

IEA Fortschrittliche Brennstoffzellen (AFC) Annex 31: Polymerelektrolyt- membran-Brennstoffzellen

Arbeitsperiode 2017 - 2019

M. Lammer, K. Malli,
R. Zacharias, A. Jany,
K. Kocher, M. Grandi,
B. Hammer, V. Hacker

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

38/2020

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

IEA Fortschrittliche Brennstoffzellen (AFC)

Annex 31: Polymerelektrolytmembran- Brennstoffzellen

Arbeitsperiode 2017 – 2019

DI Michael Lammer, DI Karin Malli, Robert Zacharias, MSc.,
DI Andrea Jany, DI Katharina Kocher, DI Maximilian Grandi,
Brigitte Hammer, Bakk., Prof. Viktor Hacker
Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik

Graz, Jänner 2020

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) initiiert, um Österreichische Forschungsbeiträge zu den Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu finanzieren.

Seit dem Beitritt Österreichs zur IEA im Jahre 1975 beteiligt sich Österreich aktiv mit Forschungsbeiträgen zu verschiedenen Themen in den Bereichen erneuerbare Energieträger, Endverbrauchstechnologien und fossile Energieträger. Für die Österreichische Energieforschung ergeben sich durch die Beteiligung an den Forschungsaktivitäten der IEA viele Vorteile: Viele Entwicklungen können durch internationale Kooperationen effizienter bearbeitet werden, neue Arbeitsbereiche können mit internationaler Unterstützung aufgebaut sowie internationale Entwicklungen rascher und besser wahrgenommen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch viele IEA Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und auch in der Marktumsetzung konnten bereits richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Publikationsreihe und die entsprechende Homepage www.nachhaltigwirtschaften.at gewährleistet wird.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	8
2	Abstract	9
3	Zusammenfassung (optional)	10
4	Ausgangslage (Umfang: 1-2 Seiten)	11
	4.1. Nationale und internationale Positionierung	11
	4.2. Projektüberblick	11
5	Projekthalt (Umfang: max. 5 Seiten)	13
	5.1. Organisation.....	13
	5.2. Dissemination und Austausch.....	13
	5.3. Workshop – Highlights of International Fuel Cell Research 2017 & Meeting zu Annex 31 und Annex 35.....	13
	5.4. 11 th International Summer School on Advanced Studies of PEFCs.....	14
	5.5. Neue Materialien für Brennstoffzellenstapel	15
	5.5.1. HyPE-FC	15
	5.5.2. MEA Power.....	16
	5.6. System, Komponenten und Balance-of-Plant-Gesichtspunkte	16
	5.6.1. PROTECT.....	16
	5.6.2. IAPUNIT.....	17
	5.7. Direkt-Brennstoff-Polymerelektrolytbrennstoffzellen.....	17
	5.7.1. HyStORM	17
6	Ergebnisse (Umfang: mind. 10 Seiten)	18
	6.1. MEA Power.....	18
	6.2. PROTECT	20
	6.3. IAPUNIT	24
	6.4. HyStORM	26
7	Vernetzung und Ergebnistransfer	30
8	Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen	32
9	Anhang	40

1 Kurzfassung

Im Annex 31 des Technology Collaboration Programme on Advanced Fuel Cells der International Energy Agency (IEA) wird die internationale Vernetzung auf den Gebieten der Forschung und Entwicklung von fortschrittlichen Brennstoffzellensystemen gefördert.

Die laufenden Forschungsprojekte befassen sich mit Teilaspekten der Entwicklung und Charakterisierung von Brennstoffzellen und deren Komponenten. Polymerelektrolytsysteme stehen dabei im Fokus. Brennstoffzellen als Hauptenergiewandler in Wasserstoff-Fahrzeugen oder elektrische Hilfsaggregate sind einer Vielzahl von Belastungen ausgesetzt. Kaltstart bei extremen Witterungsbedingungen und Zellschädigung durch Verunreinigungen wie z.B. durch Schwefelverbindungen im Brennstoff stellen hohe Anforderungen an die Materialien und Betriebsstrategien. Untersuchungen zur Aktivität von Katalysatoren und Verbesserung der Lebensdauer unter kritischen Bedingungen, sowie die Bereitstellung von hochreinem und komprimiertem Wasserstoff für Brennstoffzellensysteme bilden zentrale Säulen dieses Annexes.

Um diese Punkte optimal bearbeiten zu können, wurden sie auf mehrere Forschungsschwerpunkte aufgeteilt. Diese umfassten unter anderem die Entwicklung und Evaluierung von Herstellungsmethoden für Membran-Elektroden-Einheiten und Bipolarplatten mit kostengünstigen, neuartigen Materialien und innovativen Herstellungsstrukturen im Projekt „HyPE-FC“, die Lebensdauererhaltung bzw. -verlängerung von PEM-Brennstoffzellen und die Erarbeitung innovativer (Frost-) Start-up und Shutdown (SUSD) Betriebsstrategien im Forschungsprojekt „PROTECT“ und die Evaluierung der Stabilität von Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen für die Anwendung als Hilfsaggregat für mobile Systeme auf Zelllevel im Projekt „IAPUNIT“. Ein System zur dezentralen Erzeugung und Speicherung von Druckwasserstoff zur Versorgung von PEM-Brennstoffzellen wurde im Projekt „HyStORM“ entwickelt. Im Projekt MEA-POWER wurde eine Methode zur Erhöhung der katalytischen Aktivität von kohlenstoffgeträgerten Platinkatalysatoren in phosphorsauren Medien untersucht.

Internationaler Austausch sowie die wissenschaftliche Dissemination erfolgte im Rahmen von Vernetzungstreffen der IEA, die Partizipation an Konferenzen und Tagungen sowie die Veröffentlichung von Artikeln in international renommierten (peer reviewed) Fachzeitschriften.

2 Abstract

Annex 31 of the Technology Collaboration Programme on Advanced Fuel Cells of the International Energy Agency (IEA) promotes the international networking of research, industry and government in the fields of research and development of advanced fuel cell systems.

The current research projects deal with partial aspects of the development and characterisation of fuel cells and their components. Polymer electrolyte systems are in the focus. Fuel cells as main energy converters in hydrogen vehicles or electrical auxiliary power units are exposed to a variety of demands. Cold starts under extreme climatic conditions and cell damage caused by impurities such as sulphur compounds in the fuel place high demands on materials and operating strategies. Studies on the activity of catalysts and improvement of the lifetime under critical conditions as well as the supply of high purity and compressed hydrogen for fuel cell systems are central pillars of this annex.

In order to be able to work on these points in an optimal way, they have been divided into several research priorities. These included the development and evaluation of manufacturing methods for membrane electrode assemblies and bipolar plates with cost-effective, new materials and innovative manufacturing structures in the "HyPE-FC" project. Investigations into extending the service life of PEM fuel cells and the development of innovative (frost) start-up and shut-down (SUSD) operation strategies were carried out in the research project "PROTECT". The focus of the project "IAPUNIT" was the evaluation of the stability of high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cells for use as auxiliary power units for mobile systems at cell level. A system for decentralized production and storage of compressed hydrogen for the supply of PEM fuel cells was developed in the "HyStORM" project. In the project MEA-POWER a method for increasing the catalytic activity of carbon supported platinum catalysts in phosphoric acid media was investigated.

International exchange as well as scientific dissemination took place within the framework of networking meetings of the IEA, participation in conferences and meetings and the publication of articles in internationally renowned peer-reviewed journals.

3 Ausgangslage

3.1. Nationale und internationale Positionierung

Die Standorte der in der Technology Collaboration on Advanced Fuel Cells der IEA aktiven Forschungseinrichtungen sind in Abb. 1 illustriert. Den Schwerpunkt stellt hier Europa dar, Aktivitäten erstrecken sich auch auf Ostasien (Japan und Südkorea), die Vereinigten Staaten sowie Mexiko und Israel. Der globale und international vernetzte Zugang zu Forschung und Entwicklung ist entscheidend für die Qualität und Anwendbarkeit von Technologien. Aktuelle Herausforderungen wie der globale Klimawandel zeigen deutlich, dass inter- und transnationale Vernetzung in Bezug auf erneuerbare Energieträger und fortschrittliche Energiewandler wie Brennstoffzellen entscheidend für die Akzeptanz und den Erfolg von Projekten ist.



Abb. 1: IEA-Standorte der Technology Collaboration on Advanced Fuel Cells.

3.2. Projektüberblick

Verschiedene Anwendungen fortschrittlicher Brennstoffzellen sowie assoziierter Technologien wurden im Rahmen dieses Projekts am Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik bearbeitet. Diese umfassten die Entwicklung und Untersuchung von Komponenten, die Herstellung und Charakterisierung von Einzelzellen unter verschiedenen Betriebsbedingungen und die Bereitstellung von Druckwasserstoff hoher Reinheit.

Im Projekt „HyPE-FC“ wurde durch extensive Literaturrecherche der Grundstein für verbesserte und kostengünstigere Herstellung von Membran-elektroden-Einheiten und Bipolarplatten gelegt. Eine automatisierte Produktion von Zellkomponenten mit neuartigen Materialien wurde aufgebaut.

Eine innovative Methode zur Erhöhung der katalytischen Aktivität von kohlenstoffgeträgerten Platinkatalysatoren in phosphorsauren Medien wurde in „MEA POWER“ untersucht. Ziel des Projektes war, die Entwicklung einer wirtschaftlich profitablen, langzeitstabilen Membran-Elektroden-Einheit (engl. Membrane Electrode Assembly, MEA) im Labormaßstab darzustellen. Hierzu wurden Katalysatoren synthetisiert und in der Aktivschicht immobilisiert. Eine Funktionalisierung des Katalysatorträgermaterials mit Anilin und eine folgende Polymerisation erlaubte es, den Kohlenstoff selektiv mit Polyanilin zu überziehen und so abzuschirmen. Diese Strategie verbesserte nicht nur die Stabilität im sauren Milieu durch den schützenden Film, sondern auch die katalytische Aktivität durch elektronische Wechselwirkungen zwischen Polymer und Pt/C.

Der Einsatz von Brennstoffzellen unter extremen Witterungsbedingungen wurde im Projekt „PROTECT“ erforscht. Dabei stand die Erarbeitung innovativer (Frost-) Start-up- und Shutdown-Betriebsstrategien im Mittelpunkt des Interesses. Frostinduzierte Schädigungsmechanismen wurden aufgeklärt und beurteilt, um Methoden zu deren Vermeidung zu erstellen. Diese Mechanismen umfassen irreversible chemische Schädigung wie zum Beispiel Kohlenstoffkorrosion oder das Ablösen der katalytisch aktiven Spezies, irreversible mechanische Schädigung wie beispielsweise Rissbildung in der Membran, und reversible Effekte wie Leistungseinbrüche durch vorübergehende Eisbildung in der Zelle.

Der Einsatz von teilweise mit Kohlenmonoxid und Schwefelwasserstoff verunreinigtem Brennstoff in Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzellen wurde im Projekt „IAPUNIT“ untersucht. Die Zelle wurde dabei im Langzeittest mit den kontaminierten Gasen betrieben und mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie charakterisiert, um Schädigungseffekte zu detektieren und zu interpretieren.

Im Projekt „HyStORM“ wurde eine Versuchsanlage zur Herstellung, Bereitstellung und Speicherung von brennstoffzellentauglichem Druckwasserstoff mittels Reformer-Eisen-Dampf-Prozess vorgestellt. Das Fundament des Projekts stellen die Entwicklung von geeigneten Materialien und die Charakterisierung von Prozessparametern dar. Optimierung der Parameter zum Einsatz von Biogas erfolgte durch Untersuchung des Prozesses unter Zugabe diverser charakteristischer Modellverbindungen wie beispielsweise zyklischer Kohlenwasserstoffe oder Alkohole. Außerdem wurde eine Methode der CO₂-Abtrennung entwickelt, die die Darstellung eines reinen Kohlendioxidstroms als Nebenprodukt ermöglicht.

4 Projektinhalt

4.1. Organisation

Die Tätigkeiten im Annex 31 wurden in vier Arbeitspakete aufgeteilt. Dabei erfolgte die Koordination bzw. das Management der spezifischen Aufgaben und Arbeitspakete im Zuge von Besprechungen und Meetings. Diese wurden arbeitspaketintern organisiert und dienten der Sicherstellung der Qualität der Ergebnisse und Arbeiten.

4.2. Dissemination und Austausch

Die während des Berichtszeitrahmens veröffentlichten Publikationen sind in Listenform am Ende dieses Berichts aufgeführt. Die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen wurden von Forscher*innen der Arbeitsgruppe für Brennstoffzellensysteme und Wasserstofftechnologie der TU Graz auf internationalen Konferenzen sowie Meetings der IEA präsentiert:

- Workshop „Highlights of International Fuel Cell Research 2017“ und Annex Meeting in Graz, Österreich, 15. – 16. Mai 2017
- Annex Meeting in Washington DC, USA, 05. – 06. Oktober 2017 (Dr. Birgit Pichler)
- IEA Vernetzungstreffen in Salzburg, Österreich, 12. – 13. Oktober 2017 (DI Kurt Mayer)
- IEA Vernetzungstreffen in Wien, Österreich, 09. – 10. Oktober 2018 (DI Kurt Mayer)
- Annex Meeting und 2019 U.S. Department of Energy (DOE) Hydrogen and Fuel Cells Program Annual Merit Review and Peer Evaluation in Arlington, USA, 29. April – 03. Mai 2019 (Prof. Viktor Hacker)
- IEA Vernetzungstreffen in Innsbruck, Österreich, 25. – 26. September 2019 (DI Michael Lammer)

Das Annex Meeting im Frühjahr 2020 an der Universität Poitiers, Frankreich, fand auf Grund der Covid-19-Pandemie nicht statt.

4.3. Workshop – Highlights of International Fuel Cell Research 2017 & Meeting zu Annex 31 und Annex 35

Am 15. Mai 2017 fand in der Aula der TU Graz der Workshop “Highlights of International Fuel Cell Research 2017” statt. Über 70 Teilnehmer*innen aus 13 Ländern besuchten diese Veranstaltung, welche von der Arbeitsgruppe für Brennstoffzellensysteme und Wasserstofftechnologie organisiert und ausgerichtet wurde.

Prof. Harald Kainz, Rektor der Technischen Universität Graz, eröffnete den Workshop und begrüßte die renommierten Wissenschaftler. Theodor Zillner, Vertreter des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), wies auf die Bedeutung des internationalen Netzwerks IEA und die internationale Zusammenarbeit in Wissenschaft und Technologie hin.

D.J. Liu, Argonne National Laboratory USA und Operating Agent von Annex 31 und Fabio Matera, Consiglio Nazionale delle Ricerche Italien und Operating Agent von Annex 35, stellten das IEA Technology Collaboration Programme und die Annexes vor. Prof. Viktor Hacker, Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik der TU Graz und lokaler Organisator des Workshops, gab einen kurzen Überblick über die Forschungsgruppen im Bereich Brennstoffzellen in Österreich. In der Hauptsession präsentierten und diskutierten die Experten in 15 Vorträgen die Ergebnisse und wissenschaftlichen Errungenschaften der internationalen Brennstoffzellenentwicklung. Am Abend bot die Postersession die Möglichkeit zur Diskussion mit den Experten und nationalen Vertretern der Annexes.

Das kombinierte Meeting zu Annex 31 und Annex 35 wurde am 16. Mai 2017 in den Räumen des Instituts für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik abgehalten. Hideo Inoue, Alexander Dyck und Werner Lehnert hielten Fachvorträge zu den Forschungsaktivitäten an ihren jeweiligen Einrichtungen. Die Planung der zukünftigen Aktivitäten, Veröffentlichungen und Konferenzen bildete die zweite Hälfte des Meetings. Das Annex Meeting wurde von einer Laborführung am ICVT, einem Gruppenfoto (Abb. 2) und einer gemeinsamen Stadtführung durch Graz abgerundet.



Abb. 2: Gruppenbild vom kombinierten Annex 31 und Annex 35 Meeting an der TU Graz am 16. Mai 2017.

4.4. 11th International Summer School on Advanced Studies of PEFCs

Die Summer School findet jährlich, alternierend in Graz und Yokohama statt. Im Jahr 2018 wurde diese von der Arbeitsgruppe organisierte Veranstaltung vom 21. – 25. August an der TU Graz abgehalten.

Der einwöchige Intensivkurs beinhaltete sowohl elektrochemische Grundlagen, Aspekte der Katalyse, Thermodynamik und Messtechniken von Brennstoffzellensystemen als auch die Wasserstofferzeugung, die Wasserstoffspeicherung und relevante Anwendungen. Internationale Vortragende und Teilnehmer*innen aus Industrie und Forschung trugen dazu bei, diese Veranstaltung zu einem charaktvollen und interessanten Tag zu machen. Vier Forscher aus Israel,

Deutschland, Österreich und Japan hielten im Rahmen des inkludierten Workshops Keynote-Vorträge zu unterschiedlichen Aspekten von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.

Teilnehmende Studierende hatten auch die Gelegenheit, ihre jeweiligen wissenschaftlichen Projekte und Erfolge zu präsentieren. In der Postersession wurden 33 Poster von teilnehmenden Studierenden ausgestellt und diskutiert. Unterschiedliche Themen wurden im vorgestellt – von Brennstoffherstellung und -handhabung, über Katalysatorsynthese und -charakterisierung bis hin zum Zelldesign. Die besten Beiträge bzw. die jeweiligen Autor*innen wurden mit Posterpreisen ausgezeichnet.



Abb. 3: Abschlussfoto der 11th International Summer School on Advanced Studies of PEFCs am Campus der TU Graz.

4.5. Neue Materialien für Brennstoffzellenstapel

4.5.1. HyPE-FC

Im Zuge des Sondierungsprojektes „HyPE-FC - High performance fuel cells for road, rail and boat traffic“ und dem geplanten Folgeprojekt „HyPER-FC“ werden im Expertennetzwerk die Herstellungsmethoden für MEAs und Bipolarplatten mit kostengünstigen, neuartigen Materialien und innovativen Herstellungsstrukturen evaluiert, um die Leistung zu erhöhen und gleichzeitig die Kosten zu reduzieren.

Die Polymerelektrolytbrennstoffzelle (PEFC) wird weltweit entwickelt, um eine nachhaltige, umweltfreundliche und effiziente Energiebereitstellung zu realisieren. Als Antriebskonzept für elektrische Fahrzeuge befindet sich die PEFC bereits im Prozess der großflächigen Markteinführung. Für die Massenfertigung von PEFCs sind jedoch noch die weitere Reduktion der Systemkosten und der Aufbau von Produktionsinfrastrukturen notwendig. Ein wesentlicher Beitrag zur Kostenreduktion muss am Herzstück der Brennstoffzelle, der Membran-Elektroden-Einheit (MEA) und den Bipolarplatten erreicht werden. Dazu werden innovative Herstellungsmethoden zur Produktion der Brennstoffzellen mit hohen Leistungsdichten analysiert und entwickelt.

In der Sondierungsphase werden die vorhandenen Kompetenzen an der TU Graz mit den Partnerunternehmen und den internationalen Forschungspartnern vernetzt und die Infrastruktur für das Folgeprojekt vorbereitet. Diese Arbeiten umfassen auch die Analyse von innovativen Technologien wie der Anionenaustauschmembran-Brennstoffzelle (anion exchange membrane fuel cell AEMFC) als eine potentielle Alternative für zukünftige Anwendungen in der Mobilität. In der Untersuchung der Technologien werden die unterschiedlichen Anforderungen in der Produktion der Elektroden, Membranen und Bipolarplatten erarbeitet. Vielversprechende neue Konzepte werden in der Sondierungsphase von den Projektpartnern unmittelbar im Labor realisiert. Die Materialien und Designs werden unter den Aspekten der erreichbaren Leistungsdichten, der Kosten und der Lebensdauer unter anwendungsspezifischen Betriebsbedingungen und Anforderungen gereiht.

4.5.2. MEA Power (HTPEM)

Als Elektrolyt verwendet diese Brennstoffzelle mit Phosphorsäure (H_3PO_4) dotierte Polymere Membranen, welche hervorragende Eigenschaften für spezielle Anwendungen bieten. Allerdings limitiert die Anwesenheit von Phosphorsäure die katalytische Aktivität des Platinkatalysators (Pt/C) auf der Kathode gegenüber der Sauerstoff-Reduktionsreaktion (Oxygen Reduction Reaction, ORR) erheblich. Dies ist auf die Adsorption unterschiedlicher Phosphatspezies an der Katalysatoroberfläche zurückzuführen, wodurch katalytisch aktive Zentren blockiert werden.

Im Rahmen des Projektes „MEA Power“ wird diese Phosphatadsorption mit Hilfe der Funktionalisierung von Pt/C mit Polyanilin (PANI) geschwächt. Dabei bildet PANI einen schützenden Film um Pt/C und verhindert somit die durch Phosphationen verursachte Oberflächenbedeckung der Platinpartikel. Infolgedessen zeigen PANI-funktionalisierte Platinkatalysatoren (Pt/C@PANI) eine erhöhte Stabilität in der sauren Umgebung einer HT-PEFC. Gleichzeitig führen intermolekulare Wechselwirkungen zwischen Pt/C- und PANI-Orbitalen zu einer erhöhten katalytischen Aktivität des Katalysators.

4.6. System, Komponenten und Balance-of-Plant-Gesichtspunkte

4.6.1. PROTECT

Das Projekt „PROTECT – Performance Recovery Strategy & Advanced Control for Efficient Fuel Cell Operation“ zielt auf die Lebensdauererhaltung bzw. -verlängerung von PEM-Brennstoffzellen über die Erarbeitung innovativer (Frost-) Start-up und Shutdown (SUSD) Betriebsstrategien ab und verfolgt dabei diese Ziele:

- Identifikation von Leistungsverlusten hervorgerufen durch reversible und irreversible Degradation betroffener Komponenten
- Priorisierung der Schädigungsmechanismen
- Übersicht über vorhandene (Frost-) SUSD Studien (Literaturrecherche)
- Erarbeitung optimierter (Frost-) SUSD Strategien
- Evaluierung ausgewählter Betriebsprotokolle in Einzelzelltests in Bezug auf Wirksamkeit und Umsetzbarkeit
- Bestimmung der Degradation in den entwickelten (Frost-) SUSD Strategien

Die wesentlichen, von irreversiblen Leistungsverlusten beeinträchtigten Komponenten werden dargestellt und in ihrer Relevanz beurteilt. Durch diese Priorisierung der Schädigungsmechanismen wird dann eine Strategie zur Anpassung der (Frost-) SUSD Protokolle erarbeitet. Die optimierten Betriebsstrategien werden dann in Einzelzelltests umgesetzt. Die Änderung der Degradationsraten, die sich aus den erarbeiteten SUSD und Betriebsprotokollen ergeben, werden unter realitätsnahen Bedingungen eruiert. Ein als Referenz definiertes Protokoll wird als Vergleich herangezogen.

Durch umfassende elektrochemische und analytische Charakterisierung können die jeweiligen Schädigungsmechanismen klar bestimmt werden. Ziel ist es, eine verringerte Degradationsrate klar quantifizieren zu können. Somit haben die entwickelten Strategien in automobilen PEM-Brennstoffzellen hohes Potenzial für die kommerzielle Verwertung, sodass die Projektergebnisse einen wesentlichen Beitrag für die nachhaltige Mobilität liefern werden.

4.6.2. IAPUNIT

Im Projekt "IAPUNIT - Development of an Innovative Auxiliary Power UNIT based on high-temperature PEM fuel cell and reforming technology for logistic fuels" wird ein Hilfsantrieb basierend auf einer Hochtemperatur Polymerelektrolyt Membran Brennstoffzelle entwickelt. Für diese Zwecke werden von der Arbeitsgruppe Messungen an Einzelzellen durchgeführt. Es werden PBI (Polybenzimidazol) Membrane mit Phosphorsäure-Dotierung verwendet und anodenseitig mit verunreinigtem Wasserstoff betrieben. Diese Verunreinigung setzt sich zusammen aus 1% Kohlenmonoxid und 10 ppm Schwefelwasserstoff. Mit diesem Gas werden Langzeittests und Start-Stopp Zyklen durchgeführt.

4.7. Direkt-Brennstoff-Polymerelektrolytbrennstoffzellen

4.7.1. HyStORM

Im Projekt "HyStORM - Wasserstoffspeicherung durch Oxidation und Reduktion von Metallen" der TU Graz, AVL List GmbH und Rouge H₂ Engineering GmbH wird ein System zur dezentralen Speicherung von Druckwasserstoff entwickelt. Das Konsortium befasst sich mit maßgeblichen Herausforderungen für eine zukünftige Anwendung für die Brennstoffversorgung von PEM-Brennstoffzellen, wie sie im Folgenden vorgestellt werden.

Darüber hinaus wurde der Proof-of-Concept für die Herstellung von reinem Druckwasserstoff in Kombination mit der Sequestrierung eines reinen Kohlendioxidstroms mit dem Reformier-Eisen-Dampf-Prozess vorgestellt. Die Kohlendioxidabscheidung erfolgte durch partielle Reduktion des Sauerstoffträger-Materials von Fe₂O₃ auf Fe₃O₄. Nach jeder Oxidation mit Dampf wurde zusätzlich eine Luftoxidation durchgeführt, um die Kontaktmasse wieder auf das voll oxidierte Niveau zu bringen. Dabei wurden Produktgasdrücke von bis zu 30 bar und eine Gasreinheit von über 99% erreicht.

5 Ergebnisse

Die in den einzelnen Arbeitspaketen erzielten Ergebnisse wurden in Peer-Review-Journalen veröffentlicht und auf Konferenzen und Tagungen vorgestellt. Im Anhang befindet sich eine vollständige Liste aller Artikel, Poster und Konferenzbeiträge, welche im Rahmen dieses IEA-Annexes entstanden sind. Hier werden diese Ergebnisse zusammengefasst und entsprechend ihres jeweiligen Projektes nach Arbeitspaketen geordnet.

5.1. MEA Power

Polyanilin-funktionalisierte Pt-Katalysatorpartikel (Pt/C@PANI) wurden durch eine oxidative Polymerisation von Anilin auf Pt/C synthetisiert (Abb. 4). Um den Einfluss von PANI auf die Stabilität und Aktivität in phosphorsäurehaltigem Elektrolyten zu untersuchen, wurden Katalysatoren mit unterschiedlichen PANI-Anteilen (30 und 10 wt%) hergestellt. Jeder Katalysator hatte einen Metallgehalt von 50 wt%.

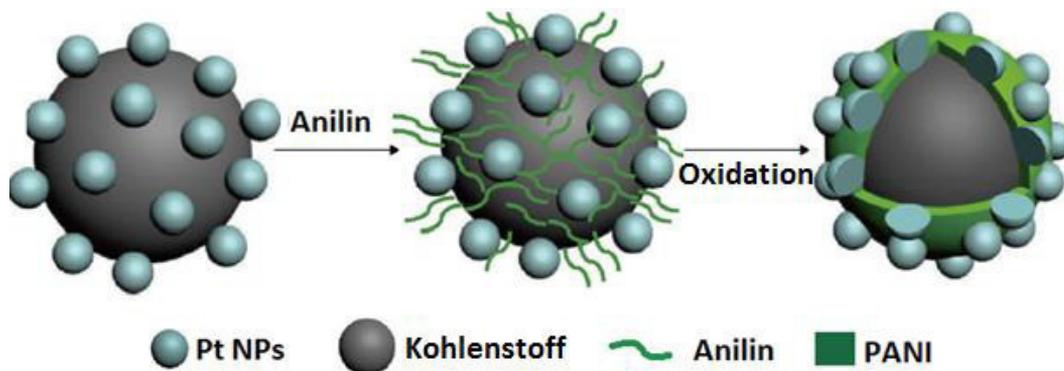


Abb. 4: Schematische Darstellung der Pt/C@PANI Synthese.

Die ex-situ Charakterisierung der Katalysatoren erfolgte mittels Rotating-Disc-Electrode-Methode, wobei ein Standard 3-Elektroden Setup verwendet wurde. Zur Bestimmung der Massenaktivität (MA) und der Sauerstoffreduktionsreaktions-Aktivität der jeweiligen Katalysatoren, wurden Cyclovoltammogramme in stickstoff- und sauerstoffgesättigtem Elektrolyten gemessen. Der Einfluss von PANI auf die Aktivität des Katalysators in Anwesenheit von Phosphationen wurde überprüft, indem jeder Katalysator auch in 1 mM und 5 mM Phosphorsäure in HClO_4 charakterisiert wurde.

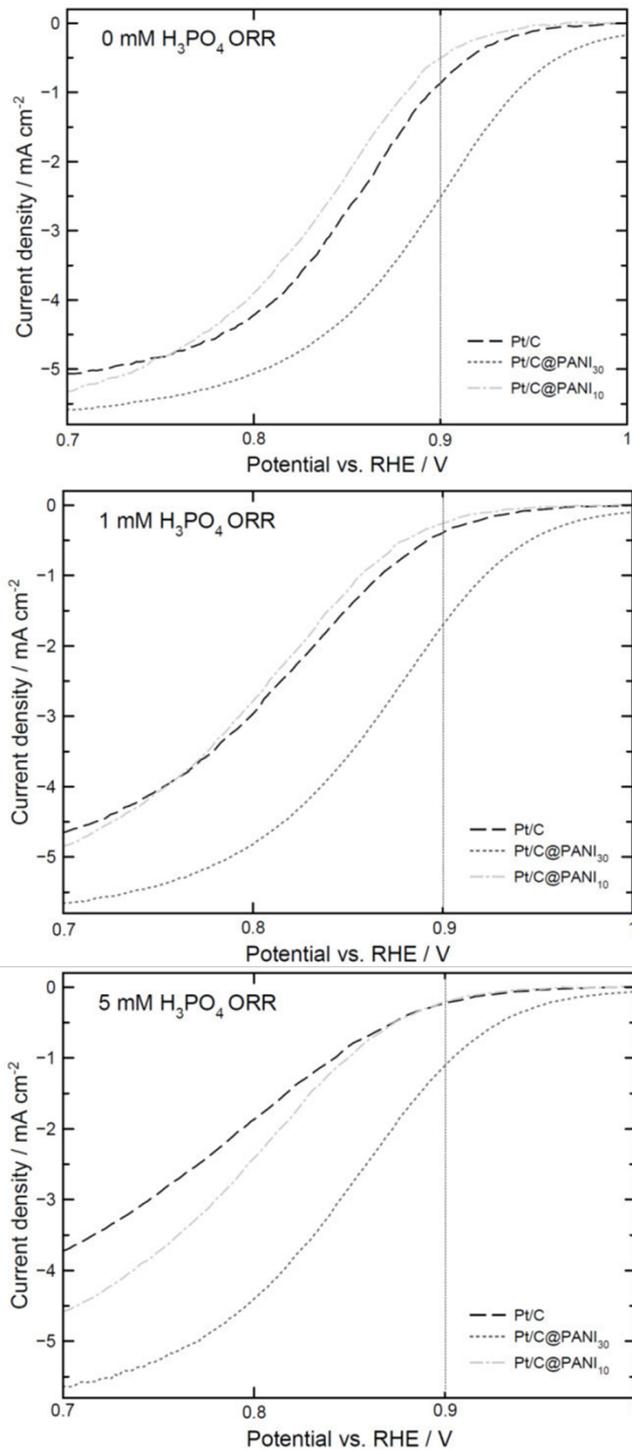


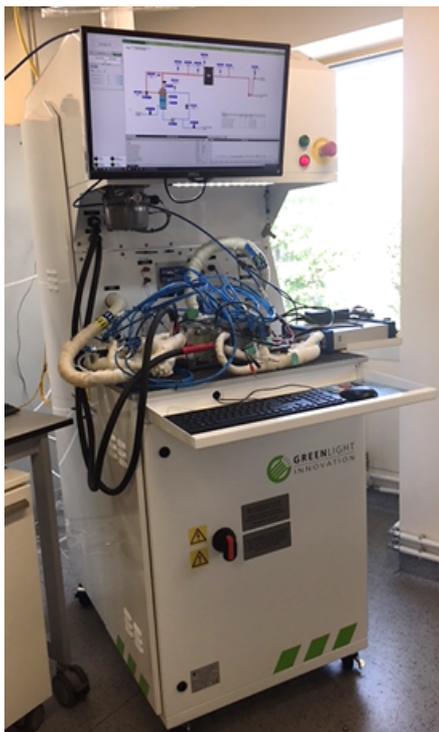
Abb. 5: ORR Aktivitätsdaten der Katalysatoren bei unterschiedlichen Konzentrationen von Phosphorsäure im Elektrolyten: a) Vergleich von Pt/C, Pt/C@PANI₃₀ und Pt/C@PANI₁₀ ohne Phosphorsäure, b) Pt/C, Pt/C@PANI₃₀ und Pt/C@PANI₁₀ in 1 mM Phosphorsäure und c) Pt/C, Pt/C@PANI₃₀ und Pt/C@PANI₁₀ in 5 mM Phosphorsäure. Zoom in den relevanten Potentialbereich.

Durch die Funktionalisierung des Platinkatalysators mit PANI konnten mittels einer oxidativen Polymerisationsreaktion Katalysatoren hergestellt werden, die in der Anwesenheit von Phosphationen im Elektrolyten aktiver und stabiler waren als pure Platinkatalysatoren. Selbst in reinem Elektrolyten wurde im Falle von Pt/C@PANI₃₀ durch intermolekulare Wechselwirkungen

eine Erhöhung der MA von mehr als 50% erreicht. Im Vergleich zu reinem Pt/C. Pt/C@PANI₁₀ betreffend, ist die PANI Konzentration zu gering um eine ausreichende Schutzhülle um die Nanopartikel zu bilden, sodass die Adsorption von Phosphationen in diesem Fall nicht verhindert werden konnte, was zur niedrigsten MA der drei Proben führte (Abb. 5). Dadurch empfiehlt sich eine weitere Analyse unterschiedlicher PANI Anteile, um das optimale Verhältnis zwischen Pt und PANI zur Vermeidung der Phosphatadsorption zu finden.

5.2. PROTECT

Zur Durchführung der Einzelzelleexperimente wurde ein kommerzieller Teststand für PEM-Brennstoffzellen angeschafft (Abb. 6). Des Weiteren wurden eine Zellkompressionseinheit inklusive Testzelle (25 cm²), sowie kommerzielle Membran-Elektroden-Einheiten erworben (Abb. 7).



Specifications

- Anode flow, 2x MFC: H₂ (3 NLPM), N₂
- Cathode flow, 2x MFC: Air/O₂ switchable (6 NLPM), N₂
- Humidification module (up to 90 °C)
- Bypass permits delivery of gas directly to stack
- Electrical reheat module (up to 110 °C)
- Stack end-plate heater (2x 2 A max)
- Nitrogen purge rotameter
- Back pressure control (0-3 Barg)
- 650 W electronic load bank, up to to 1.4 kW, air cooled
- Zero volt compensation
- CVM (cell voltage monitoring), 5 channels
- Emerald control and automation software

Abb. 6: G60 PEM Brennstoffzellen Teststand der Firma Greenlight und dessen Systemspezifikationen.

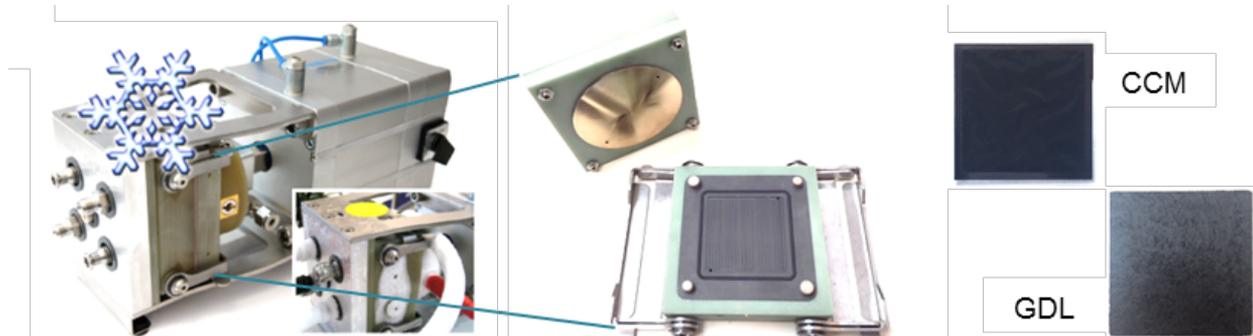


Abb. 7: Zellkompressionseinheit, Testzelle (beides balticFuelCells GmbH) und Materialien einer Membran-Elektroden-Einheit (Greenenergy).

In einer Literaturrecherche und aus dem Knowhow aus früheren Projekten an der TU Graz wurden folgende irreversible Schädigungen in der Brennstoffzelle während bzw. nach wiederholten (Frost-) SUSD Vorgängen identifiziert und hinsichtlich ihrer Relevanz beurteilt.

Irreversible chemische Degradation:

- Kohlenstoffdegradation (Kohlenstoffkorrosion und/oder -oxidation).
- Katalysatordegradation (Agglomeration und/oder Loslösen von Pt-Partikeln).
- Verlust von ionenleitenden Spezies in der Membran.

Irreversible mechanische Degradation:

- Veränderung der Elektrodenstruktur durch Partikelmigration oder Eisbildung.
- Risse, Löcher in der Membran durch Partikelmigration oder Eisbildung.

Reversible Degradation:

- Leistungsverluste durch vorübergehende Eisbildung an der Grenzfläche zwischen Elektrode und Gasdiffusionsschicht.

Daten aus der Literatur wurden gesammelt (Abb. 8) und in einer Tabelle zusammengefasst. Neben der Entfernung des Wassers aus der Zelle beim Shutdown, können die vorgeschlagenen Lösungen für (Frost-) SUSD in zwei Kategorien eingeteilt werden; entweder verbraucht das System beim Start-up oder nach dem Shutdown Energie.

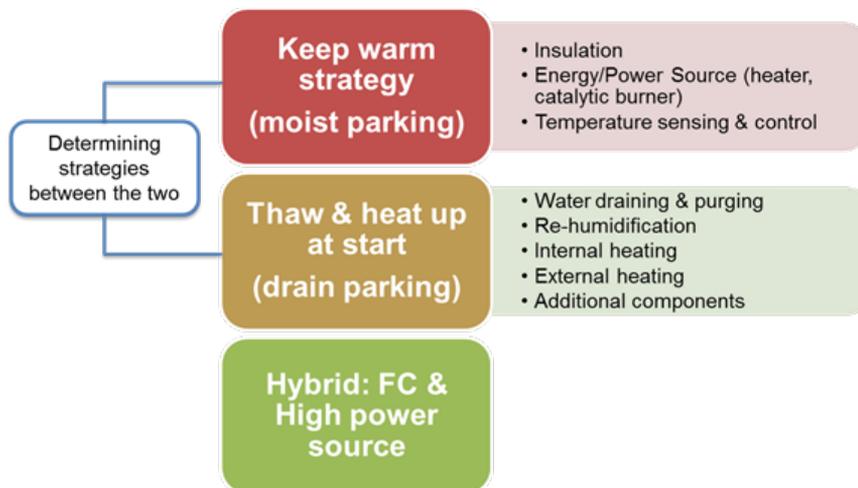


Abb. 8: Häufigste (Frost-) SUSD Strategien aus der Literaturrecherche.

Vorerst wurden SUSD-Protokolle entwickelt, die unter Normalbedingungen getestet wurden, um sicher zu stellen, dass die Ergebnisse nur auf SUSD Effekte zurückzuführen sind und nicht auf andere Einflüsse. Basierend auf der Strategie, eine auftretende Wasserstoff-Luft Grenzfläche in der Anode gänzlich zu vermeiden, wurde eine realitätsnahe Strom-kontrollierte SUSD Referenzstrategie entwickelt. Die Zelle, bestehend aus einer Membran-Elektroden-Einheit mit einer Nafion-Membran und einem Platin-Katalysator, wurde bei 80 °C, atmosphärischem Druck mit Wasserstoff und synthetischer Luft mit jeweils 80 und 30% relativer Feuchte auf Anode und Kathode betrieben. Die einzelnen Schritte dieser SUSD Sequenz sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Einzelne Schritte der SUSD Referenzstrategie.

Start-up Strategie	Aktion	Zeit [s]
O ₂ Verbrauch _{OCV}	1. Gaszufuhr ein, Zelle bei OCV halten	5
	2. Zelle bei 0.5 A cm ⁻² betreiben	60
	3. Zelle bei OCV halten	10
	4. Last und Luftzufuhr aus	5
	5. Zelle bei 2.5 A betreiben um O ₂ zu verbrauchen	10
	6. Spannung potentiostatisch bis 20 mV reduzieren	5
	7. Last aus wenn Strom unter 50 mA abfällt	30

Abb. 9 illustriert die Zellspannung und Stromdichte als Funktion der Zeit für einen typischen Start/Stopp Vorgang für die oben erwähnte Strategie. Diese sogenannte Sauerstoffverbrauch-Strategie, die auch als ‚Abschalten mit Scheinlast‘ bezeichnet wird, ist gekennzeichnet dadurch, dass die Zeit zur Entwicklung einer Sauerstoff-Luft Grenzschicht durch Diffusion verringert wird und somit die Kathode vor übermäßig hohen Potentialen während eines SUSD geschützt wird.

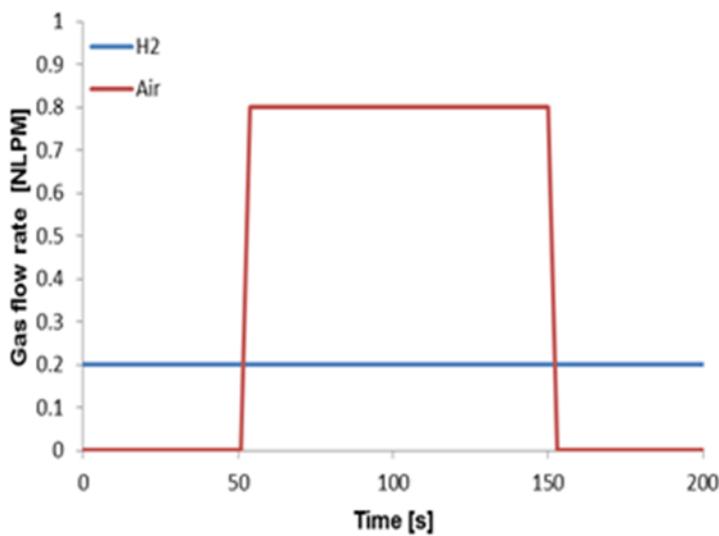
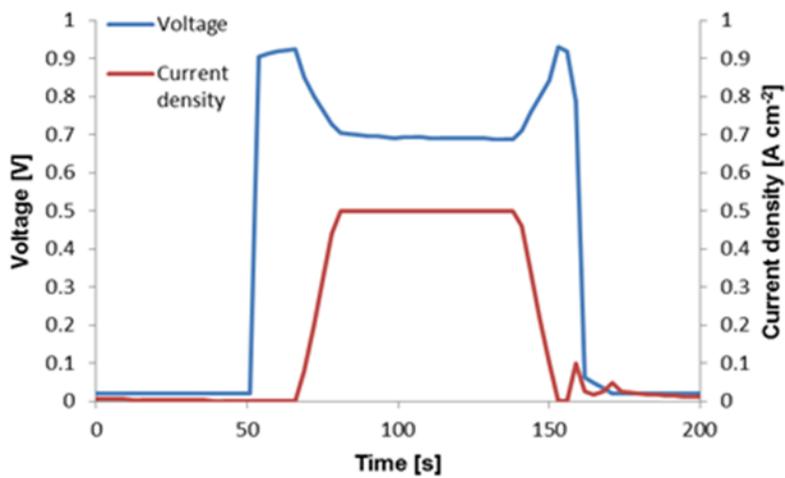


Abb. 9: Zellspannung und Zellstrom beim Start/Stopp Vorgang mit Sauerstoffverbrauch (Abschalten mit Scheinlast).

Die Zellspannung der Testzelle wurde während 200 aufeinanderfolgender SUSZ Zyklen aufgezeichnet (Abb. 10). Obwohl Sauerstoff vollständig verbraucht wird, ist eine Abnahme des ursprünglichen Zellpotentials um 5,7% auf Elektrodendegradation zurückzuführen, die vermutlich durch das Auftreten lokal erhöhter Potentiale zustande kommt. Um Membran oder Katalysatordegradation nachzuweisen, werden weitere elektrochemische Untersuchungen wie zyklische Voltammetrie und Impedanzspektroskopie durchgeführt.

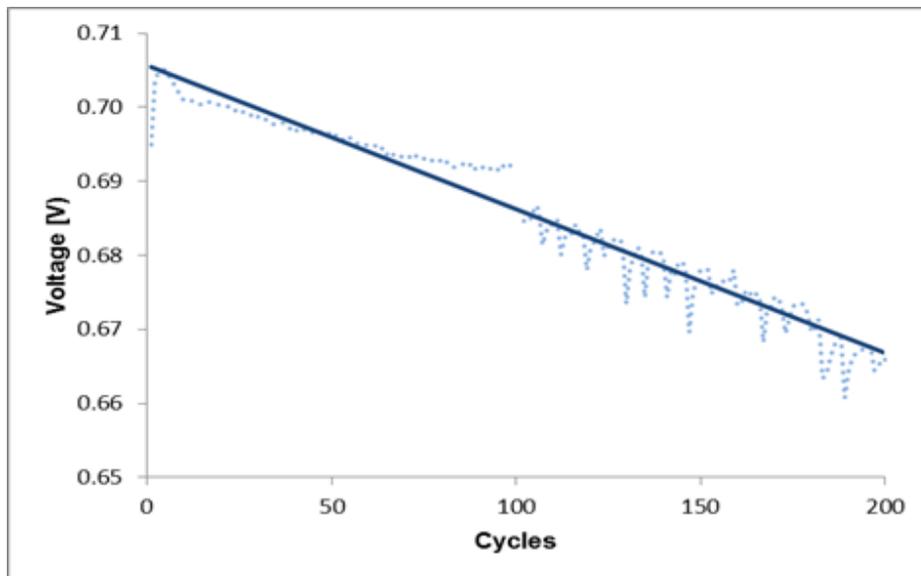


Abb. 10: Spannungsverhalten einer einzelnen Testzelle über 200 SUSD Zyklen mittels entwickelter Sauerstoffverbrauch-Strategie.

Ausblick bezogen auf die Entwicklung von (Frost-) SUSD Strategien im weiteren Projektverlauf

Die entwickelte Referenzstrategie wird auf zwei Arten modifiziert, indem einerseits die Zelle nicht auf OCV gehalten wird, und andererseits der Strom stufenweise erhöht wird. Die Leistungskurven nach wiederholten SUSD Vorgängen mit den jeweiligen Strategien werden verglichen und interpretiert.

Bei Frost-SUSD stellt neben der Bildung einer anodenseitigen Wasserstoff/Luft Front noch gefrorenes Wasser in der Zelle zusätzlich eine Degradationsursache dar. Die für Normalbedingungen entwickelten SUSD-Strategien sollen bei Temperaturen unter 0 °C getestet werden. Im Hinblick auf die Wärmeentwicklung der Zelle während des (Frost-)Starts wird eine Strategie ausgewählt. Durch Modifikation der Betriebsparameter (Variation der Stromdichten, der Gasspüldauer, ...) wird jene Strategie optimiert, um eine Strategie mit klar verminderter Degradation zu erreichen.

5.3. IAPUNIT

Im Projekt "IAPUNIT - Development of an Innovative Auxiliary Power UNIT based on high-temperature PEM fuel cell and reforming technology for logistic fuels" soll ein Hilfsantrieb basierend auf einer Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle entwickelt werden. Die Anwendung von HT-PEMFC vereinfacht unter anderem das Wassermanagement, die Kühlung, die Abwärme kann weiter genutzt werden und vor allem ist es möglich, Wasserstoff in geringerer Reinheit einzusetzen.

Im Zuge dieses Projekts wird eine Entschwefelungsanlage entwickelt, die auf dem Prinzip der Hydrodesulfurierung (HDS) basiert. Das dadurch entstandene Brenngas wird dann in einen Autothermen (ATR) eingespeist und anschließend durch eine zweistufige Water-Gas-Shift Reaktion (WGS) in wasserstoffreiches Gas umgewandelt.

Der hier entstandene (verunreinigte) Wasserstoff wird nun auf die Anode einer HT-PEM Brennstoffzelle (bzw. Brennstoffzellen-Stack) übertragen. Zusätzlich werden THDA durch einen weiteren österreichischen Projektpartner (Total harmonic distortion analysis) Messungen des Brennstoffzellen-Stacks durchgeführt.

Durch die Brennstoffzellen-Arbeitsgruppe der TU Graz werden Messungen an Einzelzellen durchgeführt. Die dafür verwendete Zelle ist in Abb. 11 dargestellt.

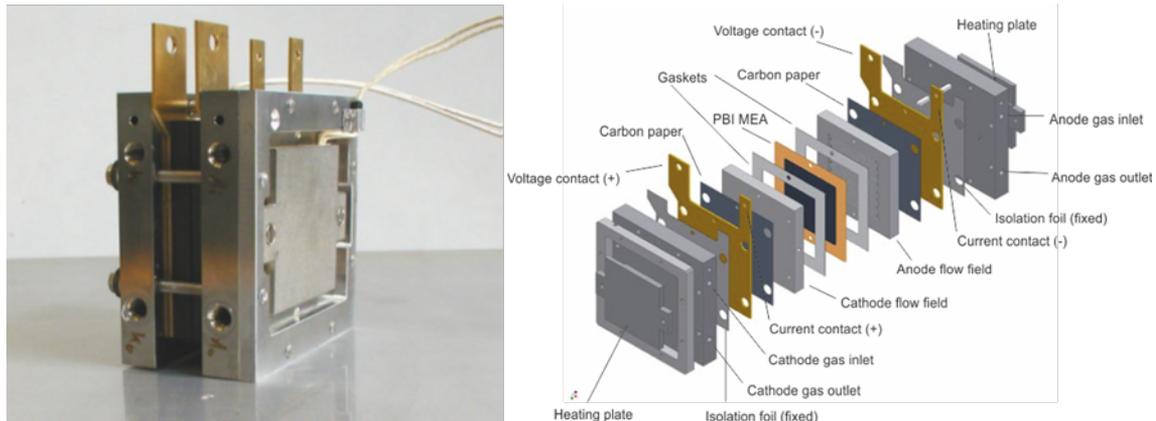


Abb. 11: BASF 50 cm² Brennstoffzelle mit PBI Membran (Original-Brennstoffzelle)

Die an der TU Graz durchgeführten Aufgabenpakete sind wie folgt:

- Auswahl und Beschaffung der MEAs (Membrane Electrode Assembly)
- Planung und Konstruktion eines geeigneten Teststands
- Geeignete Protokolle und Durchführung von Langzeittests und Start-Stopp Zyklen
- Auswahl und Auswertung von geeigneten Versuchsparameter bezogen auf die Verunreinigungen des verwendeten Gases

Zu Beginn des Projektes wurde ein Modell für einen mobilen HT-PEM-Teststand designt und im Laufe der Zeit ergänzt bzw. umgebaut. Zusätzlich wurde eine Sicherheitsbox um den Teststand gebaut, um sicher zu stellen, dass es zu keinem Entweichen giftiger Gase kommt (Abb. 11).

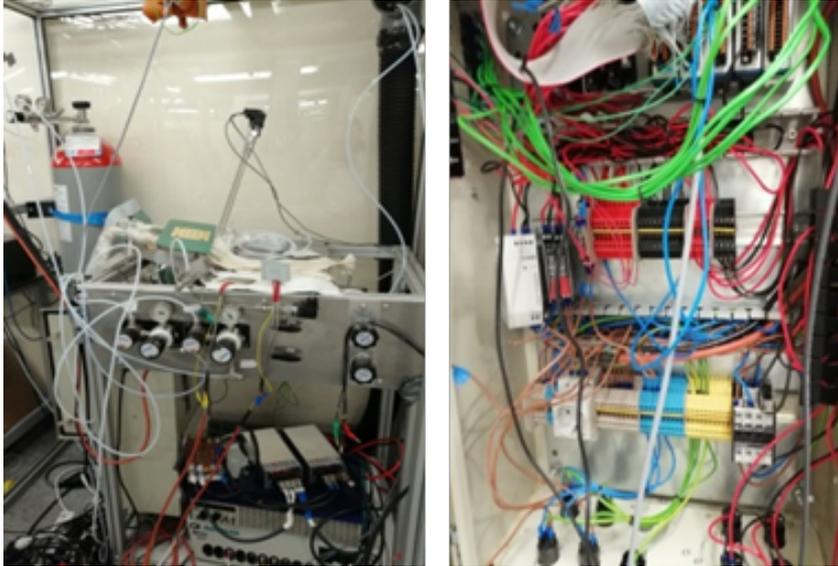


Abb. 12: IAPUNIT-Teststand mit dazu gehörigem Schaltkasten.

In Abb. 12 ist das R&I-Fließschema des Teststands dargestellt. Mass Flow Controller kontrollieren den Stickstoff- und Luftstrom (Dreiwegeventil) an der Kathodenseite (bis 3000 ml min^{-1}) und an der Anodenseite wird der Wasserstofffluss (mit H_2S und CO ; bis 1000 ml min^{-1}) vorgegeben. Ebenfalls kann durch eine zusätzliche Gasleitung (mit Magnetventil) zwischen Anode und Kathode, auch die Anode mit Stickstoff gespült werden.

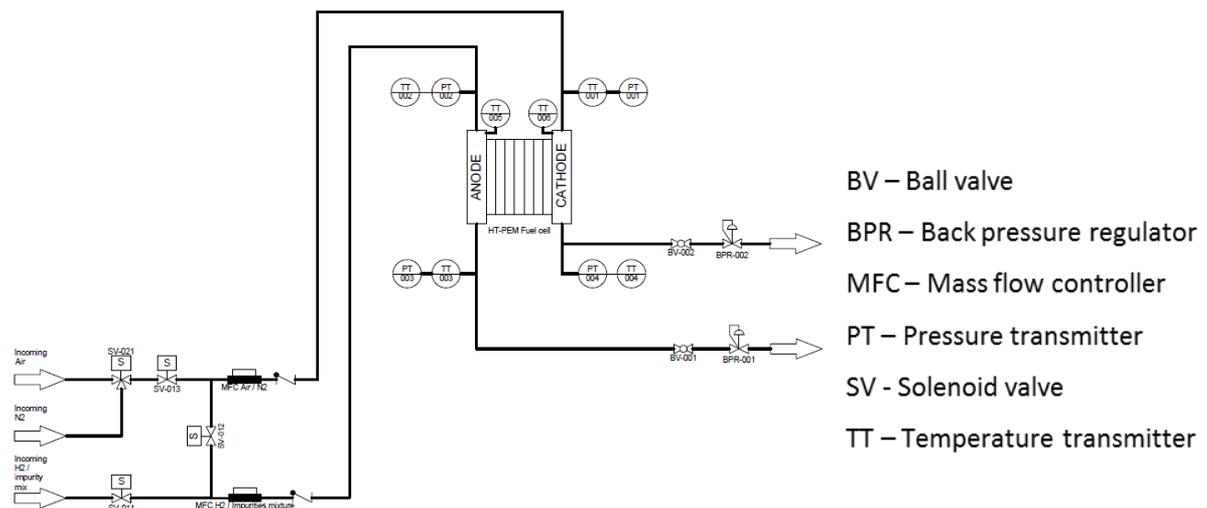


Abb. 13: Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema des Teststands

Die Zelle, die mit zwei segmentierten Platten ausgestattet ist, wird über zwei Heizplatten (an den Endplatten) geheizt. Des Weiteren wird die Temperatur (und auch der Druck) vor und nach der Zelle gemessen. Die durchgeleiteten Gase werden anschließend mit Hilfe von Teflonschläuchen in den Gasabzug geleitet.

Um sichere Langzeitversuche durchführen zu können, ist ein Wasserstoffdetektor in LabVIEW integriert, um bei zu hoher Gaskonzentration einen Alarm auszulösen. Zusätzlich werden Alarmer bei

zu hohen Temperaturen, Ausfall des Gasflusses und weiteren Problemen über ein GSM-Modul weitergeleitet. Zur allgemeinen Ansteuerung und Automatisierung des Teststands wurde LabVIEW verwendet.

Der Langzeittest wird über 1000 h bei 160 °C betrieben, dabei wird in etwa alle 100 Stunden eine U-I-Kurve und eine (bzw. zwei) Impedanzmessung durchgeführt. Am Ende des Langzeittests soll eruiert werden, ob und inwieweit die verwendete Membran geschädigt wurde. Bei den 200 Start-Stopp-Messungen soll eine Strategie entwickelt werden, die es ermöglicht, die Brennstoffzelle so gut und so schonend wie möglich in Betrieb zu nehmen (und runterzufahren). Dafür wird dasselbe Gas wie für den Langzeittest verwendet.

5.4. HyStORM

Im Projekt wurde der Proof-of-Concept für die Herstellung von reinem Druckwasserstoff in Kombination mit der Sequestrierung eines reinen Kohlendioxidstroms mit dem Reformier-Eisen-Dampf-Prozess (RESC-Prozess) vorgestellt. Die Kohlendioxidabscheidung erfolgte durch partielle Reduktion des Sauerstoffträger-Materials von Fe_2O_3 auf Fe_3O_4 . Nach jeder Oxidation mit Dampf wurde zusätzlich eine Lufoxidation durchgeführt, um die Kontaktmasse wieder auf das voll oxidierte Niveau zu bringen. Dabei wurden Produktgasdrücke von bis zu 30 bar und eine Gasreinheit von über 99% erreicht.

Im Rahmen weiterer Forschungsaktivitäten wurde 2018 eine Versuchsanlage zur Wasserstoffherzeugung mit einer Ausgangsleistung von 10 kW aus Methan und mit 18 kg Eisenoxid-basierter Kontaktmasse vorgestellt. Das System war in der Lage, hochreinen Wasserstoff von mehr als 99,999% aus Methan zu erzeugen. Die laufende Forschung konzentriert sich insbesondere auf die Nutzung biogener Ressourcen wie Biogas oder vergaste Biomasse. Im Rahmen der experimentellen Forschung wurde in dieser Berichts-Periode die Anwendbarkeit von synthetischen Biogasgemischen von Bock et al. nachgewiesen. Mehrere Biogaszusammensetzungen wurden auf ihre Eignung für die Wasserstoffherzeugung untersucht. Versuchsreihen zu folgenden Themen wurden durchgeführt:

- Erhöhung des Prozesswirkungsgrades durch Anpassung der Systemparameter
- Untersuchung des thermischen Verhaltens der exothermen und endothermen Reaktionen im Fixed-Bed Reaktor
- Untersuchungen der Zyklenstabilität der eingesetzten Metalloxide im Fixed-Bed und Einfluss der thermischen und mechanischen Belastungen
- Verbesserung der erreichbaren Wasserstoffqualität für den Einsatz in Niedertemperaturbrennstoffzellen

Aus den Ergebnissen der Versuche sowie der Vorversuche von Stephan Nestl und Gernot Voitic entstanden im Jahr 2018 zwei Publikationen, in welchen die Eignung des RESC-Prozesses für die Wasserstoffproduktion evaluiert wird. Durch die Weiterentwicklung des Versuchslayouts konnten kritische Aspekte wie Kohlenstoffbildung während der Reduktion des Metalloxids vermieden werden und somit die Grundlage für eine hohe Produktgasqualität gelegt werden (siehe Abb. 14). Parallel laufende Langzeittests in einem kleineren Teststand ermöglichen die permanente Verbesserung der eingesetzten Materialien. Das ist besonders entscheidend für spätere

Anwendungen, da die eingesetzten Materialien bauartbedingt nicht im Betrieb gewechselt werden, weshalb eine hohe Stabilität Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz ist.

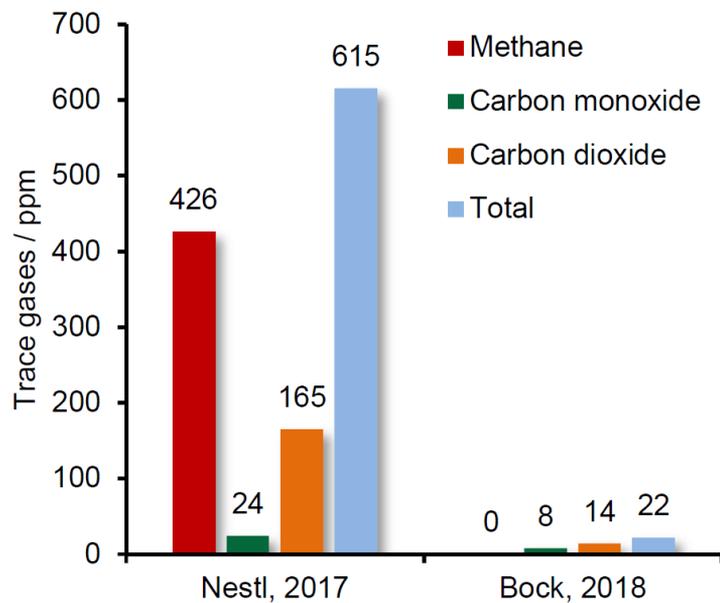


Abb. 14: Wasserstoff-Produktgasqualität im RESC Laborsystem.

Die Ergebnisse bestätigen das hohe Potenzial von Biogas als Ressource für die hochreine Wasserstofferzeugung mit 99,99% bis 99,999%, wie es von Niedertemperatur-Brennstoffzellen gefordert wird. Dennoch führte der Einsatz von synthetischem Biogas auch zu einer erhöhten Kohlenstoffbelastung im Vergleich zu früheren Versuchen mit reinem Methan als Ausgangsstoff. Die Lagerung des Sauerstoffträgers im reduzierten Zustand über Nacht zur Energiespeicherung hatte keinen negativen Einfluss auf die Wasserstoffproduktion (siehe Abb. 15). Die freigesetzte Menge hängt primär von der Art der vorhergegangenen Reduktion bzw. der Reformierungsmethode ab, d.h. Trocken- oder Dampfreformierung.

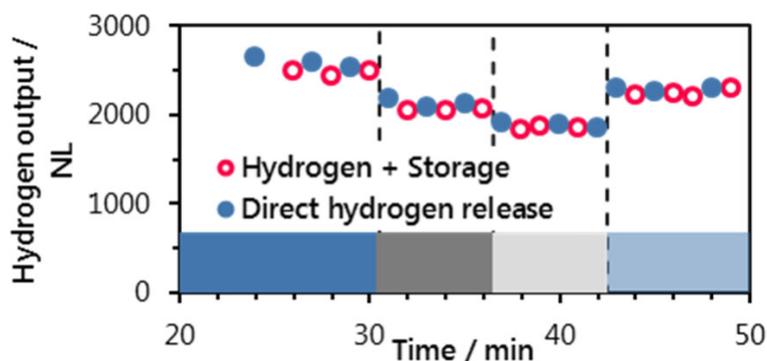


Abb. 15: Bestimmung von Verlusten durch die Lagerung des Sauerstoffträgers im heißen, reduzierten Zustand.

Darüber hinaus konnte beobachtet werden, dass mehrere Spurengasverbindungen im Biogas einen signifikanten Einfluss auf die Reinheit des produzierten Wasserstoffs haben. Um die Auswirkungen dieser Verbindungen zu untersuchen, wurden die wichtigsten Verunreinigungen in Biogas- und

vergaster Biomasse identifiziert, Modellverbindungen definiert und in einem Festbett-Reaktorsystem untersucht. Kohlenstoffablagerungen wurden insbesondere bei der gleichzeitigen Zufuhr von Alkoholen und cyclischen Verbindungen mit höheren relativen Anteilen in der Reduktionsphase nachgewiesen. Dies passiert, obwohl zusätzlicher Dampf zugeführt wurde, um eine vollständige Umwandlung der Verbindungen zu ermöglichen.

Zur effizienteren Entladung des Wasserstoffspeichers wurde die Freisetzung von Hochdruck-Wasserstoff in Laborsystemen mit einem Druck von bis zu 100 bar demonstriert. Die Kontaktmasse auf Eisenoxidbasis (95% Fe_2O_3 , 5% Al_2O_3) wurde mit Synthesegas reduziert und mit Dampf bei 1023 K oxidiert. Der maximal bereitgestellte Druck von 100 bar zur Wasserstofferzeugung in der Dampfoxidationsphase hat das Potential den Energiebedarf für die Nachverdichtung auf 900 bar, wie sie für Brennstoffzellenfahrzeuge notwendig ist, deutlich reduzieren (Abb. 16).

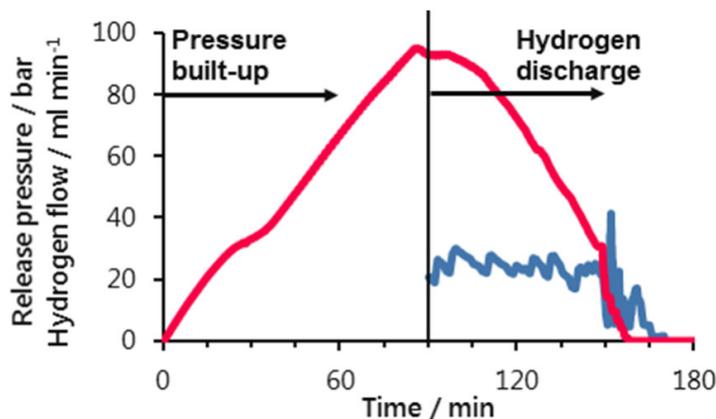


Abb. 16: Druckverlauf und Wasserstoffproduktion im Laborreaktor während der Wasserstoffentnahme.

Als finaler Schritt des Projektes wurde eine neue Anlage errichtet, die es ermöglicht, erneuerbare flüssige Kohlenstoffe zu hoch-reinem, komprimierten Wasserstoff von bis zu 70 bar umzusetzen. Das kompakte Doppelreaktorsystem verbindet einen Reformier mit einem Chemical-Looping-Reaktor, die getrennt voneinander betrieben werden können (Abb. 17). Das Eisenoxidbett des Chemical-Looping-Reaktors besteht aus pelletierter Kontaktmasse mit einer Füllmenge von 60 g. In der Reformereinheit kommen kommerzielle Katalysatoren zum Einsatz, die anhand von Voruntersuchung speziell für die Anwendung im System ausgewählt wurden. In den derzeitigen Versuchen wird Ethanol als erneuerbarer Rohstoff eingesetzt, welcher lokal und dezentral leicht erhältlich ist. Die Anlage stellt eine Output-Leistung von 0.2 – 0.4 kW (HHV_{EtOH}) aus Ethanol zur Verfügung und ist die erste Anlage in dieser Form, die einen realen biogenen Rohstoff unter Druck produziert.

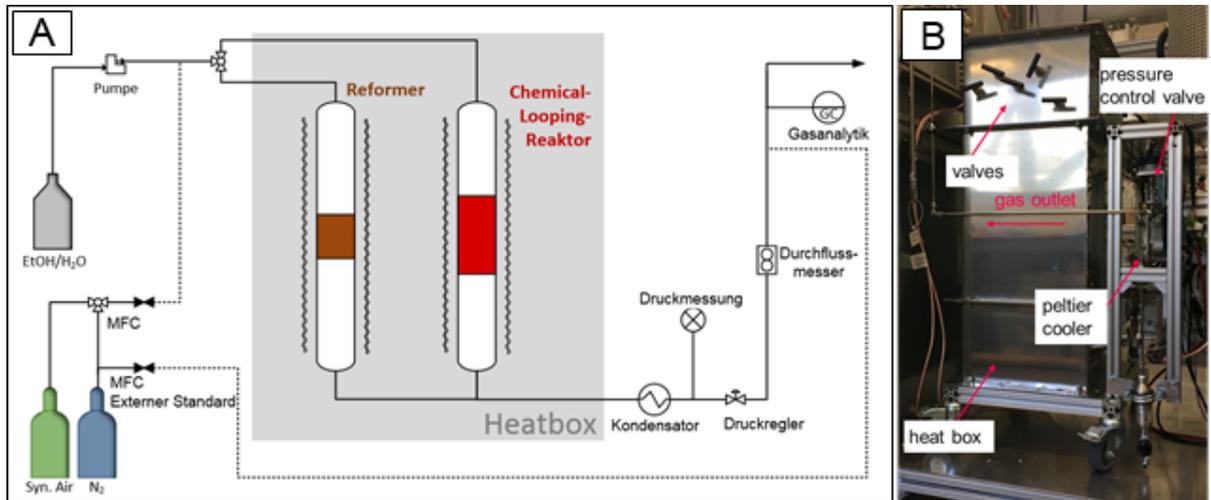


Abb. 17: [A] Schematische Darstellung des Hochdruckfestbettwasserstoff-Reaktorsystems zur Darstellung von hochreinem komprimiertem Wasserstoff; [B] Abbildung des Reaktorsystems.

5.5. HyPE-FC

Im Projekt wurden Herstellungsmethoden für MEAs und Bipolarplatten mit kostengünstigen, neuartigen Materialien und innovativen Herstellungsstrukturen evaluiert, um die Leistung zu erhöhen und gleichzeitig die Kosten zu reduzieren.

Diese Arbeiten umfassten auch die Analyse von innovativen Technologien wie der Anionenaustauschmembran Brennstoffzelle als eine potentielle Alternative für zukünftige Anwendungen in der Mobilität. In der Untersuchung der Technologien wurden die unterschiedlichen Anforderungen in der Produktion der Elektroden, Membranen und Bipolarplatten erarbeitet. Während der Reifegrad der sauren Brennstoffzellentechnologie bereits die Serienfertigung von Stapeln im Kilowattbereich erlaubt, befindet sich die alkalische Brennstoffzelle noch im Stadium der Forschung und Entwicklung der einzelnen Komponenten wie Membranmaterialien und Katalysatoren für die Anode und Kathode. Aufgrund der wesentlich geringeren Anzahl an Forschungsaktivitäten für alkalische Brennstoffzellen, speziell im Bereich der Einzelzelltests mit Membran-Elektroden-Einheiten (MEA), ist die alkalische Polymerelektrolytbrennstoffzelle gegenwärtig noch nicht weit genug entwickelt, um sie in die Produktion überzuführen. Aus diesem Grund lag der Fokus der durchgeführten experimentellen Arbeiten auf der sauren PEFC.

In Vorversuchen wurden folgende Konzepte erfolgreich experimentell erprobt:

Elektrodenfertigung:

- Einsatz von Ultraschallsprühen zur direkten Beschichtung der Membran (Abb. 17) und Steuerung der Aktivschichtdicke.
- Leistungssteigerung durch Erhöhung der katalytischen Aktivität in der MEA.
- Preisreduzierung der MEA durch Senkung der Platinbeladung über den Einsatz von Übergangsmetallen (PtCo, PtNi, PtCu). Gesamtbeladungen (Anode + Kathode) von 0.170 mg cm⁻² konnten erreicht werden.

- Konzept zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit durch Beschichtung des Kohlenstoffträgers mit Polyanilin (Patent der TU Graz) wurde erfolgreich in der MEA erprobt.

Membranherstellung:

- Einsatz von Elektrosinning als Herstellungsmethode.
- Verwendung von anorganischen Füllstoffen in der Membran

Bipolarplattenfertigung:

- Fertigung und Evaluierung von innovativen Strömungsfeldgeometrien durch CFD-Simulationen und Laborexperimente (Abb. 18).
- Einsatz leicht zu verarbeitender Rohmaterialien.

An der TU Graz vorhandene Kompetenzen wurden mit Partnerunternehmen und internationalen Forschungspartnern vernetzt und die Infrastruktur für ein Folgeprojekt vorbereitet. Mit den Konzepten zu innovativen Fertigungsmethoden wurde die Grundlage für den Aufbau einer in Österreich einzigartigen Infrastruktur zur Herstellung von Brennstoffzellen wissenschaftlichen In-situ Untersuchungen geschaffen.

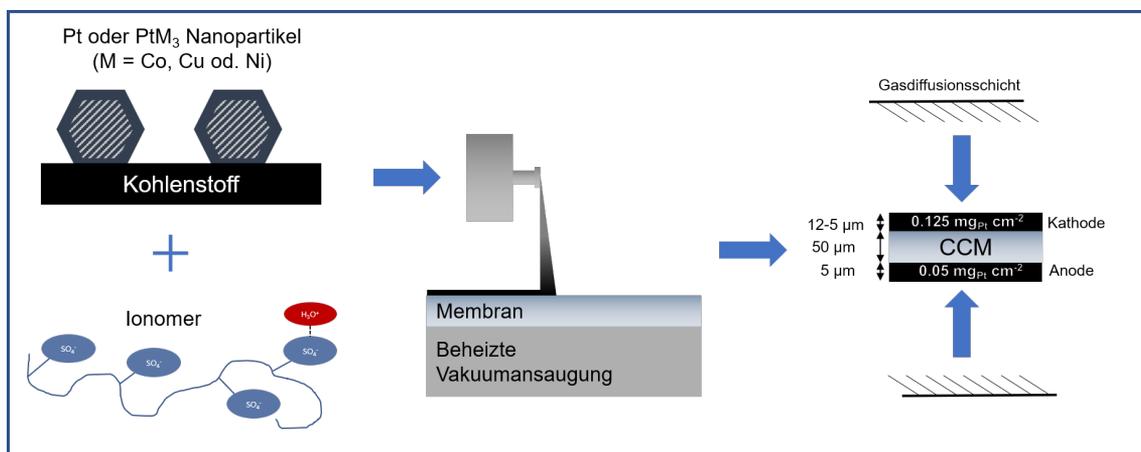


Abb. 18: Schematische Darstellung der MEA - Herstellung mit dem Ultraschallsprühbeschichtungsverfahren am ICVT.

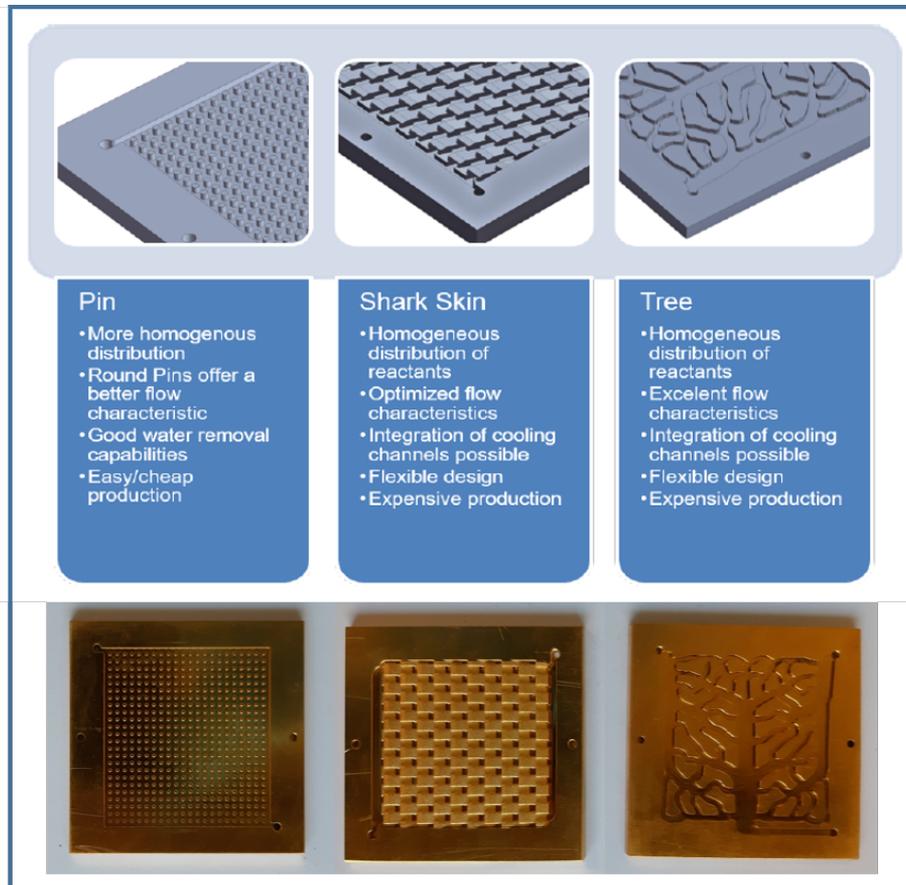


Abb. 19: Darstellung der Konstruierten Bipolarplatten, welche mit CFD – Simulationen vorab getestet, anschließend gefertigt und in der 25 cm² Einzelzelle validiert wurden.

6 Vernetzung und Ergebnistransfer

Die Dissemination der im Projekt behandelten Teilaspekte erfolgte durch die aktive Teilnahme an internationalen Konferenzen und Tagungen. So konnten die Erkenntnisse weiterführend diskutiert und validiert werden. Die enge Kooperation mit verschiedenen Unternehmen schlägt sich direkt in wirtschaftlichem Nutzen nieder. Eine direkte Implementierung der gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse in industrielle Anwendungsfelder erfolgte über das Unternehmen Rouge H₂ und der Inbetriebnahme einer Prototypen-Anlage im Smart Business Center Graz-West.

Die Ergebnisse des Projektes und der Arbeit an der Technischen Universität Graz dienen daher sowohl der Industrie, Regierungseinrichtungen wie auch der nationalen und internationalen universitären Forschung.

Ein zentrales Element der internationalen Vernetzung stellte der IEA Workshop „Highlights of International Fuel Cell Research 2017“ dar. Dieser wurde am 15. Mai 2017 in den Räumlichkeiten der Technischen Universität Graz abgehalten und erlaubte tiefere Einblicke in die Ergebnisse und wissenschaftlichen Errungenschaften der internationalen Brennstoffzellenforschung. Vertreter des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (Theodor Zillner) sowie der repräsentierten Annexe (D.J. Liu für Annex 31 und Fabio Matera für Annex 35) und der Arbeitsgruppe für Brennstoffzellensysteme und Wasserstofftechnologie (Viktor Hacker) eröffneten den Diskurs mit ihren Keynote-Vorträgen. International aufgestellte Wissenschaftler*innen präsentierten in 15 Vorträgen, Postern und im persönlichen Gespräch ihre jeweiligen Erkenntnisse und Forschungsergebnisse.

Das am 16. Mai 2017 abgehaltene Meeting der beiden vertretenen Annexe diente der Koordination sowie der weiterführenden Planung von gemeinsamen Projekten. Der in dieser Berichtsperiode abgehaltene Ringversuch wurde auf diesem Meeting beschlossen.

Die „11th International Summer School on PEFCs“ bot am 23. August 2018 den Rahmen für den „4th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells“. Dieser wurde an der TU Graz abgehalten und stellte mit Vorträgen international renommierter Forscher und einer Postersession für Studierende ein besonderes Highlight dar.

- Prof. Dario Dekel von Technion, Israel Institute of Technology, hielt den ersten Vortrag. Thema seines Live-Videobeitrags war der Stand der Forschung an Anionen-Austausch-Membran-Brennstoffzellen.
- Vertreter von industrieller Forschung des deutschen Automobilzulieferers ElringKlinger AG war Dr. Michael Götz. Sein Beitrag behandelte die industrialisierte Herstellung von PEM-Stacks und -Komponenten.
- Dr. Reinhard Tatschl von AVL List in Graz präsentierte die 3D Multiphysik-Simulation von PEFCs, sowie Modellierungsmethodologie und ausgewählte Anwendungen.
- Der letzte Vortrag wurde von Prof. Ken-Ichiro Ota von der Yokohama National University gehalten. Sein Beitrag über Brennstoffzellen- und Wasserstoffprojekte in Japan zeigte die Möglichkeiten, die Zukunft mit richtungweisenden Technologien positiv zu gestalten.

Im Zuge des Ergebnis- und Wissenstransfers werden Summer Schools und Workshops abgehalten. Die „13th International Summer School on PEFCs“ wird vom 24.-29. August 2020 an der TU Graz abgehalten werden. Internationale Studierende erhalten die Gelegenheit, an einem einwöchigen Intensivkurs mit Posterpräsentation teilzunehmen. Die Themen umfassen sowohl Grundlagen zur Brennstoffzellensystemen und Wasserstofftechnologie als auch Mess- und Charakterisierungsmethoden, fortschrittliche Anwendungsgebiete und aktuelle Forschungs- und Entwicklungsfelder. Diese haben direkten Bezug zu den Erkenntnissen und Ergebnissen, welche im Rahmen der IEA-Kooperationsprojekte gewonnen wurden.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Aus den Erkenntnissen und Ergebnissen der laufenden und abgeschlossenen Projekte konnten weitere Kooperationen und Projekte initiiert werden. Das national und international präsente Projektteam konnte sich für Folgeprojekte auf dem Gebiet der nachhaltigen Energieträger in Stellung bringen, um regional und überregional agieren zu können.

Die bearbeiteten Projekte stellen Teilaspekte und Schritte in die richtige Richtung dar. Aktuelle weltweite Entwicklungen deuten darauf hin, dass die effiziente Nutzung erneuerbarer Energieträger einen flexiblen Zugang zu Technologie und Forschung erfordert. Unser breitaufgestelltes Projektteam kann sich der Herausforderung stellen, zukunftssträchtige Technologien zu entwickeln und weiter voranzutreiben.

Der Verkehrssektor stellt einen der größten Wirtschaftszeige der Welt dar. Jede neue Antriebstechnologie muss daher die bestehende Technik übertreffen, um wettbewerbsfähig zu sein. Automotive PEFC-Technologien können nur dann mit konventionellen Systemen in Wettbewerb treten, wenn deren Lebensdauer entsprechend lang ist. Die Entwicklung von fortschrittlichen Materialien und effizienten Betriebs- und Regelstrategien sind erforderlich, um etwaigen Degradationsmechanismen entgegenzuwirken. Die an der TU Graz erforschten Materialien finden in Labor- und Industriemaßstab Anwendung und helfen so einer zukünftigen kommerziellen Implementierung dieser Technologie auf die Sprünge. Die entwickelten Mess-, Regel-, und Betriebsstrategien erlauben ein tieferes Verständnis in Bezug auf Schädigung und – in Folge – Schadensvermeidung an Brennstoffzellensystemen.

In Hinblick auf die Wasserstoffbereitstellung und -reinigung mittels RESC-Prozess gingen wesentliche Erkenntnisse direkt in die Prototypen-Anlage von Rouge H₂ Engineering ein. Die Fortschritte in Stabilität der Kontaktmasse sowie der Optimierung der Betriebsparameter erlaubten eine innovative Methode der dezentralen Druckwasserstoffversorgung von Brennstoffzellensystemen. Dieses Chemical-Looping-Verfahren erlaubt die Freisetzung von Reinstwasserstoff unter Druck, was initiale Gaskompression einsparen kann. Durch eine geeignete Prozessführung eignet sich das Verfahren auch für die Erfassung eines reinen Kohlendioxidstroms (Carbon Capture and Storage).

Literaturverzeichnis (im Rahmen des Projekts entstanden)

- <https://www.tugraz.at/institute/ceet/be-intl/fc-summer-school/> (abgerufen am 08. Jänner 2020; 11:43)
- <http://www.ieafuelcell.com/index.php?id=10> (abgerufen am 13. Jänner 2020; 14:22)
- Bock, S & Zacharias, R 2018, 'Hochreiner Wasserstoff aus ICVT-Laboranlage' *CEET konkret*, pp. 26-27.
- Kocher, K & Hacker, V 2017, 'Entwicklung und elektrochemische Charakterisierung Phosphat-toleranter Katalysatoren für die Sauerstoffreduktionsreaktion in HT-PEFCs' *CEET konkret*, pp. 36-37.
- Kocher, K & Hacker, V 2018, 'Performance strategy for efficient cold start of polymer electrolyte fuel cells' *CEET konkret*, pp. 36-37.
- Zacharias, R, Bock, S & Hacker, V 2018, 'Entwicklung von Kontaktmassen zur nachhaltigen H₂-Herstellung mit dem RESC' *CEET konkret*, pp. 30-31.

Fachartikel in peer-reviewten Journalen

- Bock, S, Zacharias, R & Hacker, V 2020, 'Co-production of pure hydrogen, carbon dioxide and nitrogen in a 10 kW fixed-bed chemical looping system' *Sustainable Energy & Fuels*.
<https://doi.org/10.1039/C9SE00980A>
- Zacharias, R, Visentin, S, Bock, S & Hacker, V 2019, 'High-pressure hydrogen production with inherent sequestration of a pure carbon dioxide stream via fixed bed chemical looping' *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 16, pp. 7943-7957.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.257>
- Bock, S, Zacharias, R & Hacker, V 2019, 'Experimental study on high-purity hydrogen generation from synthetic biogas in a 10 kW fixed-bed chemical looping system' *RSC Advances*, vol. 2019.
<https://doi.org/10.1039/C9RA03123E>
- Samsudin, AM & Hacker, V 2019, 'Preparation and Characterization of PVA/PDDA/Nano-Zirconia Composite Anion Exchange Membranes for Fuel Cells' *Polymers*, vol. 11, no. 9, 1399.
<https://doi.org/10.3390/polym11091399>
- Bock, S, Zacharias, R & Hacker, V 2018, 'High purity hydrogen production with a 10kWth RESC prototype system' *Energy conversion and management*, vol. 172, pp. 418-427.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.020>
- Nestl, S, Voitic, G, Zacharias, R, Bock, S & Hacker, V 2017, 'High-Purity Hydrogen Production with the Reformer Steam Iron Cycle' *Energy Technology*, pp. 563.
<https://doi.org/10.1002/ente.201700576>

Poster

- Kocher, K, Kolar, S, Hacker, V & Ladreiter, W 2019, 'Cold-Start/Stop Characteristics of Proton Exchange Fuel Cells' 5th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells as part of the 12th

International Summer School on PEFCs, Yokohama, Japan, 29/08/19 - 29/08/19, .

- Lechner, B, Malli, K & Hacker, V 2019, 'Regeneration of catalysts for hydrogen production' 5th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells as part of the 12th International Summer School on PEFCs, Yokohama, Japan, 29/08/19 - 29/08/19, .
- Zacharias, R, Bock, S & Hacker, V 2018, 'Improvement of iron based oxygen carriers for chemical looping hydrogen' Minisymposium Verfahrenstechnik 2018, Linz, Austria, 4/04/18 - 4/04/18, .
- Bock, S, Zacharias, R & Hacker, V 2018, 'Utilization of renewable feedstock for hydrogen production via chemical-looping' Minisymposium Verfahrenstechnik 2018, Linz, Austria, 4/04/18 - 4/04/18, .
- Bock, S, Zacharias, R & Hacker, V 2018, 'On-site renewable hydrogen production and storage by oxidation and reduction of iron-based oxygen carriers', Wien, Austria, 16/04/18 - 19/04/18, .
- Bock, S, Zacharias, R & Hacker, V 2018, 'Prototype-scale hydrogen production for PEMFC from renewables via chemical looping' 4th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells as part of the 11th International Summer School on PEFCs, Graz, Austria, 23/08/18 - 23/08/18, .
- Kocher, K & Hacker, V 2018, 'PANI functionalized cathode catalysts toward durable Polymer Electrolyte Fuel Cells' 4th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells as part of the 11th International Summer School on PEFCs, Graz, Austria, 23/08/18 - 23/08/18, .
- Kocher, K, Marius, B, Mayer, K & Hacker, V 2018, 'Start-up and Shut-down: Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells', Graz, Austria, 14/11/18 - 14/11/18, .
- Malli, K & Hacker, V 2018, 'Characterization of monolithic catalysts used for ethanol steam reforming', Linz, Austria, 4/04/18 - 5/04/18, .
- Malli, K, Ladenhaufen, D & Hacker, V 2018, 'Experimental set-up for ethanol steam reforming' 4th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells as part of the 11th International Summer School on PEFCs, Graz, Austria, 23/08/18 - 23/08/18, .
- Zacharias, R, Bock, S & Hacker, V 2018, 'Improvement of iron based oxygen carrier synthesis for chemical looping hydrogen' 4th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells as part of the 11th International Summer School on PEFCs, Graz, Austria, 23/08/18 - 23/08/18, .
- Hacker, V, Bodner, M, Mayer, K & Weinberger, S 2018, 'Methods to determine degradation in fuel cells', Wien, Austria, 16/04/18 - 19/04/18, .

Konferenzbeiträge

- Bock, S, Zacharias, R & Hacker, V 2019, High purity hydrogen production and storage with fixed bed chemical looping. in 15th Minisymposium Verfahrenstechnik and 6th Partikelforum : Conference Proceedings. 15th Minisymposium Verfahrenstechnik, Leoben, Austria, 29/04/19.
- Zacharias, R, Bock, S & Hacker, V 2019, High-pressure hydrogen production with inherent carbon dioxide separation. in 15th Minisymposium Verfahrenstechnik and 6th Partikelforum: Conference Proceedings., Poster 3.7, Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Montanuniv. Leoben, Leoben, pp. 101, 15th Minisymposium

Verfahrenstechnik, Leoben, Austria, 29/04/19.

- Marius, B, Penga, Z & Hacker, V 2019, Mitigating mass transport limitations of PEFCs during dynamic operation. in V Horvat-Radošević, K Kvastek & Z Mandić (eds), 7th Regional Symposium on Electrochemistry RSE-SEE & 8th Kurt Schwabe Symposium: Book of Abstracts., MAT_P_13, pp. 128, 7th Regional Symposium on Electrochemistry – South East Europe & 8th Kurt Schwabe Symposium, Split, Croatia, 27/05/19.
- Hacker, V 2019, Production and characterization of membrane electrode assemblies for fuel cell applications. in V Bonačić-Koutecký (ed.), Interdisciplinary Endeavour in Technology at Nanoscale, Water and Environment: Book of Abstracts. Mediterranean Institute for Life Sciences, Split, Croatia, Split, pp. 10-11.
- Grandi, M, Gatalo, M, Mayer, K, Marius, B, Kapun, G & Hacker, V 2019, Electro- and physicochemical analysis of catalyst coated membranes. in V Bonačić-Koutecký (ed.), Interdisciplinary Endeavour in Technology at Nanoscale, Water and Environment: Book of Abstracts. Mediterranean Institute for Life Sciences, Split, Croatia, Split, 2019 Research Workshop Interdisciplinary Endeavour in Technology at Nanoscale, Water and Environment, Split, Croatia, 9/10/19.
- Grandi, M, Gatalo, M, Kapun, G, Pasupathi, S & Hacker, V 2019, Automated manufacturing of high performance fuel cells and influence of electrode structure on catalyst utilization. in 15th Minisymposium Verfahrenstechnik and 6th Partikelforum: Conference Proceedings. Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Montanuniv. Leoben, 15th Minisymposium Verfahrenstechnik and 6th Partikelforum, Leoben, Austria, 29/04/19.
- Marius, B, Penga, Z & Hacker, V 2019, Voltage response analysis of polymer electrolyte fuel cells during dynamic load changes. in The 70th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry. pp. 75, 70th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry (ISE), Durban, South Africa, 4/08/19.
- Bock, S, Zacharias, R, Malli, K & Hacker, V 2019, High-Purity Hydrogen from Biogas with a Combined Reformer and Fixed-Bed Chemical Looping System. in Meet the Innovators: Transforming the Future through Chemical Engineering., 448d, American Institute of Chemical Engineers, 2019 AIChE Annual Meeting, Orlando, United States, 10/11/19.
- Zacharias, R, Bock, S, Malli, K & Hacker, V 2019, High-Pressure Hydrogen Production from Bio-Ethanol Feedstock with Fixed-Bed Chemical Looping. in Meet the Innovators - Transforming the Future through Chemical Engineering., 622d, American Institute of Chemical Engineers, 2019 AIChE Annual Meeting, Orlando, United States, 10/11/19.
- Mayer, K, Marius, B, Grandi, M & Hacker, V 2019, Online Identification of faulty operating conditions by using Total Harmonic Distortion Analysis. in V Bonačić-Koutecký (ed.), Interdisciplinary Endeavour in Technology at Nanoscale, Water and Environment: Book of Abstracts. Interdisciplinary Endeavour in Technology at Nanoscale, Water and Environment. University of Split, Split, Croatia, 9/10/19.
- Mayer, K & Hacker, V 2019, Identification of Faulty Operating Conditions in PEMFCs using EIS

and Total Harmonic Distortion Analysis. in V Vivier (ed.), Program of the 11th International Symposium on Electrochemical Impedance Spectroscopy., Lege-Cap-Ferret, France, 2/06/19.

- Mayer, K & Hacker, V 2019, Dynamic Large Signal Equivalent Circuit - A Model for Online Monitoring Techniques. in V Vivier (ed.), Program of the 11th International Symposium on Electrochemical Impedance Spectroscopy., Lege-Cap-Ferret, France, 2/06/19.
- Tatschl, R, Fink, C, Urthaler, P, Hacker, V, Bodner, M, Schenk, A, Karpenko-Jereb, L, Schatt, E-E, Verebes, P, Bergmann, A, Gößling, S & Peinecke, V 2018, PEM Fuel Cell Degradation Analysis Based on Joint Experimental and Simulation Techniques. in Transport Research Arena 2018: 2. Vehicles & Vessels - Design, Development and Production.
- Bock, S, Zacharias, R, Schauerl, R, Rechberger, J, von Hofen, F, Voitic, G, Strohmeyer, U & Hacker, V 2018, Hydrogen Production and Storage by Oxidation and Reduction of Iron-based Oxygen Carriers. in Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1487656>
- Zacharias, R, Bock, S & Hacker, V 2018, The reformer steam-iron cycle for high purity hydrogen production. in K Bouzek (ed.), HydrogenDays2018: Book of Abstracts. 1 edn, L23, Prague, pp. 47-47, HydrogenDays 2018, Prague, Czech Republic, 13/06/18.
- Bock, S, Zacharias, R & Hacker, V 2018, The production of pressurized, high purity hydrogen with the fixed bed RESC process. in Chemical Looping 2018., 4C, 5th International Conference on Chemical Looping, Park City, United States, 24/09/18.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: IEA-Standorte der Technology Collaboration on Advanced Fuel Cells.	10
Abb. 2: Gruppenbild vom kombinierten Annex 31 und Annex 35 Meeting an der TU Graz am 16. Mai 2017.	13
Abb. 3: Abschlussfoto der 11 th International Summer School on Advanced Studies of PEFCs am Campus der TU Graz.	14
Abb. 4: Schematische Darstellung der Pt/C@PANI Synthese.	17
Abb. 5: ORR Aktivitätsdaten der Katalysatoren bei unterschiedlichen Konzentrationen von Phosphorsäure im Elektrolyten: a) Vergleich von Pt/C, Pt/C@PANI ₃₀ und Pt/C@PANI ₁₀ ohne Phosphorsäure, b) Pt/C, Pt/C@PANI ₃₀ und Pt/C@PANI ₁₀ in 1 mM Phosphorsäure und c) Pt/C, Pt/C@PANI ₃₀ und Pt/C@PANI ₁₀ in 5 mM Phosphorsäure. Zoom in den relevanten Potentialbereich.	18
Abb. 6: G6o PEM Brennstoffzellen Teststand der Firma Greenlight und dessen Systemspezifikationen.	19
Abb. 7: Zellkompressionseinheit, Testzelle (beides balticFuelCells GmbH) und Materialien einer Membran-Elektroden-Einheit (Greenerity).	20
Abb. 8: Häufigste (Frost-) SUSD Strategien aus der Literaturrecherche.	21
Abb. 9: Zellspannung und Zellstrom beim Start/Stopp Vorgang mit Sauerstoffverbrauch (Abschalten mit Scheinlast).	22
Abb. 10: Spannungsverhalten einer einzelnen Testzelle über 200 SUSD Zyklen mittels entwickelter Sauerstoffverbrauch-Strategie.	23
Abb. 11: BASF 50 cm ² Brennstoffzelle mit PBI Membran (Original-Brennstoffzelle)	24
Abb. 12: IAPUNIT-Teststand mit dazu gehörigem Schaltkasten.	25
Abb. 13: Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema des Teststands	25
Abb. 14: Wasserstoff-Produktgasqualität im RESC Laborsystem.	27
Abb. 15: Bestimmung von Verlusten durch die Lagerung des Sauerstoffträgers im heißen, reduzierten Zustand.	27
Abb. 16: Druckverlauf und Wasserstoffproduktion im Laborreaktor während der Wasserstoffentnahme.	28
Abb. 17: [A] Schematische Darstellung des Hochdruckfestbettwasserstoff-Reaktorsystems zur Darstellung von hochreinem komprimiertem Wasserstoff; [B] Abbildung des Reaktorsystems.	29
Abb. 18: Schematische Darstellung der MEA - Herstellung mit dem Ultraschallsprühbeschichtungsverfahren am ICVT.	30
Abb. 19: Darstellung der Konstruierten Bipolarplatten, welche mit CFD – Simulationen vorab getestet, anschließend gefertigt und in der 25 cm ² Einzelzelle validiert wurden.	31

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Einzelne Schritte der SUSD Referenzstrategie.

22

Abkürzungsverzeichnis

AEMFC	Anion exchange membrane fuel cell
HHV	Higher heating value
HT-PEM	High temperature proton exchange membrane
MEA	Membrane-electrode assembly
OCV	Open circuit voltage
PANI	Polyanilin
PEFC	Polymer electrolyte fuel cell
PEM	Proton exchange membrane
RESC	Reformer Steam Iron Cycle
SUSD	Start up, shut down

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)