

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

Arbeitsperiode 2020 - 2024

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 62/2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Kontakt zu „IEA Forschungsk Kooperation“: Mag.^a Sabine Mitter

Autorinnen und Autoren:

DI Michael Lammer, Joel Mata Edjokola, Dipl.-Ing. Dr.techn. Maximilian Grandi, BSc, Dipl.-Ing. Mathias Heidinger, BSc, Dipl.-Ing. Maximilian Käfer, BSc., Dipl.-Ing. Mario Kircher, BSc., Lis. Dipl.-Ing. Özge Kiziltan, Dipl.-Ing. Eveline Kuhnert BSc, Dipl.-Ing. Magdalena Pauritsch, BSc., Ing. Civ. Lukas Fernando Roessler Escudero, Dipl.-Ing. BSc. Florian Tritscher, Brigitte Hammer, Bakk., Prof. Dr. Viktor Hacker (Technische Universität Graz, Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik)

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Graz, August 2024

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Disclaimer:

Dieser Ergebnisbericht wurde von der Fördernehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die Fördernehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die Fördernehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die Fördernehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts im Rahmen der IEA Forschungsk Kooperation. Es wurde vom Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) initiiert, um österreichische Forschungsbeiträge zu den Kooperationsprojekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu unterstützen.

Die IEA Forschungsk Kooperationen umfassen eine breite Palette an Energiethemen mit dem Ziel Energiesysteme, Städte, Mobilitäts- und Industriesysteme fit für eine nachhaltige Zukunft bis 2050 zu machen. Auch Themen wie Gendergerechtigkeit oder Ressourcen- und Kreislaufwirtschaftsaspekte werden berücksichtigt.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen und Unternehmen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch die vielen IEA-Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und neue internationale Standards. Auch in der Marktumsetzung konnten richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Daher werden alle Berichte nach dem Open Access Prinzip in der Schriftenreihe des BMIMI über die Plattform nachhaltigwirtschaften.at veröffentlicht.

Inhalt

1 Kurzfassung	8
2 Abstract	10
3 Ausgangslage.....	12
4 Projektinhalt	14
5 Ergebnisse	16
5.1 Materialentwicklung und Design von Vertigungstechniken	16
5.2 Systembetrachtungen von Brennstoffzellsystemen und erneuerbaren Energienetzen	19
5.3 Brennstoffaufbereitung	22
5.4 Publikationen	23
6 Vernetzung und Ergebnistransfer	25
7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen.....	32
Abbildungsverzeichnis	34
Literaturverzeichnis	35
Abkürzungen.....	36

1 Kurzfassung

Im Annex 31 des Technology Collaboration Programme on Advanced Fuel Cells (AFC) der Internationalen Energieagentur (IEA) wird die internationale Vernetzung von Forschung, Industrie und Politik auf dem Gebiet der Forschung und Entwicklung von Brennstoffzellensystemen gefördert. Die Forschungsprojekte im Berichtszeitraum befassten sich mit Teilaspekten der Entwicklung und Charakterisierung von Brennstoffzellen und deren Komponenten. Der Schwerpunkt lag dabei auf Polymerelektrolytsystemen. Brennstoffzellen werden als Hauptenergiewandler in wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen oder elektrischen Hilfsaggregaten eingesetzt und sind einer Vielzahl von Belastungen ausgesetzt. Untersuchungen zur Aktivität der Katalysatoren und zur Verbesserung der Lebensdauer unter kritischen Bedingungen stehen im Mittelpunkt dieses Programms. Dabei werden sowohl die chemisch-physikalischen Parameter als auch die Herstellungsmethoden innovativer Brennstoffzellensysteme untersucht. Die Analyse des österreichischen Stromnetzes im Hinblick auf den Einsatz erneuerbarer Energieträger und damit verbundene Untersuchungen zur Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit bilden eine weitere Säule der Brennstoffzellenforschung im Annex 31. Der internationale Austausch und die wissenschaftliche Dissemination erfolgten im Rahmen von Vernetzungstreffen der IEA, der Teilnahme an Konferenzen und Tagungen sowie der Veröffentlichung von Artikeln in international anerkannten (peer reviewed) Fachzeitschriften.

Im Sinne der internationalen Vernetzung einerseits und der Stärkung des Standortes andererseits wurden im Berichtszeitraum an der TU Graz und in weiterer Folge am Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik eine Reihe von Forschungsprojekten initiiert und auch erfolgreich abgeschlossen. Im Rahmen dieser Projekte entstand eine Reihe von Publikationen in international renommierten Peer-Review-Journals. IEA-Vernetzungstreffen und diverse Konferenzbesuche dienten ebenfalls der Dissemination von Ergebnissen aus den einzelnen Forschungsprojekten. Diese Projekte werden im Folgenden kurz dargestellt.

Im Projekt HyStore lag der Fokus der Forschung auf der Speicherung von Wasserstoff für Einzelzellen, Short-Stacks und ganze Brennstoffzellensysteme. Ein weiterer Schwerpunkt im Berichtszeitraum waren umfangreiche Brennstoffzellentests. Das Projekt GODEFC befasste sich damit, neue, kostengünstige Anoden- und Kathodenkatalysatoren mit geringem Edelmetallgehalt sowie neue Anionenaustauschmembranen auf der Basis nachhaltiger und kostengünstiger Materialien für Niedertemperaturbrennstoffzellen zu entwickeln. Ziel des Projekts polyDURAMEA, das im Rahmen des FFG Spin-off Fellowship Programms an der TU Graz durchgeführt wird, ist der Aufbau eines Unternehmens zur industriellen Produktion von katalysatorbeschichteten Membranen (CCMs) für Stack- und Systemhersteller von Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (PEMFCs). Die innovative Grundlage des Vorhabens bildet ein neuartiger, patentierter Katalysator auf Polyanilin-Basis, der eine längere Lebensdauer, höhere Leistungsdichte und deutlich geringeren Edelmetallverbrauch als bisherige Technologien verspricht. Die Systemintegration von Chemical Looping Prozessen für die Nutzung von Biomasse zur Herstellung von brennstoffzellentauglichem Wasserstoff

erfolgte im Projekt BioLOOP. Die am CEET entwickelte Technologie ermöglicht die regionale Nutzung von Biogas in dezentralen Anlagen. Im Rahmen des FFG-Projekts MILES (Mittel- und Langzeitspeichertechnologien auf dem Weg zu 100% erneuerbarer Energie in Österreich) wurde ein Kriterienkatalog für Speichersysteme erstellt, um diese in einem Simulationsmodell des österreichischen Stromsystems darzustellen. Die Brennstoffaufbereitung in Hinsicht auf hochreinen Wasserstoff aus Elektrolyse konnte im Projekt HyTechnomy realisiert werden. Das Projekt ProGen konzentriert sich auf die Entwicklung einer neuen Generation von PEM-Elektrolyseuren, wobei der Schwerpunkt auf der Erhöhung der Lebensdauer und der Senkung der Kosten durch die Reduzierung kritischer Rohstoffe liegt. Die Arbeiten im Rahmen des Projekts SHyRE konzentrieren sich auf die Entwicklung der schwefeldepolarisierten Elektrolyse (SDE). SDE ist eine Art der Wasserelektrolyse, bei der die anodische Reaktion der Wasserelektrolyse durch die Schwefeloxidsreaktion ersetzt wird.

Der Workshop *Recent Developments in Hydrogen Research* (17. Mai 2024) wurde als wissenschaftliche Veranstaltung in den Räumlichkeiten der Universität organisiert. Er richtete sich vor allem an die wissenschaftliche Gemeinschaft und an Studierende. Die Teilnahme an der öffentlichen Veranstaltung *Lange Nacht der Forschung 2024* (24. Mai 2024), einer bundesweiten Veranstaltung mit rund 270 Ausstellern in ganz Österreich, zielte darauf ab, eine breitere Öffentlichkeit zu erreichen und einen detaillierten Einblick in die Wasserstofftechnologie zu geben. Partizipation am Arbeitskreis für Brennstoffzellenantriebe der A3PS – *Austrian Association for Advanced Propulsion Systems* bildet durch Quartalsmeetings eine zentrale Möglichkeit des Austauschs zwischen Forschung, Industrie und Politik.

2 Abstract

Annex 31 of the Technology Collaboration Program on Advanced Fuel Cells (AFC) of the International Energy Agency (IEA) promotes the international networking of research, industry and politics in the field of research and development of fuel cell systems. The research projects in the reporting period dealt with partial aspects of the development and characterization of fuel cells and their components. The focus was on polymer electrolyte systems. Fuel cells are used as the main energy converters in hydrogen-powered vehicles or electrical auxiliary units and are exposed to a variety of stresses. Investigations into the activity of the catalysts and the improvement of the service life under critical conditions are the focus of this program. Both the chemical-physical parameters and the manufacturing methods of innovative fuel cell systems are being investigated. The analysis of the Austrian electricity grid with regard to the use of renewable energy sources and the associated investigations into applicability and economic viability form a further pillar of fuel cell research in Annex 31. International exchange and scientific dissemination took place within the framework of IEA networking meetings, participation in conferences and meetings and the publication of articles in internationally recognized (peer reviewed) journals.

In the interests of international networking on the one hand and strengthening the location on the other, a number of research projects were initiated and successfully completed at TU Graz and subsequently at the Institute of Chemical Process Engineering and Environmental Technology during the reporting period. These projects resulted in a number of publications in internationally renowned peer-reviewed journals. IEA networking meetings and various conference visits also served to disseminate the results of the individual research projects. These projects are briefly described below.

In the HyStore project, research focused on the storage of hydrogen for individual cells, short stacks and entire fuel cell systems. Another focus in the reporting period was on extensive fuel cell tests. The GODEFC project was concerned with developing new, cost-effective anode and cathode catalysts with a low precious metal content and new anion exchange membranes based on sustainable and cost-effective materials for low-temperature fuel cells. The aim of the project polyDURAMEA, which is being carried out as part of the FFG Spin-off Grant Program, is to establish a company for the industrial production of CCMs for PEMFC stack and system manufacturers. The project focuses on the development of innovative, scalable production methods for cost-effective and durable catalyst-coated membranes (CCMs). The system integration of chemical looping processes for the use of biomass to produce hydrogen suitable for fuel cells was carried out in the BioLOOP project. The technology developed at CEET enables the regional use of biogas in decentralized plants. As part of the FFG project MILES (Medium and long-term storage technologies on the way to 100% renewable energy in Austria), a list of criteria for storage systems was drawn up in order to present them in a simulation model of the Austrian electricity system. Fuel conditioning with regard to high-purity hydrogen from electrolysis was realized in the HyTechonomy project.

The Project ProGen is focused on developing a new generation of PEM electrolyzers, with an emphasis on increasing the service life and reducing costs by reducing critical raw materials. The work within the framework of the SHyRE project focuses on the development of sulfur-depolarized electrolysis (SDE). SDE is a type of water electrolysis in which the anodic reaction of water electrolysis is replaced by the sulfur oxidation reaction.

The workshop *Recent Developments in Hydrogen Research* (17 May 2024) was organized as a scientific event on the university's premises. It was primarily aimed at the scientific community and students. Participation in the public event *Lange Nacht der Forschung 2024* (May 24, 2024), a nationwide event with around 270 exhibitors throughout Austria, aimed to reach a broader public and provide a detailed insight into hydrogen technology. Participation in the working group for fuel cell vehicles of the *A3PS – Austrian Association for Advanced Propulsion Systems* provides a central opportunity for exchange between research, industry, and politics through quarterly meetings.

3 Ausgangslage

Der Schwerpunkt der IEA-Kooperationen liegt in Europa, die Aktivitäten erstrecken sich aber auch auf Asien (Japan, China und Südkorea), die USA 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 die internationale und Vernetzung im Bereich erneuerbarer Energieträger und fortschrittlicher Energiewandler wie Brennstoffzellen entscheidend für die Akzeptanz und den Erfolg von Projekten ist. Im Rahmen dieses Projektes wurden am Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik verschiedene Anwendungen fortschrittlicher Brennstoffzellen und verwandter Technologien bearbeitet. Diese umfassten die Entwicklung und Untersuchung von Komponenten, die Herstellung und Charakterisierung von Einzelzellen unter verschiedenen Betriebsbedingungen und die Bereitstellung von hochreinem Druckwasserstoff.

Der Arbeitsplan des IEA Technology Collaboration Programme Advanced Fuel Cells sah für die Periode 2019-2024 die folgenden, in drei große Teilbereiche unterteilten, Schwerpunkte vor:

- 1) Neue Materialien für Brennstoffzellenstapel,
- 2) System, Komponenten und Balance-of-Plant-Gesichtspunkte und
- 3) Direkt-Brennstoff-Polymerelektrolytbrennstoffzellen.

Die Forschung im Bereich neuer Stackmaterialien zielt auf die Entwicklung verbesserter, haltbarer und kostengünstiger Polymerelektrolytmembranen, Elektrodenkatalysatoren und -strukturen, Katalysatorträger, Membran-Elektroden-Baugruppen, Bipolarplatten und anderer Stackmaterialien und -designs für PEFC ab.

Der zweite Bereich befasst sich mit Stack-, System- und Balance-of-Plant-Fragen in PEFC-Systemen und umfasst Systemanalysen, Entwürfe von Stack-/Systemhardware und Prototypen sowie Modellierung und Engineering. Dies umfasst auch die Erprobung, Charakterisierung und Standardisierung von Testverfahren in Bezug auf Endnutzeraspekte wie Auswirkungen von Verunreinigungen auf die Haltbarkeit, Wasser- und Wärmemanagement, Betriebsumgebungen und Arbeitszyklen sowie Frost-Tau-Zyklen. Die Entwicklung von PEFC-Brennstoffprozessoren für KWK- und APU-Anwendungen wird ebenfalls in diesem Forschungsbereich behandelt.

Der dritte Bereich konzentriert sich auf die Forschung und Entwicklung der DF-PEFC-Technologie, einschließlich Direktmethanol-Brennstoffzellensysteme, Direkt-Ethanol-Brennstoffzellensysteme und Direkt-Borhydrid-Brennstoffzellensysteme. Dazu gehören die Entwicklung von Zellmaterialien, die Untersuchung der Beziehung zwischen Zelleistung und Betriebsbedingungen, Stack- und Systemdesign und -analyse sowie die Untersuchung brennstoffspezifischer Fragen für diese Direkt-Brennstoffzellensysteme mit Polymerelektrolyt.

Die Arbeitsgruppe Wasserstoff- und Brennstoffzellensysteme des Institutes für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik ist seit 2007 (sechs Perioden) an verschiedenen IEA-Projekten beteiligt und in der Projektleitung aktiv. Laufende Projekte fließen in die neue Periode ein, Vorprojekte bilden die Basis für darauf aufbauende Forschungsprojekte. Die wissenschaftliche Verbreitung erfolgt über Fachzeitschriften, Workshops und Konferenzen.

Die Forschungsgruppe unter der Leitung von Prof. Hacker kooperiert eng mit internationalen (Yokohama National University, elcomax, IRD Fuel Cell Technology A/S, SINTEF, CEA-LIST, Nedstack fuel cell technology BV, Forschungszentrum Jülich, ZBT Duisburg, FuMA-Tech, etc.) und nationalen Akteuren (Österreichische Energieagentur, AVL, OMV, Magna Steyr, Fronius, Proinoic, VTU, A3PS, etc.) in der Wasserstoff- und Brennstoffzellenforschung. Die Teilnahme am Technology Collaboration Program (IEA AFC) fördert diese Zusammenarbeit, ermöglicht den internationalen Austausch von Wissen und Expertise und die Verbreitung aktueller Forschungsergebnisse in Österreich durch Summer Schools und Workshops.

4 Projekinhalt

Der Fokus der österreichischen Beteiligung am IEA TCP AFC ist durch die enge Zusammenarbeit auf internationaler Ebene direkt mit den Arbeitsschwerpunkten des Annex 31 verbunden. Neue Materialien und Kostenreduktion sind nach wie vor die wichtigsten Entwicklungstreiber in diesem Bereich. Die beteiligten Länder sind China, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Israel, Japan, Mexiko, Österreich, Schweden, Schweiz, Spanien, Südkorea, USA (Leitung).

Die folgenden Bereiche stellen einige der Schwerpunkte für Annex 31 in den dargestellten fünf Jahren dar:

- Entwicklung von platingruppenmetallfreien (PGM) oder besonders PGM-armen Katalysatoren für PEM-Brennstoffzellen
- Katalysator- und Membranmaterialien für alkalische Brennstoffzellen
- Katalysator, Stack- und Balance-of-Plant Materialien für mittelschwere und schwere Brennstoffzellenfahrzeuge
- Weitere Kostensenkung, Verbesserung der Lebensdauer und Integration aller Brennstoffzellenkomponenten.

Diese Themen wurden in den Forschungsschwerpunkten Entwicklung, Evaluierung und Anwendung von innovativen Herstellungsmethoden für Membran-Elektroden-Einheiten und Bipolarplatten mit kostengünstigen, neuartigen Materialien behandelt. Erarbeitet wurden die Inhalte des Programms in individuellen Forschungsprojekten. Diese national geförderten Projekte stützten sich auf die Beiträge internationaler Expert:innen und erfahrener Projektteams.

Austausch erfolgte weiters über das AFC TCP Task 31 Meeting in Darmstadt.

Ziel des Projektes **polyDURAMEA**, das im Rahmen des FFG Spin-off Stipendienprogramms durchgeführt wurde, war der Aufbau eines Unternehmens zur industriellen Produktion von CCMs für PEMFC Stack- und Systemhersteller. Das Projekt konzentrierte sich auf die Entwicklung innovativer, skalierbarer Produktionsmethoden für kostengünstige und langlebige katalysatorbeschichtete Membranen (CCMs). Ein Aspekt der Forschung war die experimentelle Entwicklung von Schlitzdüsen-, Elektrospinn- und Ultraschallsprühbeschichtungsverfahren zur Reduzierung des Platingehaltes in der Katalysatorschicht. Dies geschah durch direkte Beschichtung der Katalysatortinte auf die Membran und anschließende Charakterisierung und Identifizierung von Beschichtungsdefekten mittels SEM-EDX.

Um ein optimiertes Wassermanagement in Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen zu ermöglichen, wurden im Projekt **MEASURED** die Gasdiffusionsschichten mit per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) wie Polytetrafluorethylen (PTFE) behandelt. Diese Substanzen können jedoch die elektrische Leitfähigkeit verringern. Zudem gibt es EU-weite Bestrebungen, den Einsatz von PFAS aufgrund der Gefahren für Mensch und Umwelt zu verbieten. Als möglicher Ersatz wurden von uns

tensiddotierte Polyanilin (PANI)-Beschichtungen entwickelt. Dieses Projekt wurde in enger Kollaboration der TU Graz (Leitung) mit den Universitäten Politècnica de València, CMT - Motores Térmicos (Spanien), Stuttgart, Institut für Chemische Verfahrenstechnik (Deutschland) und Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo (Slowenien) durchgeführt.

AlpeDHUes zielte auf die Bestimmung und Quantifizierung des Einflusses von Temperatur und Feuchte auf die Kathoden-Katalysatorschicht ab. Die Verwendung von 3D-CFD-Modellen mit hoher Auflösung ermöglichte eine detaillierte Untersuchung lokaler Schadensmechanismen auf der Grundlage physikalischer und chemischer Prinzipien. Aus diesen hochauflösenden Modellen sollen vereinfachte Modelle abgeleitet werden mit dem Ziel, diese in Echtzeit zu betreiben. Dies ist die Voraussetzung, um innovative Online-Überwachungs- und Diagnosemethoden zu implementieren und Einblicke in die Brennstoffzellenprozesse zu gewinnen. Externer Partner der TU Graz war die Technische Universität Wien, Institut für Mechanik und Mechatronik (Österreich).

Das Projekt **MILES** konzentrierte sich auf die Konzeption von Energiespeichern, einschließlich Brennstoffzellensystemen, um Strategien und Marktmodelle zu entwickeln und die Bewertung und Entwicklung geeigneter Technologien zu beschleunigen und zu vereinfachen. Dabei war erkennbar, dass eine reine Kostenentscheidung für die Auswahl geeigneter Technologien nicht zielführend ist, da andere Faktoren wie der Grad der technologischen Reife und die Sicherheit für den Entscheidungsprozess ebenso wichtig sind. Für das Kriterium der gewichteten Energiekosten (LCOS) wurde ein Ladezyklus von vier Monaten angenommen, da die angenommene Dauer einen wesentlichen Einfluss auf die Speicherkosten hat. Dieses Projekt wurde vom Institut für Chemische Verfahrenstechnik der TU Graz in Kollaboration mit dem Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation der TU Graz abgehandelt.

In **HyTechonomy** und **SHyRE** wurde die Anwendbarkeit von Elektrolysetechnologien untersucht. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Untersuchung der Meerwasserelektrolyse, um diese Technologie weltweit attraktiver zu machen. Dabei wirkten die Organisationen AIT Austrian Institute of Technology GmbH, AIT (Österreich), BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH (Österreich), Leitung: HyCentA Research GmbH (Österreich), LEC GmbH (Österreich) und PROFACTOR GmbH (Österreich) zusammen, um die Projektziele zu erreichen.

5 Ergebnisse

5.1 Materialentwicklung und Design von Vertigungstechniken

Die Forschung in polyDuRAMEA, einem Projekt, das im Rahmen des FFG Spin-off Fellowship Programms läuft, konzentriert sich auf die Entwicklung innovativer, skalierbarer Produktionsmethoden für kostengünstige und langlebige katalysatorbeschichtete Membranen [1]-[3]. Ein Aspekt der Forschung ist die experimentelle Entwicklung von Schlitzdüsen-, Elektrosprinn- und Ultraschallsprühbeschichtungsverfahren zur Reduzierung des Platingehalts der Katalysatorschicht. Dies geschieht durch direkte Beschichtung der Katalysatorfarbe auf die Membran und anschließende Charakterisierung und Identifizierung von Beschichtungsdefekten mittels SEM-EDX. Die Auswirkungen der Farbzusammensetzung [2], [3] und der Katalysatorschichtdicke [2] auf die Defektbildung und die Leistung werden untersucht. In der Schicht wird die Verwendung funktioneller Binderpolymere erforscht. Die Leistung wird in elektrochemischen Tests mit 10 cm^2 Einzelzellen validiert. Hohe Leistungen von $1,4\text{ W}_{\text{el}}\text{ cm}^{-2}$ bei $0,6\text{ V}$ und $1,15\text{ W}_{\text{el}}\text{ cm}^{-2}$ bei $0,65\text{ V}$ wurden bereits mit geringen Platinbeladungen erreicht. Zur Verbesserung der Lebensdauer und der Korrosionsbeständigkeit des Kohlenstoffträgers wurde eine Schutzbeschichtung des Kohlenstoffträgers auf Basis von PANI entwickelt und zum Patent angemeldet. Die PANI-Beschichtung verdoppelte die Lebensdauer des Katalysators bei Ex-situ-Tests, und es wird erwartet, dass dies zu einer 20 %igen Verlängerung der CCM-Lebensdauer führen wird (Abbildung 1).

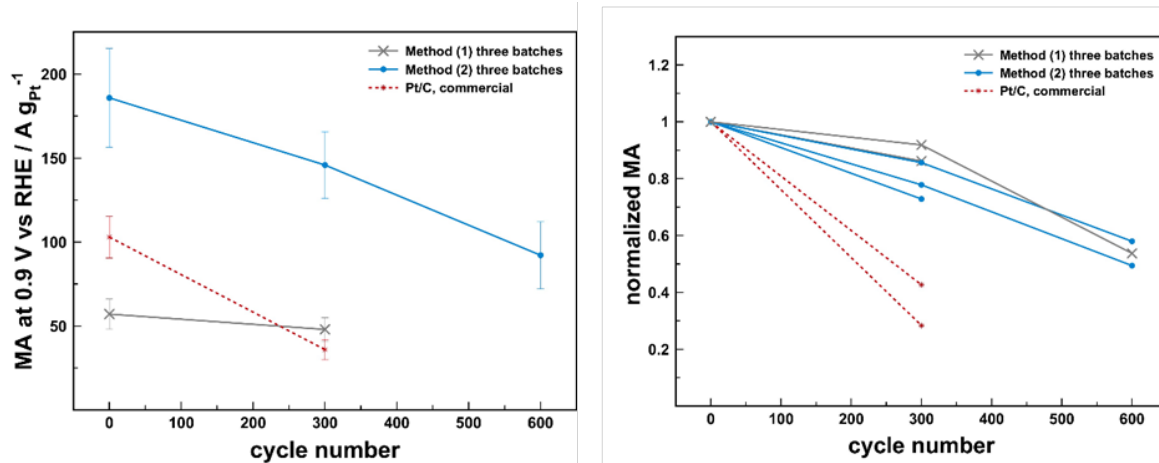


Abbildung 1: Die nach Methode 1 und 2 hergestellten PANI-Katalysatoren erreichen nach der doppelten Anzahl von Abbauzyklen die gleiche End-Aktivität wie das Vergleichsmaterial Pt/C (© TU Graz).

Zur Herstellung der Elektroden wird die Katalysatortinte, eine Dispersion aus Katalysator, Binder und Lösungsmittel, auf ein Trägermaterial (Membran oder Gasdiffusionsschicht) aufgebracht. Verschiedene Herstellungsverfahren wie Ultraschallbeschichtung, Elektrospraying oder Schlitzdüsenbeschichtung wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf Leistung und Lebensdauer untersucht. Die Modellierung dieser Eigenschaften erfolgte durch verschiedene elektrochemische Charakterisierungen, insbesondere durch Impedanzspektroskopie. Der Zusammenhang zwischen der Herstellung und der Beständigkeit der Brennstoffzellen gegenüber verschiedenen Kontaminationen, insbesondere Schwefel, wurde untersucht. Die Lagerfähigkeit der Katalysatortinte ist ein wesentlicher Bestandteil für das Gesamtverständnis des Herstellungsprozesses [4]. Physikochemische Analysen zeigten, dass die Dispersion instabiler ist als erwartet und Katalysatorpartikel sedimentieren. Daher ist eine Re-dispergierung unmittelbar vor der Verwendung der Druckfarbe für homogene Beschichtungen unerlässlich. Das organische Lösungsmittel oxidiert während der Lagerung, katalysiert durch Platin. Diese Oxidation verändert die Struktur der Beschichtung. Bei der elektrochemischen Charakterisierung konnten in zahlreichen verschiedenen Messungen keine signifikanten Unterschiede zwischen PEFC aus frischer und bis zu vier Wochen gelagerter Tinte festgestellt werden. Als Brückenwerkzeug zwischen Grundlagen- und Anwendungsforschung wurden Gasdiffusionselektroden-Halbzellen (GDE) eingesetzt (Abbildung 2). Die Vorteile von GDE-Halbzellen liegen in der gegenüber PEFC deutlich verkürzten Messzeit (3 h vs. 15 h), der Einfachheit und Modularität des Aufbaus und der hohen Reproduzierbarkeit. Außerdem können Halbreaktionen an Anode und Kathode bei relevanten Stromstärken getrennt untersucht werden [5].

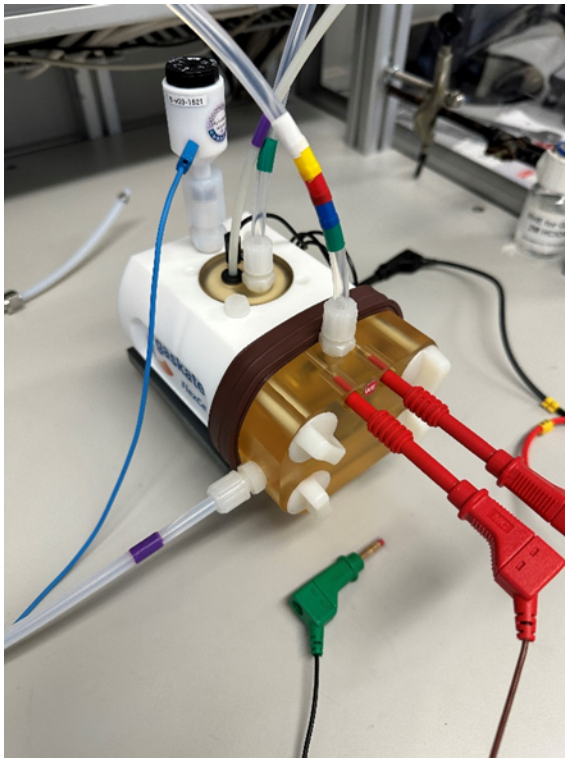


Abbildung 2: Gasdiffusionselektroden-Testzelle als Brückentool zwischen Grundlagen- und Anwendungsforschung im Bereich PEBZ (© TU Graz).

Im Projekt MEASured wurden verschiedene Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) mit einer aktiven Fläche von 50 cm² in Einzelzelltests über 100 h charakterisiert. Während der Tests wurden gezielt Betriebsparameter gewählt, um einen Einsatz in schweren Nutzfahrzeugen (HDV) zu nachzubilden, eine beschleunigte Alterung zu erreichen und somit ein schnelleres Feedback für eine effizientere Materialentwicklung zu ermöglichen. Um ein optimiertes Wassermanagement in Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen zu ermöglichen, werden die Gasdiffusionsschichten derzeit mit per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) wie Polytetrafluorethylen (PTFE) behandelt. Diese Substanzen können jedoch die elektrische Leitfähigkeit verringern. Zudem gibt es EU-weite Bestrebungen, den Einsatz von PFAS aufgrund der Gefahren für Mensch und Umwelt zu verbieten. Als möglicher Ersatz wurden von uns tensiddotierte Polyanilin (PANI)-Beschichtungen entwickelt (Abbildung 3). Während die Tenside für die notwendige Hydrophobie sorgen, bietet PANI aufgrund seiner elektrischen Leitfähigkeit einen Vorteil gegenüber dem isolierenden PTFE. Beim Test der PANI-beschichteten GDL in der Brennstoffzelle konnte eine um 42% höhere maximale Leistung gegenüber der mit PTFE behandelten GDL erzielt werden. Um die Eigenschaften des beschichteten GDL wie Oberflächenstruktur, Schichtdicke und Porosität weiter zu optimieren, wurden die Materialien mittels Mikro-Computertomographie (μ CT) untersucht. Durch den unterstützenden Einsatz von Deep Learning Software und fluiddynamischen Simulationen konnten die Tortuosität und der Gasfluss durch die GDL als wichtige Materialparameter berechnet werden.

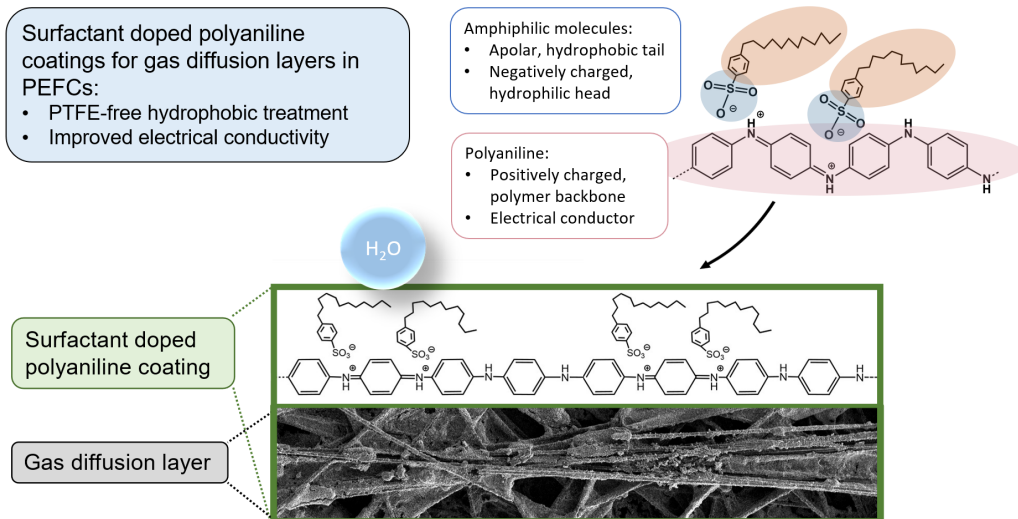


Abbildung 3: Konzept der Tensiddotierten Polyanilinbeschichtung für Gasdiffusionsschichten (© TU Graz).

5.2 Systembetrachtungen von Brennstoffzellensystemen und erneuerbaren Energienetzen

Als Ausgangspunkt werden die Degradationsmechanismen von Katalysatoren in PEM-Brennstoffzellen untersucht, wobei der Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit auf die Kathodenkatalysatorschicht im Vordergrund steht, was zu Prozessen wie Korrosion des Kohlenstoffträgers und Auflösung und Agglomeration von Platin führt [6]. Dabei wurde ein elektrochemisches Degradationsmodell, das kürzlich in das kommerzielle CFD-Paket AVL FIRE für PEM-Brennstoffzellen integriert wurde, genutzt. In dieser Arbeit werden ein theoretischer Überblick, eine experimentelle Validierung und eine 3D-Analyse des Modells anhand von Daten einer PEM-Brennstoffzelle mit drei Serpentinaugen unter verschiedenen Betriebsbedingungen vorgestellt. Das Modell verwendet einen Sub-Zyklus-Ansatz, um die zeitliche und räumliche Degradation zu kontrollieren. Es zeigt, dass höhere Temperaturen und niedrigere Luftfeuchtigkeit die Degradation beschleunigen, wodurch die Gesamtleistung und die elektrochemisch aktive Oberfläche verringert werden (Abbildung 4). In der Studie werden auch Stromdichteverteilungen analysiert, die Einblicke in lokalisierte Degradationsphänomene geben (Abbildung 5). Die Ergebnisse an neuen Zellen zeigen, dass höhere Temperaturen die Leistung aufgrund einer niedrigeren Gleichgewichtsspannung verringern. Im Gegensatz dazu wirkt sich eine geringere Luftfeuchtigkeit stark auf die Leistung aus, da die Membran austrocknet und der Ionentransport behindert wird. Stromdichtegradienten nehmen mit höheren mittleren Stromdichten zu, wobei in verschiedenen Fällen (REF, T90, RH50) aufgrund von Sauerstoffdiffusion und Selbstbefeuchtungseffekten der Membran spezifische Muster beobachtet werden. Gealterte Zellen zeigen einen größeren Leistungsabfall bei höheren Temperaturen und niedrigerer Luftfeuchtigkeit, wobei eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment besteht.

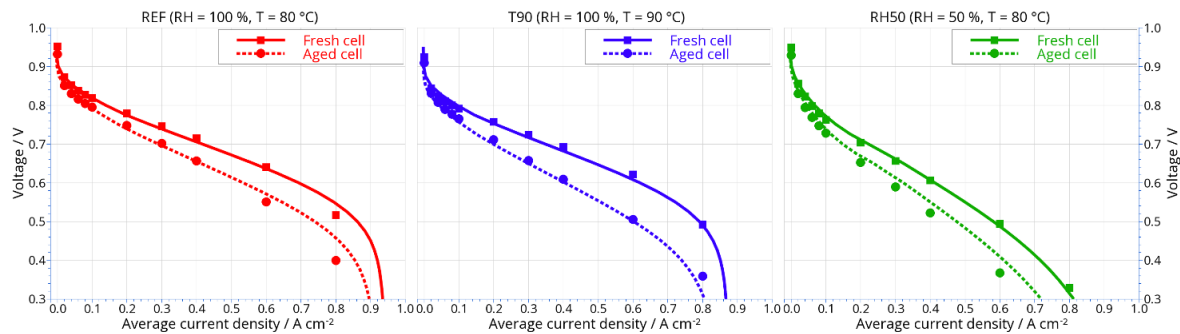


Abbildung 4: Polarisationskurven für neuwertige und gealterte Zellen in drei Variationsfällen. Höhere Temperaturen führen zu stärkeren Leistungseinbußen, während eine niedrigere Feuchte geringere Verluste verursacht (© TU Graz).

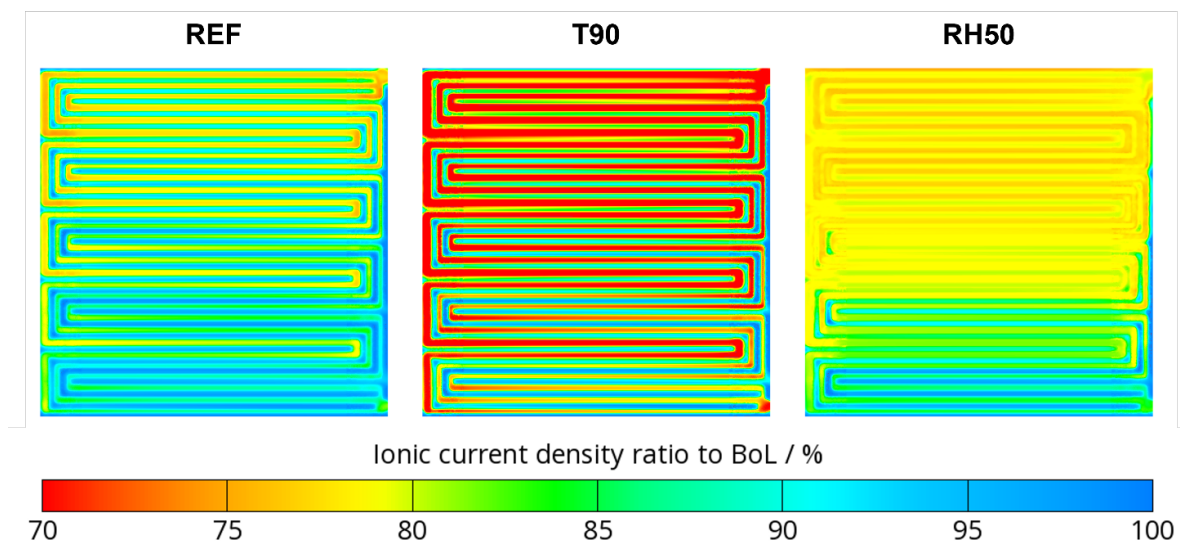


Abbildung 5: Verteilung der Ionenstromdichte in der Membran der gealterten Zelle, ausgedrückt als Prozentsatz im Vergleich zum Zustand zu Beginn. Das bietet einen detaillierten Einblick in die Stromverteilung innerhalb der Zelle (© TU Graz).

In einer zweiten Studie wird die Degradation von GDLs in PEM-Brennstoffzellen untersucht [7]. Charakterisierungstechniken wie Goniometrie, Thermogravimetrie (TGA) und SEM-EDX konzentrieren sich auf die Veränderung des Kontaktwinkels, des PTFE-Gehalts bzw. des Fluorgehalts unter verschiedenen Stress auslösenden Medien (Wasser, Wasserstoffperoxid (H_2O_2) und Fenton-Reagenz). Die Ergebnisse deuten auf eine minimale Änderung des Kontaktwinkels für makroporöses Substrat (MPS) in Wasser hin, aber auf eine signifikante Abnahme in Wasserstoffperoxid (H_2O_2) und Fenton-Reagenz, was auf eine erhöhte Benetzbarkeit und eine Verschlechterung der Oberflächeneigenschaften hinweist. Die mikroporöse Schicht (MPL) zeigt geringe Veränderungen in Wasser und H_2O_2 , aber eine deutliche Abnahme des Kontaktwinkels im Fenton-Reagenz. Die TGA-Ergebnisse zeigen eine Stabilität des PTFE-Gehalts in Wasser, eine leichte Abnahme in H_2O_2 und eine deutliche Verringerung im Fenton-Reagenz, was mit den Ergebnissen des Kontaktwinkels

korreliert. Die EDX-Analyse zeigt einen stabilen Fluorgehalt für das MPS in Wasser, aber eine Verringerung von H_2O_2 und Fenton-Reagenz. Der Fluorgehalt der MPL blieb unter allen Bedingungen stabil, was auf eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber dem Abbau aufgrund der dichteren Struktur und des höheren PTFE-Gehalts schließen lässt. Die Studie zeigt, dass das MPS anfälliger für oxidativen Abbau ist als die MPL, was wahrscheinlich auf die Unterschiede in der Struktur und im PTFE-Gehalt zurückzuführen ist.

Im Mittelpunkt des Sondierungsprojekts MILES stand eine ganzheitliche Bewertung verschiedener Mittel- und Langzeitspeichertechnologien (MLST) unter Berücksichtigung der Systemanforderungen des österreichischen Stromsystems und dessen Entwicklung im Sinne des EAG bis 2030. Dazu wird mit dem Stromsystemmodell LEGO (Low-carbon Expansion Generation Optimization) auf Basis einer technologieneutralen, techno-ökonomischen Prozessbewertung der Bedarf an MLST ermittelt und deren Wirtschaftlichkeit untersucht. Im Rahmen des Projekts werden verschiedene Speichertechnologien anhand ausgewählter Kriterien bewertet und charakterisiert. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Bewertung für jedes Speichersystem, wobei die einzelnen Kriterien zwischen den Speicherverfahren verglichen werden können.

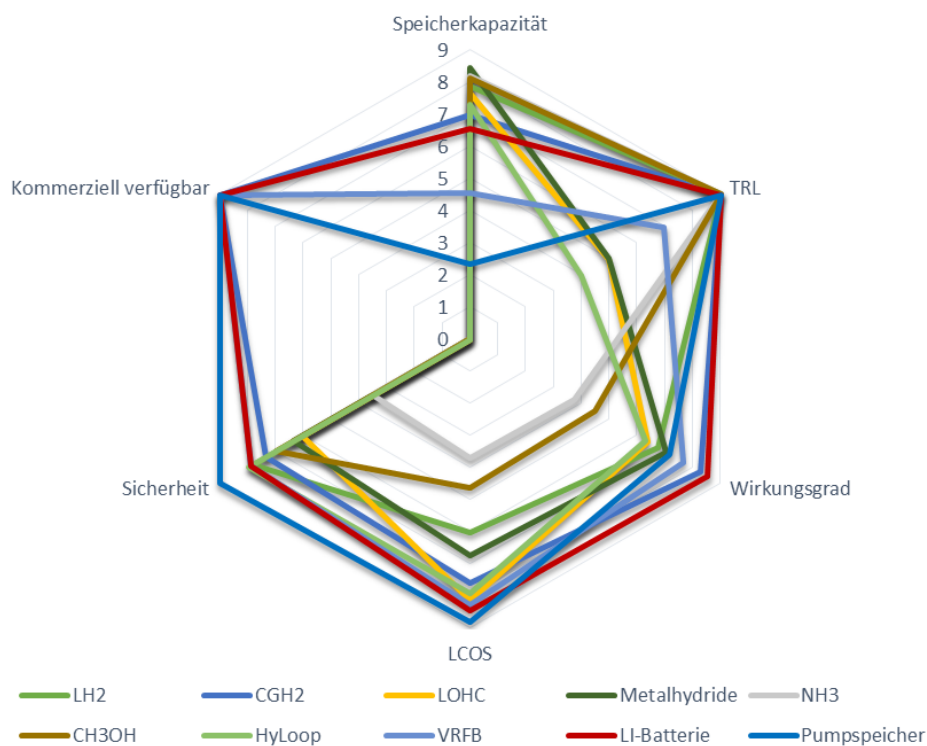


Abbildung 6: Grafische Darstellung der Bewertung über eine Reihe verschiedener Speichertechnologien (© TU Graz).

Abbildung 6 zeigt, dass eine reine Kostenentscheidung für die Auswahl geeigneter Technologien nicht zielführend ist, da andere Faktoren, wie z.B. die technologische Reife und die Sicherheit, für die Entscheidungsfindung ebenso wichtig sind. Für das Kriterium der gewichteten Energiekosten

(LCOS) wird ein Ladezyklus von vier Monaten angenommen, da die angenommene Dauer einen erheblichen Einfluss auf die Speicherkosten hat. So sind z.B. Li-Batterien für die Kurzzeitspeicherung bereits etabliert und relativ kostengünstig, werden aber bei längeren Zyklen von anderen Speichertechnologien überholt.

5.3 Brennstoffaufbereitung

Die nachhaltige Erzeugung von Wasserstoff ist für die Reduktion von Treibhausgasemissionen und den Übergang zu einem emissionsarmen Energiesystem unerlässlich. Die Ergebnisse dieser Arbeit tragen zur Optimierung der PEM-Wasserelektrolyse bei. Es wurden AST-Profile (Accelerated Stress Test) entwickelt, die direkt von erneuerbaren Energiequellen abgeleitet sind. Dieser Ansatz ermöglichte die Bewertung der Kopplung von Wind-, Photovoltaik- und Wasserkraftanlagen mit der PEMWE und führte zur wirksamen Identifizierung von Gegenmaßnahmen zur Verringerung der Degradation der Komponenten [8,9]. Die Arbeiten des CEET im Rahmen von ProGen konzentrieren sich auf Lebensdaueruntersuchungen durch die Definition der Belastungsgrenzen des Katalysators. Um die Dauer von Langzeittests zu verkürzen, wird ein Protokoll für beschleunigte Belastungstests entwickelt, bei dem die spezifische Degradation der Katalysatorschicht durch den Wechsel zwischen verschiedenen Oxidationszuständen ausgelöst wird. Membran-Elektroden-Einheiten (MEAs) mit unterschiedlichen Katalysatorbeladungen werden von den Projektpartnern bereitgestellt und in einer kommerziellen 5 cm² Elektrolysezelle nach dem AST-Protokoll getestet. Ihr elektrochemisches Verhalten wird durch Polarisationsverhalten und EIS charakterisiert. Die gesammelten elektrochemischen Informationen werden durch verschiedene ex-situ Methoden wie SEM und EDX ergänzt, um das Verständnis zu vertiefen.

Die Arbeiten im Rahmen des Projekts SHyRE konzentrieren sich auf die Entwicklung der schwefeldepolarisierten Elektrolyse (SDE). SDE ist eine Art der Wasserelektrolyse, bei der die anodische Reaktion der Wasserelektrolyse durch die Schwefeloxidsreaktion (SOR) ersetzt wird. Durch diese Substitution wird die für die Wasserspaltung erforderliche Energie von 1,23 V bei der Wasserelektrolyse auf 0,158 V bei der SDE reduziert. Außerdem entsteht bei der SOR als Nebenprodukt Schwefelsäure in hoher Reinheit (Abbildung 7).

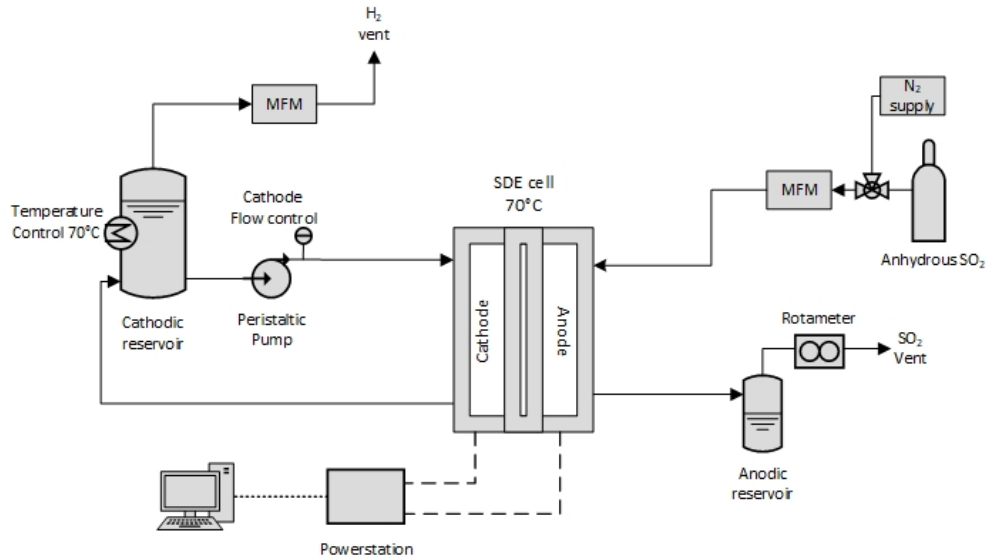


Abbildung 7: Experimenteller SDE-Aufbau für die Produktion von H_2 (© TU Graz).

5.4 Publikationen

Im Lauf dieser Periode sind eine Reihe von Publikationen in Fachzeitschriften erschienen. Diese sind im Anhang unter Literaturverzeichnis gelistet. Besonderen Stellenwert für den wissenschaftsstandort Österreich haben die folgenden Arbeiten:

- Photometric Method to Determine Membrane Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells (Mathias Heidinger, Eveline Kuhnert, Kurt Mayer, Daniel Sandu, Viktor Hacker und Merit Bodner, International Journal of Energy, 2023, Englisch, 23 Seiten)
<https://doi.org/10.3390/en16041957>

Es wird eine neue Methode zur Messung der Membrandegradation in Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen vorgeschlagen. Die Methode basiert auf dem Nachweis von Fluoridionen im Abwasser aus dem Kathoden- und Anodenausgang der PEFC unter Verwendung der Photometrie. Zu Beginn des Tests und nach dem Experiment am Ende des Tests wurden umfassende elektrochemische Charakterisierungen durchgeführt, um die Leistungsverluste und die Veränderungen aufgrund der Membrandegradation in den Zellen zu untersuchen.

- A Review of Accelerated Stress Tests for Enhancing MEA Durability in PEM Water Electrolysis Cells (Eveline Kuhnert, Viktor Hacker und Merit Bodner, International Journal of Energy, 2023, Englisch, 23 Seiten)
<https://doi.org/10.1155/2023/3183108>

Zu Beginn des Tests und nach dem Experiment am Ende des Tests wurden umfassende elektrochemische Charakterisierungen durchgeführt, um die Leistungsverluste und die Veränderungen aufgrund der Membrandegradation in den Zellen zu untersuchen.

- Recent advancements in high performance polymer electrolyte fuel cell electrode fabrication – Novel materials and manufacturing processes (Maximilian Grandi, Sebastian Rohde, Di-Jia Liu, Bernhard Gollas und Viktor Hacker, Elsevier, Journal of Power Sources, 562, 2023, Englisch, 20 Seiten)
<https://doi.org/10.1155/2023/3183108>

Dieser Artikel fasst die Trends bei der Entwicklung von Materialien und neuen MEA-Herstellungstechniken zusammen. Er basiert auf den im November 2021 an der Technischen Universität Graz abgehaltenen Fachtagung des Technology Collaboration Programme on Advanced Fuel Cells (AFC TCP) der Internationalen Energieagentur *Potential for cost reduction and performance improvement for PEFC at component and system level*. Die Materialien und Techniken werden systematisch im Hinblick auf die Zelleistung und Skalierbarkeit verglichen. Auf der Grundlage der in den letzten fünf Jahren veröffentlichten Ergebnisse werden aktuelle und künftige wissenschaftliche Herausforderungen ermittelt und analysiert.

- Core-shell iron-based oxygen carrier material for highly efficient green hydrogen production by chemical looping (Fabio Blaschke, Marian Bele, Špela Polak, Brigitte Bitschnau und Viktor Hacker, Materials Today, 75, 2024, Englisch, 20 Seiten)
<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2024.03.016>

Diese Arbeit zeigt einen effektiven Weg zur Wasserstoffproduktion in Brennstoffzellenqualität durch die Synthese von strukturierten Sauerstoffträgern (OC) aus kostengünstigen, grünen und umweltfreundlichen Materialien. Die neuartigen strukturierten Sauerstoffträger mit einer Core-Shell-Architektur stellen ein innovatives Konzept dar, um die Agglomeration von Pellets im Festbettreaktorsystem zu verhindern.

- Effects of Catalyst Ink Storage on Polymer Electrolyte Fuel Cells (Mario Kircher, Michaela Roschger, Wai Yee Koo, Fabio Blaschke, Maximilian Grandi, Merit Bodner und Viktor Hacker, Energies 2023, 16(19), 7011, 2023, Englisch, 20 Seiten).
<https://doi.org/10.3390/en16197011>

In dieser Studie werden die Auswirkungen der Lagerung auf die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Katalysatortinte (Pt/C, Nafion, 2-Propanol, Wasser) und der anschließend hergestellten Katalysatorschichten untersucht. Die Sedimentationsanalyse zeigte, dass die Katalysatorpartikel durch die von Nafion induzierte Ladungswechselwirkung nicht vollständig stabilisiert werden.

6 Vernetzung und Ergebnistransfer

Die im Projekt erarbeiteten Inhalte wurden für verschiedene Stakeholdergruppen, darunter Wissenschaftler:innen, Industrievertreter:innen, Fördergeber:innen und Politiker:innen, aufbereitet und über diverse Plattformen präsentiert. Ziel war es, diese Inhalte einem möglichst breiten Publikum zugänglich zu machen. Die gewählten Plattformen umfassen wissenschaftliche Publikationen und Fachtagungen, öffentliche Workshops und Diskussionen im Rahmen von IEA, A3PS und anderen Veranstaltungen zur Vernetzung von Forschung, Industrie und Politik.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten in diesem Zeitraum wurden die folgenden Publikationen in begutachteten Fachzeitschriften veröffentlicht. Weitere Veröffentlichungen erfolgten in Form von Posterpräsentationen und Vorträgen auf wissenschaftlichen Tagungen und Konferenzen. Die wichtigsten sind unter 5 Ergebnisse aufgeführt.

2024

Steiner, T, Schulze, K, Kienzl, N, Pauritsch, M, Hacker, V, Bock, S, Abad, A, Scharler, R & Anca-Couce, A 2024, 'Chemical looping of synthetic ilmenite, Part I: Addressing challenges of kinetic TGA measurements with H₂', *Fuel*, vol. 368, 131528. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131528>

Blaschke, F, Bele, M, Polak, S, Bitschnau, B & Hacker, V 2024, 'Core-shell iron-based oxygen carrier material for highly efficient green hydrogen production by chemical looping', *Materials Today*, vol. 75, pp. 37-56. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2024.03.016>

Kuhnert, E, Mayer, K, Heidinger, M, Riennessel, C, Hacker, V & Bodner, M 2024, 'Impact of intermittent operation on photovoltaic-PEM electrolyzer systems: A degradation study based on accelerated stress testing', *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 55, pp. 683-695. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.249>

Blaschke, F, Bele, M, Bitschnau, B & Hacker, V 2024, 'Stabilizing effect of support materials on iron-based oxygen carrier pellets for chemical looping hydrogen in long-term operation', *Science Talks*, vol. 10, 100335. <https://doi.org/10.1016/j.sctalk.2024.100335>

Heidinger, M, Sandu, D, Hacker, V & Bodner, M 2024, 'Advances in Photometric Fluoride Measurements in Effluent Fuel Cell Water', *DocDays VT 2024*, Graz, Austria, 1/07/24 - 2/07/24.

Heidinger, M, Sandu, D, Hacker, V & Bodner, M 2024, 'Advances in Photometric Fluoride Measurements in Effluent Fuel Cell Water', *DocDays VT 2024*, Graz, Austria, 1/07/24 - 2/07/24.

Hacker, V, Kircher, M, Rohde, S, Grandi, M & Madan, C 2024, 'Recent innovations in membrane electrode assembly fabrication for polymer electrolyte fuel cells', 9th Regional Symposium on Electrochemistry of South-East Europe, Novi Sad, Serbia, 3/06/24 - 7/06/24 pp. 14.

Hacker, V & Bodner, M 2024, 'Innovative chemische Speichermedien für erneuerbare Energien' WING-Business, vol. 1, no. 24, pp. 26-30.

Hacker, V, Bock, S & Blaschke, F Mar. 27 2024, Structured oxygen carrier, Patent No. EP4342582A1.

Muhammad, Y & Hacker, V 2024, 'Insight into aligned nanofibers improving fuel cell performances: strategies, rationalities, and opportunities', Materials Advances, vol. 5, no. 12, pp. 4974-4995. <https://doi.org/10.1039/D4MA00120F>

2023

Kuhnert, E, Heidinger, M, Sandu, D, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Analysis of PEM Water Electrolyzer Failure Due to Induced Hydrogen Crossover in Catalyst-Coated PFSA Membranes', Membranes, vol. 13, no. 3, 348. <https://doi.org/10.3390/membranes13030348>

Stoppacher, B, Lonardi, F, Bock, S, Bele, M, Bertucco, A & Hacker, V 2023, 'Deactivation of a steam reformer catalyst in chemical looping hydrogen systems: experiments and modeling', JPhys Energy, vol. 5, no. 1, 014021. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/acb668>

Kircher, M, Roschger, M, Koo, WY, Blaschke, F, Grandi, M, Bodner, M & Hacker, V 2023, 'Effects of Catalyst Ink Storage on Polymer Electrolyte Fuel Cells', Energies, vol. 16, no. 19, 7011. <https://doi.org/10.3390/en16197011>

Hren, M, Makuc, D, Plavec, J, Roschger, M, Hacker, V, Genorio, B, Bozic, M & Gorgieva, S 2023, 'Efficiency of neat and quaternized-cellulose nanofibril fillers in chitosan membranes for direct ethanol fuel cells', Polymers, vol. 15, no. 5, 1146. <https://doi.org/10.3390/polym15051146>

Roschger, M, Wolf, S, Billiani, A, Gorgieva, S, Genorio, B & Hacker, V 2023, 'Electrode configurations study for alkaline direct ethanol fuel cells', Journal of Electrochemical Science and Engineering, vol. 13, no. 5, pp. 783-793. <https://doi.org/10.5599/jese.1623>

Hren, M, Roschger, M, Hacker, V, Genorio, B, Fakin, D & Gorgieva, S 2023, 'High performance chitosan/nanocellulose-based composite membrane for alkaline direct ethanol fuel cells', International Journal of Biological Macromolecules, vol. 253, no. 8, 127693. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127693>

Roschger, M, Wolf, S, Mayer, K, Billiani, A, Genorio, B, Gorgieva, S & Hacker, V 2023, 'Influence of the electrocatalyst layer thickness on alkaline DEFC performance', Sustainable Energy & Fuels, vol. 7, no. 4, pp. 1093-1106. <https://doi.org/10.1039/D2SE01729F>

Roschger, M, Wolf, S, Hasso, R, Genorio, B, Gorgieva, S & Hacker, V 2023, 'Influence of the Electrode Deposition Method of Graphene-Based Catalyst Inks for ADEFC on Performance',

ACS Applied Materials and Interfaces, vol. 15, no. 34, pp. 40687-40699.
<https://doi.org/10.1021/acsami.3c09192>

Grandi, M, Gatalo, M, Kamšek, AR, Kapun, G, Mayer, K, Ruiz-Zepeda, F, Šala, M, Marius, B, Bele, M, Hodnik, N, Bodner, M, Gaberšček, M & Hacker, V 2023, 'Mechanistic study of fast performance decay of Pt-Cu alloy based catalyst layers for polymer electrolyte fuel cells through electrochemical impedance spectroscopy', *Materials*, vol. 16, no. 9, 3544.
<https://doi.org/10.3390/ma16093544>

Wolf, S, Roschger, M, Genorio, B, Garstenauer, D & Hacker, V 2023, 'Mixed Transition-Metal Oxides on Reduced Graphene Oxide as a Selective Catalyst for Alkaline Oxygen Reduction', *ACS Omega*, vol. 8, no. 12, pp. 11536-11543. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00615>

Heidinger, M, Kuhnert, E, Mayer, K, Sandu, D, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Photometric Method to Determine Membrane Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells', *Energies*, vol. 16, no. 4, 1957. <https://doi.org/10.3390/en16041957>

Samsudin, AM & Hacker, V 2023, 'QPVA-Based Electrospun Anion Exchange Membrane for Fuel Cells', *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 12, no. 2, pp. 375-380. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.49909>

Wolf, S, Roschger, M, Genorio, B, Hodnik, N, Gatalo, M, Ruiz-Zepeda, F & Hacker, V 2023, 'Reduced graphene oxide as efficient carbon support for Pd-based ethanol oxidation catalysts in alkaline media', *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 771-782. <https://doi.org/10.5599/jese.1643>

Roschger, M, Wolf, S, Billiani, A, Mayer, K, Hren, M, Gorgieva, S, Genorio, B & Hacker, V 2023, 'Study on Commercially Available Membranes for Alkaline Direct Ethanol Fuel Cells', *ACS Omega*, vol. 8, no. 23, pp. 20845-20857. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01564>

Tritscher, F, Mularczyk, A, Forner-Cuenca, A, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Surfactant doped polyaniline coatings for functionalized gas diffusion layers in low temperature fuel cells', *Materials Advances*, vol. 4, no. 12, pp. 2573-2585. <https://doi.org/10.1039/D2MA01104B>

Blaschke, F, Bele, M, Bitschnau, B & Hacker, V 2023, 'The effect of microscopic phenomena on the performance of iron-based oxygen carriers of chemical looping hydrogen production', *Applied Catalysis B*, vol. 327, no. 15 June 2023, 122434. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.122434>

Gollas, B & Hacker, V 2023, 'Joint event: 8th Regional Symposium on Electrochemistry of South-East Europe (RSE-SEE 8) and 9th Kurt Schwabe Symposium', *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 713-714. <https://doi.org/10.5599/jese.1989>

Hacker, V, Blaschke, F, Lammer, M & Pauritsch, M 2023, Iron Based Hydrogen Storage and Transport. in Y Bicer, T Al-Ansari, I Dincer, O Abedrabboh, M Alherbawi & B Yuzer (eds), 14th International Conference on Hydrogen production. Doha, pp. 6, International Conference on Hydrogen Production, Doha, Qatar, 19/12/23.

Hacker, V, Mitsushima, S, Gollas, B & Bodner, M (eds) 2023, 'Student Poster Presentation on Hydrogen and Fuel Cells: Abstracts of the poster presentations within the 15th International

Summer School on Advanced Studies of Polymer Electrolyte Fuel Cells', Paper presented at 6th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells, Graz, Austria, 30/08/23 - 30/08/23.
<https://doi.org/10.3217/978-3-85125-973-5>

Pauritsch, M, Lammer, M, Pröll, C, Blaschke, F, Madan, C & Hacker, V 2023, 'Chemical Looping for Hydrogen Production and Energy Storage', Powering Sustainable Manufacturing, Triest, Italy, 14/11/23 - 14/11/23.

Blaschke, F, Bele, M & Hacker, V 2023, 'Enhanced Hydrogen Production with Chemical Looping Through Doping Zirconium Oxide by Using Iron-Based Oxygen Carrier', DocDays VT 2023, Graz, Austria, 3/07/23.

Käfer, M, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Enhancing Water Analysis for improved Performance and Durability of FCEVs', 6th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells, Graz, Austria, 30/08/23 - 30/08/23.

Heidinger, M, Kuhnert, E, Mayer, K, Sandu, D, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Ex-situ measurement of chemical membrane degradation using photometry', 6th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells, Graz, Austria, 30/08/23 - 30/08/23.

Edjokola, JM, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Impact of Temperature and Relative Humidity on Electrocatalyst Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells: An Experimental Study', 6th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells, Graz, Austria, 30/08/23 - 30/08/23.

Halper, K, Blaschke, F, Lammer, M & Hacker, V 2023, 'Investigation of the Influence of Carbon Deposition on the Purity of the Hydrogen Production in the Chemical Looping Process', 15th International Summer School on Advanced Studies of Polymer Electrolyte Fuel Cells and Hydrogen, Graz, Austria, 28/08/23 - 2/09/23. <https://doi.org/10.3217/978-3-85125-973-5>

Roschger, M, Wolf, S, Billiani, A, Mayer, K, Hren, M, Gorgieva, S, Genorio, B & Hacker, V 2023, 'Investigations on the System Design of Alkaline Direct Ethanol Fuel Cells', 6th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells, Graz, Austria, 30/08/23 - 30/08/23.
<https://doi.org/10.3217/978-3-85125-973-5>

Grandi, M, Madan, C, Maiberg, R, Kircher, M, Rhode, S, Bodner, M & Hacker, V 2023, 'Progress in the production of membrane electrode assemblies (MEAs) for durable polymer electrolyte fuel cells', Powering Sustainable Manufacturing, Triest, Italy, 14/11/23 - 14/11/23.

Kircher, M, Koo, WY, Roschger, M & Hacker, V 2023, 'Storage effects of catalyst ink for polymer electrolyte membrane fuel cells', AIChE Annual Meeting 2023, United States, 5/11/23 - 10/11/23.

Heidinger, M, Sandu, D, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Determination of Membrane Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells with In-Situ and Ex-Situ Measurements', 244th ECS Meeting, Gothenburg, Sweden, 8/10/23 - 12/10/23.

Edjokola, JM, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Elucidating Gas Diffusion Layer Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells under Different Oxidative Media', World Fuel Cell Conference 2023, London, United Kingdom, 11/12/23 - 13/12/23.

Käfer, M, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Enhancing Water Analysis for improved Performance and Durability of Fuel Cell-powered Electric Vehicles', 6th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells, Graz, Austria, 30/08/23 - 30/08/23.

Heidinger, M, Kuhnert, E, Mayer, K, Sandu, D, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Ex-situ measurement of chemical membrane degradation using photometry', 6th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells, Graz, Austria, 30/08/23 - 30/08/23 pp. 14-15.
<https://doi.org/10.3217/978-3-85125-973-5>

Kuhnert, E, Heidinger, M, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Fluoride Emission Rate Analysis in Proton Exchange Membrane Water Electrolysis Cells'.

Edjokola, JM, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Impact of Temperature and Relative Humidity on Electrocatalyst Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells: An Experimental Study', 6th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells, Graz, Austria, 30/08/23 - 30/08/23.
<https://doi.org/10.3217/978-3-85125-973-5>

Kuhnert, E, Heidinger, M, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Induced Hydrogen Crossover Accelerated Stress Test for PEM Water Electrolysis Cells', 6th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells, Graz, Austria, 30/08/23 - 30/08/23.

Edjokola, JM, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Investigation of Gas Diffusion Layer Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells via Chemical Oxidation', 244th ECS Meeting , Gothenburg, Sweden, 8/10/23 - 12/10/23.

Roschger, M, Wolf, S, Billiani, A, Mayer, K, Hren, M, Gorgieva, S, Genorio, B & Hacker, V 2023, 'Investigations on the System Design of Alkaline Direct Ethanol Fuel Cells', 15th International Summer School on Advanced Studies of PEFCs, Graz, Austria, 28/08/23 - 2/09/23.

Blaschke, F, Bele, M, Bitschnau, B & Hacker, V 2023, 'Stabilizing effect of support materials on iron-based oxygen carrier pellets for chemical looping hydrogen in long-term operation', Materials Today Conference 2023, Singapore, Singapore, 2/09/23 - 5/09/23.

Blaschke, F, Lammer, M, Pauritsch, M, Stoppacher, B & Hacker, V 2023, Iron Oxide – The Energy Carrier of the Future: The need for large-scale energy storage and transport will continue to rise in a post-fossil world, along with the world's population and standard of living..
<<https://epaper.tugraz.at/paper/101/1/desktop>>

Kuhnert, E, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'A Review of Accelerated Stress Tests for Enhancing MEA Durability in PEM Water Electrolysis Cells', International Journal of Energy Research , vol. 2023, 3183108. <https://doi.org/10.1155/2023/3183108>

Grandi, M, Rohde, S, Liu, D-J, Gollas, B & Hacker, V 2023, 'Recent advancements in high performance Polymer Electrolyte Fuel Cell electrode fabrication – novel materials and manufacturing processes', Journal of Power Sources, vol. 562, 232734. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232734>

Edjokola, JM, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Investigation of Gas Diffusion Layer Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cell Via Chemical Oxidation', ECS Transactions, vol. 112, no. 4, pp. 265-271. <https://doi.org/10.1149/11204.0265ecst>

Kuhnert, E, Kiziltan, Ö, Hacker, V & Bodner, M 2023, 'Investigation of the Impact of Chloride Contamination on Degradation in PEM Water Electrolyzer Cells', ECS Transactions, vol. 112, no. 4, pp. 485-494. <https://doi.org/10.1149/11204.0485ecst>

Die Ergebnisse des Projektes und der Arbeiten im TCP dienen somit sowohl der Industrie, staatlichen Institutionen als auch der nationalen und internationalen universitären Forschung.

Zusätzlich zu diesen Fachpublikationen wurden Veranstaltungen zum internationalen Austausch, der Ausbildung und Forschung sowie der Öffentlichkeitsarbeit abgehalten. Teilnahme bzw. Organisation dient der Stärkung von Forschung und Entwicklung, sowie der Verbesserung der gesellschaftlichen Wahrnehmung von Wissenschaft und Technik. Zu diesen zählen die im Folgenden gelisteten Events:

AFC TCP Task 31 Meeting

Gastgeberin des Task 31 2023 Meetings war Prof. Ulrike Kramm von der Technischen Universität Darmstadt. Elf Vertreter aus neun Ländern nahmen an der Veranstaltung teil, zusammen mit mehreren Forschenden und PhD-Student:innen der TU Darmstadt und lokalen Industrievertretern. Insgesamt wurden Vorträge von neun Teilnehmer:innen unterschiedlicher teilnehmender Länder präsentiert. Ergänzt wurde die Veranstaltung von zwei außertourlichen Vorträgen, sowie einer Postersession für Studierende. Wissenschaftliche Diskussionen rundeten die Veranstaltung ab. Zum Abschluss des Workshops organisierten die Organisatoren von der TU Darmstadt eine Laborbesichtigung und eine Demonstration ihrer hochmodernen Forschungseinrichtungen und laufenden Brennstoffzellenprojekte. Als möglichen nächsten Abhaltungsort des Task 31 Meetings wurde die Universität von Poitiers vorgeschlagen.

15th International Summer School on Advanced Studies of PEFCs and H₂

Die Summer School findet jährlich, alternierend in Graz und Yokohama statt. Im Jahr 2023 wurde diese von der Arbeitsgruppe organisierte Veranstaltung vom 28. August bis 2. September an der TU Graz abgehalten. Internationale Vortragende und Teilnehmer:innen aus Industrie und Forschung trugen dazu bei, diese Veranstaltung zu einem charaktvollen und interessanten Tag zu machen. Keynote-Vorträge zu unterschiedlichen Aspekten von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie bildeten das Fundament der Veranstaltung. Teilnehmende Studierende hatten auch die Gelegenheit, ihre jeweiligen wissenschaftlichen Projekte und Erfolge zu präsentieren. In der Postersession wurden 32 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.

Recent Developments in Hydrogen Research

Mai 2024 als wissenschaftliche Veranstaltung in den Räumlichkeiten der Universität organisiert. Er richtete sich vor allem an die wissenschaftliche Gemeinschaft und an Studierende.

Hauptteil der Veranstaltung war die Reihe von Expert:innenvorträgen zu aktuellen Entwicklungen im Bereich der Wasserstoffforschung, gefolgt von Podiumsdiskussion, in der die Podiumsteilnehmer:innen ihre Sichtweise zu den Schwellen, die im Hinblick auf Wasserstoff überwunden werden müssen, einbrachten. Den Abschluss des Workshops bildete die Möglichkeit, in entspannter Atmosphäre Kontakte zu knüpfen und sich mit anderen Teilnehmer:innen aus Wissenschaft und Industrie auszutauschen.

Lange Nacht der Forschung 2024

Die Teilnahme an der öffentlichen Veranstaltung *Lange Nacht der Forschung 2024* (24. Mai 2024), einer bundesweiten Veranstaltung mit rund 270 Ausstellern in ganz Österreich, zielte darauf ab, eine breitere Öffentlichkeit zu erreichen und einen detaillierten Einblick in die Wasserstofftechnologie zu geben. Auf diese Weise konnten Kinder, Jugendliche und Erwachsene mit Wissenschaftler:innen der Technischen Universität Graz in Kontakt kommen und deren Forschung hautnah erleben.

Austrian Association for Advanced Propulsion Systems – A3PS

Partizipation am Arbeitskreis für Brennstoffzellenantriebe positioniert die österreichische akademische Forschung für wirkungsvollen Austausch mit der Industrie. Beteiligung erfolgte im Lauf der Projektperiode über die Mitarbeit an Positionspapieren, der A3PS Roadmap *Austrian Roadmap for sustainable mobility – a long-term perspective* und lokalen Diskussionsforen im Rahmen der A3PS-Quartalsmeetings und Mitgliederversammlungen.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Durch die Beteiligung an *Fortschrittliche Brennstoffzellen Annex 31: Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen* konnte das Projektteam der TU Graz seine internationale Positionierung auf dem Gebiet der Niedertemperatur-Brennstoffzellen festigen und durch intensive Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnerorganisationen weiter ausbauen.

Die Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie bietet ein erhebliches Potenzial für die Umgestaltung der Energieversorgung und Mobilität. Brennstoffzellen wandeln chemische Energie direkt in elektrische Energie um, wobei Wasserstoff als sauberer Energieträger dient. Die abgeschlossenen und laufenden Projekte zu dieser Technologie ermöglichen somit eine emissionsfreie Energieerzeugung, da als Nebenprodukt nur reines Wasser entsteht. Darüber hinaus kann Wasserstoff als Speichermedium für erneuerbare Energien eingesetzt werden, was die Netzstabilität und Versorgungssicherheit erhöht.

Die Integration von Wasserstofftechnologien kann somit zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beitragen, die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern verringern, den Übergang in eine nachhaltige Energiezukunft beschleunigen und damit den Wirtschafts- und Forschungsstandort Österreich nachhaltig stärken.

Da Energiespeichertechnologien, wie z.B. die systemsiche Verknüpfung von Wasserstoffspeichern und Brennstoffzellen, nach momentanem Kenntnisstand ein integraler Faktor für die Stabilität von (erneuerbaren) Energienetzen sind, sollte hier auch politisch angesetzt werden. Die momentane Rechtslage in Österreich macht die Speicherung von erneuerbarer Energie noch zu einem komplexen Thema. Die technischen Herausforderungen zur Speicherung werden in einer Vielzahl von Forschungsprojekten in Angriff genommen und sukzessive überwunden, doch sind es die rechtlichen Rahmenbedingungen, welche deren Einsatz erst ermöglichen. Nur in dieser Kombination kann die grüne Energiewende vollends gelingen. Wie im FFG-Projekt *MILES* eindrücklich gezeigt wurde, besteht in Österreich und darüber hinaus durchaus der Bedarf und die ökonomische Sinnhaftigkeit von Bedarf an Mittel- und Langzeitspeichern, sie sind nur eben oft auf Grund der rechtlichen Rahmenbedingungen schwer zu implementieren. Hier gilt es auf politischer Ebene anzusetzen, um Klima- und Umweltschutz als wirtschaftlich sinnvolle Maßnahme zu verstehen und voranzutreiben.

Weiterführende Forschung am Forschungsstandort Graz erfolgt auf dem Sektor Brennstoffzellen beispielsweise im Projekt *Coat&Roll*. Hier liegt der Schwerpunkt auf innovativen Fertigungsverfahren von Brennstoffzellkomponenten und baut somit direkt auf den Projekten *polyDURAMEA* und *MEASURED* dieser Periode auf. Dabei wird an der TU Graz eine einzigartige Rolle-zu-Rolle-

Infrastruktur für die Produktionsforschung von Zukunftstechnologien aufgebaut. Die Forschungsinfrastruktur im Projekt *Coat&Roll* ermöglicht die Untersuchung komplexer Fertigungsverfahren zur Entwicklung neuer Technologien und Materialkombinationen im Rolle-zu-Rolle-Verfahren mit minimalem Einsatz von Substraten und Chemikalien durch Drucken, Beschichten und Laminieren. Das Projekt *Jeffree - Joint Effort for Efficient PFAS Free Catalyst Coated Membrane for Fuel Cells* zielt darauf ab, Perfluoralkyl- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) aus Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen zu entfernen und gleichzeitig deren Effizienz zu erhöhen. PFAS sind persistent, toxisch und reichern sich in Wasser, Boden und Organismen an. Im Rahmen des Projekts werden PFAS-freie Membran-Elektroden-Einheiten entwickelt, die die Effizienz und Haltbarkeit der heutigen PEM-Brennstoffzellen übertreffen und eine neue Ära sauberer und effizienter Energielösungen ermöglichen.

Andere Forschungsschwerpunkte orientieren sich auf Elektrolysetechnologien. Zu den Projekten, welche in direktem Zusammenhang mit Brennstoffzellenforschung stehen, gehören *SAEP* und *AniGen*. Das Projekt *SAEP - Sustainable catalyst coated electrodes for efficient AEM electrolyser production* konzentriert sich auf die Entwicklung von Anionenaustauschmembran-Elektrolyseuren für die kostengünstige Produktion von grünem Wasserstoff durch die Entwicklung von Katalysatoren ohne Platingruppenmetalle. Unter der Leitung der TU Graz und in Zusammenarbeit mit JOAN-NEUM RESEARCH konzentriert sich das Projekt auf die skalierbare Herstellung von Elektroden von Rolle zu Rolle mit verbesserter Leistung und Haltbarkeit. Das Projekt *AniGen - Novel AEM designs and scale-up* umfasst die Entwicklung der nächsten Generation von Anionenaustauschmembran-Elektrolysezellen und die Kombination dieser Zellen zu einem Kurzstapel mit drei bis fünf Zellen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Verbesserung der Effizienz und der Erhöhung der Lebensdauer.

Im FFG-Projekt *FIRES* soll ab Herbst 2025 ein innovatives Speichersystem für Wasserstoff und thermische Energie entwickelt und im Pilotmaßstab erprobt werden. Zu diesem Zweck wird ein internationales Konsortium mit Expertise in Speichermaterialentwicklung, Materialsynthese, Prozesssimulation und konstruktiver Verfahrenstechnik unter der Leitung der TU Graz zusammentreten, um die zukunftssträchtige Technologie Chemical-Looping-Hydrogen (HyLoop) auf die nächste Stufe zu heben.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die nach Methode 1 und 2 hergestellten PANI-Katalysatoren erreichen nach der doppelten Anzahl von Abbauzyklen die gleiche End-Aktivität wie das Vergleichsmaterial Pt/C (© TU Graz).....	17
Abbildung 2: Gasdiffusionselektroden-Testzelle als Brückentool zwischen Grundlagen- und Anwendungsforschung im Bereich PEBZ (© TU Graz).	18
Abbildung 3: Konzept der Tensiddotierten Polyanilinbeschichtung für Gasdiffusionsschichten (© TU Graz).....	19
Abbildung 4: Polarisationskurven für neuwertige und gealterte Zellen in drei Variationsfällen. Höhere Temperaturen führen zu stärkeren Leistungseinbußen, während eine niedrigere Feuchte geringere Verluste verursacht (© TU Graz).	20
Abbildung 5: Verteilung der Ionenstromdichte in der Membran der gealterten Zelle, ausgedrückt als Prozentsatz im Vergleich zum Zustand zu Beginn. Das bietet einen detaillierten Einblick in die Stromverteilung innerhalb der Zelle (© TU Graz).....	20
Abbildung 6: Grafische Darstellung der Bewertung über eine Reihe verschiedener Speichertechnologien (© TU Graz).	21
Abbildung 7: Experimenteller SDE-Aufbau für die Produktion von H ₂ (© TU Graz).....	23

Literaturverzeichnis

- [1] M. Grandi, S. Rohde, D. J. Liu, B. Gollas, and V. Hacker, "Recent advancements in high performance polymer electrolyte fuel cell electrode fabrication – Novel materials and manufacturing processes," *J. Power Sources*, vol. 562, p. 232734, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.232734.
- [2] M. Grandi et al., "The Influence Catalyst Layer Thickness on Resistance Contributions of PEMFC Determined by Electrochemical Impedance Spectroscopy," *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 7299, Nov. 2021, doi: 10.3390/en14217299.
- [3] M. Grandi et al., "Mechanistic Study of Fast Performance Decay of PtCu Alloy-based Catalyst Layers for Polymer Electrolyte Fuel Cells through Electrochemical Impedance Spectroscopy," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 9, p. 3544, May 2023, doi: 10.3390/ma16093544.
- [4] M. Kircher et al., "Effects of Catalyst Ink Storage on Polymer Electrolyte Fuel Cells," *Energies*, vol. 16, no. 19, p. 7011, 2023, doi: 10.3390/en16197011.
- [5] M. Roschger et al., "Influence of the electrocatalyst layer thickness on alkaline DEFC performance," *Sustainable energy & fuels*, vol. 7, no. 4, pp. 1093–1106, 2023, doi: 10.1039/d2se01729f.
- [6] Fink, C., Edjokola, J.M., Telenta, M., & Bodner, M. (2023). "Modeling of Catalyst Degradation in PEM Fuel Cells Applied to 3D Simulation". *EFCF 2023: Low-Temp. Fuel Cells, Electrolysers & H2 Processing*.
- [7] Edjokola, J. M., Hacker, V., & Bodner, M. (2023). "Investigation of Gas Diffusion Layer Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cell via Chemical Oxidation". *ECS Transactions*, 112(4), 265–271. <https://doi.org/10.1149/11204.0265ecst>
- [8] Kuhnert E, Hacker V, Bodner M. "A Review of Accelerated Stress Tests for Enhancing MEA Durability in PEM Water Electrolysis Cells". *International Journal of Energy Research* 2023;2023:1–23. <https://doi.org/10.1155/2023/3183108>.
- [9] Kuhnert E, Mayer K, Heidinger M, Rienessel C, Hacker V, Bodner M. "Impact of intermittent operation on photovoltaic-PEM electrolyzer systems: A degradation study based on accelerated stress testing". *International Journal of Hydrogen Energy* 2024;55:683–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.249>.

Abkürzungen

A3PS	Austrian Association for Advanced Propulsion Systems
AST	beschleunigte Belastungstests
CCM	katalysatorbeschichtete Membran
CFD	Numerische Strömungsmechanik
CGH ₂	komprimierter Wasserstoff
EAG	Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz
EDX	energiedispersive Röntgenspektroskopie
EU	Europäische Union
FFG	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
GDE	Gasdiffusionselektrode
GDL	Gasdiffusionsschicht
HDV	Schwerlastfahrzeugen
HyLoop	Chemical Looping Wasserstoff
IEA	Internationale Energieagentur
LCOS	gewichtete Energiespeicherkosten
LEGO	Low-carbon Expansion Generation Optimization
LH ₂	Flüssigwasserstoff
LOHC	Flüssiger, organischer Wasserstoffträger
MEA	Membran-Elektroden-Einheit
MLST	Mittel- und Langzeitspeichertechnologien
MPL	mikroporöse Schicht
MPS	makroporöses Substrat
PANI	Polyanilin
PEFC	Polymerelektrolytbrennstoffzelle
PEM	Polymerelektrolytmembran
PFAS	per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen
PTFE	Polytetrafluorethylen
SDE	schwefeldepolarisierte Elektrolyse
SEM	Elektronenmikroskopie
SOR	Schwefeloxidationsreaktion
TGA	Thermogravimetrie
TRL	Technologiebereitschaft
VRFB	Vanadium-Redoxflowbatterie

