

# IEA Fortschrittliche Brennstoffzellen (AFC) Annex 34: Brennstoffzellen für Transportanwendungen

Arbeitsperiode 2019 - 2022

A. Trattner, M. Macherhammer

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**27/2023**

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe  
unter [nachhaltigwirtschaften.at](https://nachhaltigwirtschaften.at)

### **Impressum**

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

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

### **Copyright und Haftung:**

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist.

Nutzungsbestimmungen: [nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/](https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/)

# IEA Fortschrittliche Brennstoffzellen (AFC)

## Annex 34: Brennstoffzellen für Transportanwendungen

Arbeitsperiode 2019 - 2022

Dipl.-Ing. Dr. techn. Alexander Trattner,  
Dipl.- Ing. Dr. techn. Marie - Gabrielle Macherhammer  
HyCentA Research GmbH

Graz, August 2022

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



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



## **Vorbemerkung**

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

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

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

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

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Kurzfassung .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Abstract.....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Ausgangslage.....</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Projekthalt.....</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Vernetzung und Ergebnistransfer .....</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen.....</b>	<b>37</b>

# 1 Kurzfassung

**Ausgangssituation:** Um den Transportsektor auf emissionsfreie Antriebe umstellen zu können werden derzeit international immer mehr alternative Möglichkeiten untersucht und weiterentwickelt. Für einen möglichst schnellen und effizienten Umstieg bieten sich hier vor allem Wasserstoff in Kombination mit Brennstoffzellen an. Vor allem im öffentlichen Verkehr und bei Nutzfahrzeugen hat die Brennstoffzelle entschiedene Vorteile gegenüber anderen neuen Antrieben. Trotz dieser unbestrittenen Pluspunkte und vielen Forschungsaktivitäten in diesem Bereich in Österreich ist das brennstoffzellen-betriebene Fahrzeug noch nicht in größerer Zahl am österreichischen oder generell am europäischen Markt angekommen. Eine Vernetzung auf internationaler Ebene und das Aufbauen neuer Kooperationen schafft Möglichkeiten, die Forschung und Entwicklung und in weiterer Folge die Umstellung auf alternative Antriebe auch in Österreich voranzutreiben.

**Inhalte und Zielsetzungen:** Das Technology Collaboration Programme, TCP, der Internationalen Energieagentur, IEA, unterstützt international agierende Expertengruppen bei der Ausarbeitung alternativer Energietechnologien. Das Hauptziel des Annexes 34: Brennstoffzellen für Transportanwendungen im Bereich Fortgeschrittene Brennstoffzellen, Advanced Fuel Cells – AFC, ist die fortführende Entwicklung von Brennstoffzellenkomponenten und -systemen. Zusätzlich sind Well-to-Wheel Analysen (Betrachtung der gesamten Wirkungskette von der Gewinnung des Kraftstoffes bis zur Umwandlung in kinetische Energie), Potentialabschätzungen zur Kostenreduktion und Technologieforschung im Allgemeinen in den Bereichen Personen- und Lastkraftwägen, Bussen und Infrastruktur Teil des Projektinhalts. Das übergeordnete Ziel des Projekts ist die internationale Vernetzung und der Austausch von Erkenntnissen, um in Österreich Wasserstoff-Mobilität zu etablieren.

**Methodische Vorgehensweise:** Österreich als Forschungsstandpunkt, der sich seit Jahren mit der Wasserstoffwirtschaft in allen Teilbereichen beschäftigt, kann einerseits auf viele Groß- und Demonstrationsprojekte zurückgreifen und andererseits durch die Zusammenarbeit mit internationalen Partnern Erkenntnisse für weitere Umsetzungen und Anwendungsfälle gewinnen. Durch den Austausch auf unterschiedlichen Ebenen und Plattformen, in der wissenschaftlichen Gemeinschaft und mit Stakeholdern der breiten Öffentlichkeit lassen sich Ergebnisse verbreiten und neue Ansätze und Projekte initiieren. Im vorliegenden Annex sind Partner aus Österreich, Deutschland, Kanada, USA, China, Dänemark, Frankreich und Schweden vertreten.

**Ergebnisse und Schlussfolgerungen:** Durch die bereits seit Jahren in Österreich laufenden Forschungs- und Demonstrationsprojekte für den Mobilitätssektor konnten wertvolle Erkenntnisse in die internationale Zusammenarbeit eingebracht und für verschiedenste Anwendungen erweitert werden. Beispielsweise wurde ein Software-Tool entwickelt, das die Berechnung von Energieverbräuchen auf unterschiedlichen Wasserstoff-Transportwegen erlaubt und so zukünftig Entscheidungen erleichtern kann. Der detaillierte Austausch mit den Mitgliedern des Projekts verhalf außerdem zu der Erstellung eines Maßnahmenkatalogs, um Wasserstoff schnell und einfach in unser nationales Energiesystem implementieren zu können. Zusätzlich konnten wissenschaftliche Erkenntnisse im Bereich des Thermalmanagement für schwere Nutzfahrzeuge und die Entwicklung von einer Auslegungsmethodik für die passive Rezirkulation von Wasserstoff im Anodensubsystem

von Brennstoffzellensystemen entwickelt und mit der wissenschaftlichen Gemeinschaft geteilt werden. Durch die unterschiedlichen Annexvertreter wurde wertvoller Input für Österreich zur weltweiten Herstellung und Verteilung von Wasserstoff geliefert. Ebenso wurde durch den internationalen Austausch deutlich, dass die sinkenden Total Cost of Ownership dazu beitragen, Wasserstoffsysteme für alle mobilen Anwendungen äußerst attraktiv zu machen. Dies vereinfacht den Transfer von Wasserstoffspeicher- und Brennstoffzellensystemen auf weitere Anwendungen wie beispielsweise Schiffe und Flugzeuge.

## 2 Abstract

Starting point: In order to be able to convert the transport sector to emission-free powertrains, more and more alternative options are currently being investigated and developed internationally.

Hydrogen in combination with fuel cells is a particularly suitable option for ensuring the fastest and most efficient transition possible. Especially in public transport and commercial vehicles, fuel cells have decisive advantages over other new powertrain systems. Despite these undisputed advantages and many research activities in this field in Austria, the fuel cell-powered vehicle has not yet arrived in quantities on the Austrian or generally on the European market. Networking on an international level and establishing new cooperations creates opportunities to advance research and development and the conversion to alternative powertrains in Austria as well.

Contents and objectives: The Technology Collaboration Programme, TCP, of the International Energy Agency, IEA, supports internationally active expert groups in the elaboration of alternative energy technologies. The main objective of Annex 34: Fuel Cells for Transport Applications in the area of Advanced Fuel Cells is the continued development of fuel cell components and systems. In addition, well-to-wheel analyses ((consideration of the entire chain of effects from the extraction of the fuel to its conversion into kinetic energy), cost reduction potential assessments and technology research in general in the areas of passenger and freight vehicles, buses and infrastructure are part of the project content. The overall goal of the project is international networking and exchange of knowledge to establish hydrogen mobility in Austria.

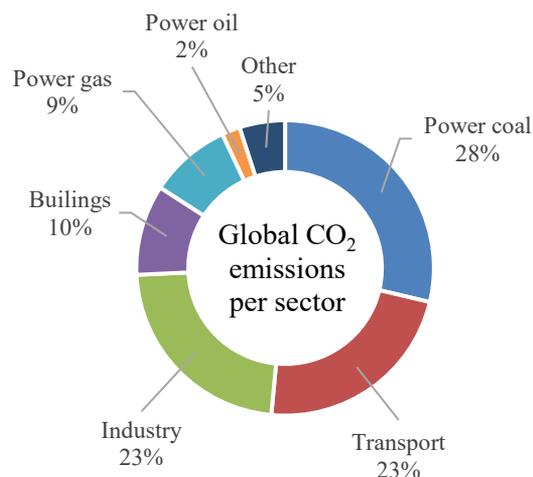
Methods: Austria as a research focal point, which has been dealing with the hydrogen economy in all sub-areas for years, can on the one hand draw on many large-scale and demonstration projects and on the other hand gain knowledge for further implementations and use cases through cooperation with international partners. Through exchange on different levels and platforms, in the scientific community and with stakeholders of the general public, results can be disseminated and new approaches and projects can be initiated. In the present Annex, partners from Austria, Germany, Canada, USA, China, Denmark, France and Sweden are represented.

Results and conclusions: Based on the research and demonstration projects for the mobility sector that have already been running in Austria for years, valuable findings could be introduced into international cooperation and further extended for a wide variety of applications. For example, a software tool was developed that allows the calculation of energy consumption for different hydrogen transport routes and can thus facilitate decisions in the future. The detailed exchange with the members of the project also helped to create a catalogue of measures to be able to implement hydrogen quickly and easily into our national energy system. In addition, scientific knowledge in the area of thermal management for heavy-duty motor vehicles and the development of a design methodology for passive recirculation of hydrogen in the anode subsystem of fuel cell systems were developed and shared with the scientific community. The different Annex representatives provided valuable input for Austria on the worldwide production and distribution of hydrogen. It also became clear through the international exchange that the decreasing total cost of ownership contributes to making hydrogen systems extremely attractive for all mobile applications. This simplifies the transfer of hydrogen storage and fuel cell systems to other applications such as ships and aircraft.

### 3 Ausgangslage

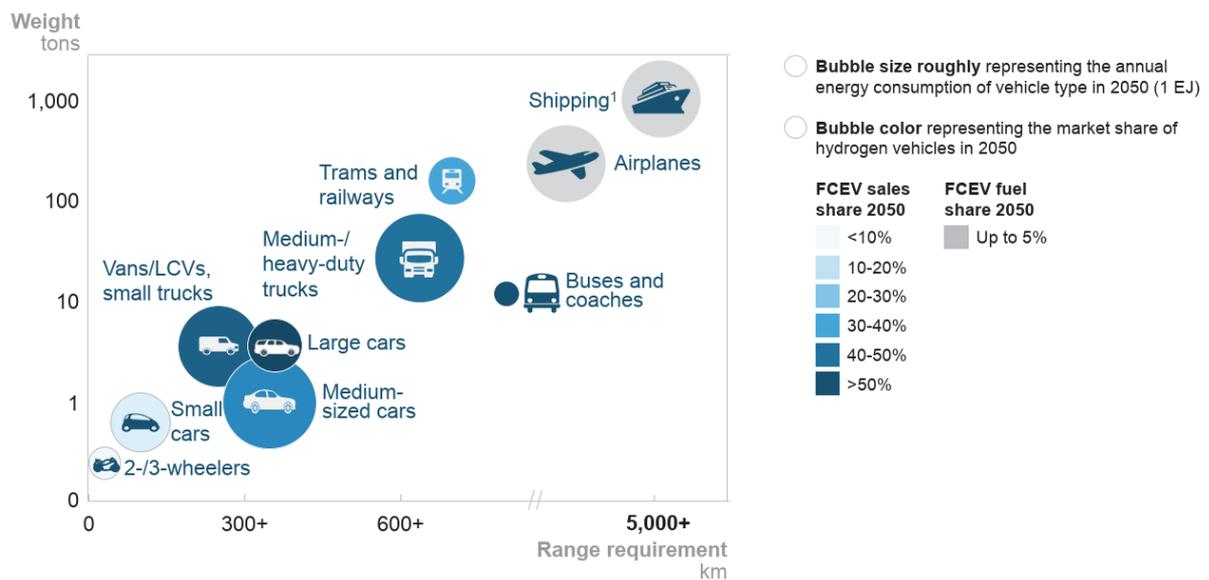
Die Reduktion von Treibhausgasemissionen ist mehr denn je eines der wichtigsten Ziele unserer Zeit um die Klimaerwärmung und die damit verbundenen Umweltkatastrophen einzudämmen. Fast ein Viertel der globalen Treibhausgasemissionen wird dem Verkehrssektor zugeordnet, siehe Abbildung 1:

Abbildung 1: Globale CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Sektor<sup>i</sup>



Um die Vorgabe des Pariser Abkommens zur Begrenzung der „globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau“<sup>ii</sup> erreichen zu können, muss eine Reduktion der Emissionen um 40 % bis 2050 insgesamt und durch die prognostizierte Zunahme des Güter- und Flugverkehrs um mehr als 70 % im Transportsektor gesenkt werden. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen können neben batterieelektrischen Antrieben auch Wasserstoff und Brennstoffzellen eine grundlegende Rolle spielen. Basierend auf dem Hydrogen Council<sup>iii</sup> kann der gesamte Verkehrssektor bis 2030 dekarbonisiert werden, wobei die Stärke von brennstoffzellenbasierten Antrieben vor allem im Bereich von großen Reichweiten und hohen Lasten zum Vorschein kommt, siehe Abbildung 2.

Abbildung 2: Anteil an Wasserstoff-basierten Antrieben im Verkehrssektor für 2050<sup>3</sup>



Derzeit sind Brennstoffzellen-Fahrzeuge vor allem für den Individualverkehr am Markt verfügbar. Beispiele hierfür sind die Modelle Toyota Mirai, Honda Clarity und Hyundai Nexo, der bereits die zweite Generation nach dem Modell ix35 des Brennstoffzellen Fahrzeugs ist. Wie zuvor bereits erwähnt, werden Brennstoffzellenantriebe zukünftig aber vor allem in schweren Nutzfahrzeugen, Zügen und Schiffen eingesetzt werden. Derzeit sind sowohl 12-Meter-Stadtbusse als auch 18-Tonnen-LKW mit Brennstoffzellenantrieb am Markt erhältlich.

Um die Umstellung des Transportwesens zu ermöglichen, müssen vor allem die Kosten gesenkt werden, wofür sich die Vereinfachung von komplexen Systemen als gangbarer Weg darstellt. Im Zuge der internationalen Zusammenarbeit in diesem Annex der IEA konnten signifikante Erkenntnisse und ein lebender Austausch erreicht werden.

## 4 Projektinhalt

Das Technology Collaboration Programme, TCP, der Internationalen Energieagentur, IEA, unterstützt international agierende Expertengruppen bei der Ausarbeitung alternativer Energietechnologien mit dem Fokus auf Energiesicherheit, Umweltschutz und Wirtschaftswachstum. Das Hauptziel des Annexes 34: Brennstoffzellen für Transportanwendungen im Bereich Fortgeschrittene Brennstoffzellen, Advanced Fuel Cells – AFC (siehe Abbildung 3), ist die fortführende Entwicklung von Brennstoffzellenkomponenten und -systemen. Weiters steht auch die Unterstützung der Marktimplementierung durch die Analyse und Anpassung der hierfür erforderlichen politischen Rahmenbedingungen und dem Abbau existierender Implementierungsbarrieren im Fokus.

Abbildung 3: Logo des IEA TCP für Fortschrittliche Brennstoffzellen



Im Detail befasst sich Annex 34 mit Vor- und Nachteilen von Brennstoffzellen, der Weiterentwicklung von Speichermedien, der Erfassung von Kostenreduktionspotentialen und der Ergebnisanalyse von Pilotprojekten. Diese Aspekte werden in vier Subtasks unterteilt:

- Subtask 1: Fortschrittliche Brennstoffzellensysteme für Transportapplikationen inklusive Wasserstoffspeichertechnologien,
- Subtask 2: Wasserstoffinfrastruktur und –produktion inklusive Well-to-Wheel-Studien sowie dezentrale und zentrale Wasserstoffproduktion,
- Subtask 3: Technologie Validierung, insbesondere für leichte und schwere Nutzfahrzeuge und Busse,
- Subtask 4: Wirtschaftlichkeitsanalyse von Brennstoffzellensystemen in Kraftfahrzeugen sowie der Wasserstoffproduktion.

Die österreichische Beteiligung am Technology Collaboration Programme on Advanced Fuel Cells verfolgt die folgenden Ziele:

- Integration österreichischer Spitzenforschung in internationale Arbeitsschwerpunkte,
- Transfer von internationalem Know-how nach und in Österreich und vice versa,
- Forcierung und Mobilisierung der österreichischen angewandten und Grundlagenforschung (durch gewonnenes IEA-Know-how)
- Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und Internationalisierung der österreichischen Wirtschaft

Derzeit nehmen folgende Länder an Technology Collaboration Programme teil: China, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Israel, Italien, Japan, Kroatien, Mexiko, Österreich, Schweden, Schweiz,

Südkorea und USA. Im November 2017 wurde Prof. Detlef Stolten (Deutschland) als Vorsitzender im Amt bestätigt. Dr. Nancy Garland (USA) und Dr. Jonghee Han (Südkorea) wurden als stellvertretende Vorsitzende gewählt.

Der Annex 34 ist seit 2009 in Bearbeitung und steht seit 2017 unter der Leitung von Dr Rajesh Ahluwalia des United States Department of Energy's Argonne National Laboratory in Illinois. Tabelle 1 zeigt die vertretenen Länder und Institutionen.

Tabelle 1: Länder und Institute vertreten im Annex 34 des TCP AFC

Land	Institution	Name
<b>Österreich</b>	HyCentA	A. Trattner
<b>China</b>	Tsinghua Universität	Jianqiu Li
	Sunrise Power Co.	Zhongjun Hou
<b>Dänemark</b>	EWII (IRD Fuel Cells)	M. Odgaard
<b>Frankreich</b>	Institut FC Lab	F. Petit
	CEA Liten	L. Antoni
<b>Kanada</b>	Ballard	S. Knights
<b>Deutschland</b>	Forschungszentrum Jülich GmbH	T. Grube
	RWTH – Aachen	B. Gnörich
<b>Schweden</b>	Volvo Technology Corporation	P. Ekdunge
	PowerCell	B. Riddell
<b>USA</b>	Argonne National Laboratory (ANL)	R. Ahluwalia

Die Österreichische Energieagentur organisierte gemeinsam mit dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, BMVIT, vom 6.–8. November 2018 das 57. Executive Committee (ExCo) Meeting. Das Meeting, das öffentlich zugänglich war und in dem der Status quo der relevanten Annexe präsentiert wurde, fand in Linz statt. Das ExCo Meeting wurde mit dem nationalen Workshop des Projektes HyLaw und dem Workshop des Projektes IEA AFC TCP Annex 33 gekoppelt. Es nahmen ungefähr 100 Interessierte an der Veranstaltung teil.

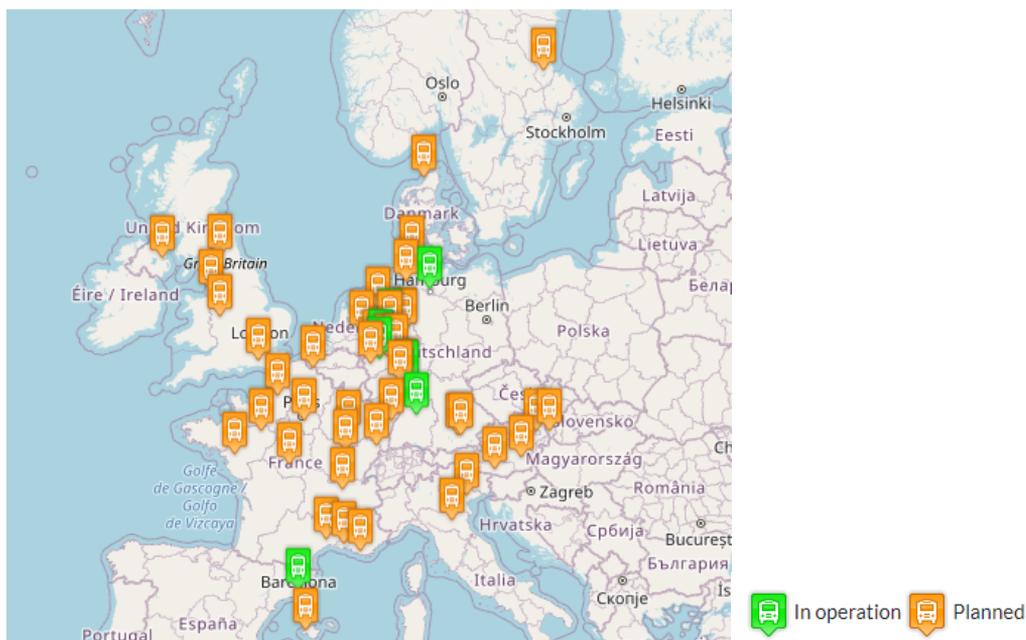
Im Zuge des bereits seit Jahren laufenden Annexes wurden auf internationaler Ebene Berichte erstellt, Zusammenarbeit gefördert und die dazugehörige Medienarbeit geleistet. Der erzielte Fortschritt wurde der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt und enthielt die folgenden Schwerpunkte:

- Formulierung und Bearbeitung von gemeinsamen Forschungszielen
- Diskussion und Dissemination von Ergebnissen der Forschungsarbeiten (Info-Veranstaltungen) sowie Durchführung von System- und Marktanalysen und damit verbundene Barrieren (inkl. der Analyse der Kosten für Zellen, Stacks und Systeme)
- Verstärkte Veröffentlichungs- und Verbreitungsaktivitäten (inkl. Newsletter, Annual Reports, Workshops, spezifische Reports zu aktuellen Themen, etc.).

## Projektziele

Obwohl die Brennstoffzellentechnik an sich bereits seit Jahrzehnten bekannt und etabliert ist, wurden bisher erst wenige Fahrzeug-Modelle auf den Markt gebracht. Zwei der vorwiegenden Gründe dafür sind die erst spärlich vorhandene Infrastruktur und die immer noch sehr teuren Fahrzeuge für den Individualverkehr. Besonders im öffentlichen Personennahverkehr und im Nutzfahrzeugbereich liegen die Vorteile von Brennstoffzellenantrieben auf der Hand. Vor allem im urbanen Bereich gibt es bereits mehrere Städte, die eine Wasserstoffbusflotte einsetzen und weiters eine Großzahl an Ankündigungen<sup>iv</sup>, siehe Abbildung 4.

Abbildung 4: Implementierungsprojekte für Brennstoffzellenbusse in Europa<sup>iv</sup>



Neben den Hyundai Xcient Fuel Cell Brennstoffzellen LKW, der derzeit bereits in der Schweiz eingesetzt wird<sup>v</sup>, gibt es derzeit auch weitere Ankündigungen für mittlere und große Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge, unter anderem von Daimler Truck, der mit Flüssigwasserstoff betankt wird<sup>vi</sup>.

Österreich hat durch die Wasserstoffinitiative-Vorzeigeregion Austria, der WIVA P&G, bereits eine gute Basis, um in vielen der oben genannten Bereichen ein Grundwissen zu erarbeiten und verschiedene Forschungsergebnisse zur Verfügung zu stellen. Vor allem aber die Wasserstoff-Infrastruktur als auch der öffentliche Transportsektor sind Gebiete, die noch intensiver Entwicklungsarbeit bedürfen. Hier ist der Austausch auf internationaler Ebene von großem Vorteil, da in Städten wie Bozen oder Aberdeen bereits seit Jahren Wasserstoffbusse unterwegs sind.

Zusätzlich ist auch die Versorgung mit Wasserstoff für den Verkehr eine essentielle Komponente für eine breite Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit. Die Tankstellen werden derzeit meistens mit Trailern versorgt, wobei der Wasserstoff hierfür in zentralen Anlagen produziert wird. In Zukunft müssen verschiedene Szenarien zur dezentralen und zentralen Erzeugung evaluiert werden, um eine

effiziente Bereitstellung sicherstellen zu können. Auch hier ist der Austausch mit verschiedenen internationalen Partnern von großer Wichtigkeit.

Nicht zuletzt ist die Kostenreduktion ein wichtiges Thema. Da Österreich ein Knotenpunkt der international tätigen Automobilzulieferer ist und die Vernetzung innerhalb Österreichs schon gut vorangeschritten ist, ist nun die Zusammenarbeit auf europäischer und internationaler Ebene ein wichtiger Schritt, um die Barrieren für eine vollkommene Marktdurchdringung mit kostengünstigen Fahrzeugmodellen in allen Bereichen des Transports zu erreichen.

#### Methode und wissenschaftlicher Lösungsansatz

Um einen Fortschritt in verschiedenen Bereich der Brennstoffzelle für Transportanwendungen auf internationaler Ebene erreichen zu können, müssen verschiedene Plattformen zum Austausch geschaffen und genutzt werden. Österreich hat mit der WIVA P&G bereits eine breite Vernetzung innerhalb des Landes über verschiedene Demonstrations- und Forschungsprojekte vollzogen und somit eine gute Ausgangssituation.

Durch die WIVA P&G sind wichtige Stakeholder in einem Konsortium versammelt, die zur maßgeblichen Erleichterung der Vernetzung beitragen. Durch vierteljährliche Versammlungen und alljährliche Informationsveranstaltungen kann ein reger Austausch gefördert und eine breite Öffentlichkeit angesprochen werden. In der Modellregion werden verschiedenste groß angelegte Projekte umgesetzt, wovon ein Großteil der Mobilität und der Infrastruktur gewidmet sind. Mit der Teilnahme von Industriepartnern und wissenschaftlichen Instituten können die Expertise gesteigert und die Entwicklung vorangetrieben werden, die die gesamte Wertschöpfungskette von der Erzeugung bis zur Nutzung abdeckt. Zusätzlich dazu verfolgt die WIVA P&G einen Kommunikationsplan, der die Sichtbarkeit der Projekte erhöht und die Ergebnisse weit verbreitet.

Neben den Tätigkeiten in der WIVA hat das HyCentA auch einen engen Kontakt zu verschiedenen Ministerien der Republik Österreich und ist hier auch in vielen Gebieten beratend tätig. Dies ist von besonderem Vorteil, da sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene derzeit Strategien zu und mit erneuerbaren Energien, darunter auch Wasserstoff, entwickelt werden. Auch Normen und Standards zu verschiedenen Aspekten der Wasserstoffwirtschaft müssen zukünftig erweitert und angepasst werden, wobei das HyCentA auch in diesem Themenfeld immer wieder unterstützend tätig ist. Die internationale Zusammenarbeit in diesem Bereich ist unbedingt von Nöten, um eine einheitliche Vorgehensweise zu etablieren und die Umsetzung schnell voranzutreiben.

In diesem Sinne wird Wissen nicht nur ausgetauscht und Methoden abgestimmt, sondern auch neue Projekte ermöglicht und Standards generiert.

Die HyCentA Research GmbH am Standort der Technischen Universität Graz ist die einzige außeruniversitäre Forschungseinrichtung in Österreich, die sich ausschließlich mit der Forschung und Entwicklung an Wasserstofftechnologien beschäftigt. Seit der Gründung im Jahr 2005 führt das HyCentA in einem internationalen Netzwerk mit Industrie und Wissenschaft Projekte zur Erzeugung, Verteilung, Speicherung und Anwendung von Wasserstoff durch – und deckt damit die ganze Wertschöpfungskette ab. Das HyCentA weist alle erforderlichen Kompetenzen auf, um Technologien vom Labor bis zum industriellen Maßstab zu erforschen, entwickeln und demonstrieren zu können. Dies umfasst einschlägige Kenntnisse und praktische Erfahrungen in den Disziplinen Engineering, Simulation und Prüfen von Wasserstoff- und elektrochemischen Technologien, wie Elektrolyse,

Wasserstoffspeicherung, Brennstoffzelle, Betankungs- sowie Mess- und Sicherheitssysteme. Das HyCentA ist als außeruniversitäre Forschungseinheit sehr eng mit der Technischen Universität in Graz verbunden und wirkt in der Lehre verschiedener Studienpläne zum Thema Wasserstoff mit. Zusätzlich übernimmt es auch die Betreuung von Abschlussarbeiten wie Bachelor, Master und PhD Thesen. Zu weiteren wissenschaftlichen Tätigkeiten des HyCentA gehören die Teilnahme an internationalen Kongressen, die Zusammenarbeit mit anderen wissenschaftlichen Einrichtungen und die Publikationen von relevanten Forschungsergebnissen. Diese Tätigkeiten ermöglichen einen guten Informationsfluss zu den Studierenden und helfen somit, einen Teil der Bevölkerung direkt zu erreichen. Auch wird der internationale Austausch durch unterschiedlichste Programme für Studierende gefördert. Neben Studierenden wird auch Fachpersonal für spezielle Wasserstoffanwendungen ausgebildet – hier wird sich der Bedarf kontinuierlich erhöhen, weshalb in Zukunft darauf geachtet werden muss, genug Ausbildungsstätten einzurichten.

Weiters gab es schon in der Vergangenheit durch die Bildung verschiedener Clusterorganisationen, wie beispielsweise dem Fuel Cell & Hydrogen Cluster Austria,<sup>vii</sup> FCH Austria, Bestrebungen durch die Einbeziehung wichtiger Stakeholder eine enge Vernetzung zu schaffen. Auch in Zukunft wird die Analyse von bewährten und neu hinzukommenden Interessensvertretern von großer Bedeutung sein, wobei hier das HyCentA auf langjährige Tätigkeiten und Erfahrungswerte zurückgreifen kann. Wie auch schon bei der Liste der Projekte ersichtlich generiert das HyCentA bereits heute schon Berichte für die Öffentlichkeit, die zur Information und Weiterbildung dienen.

# 5 Ergebnisse

Das Projekt gliedert sich in vier unterschiedliche Unteraufgaben, nämlich in

- Fortschrittliche Brennstoffzellensysteme für Transportapplikationen inklusive Wasserstoffspeichertechnologien,
- Wasserstoffinfrastruktur und –produktion inklusive Well-to-Wheel-Studien sowie dezentrale und zentrale Wasserstoffproduktion,
- Technologie Validierung, insbesondere für leichte und schwere Nutzfahrzeuge und Busse,
- Wirtschaftlichkeitsanalyse von Brennstoffzellensystemen in Kraftfahrzeugen sowie der Wasserstoffproduktion.

Basierend auf dieser Einteilung sind auch die Ergebnisse strukturiert.

Im **ersten Bereich, Fortschrittliche Brennstoffzellensysteme für Transportapplikationen inklusive Wasserstoffspeichertechnologien**, war das Ziel die Erfassung von Kostenreduktionspotentialen für Brennstoffzellen und Speichersystem sowie der Leitfaden für den optimalen Einsatz von Brennstoffzellen-Fahrzeuge.

Im Zuge der Clean Hydrogen Partnership wurde 2022 die Strategic Research and Innovation Agenda veröffentlicht. Basierend auf derzeitigen Entwicklungspotentialen und geplanten Projekten wurden auch im Bereich Transportanwendungen für Heavy-Duty Brennstoffzellensysteme Key Performance Indicators definiert, die zur Unterstützung der Marktdurchdringung erreicht werden sollen, siehe Tabelle 2. Die Kosten für ein Brennstoffzellen-Modul (inklusive Stack, Luftversorgungssystem, Kühlsystem, interne Steuerung, Medienverteiler und andere Komponenten wie Rezirkulation, Befeuchter, Sensoren, DCDC) sollen sich bis 2030 auf unter ein Zehntel reduzieren. Die Berechnungen basierend auf einer jährlichen Produktionsrate von 2.500 Einheiten im Jahr 2024 und 25.000 Einheiten im Jahr 2030.

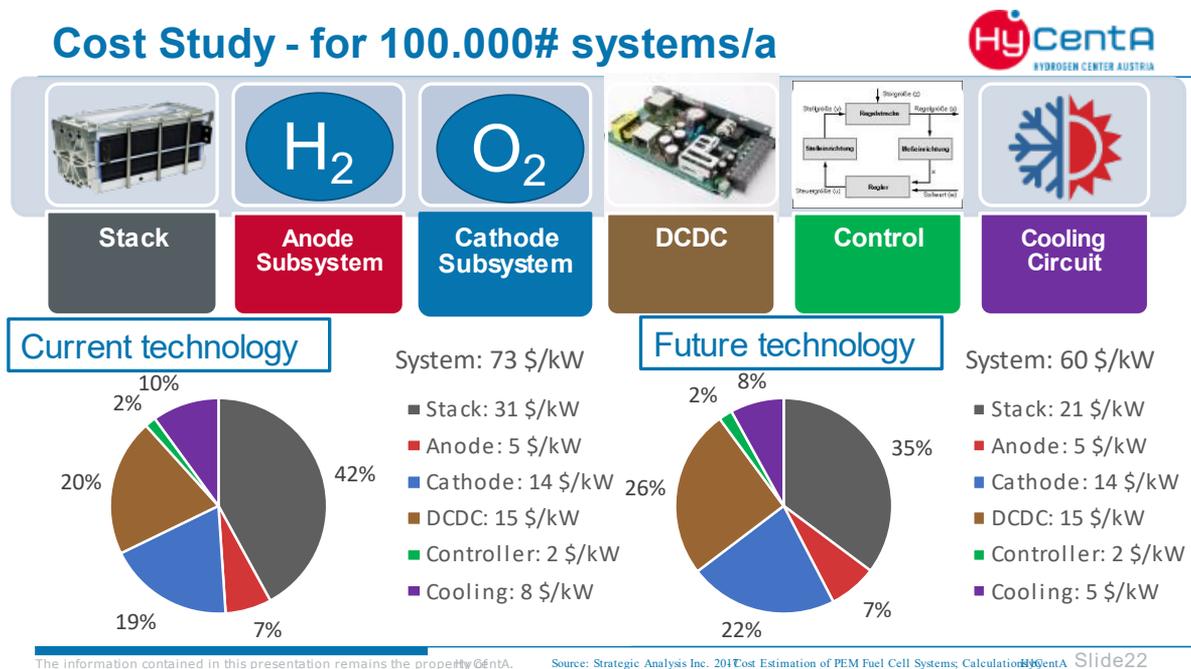
Tabelle 2: Key Performance Indicators für Heavy-Duty Brennstoffzellensysteme

No	Parameter	Unit	SOA	Targets	
			2020	2024	2030
<b>Fuel Cell Building Blocks</b>					
1	FC module CAPEX	€/kW	1,500	<480	<100
2	FC module availability	%	85%	95%	98%
3	FC stack durability	h	15,000	20,000	30,000
4	FC stack cost	€/kW	>100	<75	< 50
5	Power density	W/cm <sup>2</sup>	1 @ 0.650 V	High TRL 1.0@0.675V Low TRL >1.2@0.650V	High TRL 1.2 @ 0.675V Low TRL >1.5@ 0.650V
6	PGM loading	g/kW	0.4	High TRL 0.35 Low TRL < 0.30	High TRL 0.30 Low TRL < 0.25
<b>Hydrogen on-board storage</b>					
7	Storage tank CAPEX (CG H <sub>2</sub> )	€/kg H <sub>2</sub>	800	500	300
8	Storage tank CAPEX (LH <sub>2</sub> )	€/kg H <sub>2</sub>	n/a	320	245
9	Gravimetric capacity (CG H <sub>2</sub> )	%	6	6.5	7
10	Conformability LH <sub>2</sub>	%	40	45	55
11	Gravimetric Capacity LH <sub>2</sub>	%	8	10	12
12	LH <sub>2</sub> tank volumetric Capacity	gH <sub>2</sub> /l system	35	38	45

Basierend auf internen Berechnungen des HyCentA können diese Ziele durchaus erreicht werden. Es zeigt sich, dass Skalierungseffekte bereits ab 20.000 Stück pro Jahr zu deutlichen Kostenreduktionen führen und dass dies vor allem durch die Industrialisierung der Bipolarplatten ermöglicht wird. Die größten Einsparungspotentiale, die sich durch die Verbesserung der Technologie und Reduktion der eingesetzten kritischen Rohstoffe ergeben, liegen im Bereich des Stacks und der Kühlkomponenten. Ein Vergleich wird in Abbildung 5 dargestellt. Die größten Kostenanteile entfallen in Zukunft auf den Stack und den DC/DC Wandler (Leistungselektronik). Beide Bauteilgruppen bieten auch für die österreichische Industrie wesentliche Wertschöpfungspotenziale.

Ein Beispiel für die Reduktion von Komplexität und damit ein Potential zur Kosteneinsparung ist das Weglassen eines Befeuchters. Die theoretischen Berechnungen und die Validierung werden in der Veröffentlichung „Quasi-stationary UI-characteristic model of a PEM fuel cell–Evaluating the option of self-humidifying operation“ dargestellt. <sup>viii</sup>

Abbildung 5: Vergleich von Komponenten-Herstellungskosten für Brennstoffzellen aktuell und zukünftig



Im Zuge des Annex 34 wurde auch im Bereich Kosten wertvoller Input des Partners Argonne National Laboratory geliefert. In einer kurzen und übersichtlichen Zusammenfassung wurden die Erkenntnisse zu der Entwicklung der Kosten von Brennstoffzellensystemen in den USA dargestellt, siehe Abbildung 6.

Abbildung 6: Entwicklungspotential von Brennstoffzellenantrieben und deren Kosten

### Key Messages from Annex 34

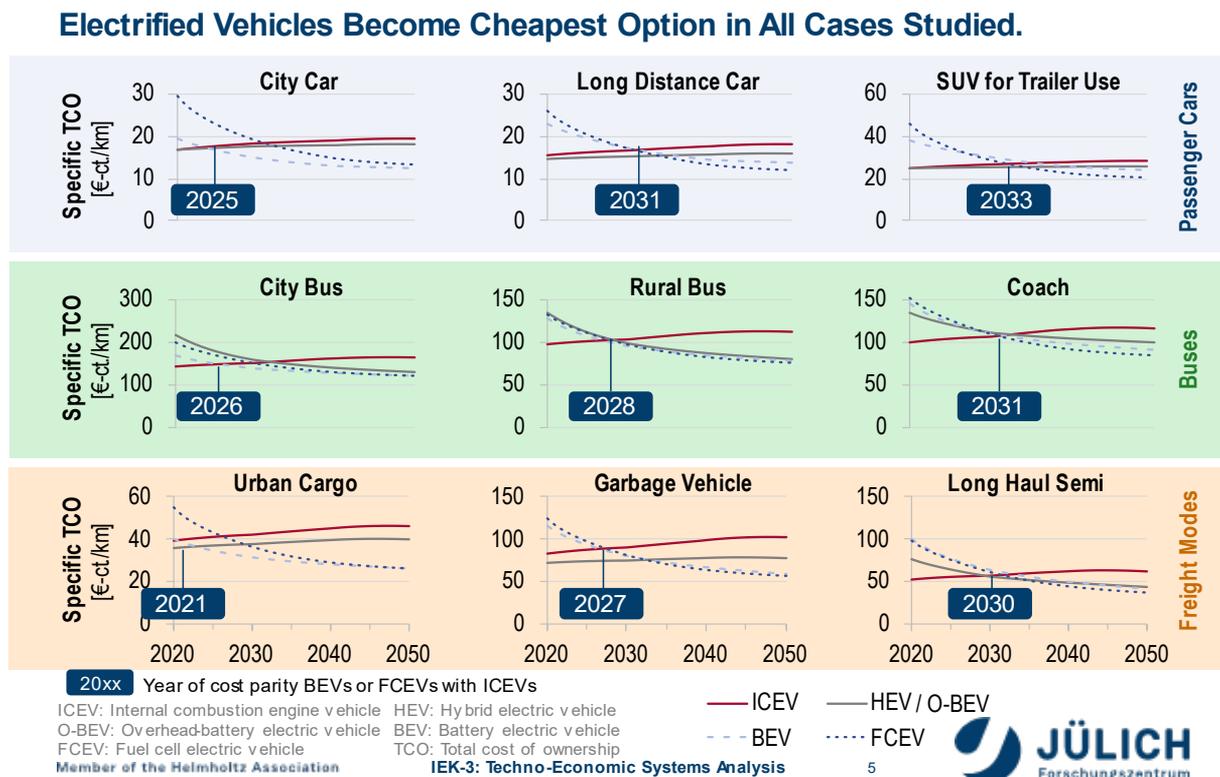


#### Recent Progress in Fuel Cells for Transportation

- **Light-duty Vehicles:** SA/ANL team estimated the durability adjusted cost of fuel cell systems for LDVs (8,000-h life, 0.175 mg/cm<sup>2</sup> total Pt loading) as \$252/kW at 1,000 units/year decreasing to \$76/kW at 100,000 units/year.
- **Cost Reduction Trajectory:** Ballard projects the fuel cell truck TCO to 1) reach parity with battery electric trucks at \$500-700/kW (100 units/year) and \$6-5/kg-H<sub>2</sub>, 2) surpass all ZEV options at \$250-350/kW (1000 units/year) and <\$5/kg-H<sub>2</sub>, and 3) surpass diesel trucks at \$100/kW (100,000 units/year) and \$4/kg-H<sub>2</sub>.
- **Heavy-duty Trucks:** SA/ANL team has estimated the durability adjusted cost of fuel cell systems for Class-8 trucks (25,000-h life, 0.4 mg/cm<sup>2</sup> total Pt loading) as \$548/kW at 200 units/year decreasing to \$323/kW at 1000 units/year.
- **Locomotives with Hydrogen Electric Multiple Units (HEMU):** HEMU can be competitive with diesel (DMU), electric (EMU), and battery (BEMU) drive trains with LH<sub>2</sub> storage and \$1.75-\$3.00/kg-H<sub>2</sub>.
- **Maritime:** A TCO study determined \$3.50/kg-H<sub>2</sub> as the breakeven bunkered fuel cost for truck fuel cells to be competitive with 2x375-2x750 kW diesel engines in small ferries with \$700/ton-LSMGO.
- **Aviation:** A TCO study determined the metrics for fuel cells to be competitive with incumbent aviation gas piston engines for small 4-6 passenger regional planes as 1000-2000 W/kg specific power, 3,000-h lifetime, \$300-250/kW initial cost, 18-22.5 wt.% LH<sub>2</sub> storage system gravimetric capacity, and \$7.50/kg-H<sub>2</sub> fuel cost.
- **H<sub>2</sub> cost:** An FZU study estimated the minimized worldwide cost of imported H<sub>2</sub> as 3.70 (USA) to 4.46 (Japan) €/kg. The study considered the costs of electricity produced from wind/solar, electrolysis, H<sub>2</sub> pipeline, H<sub>2</sub> liquefaction, LH<sub>2</sub> storage and LH<sub>2</sub> transmission.

Im Vergleich zu konventionellen und batterieelektrischen Fahrzeugen werden in Zukunft laut einer Studie des IEK-3 des Forschungszentrums Jülich Brennstoffzellen-Fahrzeuge in fast allen Bereichen die günstigste Option sein, siehe Abbildung 7.

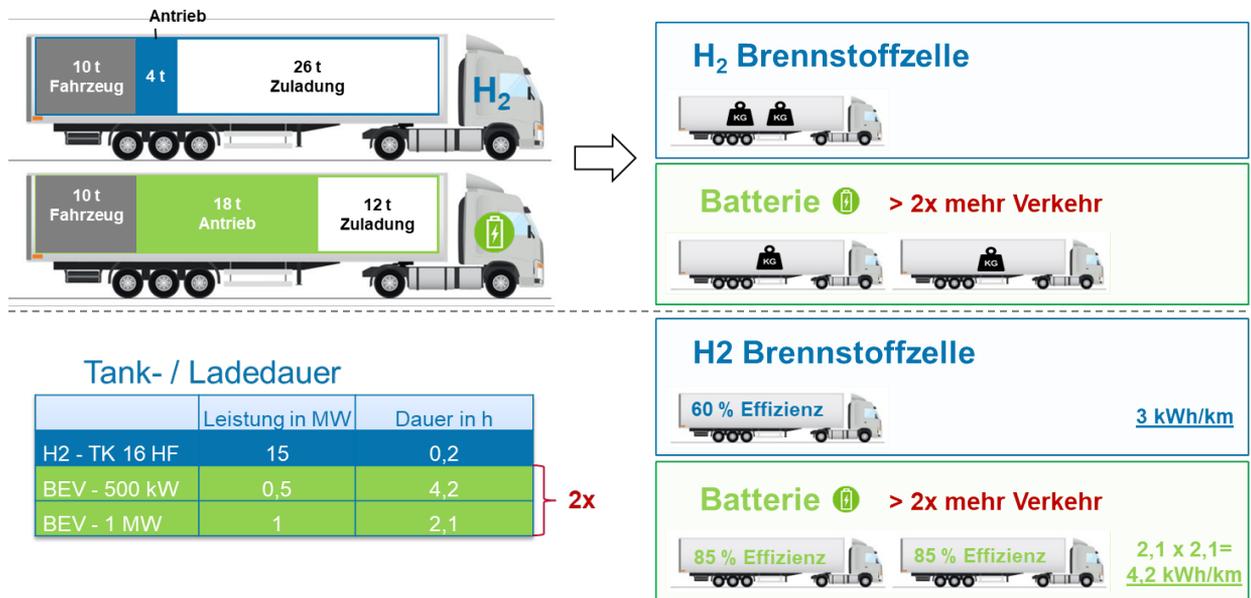
Abbildung 7: Analyse zum Vergleich von verschiedenen Antriebsoptionen und der Break-Even Punkt der TCO-Kosten<sup>ix</sup>



Besonders im **Güterverkehr** wird deutlich, dass ein Brennstoffzellensystem besondere Vorteile gegenüber batteriebetriebenen Kraftfahrzeugen aufweist. Abbildung 8 gibt einen Überblick über unterschiedliche Aufbauten, Betankungs- und Ladedauern und -leistungen sowie die mögliche Zuladung. Neben der höheren Tonnage, die im Vergleich zu batterie-elektrisch betriebenen Lastkraftwägen weniger Verkehr ermöglicht, ist auch die Betankungsdauer von entscheidender Wichtigkeit. Dies ist vor allem für Logistikunternehmen von hohem Interesse.

Abbildung 8: Vergleich batterie-elektrischer/wasserstoffbasierter Antrieb für schwere Nutzfahrzeuge

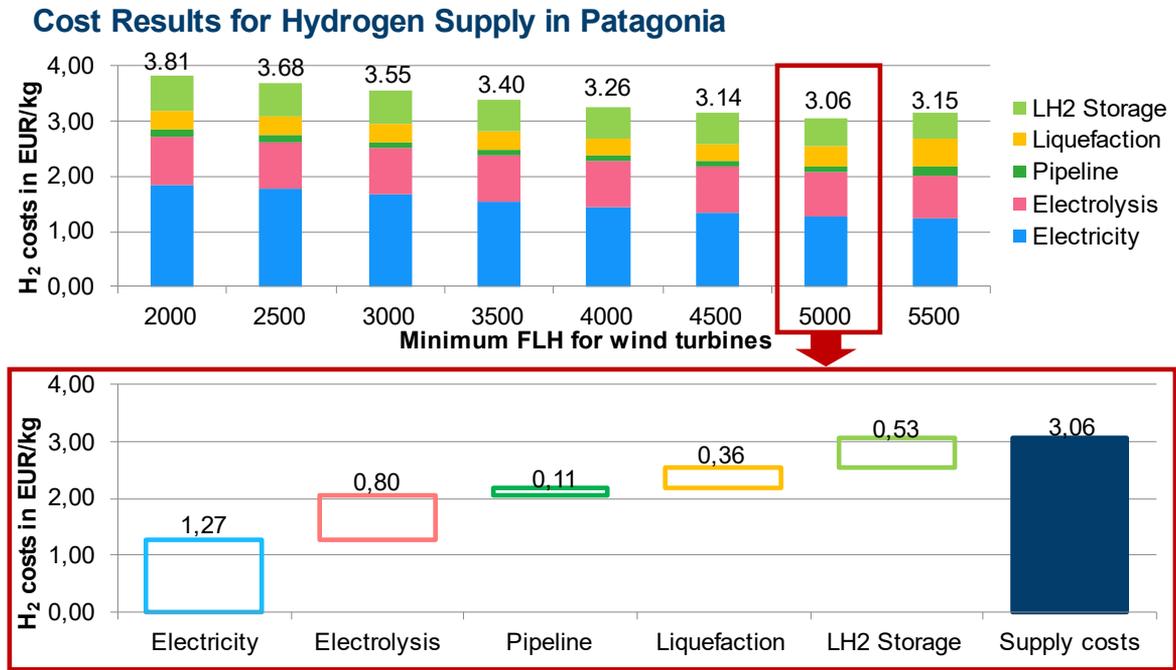
## 40 t LKW - 1000 km Reichweite



**Bereich zwei** beinhaltet die Schwerpunkte **Wasserstoffinfrastruktur** und **–produktion inklusive Well-to-Wheel-Studien** sowie **dezentrale und zentrale Wasserstoffproduktion**.

Die Abteilung techno-ökonomische Systemanalyse des Forschungszentrums Jülich hat vielerlei Verteilungswege definiert und berechnet. Basierend auf einer weltweiten Analyse von zur Verfügung stehenden erneuerbaren Stromquellen wurden unterschiedliche Herstellungs- und Verteilungswege bewertet. Abbildung 9 zeigt beispielsweise die Aufteilung der anteiligen Kosten für die Wasserstoffbereitstellung aus Patagonien.

Abbildung 9: Aufteilung der anteiligen Kosten für die Wasserstoffbereitstellung aus Patagonien



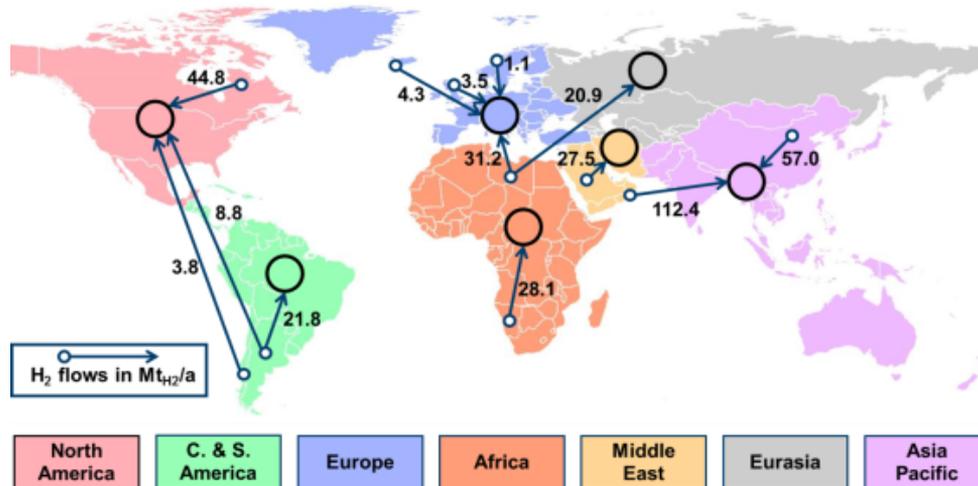
[1] Heuser, Philipp: Weltweite Infrastruktur zur Wasserstoffbereitstellung auf Basis erneuerbarer Energie Worldwide Hydrogen Supply Infrastructure Based on Renewable Energy Dissertationthesis, RWTH Aachen University, 2020

In Zukunft wird auch Wasserstoff auf globaler Ebene im Zuge der Energiewirtschaft gehandelt werden. Insgesamt wurde vom FZJ eine weltweite Analyse durchgeführt, die zukünftige Wasserstoffbereitstellungsmöglichkeiten definiert. Vor allem windstarke und sonnenintensive Länder haben naturgemäß ein hohes Potenzial für zukünftige Wasserstoffherstellung, siehe Abbildung 10.

Abbildung 10: Ergebnisse der weltweiten Wasserstoffzuteilung

### Worldwide Hydrogen Allocation Results for the Reference Scenario [1]

	Germany	Japan	Europe	USA	China	India	Southeast Asia
<b>Demand in Mt/a</b>	5.1	7.4	40.1	46.3	78.8	40.9	42.3
<b>Import cost in €/kg</b>	3.65	4.09	3.80	3.64	4.08	3.72	3.88

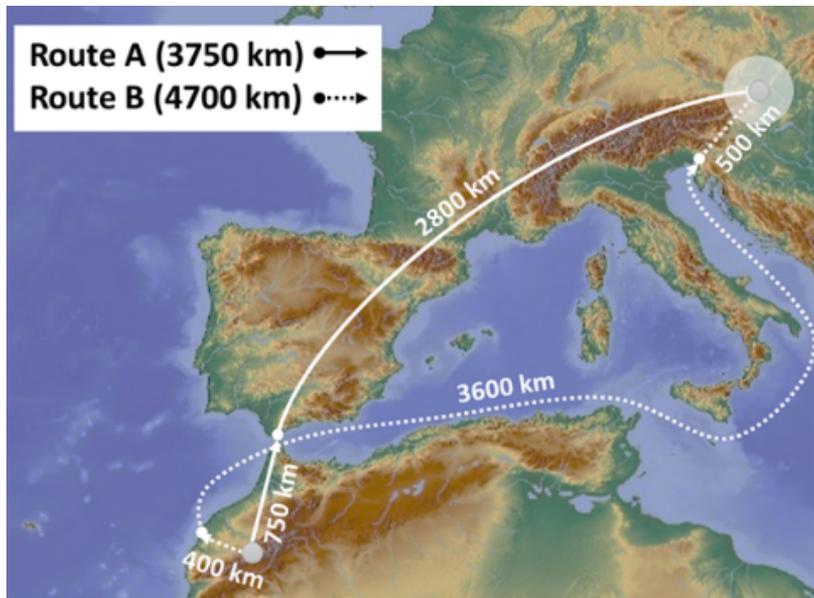


- Hydrogen is allocated by minimizing global supply cost
- Regionalized H<sub>2</sub> supply due to relatively high shipping cost

[1] HEUSER, P.; GRUBE, T.; HEINRICHS, H. et al.: Worldwide Hydrogen Provision Scheme Based on Renewable Energy. In: Preprint 2020, 202002010 (2020)

Das HyCentA hat für die Darstellungen von unterschiedlichen Wasserstofftransportwegen ein Simulationsmodell entwickelt, das zur Identifikation und Effizienzberechnung von Wasserstoffbereitstellungspfaden dient. Es wurde ursprünglich mit Fokus auf mobile Anwendungen erarbeitet, kann jedoch aufgrund des Codeaufbaus für die grundsätzliche Verteilungsanalyse verwendet werden. Der zu untersuchende Bereitstellungspfad wird in Transportabschnitte unterteilt, siehe Abbildung 11, und in eine Excel-Eingabemaske eingelesen. Für jeden Transportabschnitt können verschiedene Transportmöglichkeiten und Energieträger gewählt werden. Das Simulationsmodell berechnet für die ausgewählte Konfiguration alle möglichen Transportvarianten und gibt die effizientesten Pfade in einem Excel-Sheet aus.

Abbildung 11: Darstellung unterschiedlicher Transportwege von Wasserstoff für mobile Anwendungen

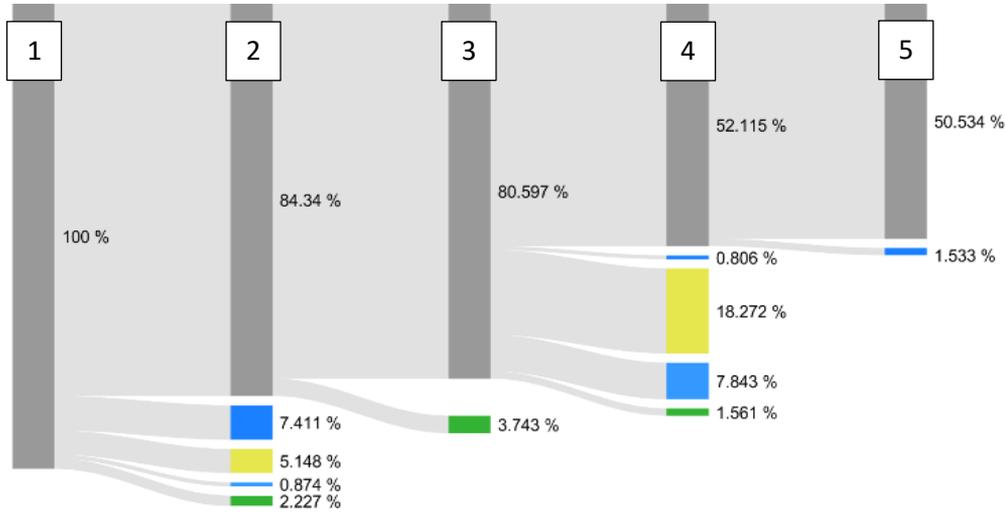


Im Detail können unterschiedliche Eingaben getätigt werden:

- Energieträger am Start: Primärenergie, elektrische Energie oder Wasserstoff (1 bar, 20°C)
- Individuelle Auswahlmöglichkeit von Transportform und Transportsubstanz für jeden Abschnitt
- Unterteilung der Abschnitte in Wandlungsprozessschritte, Konditionierungsprozessschritte und Transportprozessschritte

Das Ergebnis enthält die Berechnung der effizientesten Transportvariante, detaillierte Berechnungsergebnisse für jeden Prozessschritt, ein Sankey-Diagramm mit Wirkungsgraden und Balkendiagramme mit der Reichweite von Fahrzeugen, siehe Abbildung 12. Am Beginn der Analyse, Punkt 1, wird die Ausgangsquelle, hier Wasserstoff, mit 100 % angenommen. Mögliche Herstellungsverluste werden hier nicht berücksichtigt. Wasserstoff wird zuerst komprimiert, dann zu Ammoniak umgewandelt, das wiederum konditioniert und auf einen Truck verladen wird. Punkt 2 zeigt die dadurch entstehenden Verluste mit einem Resultat von 84,34 %. Im nächsten Schritt werden 2 800 km zurückgelegt, wobei hier weitere Energie aufgewendet werden muss und im Punkt 3 80,6 % erreicht werden. Im nächsten Schritt wird aus  $\text{NH}_3$  wieder Wasserstoff gewonnen, der konditioniert und zur Zieltankstelle gebracht wird, was einen Verlust von 28,5 % bedeutet. Der letzte Schritt beinhaltet noch die Abfüllung und Verdichtung des Wasserstoffs am Zielort, wobei am Ende, Punkt 5, eine Effizienz des Transportweges von 50,53 % erreicht wird.

Abbildung 12: Sankey-Diagramm und Berechnungsergebnisse für den Transportweg von Marokko nach Österreich (NH<sub>3</sub> Pfad)



start									
0	start parameter								
substance	amount of Energy [J]	mass [kg]	pressure [Pa]	temperature [K]	voltage [V]				
H2	1	100000	293						
section 1									
1 conditioning									
process step	substance	pressure_in [Pa]	temperature_in [K]	pressure_out [Pa]	temperature_out [K]	mass [kg]	energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
compression	H2			350000.0	293.0	1.0	3602.2	92.589%	92.589%
2 transformation									
substance_in	substance_out	pressure_in [Pa]	temperature_in [K]	pressure_out [Pa]	temperature_out [K]	mass [kg]	energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
H2	NH3			100000.0	240.0	5.6	1102.1	94.440%	87.447%
3 conditioning									
process step	substance	pressure_in [Pa]	temperature_in [K]	pressure_out [Pa]	temperature_out [K]	mass [kg]	energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
conditioning_2	NH3			1000000.0	293.0	5.6	1211.9	93.000%	86.567%
4 distribution									
transport technology	substance	distance [km]	transport variant	pipeline variant			energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
truck_hydrogen	NH3	750.0					4380.3	97.427%	84.340%
overview section 1									
energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency							
16236.435	84.340%	84.340%							
section 2									
1 conditioning									
process step	substance	pressure_in [Pa]	temperature_in [K]	pressure_out [Pa]	temperature_out [K]	mass [kg]	energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
		1000000.0	293.0					100.000%	0.000%
2 transformation									
substance_in	substance_out	pressure_in [Pa]	temperature_in [K]	pressure_out [Pa]	temperature_out [K]	mass [kg]	energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
		0.0	0.0					100.000%	0.000%
3 conditioning									
process step	substance	pressure_in [Pa]	temperature_in [K]	pressure_out [Pa]	temperature_out [K]	mass [kg]	energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
		0.0	0.0					100.000%	0.000%
4 distribution									
transport technology	substance	distance [km]	transport variant	pipeline variant			energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
train_electric	NH3	2800.0					5571.3	95.562%	80.597%
overview section 2									
energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency							
5571.258	95.562%	80.597%							
section 3									
1 conditioning									
process step	substance	pressure_in [Pa]	temperature_in [K]	pressure_out [Pa]	temperature_out [K]	mass [kg]	energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
conditioning_1	NH3			100000.0	240.0	5.6	1211.8	93.000%	79.797%
2 transformation									
substance_in	substance_out	pressure_in [Pa]	temperature_in [K]	pressure_out [Pa]	temperature_out [K]	mass [kg]	energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
NH3	H2			100000.0	293.0	0.9	35633.7	77.100%	61.579%
3 conditioning									
process step	substance	pressure_in [Pa]	temperature_in [K]	pressure_out [Pa]	temperature_out [K]	mass [kg]	energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
compression	H2			5000000.0	293.0	0.9	15806.4	87.252%	53.678%
4 distribution									
transport technology	substance	distance [km]	transport variant	pipeline variant			energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
truck_hydrogen	H2	200.0	v500bar				19400.5	97.091%	52.115%
overview section 3									
energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency							
72052.433	64.667%	52.115%							
section 4									
1 conditioning									
process step	substance	pressure_in [Pa]	temperature_in [K]	pressure_out [Pa]	temperature_out [K]	mass [kg]	energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
filling	H2			50000000.0	293.0	70000000.0	3752.5	96.967%	50.534%
2 transformation									
substance_in	substance_out	pressure_in [Pa]	temperature_in [K]	pressure_out [Pa]	temperature_out [K]	mass [kg]	energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
								100.000%	50.534%
3 conditioning									
process step	substance	pressure_in [Pa]	temperature_in [K]	pressure_out [Pa]	temperature_out [K]	mass [kg]	energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
								100.000%	50.534%
4 distribution									
transport technology	substance	distance [km]	transport variant	pipeline variant			energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency
								100.000%	50.534%
overview section 4									
energy consumption [J]	partial efficiency	total efficiency							
3752.454	96.967%	50.534%							

Im Zuge des internationalen Austausches und in Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich wird eine Veröffentlichung in diesem Bereich angestrebt.

Die Thematik der **zentralen und dezentralen Wasserstoffinfrastruktur** wird in vielen Bereichen aufgefasst. Umfassende Beispiele inklusive mögliche Wasserstoff-Speicherungstechnologien werden in der Veröffentlichung „Renewable Hydrogen: Modular Concepts from Production over Storage to the Consumer“ diskutiert. Besonders der modulare Ansatz von Wasserstoff-Infrastrukturen kann zu einer raschen Implementierung und einer schnelleren Kostenreduktion von Komponenten führen.<sup>x</sup>

In Zukunft wird sich eine globale Wasserstoffwirtschaft etablieren, da es schwer möglich sein wird, Angebot und Nachfrage an einem Platz zu decken. Wie bereits gezeigt, wird der Bedarf mit den Kapazitäten der Erzeugung vor Ort und Importen aus aller Welt befriedigt werden müssen. Dies schließt an den bereits bestehenden internationalen Energiehandel an.

**Bereich drei** enthält wesentliche Erkenntnisse zu der Technologie Validierung, besonders im Bereich leichte und schwere Nutzfahrzeuge sowie Busse.

Durch den internationalen Austausch im Annex konnten bereits viele Beispiele für Brennstoffzellenantriebe bei Bussen, LKW und Zügen gesammelt werden, siehe Abbildung 13.

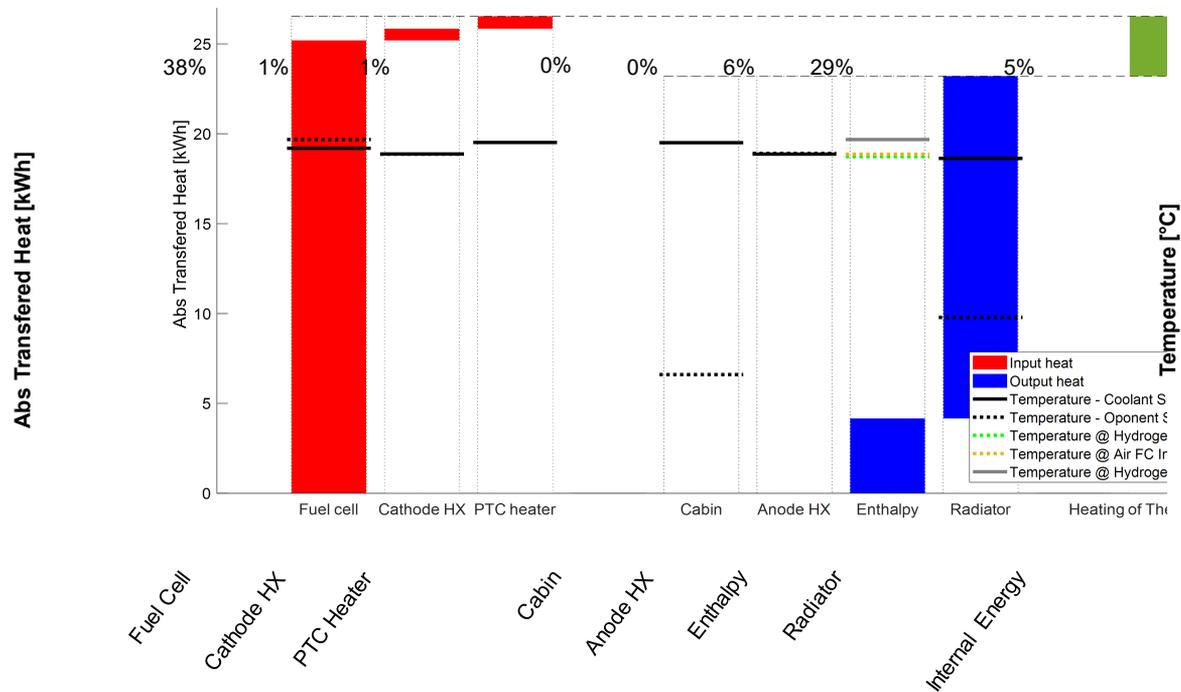
Abbildung 13: Beispiele für BZ-Anwendungen in LKW (links), Bussen (Mitte) und Zügen (rechts)



Speziell das Thermalmanagement bei **schweren Nutzfahrzeugen** stellt die Entwicklung vor eine Herausforderung. Im Zuge einer Masterarbeit am HyCentA wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das mögliche Optimierungspotentiale aufzeigt. Als Beispiel wurde das Wärmemanagementsystem eines brennstoffzellenbetriebenen LKW analysiert. Der betrachtete LKW hat ein maximales Fahrzeuggewicht von 40 t, eine Antriebsleistung von 275 kW und ist für eine Reichweite von 800 - 1000 km ausgelegt.

Eine Analyse der Wärmequellen und -senken des Brennstoffzellen-Kühlkreislaufs während des transienten Betriebs ist in Abbildung 14 dargestellt.

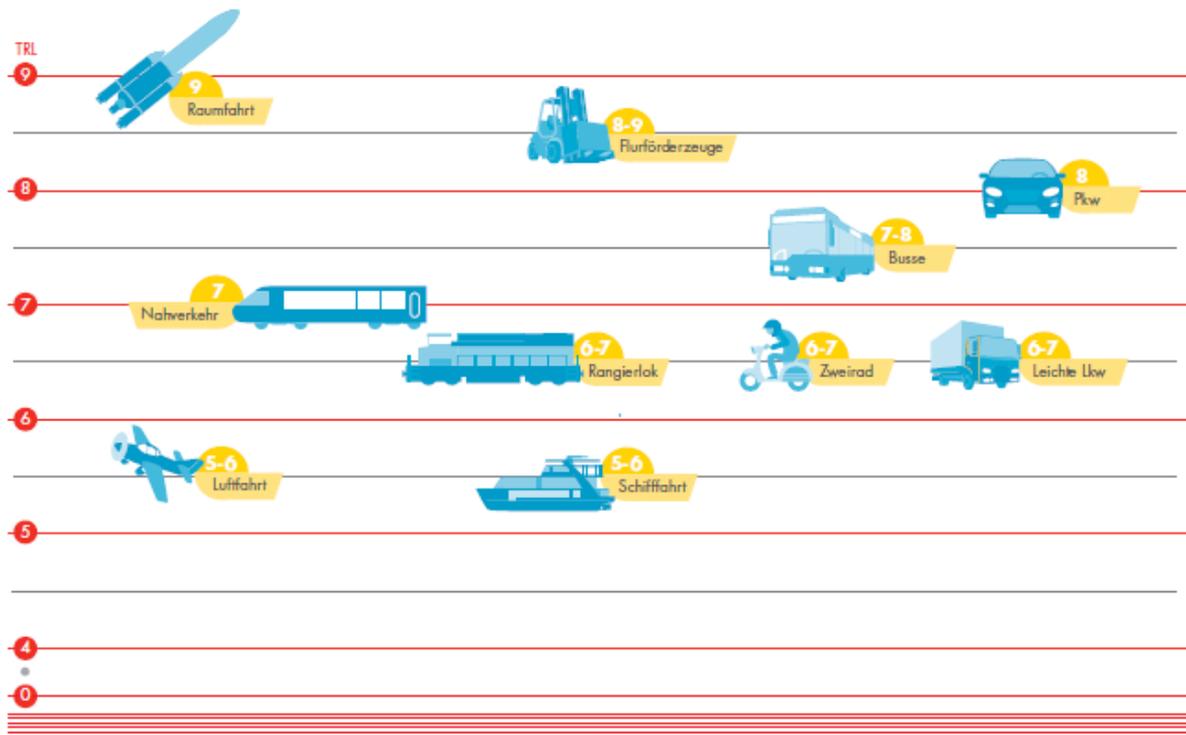
Abbildung 14: Analyse der unterschiedlichen Wärmequellen und -senken des Brennstoffzellenkühlkreislaufs eines schweren Nutzfahrzeugs



Die Wärmezufuhr und -abfuhr sowie die Änderung der inneren Energie sind als Säulen dargestellt. Die Säulen stellen den kumulierten Absolutwert der jeweils übertragenen Wärme während des World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC) für schwere Nutzfahrzeuge bei 30 °C Umgebungstemperatur dar. Zusätzlich wird das durchschnittliche Temperaturniveau des Kühlmittels und der jeweiligen Gegenseite der Wärmeübertragung, z.B. Wasserstoff, Luft oder Brennstoffzellenmasse, dargestellt. Die prozentualen Angaben über den Spalten stellen den Anteil der jeweils übertragenen Wärme an das Kühlmittel bzw. vom Kühlmittel in Prozent der zugeführten Brennstoffwärme dar. 29 % der Brennstoffwärme werden über den Kühler abgeführt. Die Enthalpieänderung der Reaktanten zwischen Brennstoffzelleneinlass und -auslass beträgt 6 % der Brennstoffwärme. Bei 30 °C Umgebungstemperatur findet kein Wärmeübergang in die Kabine statt. Die im Kathoden- und Anodenwärmetauscher übertragene Wärme sowie die vom PTC-Heizer während des Aufwärmprozesses gelieferte Wärme sind in dem dargestellten Szenario vernachlässigbar. Diese und weitere Erkenntnisse wurden in der Veröffentlichung „Efficiency Potentials of Fuel Cell Propulsion Systems“ im Detail diskutiert.<sup>xi</sup>

Brennstoffzellensystem und Speichertechnologien in Bussen werden bereits seit Jahren eingesetzt und haben im Vergleich mit anderen Mobilitätsanwendungen die höchste technische Reifestufe. Seit Anfang der 1990er Jahre wurden und werden weltweit – vor allem in Nordamerika, Europa sowie zunehmend auch in Asien – mehrere hundert Busse mit Wasserstoff betrieben. Abbildung 15 gibt einen Überblick über die einzelnen Anwendungen und ihren Reifegrad (TRL – Technology Readiness Level). 12 Meter Busse sind bereits am Markt etabliert, es gibt allerdings auch erste Busse mit 18 Meter Fahrzeuginnenlänge und zusätzlich folgen Busse mit 24 Meter Länge. Der Vorteil von Brennstoffzellen-Bussen ist die Möglichkeit, durch die Abwärme der Brennstoffzelle besonders effizient den Innenraum heizen zu können.

Abbildung 15: Technology Readiness Level, TRL, verschiedener mobiler Anwendungen von Brennstoffzellensystem<sup>xii</sup>



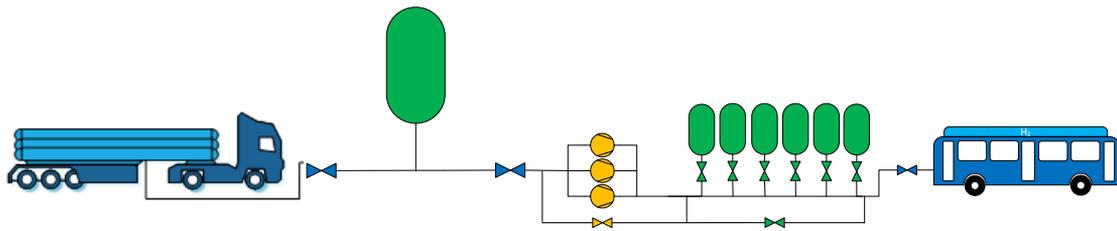
Das Projekt move2zero, gefördert im Rahmen des Programms „Zero Emission Mobility“ des Klima- und Energiefonds, beschäftigt sich mit der ganzheitlichen Dekarbonisierung des städtischen Bustransportsystems in Graz. Die Busflotte der Holding Graz besteht derzeit aus ungefähr 170 Bussen, wobei ca. ein Drittel 12-Meter-Busse und der Rest 18-Meter-Busse sind. Die durchschnittliche tägliche Fahrstrecke an Werktagen beträgt 165 km bei insgesamt 207 Buszyklen. Die maximale Fahrleistung beträgt etwa 415 km. In einer ersten Phase soll eine Demonstrationsflotte von sieben Brennstoffzellen-Bussen eingeführt werden.

Zusätzlich zur Umstellung der Busflotte ist auch eine detaillierte Betrachtung der Wasserstoff-Versorgungsinfrastruktur notwendig um das am besten geeignete Konzept für die Umsetzung wählen zu können. Je nach Anforderung kann grüner Wasserstoff mittels Elektrolyse vor Ort produziert oder per Trailer angeliefert werden. Verschiedene Szenarien wurden konzeptioniert und bewertet. Eine Möglichkeit den grünen Wasserstoff aus der Nähe von Graz zu beziehen wäre das Projekt "Renewable Gasfield". Im Rahmen dieses Forschungsprojektes errichtet die Energie Steiermark in Gabersdorf eine 1 MW PEM-Elektrolyseur-Anlage zur Erzeugung von grünem Wasserstoff aus zertifiziertem Grünstrom. Die Anlage produziert unter Volllast 210 Nm<sup>3</sup> (ca. 19 kg) pro Stunde und könnte auf 420 Nm<sup>3</sup> pro Stunde erweitert werden, sobald die Wasserstoffmenge für die move2zero-Flotte benötigt wird. Der produzierte Wasserstoff wird mit einem Druck von 300 bar in Wechselbehälter abgefüllt und per Trailer nach Graz geliefert.

Der wöchentliche Bedarf an Wasserstoff für die Demonstrationsflotte wurde mit max. 1 158 kg berechnet, der als Grundlage für die Auslegung der Wasserstoff-Tankstelle dient. Abhängig von den am Markt verfügbaren Trailern und Containern wurden unterschiedliche Konzepte beispielsweise mit und ohne Feuerschutzwand erarbeitet.

Um eine Entscheidung treffen zu können wurde eine Nutz-Wert-Analyse durchgeführt. Diese Art der Bewertung ergab als am besten geeignete Lösung das Konzept mit einem Niederdruckspeicher und einem Anhänger vor Ort. Durch die zusätzliche Lagerung der Trailer und die Betankung durch Überströmen aus den Trailern kann die Energieeffizienz der Wasserstoffinfrastruktur deutlich gesteigert werden. Das Niederdruckspeichersystem bietet zudem eine höhere Sicherheit bei einer unterbrochenen Wasserstoffversorgung, was ein wesentliches Kriterium für die Demonstrationsphase der Brennstoffzellenbusse ist. In Abbildung 16 ist ein Ablaufdiagramm des HRS-Konzepts für die Demophase dargestellt.

Abbildung 16: Konzept für Wasserstoffinfrastruktur mit Trailer und Niederdruckspeicher

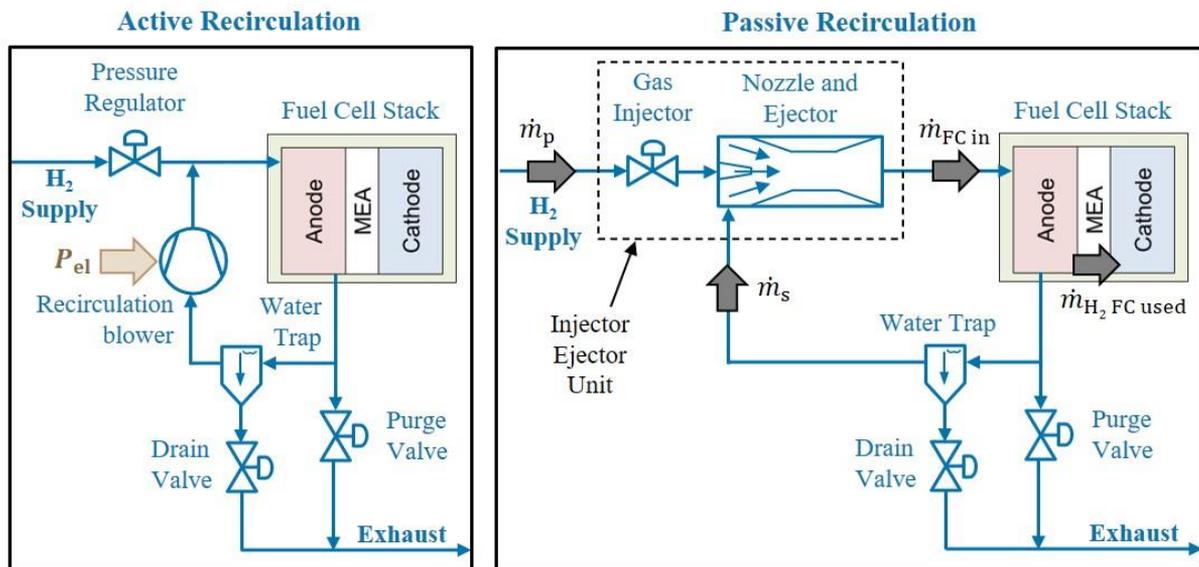


Das Ausschreibungsverfahren für die Wasserstoff-Infrastruktur beginnt im September 2022, die Genehmigungseinreichung ist anschließend für Mitte 2023 geplant um den Baubeginn Ende 23/Anfang 24 starten zu können.

Um die Dekarbonisierung schneller durchführen zu können, müssen auch die **Brennstoffzellensysteme** im mobilen Bereich effizienter und kostengünstiger gestaltet werden. Am HyCentA werden dafür spezifische Subsysteme und Komponenten evaluiert und Optimierungspotentiale aufgezeigt. Vor allem bei der Auslegung von Brennstoffzellensystemen können unterschiedliche Konzepte verfolgt werden.

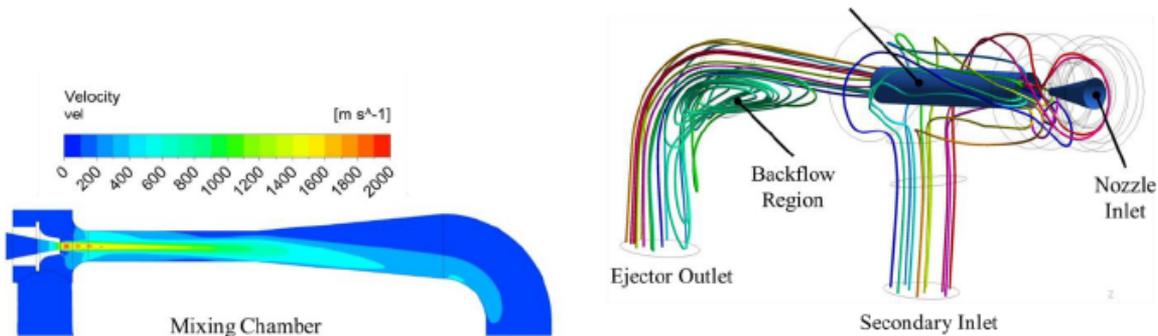
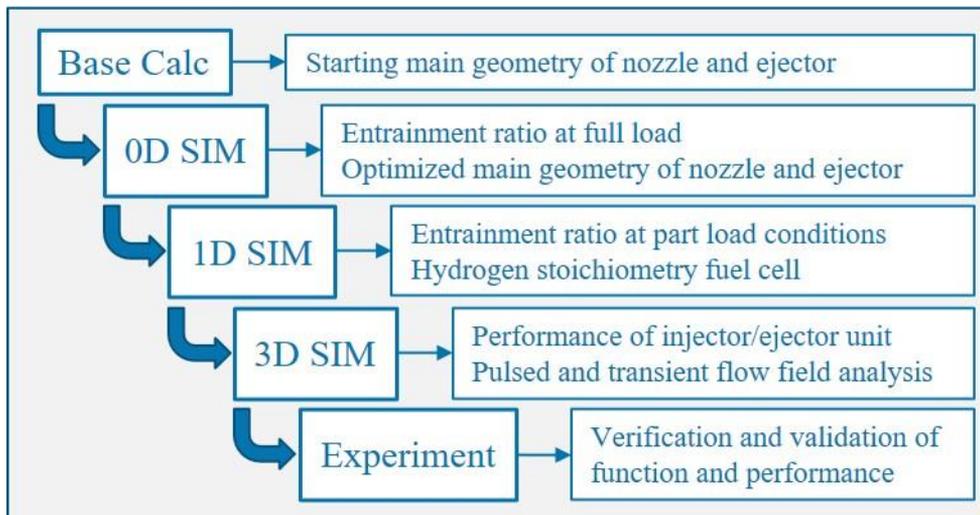
Das **Anodensubsystem** von PEM-Brennstoffzellensystemen muss unter allen Betriebsbedingungen Wasserstoff im erforderlichen Temperatur-, Druck-, Massenstrom- und Konzentrationsbereich bereitstellen um eine reibungslose Funktion der Brennstoffzelle garantieren zu können. Derzeit stellen mehrere Komponenten wie Ventile, Sensoren und eine Rezirkulationspumpe (aktive Rezirkulation) die Versorgung sicher, was eine erhebliche Menge an Energie verbraucht und den Gesamtwirkungsgrad verringert. Die passive Rezirkulation mit einer gepulsten Injektor-Ejektor-Einheit ist ein vielversprechender Ansatz, um die erforderliche Versorgung bei geringem Energieverbrauch zu gewährleisten, siehe Abbildung 17.

Abbildung 17: Vergleich von aktiver und passiver Rezirkulation im Anodensubsystem eines mobilen Brennstoffzellensystems



Allerdings ist ein hoher Entwicklungsaufwand erforderlich, um einen Injektor-Ejektor für den gesamten Betriebsbereich zu entwerfen und zu optimieren. Am HyCentA wurde eine neuartige Entwicklungs-Toolchain entwickelt, die aus Simulationsmodellen und experimenteller Validierung besteht, siehe Abbildung 18. Die Ergebnisse wurden im folgenden Beitrag veröffentlicht: Singer Gerald, Gappmayer Gregor, Macherhammer Marie-Gabrielle, Pertl Patrick, Trattner Alexander: A development toolchain for a pulsed injector-ejector unit for PEM fuel cell applications, International Journal of Hydrogen Energy, 2022, Volume 47, p.23818 – 23832.

Abbildung 18: Entwicklungs-Toolchain für ein Injektor-Ejektor System (oben) und Simulationsergebnisse der 3D CFD-Strömungssimulation (unten)



Diese Toolchain ermöglicht eine genaue Konstruktion und Optimierung von Injektor-Ejektor-Einheiten und spart Entwicklungszeit und -kosten.<sup>xiii</sup>

**Bereich vier behandelt Wirtschaftlichkeitsanalysen von Brennstoffzellensystemen in Kraftfahrzeugen sowie der Wasserstoffproduktion.**

Um das Thema Wasserstoff als Ganzes beim Endverbraucher zu etablieren und die Vorteile einer durchgehenden Wertschöpfungskette deutlich zu machen, muss vor allem die Wirtschaftlichkeit gegeben sein. Hierbei muss das gesamte Energiesystem betrachtet werden. Die Möglichkeiten zur Umstellung wurden in der Veröffentlichung „Sustainable hydrogen society – Vision, findings and development of a hydrogen economy using the example of Austria“<sup>xiv</sup> vorgestellt. Die Studie stellt die Grüne Energierevolution zur Diskussion. Grüne Energierevolution bedeutet den vollständigen Wechsel von fossilen zu grünen Primärenergiequellen wie Sonne, Wind, Wasser, Umweltwärme und Biomasse. Dies ist notwendig um eine grüne Wasserstoffgesellschaft implementieren zu können, wobei grüner Strom und grüner Wasserstoff in allen Bereichen von Mobilität, Industrie, Haushalt und Energiedienstleistungen zum Einsatz kommt, siehe Abbildung 19.

Abbildung 19: Vision einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft



Erneuerbare Energien bieten eine grüne Zukunft und sind in Kombination mit elektrochemischen Maschinen wie Elektrolyseuren, Batterien und Brennstoffzellen in der Lage höhere Wirkungsgrade und Null-Emissionen zu erreichen.

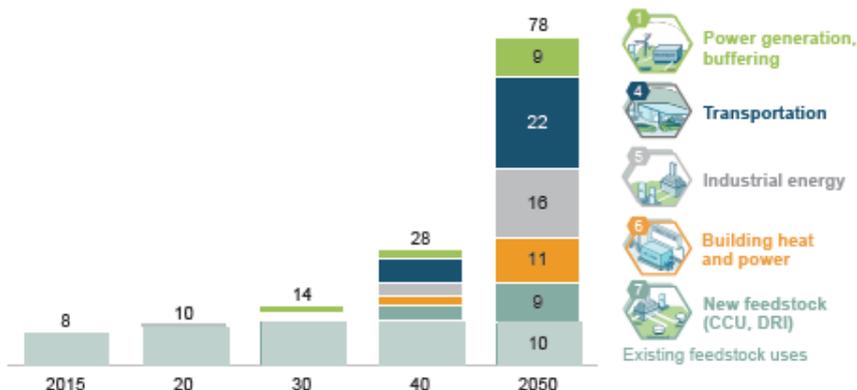
Zusätzlich geht es bei dieser Umstellung nicht nur um den Ersatz von Brennstoffen, sondern um den Übergang zu einem anderen System mit entsprechenden politischen, technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Umwälzungen. Wasserstoff, das bisher fehlende Teil des Puzzles der sauberen Energie, wird die Wertschöpfungsketten im Energiesektor in den kommenden Jahren wahrscheinlich weiter umgestalten. Das 1,5°C-Szenario von IRENA sieht vor, dass sauberer Wasserstoff bis zum Jahr 2050 bis zu 12 % des Endenergieverbrauchs decken könnte. Der größte Teil davon würde aus erneuerbaren Energien erzeugt, der Rest aus Gas und Kohlenstoffabscheidung und -speicherung.<sup>xv</sup>

Das Hydrogen Council sieht das Potential, die Menge des benötigten Wasserstoffs bis 2050 zu verzehnfachen, siehe Abbildung 20.<sup>xvi</sup>

Abbildung 20: Wasserstoffnachfrage in 2050.

**Exhibit 5: Hydrogen demand could increase 10-fold by 2050**

Global energy demand supplied with hydrogen, EJ



SOURCE: Hydrogen Council

So hoch dieses Wachstumspotential auch ist, entscheidend sind nun Tätigkeiten, die das Upscaling vorantreiben und die Technologien auf dem Markt verfügbar machen. Zeitnahes Handeln ist unumgänglich um die Umsetzung zu einem erneuerbaren Energiesystem zu erreichen.

Auch für die Beschäftigung in Österreich ermöglicht die Implementierung von Wasserstoff ein **Wachstum**. In der Impaktanalyse des Wirtschaftsinstituts Economica<sup>xvii</sup> werden folgende Beschäftigungszahlen kolportiert: Durch Investitionen in den Bau von Elektrolyseanlagen können in der Dekade von 2020 bis 2030 unmittelbar 2.282 Beschäftigungsverhältnisse (in VZÄ) geschaffen bzw. abgesichert werden. Der Gesamteffekt an Beschäftigten (VZÄ) beläuft sich auf 4.791 und setzt sich wie folgt zusammen:

- Direkter Beschäftigungseffekt: 2.282
- Indirekter Beschäftigungseffekt (in Zulieferbetrieben): 1.650
- Induzierter Beschäftigungseffekt (Einkommenseffekte): 859.

Auch für die Zulieferindustrie in der **Automobilbranche** wird die Umstellung der Mobilität essentiell. Mit einem Produktionswert von 25,2 Milliarden Euro sichert die Branche der Automotiven Zulieferindustrie über 193.000 Jobs. Dies führt zu gesamtwirtschaftlichen Effekten in der Höhe von 42,8 Milliarden Euro und 81.700 direkte Jobs, indirekt sichert die Branche über 193.000 Arbeitsplätze.<sup>xviii</sup> Ein frühzeitiger Umstieg auf neue Antriebstechnologien wie batterieelektrische oder brennstoffzellenbasierte Antriebe ist notwendig, um diesen Wirtschaftszweig wettbewerbsfähig zu gestalten.

# 6 Vernetzung und Ergebnistransfer

Wasserstoff als zukünftiger erneuerbarer Sekundärenergieträger ist bereits in der breiten Öffentlichkeit angekommen. Im Zuge des IEA AFC Annex 34 wird ein Wissensaustausch auf mehreren Ebenen verfolgt:

- a) Austausch innerhalb des Annexes
- b) Austausch in der wissenschaftlichen Community
- c) Austausch mit österreichischen Clusterorganisationen, Stakeholdern der Politik und Industrie
- d) Austausch mit der breiten Bevölkerung und Ausbildung von Fachkräften

- a) Vernetzung innerhalb des Annex 34: Brennstoffzellen für Transportanwendungen im Bereich Fortgeschrittene Brennstoffzellen

Eine Umstellung des Energiesystems auf Basis der Wasserstoffwirtschaft kann nur in einem grenzübergreifenden Ansatz geschehen, der sowohl regionale, über-regionale und globale Zusammenhänge berücksichtigt. Durch die Pandemie konnten jedoch Meetings in den vergangenen Jahren nur online durchgeführt werden. Obwohl erfreuliche Ergebnisse in der Zusammenarbeit erzielt werden konnten, ermöglicht ein Vor-Ort Treffen zusätzliche Initiativen und Gespräche. Die Arbeit mit den Projektpartner\*Innen im Annex ermöglichte während der Projektlaufzeit Synergien zu nutzen und gemeinsame Weiterentwicklungen zu beginnen. Beispielsweise konnten eine durchgeführte Benchmark-Analyse des Toyota Mirai des Argonne National Laboratory positiv zur wissenschaftlich neutralen Diskussion im Bereich Effizienz von mobilen Anwendungen für Brennstoffzellensysteme beitragen. Zusätzlich konnte eine Forschungsk Kooperation von HyCentA und Forschungszentrum Jülich im COMET Programm begonnen werden. Weitere vielversprechende Kooperationskontakte konnten etabliert werden.

- b) Austausch in der wissenschaftlichen Gesellschaft

Die bereits in Kapitel 5 aufgezählten Veröffentlichungen zeigen deutlich, dass das HyCentA an einem Wissenstransfer innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinde stark interessiert ist. Über Veröffentlichungen können gezielter wissenschaftliche Erkenntnisse einer breiten Gemeinschaft zur Verfügung gestellt werden. Das HyCentA bemüht sich, möglichst viele Publikationen open access zu veröffentlichen und somit einen unbeschränkten Zugang zu gewähren.

Zusätzlich dazu sind wissenschaftliche Konferenzen eine gute Basis, neue Kontakte zu knüpfen und Synergien zu identifizieren. Im Zuge der Verbreitung von Erkenntnissen wurden während der Projektlaufzeit nationale und internationale Vorträge von HyCentA Mitarbeitenden gehalten, wie beispielsweise der Vortrag „Methodical Approach for the Evaluation of Hydrogen Fuel Cell Powertrain Concepts for Mobility Applications“ auf der Canadian Hydrogen Convention 04/2022.

- c) Zusammenarbeit und Austausch mit österreichischen Clusterorganisationen, Stakeholdern der Politik und Industrie

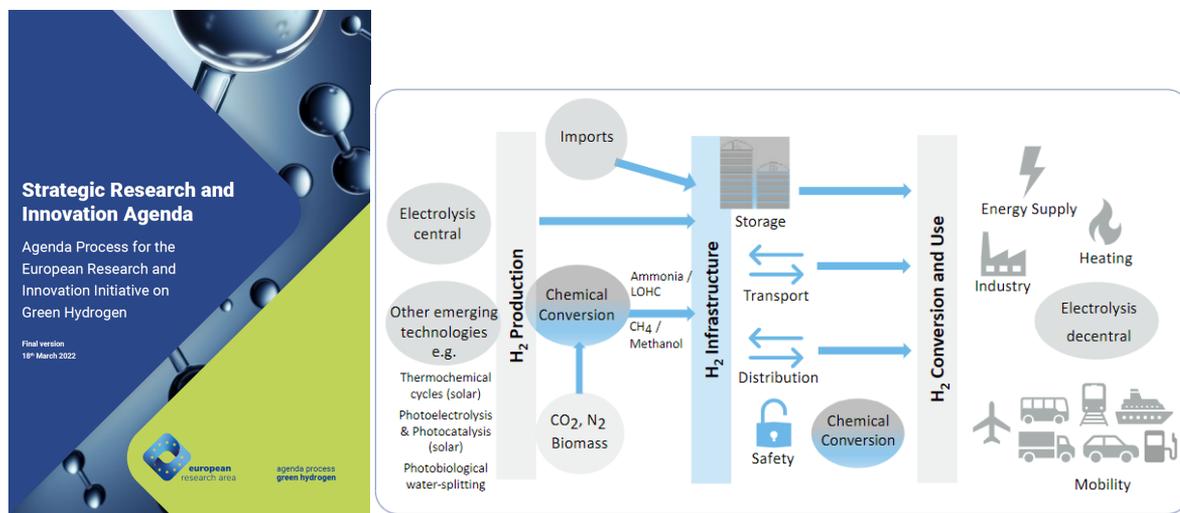
Die Wasserstoffinitiative Vorzeigeregion Österreich Power und Gas hat durch ihre nationale und internationale Vernetzung die Möglichkeit, die Erkenntnisse aus laufenden Projekten zur Verfügung zu stellen. Da in Österreich bereits Demonstrationsprojekte erfolgreich abgeschlossen wurden, konnte bereits viel Erfahrung aus realen Anwendungsszenarien gesammelt werden. Dies ist neben Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten essentiell, um Technologien marktreif zu machen. Das HyCentA als Gründungsmitglied fördert sowohl den Austausch von außen in die WIVA P&G als auch die Möglichkeit, Erkenntnisse aus der Projektlandschaft der Vorzeigeregion nach außen zu tragen.

Die A3PS, Austrian Association for Advanced Propulsion Systems, bietet mit ihren unterschiedlichen Arbeitsgruppen speziell der Wasserstoff-Mobilität eine Plattform zum Austausch zwischen Forschung und Entwicklung und Industrie.

Beide Vereine stellen ihre Arbeiten und daraus gezogene Empfehlung in Form von Positionspapieren der breiten Öffentlichkeit zu Verfügung. Diese sollen auch Entscheidungsträgern und Stakeholdern in der Politik dazu verhelfen, eine breite Wissensbasis aufzubauen. Zusätzlich dazu wurden vom HyCentA in Zusammenarbeit mit dem Projektmitgliedern ein Maßnahmenkatalog erstellt, der der Politik bereits Vorschläge für die Umsetzung liefert.

Bei der Entwicklung der „Strategic Research and Innovation Agenda“ wurde der Fokus speziell auf die Europäische Forschungs- und Innovationsinitiative für grünem Wasserstoff gelegt. Unter Mitwirkung des HyCentA wurden in dieser Agenda die wichtigsten Forschungsbedarfe und Handlungsfelder für die Umsetzung einer Wasserstoffwirtschaft basierend auf grünem Wasserstoff dargestellt, siehe Abbildung 21.<sup>xix</sup>

Abbildung 21: Strategic Research and Innovation Agenda (links) und Wertschöpfungskette von grünem Wasserstoff (recht)



#### d) Austausch mit der breiten Bevölkerung und Ausbildung von Fachkräften

Um auch andere Städte und Gemeinden an den Ergebnissen teilhaben zu lassen, muss vor allem ein Weg über die öffentlichen Einrichtungen gefunden werden. Das HyCentA nimmt den Auftrag zur Schulung der Allgemeinheit regelmäßig wahr und bemüht sich um einen regen Austausch mit unterschiedlichen verantwortlichen Personen. Beispielsweise werden erneuerbare Energiekonzepte in Form von Workshops oder Studien verfasst und unterschiedliche Möglichkeiten der Umstellung

des lokalen Energiekonzeptes aufgezeigt. Zusätzlich besteht auch die Möglichkeit, die häufig genutzt wird, die Forschungsinfrastruktur des HyCentA zu besichtigen und neue Technologien live zu erleben.

Als universitätsnahe Forschungseinrichtung unterstützt das HyCentA auch die Ausbildung von zukünftigen Fachkräften durch Lehre an der Technischen Universität Graz sowie Betreuung von Bachelor-, Master- und Doktorarbeiten.

# 7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

In Österreich gibt es bereits seit Jahren führende Kompetenz in der Wasserstoffforschung. Obwohl hier viel Knowhow und Prototypen sowie Demonstrationsprojekte entwickelt wurde, wurden bisher wenige österreichische Technologien bis zur Markteinführung gebracht. Die österreichische Regierung muss sich zum Ziel setzen, einerseits den Fokus auf Wasserstoff und Technologieentwicklung zu erhöhen und andererseits Maßnahmen setzen, schnell und effizient Produkte auf den Markt zu bringen, um die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen zuerst zu reduzieren und bis 2040 zu eliminieren.

Da die Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Quellen für Österreich keine rein nationale Herausforderung ist, ist eine internationale Zusammenarbeit auf diesem Gebiet essentiell. Mit Wasserstoff kann die Problematik der saisonalen Energiespeicherung gelöst werden. Österreich hat mit seinen bereits jetzt hohen Gasspeicherkapazitäten die Chance, hier schnell und langfristig Wasserstoff in großen Mengen speichern zu können. Eine Umsetzung wird in Europa und auf internationaler Ebene nur unter Zusammenarbeit funktionieren, da der Ausbau der erneuerbaren Energiequellen und damit die Möglichkeit grünen Wasserstoff zu produzieren in manchen Ländern einfacher umzusetzen sein wird. Deshalb werden Wasserstoffimporte und -exporte zukünftig genauso Teil unserer Energiewirtschaft sein wie heute Strom- und Gasimporte und -exporte.

Basierend auf den bisher erarbeiteten Ergebnissen im Annex 34 konnten bereits einige Kooperationen initiiert werden. Diese und die Vernetzung mit bestehenden und neuen Mitgliedern kann nun in der nachfolgenden Periode weitergeführt werden, da bereits ein Nachfolgeprojekt begonnen hat. Die Arbeit mit den Projektmitgliedern führte zu fruchtbaren Diskussionen und einem regen Austausch unter Miteinbezug der jeweiligen nationalen Wasserstoffstrategien.

Die Österreichische Wasserstoffstrategie<sup>xx</sup> sieht die Anwendung von klimaneutralem Wasserstoff sehr differenziert und vor allem im Bereich der Industrie, wie beispielsweise der Stahlproduktion. International wird aber der Einsatz von Wasserstoff gerade für den ÖPNV und die Bewältigung von langen Strecken mit hohen Lasten beispielsweise im Schwerkverkehr als wichtige Säule für die Dekarbonisierung im Transportsektor gesehen. Gerade auch wenn man bedenkt, dass PKW immer schwerer werden und SUVs derzeit und zukünftig auf dem Vormarsch sind, kann Wasserstoff auch im Individualverkehr eine Rolle spielen. Gleichzeitig mit dem Vorantreiben der Wasserstoff-Mobilität muss auch die Betankungsinfrastruktur aufgebaut werden. Durch den gezielten **Ausbau der Wasserstoff-Tankstellen Infrastruktur** wird der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft beschleunigt, gleichzeitig wird gewährleistet, dass der erneuerbare Wasserstoff abnahmeseitig nicht ins Hintertreffen gerät. Die Abgeordneten des Europäischen Parlaments haben dafür gestimmt, die ehrgeizigen Ziele, die der Verkehrsausschuss des Europäischen Parlaments in der Verordnung über die Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) festgelegt hat, beizubehalten. Eine maximale Entfernung von 100 km zwischen den einzelnen Wasserstofftankstellen, sowohl entlang des Kernnetzes als auch des umfassenden TEN-T-Netzes, bedeutet, dass bis zum Aufbau der Infrastruktur Ende 2027 bis zu 1.780 Wasserstofftankstellen in ganz Europa zur Verfügung stehen sollen, die bis zu

1 Million Tonnen Wasserstoff pro Jahr liefern, ausreichend für den Antrieb von bis zu 59.000 Lkw (bei einer Annahme von 60 kg/Lkw pro Tag). Ein Umsetzungsplan in Österreich fehlt bis dato.

Gerade in Österreich ließe sich ein flächendeckendes Tankstellennetz leicht umsetzen. Durch 36 zusätzliche Tankstellen an neuralgischen Verkehrsknotenpunkten und in Ballungszentren könnten 126 000 PKW oder 4150 Busse/LKW und 12 000 PKW bedient werden, siehe Abbildung 22.

Abbildung 22: Vorgeschlagenes Wasserstofftankstellennetz für Österreich; Tankstelle L hat eine Kapazität von 2 500 kgH<sub>2</sub>/Tag, Tankstelle S 212 kgH<sub>2</sub>/Tag



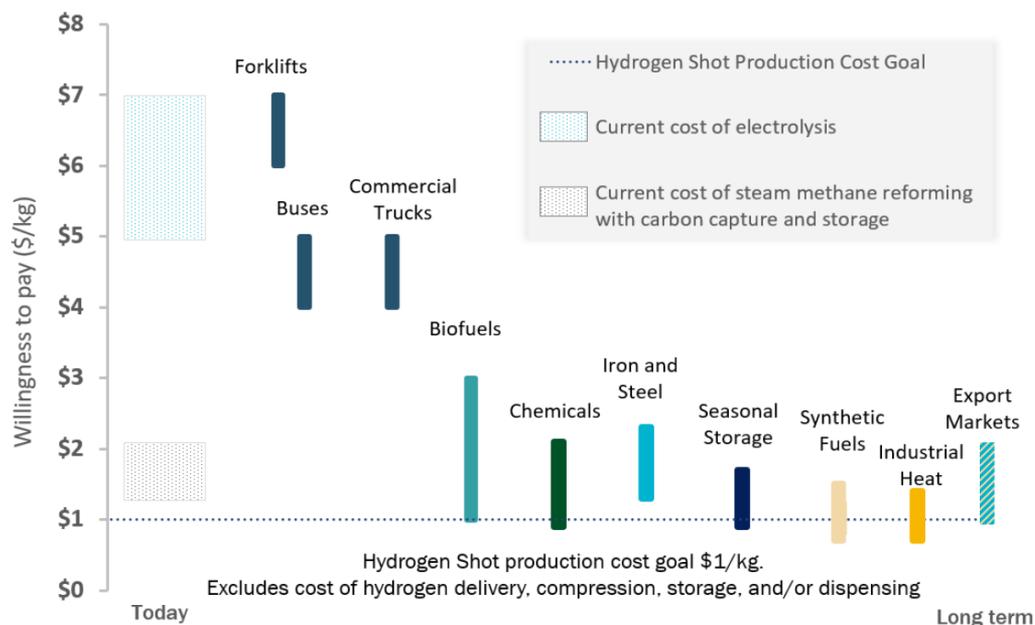
Durch die dichtere Tankinfrastruktur wird eine schnelle und erleichterte Umrüstung von Fahrzeugflotten ermöglicht. Weiteres können dadurch die Clean Vehicle Directive und die zukünftige Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR) konsequent erfüllt werden. Ein Best Practice Projekt ist „H2.Live“ aus Deutschland, das Echtzeitinformationen über den aktuellen Status aller öffentlichen Wasserstofftankstellen in Deutschland liefert.

Mit Hilfe einer **CAPEX Förderung von Tankstellen-Infrastruktur und Elektrolyseanlagen** werden Investitionen in diesem Bereich für die Wirtschaft attraktiver und profitabel, gleichzeitig das Henne-Ei-Problem gelöst. Diese Maßnahme ist erst der Schlüssel zur Realisierung des vorgeschlagenen Ausbaus der Tankstellen-Infrastruktur für Wasserstoff-Fahrzeuge. Als Best Practice Beispiel ist hier Japan zu nennen, die seit 2017 massiv den Ausbau von Wasserstoff-Infrastruktur und Fahrzeugen fördert.

Laut österreichischer Wasserstoffstrategie soll Wasserstoff besonders in jenen Bereichen eingesetzt werden, die einen hohen Bedarf an thermischer Energie aufweisen, sowie in Anwendungen, bei denen die Möglichkeiten der Elektrifizierung begrenzt sind (Chemische Industrie, Stahlindustrie, Flugverkehr, Schiffsverkehr, Spitzenausgleich für volatile erneuerbare Energien). Damit grüner Wasserstoff langfristig jedoch auf dem Markt wettbewerbsfähig ist, muss er unter dem Preisniveau der Energieträger verfügbar sein, die er in den einzelnen Sektoren ersetzen würde. Daher sollte eine **kostenbasierte Sichtweise** bevorzugt werden. Abbildung 23 zeigt die Preisspanne, in der Wasserstoff in verschiedenen Anwendungsbereichen gegenüber den etablierten Kraftstoffen (wie Diesel, Erdgas

oder Kohle) wettbewerbsfähig wäre, sowie den ungefähren Zeitrahmen, in dem eine groß angelegte Einführung von sauberem Wasserstoff in jedem Sektor zu erwarten ist. Die "Zahlungsbereitschaft" für jede Anwendung spiegelt den Gesamtpreis wider, zu dem Wasserstoff für den Endverbraucher verfügbar sein muss, einschließlich der Kosten für Produktion, Verteilung und zusätzliche Aufbereitung vor Ort, wie Verdichtung, Speicherung und Abgabe.

Abbildung 23: Die Zahlungsbereitschaft bzw. der Schwellenpreis für sauberen Wasserstoff in mehreren aktuellen und neu entstehenden Sektoren (einschließlich Produktion, Lieferung und Aufbereitung vor Ort, wie zusätzliche Verdichtung, Abfüllung, Kühlung und/oder Abgabe)<sup>xxi</sup>



Durch eine erhöhte **Förderung von Wasserstoff-Fahrzeugen** kann die Transformation von Fahrzeugen und -flotten (Bus, LKW, PKW) auf Brennstoffzellenantrieb vorangetrieben werden. Die Kosten von Brennstoffzellenfahrzeuge wie z.B. Bussen liegen derzeit bei rund 300 % im Vergleich zu einem konventionellen Antrieb. Im öffentlichen Personennahverkehr könnte z.B. mit einer Mehrkostenausgleichsregelung der Anteil an Wasserstoff-Fahrzeugen gehoben und die Clean Vehicle Directive konsequent umgesetzt werden. Auch im PKW-Sektor sind die derzeitigen Anschaffungskosten mit rund 65.000 € exkl. MwSt. (Beispiel Hyundai Nexa) sehr hoch und daher nicht für die breite Masse erschwinglich. Hier benötigt es eine Koordination der Anschaffungen, die Umsetzung von Leuchtturmprojekten und der Schaffung von Use Cases.

Zur Erhöhung der lokalen Wertschöpfung und der Jobbeschaffung sollte die **Industrialisierung von Brennstoffzellen** mittels Ausbaus der F&E Landschaft in Österreich gefördert werden. Zur Erhöhung der Lebensdauer und Effizienz sowie der Reduktion der Kosten von Brennstoffzellen und deren Komponenten sollten insbesondere der Aufbau von Entwicklungszentren und Fertigungsstandorten in Österreich vorangetrieben werden. Auch hier ist als Best Practice Beispiel wieder Japan zu nennen.

Die **Schaffung von zero-emission Zonen** in urbanen Räumen kann unterstützend bei der Einführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugflotten (Bus, LKW, PKW) wirken. Gleichzeitig führt dies zu einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Anwendung und dadurch eine Attraktivierung für den Umstieg zu emissionsfreien Technologien. Mit Hilfe von Leuchtturmprojekten und der Schaffung von Use

Cases können die Emissionsziele und die Umsetzung der Clean Vehicle Directive besser erreicht werden.

Für den Ausbau und Neubau von großen Wasserstoff-Infrastrukturen sollten **rechtliche Rahmenbedingungen** wie z.B. der Erhöhung der unteren Mengenschwelle für die Lagerung von Wasserstoff angepasst werden (SEVESO III Richtlinie, 5 Tonnen). Generell sollte eine einheitliche Festlegung für den Umgang mit der Zurechnung von Wasserstoff-Mengen zur genannten Mengenschwelle festgelegt werden (Fahrzeugtanks von Wasserstoff-Fahrzeugen, Speicherbündel, Wasserstoff-Trailer). Eine Umsetzung führt zu einer erleichterten Umsetzung von Wasserstoff-Infrastrukturen und zu einer gesicherten Versorgung von Fahrzeugflotten bei dezentraler Produktion und Tankstellen.

Ein **Abbau behördlicher Hürden** für den Aufbau von Wasserstoff-Infrastrukturanlagen kann mit der Umsetzung eines Genehmigungsleitfadens für Wasserstoff-Anlagen erfolgen. Dadurch wird der Genehmigungsprozess sicherer, transparenter und einfacher. Darüber hinaus sollte zwischen privaten, kommerziellen, industriellen Anlagen sowie F&E-Anlagen unterschieden werden. Dadurch können die Umsetzung gesamtheitlich beschleunigt und die Klimaziele erreicht werden. Als Best Practice Beispiele sind der Genehmigungsleitfaden der NOW GmbH in Deutschland und das EU Projekt HyLaw zu nennen.

Durch eine **Netzentgeltbefreiung** wird die Herstellung von grünem Wasserstoff wettbewerbsfähig. Gleichzeitig wird der Hochlauf der Wasserstoff-Verfügbarkeit beschleunigt und der Einsatz in Industrie und Mobilität erleichtert. Einheitliche EU-Regelungen sind zu bevorzugen, jedoch sollten nationale Zwischenregelungen zur raschen Umsetzung von möglichen Business-Cases implementiert werden.

Ein vorgelagerter **Ausbau von F&E Infrastruktur** ist wesentlich für einen industriellen Markthochlauf von Wasserstoff-Technologien, daher muss diese gefördert werden. Die Verbesserung von Effizienz, Lebensdauer und Kosten führen zu konkurrenzfähigen Produkten. Die lokale Wertschöpfung wird dadurch erhöht und der F&E Standort gestärkt. Die Industrie muss hierbei unterstützt werden, um auf innovative Produkte umzustellen. Der Fokus sollte auf Elektrolyse, Brennstoffzelle und Wasserstoff-Speicher liegen. Als Best Practice Beispiel ist hier das Wasserstoff-Cluster in Nordrhein-Westfalen, Deutschland zu nennen.

Darüber hinaus sollten auch die **Kräfte zur Weiterentwicklung gebündelt** werden. Zurzeit gibt es einige Plattformen und Cluster, die sich mit Wasserstoff beschäftigen jedoch teilweise keine Kooperation haben. Dies verlangsamt die Entwicklung anstatt sie voranzutreiben.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Globale CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Sektor.....	10
Abbildung 2: Anteil an Wasserstoff-basierten Antrieben im Verkehrssektor für 2050 <sup>3</sup> .....	11
Abbildung 3: Logo des IEA TCP für Fortschrittliche Brennstoffzellen .....	12
Abbildung 4: Implementierungsprojekte für Brennstoffzellenbusse in Europa <sup>iv</sup> .....	14
Abbildung 5: Vergleich von Komponenten-Herstellungskosten für Brennstoffzellen aktuell und zukünftig.....	19
Abbildung 6: Entwicklungspotential von Brennstoffzellenantrieben und deren Kosten.....	19
Abbildung 7: Analyse zum Vergleich von verschiedenen Antriebsoptionen und der Break-Even Punkt der TCO-Kosten .....	20
Abbildung 9: Vergleich batterie-elektrischer/wasserstoffbasierter Antrieb für schwere Nutzfahrzeuge .....	21
Abbildung 10: Aufteilung der anteiligen Kosten für die Wasserstoffbereitstellung aus Patagonien ...	22
Abbildung 11: Ergebnisse der weltweiten Wasserstoffzuteilung .....	23
Abbildung 12: Darstellung unterschiedlicher Transportwege von Wasserstoff für mobile Anwendungen .....	24
Abbildung 13: Sankey-Diagramm und Berechnungsergebnisse für den Transportweg von Marokko nach Österreich (NH <sub>3</sub> Pfad) .....	25
Abbildung 14: Beispiele für BZ-Anwendungen in LKW (links), Bussen (Mitte) und Zügen (rechts).....	26
Abbildung 15: Analyse der unterschiedlichen Wärmequellen und -senken des Brennstoffzellenkühlkreislaufs eines schweren Nutzfahrzeugs.....	27
Abbildung 16: Technology Readiness Level, TRL, verschiedener mobiler Anwendungen von Brennstoffzellensystem.....	28
Abbildung 17: Konzept für Wasserstoffinfrastruktur mit Trailer und Niederdruckspeicher .....	29
Abbildung 18: Vergleich von aktiver und passiver Rezirkulation im Anodensubsystem eines mobilen Brennstoffzellensystems .....	30
Abbildung 19: Entwicklungs-Toolchain für ein Injektor-Ejektor System (oben) und Simulationsergebnisse der 3D CFD-Strömungssimulation (unten).....	31
Abbildung 20: Vision einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft.....	32
Abbildung 21: Wasserstoffnachfrage in 2050.....	32
Abbildung 22: Strategic Research and Innovation Agenda (links) und Wertschöpfungskette von grünem Wasserstoff (recht) .....	35
Abbildung 18: Vorgeschlagenes Wasserstofftankstellennetz für Österreich; Tankstelle L hat eine Kapazität von 2 500 kgH <sub>2</sub> /Tag, Tankstelle S 212 kgH <sub>2</sub> /Tag.....	38
Abbildung 19: Die Zahlungsbereitschaft bzw. der Schwellenpreis für sauberen Wasserstoff in mehreren aktuellen und neu entstehenden Sektoren (einschließlich Produktion, Lieferung und Aufbereitung vor Ort, wie zusätzliche Verdichtung, Abfüllung, Kühlung und/oder Abgabe).....	39

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Länder und Institute vertreten im Annex 34 des TCP AFC .....	13
Tabelle 2: Key Performance Indicators für Heavy-Duty Brennstoffzellensysteme .....	18

## Abkürzungsverzeichnis

BEV	Battery Electric Vehicle, batterieelektrisches Fahrzeug
BZ	Brennstoffzelle
BZS	Brennstoffzellensystem
bzw.	beziehungsweise
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle, Brennstoffzellen-Fahrzeug
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
IEA	International Energy Agency
LKW	Lastkraftwagen
MW	Megawatt
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
PEM	Proton Exchange Membrane, Protonenaustauschmembran
PKW	Personenkraftwagen
SUV	Sports Utility Vehicles
TCO	Total Cost of Ownership

## Literaturverzeichnis

---

- <sup>i</sup> International Energy Agency, “Global energy-related CO2 emissions by sector,” <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-by-sector>, aufgerufen am 25.07.2022.
- <sup>ii</sup> United Nations, “Paris Agreement,” [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf), aufgerufen am 25.07.2022.
- <sup>iii</sup> Hydrogen council, “Hydrogen scaling up,” Hydrogen council, 2017.
- <sup>iv</sup> Fuel Cell Electric Buses <https://fuelcellbuses.eu/category/demos-europe>, aufgerufen am 26.07.2022
- <sup>v</sup> Hyundai BZ LKW <https://www.hyundai.news/de/articles/press-releases/erste-brennstoffzellen-lkw-hyundai-xcient-fuel-cell-kommen-nach-europa.html>, aufgerufen am 26.07.2022
- <sup>vi</sup> Daimler Truck testet BZ LKW mit Flüssigwasserstoff <https://www.electrive.net/2022/06/27/daimler-truck-testet-bz-lkw-mit-fluessigwasserstoff/>, aufgerufen am 26.07.2022
- <sup>vii</sup> Fuel Cell & Hydrogen Cluster Austria <https://mobilitaetderzukunft.at/de/projekte/fahrzeugtechnologien/fch-projekte.php>, aufgerufen am 26.07.2022
- <sup>viii</sup> Wallnöfer-Ogris Eva, Pertl Patrick, Trattner, Alexander: Quasi-stationary UI-characteristic model of a PEM fuel cell—Evaluating the option of self-humidifying operation, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 56, 13 November 2020, Pages 32464-32477
- <sup>ix</sup> Kraus, S., Reul, J., Grube, T., Linssen, J., Stolten, D., Vehicle Cost Analysis for Road Vehicles until 2050. In proceedings: 30<sup>th</sup> Aachen Colloquium Sustainable Mobility, Aachen/Germany, October, 6, 2021
- <sup>x</sup> Trattner Alexander, Höglinger Martin, Macherhammer Marie-Gabrielle, Sartory Markus: Renewable Hydrogen: Modular Concepts from Production over Storage to the Consumer, Chemie Ingenieur Technik 2021 Volume 93, Pages 706-716
- <sup>xi</sup> Trattner Alexander, Macherhammer Marie-Gabrielle, Esser Klaus, Pertl Patrick: Efficiency Potentials of Fuel Cell Propulsion Systems, Der Antrieb von morgen 2020 pp 199–215
- <sup>xii</sup> Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>, Shell Wasserstoff Studie, 2017
- <sup>xiii</sup> Singer Gerald, Gappmayer Gregor, Macherhammer Marie-Gabrielle, Pertl Patrick, Trattner Alexander: A development toolchain for a pulsed injector-ejector unit for PEM fuel cell applications, International Journal of Hydrogen Energy, 2022, Volume 47, p.23818 - 23832
- <sup>xiv</sup> Trattner Alexander, Klell Manfred, Radner Fabian: Sustainable hydrogen society – Vision, findings and development of a hydrogen economy using the example of Austria, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 47, Pages 2059-2079
- <sup>xv</sup> Geopolitics of the Energy Transformation, The Hydrogen Factor, International Renewable Energy Agency, 2022, <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>
- <sup>xvi</sup> Hydrogen scaling up, A sustainable pathway for the global energy transition, Hydrogen Council 2017, <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>
- <sup>xvii</sup> Ökonomische Effekte der Wasserstoffstrategie, Economica, 2020, [https://www.economica.eu/wp-content/uploads/2021/02/Impakt-H2\\_Economica\\_Endbericht.pdf](https://www.economica.eu/wp-content/uploads/2021/02/Impakt-H2_Economica_Endbericht.pdf), aufgerufen am 27.07.2022
- <sup>xviii</sup> Automotive Zulieferindustrie, OTS, [https://www.ots.at/presseaussendung/OTS\\_20210709\\_OTS0012/automotive-zulieferindustrie-enorme-bedeutung-fur-den-industriestandort-oesterreich](https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20210709_OTS0012/automotive-zulieferindustrie-enorme-bedeutung-fur-den-industriestandort-oesterreich) aufgerufen am 27.07.2022
- <sup>xix</sup> Neue Strategische Agenda für eine Europäische Wasserstoffwirtschaft veröffentlicht, Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2022, <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/pressemitteilungen/de/2022/03/180322-SRIA.html>, aufgerufen am 28.07.2022
- <sup>xx</sup> Österreichische Wasserstoffstrategie, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022, <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/energieversorgung/wasserstoff/strategie.html> aufgerufen am 28.07.2022
- <sup>xxi</sup> DOE National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap, Draft, September 2022

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

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

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