

IEA AFC Annex 31: Fortschrittliche Brennstoffzellen: Polymerelektrolytmembran- Brennstoffzellen

Arbeitsperiode 2014 - 2017 V. Hacker

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

30/2017

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

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

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

IEA AFC Annex 31: Fortschrittliche Brennstoffzellen: Polymerelektrolytmembran- Brennstoffzellen

Arbeitsperiode 2014 - 2017

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Viktor Hacker
Technische Universität Graz, Institut für Chemische
Verfahrenstechnik und Umwelttechnik

Graz, April 2017

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie

IEA FORSCHUNGS
KOOPERATION

Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 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.

Dipl. Ing. Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1. Kurzfassung | 4 |
| 1.1. Deutsche Kurzfassung | 4 |
| 1.1.1. Ausgangssituation/Motivation | 4 |
| 1.1.2. Inhalt und Methodische Vorgehensweise | 4 |
| 1.1.3. Ergebnisse | 6 |
| 1.2. Englische Kurzfassung | 7 |
| 1.2.1. Motivation | 7 |
| 1.2.2. Content and approach | 7 |
| 1.2.3. Summary | 8 |
| 2. Einleitung | 9 |
| 3. Hintergrundinformation zum Projektinhalt | 9 |
| 4. Ergebnisse des Projektes | 11 |
| 4.1. Arbeitspaket 1: Projektmanagement, Dissemination und Öffentlichkeitsarbeit | 11 |
| 4.2. Arbeitspaket 2: Neue Materialien für Brennstoffzellenstapel | 11 |
| 4.3. Arbeitspaket 3: System, Komponenten und Balance-of-Plant-Gesichtspunkte | 12 |
| 4.4. Arbeitspaket 4: Direkt-Brennstoff-Polymerelektrolytbrennstoffzellen | 16 |
| 5. Vernetzung und Ergebnistransfer | 18 |
| 5.1. IEA Vernetzungstreffen | 18 |
| 5.2. International Summer School on Advanced Studies of Polymer Electrolyte Fuel Cells | 20 |
| 5.3. International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells | 22 |
| 5.3.1. Student Poster Session / Poster Prize | 22 |
| 6. Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen | 23 |
| 7. Verzeichnisse | 24 |
| 7.1. Literaturverzeichnis | 24 |
| 7.1.1. Auflistung der Publikationen innerhalb von Annex 31 | 24 |
| 7.2. Abbildungsverzeichnis | 26 |
| 7.3. Tabellenverzeichnis | 27 |

1. Kurzfassung

1.1. Deutsche Kurzfassung

1.1.1. Ausgangssituation/Motivation

Annex 31 des Technology Collaboration Programm on Advanced Fuel Cells der International Energy Agency (IEA) war ein forschungs- und entwicklungsorientierter Annex, der die Vernetzung internationaler Partner aus Industrie, Forschung und Regierung förderte. Inhaltlich wurden innerhalb des Berichtszeitraumes alle Aspekte von Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen (PEFCs) und Direkt-Brennstoff-Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen (DF-PEFCs) abgedeckt.

Die Einsatzbereiche der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen umfassen portable Anwendungen zur Stromversorgung von elektronischen Kleinverbrauchern wie Laptops oder Smartphones, mobile Anwendungen als Fahrzeugantrieb oder Hilfsaggregat (APU) im Transportsektor und stationäre Anwendungen wie die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) oder die dezentrale Stromerzeugung. Um die Brennstoffzelle als kommerziell konkurrenzfähiges Produkt zu etablieren sind die weitere Reduktion der Kosten, sowie die Erhöhung der Leistungsdichte und der Lebensdauer notwendig.

1.1.2. Inhalt und Methodische Vorgehensweise

Innerhalb des Annex 31 („Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen“) wurden die einzelnen Aspekte der Brennstoffzellenforschung in drei Teilaufgabengebieten behandelt. Diese umfassen die Entwicklung neuer Materialien für die unterschiedlichen Stapelkomponenten, System, Komponenten und Balance-of-Plant-Aspekte, sowie Direkt-Brennstoff-Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen.

Neue Materialien für Brennstoffzellenstapel

Die Forschungsarbeiten innerhalb des Annexes konzentrierten sich auf die Entwicklung und Erforschung neuer Materialien und Designs für Polymer-Elektrolyt-Membranen, Katalysatoren für Elektroden, Supportmaterialien für Katalysatoren, Membran-Elektroden-Einheiten und Bipolarplatten.

Im laufenden Projekt MEA Power werden neue Materialien für die Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembranbrennstoffzelle (HT-PEFC) hergestellt. Im Berichtszeitraum wurden diesbezüglich Möglichkeiten untersucht, der Deaktivierung des Platinkatalysators durch den Elektrolyt entgegen zu wirken.

Eine Möglichkeit diese Deaktivierung zu umgehen ist die Legierung von Platin mit Gold. Unter sauren Bedingungen kann an der Goldoberfläche kein Phosphat adsorbieren. Durch Wechselwirkung zwischen Platin und Gold wird auch die Bindung von Phosphat an Platin geschwächt und damit die Aktivität des Katalysators verbessert.

System, Komponenten und Balance of Plant-Gesichtspunkte

Der Fokus dieser Teilaufgabe lag auf der Stapel- und Systementwicklung sowie auf Gesichtspunkten der Anlagen-peripherie.

Membran-Elektroden-Einheiten wurden in Einzelzellen mit einer segmentierten Kathodenstromabnehmerplatte charakterisiert (Abbildung 1). Dies erlaubt die orts aufgelöste Aufzeichnung von Stromdichte und Temperatur. So konnten Aussagen über schädigende Effekte wie Gradienten oder lokale Minima und Maxima getroffen werden.

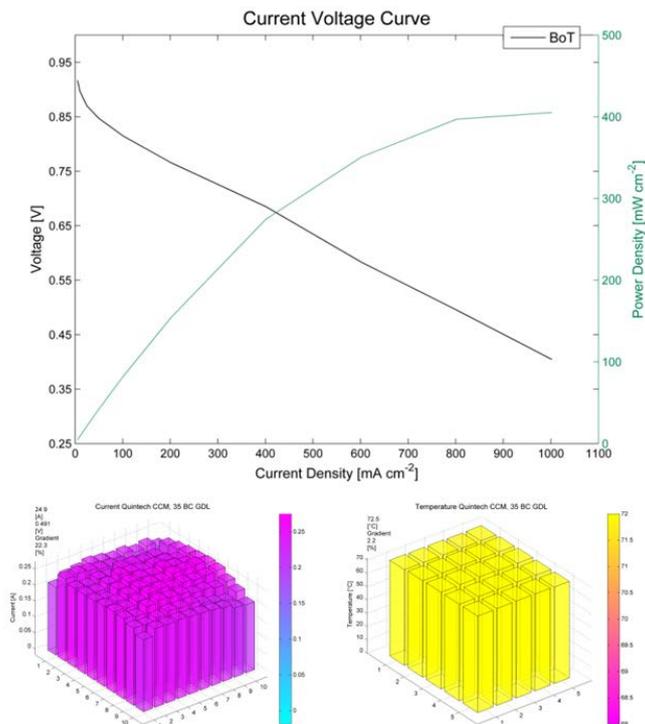


Abbildung 1: Polarisationskurve einer Membran-Elektroden-Einheit (oben) inklusive Stromdichteverteilung (unten links) und Temperaturverteilung (unten rechts) im Leistungsmaximum (Qu.: Technische Universität Graz, CEET).

Darüber hinaus wurde die dezentrale Bereitstellung von komprimiertem Wasserstoff aus erneuerbaren Rohstoffen mittels chemical-looping Verfahren im Festbettreaktor untersucht. In Hochdruckversuchen wurde nachgewiesen, dass die direkte Erzeugung von verdichtetem hochreinem Wasserstoff aus Synthesegas möglich ist. Dabei wurde im ersten Schritt eine Wasserstoffreinheit zwischen 99,958% - 99,999% erreicht.

Direkt-Brennstoff-Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle

Im Projekt H₂-Speicher wurden zwei Prototypen realisiert und die dargestellten Methoden einem erfolgreichem Proof-of-Concept unterzogen. Zum einen wurde eine Demoanlage mit H₂-Freisetzungsreaktor und PEM-Brennstoffzelle gefertigt und zum anderen eine Direkt-Borhydrid-Brennstoffzelle. Es konnte eine Leistung von 375 mW erreicht werden.

1.1.3. Ergebnisse

Das Ziel des Projekts war die Gewinnung von Wissen hinsichtlich der Degradation von Brennstoffzellenstapeln, um die Lebensdauer von μ CHP Systemen, welche mit PEMFC oder DMFC-Technologie betrieben werden zu verbessern. Durch die Kooperation mit Industriepartnern, wurden bereits bestehende Systeme untersucht um deren Lebensdauer zu verbessern und somit auch deren Wettbewerbs- und Marktfähigkeit.

1.2. Englische Kurzfassung

1.2.1. Motivation

Organized within the Technology Collaboration Programm on Advanced Fuel Cells of the International Energy Agency (IEA), Annex 31 was a research and development oriented task. The objective was to enable an international knowledge exchange between partners from the industries, research as well as governmental institutions. This included all aspects of polymer electrolyte fuel cells (PEFCs) and direct fuel polymer electrolyte fuel cells (DF-PEFCs).

Polymer electrolyte fuel cells are suitable for various applications including the use in portable devices, such as portable computers and smartphones, transportation or as auxiliary power unit (APU) in automotive applications and for decentralized energy supply in combined heat and power units (CHPs) for stationary application. In order to establish fuel cells as a commercially viable product, a further reduction of costs as well as an increased performance and lifetime are required.

1.2.2. Content and approach

Within the scope of Annex 31 („polymer electrolyte fuel cells“), the individual aspects of fuel cell technology were investigated in three subtasks. These focused on the development of new materials for fuel cell stacks, system, components and balance of plant aspects as well as direct fuel polymer electrolyte fuel cells.

New materials for fuel cell stacks

Research activities focused on the development and characterisation of novel materials and designs for polymer electrolyte membranes, electrode catalysts, catalyst support materials, membrane electrode assemblies and bipolar plates.

Within the scope of the ongoing project MEA Power, new materials for the high temperature polymer electrolyte fuel cell are developed. The aim is to mitigate the platinum electrocatalyst deactivation due to electrolyte washout.

Therefore, a platinum gold alloy has been used, as phosphate is unable to bind to the latter under acidic conditions. The interaction between platinum and gold weakens the platinum phosphate bond and therefore enhances the catalyst activity.

System, components and balance of plant aspects

This subtask focuses on stack and system development as well as on balance of plant aspects.

Membrane-electrode-assemblies were characterized in a single cell with a segmented cathode current collector plate (Figure 1). This allows to measure current and temperature spatially resolved. Thereby, harmful conditions such as gradients or local minima or maxima can be identified.

In addition, the decentralized production of compressed hydrogen from renewable resources using chemical looping in a fixed bed reactor was investigated. It was proven that the conversion of syngas into compressed hydrogen with a high purity is possible under high pressure. In a first step, a purity of 99.958 – 99.999% was achieved.

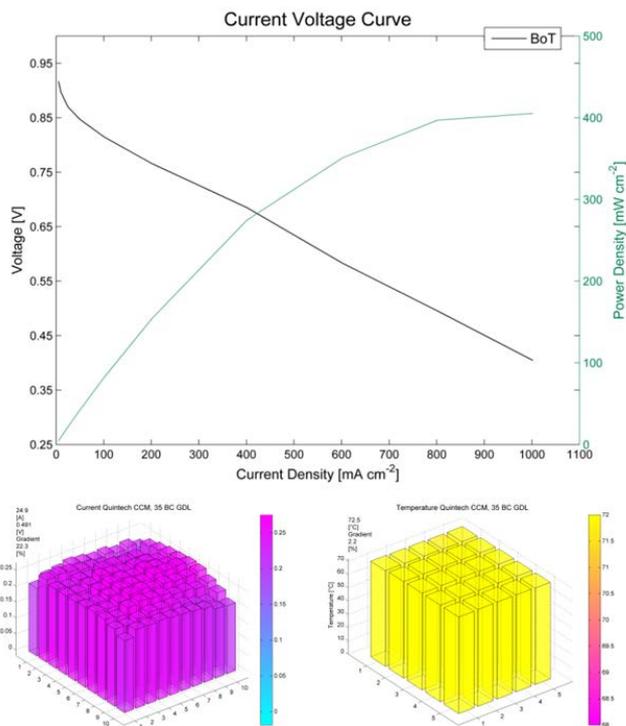


Abbildung 2: Polarization curve of a membrane-electrode-assembly (upper image) including the spatially resolved current (lower image, left) and temperature (lower image, right) distribution at a maximum power output (source: Graz University of Technology, CEET).

Direct fuel polymer electrolyte fuel cells

Within the project H2-Speicher, two prototypes were constructed and successfully used for proof-of-concept. This included a pilot plant for the selective release of hydrogen with a PEFC and a direct borohydride fuel cell. A maximum power output of 375 mW was achieved.

1.2.3. Summary

The aim of this project was to gain knowledge regarding fuel cell system degradation in order to prolong the lifetime of μ CHP systems powered by PEFC and DMFC technology. By the close cooperation with project partners from the industries, existing systems were investigated and enhanced in order to improve their competitiveness.

The activities within Annex 31 enabled the international exchange in regard to all different aspects of polymer electrolyte fuel cell technology, investigated at Graz University of Technology. Results were disseminated in various peer-reviewed articles and presented and discussed at the workshops organised by the International Energy Agency.

2. Einleitung

Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen sind Systeme, die die in Wasserstoff chemisch gebundene Energie mit hoher Effizienz in elektrisch nutzbare Energie umwandeln. Einsatz finden sie in mobilen, automobilen wie auch stationären Anwendungen. Innerhalb der letzten Jahre und Jahrzehnte ist das globale Interesse sukzessive gestiegen. Um Brennstoffzellensysteme jedoch kommerziell etablieren zu können, ist nach wie vor vielfache Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig. Dies passiert in einer Vielzahl an global verteilten Forschungseinrichtungen, wie der Technischen Universität Graz.

Das Technology Collaboration Programm on Advanced Fuel Cells der International Energy Agency dient der Vernetzung von Experten aus Regierung, Forschung und Industrie auf nationaler und internationaler Ebene. Ziel ist die gemeinsame Weiterentwicklung und Etablierung von Brennstoffzellen am globalen Markt. Die unterschiedlichen Annexe befassen sich dabei mit den Teilaspekten und Anwendungsgebieten dieser Technologie.

Die Vernetzung der im Bereich der Brennstoffzellenforschung relevanten Personen ermöglicht es, einen Überblick über die globalen Aktivitäten zu bieten, Doppelgleisigkeiten in den Forschungsbestrebungen zu vermeiden und technische Standards zu harmonisieren. Daraus ergibt sich ein höherer Standard der Qualität des Outputs der individuellen Projekte¹.

Die Technische Universität Graz hat auch schon in der Vergangenheit an den Aktivitäten des Technology Collaboration Programme teilgenommen und davon profitiert. Aus der Kollaboration sind zahlreiche Projekte hervorgegangen. Die Teilnahme an den zweimal jährlich stattfindenden Annex Executive Committee und Workgroup Meetings ermöglicht darüber hinaus die internationale Abstimmung der Forschungsarbeiten und liefert wichtige Anregungen und Input aus der Industrie und aus anderen Forschungseinrichtungen.

3. Hintergrundinformation zum Projektinhalt

Annex 31 zum Thema Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen der International Energy Agency bietet den jeweiligen teilnehmenden Organisationen die exzellente Möglichkeit, sich international zu vernetzen. Der intensive wissenschaftliche Austausch ermöglicht einerseits ein rasches und effizientes Fortschreiten der Entwicklung von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen und führt andererseits durch diverse Kooperationen zu einem direkten wirtschaftlichen Profit für die involvierten Partner.

Inhaltlich gliedert sich der Annex in drei Themenschwerpunkte, wobei alle Aspekte der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle und Direktbrennstoff-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle abgedeckt werden. Forschung und Entwicklung konzentrieren sich dabei auf die Entwicklung neuer Materialien für die individuellen Stapelkomponenten, Aspekte des Systems, der Komponentenauslegung und der Systemperipherie, sowie die speziellen Anforderungen von Direktbrennstoff-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen. Die Technische Universität Graz ist dabei in die Bearbeitung aller Aufgabenstellungen involviert.

Regelmäßig abgehaltene Meetings sind dabei ein wesentlicher Bestandteil der Vernetzungsaktivitäten. Die Präsentationen der individuellen Aktivitäten der einzelnen Partner und die Diskussion aktueller Ergebnisse dienen dabei als Tools zum Wissenstransfer.

Tabelle 1: Liste der im IEA Annex 31 teilnehmenden Einrichtungen, alphabetisch geordnet nach Herkunftsland¹

| NAME | COUNTRY | COMPANY | EMAIL |
|---------------------------|-------------|---|--|
| Viktor Hacker | Austria | Graz University of Technology | viktor.hacker@tugraz.at |
| Shanna Knights | Canada | Ballard | shanna.knights@ballard.com |
| Steven Holdcroft | Canada | Simon Fraser University and NRC Canada | holdcroft@sfu.ca |
| Steen Yde-Anderson | Denmark | IRD Fuel Cell A/S | sya@ird.dk |
| Hans Aage Hjuler | Denmark | Danish Power Systems | hah@daposy.dk |
| Jari Ihonen | Finland | VTT | Jari.Ihonen@vtt.fi |
| Henri Karimäki | Finland | VTT | Henri.Karimaki@vtt.fi |
| Thierry Priem | France | Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) | thierry.priem@cea.fr |
| Werner Lehnert | Germany | <u>Forschungszentrum Jülich</u> | w.lehnert@fz-juelich.de |
| Carsten Cremers | Germany | ICT Fraunhofer | carsten.cremers@ict.fraunhofer.de |
| Alex Schechter | Israel | Ariel University | salex@ariel.ac.il |
| Alessandra Carbone | Italy | CNR-ITAE | alessandra.carbone@itaecnr.it |
| Akimasa Daimaru | Japan | Daido University | adaimaru@daido-it.ac.jp |
| Gu-Gon Park | South Korea | Korea Institute of Energy Research | gugon@kier.re.kr |
| EunAe Cho | South Korea | Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) | eacho@kaist.ac.kr |
| Ulises Cano | Mexico | Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) | ucano@iie.org.mx |
| Göran Lindbergh | Sweden | KTH – Royal Institute of Technology | lgoeran.lindbergh@ket.kth.se |
| Rakel Lindström | Sweden | KTH – Royal Institute of Technology | rakel2@kth.se |
| Lars Petterson | Sweden | KTH – Royal Institute of Technology | larsp@ket.kth.se |
| Di-Jia Liu | USA | Argonne National Laboratory | djliu@anl.gov |

4. Ergebnisse des Projektes

4.1. Arbeitspaket 1: Projektmanagement, Dissemination und Öffentlichkeitsarbeit

Neben den bisher entstandenen Veröffentlichungen (siehe Auflistung unten) sind derzeit weitere Beiträge für Fachzeitschriften, sowie ein Buch in Bearbeitung. Zusätzlich dienen die Ergebnisse aus dem Projekt MEA Power als Basis für neue Kooperationen auf dem Gebiet der HT-PEFC.

Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit gab es am 2. April 2016 einen Artikel über Dr. Schenk und das von ihm geleitete FFG-Projekt MEA Power in der Tageszeitung "Die Presse" (<http://diepresse.com/home/science/dissertation/4958237/Billigere-Brennstoffzelle-fuer-daheim>).

Im Zeitungsartikel wird die Möglichkeit zur hocheffizienten, geräuschlosen, dezentralen Energieversorgung von Einfamilienhäusern und Wohnungen mittels Brennstoffzellen-KWK-Systemen besprochen². An der TU Graz werden im Rahmen des o.a. Projektes die Kernkomponenten des Brennstoffzellensystems weiterentwickelt. Die wissenschaftlichen Leistungen von Dr. Schenk zur erfolgreichen Umsetzung dieses Vorhabens wurden sowohl mit dem Award of Excellence des BMFWF als auch mit dem Förderpreis des Forums Technik und Gesellschaft ausgezeichnet.

Von 28.08.2016 bis 03.09.2016 wurde an der TU Graz die "9th International Summer School on Advanced Studies of PEFCs" abgehalten. Der "2nd International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells" fand am 31.08.2016 an der TU Graz statt.

Neben der Teilnahme und Dissemination auf Konferenzen wurden die Projekte und Projektergebnisse auch regelmäßig auf den A3PS-Treffen vorgestellt.

Am 15./16. Mai 2017 wird an der TU Graz der Workshop "Highlights of International Fuel Cell Research 2017 Results of Annex 31 & 35 of the IEA AFC Technology Collaboration Programme" in Graz veranstaltet, sowie ein IEA Annex 31 Meeting abgehalten (www.ceet.tugraz.at/fuelcells).

4.2. Arbeitspaket 2: Neue Materialien für Brennstoffzellenstapel

Im laufenden Projekt MEA Power werden neue Materialien für die Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembranbrennstoffzelle (HT-PEFC) hergestellt. Im Berichtszeitraum wurden diesbezüglich Möglichkeiten untersucht, der Deaktivierung des Platinkatalysators durch den Elektrolyt entgegen zu wirken. Optimierte Katalysatoren sind eine Grundvoraussetzung, um die HT-PEFC leistungsfähiger zu machen. Derzeit leidet die Performance der HT-PEFC darunter, dass der Phosphorsäure-Elektrolyt aktive Zentren an der Katalysatoroberfläche blockiert.

Eine Möglichkeit, diese Deaktivierung zu umgehen, ist die Legierung von Platin mit Gold. Unter sauren Bedingungen kann an der Goldoberfläche kein Phosphat adsorbieren. Durch Wechselwirkung zwischen Platin und Gold wird auch die Bindung von Phosphat an Platin geschwächt und damit die Aktivität des Katalysators verbessert.

4.3. Arbeitspaket 3: System, Komponenten und Balance-of-Plant-Gesichtspunkte

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde im Rahmen des Projektes FC Diamond eine detaillierte Zusammenfassung zur Verfügung stehender Alterungsprotokolle erarbeitet. Diese umfangreiche Aufstellung berücksichtigt neben der langjährigen Erfahrung der TU Graz und des ZBTs ebenfalls internationale Harmonisierungsprotokolle, u.a. des U.S. Department of Energy (DoE) und dem Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission. Die unterschiedlichen Protokolle berücksichtigen dabei eine Vielzahl nebeneinander auftretender Degradationsmechanismen. Darauf basierend werden im kommenden Berichtszeitraum gezielt Versuche durchgeführt. Die daraus resultierenden Erkenntnisse erlauben ein grundlegendes Verständnis der einzelnen Degradationsvorgänge und deren Zusammenhänge innerhalb der Brennstoffzelle, und werden entsprechend in die Modellbildung integriert.

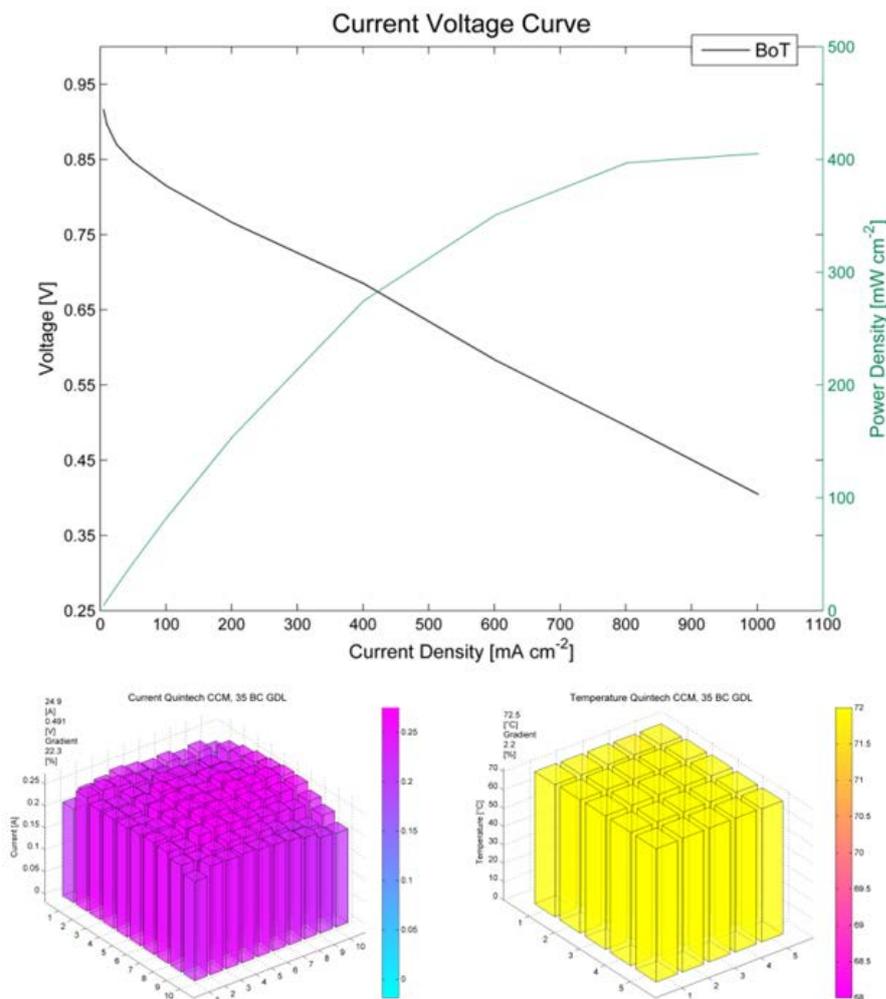


Abbildung 3: Polarisationskurve einer Membran-Elektroden-Einheit (oben) inklusive Stromdichteverteilung (unten links) und Temperaturverteilung (unten rechts) im Leistungsmaximum.

Die Membran-Elektroden-Einheiten werden in Einzelzellen mit einer segmentierten Kathodenstromabnehmerplatte charakterisiert (Abbildung 5). Dies erlaubt die ortsaufgelöste Aufzeichnung von Stromdichte und Temperatur. So können Aussagen über schädigende Effekte wie

Gradienten oder lokale Minima und Maxima getroffen werden. Neben der Erstellung des Testprotokolls wurde die Automatisierung eines Brennstoffzellenteststands begonnen. Durch die Automatisierung können neue Testmethoden im Labor umgesetzt werden.

Dieser wird ebenfalls für den für das Projekt PEMREX S angeschafften Stapel Einsatz finden, um eine vollständige Charakterisierung zu ermöglichen. Im zweiten Jahr des PEMREX S Projektes wurde ein Kurzstapel vom ZBT Duisburg (Abbildung 6) in Betrieb genommen.

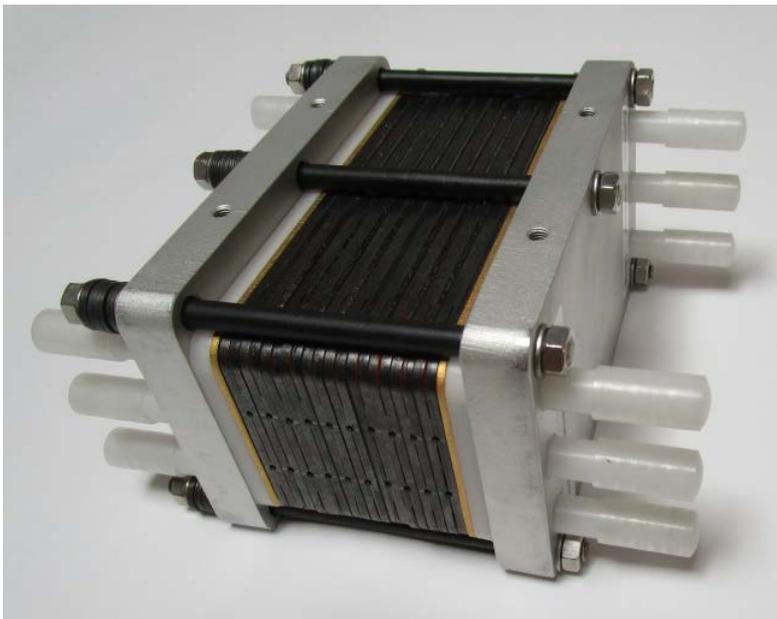


Abbildung 4: Kurzstapel

In dem durch die Europäische Kommission geförderten Second Act Projekt (Grant Agreement n°621216) wurde innerhalb des Berichtszeitraumes der Fokus auf die zuverlässige Bestimmung der Fluoremission sowie auf den Einfluss von Sauerstoffunterversorgung auf die Degradation der Brennstoffzelle gelegt.

Das Projekt Hydrogen Storage via Oxidation and Reduction of Metals, HyStORM untersucht die dezentrale Bereitstellung von komprimiertem Wasserstoff aus erneuerbaren Rohstoffen mittels chemical-looping Verfahren im Festbettreaktor (Abbildung 7). Der dezentrale Betrieb der Wasserstoffversorgung ermöglicht den effizienten Einsatz von lokal verfügbaren erneuerbaren Rohstoffen. Zusätzlich werden der Transport von Wasserstoff über lange Strecken sowie die Speicherung von großen Mengen vor Ort reduziert, wodurch deutliche Einsparungen für den Verbraucher erzielt werden.

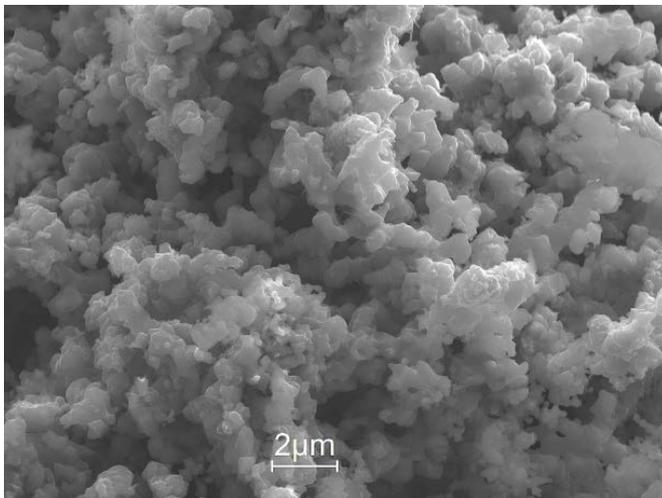
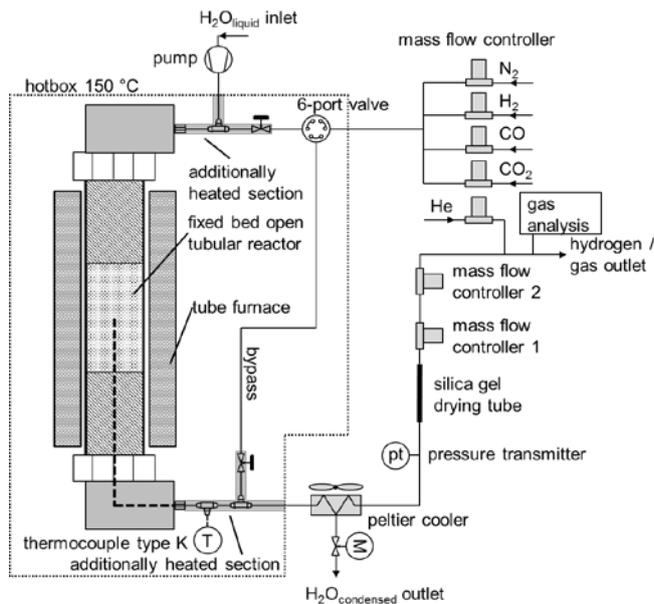


Abbildung 5: Oben: Prozessschema der Hochdruckwasserstoff-Anlage. Unten: Elektronenmikroskopische Aufnahme der Kontaktmasse nach zyklischen Druckversuchen.

In Hochdruckversuchen wurde nachgewiesen, dass die direkte Erzeugung von verdichtetem hochreinem Wasserstoff aus Synthesegas mittels chemical-looping möglich ist. Dabei wurde im ersten Schritt eine Wasserstoffreinheit zwischen 99,958% - 99,999% erreicht. Durch eine Optimierung der Prozessparameter soll im nächsten Schritt die Reinheit des Wasserstoffs ohne zusätzliche Reinigungsschritte weiter gesteigert werden. Die Druckversuche belegten, dass der erhöhte Systemdruck bis 50 bar keine negativen Auswirkungen auf die Stabilität der eingesetzten Materialien sowie die Reaktivität der Redoxreaktionen aufweist.

Das Projekt MeStREx beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Range Extender-Systems für den automobilen Sektor. Zweck ist es der Reichweitenproblematik von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen zu begegnen, indem die Batteriepacks an Bord kontinuierlich geladen werden. Das System setzt sich aus einer Hochtemperaturbrennstoffzelle (engl. Solid oxide fuel cell – SOFC) und einer Reformereinheit zusammen. Die Aufgabe des Reformers besteht darin Synthesegas mit hohem Heizwert für die Brennstoffzelle aus einem Ethanol-Wassergemisch bereitzustellen. Des Weiteren dient dieser der Minimierung der Verkokungsgefahr des Systems sowie der thermischen Entlastung

der Anode. Hauptbestandteil des Forschungsauftrags an das Brennstoffzellenlabor des ICVTs ist die Untersuchung der katalytischen Dampfreformierung zur Auslegung der Reformerunit.

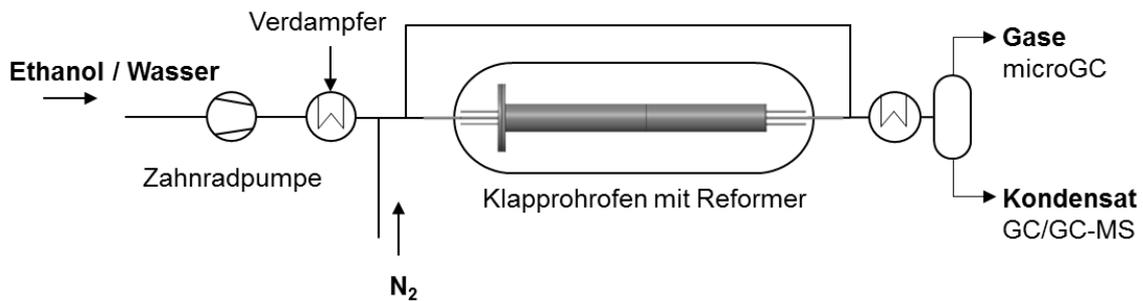


Abbildung 6: Schematischer Aufbau des Teststandes für die Untersuchung von Katalysatoren für die Dampfreformierung von Ethanol.

Im ersten Teil des Arbeitspaketes wurden thermodynamische Berechnungen zur Eingrenzung der kritischen Betriebsparameter, Einsatztemperatur und Ethanol zu Wassermischungsverhältnis, untersucht. Basierend auf den Ergebnissen wurden heterogene Katalysatoren aus kommerziellen Quellen im eigens dafür konzipierten Teststand charakterisiert (Abbildung 8 und Abbildung 9).

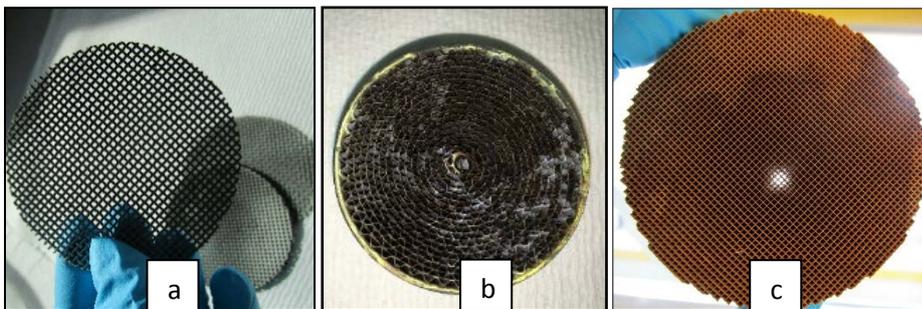


Abbildung 7: Abbildungen von unterschiedlichen Katalysatoren auf metallischem (a + b) sowie keramischem (c) Trägermaterial.

Die bisherigen Ergebnisse der Katalysatorcharakterisierungen zeigen, dass speziell gefertigte Katalysatoren für die Ethanol-Dampfreformierung schon bei niedrigen Temperaturen eine sehr hohe katalytische Aktivität aufweisen. Katalysatoren welche nicht speziell für die Ethanol-Dampfreformierung ausgelegt wurden und generell für die Dampfreformierung von höheren Kohlenwasserstoffen eingesetzt werden können, erzielten einen vollständigen Ethanolumsatz erst bei höheren Temperaturen (Abbildung 10). Bis 750 °C wurden Ethanol und höherwertige Kohlenwasserstoffe, welche sich durch eine unvollständige Reformierung bilden, im Kondensat sowie im Produktgas nachgewiesen (Abbildung 11). Obwohl bei ausreichend hoher Reaktionstemperatur ein vollständiger Umsatz erzielt wurde, wirken sich höhere Reaktionstemperaturen nachteilig auf die Katalysatorstabilität und die Effizienz des Gesamtsystems aus. Somit ist deren Einsatz in Hinblick auf das Komplettsystem weniger attraktiv.

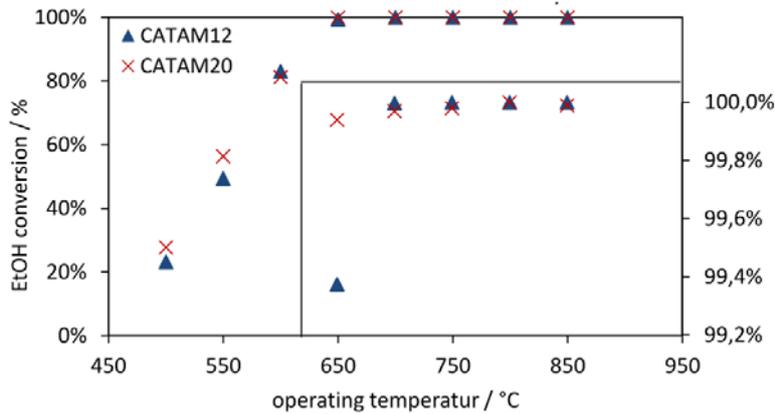


Abbildung 8: Ethanol Umsatz der Katalysatoren CATAM12 und CATAM20.

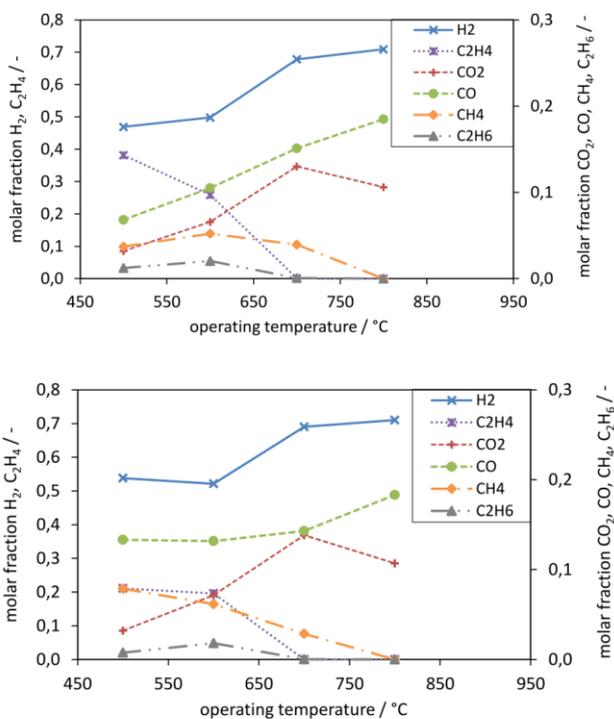


Abbildung 9: Zusammensetzung des Produktgases der Katalysatoren CATAM12 (oben) und CATAM20 (unten).

4.4. Arbeitspaket 4: Direkt-Brennstoff-Polymerelektrolytbrennstoffzellen

Ziel des Projekts H2-Speicher ist die Entwicklung eines regenerierbaren, bei Umgebungsbedingungen drucklosen, flüssigen und stabilen Wasserstoffspeichers unter Verwendung ionischer Flüssigkeiten. Mit entsprechender Peripherie kann dieser Speicher als Wasserstoffspeicher für automobiler Anwendungen eingesetzt werden. Die hohe Speicherdichte (etwa 1/3 von Benzin) erlaubt kompakte und drucklose Langzeitspeicher bei Raumtemperatur, die mit anderen Methoden nicht darstellbar sind.

Im Projekt wurden zwei Prototypen realisiert und die dargestellten Methoden einem erfolgreichem Proof-of-Concept unterzogen. Zum einen wurde eine Demoanlage mit H₂-Freisetzungsreaktor und PEM-Brennstoffzelle gefertigt und zum anderen eine Direkt-Borhydrid-Brennstoffzelle (siehe Abbildung 12).

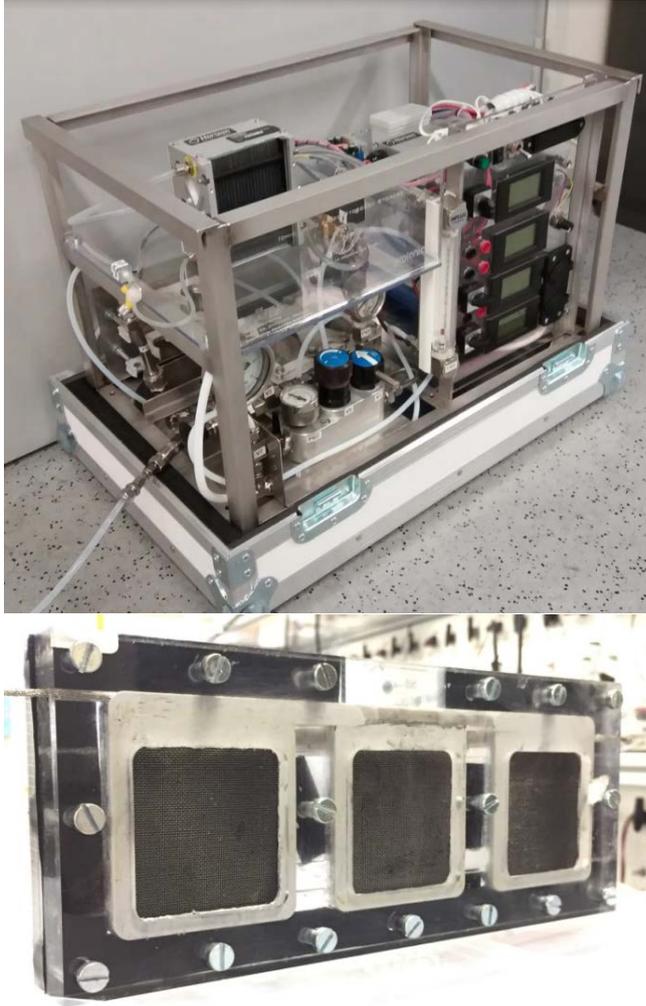


Abbildung 10: Abbildungen der Prototypen, oben: mit H₂-Freisetzungsreaktor mit PEM-Brennstoffzelle, unten: Direktbrennstoffzelle

Die Direktbrennstoffzelle wurde ohne kostspielige Ionenaustauschmembranen und Platinkatalysatoren gefertigt. Es handelt sich um ein passives, selbstatmendes Zelldesign welches die ionische Leitfähigkeit des Brennstoffes selbst nützt.

Die Leistungsfähigkeit dieses Brennstoffzellentyps, bestehend aus zwei Zellen, ist in Abbildung 13 dargestellt. Es konnte eine Leistung von 375 mW erreicht werden.

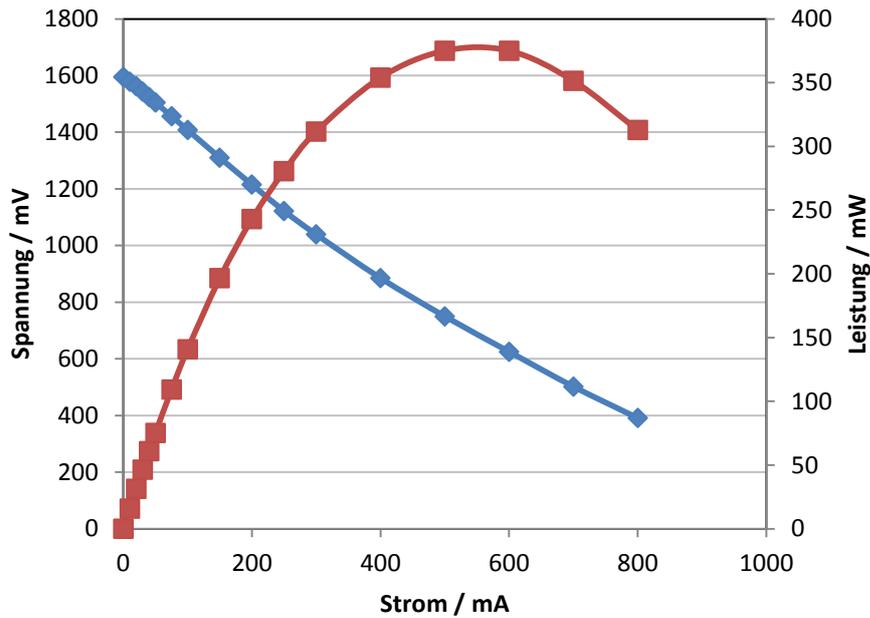


Abbildung 11: Strom-Spannungs-Kennlinie der Direktbrennstoffzelle

5. Vernetzung und Ergebnistransfer

5.1. IEA Vernetzungstreffen

Durch die regelmäßige Teilnahme an IEA Vernetzungstreffen kann die internationale Position der Technischen Universität Graz und Österreichs in der Brennstoffzellenforschung als Gesamtes gestärkt werden. Der inhaltliche Wissensaustausch ermöglicht Forschung und Entwicklung auf hohem Niveau. Die Treffen haben insbesondere das Ziel, die Abstimmung, Kommunikation und Kollaboration zwischen Regierungseinrichtungen, Industrie und universitären Forschungseinrichtungen in Hinblick auf die Etablierung von Brennstoffzellensystemen zu ermöglichen.

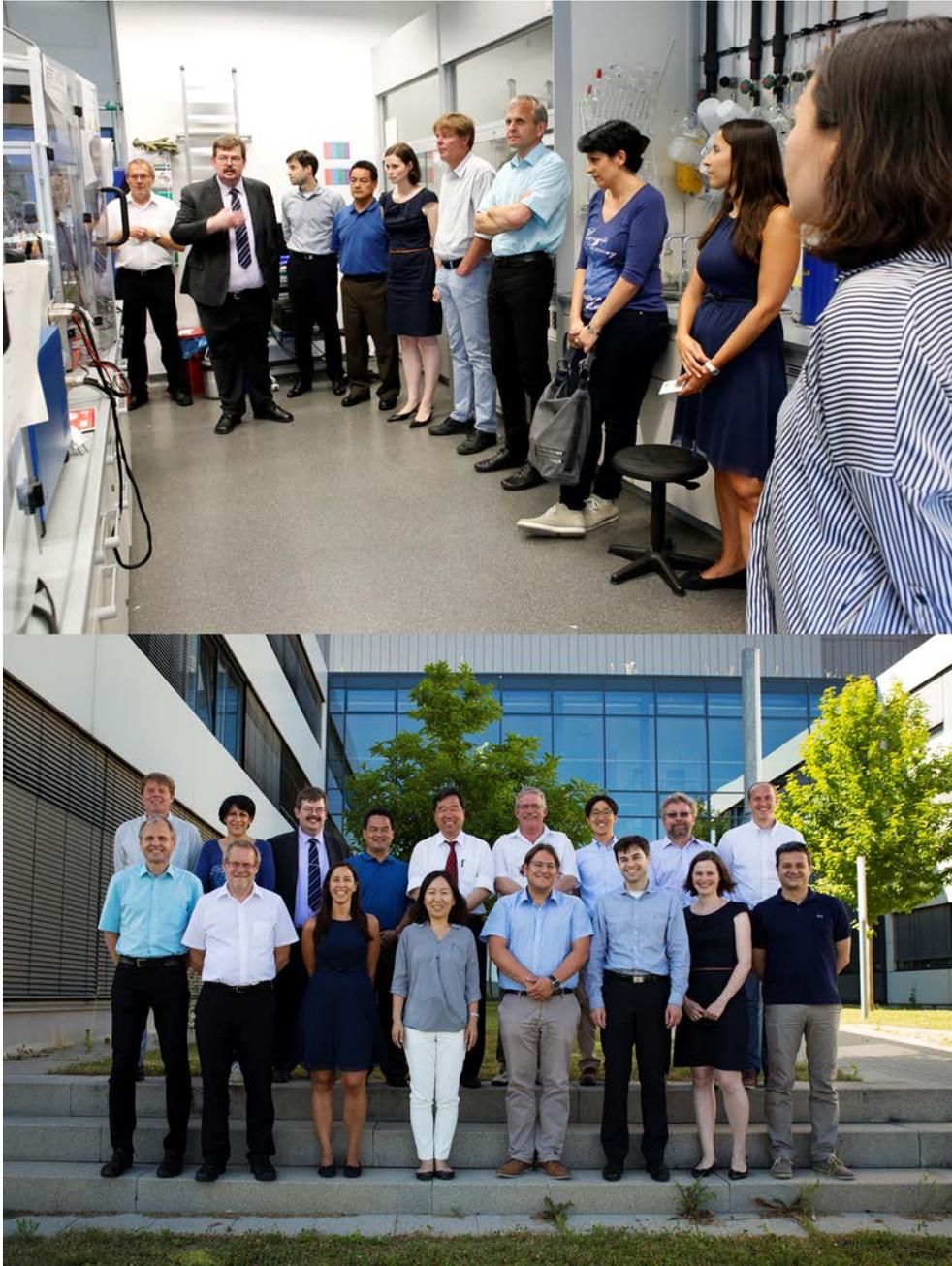


Abbildung 12: IEA Vernetzungstreffen Annex 31, Fraunhofer ICT im Pfinzthal 2015

Im Rahmen von Annex 31 („Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen“) fanden Meetings 2015 bei Fraunhofer ICT im Pfinzthal und 2016 bei CNR-ITAE in Messina und in Beijing statt. Im Rahmen des Meetings in Messina wurde die Möglichkeit einer gemeinsamen Publikation angesprochen. Darüber hinaus wurde der Veranstaltungsort für das nächste Vernetzungstreffen diskutiert. Aufgrund der thematischen Nähe zu einem dort stattfindenden Kongresses fiel die Wahl dabei auf China.



Abbildung 13: Teilnehmer am Annex 31 Meeting in Beijing, China

Um die Brennstoffzellentechnologie in China zu stärken, wurde der „1st International Fuel Cell Vehicle Congress (FCVC)“ in Beijing gemeinsam mit dem „53rd Executive Committee and Annex Meeting“ der International Energy Agency abgehalten. Das Meeting gab einen Überblick über den derzeitigen Status und zukünftig erwartete Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugtechnologie innerhalb und außerhalb Chinas. Insbesondere die Entwicklungsschwerpunkte chinesischer und internationaler Automobilhersteller, sowie der notwendige Ausbau der Wasserstoffherstellung und Infrastruktur wurden beleuchtet. Brennstoffzellenleistungsbeurteilung, Codes und Standards wurden ebenfalls diskutiert.

5.2. International Summer School on Advanced Studies of Polymer Electrolyte Fuel Cells

Die „International Summer School on Advanced Studies of Polymer Electrolyte Fuel Cells“ wird jährlich als Aktivität im Rahmen der internationalen Kooperation mit der Yokohama National University durchgeführt. Dieses interdisziplinäre Trainingsprogramm für junge WissenschaftlerInnen startete im Jahre 2008 in Folge des Abkommens der Technischen Universität Graz mit der Yokohama National University zum akademischen Austausch.

Das Programm der Sommerakademie umfasst Forschung, Entwicklung und Anwendung von Brennstoffzellensystemen sowie die Themenbereiche Elektrochemie, Thermodynamik, Kinetik und Katalyse.

Das vorrangige Ziel der Veranstaltung ist die Vermittlung von theoretischen Grundlagen an junge WissenschaftlerInnen und die Schaffung einer Plattform des wissenschaftlichen Austausches in diesem interdisziplinären Wissenschaftszweig. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

und der Wissenstransfer zwischen den ForscherInnen sind essentiell für die Implementierung dieser neuen und umweltschonenden Technologie.

Neben den wissenschaftlichen Vorträgen werden auch jährlich soziale Aktivitäten organisiert.



Abbildung 14: TeilnehmerInnen der Brennstoffzellen Sommerakademie 2016 in Graz

2016 fand die Veranstaltung zum neunten Mal statt. 52 StudentInnen aus China, Deutschland, Ecuador, Frankreich, Indien, Italien, Japan, Kroatien, Norwegen, Österreich, Simbabwe und Südafrika nahmen an der Sommerakademie teil. International anerkannte Experten im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie aus Deutschland, Frankreich, Italien, Japan, Österreich und Südafrika konnten als Vortragende gewonnen werden³.



Abbildung 15: Ausflug auf den Schöckl, 2016

Die Kurzbeiträge der Sommerakademie wurden im gemeinsam erstellten Konferenzbericht veröffentlicht:

V. Hacker, A. Schenk, S. Mitsushima, T. Araki, K. Ota, (eds.), „Advanced Studies of Polymer Electrolyte Fuel Cells, 9th International Summer School“, Verlag der TU Graz (2016) ISBN: 978-3-85125-481-5

5.3. International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells

Der „International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells“ wurde 2016 erstmalig in Graz veranstaltet und bot den geeigneten Rahmen um die aktuellen Entwicklungen im IEA Implementing Agreement Advanced Fuel Cells in entspannter Atmosphäre zu diskutieren.

Die Veranstaltung wurde durch Vizerektor Prof. Bischof, Institutsleiter Prof. Siebenhofer und den Organisator Prof. Hacker eröffnet. Dr. Cordellia Sita von der University of the Western Cape aus Südafrika und Dr. Têko W. Napporn von der Université de Poitiers aus Frankreich konnten als Keynote-Speaker gewonnen werden. Dr. Sita, Direktorin des Kompetenzzentrums HySA Systems in Kapstadt, präsentierte in Ihrer Keynote „Fuel Cells in South Africa: Research, Development, Innovation and Market Trends“ die Entwicklungen und Erfolge der Brennstoffzellenforschung in Südafrika. Dr. Napporn, Gastprofessor an der Yokohama National University, hielt einen Vortrag zum Thema „Gold at Nanoscale as Electrocatalyst for Glucose / Air Fuel Cell“³.



Abbildung 16: Keynote-Speaker Dr. Napporn und Dr. Sita

5.3.1. Student Poster Session / Poster Prize

Bei der anschließend stattfindenden Student Poster Session präsentierten 38 Studierende die Ergebnisse ihrer Forschungsarbeiten. Die vier besten Poster-Präsentationen wurden ausgezeichnet und erhielten einen Preis gesponsert von FoE Mobility & Production.



Abbildung 17: Verleihung der Posterpreise (von re. nach li.: Prof. Mitsushima, Dr. Reimer, A. Maeda, S. Hashimura, F. Labbé, B. Pichler, Prof. Kokoh, Prof. Hacker)

Die Kurzbeiträge der Posterpräsentationen wurden in einem Abstract Book zum Workshop veröffentlicht.

6. Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Innerhalb des Projektes wurden zahlreiche Aspekte, welche für die Etablierung der Brennstoffzelle relevant sind behandelt. Durch die Teilnahme an drei unter Annex 31 abgehaltenen Meetings und der Organisation eines weiteren im Mai 2017 in Graz konnte nicht nur die Sichtbarkeit der Technischen Universität Graz und somit auch Österreichs nach außen gestärkt werden, sondern auch forschungsrelevante Aspekte auf internationalem Niveau diskutiert werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden in den diversen stark vernetzten Projekten in Kooperation mit der Industrie verwertet. Die Ergebnisse der einzelnen Projekte wurden bereits disseminiert. Darüber hinaus konnte auch innerhalb des durch die Vernetzung über die IEA entstandenen Second Act Projektes ein Beitrag zum Festlegen von Harmonisierungsprotokollen geleistet werden, welche über das Europäische Joint Research Centre mit der Öffentlichkeit geteilt werden.

Die Ergebnisse des Projektes und die Arbeiten an der Technischen Universität Graz unterstützen damit sowohl die Industrie, Regierung und Behörden wie auch nationale und internationale Forschungseinrichtungen.

7. Verzeichnisse

7.1. Literaturverzeichnis

- (1) <http://www.ieafuelcell.com/> (accessed Mar 17, 2017).
- (2) <http://diepresse.com/home/science/dissertation/4958237/Billigere-Brennstoffzelle-fuer-daheim> (accessed Mar 17, 2017).
- (3) <https://www.ceet.tugraz.at/fuelcells> (accessed Mar 17, 2017).

7.1.1. Auflistung der Publikationen innerhalb von Annex 31

- Schenk, A, Gamper, S, Grimmer, C, Pichler, BE, Bodner, M, Weinberger, S & Hacker, V 2016, 'Development of Low Cost High-Temperature Polymer Electrolyte Fuel Cell Membrane-Electrode-Assemblies for Combined Heat and Power Plants in Single Family Homes' ECS transactions, vol 75, no. 14, pp. 435-441. DOI: doi: 10.1149/07514.0435ecst
- Schenk, A, Gamper, S, Grimmer, C, Bodner, M, Weinberger, S & Hacker, V 2016, 'Phosphoric Acid Tolerant Oxygen Reduction Reaction Catalysts for High-Temperature Polymer Electrolyte Fuel Cells' ECS transactions, vol 75, no. 14, pp. 939-942. DOI: doi:10.1149/07514.0939ecst
- Schenk, A 2016, 'Nanostructured materials for economic fuel cells', pp. 23-25, TU Graz Research Journal, ISSN 2074-9643, Verlag der TU Graz, 15.
- C. Grimmer, M. Grandi, R. Zacharias, B. Cermenek, H. Weber, C. Morais, et al., The electrooxidation of borohydride: A mechanistic study on palladium (Pd/C) applying RRDE , 11B-NMR and FTIR, Appl. Catal. B Environ. 180 (2016) 614–621.
- C. Grimmer, M. Grandi, R. Zacharias, S. Weinberger, A. Schenk, E. Aksamija, F.-A. Mautner, B. Bitschnau, V. Hacker, Carbon Supported Nanocrystalline Manganese Oxide: Surpassing Platinum as Oxygen Reduction Catalyst in Direct Borohydride Fuel Cells, J. Electrochem. Soc. 163 (8) (2016) F885-F890.
- C. Grimmer, R. Zacharias, M. Grandi, B. Pichler, I. Kaltenboeck, F. Gebetsroither, J. Wagner, B. Cermenek, S. Weinberger, A. Schenk, V. Hacker, A membrane-free and practical mixed electrolyte direct borohydride fuel cell, J. Electrochem. Soc. 163 (3) (2016) F278-F283.
- C. Grimmer, R. Zacharias, M. Grandi, B. Cermenek, A. Schenk, S. Weinberger, et al., Carbon Supported Ruthenium as Anode Catalyst for Alkaline Direct Borohydride Fuel Cells, J. Phys. Chem. C. 119 (2015) 23839–23844.
- C. Grimmer, S. Nestl, J. Senn, V. Hacker, Selective real-time quantification of hydrogen within mixtures of gases via an electrochemical method, Int. J. Hydrogen Energy. 40 (2015) 2055–2061.
- C. Grimmer, T. Friedrich, D. Woisetschläger, N. Mayer, R. Kalb, V. Hacker, Novel Borohydride-Based Ionic Liquids as Hydrogen Carrier, Chemie Ing. Tech. 86 (2014) 1443–1443.
- C. Grimmer, A. Schenk, B.E. Pichler, M. Perchthaler, V. Hacker, Manufacturing and Stabilization of PtCo/C Cocatalysts for PEM Fuel Cells, ECS Trans. 58 (2013) 753–759.
- B. Feketeföldi, B. Cermenek, C. Spirk, A. Schenk, C. Grimmer, M. Bodner, M. Koller, V.

Ribitsch, V. Hacker, Chitosan-Based Anion Exchange Membranes for Direct Ethanol Fuel Cells, *J. of Membrane Science & Technology* 6 (1) (2016) 145.

- A. Schenk, C. Grimmer, M. Perchthaler, S. Weinberger, B. Pichler, C. Heinzl, et al., Platinum–cobalt catalysts for the oxygen reduction reaction in high temperature proton exchange membrane fuel cells – Long term behavior under ex-situ and in-situ conditions, *J. Power Sources*. 266 (2014) 313–322.
- T. Friedrich, C. Grimmer, D. Woisetschläger, N. Mayer, M. Koncar, V. Hacker, Borhydride mit Ionic-Liquid-Kation als Wasserstoffspeicher – Rezyklierung des Speichermediums, *Chemie Ing. Tech.* 86 (2014) 1429–1430.
- Bodner M, Cermenek B, Rami M, Hacker V. The Effect of Platinum Electrocatalyst on Membrane Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells. *Membranes*. 2015;5(4):888-902. Available from, DOI: 10.3390/membranes5040888
- Bodner M, Schenk A, Salaberger D, Rami M, Hochenauer C, Hacker V.: Air Starvation Induced Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells. *Fuel Cells*. 2017 Feb 2;17(1):18-26. Available from, DOI: 10.1002/fuce.201600132
- Bodner M, Rami M, Marius B, Schenk A, Hacker V.: Determining Membrane Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells by Effluent Water Analysis. *ECS transactions*. 2016 Sep 23;75(14):703-706. Available from, DOI: 10.1149/07514.0703ecst
- Bodner M, Schenk A, Marius B, Rami M, Hacker V.: Air Starvation Accelerated Stress Tests in Polymer Electrolyte Fuel Cells. *ECS transactions*. 2016 Sep 23;75(14):769-776. Available from, DOI: 10.1149/07514.0769ecst
- Bodner M, Hochenauer C, Hacker V.: Effect of pinhole location on degradation in polymer electrolyte fuel cells. *Journal of power sources*. 2015;(295):336-348. Available from: doi:10.1016/j.jpowsour.2015.07.021
- Bodner M, Hofer A, Hacker V.: H₂ generation from alkaline electrolyzer. *Wiley interdisciplinary reviews / Energy and environment [Electr. Res.]*. 2015;(4):365- 381. Available from: 10.1002/wene.150
- Hacker V, Bodner M, Schenk A.: *Integration of a Membrane Reactor with a Fuel Cell. In Integrated Membrane Systems and Processes*. 1 ed. John Wiley & Sons. 2016.
- Hacker V, Cermenek B, Grimmer C. Direktverstromung von Ethanol. *Biobased future*. 2016;5:19-19.
- Ranacher C, Resel R, Moni P, Cermenek B, Hacker V, Coclite AM. Layered Nanostructures in Proton Conductive Polymers obtained by initiated Chemical Vapor Deposition. *Macromolecules*. 2015;48:6177-6183. Available from, DOI: 10.1021/acs.macromol.5b01145
- Chaiburi C, Cermenek B, Pichler BE, Grimmer C, Schenk A, Hacker V. Ethanol-Tolerant Pt-free Cathode Catalysts for the Alkaline Direct Ethanol Fuel Cell. 2016; 19(4): 199-207.
- Voitic G, Malli K, Schenk A, Hacker V: *Biobased Future*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. 2016 Jul; 6: 15. Available from: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/mitteilungsblatt-biobased-future-6_juli-

2016.pdf

- Voitic G, Hacker V.: Recent advancements in chemical looping water splitting for the production of hydrogen. RSC Advances . 2016 Oct 10;6:98267-98296.
- Voitic G, Nestl S, Malli K, Wagner J, Bitschnau B, Mautner F-A et al. High purity pressurised hydrogen production from syngas by the steam-iron process. RSC Advances . 2016 May 23;6:53533-53541.
- Voitic G, Nestl S, Lammer M, Wagner J, Hacker V. Pressurized Hydrogen Production by Fixed-Bed Chemical Looping. Applied energy. 2015;157:399-407. Available from, DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.095
- Nestl S, Voitic G, Lammer M, Marius B, Wagner J, Hacker V. The production of pure pressurised hydrogen by the reformer-steam iron process in a fixed bed reactor system. Journal of power sources. 2015;280(15):57-65. Available from, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.01.052

7.2. Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|---|
| Abbildung 1: Gefertigte Membran-Elektroden-Einheiten mit dem entwickelten Pt-Co/C Katalysator an der Kathode (Qu.: Technische Universität Graz, ICVT)..... | Fehler! Textmarke nicht definiert. |
| Abbildung 2: Wasserstoffdiffusion und Infrarot Thermographie mit a) keinem Pinhole b) Pinhole (Qu.: Bodner M. et al. International Workshop on PEMFC Stack and Stack-Component Testing, DLR, Stuttgart, 2014) | Fehler! Textmarke nicht definiert. |
| Abbildung 3: Manufactured membrane electrode assemblies including a newly developed Pt-Co/C cathode electrocatalyst (Source: Graz University of Technology, CEET) | Fehler! Textmarke nicht definiert. |
| Abbildung 4: Hydrogen diffusion current and infrared thermography measurements with a) no pinhole and b) a pinhole (Source: Bodner M. et al., International Workshop on PEMFC Stack and Stack Component Testing, DLR, Stuttgart, 2014) | Fehler! Textmarke nicht definiert. |
| Abbildung 5: Polarisationskurve einer Membran-Elektroden-Einheit (oben) inklusive Stromdichteverteilung (unten links) und Temperaturverteilung (unten rechts) im Leistungsmaximum. | 12 |
| Abbildung 6: Kurzstapel..... | 13 |
| Abbildung 7: Oben: Prozessschema der Hochdruckwasserstoff-Anlage. Unten: Elektronenmikroskopische Aufnahme der Kontaktmasse nach zyklischen Druckversuchen. | 14 |
| Abbildung 8: Schematischer Aufbau des Teststandes für die Untersuchung von Katalysatoren für die Dampfreformierung von Ethanol. | 15 |
| Abbildung 9: Abbildungen von unterschiedlichen Katalysatoren auf metallischem (a + b) sowie keramischem (c) Trägermaterial. | 15 |
| Abbildung 10: Ethanol Umsatz der Katalysatoren CATAM12 und CATAM20. | 16 |
| Abbildung 11: Zusammensetzung des Produktgases der Katalysatoren CATAM12 (oben) und CATAM20 (unten)..... | 16 |
| Abbildung 12: Abbildungen der Prototypen, oben: mit H ₂ -Freisetzungsreaktor mit PEM-Brennstoffzelle, unten: Direktbrennstoffzelle..... | 17 |
| Abbildung 13: Strom-Spannungs-Kennlinie der Direktbrennstoffzelle..... | 18 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 14: IEA Vernetzungstreffen Annex 31, Fraunhofer ICT im Pfinzthal 2015 | 19 |
| Abbildung 15: Teilnehmer am Annex 31 Meeting in Beijing, China..... | 20 |
| Abbildung 16: TeilnehmerInnen der Brennstoffzellen Sommerakademie 2016 in Graz | 21 |
| Abbildung 17: Ausflug auf den Schöckl, 2016 | 21 |
| Abbildung 18: Keynote-Speaker Dr. Napporn und Dr. Sita | 22 |
| Abbildung 19: Verleihung der Posterpreise (von re. nach li.: Prof. Mitsushima, Dr. Reimer, A. Maeda, S. Hashimura, F. Labbé, B. Pichler, Prof. Kokoh, Prof. Hacker) | 23 |

7.3. Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Liste der im IEA Annex 31 teilnehmenden Einrichtungen, alphabetisch geordnet nach Herkunftsland..... | 10 |
|---|----|