet. Dazu wurden Anforderungen an Fehlererkennungsmodi im Brennstoffzellenüberwachungssystem definiert und Schwachstellen in derzeit erhältlichen Systemen aufgewiesen. Durch die Bewertung der Überwachungsmethode hinsichtlich der Anwendbarkeit in kommerziellen Systemen konnten die Parameter zur Erkennung von fehlerhaften Zuständen genau definiert werden und gemeinsam mit dem DLR und dem ZSW die benötigten Gegenmaßnahmen erarbeitet werden (Abbildung 18).

Fault	Location	Fault cause	Monitoring	Counter action	Control action
Hydrogen starvation	Anode	Insufficient hydrogen supply	<ul style="list-style-type: none"> • CVM drops • Pressure decrease in H₂ loop • Increase of anode impedance (polarization and diffusion) 	<ul style="list-style-type: none"> • Increase hydrogen flow 	<ul style="list-style-type: none"> • Increase input power of hydrogen recirculation pump
Anode flooding	Anode	Water accumulation in anodic flow field	<ul style="list-style-type: none"> • Increased pressure drop from anode inlet to anode outlet • Increase of anode impedance (diffusion) 	<ul style="list-style-type: none"> • Remove water by short increase of hydrogen flow • Lower hydrogen inlet humidity 	<ul style="list-style-type: none"> • Higher purge frequency and/or longer purges • Decrease hydrogen recirculation rate (lower humidification)
Air starvation	Cathode	Insufficient air supply	<ul style="list-style-type: none"> • CVM drop • Pressure drop from air inlet to air outlet decreases • Pressure in air line decreases • Increase of cathode impedance (polarization and diffusion) 	<ul style="list-style-type: none"> • Increase of air flow • Increase of input power to blower/ compressor 	<ul style="list-style-type: none"> • Increase of input power to blower/ compressor
Cathode flooding	Cathode	Water accumulation in cathodic flow field	<ul style="list-style-type: none"> • CVM drop • Pressure drop from air inlet to air outlet increases • Increase of cathode impedance (diffusion) 	<ul style="list-style-type: none"> • Remove water by short increase of air flow • Lower air inlet humidity 	<ul style="list-style-type: none"> • Short increase of input power to blower/ compressor (water removal) • Decrease air humidity by lower bypass flow through gas-to-gas-humidifier
Membrane dry-out	Membrane	Insufficient water supply to membrane	<ul style="list-style-type: none"> • CVM drop • Increase of HFR 	<ul style="list-style-type: none"> • Increase gas inlet humidity • Lower gas flow if acceptable 	<ul style="list-style-type: none"> • Increase H₂ recirculation rate (increase humidity) • Increase air humidity by higher bypass flow through gas-to-gas-humidifier • Decrease input power to blower/ compressor if acceptable
Membrane damage	Membrane	Pinholes and cracks in membrane	<ul style="list-style-type: none"> • Fast OCV decrease without gas flow 	<ul style="list-style-type: none"> • Replace MEA 	<ul style="list-style-type: none"> • Warning "MEA fault"
Stack overheating	Stack	Insufficient stack cooling	<ul style="list-style-type: none"> • T sensor in cooling loop 	<ul style="list-style-type: none"> • Increase of cooling capacity 	<ul style="list-style-type: none"> • Increase of power input to coolant pump • Increase of power input to cooling fan

Abbildung 18: Detektionsparameter für Fehlermodi im Brennstoffzellensystem

D. Gdansk University of Technology (GUT)

Die Methodenentwicklung bei der Brennstoffzellenüberwachung mit Hilfe der DEIS-Messungen befasste sich zunächst mit der Anpassung der Messmethode. Hierzu musste das Anregungssignale (sinusförmige Überlagerung des Stroms) an Brennstoffzellenanwendung angepasst werden, um zuverlässige Messergebnisse zu erhalten. Nachdem diese Arbeiten an Einzelzellen abgeschlossen waren, konnte die Methode auf Brennstoffzellenstacks übertragen werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich die Methode sehr gut dazu eignet mehrere Zellen im Stack sehr schnell zu charakterisieren und fehlerhafte Betriebszustände zu identifizieren. Während eine klassische Impedanzspektroskopie hierzu bis zu 5 Minuten benötigt, können die gleichen Ergebnisse mit DEIS schon in etwa 1 Sekunde erreicht werden. So konnte gezeigt werden das fehlerhafte Betriebsbedingungen in einzelnen Zellen sehr schnell erkannt und von nicht betroffenen Zellen unterschieden werden konnten (Abbildung 19). Anschließend wurde eine Software zur schnellen Datenerfassung von bis zu 60 Einzelzellen entwickelt.

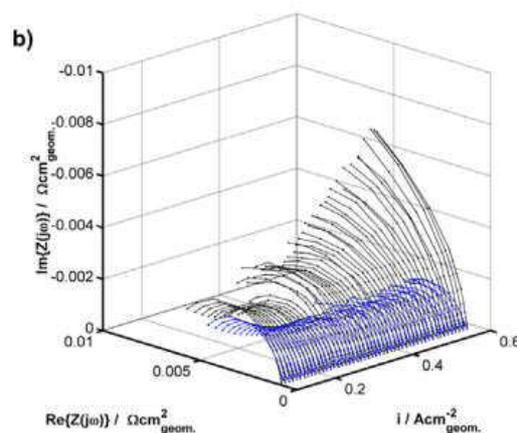


Abbildung 19: Impedanzmessungen an Zellen im kritischen (schwarz) und unkritischen Betriebszustand (blau)

Ein Algorithmus, basierend auf dem Nelder-Mead Algorithmus, wurde entwickelt, um die DEIS-Ergebnisse automatisiert zu analysieren (fitten), indem die physikochemische Interpretation anhand eines gewählten Ersatzschaltbildes erfolgt (Abbildung 20). So können verschiedene Parameter bestimmt werden, die es ermöglichen zwischen den verschiedenen Fehlermodi zu unterscheiden.

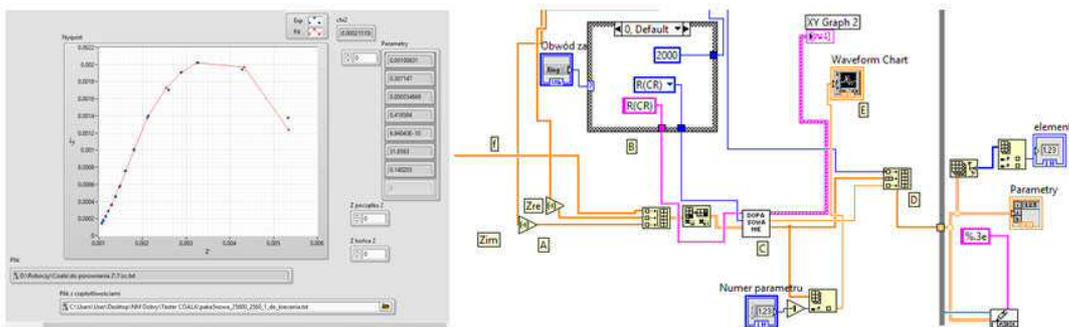


Abbildung 20: Software zur DEIS-Auswertung

Zudem wurde eine Überwachungsstrategie vorgeschlagen, welche auf Änderungen der DEIS-Parameter beruht (Abbildung 21). Damit ist es möglich zwischen Membran-Austrocknung, Luftarmut, Kathodenflutung oder einem Problem an der Anode zu unterscheiden und dies dem Controller mitzuteilen, um Gegenmaßnahmen einzuleiten. So konnte die Brennstoffzellenüberwachungsmethodik spezifiziert werden.

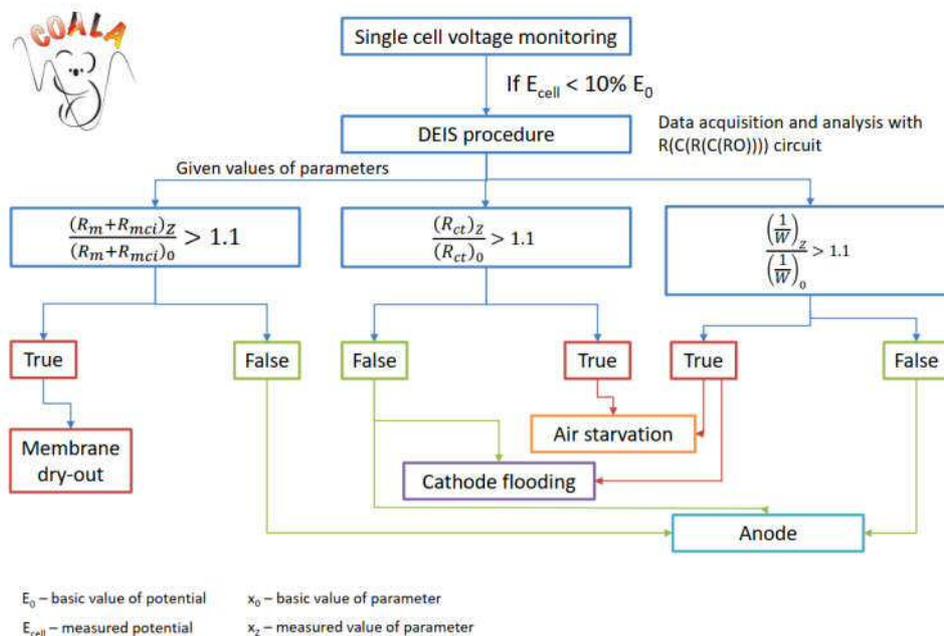


Abbildung 21: Brennstoffzellenüberwachungsstrategie

E. Impact Clean Power Technology S. A. (ICPT)

In AP3 hat ICPT vor allem die Methodik zur LiC-Überwachung erarbeitet. Hierzu wurden in Abstimmung mit dem Zellhersteller Warnungen, Alarme und Fehlerereignissen verschiedener zu überwachender Parameter definiert (Temperaturen, Spannungen, Ladungszustände usw.). Die Sicherheitssoftware wurde zudem getestet und ihre Effektivität gegen Überlastung und Tiefenentladung wurde nachgewiesen. Die entsprechenden Signale wurden in das CAN-Protokoll zur Kommunikation mit dem Hybridsystemkontroller integriert (Abbildung 22). Somit wurde die Methodik zur LiC-Überwachung genau spezifiziert um den Überwachungsalgorithmus in AP 4 zu erstellen.

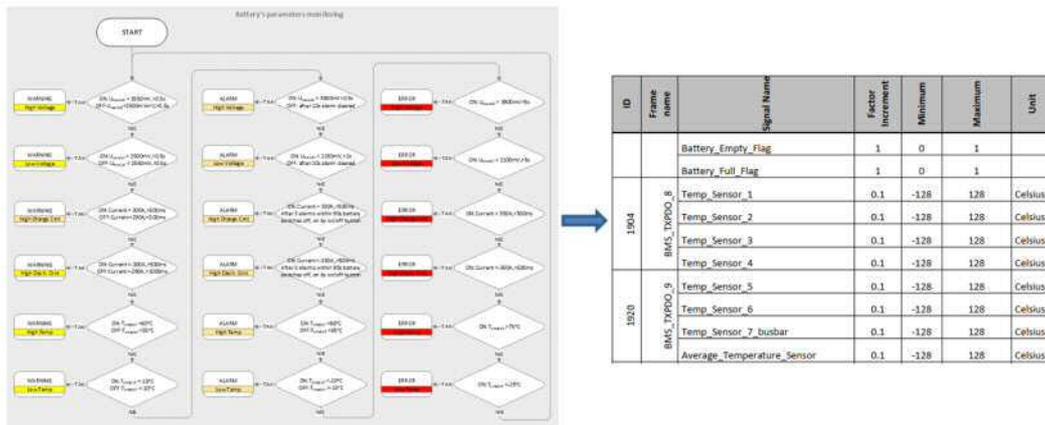


Abbildung 22: LiC-Überwachungsstrategie

Die SoC-Erkennung wurde verbessert indem eine automatische Kalibrierung des Ladezustands implementiert wurde. Der Algorithmus basiert auf der Spannung und dem Strom der LiC-Einheit und berücksichtigt das Relaxationsverhalten der Kondensatoren. Die Präzision der Coulombzählung wurde hierzu überarbeitet und das entstandene Kapazitätssignal wurde im CAN-Bus-Signal integriert. Alle Leistungs- und Sicherheitsfunktionen der LiC-Einheit wurden getestet und erweiterte Temperaturtests wurden abgeschlossen.

Die finalen Kenndaten der LiC-Einheit wurden noch mit dem Stand der Technik verglichen (Abbildung 23). Hierzu wurden gemeinsam mit dem DLR die Vorteile der Hybridisierung von PEMFC-Systemen mit der LiC-Einheit im Vergleich mit Lithium-Ionen-Batterien herausgestellt. Nur die LTO-Technologie (Lithium-Titanat-Oxid) kann mit der entwickelten LiC-Einheit in Bezug auf hochdynamisches Laden und Entladen konkurrieren, was entscheidend ist, um die Belastung des PEMFC-Stacks zu minimieren und so die Effizienz und Lebensdauer zu maximieren. Die LTO-Technologie führt jedoch zu einem 3,5-fach höheren Gewicht und einem 2-fach höheren Volumen. Dieser Vergleich zeigt deutlich die äußerst vorteilhafte Verwendung der entwickelten LiC-Einheit für die Hybridisierung mit PEMFC-Systemen.

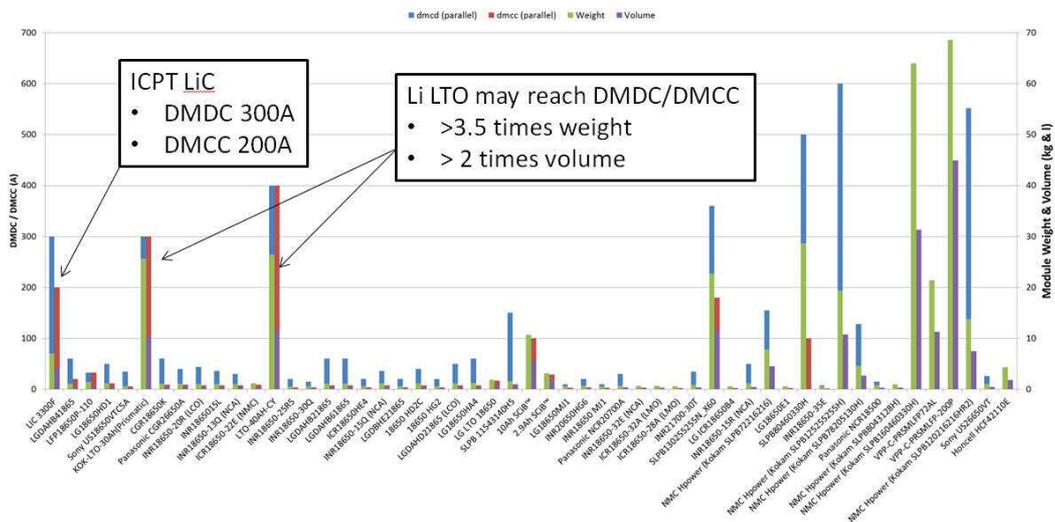


Abbildung 23: Vergleich des LiC-Moduls zu Batterietechnologien

Des Weiteren hat ICPT bei der Entwicklung der verschiedenen Betriebsmodi der DC/DC-Wandler, auch für den DEIS-Betrieb, seine Erfahrungen auf dem Gebiet der LiC- und Batterie-Module eingebracht. So wurde ein geeigneter Algorithmus zur Lastaufteilung zwischen den beiden Teilsystemen entwickelt, der die Lebensdauer maximieren soll. Für die Entwicklung der Kontrollstrategien hat ICPT verschiedene, reale Lastzyklen zur Verfügung gestellt und die Anforderungen und Betriebsmöglichkeiten von Seiten des LiC-Moduls festgelegt. Gemeinsam mit DLR, ZSW und PC wurde die Simulationsergebnisse aus den verschiedenen Lastzyklen bewertet und die bestmögliche Methodik zur Lastverteilung zwischen den Teilsystemen entwickelt. Diese verringerte Dynamik des Brennstoffzellensystems durch die schnelle Reaktion des LiC-Moduls und verbessert so Effizienz und Lebensdauer des Hybridsystems.

2.1.4 AP4: Entwicklung des Kontrollalgorithmus

AP4 beinhaltet die Entwicklung des Kontrollalgorithmus und wurde unter Kooperation aller Partner durchgeführt. Die Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele und der erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Ziele und Ergebnisse in AP4

Vorgegebenes Ziel	Erzielte Ergebnisse	Beteiligte Partner
Implementierung vom Optimierungsalgorithmus für Brennstoffzelleneffizienz	<ul style="list-style-type: none"> - Übertragung von Stack auf Systemebene - Berücksichtigung der wichtigsten Betriebsparameter - Implementierung in Kontrollalgorithmus - Validierung im System 	DLR, ZSW
DEIS-Implementierung	<ul style="list-style-type: none"> - Übertragung der Software zur Datenerfassung und Auswertung auf Systemebene - Algorithmus zur Isolierung von Fehlerzuständen in 60 Zellen - Validierung nur auf Stacklevel 	GUT
Entwicklung und Implementierung von LiC-Überwachungsalgorithmus in LiC-Managementsystem	<ul style="list-style-type: none"> - Überführung von Kontrollstrategie in Überwachungsalgorithmus - LiC-Managementsystem als Platine gefertigt - Algorithmen in Steuerung implementiert 	ICPT
Entwicklung und Implementierung von Brennstoffzellenüberwachungsalgorithmus in Brennstoffzellen-Managementsystem	<ul style="list-style-type: none"> - Fehlende Implementierung aufgrund fehlender Controllerhardware - Getrennte Validierung von Überwachungsalgorithmus und Managementsystem 	DLR, GUT

Entwicklung von Kontrollalgorithmus für Hybridsystem	<ul style="list-style-type: none"> - Kontrollalgorithmus für alle Systemkomponenten erstellt - Zustandsdiagramme in Kontrollalgorithmus überführt - Implementierung der Teilsystemsteuerung in Hybridsystemsteuerung - Validierung mit CompactRio-Einheit - Keine Validierung mit Kontrollerhardware aus COALA 	DLR, PC
---	---	---------

Aufgrund der fehlenden Kontrollerhardware aus COALA (siehe Kapitel 2.1.5) konnten einige Ziele in diesem AP nicht erreicht werden. Allerdings wurden in Absprache mit den Projektträgern Lösungen entwickelt, um die Gesamtziele des Projektes dennoch zu erreichen. Der entwickelte Überwachungsalgorithmus wurde in die DEIS-Software implementiert und von der GUT auf Stack-Ebene getestet. Profile, die unterschiedliche kritische Zustände simulieren, wurden durchgeführt und so gezeigt, dass diese kritischen Zustände vom Algorithmus korrekt erkannt werden. Die Hybridisierungsstrategie, die Lastverteilung und der Kontrollalgorithmus für das Hybridsystems wurden mit einem Labor-CompactRIO validiert. Nur die Kombination von Überwachungs- und Kontrollalgorithmus konnte im Vorhaben nicht umgesetzt werden.

Durch diese Strategie wurden in AP4 folgende Meilensteine erfüllt:

- M4.1: LiC-Managementsystem verfügbar
- M4.3: Kontrollalgorithmus für Hybridsystem verfügbar
- M4.4: Kontrollalgorithmus für Hybridsystem überarbeitet

Auch der Meilenstein „M4.2: Brennstoffzellen-Managementsystem verfügbar“ kann als abgeschlossen betrachtet werden, jedoch mussten hier Einschränkungen gemacht werden. Zwar stand, wie in Kapitel 2.1.5 beschrieben, die finale Kontrollerhardware nicht im Rahmen des Projektes zur Verfügung, aber die Algorithmen und die Methodik wurden basierend auf DEIS-Messungen erarbeitet und auf dem Stack-Level validiert.

Im Folgenden werden die Aufgaben und erzielten Ergebnisse der einzelnen deutschen Teilprojekte in diesem AP beschrieben.

A. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Die Regelalgorithmen für alle PEMFC-Systemkomponenten und die Übertragung auf steuerbare, physikalische Werte zur Verknüpfung mit dem Optimierungsalgorithmus wurden erarbeitet (Abbildung 24).

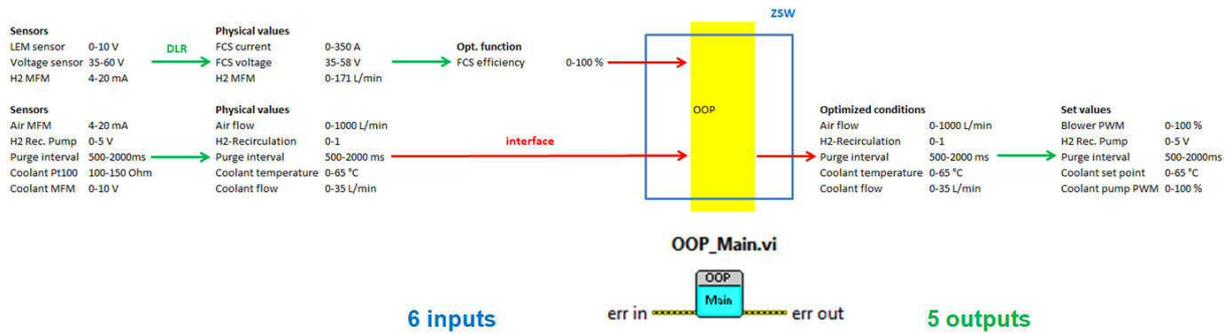
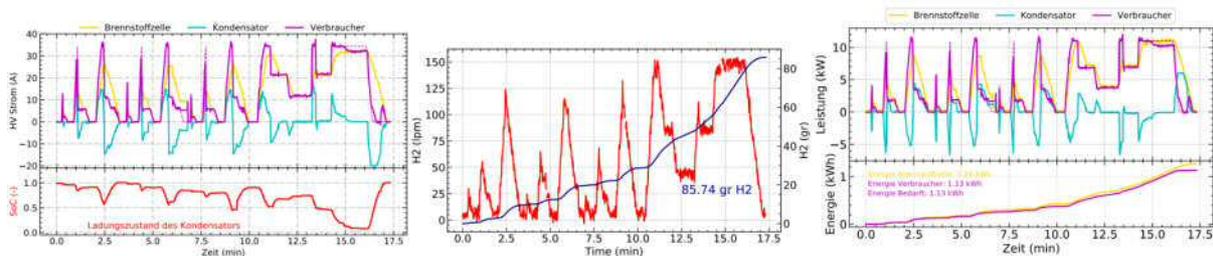


Abbildung 24: Optimierungsalgorithmus auf Systemebene

Durch die Optimierung der Betriebsparameter konnte auf Systemebene nachgewiesen werden, dass es mit der entwickelten Strategie möglich ist, die Systemeffizienz deutlich zu verbessern (Abbildung 25). Zu diesem Zweck wurden Messungen im Hybridsystem mit dem Lastzyklus nach dem NEDC durchgeführt, wobei die verschiedenen möglichen Betriebspunkte (siehe Kapitel 2.1.3) untersucht wurden. Hieraus ließen sich sehr vorteilhafte Ergebnisse ableiten:

- Durch die Optimierung kann die Brennstoffzelleneffizienz um bis zu 5 % verbessert werden, was durch einen verringerten Wasserstoffverbrauch und einer erhöhten Leistung der Brennstoffzelle erreicht wird. Dies zeigt, dass es der Optimierungsalgorithmus direkt ermöglicht Brennstoff im Hybridsystem einzusparen.
- Die höchste Effizienz wird bei einer geringen Dynamik im Brennstoffzellensystem erreicht. Dies zeigt wie vorteilhaft die Verwendung der entwickelten LiC-Einheit ist.
- Zudem sollten sich die erhöhte Effizienz und die verringerte Dynamik in der Brennstoffzelle positiv auf die Lebensdauer des Systems auswirken.



Betriebspunkt	Ohne Optimierung			Mit Optimierung		
	Wasserstoffverbrauch	Erzeugte Leistung	Effizienz	Wasserstoffverbrauch	Erzeugte Leistung	Effizienz
Geringe Dynamik (10-5)	90,82 g	1,23 kWh	40,6 %	85.74 g	1.26 kWh	44,1 %
Mittlere Dynamik (12-8)	87,83 g	1,16 kWh	39,6 %	86.34 g	1.23 kWh	42,7 %
Hohe Dynamik (15-10)	87,39 g	1,13 kWh	38,8 %	87.39 g	1.28 kWh	43,1 %

Abbildung 25: Validierung des Optimierungsalgorithmus auf Systemebene

Für den Kontrollalgorithmus hat das DLR das Zustandsdiagramm des PEMFC-Systems erstellt, wofür sowohl die einzelnen Betriebszustände "RUN" (normaler Betrieb), "Short/Stop" (Keine Leistungsabgabe, aber System läuft noch) und "OFF" (ausgeschaltetes System) definiert wurden als auch der Übergang zwischen den verschiedenen Betriebszuständen erarbeitet wurde (Abbildung 26). Darauf basierend wurde der Kontroll- und Steueralgorithmus des Hybridsystems mit Implementierung der Algorithmen der Teilsysteme entwickelt.

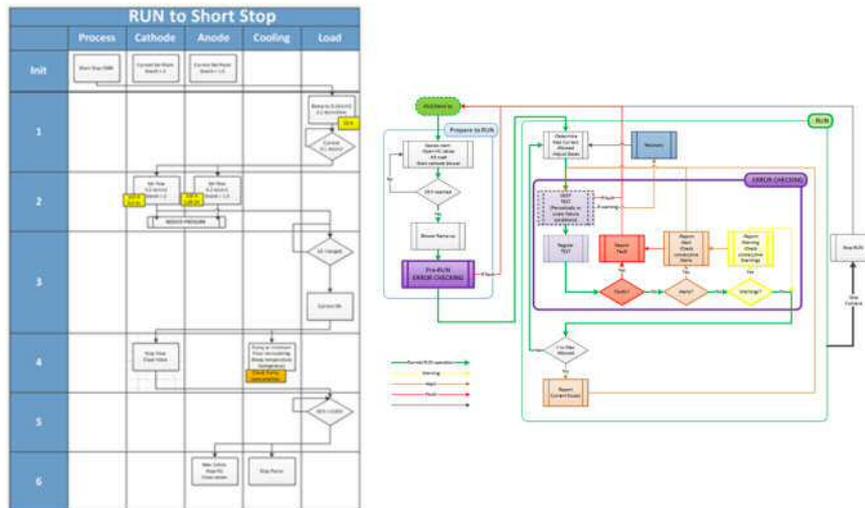


Abbildung 26: Zustandsdiagramm für Brennstoffzellensystem

Das so entwickelte Brennstoffzellen-Managementsystem sowie die Hybridsystemsteuerung basiert auf einem Labor-CompactRIO und wurde in AP5 (Kapitel 2.1.5) getrennt vom Überwachungsalgorithmus validiert

B. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Der Algorithmus zur Optimierung der Systemeffizienz wurde nach Vorgaben des DLR am ZSW erarbeitet (Abbildung 27). Er beruht auf dem OOP-Algorithmus auf Stack-Ebene und wurde an die zu optimierenden Parameter sowie deren Sensitivität angepasst. Zudem konnte die Effizienzberechnung vereinfacht werden, da diese im System im Wesentlichen auf der verbrauchten Wasserstoffmenge und der elektrischen Systemleistung beruht. In mehreren Iterationsschleifen wurde der Algorithmus erstellt und zur Integration dem DLR zur Verfügung gestellt.

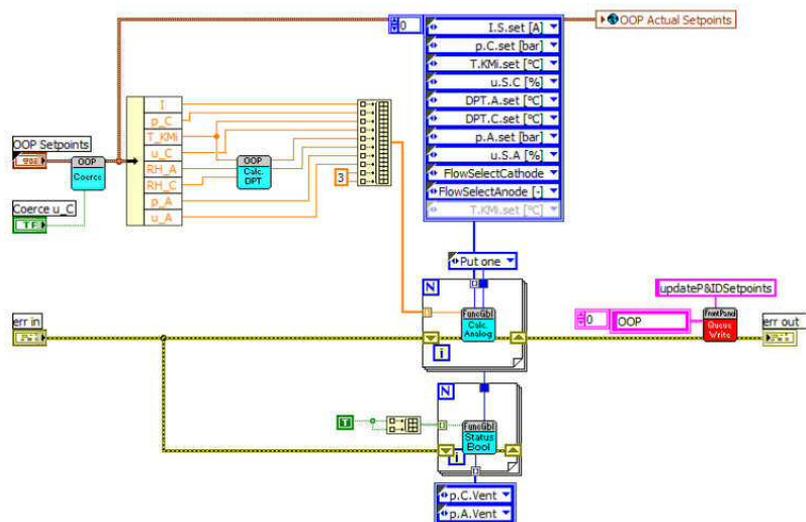


Abbildung 27: Optimierungsalgorithmus für die Systemebene

C. PowerCell Deutschland GmbH (PC)

Bei der Entwicklung des Kontrollalgorithmus hat PC die Spezifikationen und die Anforderungen des PEMFC-Teilsystems und des Hybridsystems bereitgestellt. Dies umfasste die Spezifikationen zur generellen PEMFC-Systemdynamik sowie der Dynamik des Luftkompressors im Besonderen. Zudem wurde bei der Einrichtung und der Steuerung des Hybridsystems sowie der Erstellung der Strategien zur Vermeidung und zur Überwindung von Degradationseffekten auf Systemebene unterstützt.

Bei der Entwicklung der Hybridisierungsstrategie wurden Datenblätter üblicher Systemkomponenten bereitgestellt und die Lastwechselverfahren zwischen PEMFC und LiC zusammen mit ICPT und DLR erarbeitet.

Zudem hat sich PC bei der Erstellung des Start/Stop-Algorithmus beteiligt, um eine geringe geringere Degradation und eine hohe Lebensdauer zu ermöglichen. Hierbei wurden die Prozeduren für lange und kurze Stopps sowie für Neustart und Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit an die Anforderungen im System und an die Anforderung des Kontrollalgorithmus angepasst. Es wurden gemeinsam mit dem ZSW auch generelle Richtlinien zur Minimierung der Degradation von PEMFC-Stacks zusammengefasst.

Schließlich wurden noch wichtige Hinweise zur Methodik bei der Hybridsystemsteuerung und dem Brennstoffzellenmanagementsystem gegeben, um die Lebensdauer des PEMFC-Stacks zu erhöhen.

D. Gdansk University of Technology (GUT)

Um die DEIS-Implementierung in den Kontrollalgorithmus umzusetzen, wurde die entwickelte Software zur Datenerfassung und Auswertung auf die Systemebene übertragen sowie der Algorithmus zur Isolierung von Fehlerzuständen auf 60 Zellen erweitert (Abbildung 28). Dabei stellte sich heraus, dass v.a. die Auswertung der Messdaten eine hohe Anforderung an die Prozessorleitung des Controllers stellt und unter gewissen Umständen die Geschwindigkeit der Auswertung bestimmt. Es wurden schnelle LabView-basierte Algorithmen entwickelt, um diese Analyse auch in 60 Zellen umsetzen zu können. So war es möglich den Algorithmus auf die Implementierung in die Controllerhardware vorzubereiten, um die Validierung auf Systemebene durchzuführen.

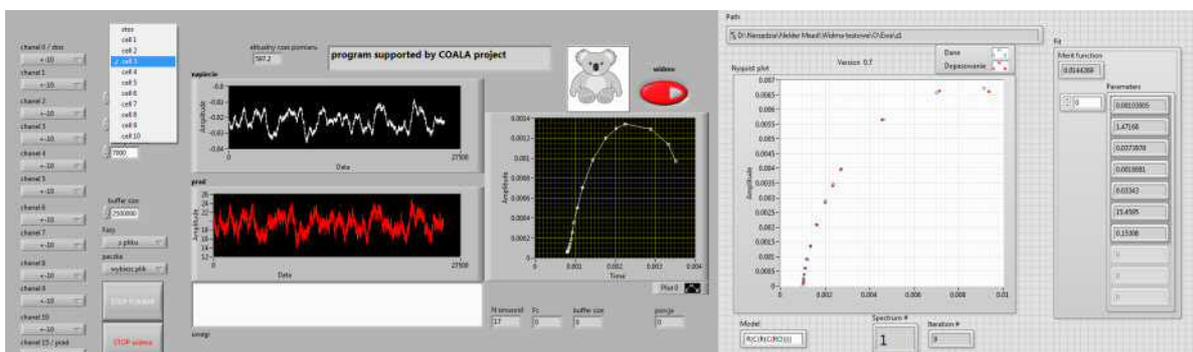


Abbildung 28: Software zur DEIS-Messung und DEIS-Auswertung im Brennstoffzellensystem

Aufgrund der fehlenden Controllerhardware aus dem COALA-Vorhaben (siehe Kapitel 2.1.5) konnte diese Implementierung jedoch nicht umgesetzt werden. Die Validierung der Methode erfolgte somit nur auf dem Stacklevel mit bis zu 10 Zellen und mit der vorhandenen Hardware. Die Messungen wurden beim ZSW mit der Hardware der GUT durchgeführt. Beispielhaft kann durch die Verringerung der zugeführten Luftmenge eine Luftverarmung im Stack simuliert werden. Dabei war es möglich diese Luftverarmung eindeutig durch die Änderung der bestimmten DEIS-Parameter (z.B. R_d) nachzuweisen. Somit konnte der entwickelte Brennstoffzellenüberwachungsalgorithmus erfolgreich validiert werden (Abbildung 29), allerdings unabhängig vom Kontrollalgorithmus des PEMFC-Teilsystems und des Hybridsystems. Für diese Kombination wäre die Controllerhardware aus dem COALA-Vorhaben notwendig gewesen, die leider nicht zur Verfügung stand.

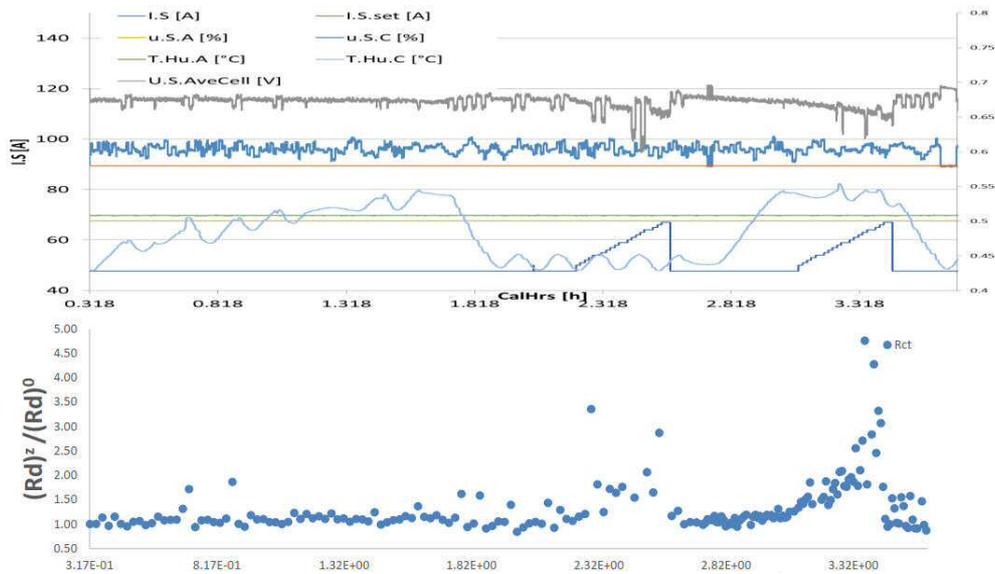


Abbildung 29: Validierung des Brennstoffzellenüberwachungsalgorithmus

E. Impact Clean Power Technology S. A. (ICPT)

Die Kontrollstrategie wurde in den Überwachungsalgorithmus überführt. Anschließend wurden dieser sowie der Betriebsalgorithmus intensiv getestet und notwendige Verbesserungen vorgenommen. Die Kontrollmethodik wurde festgelegt und auch die Überwachungssoftware wurde getestet. Softwareseitig wurde noch einmal ein Update des Moduls vorgenommen, welches das Aufspielen neuer Software vereinfacht. Neue Software-Versionen können nun über die CAN-Schnittstelle im Hauptdatenanschluss der LiC-Einheit eingespielt werden. Das CAN-Bus-Signal wurde um weitere Informationen erweitert. Es beinhaltet nun auch Zustandsangaben wie „Batterie voll“ und „Batterie leer“, die den Controller des Hybridsystems über den LiC-Status informieren und ihn anleiten wie weiter zu verfahren ist. Somit wurde die Entwicklung des LiC-Überwachungsalgorithmus erfolgreich abgeschlossen und die Integration in das LiC-Managementsystem, welches als Platine gefertigt wurde, umgesetzt. Das LiC-Managementsystem war somit einsatzbereit (Abbildung 30).

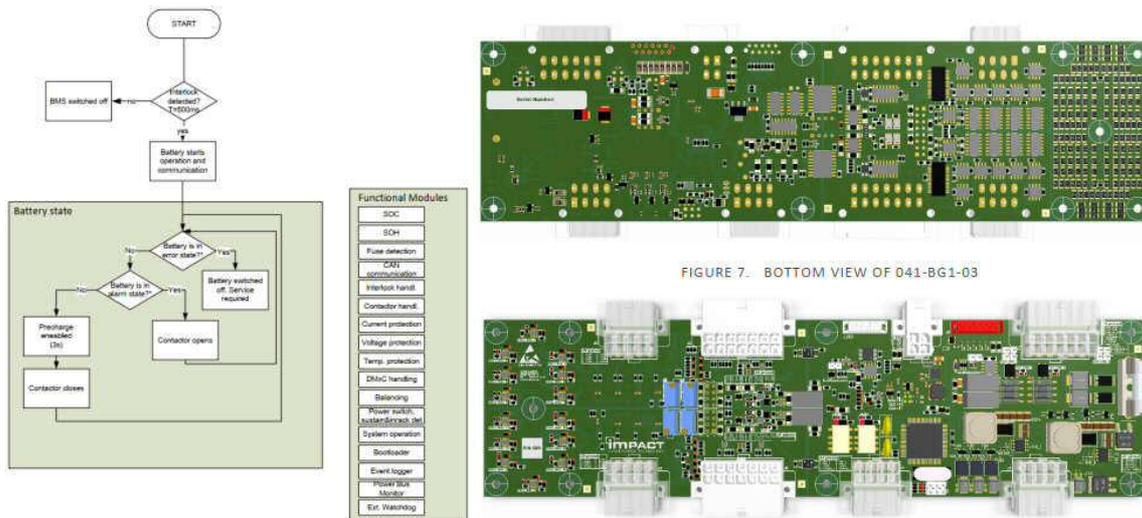


Abbildung 30: LiC-Managementsystem

2.1.5 AP5: Bereitstellung des Hybridsystem-Kontrollers

In AP5 wird die Bereitstellung der Hardware zur Hybridsystemsteuerung sowie die finale Implementierung der Schnittstellen und verschiedenen Algorithmen in den Controller bearbeitet. Auch an diesem AP waren alle Partner beteiligt. Die Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele und der erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Ziele und Ergebnisse in AP5

Vorgegebenes Ziel	Erzielte Ergebnisse	Beteiligte Partner
Hardware von Hybridsystem-Kontroller	<ul style="list-style-type: none"> - COALA-Kontrollerhardware konnte nicht im Vorhaben zur Verfügung gestellt werden - Alternative Nutzung von Labor-CompactRIO als Hardware 	DLR, GUT
Überwachungsschnittstelle für DEIS	<ul style="list-style-type: none"> - Alle Schnittstellen und Algorithmen definiert - Implementierung aufgrund fehlender Hardware nicht möglich 	GUT
Überwachungsschnittstelle für lokale Sensoren	<ul style="list-style-type: none"> - Überwachung von lokalen Temperaturen, Drücken und Medienflüssen in CompactRIO implementiert 	DLR
Überwachungsschnittstelle für LiC-Teilsystem	<ul style="list-style-type: none"> - Gesamte LiC-Hardware verfügbar - Schnittstelle zwischen LiC-Teilsystem und Hybridsystemcontroller durch CAN-Bus-Protokoll definiert - LiC-Steuerung in Hybridsystemsteuerung implementiert 	DLR, ICPT
Implementierung des Gesamtalgorithmus	<ul style="list-style-type: none"> - Implementierung des Gesamtalgorithmus für Hybridsystem in den Labor-CompactRIO 	DLR
Validierung des Hybridsystem-Kontrollers	<ul style="list-style-type: none"> - Erfolgreiche Validierung mit Labor-CompactRIO an repräsentativen Lastzyklen 	DLR

Die Controllerhardware aus COALA (siehe Kapitel 2.1.5) konnte innerhalb des Vorhabens nicht zur Verfügung gestellt werden. Die weiteren Ziele wurden jedoch durch alternative Validierungswege erreicht. Nur die Kombination von Überwachungs- und Kontrollalgorithmus konnte im Vorhaben nicht umgesetzt werden. In AP5 waren folgende Meilensteine vorgesehen, auf die nun detailliert eingegangen wird:

- M5.1: Überwachungs- und Steuerungshardware verfügbar
Die LiC-Einheit mit Steuerungs- und Überwachungsplatine wurde von ICPT bereitgestellt und ins Hybridsystem implementiert. Auch das Brennstoffzellen-System von Hydrogenics ist im Hybridsystem implementiert und alle Systemkomponenten werden vom COALA-Brennstoffzellen-Managementsystem über einen Labor-CompactRIO gesteuert. Die finale COALA-Controllerhardware sollte die Überwachungs- und Steuerungshardware für PEMFC- und LiC-Packs enthalten. Die Herstellung wurde an die polnische Firma SterKom vergeben. Diese hat ein sehr vielversprechendes Konzept erstellt und auch Teile des Systems der GUT zu Testzwecken zur Verfügung gestellt. Trotz intensiver Nachfrage und Kooperation ist es SterKom jedoch nicht gelungen innerhalb des Vorhabens die fertige Controllereinheit zur Verfügung zu stellen. Aus diesem Grund wurden alternative Lösungen für die Validierung entwickelt (siehe Kapitel 2.1.4). Somit wurde dieser Meilenstein als einziger Meilenstein im Projekt leider nicht erfüllt.
- M5.2: Kontrollalgorithmus für Hybridsystem implementiert und validiert
Aufgrund der fehlenden finalen Controllerhardware wurde der Kontrollalgorithmus für das Hybridsystem in einen Labor-CompactRIO implementiert, überarbeitet und erfolgreich validiert. Durch die Verwendung der alternativen Hardware kann dieser Meilenstein also als abgeschlossen betrachtet werden.

Im Folgenden werden die Aufgaben und erzielten Ergebnisse der einzelnen deutschen Teilprojekte in diesem AP beschrieben.

A. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Als Alternative zur finalen Controllerhardware wurde das Hybridsystem am DLR mit einem Labor-CompactRIO ausgestattet und alle Algorithmen in diesen implementiert (Abbildung 31). Auch alle benötigten Schnittstellen wurden integriert. Allerdings ist diese Hardware nicht dafür geeignet DEIS-Messungen durchzuführen. Aus diesem Grund musste die Validierung des Kontrollalgorithmus getrennt von der Validierung des Überwachungsalgorithmus der Brennstoffzelle (an der GUT) erfolgen.



Abbildung 31: Labor-CompactRIO

Die Schnittstellen zu den lokalen Sensoren für Temperaturen, Drücken und Medienflüssen sowie die für die Messung des Leistungsverbrauchs der Teilkomponenten wurden über ein analoges I/O-Schnittstellenmodul umgesetzt. Zudem wurden die Kommunikation mit den Teilsystemen und zu den DC/DC-Wandlern über eine CAN-Bus-Schnittstelle implementiert. Über diese erfolgte auch die Kommunikation mit dem LiC-Modul und dessen Überwachungseinheit. Somit konnte der Betrieb alle Teile des Hybridsystems kontrolliert werden. In diesen Labor-CompactRIO wurde auch der erstellte Gesamtalgorithmus für das Hybrid-System integriert, welcher unter anderem auch die Optimierung der Betriebsparameter des Brennstoffzellensystems ermöglicht (siehe Kapitel 2.1.4).

Die Validierung dieses Hybridsystemkontrollers erfolgte an repräsentativen Lastzyklen nach dem NEDC. Hierzu wurde das Verhalten des Hybridsystems zunächst simuliert um die Lastaufteilung zwischen Brennstoffzelle (FC) und LiC-Einheit zu beurteilen und die mögliche Dynamik zu bestimmen. Basierend auf dieser Simulation wurde ein Betriebsfenster definiert, indem alle Anforderungen an das Hybridsystem erfüllt werden (Abbildung 32). Dabei beschreibt „Alpha increase“ wie schnell der Strom der Brennstoffzelle erhöht wird und „Alpha decrease“ wie schnell dieser verringert wird. Die hellviolette Zone stellt das mögliche Betriebsfenster dar. In diesem werden insbesondere zwei Anforderungen möglichst gut abgedeckt. Zum einen überschreitet die angeforderte Leistung nicht länger als eine Minute die Leistung, die vom Hybridsystem bereitgestellt werden kann. Und zum anderen ist das LiC-Modul weniger als 2 Minuten voll aufgeladen und kann keine Energie mehr speichern. Die Punkte in Grün zeigen drei Beispiele für empfehlenswerte Betriebspunkte, bei denen die Validierung durchgeführt wurde.

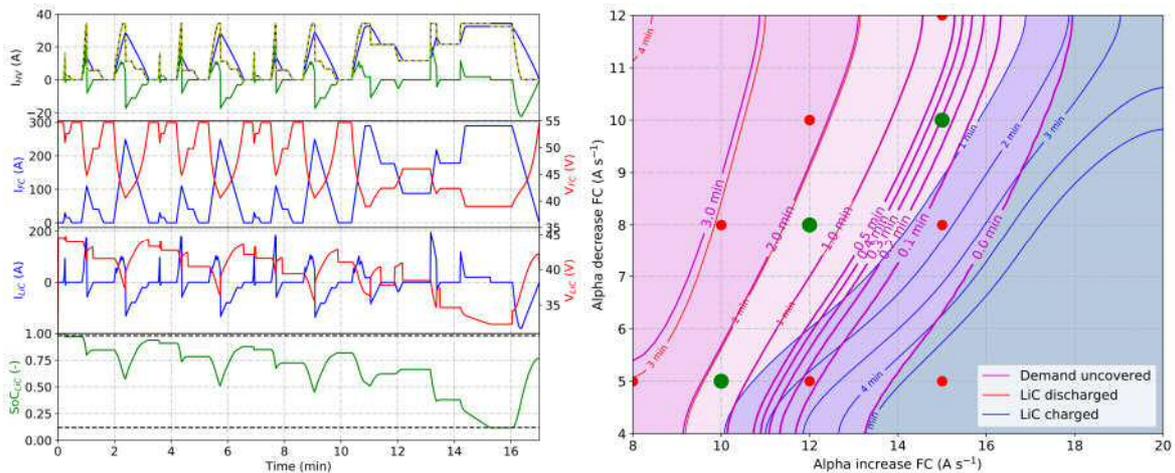


Abbildung 32: Betriebsfenster für Brennstoffzellensystem

Beispielhaft ist die Validierung unter geringer Dynamik (Alpha increase = 10 A/s und Alpha decrease = 5 A/s) und hoher Dynamik (Alpha increase = 15 A/s und Alpha decrease = 10 A/s) im Brennstoffzellensystem gezeigt (Abbildung 33). Man erkennt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. In den Experimenten wurden alle implementierten Algorithmen erfolgreich validiert und das Hybridsystem konnte sehr stabil und effizient betrieben werden. Wie man erkennt ist das Hybridsystem bei schneller Dynamik in Brennstoffzellensystem in der Lage den Leistungsbedarf praktisch vollständig abzudecken. Jedoch ist das LiC-Modul zu einem großen Teil voll aufgeladen und kann keine weitere Energie mehr speichern. Entsprechend muss die Brennstoffzelle ihre Leistung sehr schnell reduzieren, was sich negativ auf die Lebensdauer und die Effizienz des Systems auswirken kann. Im Gegensatz dazu ist die Lastverteilung zwischen den beiden Teilsystemen im Falle der geringen Dynamik nahezu ideal. Nur im Bereich sehr hoher Leistung (bei etwa 15 Minuten) kann die geforderte Leistung nicht vollständig abgedeckt werden. Allerdings handelt es sich hier nur um eine geringe Unterdeckung des bedarfs von etwa 10 %. Wie bereits in Kapitel 2.1.4 gezeigt ist zudem die Effizienz bei geringer Dynamik im Brennstoffzellensystem deutlich höher. Erneut konnte also gezeigt werden, dass die Nutzung des LiC-Moduls als schneller Energiespeicher sehr vorteilhaft für die Hybridisierung mit Brennstoffzellen ist.

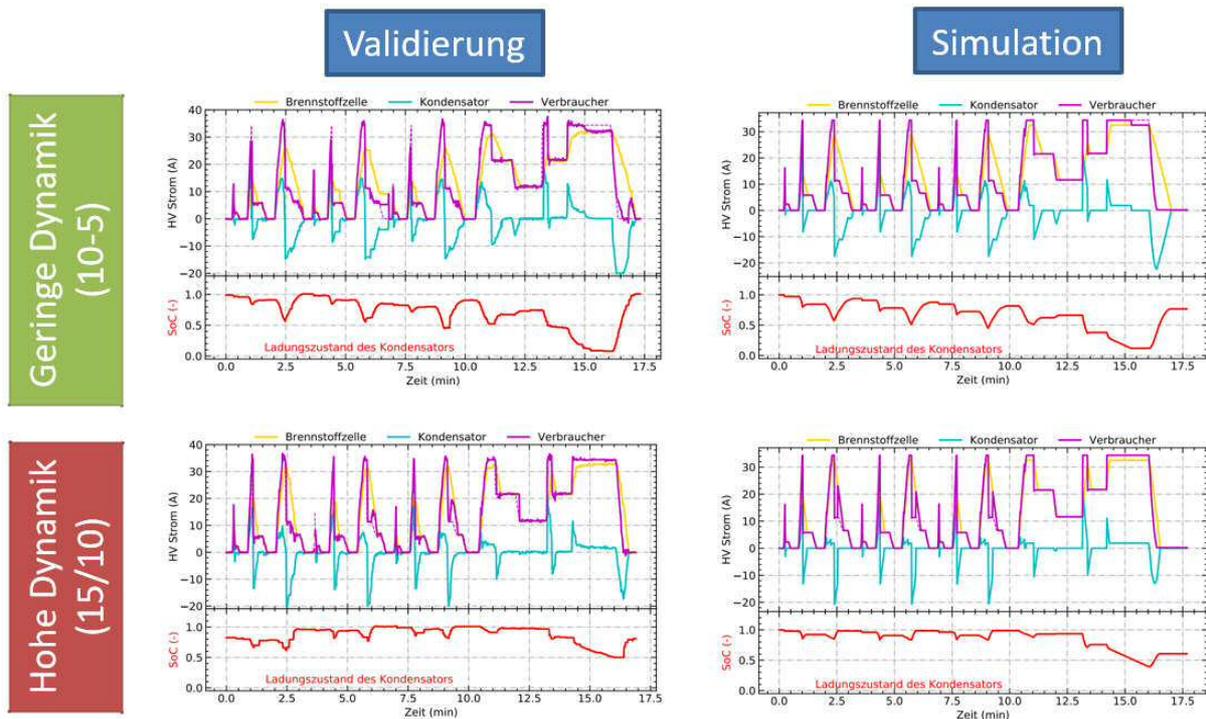


Abbildung 33: Validierungsergebnisse der Hybridisierungsstrategie

Alle integrierten Methoden, Sensoren und Algorithmen konnten durch diese Tests mit dem Labor-CompactRIO wie gezeigt erfolgreich validiert werden und ihr vorteilhafter Einsatz im Hybridsystemen ist somit erwiesen.

B. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Das ZSW hat in enger Kooperation mit der GUT die Validierung der Überwachungsstrategien und der eingesetzten Methoden validiert (Abbildung 34). Hierzu wurden die DEIS-Messungen der GUT beim ZSW mit einem Teststand kombiniert und verschiedenen Messungen zur Sensitivität der DEIS-Methodik auf Parameteränderungen sowie auf CO-Verunreinigungen durchgeführt. Dabei wurde zudem die Auswirkung auf die Stromdichteverteilung detailliert untersucht. Durch diese zunächst nicht geplanten Arbeiten ist es gelungen den Überwachungsalgorithmus und die DEIS-Methode tiefgehend zu validieren. So konnte beispielhaft der Einfluss von Luftdruckänderungen auf die Leistung der PEMFC und auf das DEIS-Signal, welches als Überwachungsparameter verwendet wird, untersucht werden.

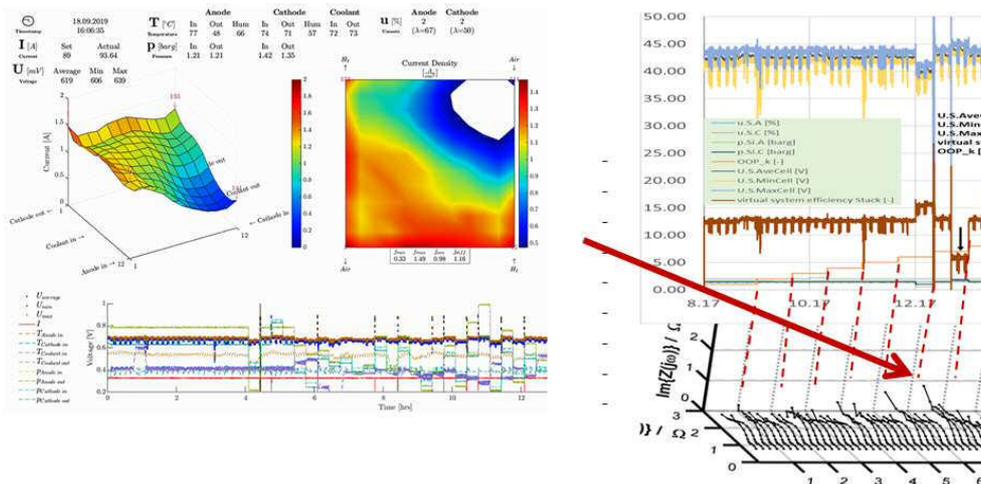


Abbildung 34: Validierungsergebnisse der Überwachungsstrategie für Brennstoffzellen

C. PowerCell Deutschland GmbH (PC)

In AP5 war PC an der Schnittstellenspezifikationen für das Hybridsystem beteiligt. Dies umfasste vor allem die Anforderungen an die Leistungselektronik, die gewährleistet sein müssen um die Sicherheit des PEMFC-Stacks zu gewährleisten und eine Spannungsumkehr der Einzelzellen zu vermeiden. Hierzu wurden gemeinsam mit dem DLR und ICPT die Betriebsmodi für die DC/DC-Wandler im System entwickelt, um das Hybridsystem sowohl bei der Lastaufteilung der Hybridisierungsstrategie als auch während der eingeführten Impedanzspektroskopie zur Zellüberwachung zu isolieren und zu schützen (Abbildung 35).

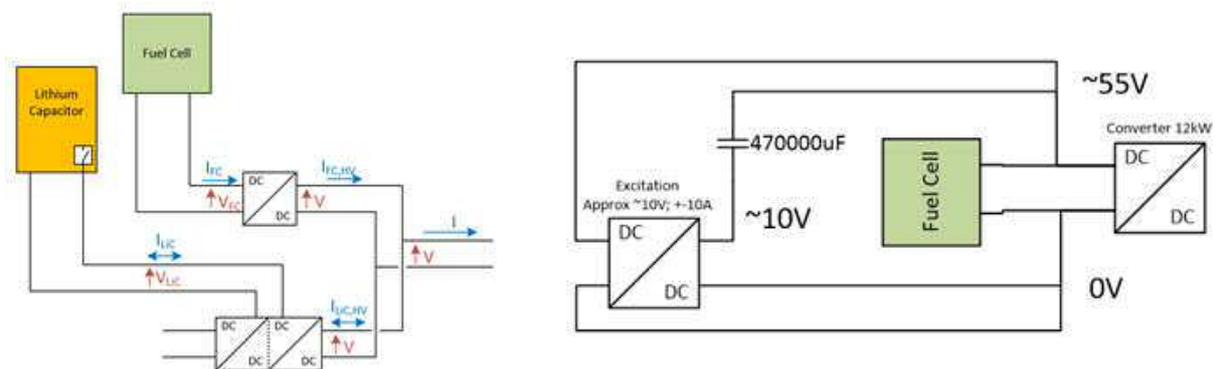


Abbildung 35: Betriebsmodi von DC/DC-Wandlern

Zudem wurden die vom DLR entwickelten Zustandsdiagramme überprüft und Hinweise zur Verbesserung des PEMFC-Managementsystems gegeben.

D. Gdansk University of Technology (GUT)

Alle Schnittstellen und Algorithmen zur Implementierung der DEIS-Überwachung wurden entwickelt und bereitgestellt. Die Implementierung war jedoch aufgrund der fehlenden Hardware nicht möglich.

Die GUT hat im COALA-Vorhaben die Beauftragung der Fertigung der Controller-Hardware vorgenommen. Hierzu wurden zunächst die Controller-Spezifikationen zusammengetragen und Firmen kontaktiert, welche die Controller-Hardware erarbeiten können. Hierzu wurde die polnische Firma SterKom identifiziert, die nach einer Ausschreibung auch mit der Fertigung der Hardware beauftragt wurden. Das Konzept des Controllers sah mehrere Module vor (Abbildung 36):

- DEIS-Generatormodul: Dieses Modul sollte das Anregungssignal für die DEIS-Messungen im System liefern. Durch die Parallelschaltung eines kleinen DC/DC-Wandlers mit einem Kondensator sollte das Sinussignal dem Gleichstrom der Brennstoffzelle überlagert werden. Dieses vielversprechende Konzept besteht aus 2 entscheidenden Teilen, einem analogen und einem digitalen. Das Analogmodul wurde von Sterkom getestet und zeigte unterschiedliche Generatorsignale bei unterschiedlichen Frequenzen. Die verbesserte Version sowie das Digitalmodul wurden leider nicht innerhalb des Vorhabens bereitgestellt.
- DEIS-Erfassungsmodul: Ermöglicht die Messung der DEIS-Antwort von bis zu 60 Einzelzellen und muss mit dem Generatormodul synchronisiert werden. Es besteht aus 4 Teilen zur Überwachung von je 16 Zellen. Die Einzelteile wurden getestet und die erforderlichen Verbesserungen wurden implementiert. Das 60-Kanal-Gerät wurde Ende Dezember 2019 an die GUT geliefert, kann jedoch ohne das Generatormodul nicht betrieben werden.
- I/O-Modul und CAN-Kommunikation: Stellt die Schnittstelle zu den übrigen Systemkomponenten sowie den DC/DC-Wandlern der Leistungselektronik dar. Das Modul wurde fertig gestellt und ausgeliefert. Es liegt dem DLR vor, jedoch wurde keine Dokumentation mitgeliefert. Somit ist weder klar wie das Modul betrieben werden kann, noch welche Anschlüsse für die einzelnen Komponenten zu wählen sind.

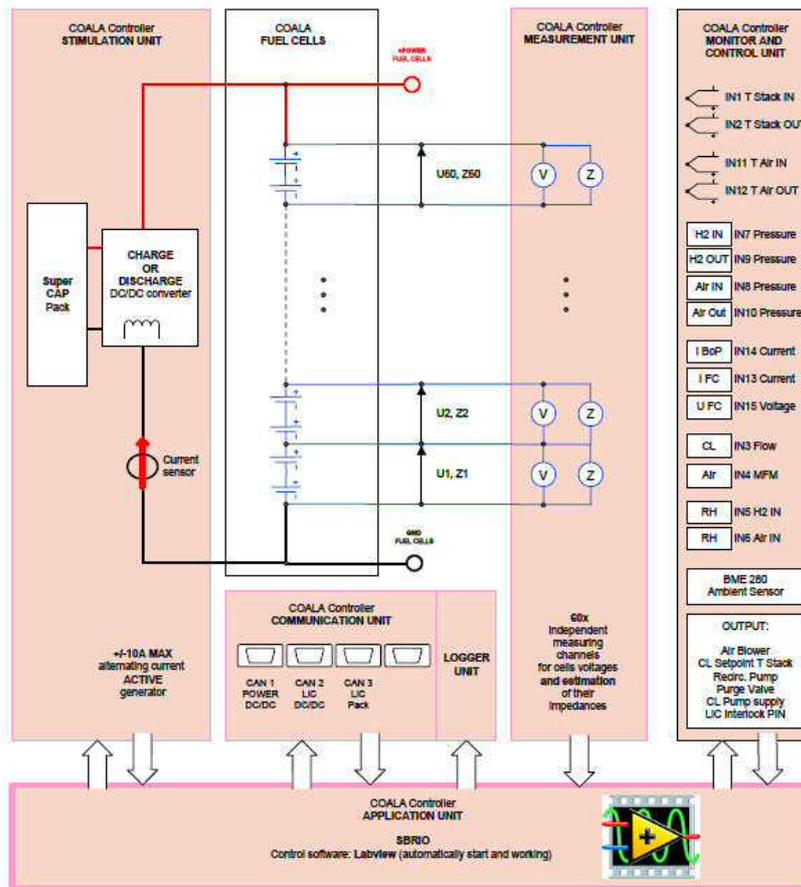


Abbildung 36: Konzept der Controllerhardware

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Controllerhardware nicht im Rahmen des Vorhabens zur Verfügung gestellt werden konnte und somit Meilenstein „M5.1: Überwachungs- und Steuerungshardware verfügbar“ als einziger Meilenstein nicht erfüllt werden konnte. Aus diesem Grund wurden alternative Lösungen für die Validierung entwickelt (siehe Kapitel 2.1.4). Durch diese Validierungen konnten die vorteilhafte Nutzung sowohl der Überwachungsmethodik und deren Algorithmen als auch der Kontrollmethodik und deren Algorithmen für die verschiedenen Teilsysteme sowie für das Hybridsystems nachgewiesen werden. Nur leider konnte die Validierung von Überwachung und Kontrolle aufgrund der fehlenden Hardware nicht kombiniert werden.

E. Impact Clean Power Technology S. A. (ICPT)

In AP5 hat ICPT alle Überwachungsschnittstelle für das LiC-Teilsystem zur Verfügung gestellt. Alle notwendigen Schnittstellen zwischen LiC-Teilsystem und Hybridsystemcontroller wurden durch ein CAN-Bus-Protokoll definiert und die LiC-Steuerung innerhalb der Hybridsystemsteuerung wurde gemeinsam mit dem DLR in den Kontrollalgorithmus für das Hybridsystem implementiert.

Somit wurde die fertige LiC-Einheit, inklusive der notwendigen Dokumentation, am 16. Oktober 2019 an das DLR verschickt und stand für den Aufbau des Hybridsystems und die Validierung der entwickelten Algorithmen zur Verfügung (Abbildung 37).

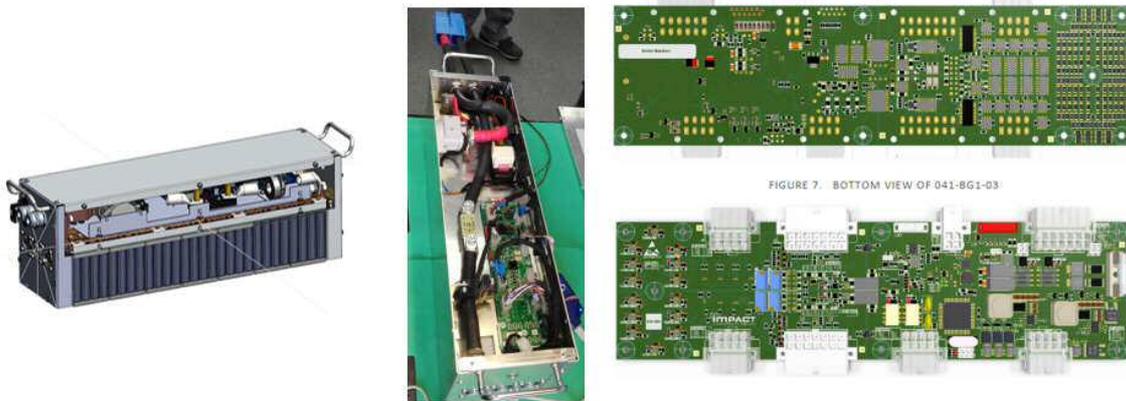


Abbildung 37: LiC-Modul und LiC-Überwachungssystem

Wie bereits beschreiben konnten so der LiC-Überwachungsalgorithmus sowie die Kontrollalgorithmen für LiC- und PEMFC-Teilsystem sowie für das gesamte Hybridsystem erfolgreich validiert werden. Auch die Validierung des Optimierungsalgorithmus konnte direkt im Hybridsystem erfolgen. Lediglich der PEMFC-Überwachungsalgorithmus musste getrennt und außerhalb des Hybridsystems validiert werden. Dennoch verlief auch diese Validierung positiv.

2.1.6 Fazit und Ausblick

Im COALA-Vorhaben konnte zwar leider die finale Controllerhardware für den Meilenstein „M5.1: Überwachsungs- und Steuerungshardware verfügbar“ nicht zur Verfügung gestellt werden, aber die sonstige entwickelte Hardware sowie die erarbeiteten Algorithmen haben deutliche Vorteile bei der Hybridisierung mit Brennstoffzellen bewiesen. Im Folgenden sollen die Haupterrungenschaften des Vorhabens noch einmal betont werden:

Der Optimierungsalgorithmus für das Brennstoffzellensystem zeigt mehrere Vorteile auf:

- Verbesserte Stack-Effizienz um bis zu 4 % und Systemeffizienz um bis zu 5 %.
- Verlängerte Lebensdauer durch verringerte Degradationsrate um 25-30% (75 statt 105 $\mu\text{V/h}$ in ZSW BZ100 bei 1 A/cm^2).
- Höhere maximale Stromdichte von 25 % (1,9 statt 1,5 A/cm^2 in PC S3) und damit erhöhte Leistungsdichte.

Das entwickelte LiC-Modul ist wettbewerbsfähig zur LTO-Technologie und besitzt weitere Vorteile bei der Hybridisierung mit Brennstoffzellen:

- Schnelle Ladung und Entladung minimiert die Dynamik und die Belastung des Brennstoffzellensystems. Es konnte gezeigt werden, dass so sowohl die Effizienz als auch die Lebensdauer des Systems verbessert werden kann.
- 3,5-fach geringeres Gewicht und halbes Volumen ermöglichen den Bau von kompakten und leichten Hybridsystemen mit hoher Leistungsdichte

Die entwickelte Hybridisierungsstrategie hat deutliche Vorteile im Systembetrieb:

- Trotz geringer Dynamik im Brennstoffzellensystem kann der Leistungsbedarf zum größten Teil abgedeckt werden.
- Das erarbeitete Betriebsfenster ermöglicht einen flexiblen Einsatz in verschiedenen Anwendungen.
- Verbesserung von Effizienz und Lebensdauer des Hybridsystems.

Das entwickelte Überwachungssystem für Brennstoffzellen ist in der Lage schädliche Betriebsbedingungen durch folgende Vorteile zu vermeiden:

- Verbesserung des Verständnisses fehlerhafter Bedingungen in einer Brennstoffzelle
- Überwachungsalgorithmus und DEIS-Software zur detaillierten Untersuchung von Brennstoffzellen im Systembetrieb steht zur Verfügung
- Fehlererkennung und Anpassung der Betriebsbedingungen werden schnell ermöglicht.

Nachdem alle diese Vorteile aufgezeigt werden konnten, wäre es noch von hohem Interesse die beiden Errungenschaften des verbesserten Kontrollsystems für Hybridsysteme und des verbesserten Überwachungssystems für Brennstoffzellen zu kombinieren und in einer einzigen Hardware zu integrieren. Dieser Punkt konnte leider nicht mehr im Rahmen des Projektes umgesetzt werden.

Zudem wäre nach Bereitstellung dieser Hardware von hohem Interesse den kombinierten Hybridkontroller direkt in bestehenden Anwendungen (auf höherem TRL) zu testen und so die Anwendungsvorteile auch im kommerziellen Betrieb nachzuweisen.

2.2 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschrittenen Verwertungsplans

Als direkt verwertbare Ergebnisse des COALA-Vorhabens steht zum einen das von ICPT entwickelte LiC-Modul sowie das zugehörige Kontroll- und Überwachungssystem zur Verfügung. Zum anderen können die entwickelten Kontroll- und Überwachungsstrategien für Brennstoffzellen- und Hybridsystem in verschiedenen Anwendungen genutzt werden. Hierzu müssen diese jedoch noch in eine geeignete Hardware integriert werden.

Auf Seiten von ICPT erweitert das entwickelte LiC-Modul das Produktportfolio von ICPT für Anwendungen mit starken Beschränkungen hinsichtlich Systemgröße und -gewicht und das LiC-Managementsystem soll in Weiterentwicklungen implementiert werden. PC zieht die Anpassung der Kontroll- und Überwachungsstrategien sowie deren Implementierung bei weiteren Entwicklungen in Betracht.

Die Verwertung durch die beteiligten Forschungseinrichtungen konzentriert sich im Wesentlichen auf die Veröffentlichung der wissenschaftlichen Ergebnisse (verbessertes Verständnis von Brennstoffzellen und Unterstützung weiterer Entwicklungen), der Verbesserung Ausbildung und Lehre sowie der Sicherstellung und Folgefinanzierung innovativer Forschung auf dem Gebiet der nachhaltigen Energieversorgung.

Der Gesamtverwertungsplan des COALA-Konsortiums wurde in Abbildung 38 zusammengefasst.

Verwertung	Partner	Aktion	Zeithorizont nach Projektende											
			Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
LiC-Modul	ICPT	Kundengewinnung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Anpassung an Kundenspezifikationen					■	■	■	■				
		Produktion und Verkauf nach Kundenwunsch									■	■	■	■
Kontrollstrategie	PC	Validierung	■	■	■	■								
		Implementierung					■	■	■	■				
		Anwendung in Controllern für kommerzielle Systeme									■	■	■	■
Veröffentlichungen	DLR	Wissenschaftliche Publikationen	■	■	■	■								
	ZSW	Wissenschaftliche Publikationen	■	■	■	■								
	GUT	Wissenschaftliche Publikationen	■	■	■	■								
Folgefinanzierung	DLR	Beantragung von Folgeprojekten	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	ICPT	Beantragung von Folgeprojekten	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PC	Beantragung von Folgeprojekten	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	ZSW	Beantragung von Folgeprojekten	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	GUT	Beantragung von Folgeprojekten	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Verbesserung von Lehre und Ausbildung	DLR	Einbinden von Ergebnissen in Vorlesung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	ZSW	Einbinden von Ergebnissen in Vorlesung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	GUT	Einbinden von Ergebnissen in Vorlesung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Abbildung 38: Gesamtverwertungsplan

Die individuellen Verwertungspläne sind im Folgenden detailliert aufgeführt und die jeweiligen Zeithorizonte jeweils graphisch dargestellt.

2.2.1 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

A. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Keine neuen Schutzrechte im Rahmen des Projektes angemeldet. Genutzt wurden Patente zur lokalen Sensorik (DE 10316117 B3, EP 1618395 A1).

B. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Keine (Forschungseinrichtung).

C. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit und Sichtbarkeit sowie Transfer zu Nutzergruppen und verbesserte Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen durch:

- Wissenschaftliche Veröffentlichungen: siehe Kapitel 2.4.1 (weitere in Planung)
- Beiträge auf wissenschaftlichen Konferenzen: siehe Kapitel 2.4.2
- Öffentlichkeitsarbeit auf Messen: PolEcoSystems 2017 in Warsaw und Hannover Messe 2018 in Hannover

Ausbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs:

- 1 Masterarbeit im Rahmen des Vorhabens (Charakterisierung der Gasflussverteilung in PEMFC-Stacks mittels Impedanzspektroskopie (2017))
- Verwendung der Ergebnisse in Vorlesung Brennstoffzellentechnologie II an der Universität Stuttgart

D. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für mögliche notwendige nächste Phase bzw. nächste innovatorische Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse

Bereits bewilligte Folgeprojekte zur Verbesserung der orts aufgelösten Messtechnik:

- Pa-II-ell (NIP, BMWi): segmentierte Messtechnik für HT-PEMFC
- ElyKon (Hypos, BMBF): segmentierte Messtechnik für Elektrolyse

Geplanter Antrag zur Weiterentwicklung von Betriebsstrategien von PEMFC- und Hybridsystemen:

- Betriebsstrategien für Hybridsysteme in der Schwerlastanwendung

E. Zeithorizonte

Verwertung	Aktion	Zeithorizont nach Projektende											
		2020				2021				2022			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Folgeprojekte	Pa-II-ell (NIP, BMWi): segmentierte Messtechnik für HT-PEMFC	■	■	■	■	■	■	■	■				
	ElyKon (Hypos, BMBF): segmentierte Messtechnik für Elektrolyse	■	■	■	■	■	■	■	■				
	Antrag: Betriebsstrategien für Hybridsysteme in der Schwerlastanwendung				■	■	■	■	■	■	■	■	■
Weitere geplante Veröffentlichungen	Anodische Fehlerdiagnose		■	■									
	Betriebsstrategien in Hybridsystemen		■	■	■								
Lehre	Brennstoffzellentechnologie II (Universität Stuttgart)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Abbildung 39: Verwertungsplan DLR

2.2.2 Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

A. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Keine.

B. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Keine (Forschungseinrichtung).

C. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit und Sichtbarkeit sowie Transfer zu Anwendern:

- Wissenschaftliche Veröffentlichungen: siehe Kapitel 2.4.1 (weitere in Planung)
- Beiträge auf wissenschaftlichen Konferenzen: siehe Kapitel 2.4.2
- Präsentationen während Workshops anderer öffentlich finanzierter Brennstoffzellenprojekte
- Sicherstellen, dass die Ergebnisse von COALA in weiteren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Europa zur Verbesserung der PEMFC- und Hybridsystemtechnologie verwendet werden

Ausbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs:

- Testplattform und COALA-Ergebnisse werden zukünftig für Bildungszwecke eingesetzt: Bachelor- und Masterarbeiten.

D. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für mögliche notwendige nächste Phase bzw. nächste innovatorische Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse

Implementierung der Ergebnisse in die Testplattform für Brennstoffzellensysteme für Kraftfahrzeuge:

- Bereitstellung von Testdienstleistungen für Industrie und Forschung

Nutzung der Ergebnisse im Rahmen anderer finanzierter nationaler / EU-finanzierter Projekte.

E. Zeithorizonte

		Zeithorizont nach Projektende											
		2020				2021				2022			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Weiterführende Forschung	Automotive Testplattform für Industrie und Forschung												
	Gefördertes nationale Projekt												
Veröffentlichungen	Nutzung der Ergebnisse im Rahmen anderer nationaler/EU Projekte												
Wissenschaftlicher Nachwuchs	Bachelor / Masterarbeiten												

Abbildung 40: Verwertungsplan ZSW

2.2.3. PowerCell Deutschland GmbH (PC)

A. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Keine.

B. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Steuerungs- und Überwachungsstrategien sind für verschiedene Anwendungen geeignet und sollen für Weiterentwicklungen bei PC zur Systemsteuerung eingesetzt werden.

Zudem können die Steuerungs- und Überwachungsstrategien an die von PC hergestellten Brennstoffzellensysteme angepasst werden, um deren Effizienz und Lebensdauer zu erhöhen.

C. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Keine (KMU).

D. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für mögliche notwendige nächste Phase bzw. nächste innovatorische Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse

- Validierung von Strategien für verschiedene Anwendungen
- Implementierung: Strategie- und Technologieimplementierung in Prototypen
- Verwendung in Controllern für kommerzielle Systeme: Technologieimplementierung in kommerzieller Controller-Hardware
- Folgeprojekte zur Verbesserung und Anpassung von Strategien an verschiedene Anwendungen

E. Zeithorizonte

		Zeithorizont nach Projektende											
		2020				2021				2022			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Verwertung	Aktion												
Verwertung der Kontrollstrategie	Validierung												
	Implementierung												
	Anwendung in Controllern für kommerzielle Systeme												
Folgefiananzierung	Beantragung von Folgeprojekten												

Abbildung 41: Verwertungsplan PC

2.2.4. Gdansk University of Technology (GUT)

A. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Keine.

B. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Keine (Universität).

C. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Steigerung der wissenschaftlichen Sichtbarkeit:

- Wissenschaftliche Veröffentlichungen: siehe Kapitel 2.4.1
- Beiträge auf wissenschaftlichen Konferenzen: siehe Kapitel 2.4.2

Ausbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs innerhalb des Vorhabens:

- 10 Bachelorarbeiten
- 2 Masterarbeiten
- 1 Doktorarbeit
- Verwendung der Ergebnisse in verschiedenen Vorlesungen und eine reine Brennstoffzellenvorlesung ist geplant

D. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für mögliche notwendige nächste Phase bzw. nächste innovatorische Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse

Die GUT wird sich für Folgeprojekte bewerben, wenn eine interessante Ausschreibung veröffentlicht wird. Die GUT wird sich dabei auf folgende Themen konzentrieren:

- EIS, DEIS-Diagnose
- DEIS-Implementierung in Controllerhardware
- DEIS-Implementierung in Steuerungsstrategie und Steuerungsalgorithmus.

E. Zeithorizonte

		Zeithorizont nach Projektende											
		2020				2021				2022			
Verwertung	Aktion	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Folgeprojekte	Beantragung eines Projektes	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Weitere Veröffentlichungen	Optimale Gasfeuchte	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Einfluss von Luftfeuchte (eingereicht)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Lokale DEIS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Lehre	Vorlesungen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Abbildung 42: Verwertungsplan GUT

2.2.5. Impact Clean Power Technology S. A. (ICPT)

A. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Keine.

B. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Das LiC-Modul und das Managementsystem (Leiterplatte und Software) erweitern das Produktportfolio von ICPT. Das LiC-Modul ist auf automobile, mobile und stationäre Anwendungen spezialisiert, in denen die Systemgröße und das Gewicht stark eingeschränkt sind.

Das LiC-Managementsystem kann mit oder ohne Hybridisierung mit Brennstoffzellen verwendet werden und wird für die weitere Entwicklung verwendet.

C. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Keine (KMU).

D. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für mögliche notwendige nächste Phase bzw. nächste innovatorische Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse

- Kundengewinnung: Suche und Identifizierung potenzieller Kunden für LiC-Modul
- Anpassung des LiC-Moduls an Kundenspezifikationen: Entwicklung eines speziellen LiC-Moduls für die Kundenanwendungen
- Produktion und Verkauf nach Kundenwunsch: Produktion und Verkauf von speziellen LiC-Modulen für Kundenanwendungen
- Folgeprojekte zur Demonstration der Verwendung von LiC-Modulen

E. Zeithorizonte

		Zeithorizont nach Projektende											
		2020				2021				2022			
Verwertung	Aktion	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
LiC-Modul	Kundengewinnung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Anpassung an Kundenspezifikationen					■	■	■	■				
	Produktion und Verkauf nach Kundenwunsch									■	■	■	■
Folgefinanzierung	Beantragung von Folgeprojekt	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Abbildung 43: Verwertungsplan ICPT

2.3. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Zum Einsatz von Optimierungsalgorithmen für die direkte Optimierung des Brennstoffzellenbetriebs sind dem Konsortium in den vergangenen Jahren keine Neuerungen bekannt.

Der Stand-der-Technik in Hybridsystemen mit Brennstoffzellen beruht noch immer auf dem Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien. Die LTO-Technologie kann dabei ebenfalls schnelles Laden und Entladen ermöglichen, ist jedoch auf Anwendungen mit geringen Anforderungen an Kompaktheit und Gewicht (wie beispielsweise Busse) beschränkt. Die Verwendung von Kondensatoren ist weiterhin unüblich.

Im Unterschied zu dem Ansatz in COALA beschäftigen sich verschiedenen Gruppen bei der Überwachung von Brennstoffzellen mit Impedanzspektroskopie auf die Analyse der Antwort des gesamten Brennstoffzellenstacks und nicht der Einzelzellen. Zu diesen Ansätzen gehören:

- Europäisches Projekt Health Code (FCH-JU 671486): <https://pemfc.health-code.eu/>
- Europäisches Projekt Insight (FCH-JU 735918): <http://insight-project.eu/>
- THDA-Ansatz der Firma AVL: <https://www.avl.com/web/guest/-/fuel-cell-engineering-for-passenger-cars-and-electric-vehicles>

Die Analyse der Einzelzellen ermöglicht jedoch eine deutlich höhere Sensitivität und die lokale Isolation von fehlerhaften Zuständen.

2.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse aus dem Vorhaben

Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem COALA- Vorhaben wurden sowohl in wissenschaftlichen Publikationen als auch in Beiträge zu wissenschaftlichen Konferenzen veröffentlicht und sind im Folgenden detailliert aufgeführt:

2.4.1 Wissenschaftliche Publikationen

Tabelle 6: wissenschaftliche Publikationen

No.	Title	Authors	Journal	DOI	Status
1	Implementation of DEIS for reliable fault monitoring and detection in PEMFC single cells and stacks	K. Darowicki, E. Janicka, M. Mielniczek, A. Zielinski, L. Gawel, J. Mitzel, J. Hunoer	Electrochimica Acta 292 (2018) 383-389	10.1016/j.electacta.2018.09.105	Published
2	The influence of dynamic load changes on temporary impedance in hydrogen fuel cells, selection and validation of the electrical equivalent circuit	K. Darowicki, E. Janicka, M. Mielniczek, A. Zielinski, L. Gawel, J. Mitzel, J. Hunoer	Applied Energy 251 (2019) 13396	10.1016/j.apenergy.2019.113396	Published
3	Operando and ex-situ investigation of PEMFC degradation	P. Gazdzicki, J. Mitzel, D. G. Sanchez, P. Abmann, J. Sousa, T. Morawietz, R. Hiesgen, F. Häubler, J. Hunger, G. Schlumberger	ECS Transactions 92 (2019), 261-276	10.1149/09208.0261ecst	Published
4	Fault Monitoring in PEFC Stacks by Evaluation of Local Performance and Cell Impedance Analysis	J. Mitzel, D. Garcia-Sanchez, M. Schulze, F. Häubler, J. Hunger, G. Schlumberger	Fuel Cells 4 (2020) 403-412	10.1002/fuce.201900193	Published
5	Advancement of segmented cell technology in low temperature hydrogen technologies	I. Biswas, D.G. Sánchez, M. Schulze, J. Mitzel, B. Kimmel, A.S. Gago, P. Gazdzicki.	Energies 13 (2020) 2301	10.3390/en13092301	Published
6	An integral-differential method for impedance determination of the hydrogen oxidation process in the presence of carbon monoxide in the proton exchange membrane fuel cell	K. Darowicki, L. Gawel, M. Mielniczek, E. Janicka, A. Zielinski, J. Mitzel, J. Hunoer	International Journal of Hydrogen Energy 2020	10.1016/j.ijhydene.2020.07.038	Published online
7	The impedance of hydrogen oxidation reaction in a proton exchange membrane fuel cell in the presence of carbon monoxide in hydrogen stream	K. Darowicki, L. Gawel, M. Mielniczek, A. Zielinski, E. Janicka, J. Hunger, L. Jöbissen	Applied Energy		Accepted
8	Determination of optimal relative humidity of reactant gases in PEMFC stack depending on the amount of energy generated	E. Janicka, M. Mielniczek, L. Gawel, K. Darowicki, J. Mitzel, J. Hunoer			Submitted

2.4.2 Beiträge zu wissenschaftlichen Konferenzen

Table 7: Beiträge zu wissenschaftlichen Konferenzen

No.	Title (original language)	Authors	Date and Place	Conference	Form
1	Selekcja i Walidacja Obwodu Zastępczego Opisującego Pelen Zakres Pracy Ogniwa Paliwowego na Wodór	E. Janicka, K. Darowicki, M. Mielniczek, L. Gawel, A. Zielinski	3-7.09.2018, Gdańsk	Kongres Technologii Chemicznej 2018 – Polish conference	Oral
2	Zastosowanie Nowoczesnych Ogniw Litowo Tytanowych Do Autobusów Elektrycznych	B.Kras	3-7.09.2018, Gdańsk	Kongres Technologii Chemicznej 2018 – Polish conference	Oral
3	Ocena aktywności elektrokatalitycznej katody w ogniwie paliwowym	L.Gawel	3-7.09.2018, Gdańsk	Kongres Technologii Chemicznej 2018 – Polish conference	Poster
4	Application of Nanoscale Impedance Microscopy to investigations of boron doped diamond surface heterogeneity	A. Zieliński, J. Ryj, K. Darowicki	3-7.07.2018, Minsk	13th International Symposium on Systems with Fast Ionic Transport – international conference	Poster
5	Combination of Electrochemical Impedance Spectroscopy and Local Current Density Distribution for Fault Monitoring in PEMFC Stacks	J. Mitzel, D. Garcia-Sanchez, M. Schulze, F. Häubler, J. Hunger, G. Schlumberger	24.-26.09.2018, Ulm	Electrochemistry 2018 - international conference	Poster
6	COALA – Control algorithm and controller for increasing the efficiency of hybrid PEMFC systems in different applications	J. Mitzel, M. Mielniczek	25.10.2018, Poznan	STAIR status conference	Oral
7	Fault Monitoring in PEFC Stacks by Evaluation of Local Performance and Cell Impedance Analysis	J. Mitzel, D. Garcia-Sanchez, M. Schulze, F. Häubler, J. Hunger, G. Schlumberger	2-5.07.2019, Luzern	European Fuel Cell Forum 2019	Oral
8	Assessment of the air humidity impact on the operation of the PEM fuel cell with the use Dynamic Electrochemical Impedance Spectroscopy	E. Janicka, K. Darowicki, M. Mielniczek	12.-15.05.2019, Toledo, Spain	25th topical meeting of ISE	Oral

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel COALA: Steueralgorithmus und Steuerung zur Steigerung der Effizienz von Hybrid-PEMFC-Systemen in verschiedenen Anwendungen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Jens Mittel, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Jürgen Hunger, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg Per Ekdunge, PowerCell Deutschland GmbH	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2020
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Helmholtzstraße 8, 89081 Ulm PowerCell Deutschland GmbH, Mainzer Landstraße 49, 60329 Frankfurt am Main	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 01LX1601A bis C
	11. Seitenzahl 51
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 0
	14. Tabellen 7
	15. Abbildungen 43
16. Zusätzliche Angaben: -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Im Rahmen des deutsch-polnischen COALA-Vorhabens wurde eine Kontrollstrategie für Brennstoffzellen-Hybridsysteme entwickelt, welche die Überwachung der Teilsysteme und die Optimierung der Systemeffizienz ermöglicht sowie Vermeidungsstrategien für ungünstige Betriebsbedingungen nutzt. Der Stand der Technik nutzt lediglich Kennfelder mit vorher festgelegten Parametereinstellungen für verschiedene Lastpunkte. Ziel war die Anpassung der Parameter während der Betriebsdauer. Der dazu entwickelte Optimierungsalgorithmus steigert die Brennstoffzelleneffizienz um bis zu 4 %, die Systemeffizienz um bis zu 5 % und die Systemlebensdauer um bis zu 25 %. Aktuelle Hybridsysteme nutzen zudem Lithiumionenbatterien zur Energiespeicherung. Der geplante Einsatz eines LiCs-Moduls (Lithium-Ionen-Kondensatoren) ermöglicht schnelles Laden/Entladen und so verringerte Dynamik und erhöhte Lebensdauer im PEMFC-System. Das entwickelte LiC-Modul erfüllt diese Anforderungen bei 3,5-fach geringerem Gewicht und halbem Volumen. Die Überwachung von Hybridsystemen basiert derzeit auf der Messung der Einzelzellspannungen und des Ladezustandes der Batterie. Das fortschrittliche COALA-Überwachungssystem nutzt zudem lokale Sensoren und die dynamische, elektrochemische Impedanzspektroskopie. Dieses Überwachungssystem ermöglicht die schnelle Reaktion auf kritische Betriebsbedingungen im System. Des Weiteren wird die Lebensdauer von Hybridsystems heute aufgrund von kritischem Betrieb in den Start/Stopp-Phasen limitiert. Die entwickelte Hybridisierungsstrategie beinhaltet Prozeduren um diesen Einfluss zu minimieren und nutzt ein erweitertes Betriebsfenster für einen flexiblen Einsatz. Die Ergebnisse des Vorhabens unterstützt die Markteinführung von Brennstoffzellen und so einer emissionsfreien, wasserstoffbasierten Energieversorgung in verschiedenen Anwendungen. Hierzu zählen sowohl der Transport- (Pkw und Lkw) als auch der Energiesektor (Strom und Wärmeerzeugung in Wohnhäusern und gewerblichen Einrichtungen).	
19. Schlagwörter Brennstoffzelle, Lithium-Ionen-Kondensator, Hybridsystem, Algorithmen, Steuerung, Optimierung	
20. Verlag	21. Preis

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title COALA: Control algorithm and controller for increasing the efficiency of hybrid PEMFC systems in different applications	
4. author(s) (family name, first name(s)) Jens Mitzel, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Jürgen Hunger, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg Per Ekdunge, PowerCell Deutschland GmbH	5. end of project 31.03.2020
	6. publication date planned
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Helmholtzstraße 8, 89081 Ulm PowerCell Deutschland GmbH, Mainzer Landstraße 49, 60329 Frankfurt am Main	9. originator's report no.
	10. reference no.
	11. no. of pages 51
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 0
	14. no. of tables 7
	15. no. of figures 43
16. supplementary notes: -	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract As part of the German-Polish COALA project, a control strategy for fuel cell hybrid systems was developed, which enables the monitoring of the subsystems and the optimization of system efficiency as well as avoidance strategies for unfavorable operating conditions. State-of-the-art systems are using look-up tables with previously defined parameter settings for different load points. The aim was to adapt the parameters during operation. The developed optimization algorithm increases the fuel cell efficiency by up to 4%, the system efficiency by up to 5% and the system lifetime by up to 25%. Current hybrid systems also use lithium ion batteries for energy storage. The planned use of a LiC pack (lithium-ion capacitor) enables fast charging/discharging and thus reduced dynamics and increased lifetime of the PEMFC system. The developed LiC pack meets these requirements with 3.5 times less weight and half the volume. The monitoring of hybrid systems is currently based on the measurement of the individual cell voltages and the state-of-charge of the battery. The advanced COALA monitoring system also uses local sensors and dynamic, electrochemical impedance spectroscopy. This monitoring system enables fast response to critical operating conditions in the system. Furthermore, the lifetime of hybrid systems is limited due to critical operation in the start/stop phases. The developed hybridization strategy includes procedures to minimize this influence and uses an extended operating window for flexible use. The results of the project support the market introduction of fuel cells and thus of an emission-free, hydrogen-based energy supply in various applications. This includes both the transport sector (cars and trucks) and the energy sector (electricity and heat generation in residential buildings and commercial facilities).	
19. keywords Fuel cell, lithium-ion capacitor, hybrid system, algorithms, control, optimization	
20. publisher	21. price

*) Project number should be mentioned in the publication.