



Wasserstoff und Brennstoffzellen für zukünftige emissionsfreie Antriebe

—
Stefan Keller, Ulf Groos, Kläre Christmann
Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany

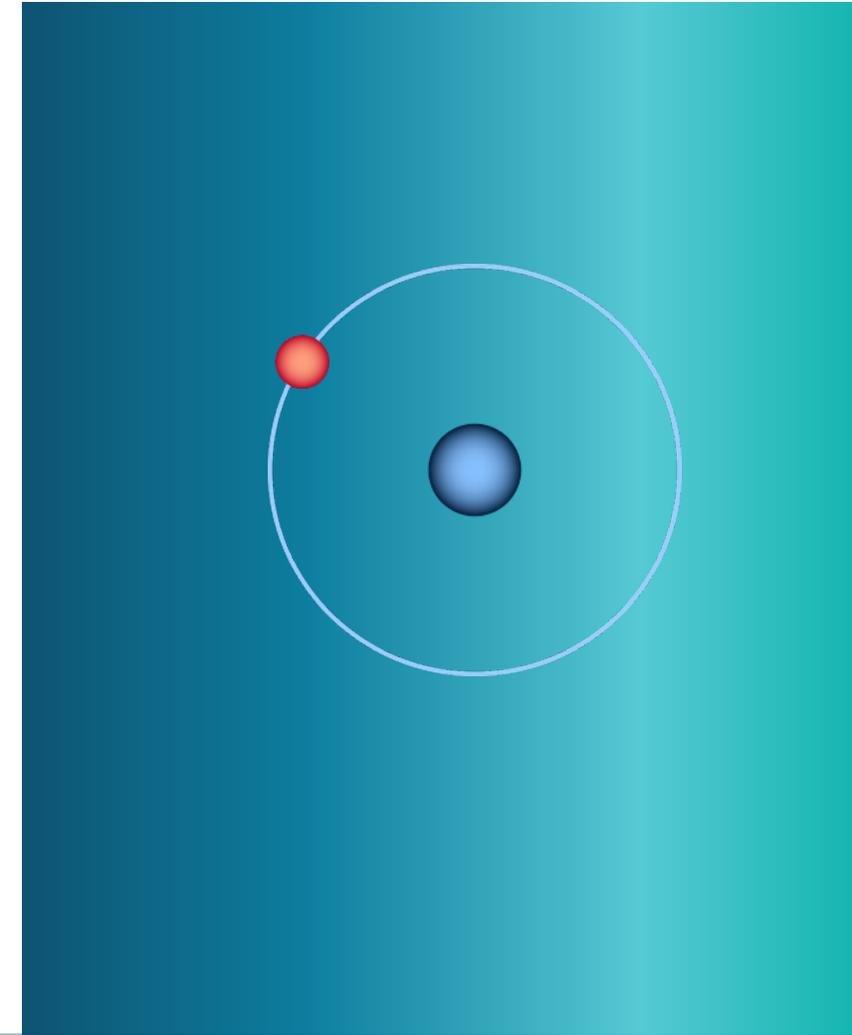
IHK-Wasserstoff-Forum, Konstanz, 29. Juni 2023



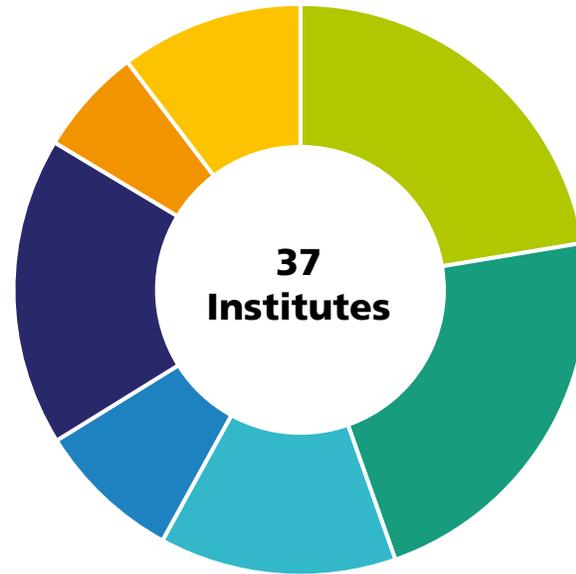
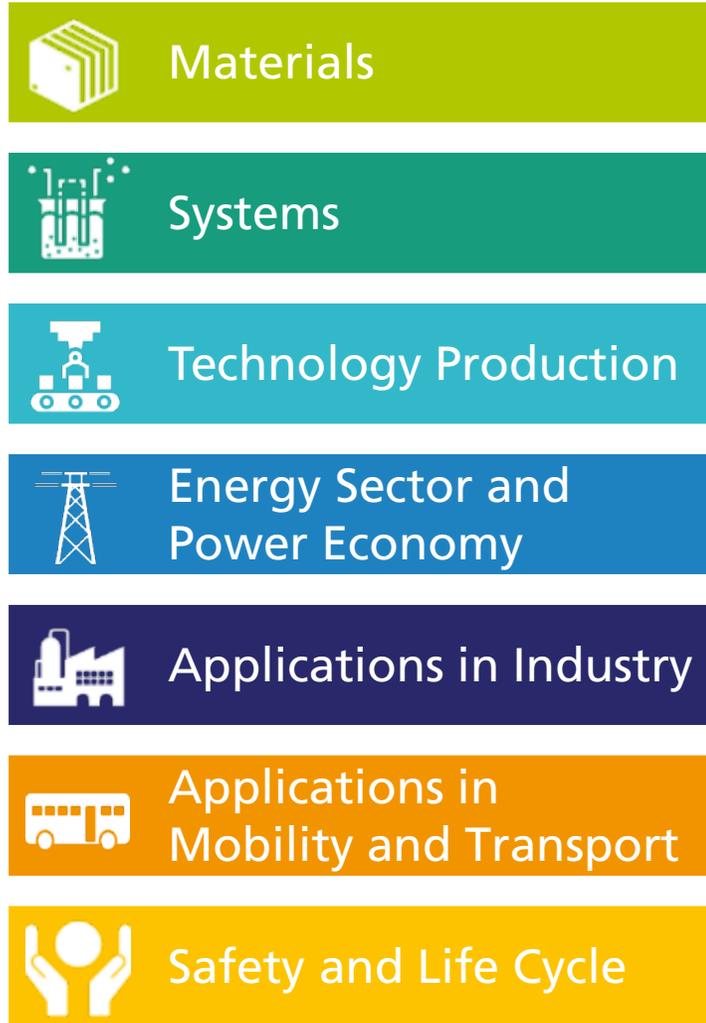
Wasserstoff und Brennstoffzellen für zukünftige emissionsfreie Antriebe

Inhaltsverzeichnis

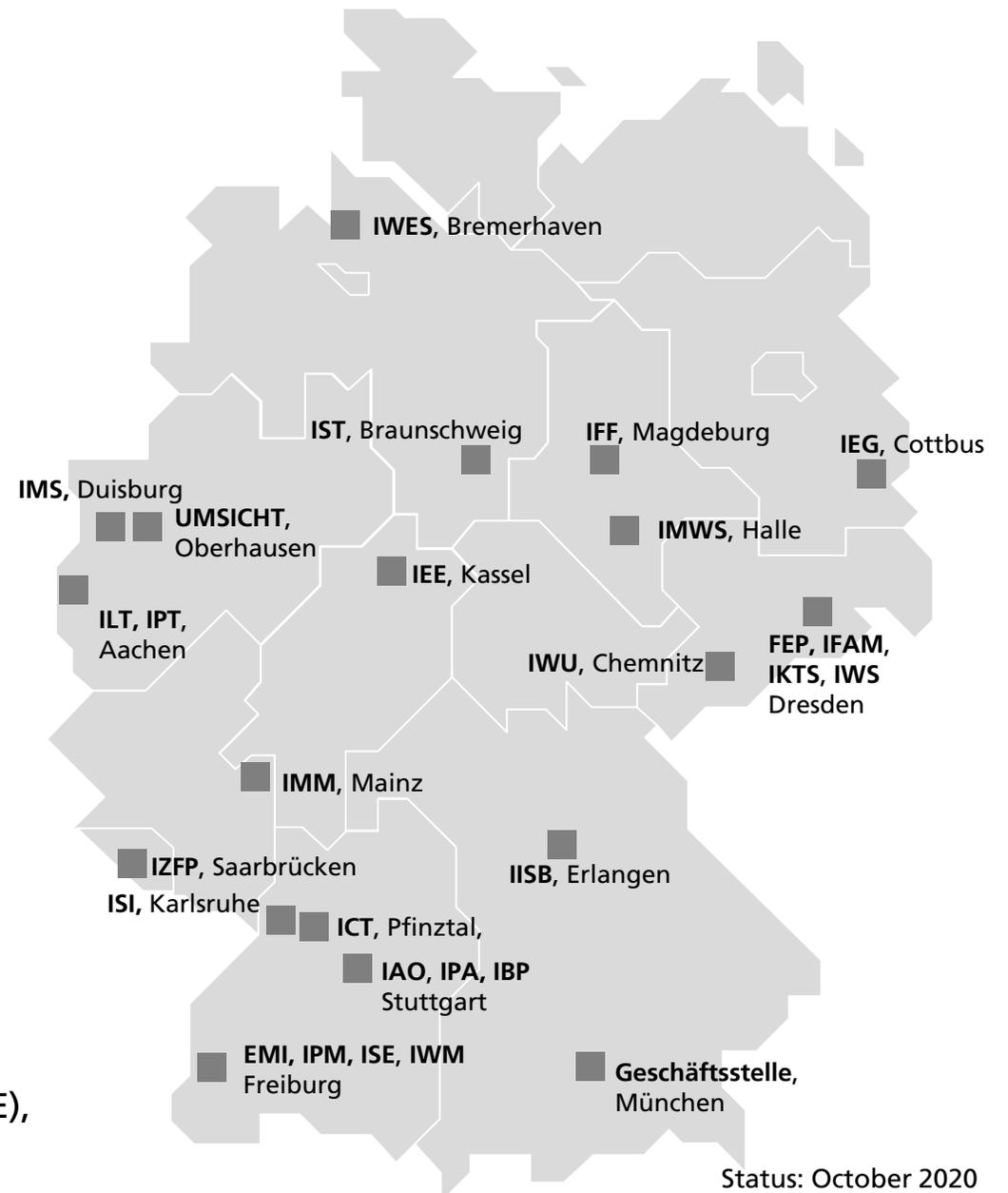
1. Kurzvorstellung Fraunhofer ISE und Bereich Wasserstofftechnologien
2. Einsatz von Wasserstoff als Energieträger
3. Wasserstoff in der Mobilität: Nutzung und Anwendungen



The Fraunhofer Hydrogen Network



■ **Management:**
 Prof. Christopher Hebling (ISE),
 Prof. Mario Ragwitz (IEG)

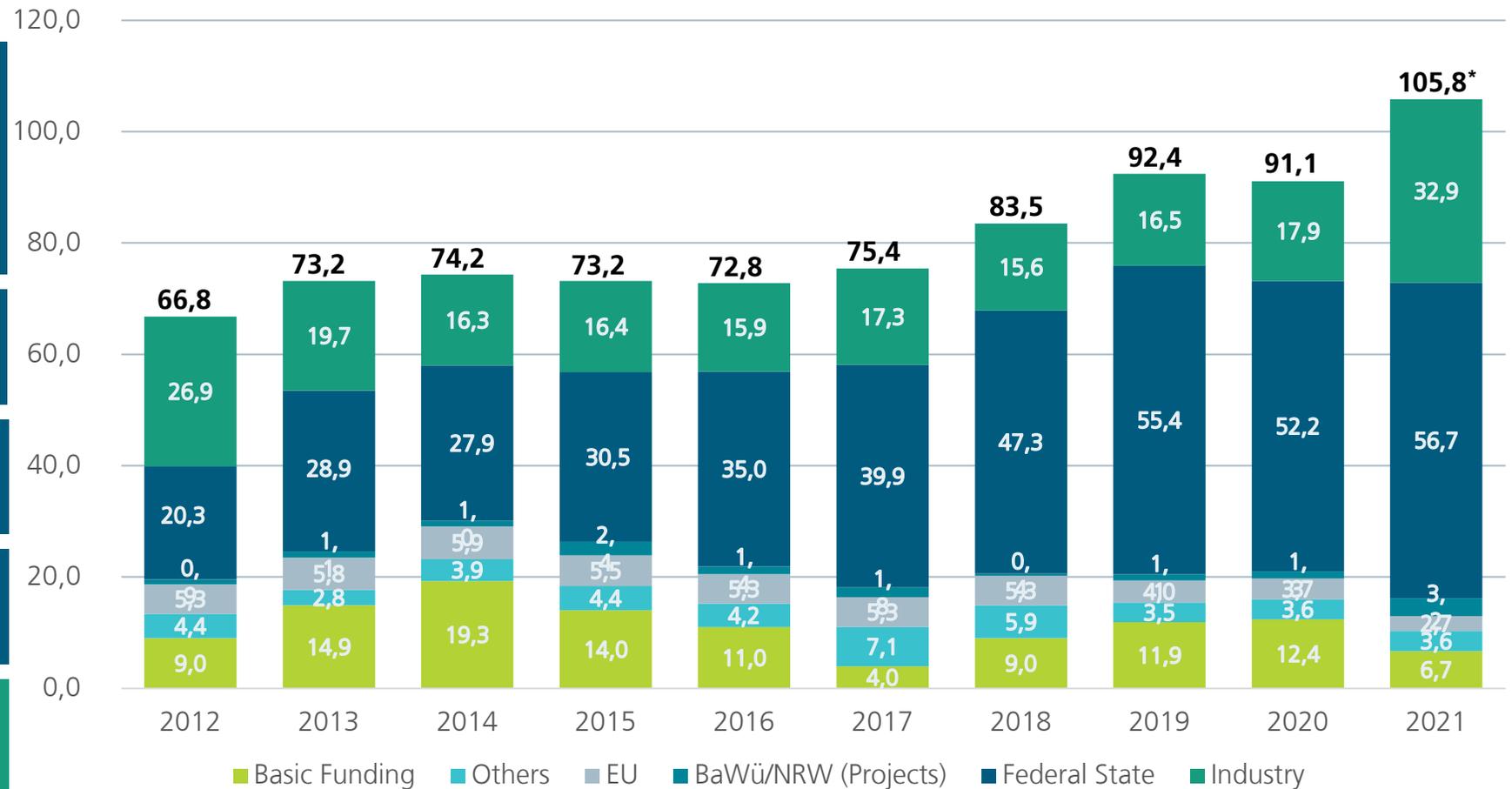


Status: October 2020

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Budget 2022 (120,6 M€), rund 1.400 Mitarbeitende, gegründet 1981

- Photovoltaik
Silicium-PV
III-V- und Konzentrator-PV
Perowskit- und Organische PV
PV Module und Kraftwerke
- Energieeffiziente Gebäude
- Solarthermische Kraftwerke
und Industrieprozesse
- Leistungselektronik, Netze und
Intelligente Systeme
- Wasserstofftechnologien und
Elektrische Energiespeicher



Wasserstofftechnologien @ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Defossilisierung von Transport, Chemikalien und Industrieprozessen



Brennstoffzellen

Charakterisierung, Modellierung und Fertigung von PEM Brennstoffzellen



Nachhaltige, synthetische Produkte

Entwicklung von Katalysatoren und Prozessen inklusive Lebenszyklusanalysen und techno-ökonomischer Analysen



Elektrolyse und Power to Gas

PEM Wasserelektrolyse als Basistechnologie für erneuerbare Energien

150 Mitarbeitende; 15 Mio € jährliches Budget, > 30 Jahre Erfahrung mit Wasserstoff

Abteilung Brennstoffzellen

Wissenschaftlich fundierte F&E-Dienste

Abteilung Brennstoffzellensysteme

1. > 26 Forschende plus Studierende
2. 4,6 Mio € Jahreshaushalt (ohne Investitionen) und 40% Umsatz durch Auftragsforschung für die Wirtschaft (2022)
3. > 500 m² Laborfläche mit 12 Einzelzell-Testständen, 4 Short-Stack-Testständen, 2 Klimakammern (alle vollautomatisiert für 24/7-Betrieb)
4. Fokus auf Anwendung Transport (LT PEMFC)
5. Charakterisierung, Modellierung, Produktionsforschung, Ex-Situ Analytik

Besuchen Sie unsere virtuelle Labortour:
<https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/hydrogen-technologies-and-electrical-energy-storage/fuel-cell-systems.html>



Kapitel 02

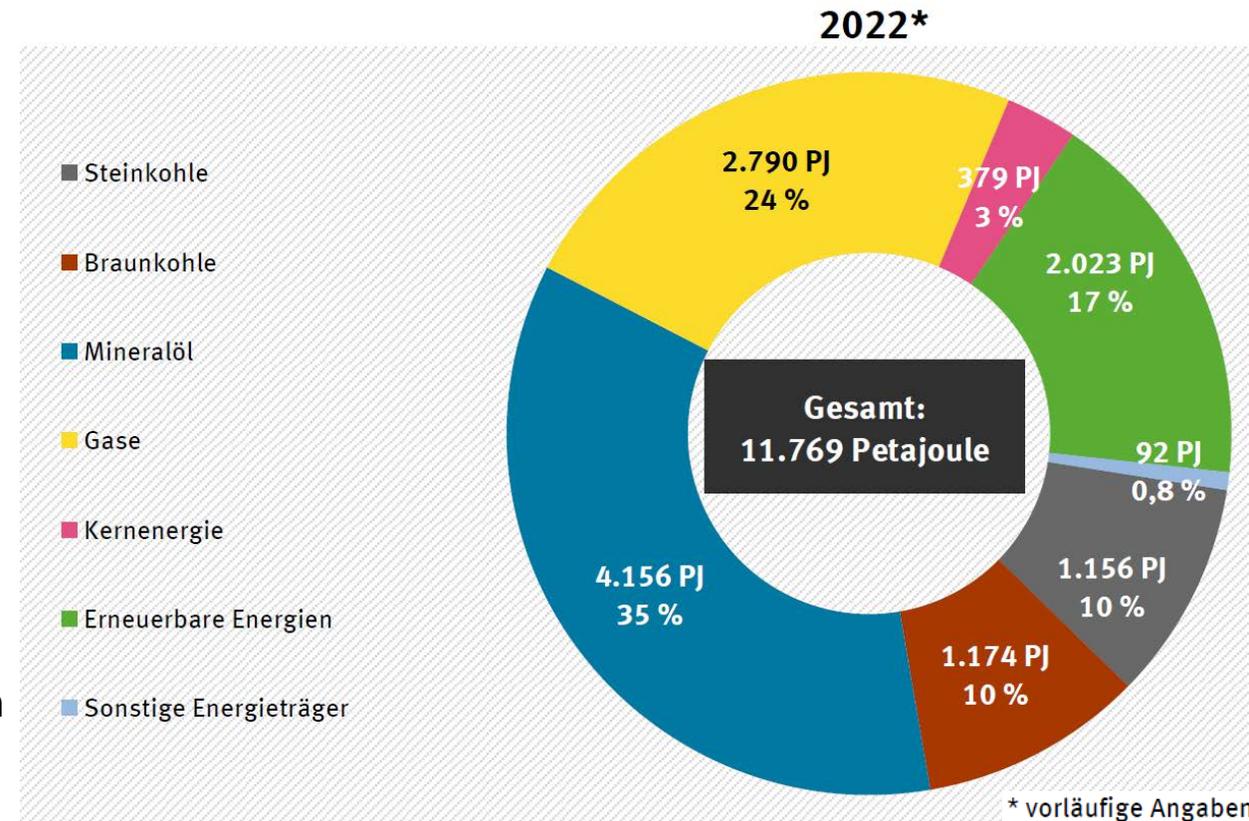
Einsatz von Wasserstoff als Energieträger

Energiesystem Deutschland

Unsere Energie muss CO₂ arm werden

- Bisheriges Energiesystem basiert überwiegend auf **fossilen Energieträgern**
- Hauptproblem: Verbrennung von fossilen Rohstoffen produziert (zusätzliches) CO₂ → **Treibhauseffekt und Klimawandel, Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen**
- Zukünftiges Energiesystem auf Basis **Erneuerbarer Energien**
- Herausforderungen dabei
 1. Inländisches EE-Potential
 2. Speicherung sowie Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch
 3. Nutzung von **Wasserstoff** und Folgeprodukten

Peta = 1 Billiarde = 1.000.000.000.000.000 = 10¹⁵
3,6 PJ = 1 TWh
Beispiel: 1 Liter Diesel ≈ 9,8 kWh = 35.280 kJ
Beispiel: 1 kg Wasserstoff ≈ 33,3 kWh = 120.000 kJ

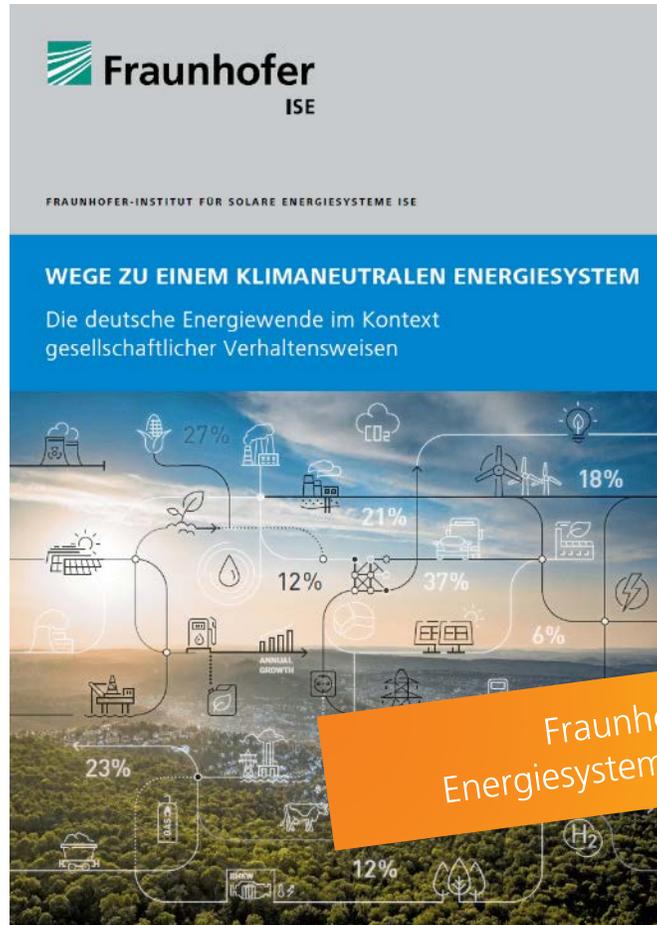


Primärenergieverbrauch in Deutschland nach Energieträgern 2022

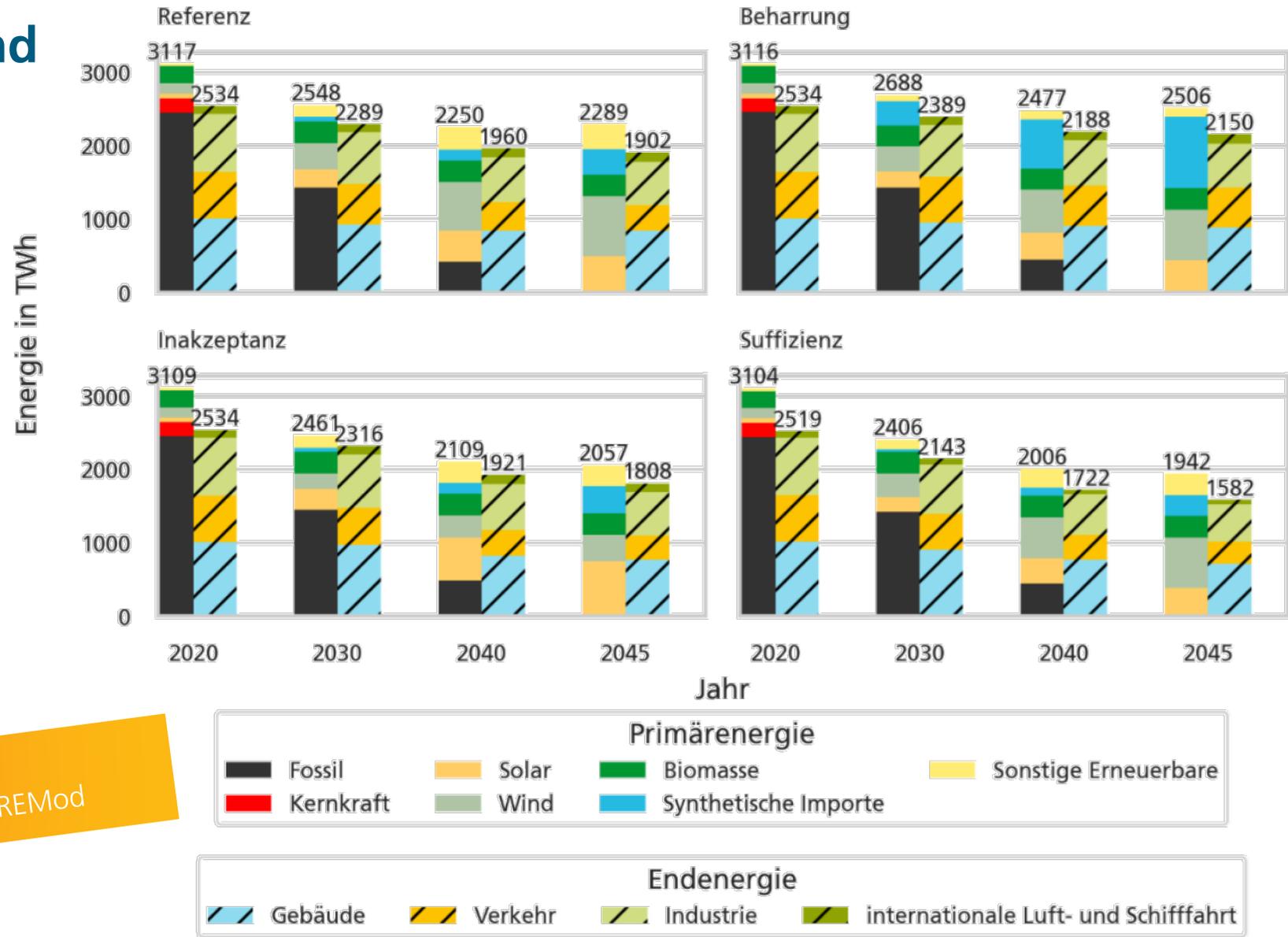
Quelle: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#primaerenergieverbrauch-nach-energietraegern> (Aufruf: 21.06.2023)

Energiesystem Deutschland

Energieimporte auch in Zukunft



Fraunhofer ISE,
Energiesystemmodell REMod



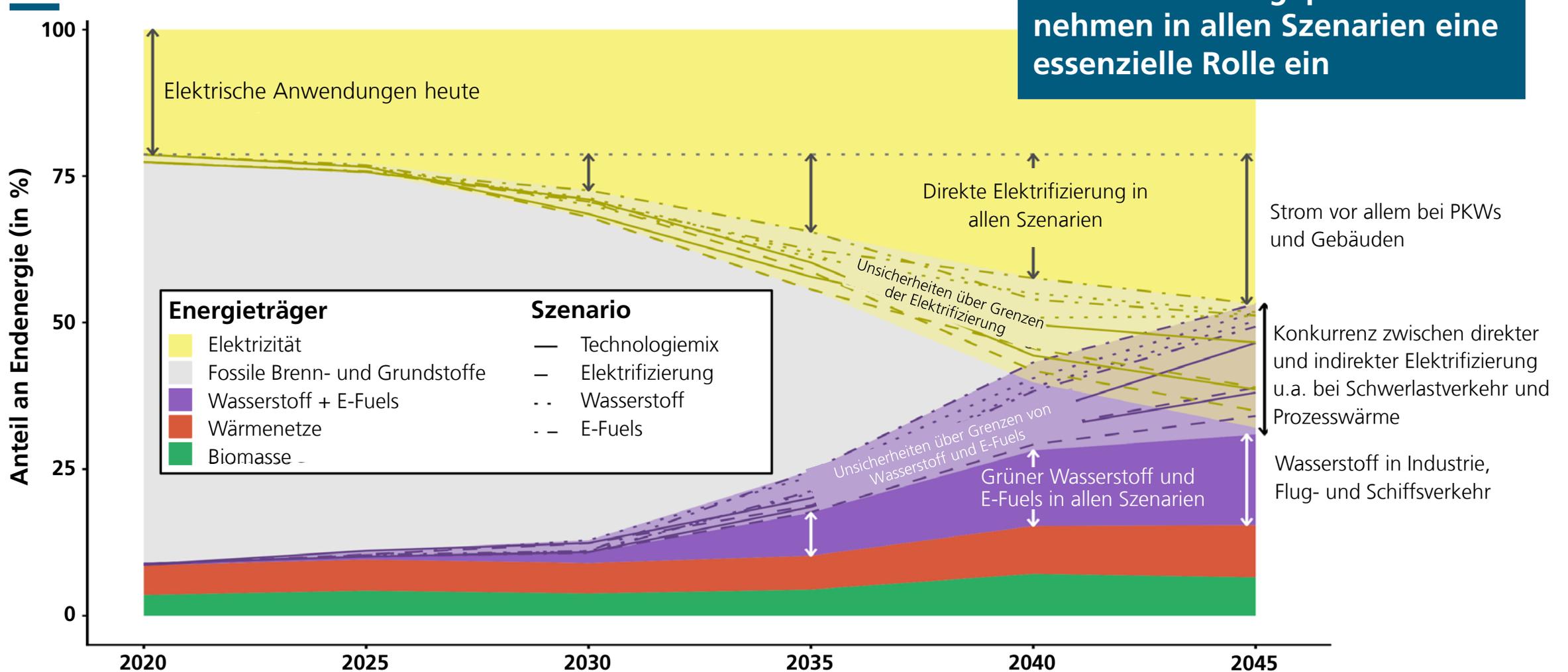
Quelle: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem, Studie, ISE, 2021

<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>

FHG-SK: ISE-PUBLIC

Vergleich von Energieszenariostudien

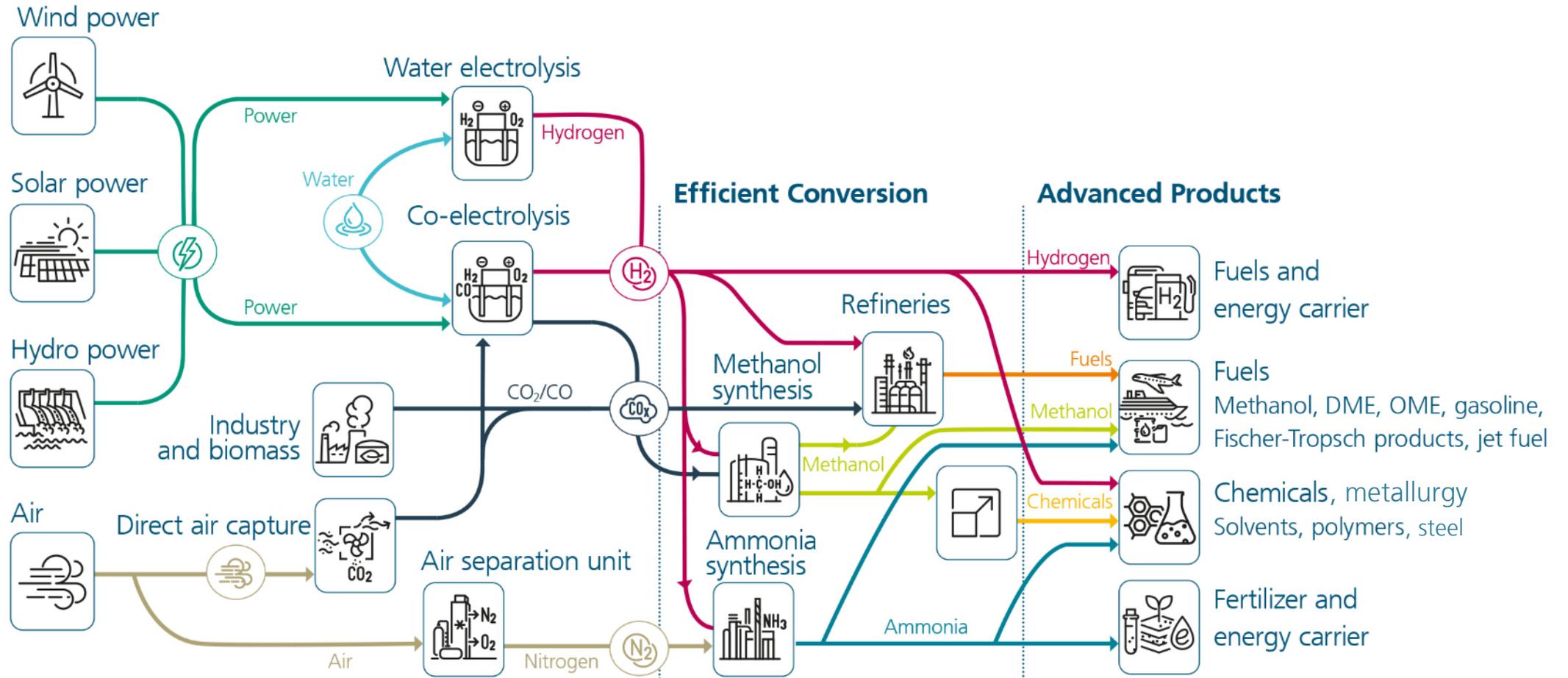
Wasserstoff wird in allen Szenarien wichtig



Grafik übernommen aus: Ariadne Kurzdossier 2021: Durchstarten trotz Unsicherheit, 16.11.2021, <https://ariadneprojekt.de/publikation/eckpunkte-einer-anpassungsfahigen-wasserstoffstrategie/>

Nachhaltige Energieträger, Kraftstoffe und Basismoleküle

Wasserstoff hat sehr viele Anwendungsmöglichkeiten



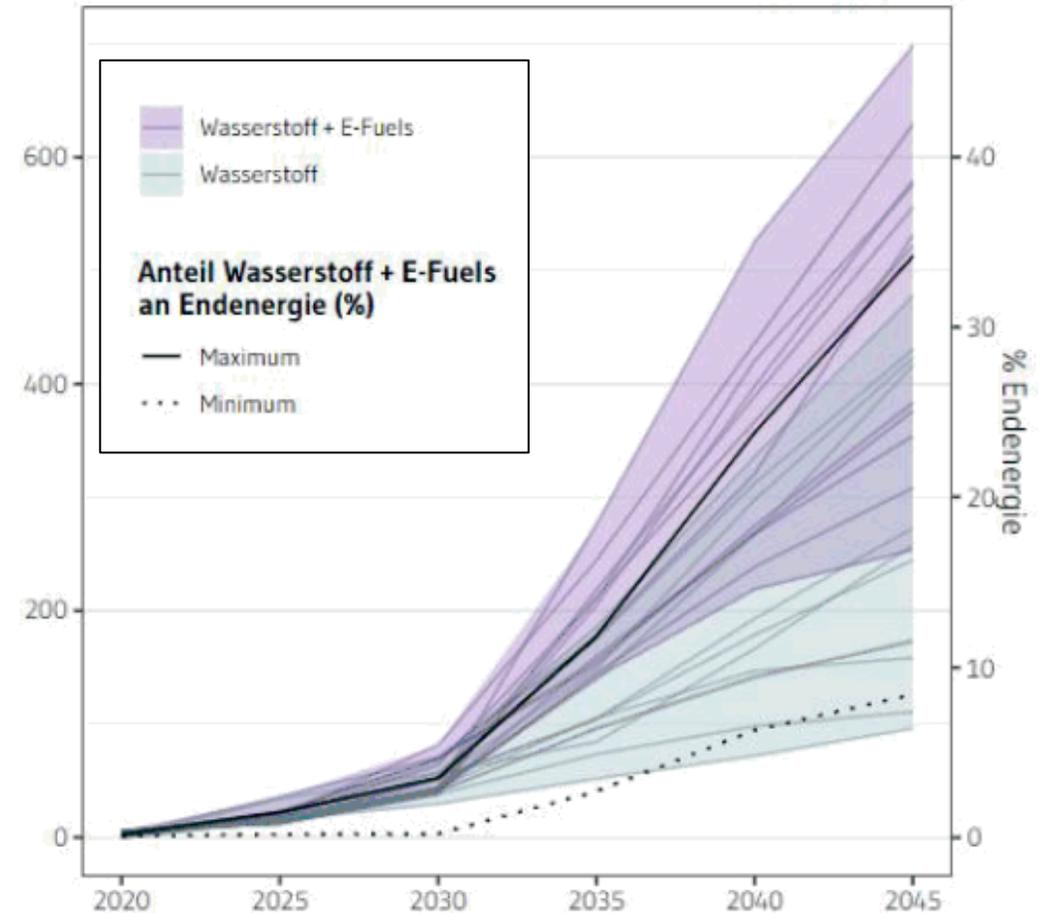
Nachfrage nach Wasserstoff und E-Fuels in Deutschland

Ergebnisse der Szenarienanalyse für Deutschland aus dem Ariadne-Projekt

- Nachfrage nach Wasserstoff und E-Fuels reicht von **250 bis 700 TWh in 2045**
- Die Szenarienanalysen des Ariadne Projekts zeigen:
 - Bis 2030 ist die Verwendung von H₂ und E-Fuels
 - Die Rolle von Wasserstoff und eFuels kann je nach künftiger Klimaschutzstrategie und dem Umfang der Elektrifizierungsmaßnahmen stark variieren

"No-regret"-Optionen für fast alle Szenarien sind die energetische und stoffliche Nutzung von H₂ und eFuels in der Industrie (Stahl, Ammoniak, Petrochemie), Luftfahrt, Schifffahrt und LKW

Nachfrage nach Wasserstoff und E-Fuels [TWh/a]



Quelle: Ariadne Kurzdossier 2021: Durchstarten trotz Unsicherheit, 16.11.2021, <https://ariadneprojekt.de/publikation/eckpunkte-einer-anpassungsfahigen-wasserstoffstrategie/>

Wasserstoff als Energieträger

Speicherung kann kosteneffizient realisiert werden

Kavernenspeicher für große Energiemengen

Testkavernen werden gebaut (bsp. HyCAVmobil, EWE)

Nutzung von bestehenden Kavernen möglich

Potential bestehender Kavernen: 30,7 TWh

(Stromerzeugung D 2022: 571,3 TWh, Pumpspeicher: ca. 0,04 TWh, weltweite Batterieproduktion ca. 1,2 TWh / a)

Bedarfsdeckung für Langfristszenarien des BMWK:

47 – 73 TWh → 5,9 – 12,8 Mrd. € (0,13 – 0,18 € / kWh)



Wasserstoff als Energieträger

Verteilung kann kosteneffizient realisiert werden

Pipelines für effektiven Transport

Untersuchungen an Leitungen und Komponenten zur Materialeignungen :
Retrofit von Leitungen möglich

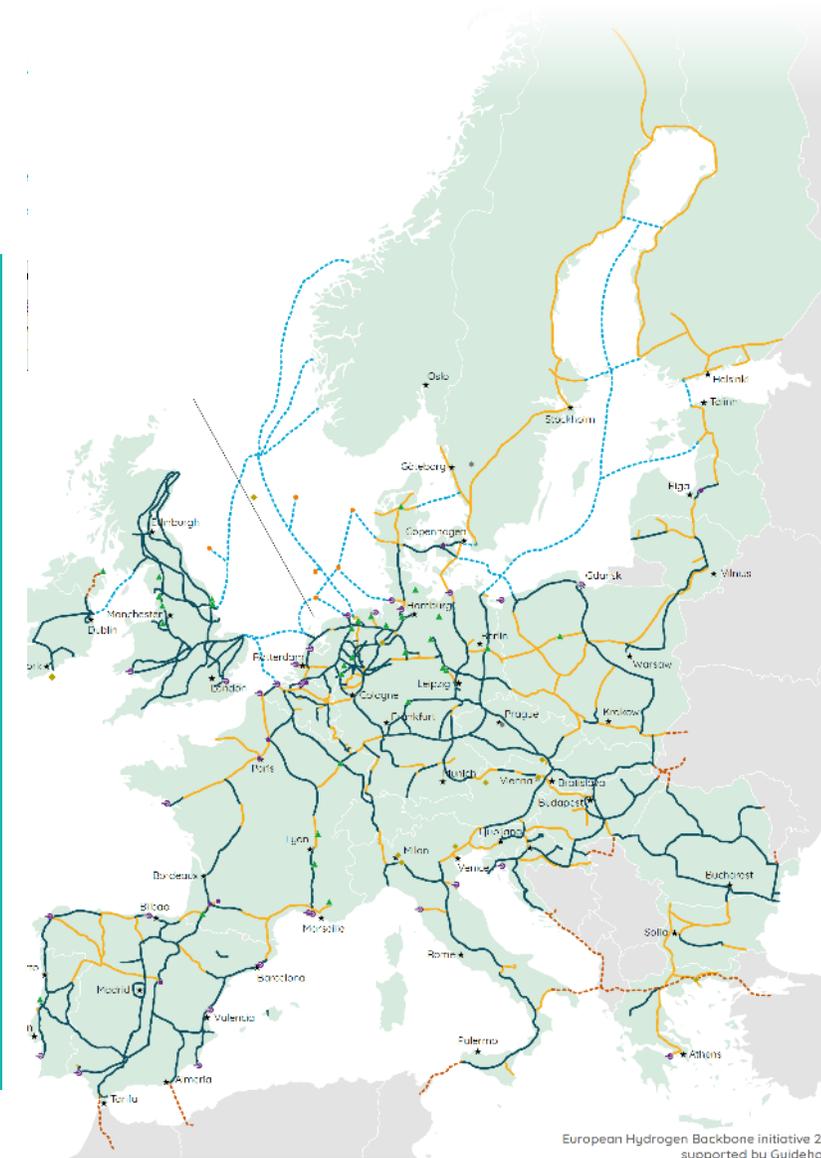
Potentiellles EU-Backbone:

2030: 23.000 km, 687 TWh (REPowerEU)

2040: 52.000 km, 2.100 TWh, 40 % neu (gelb)

0,11 – 0,21 € / kg für 1.000 km

(0,33-0,63 ct / kwh)



European Hydrogen Backbone initiative 2022, supported by Guidehouse



© EWE / C3 Visual Lab

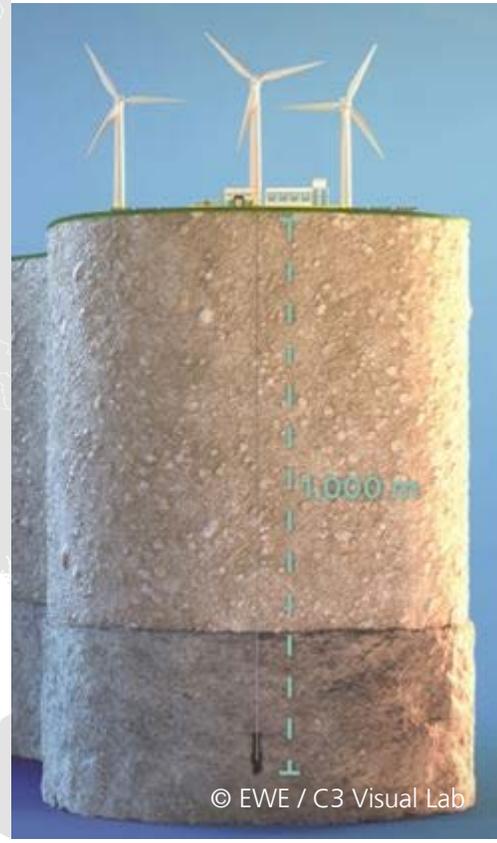
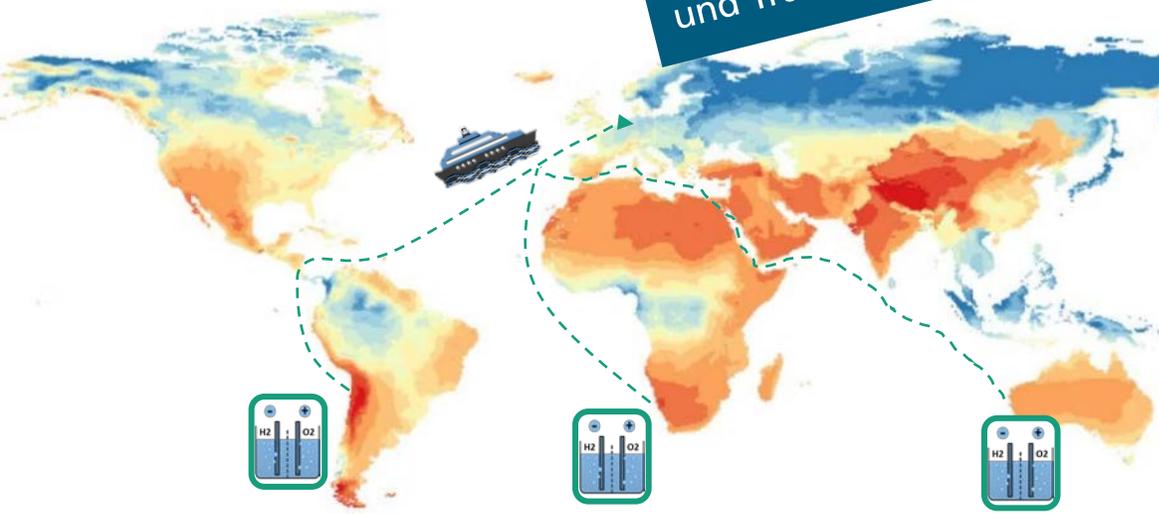
Quelle: European Hydrogen Backbone (EHB) initiative,
<https://ehb.eu/> (Aufruf: 28.06.2022)
FHG-SK: ISE-PUBLIC

Wasserstoff als Energieträger

Wasserstoff globalisiert die Erneuerbaren Energien

Schiffstransport für weltweite EE-Ernte

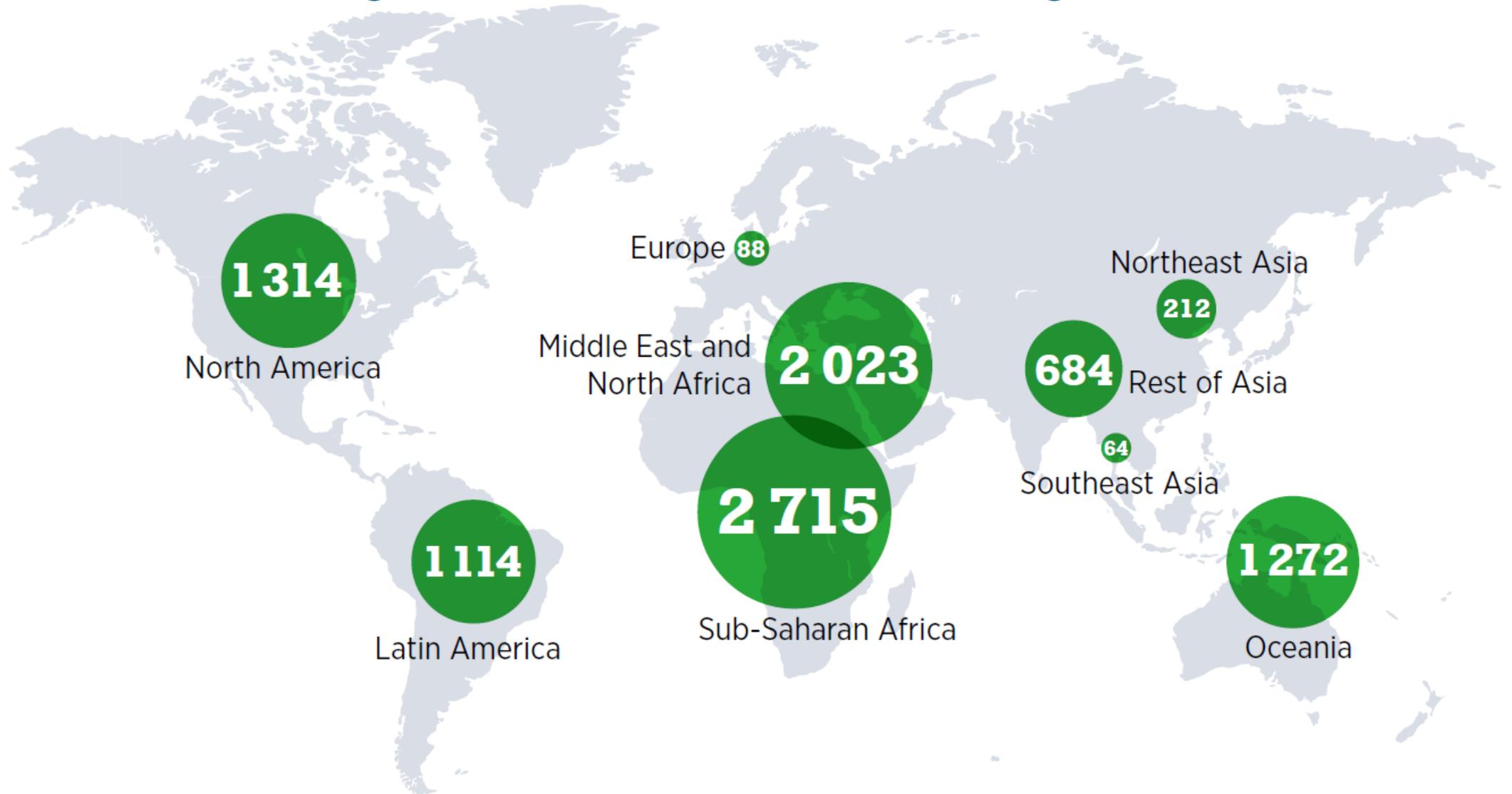
Moleküle eignen sich für Speicherung und Transport viel besser als Elektronen



Quelle: The Future of Hydrogen, Report, IEA, 2019, verändert
<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (Aufruf: 01.06.2023)

Quelle: European Hydrogen Backbone (EHB) initiative,
<https://ehb.eu/> (Aufruf: 28.06.2022)
FHG-SK: ISE-PUBLIC

Technisches Potential für grünen Wasserstoff < USD 1.5/kg (2050, EJ)



Quelle: IRENA, Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor, 2022

Transport per Schiff wirtschaftlich darstellbar

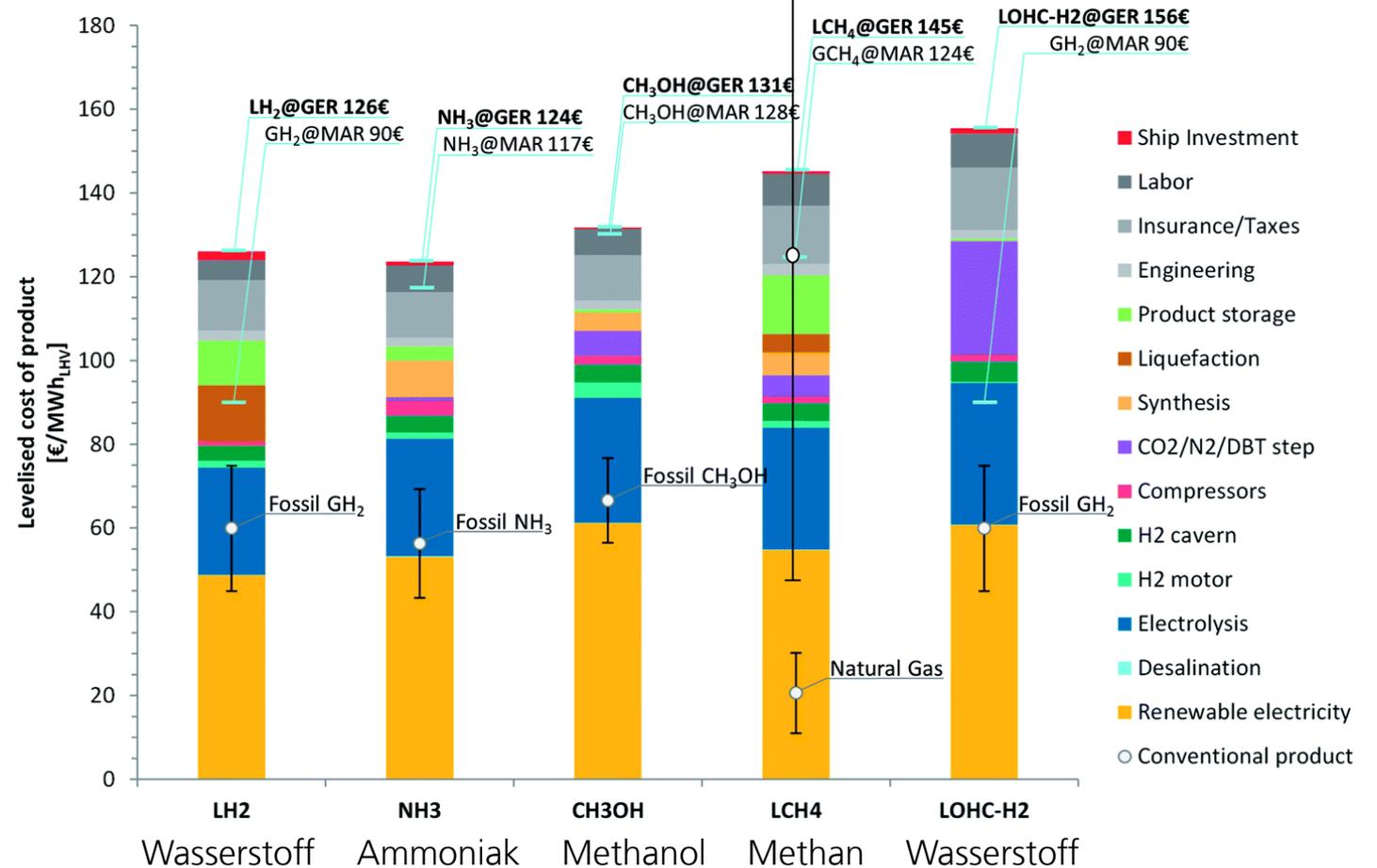
Ob als Wasserstoff oder als Folgeprodukt entscheidet Distanz und Endanwendung

Beispielfall Transport aus Marokko

- Komplette CO₂-freie Erzeugungs- und Transportkette
- Verschiedene Energieträger

Ergebnis

- Bandbreite EE-Energie in Hamburg: 124 – 156 €/MWh (z.B. H₂: 4,2 €/kg)
- Eher geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Energieträgern
- Kosten werden von Stromerzeugung und Elektrolyse dominiert



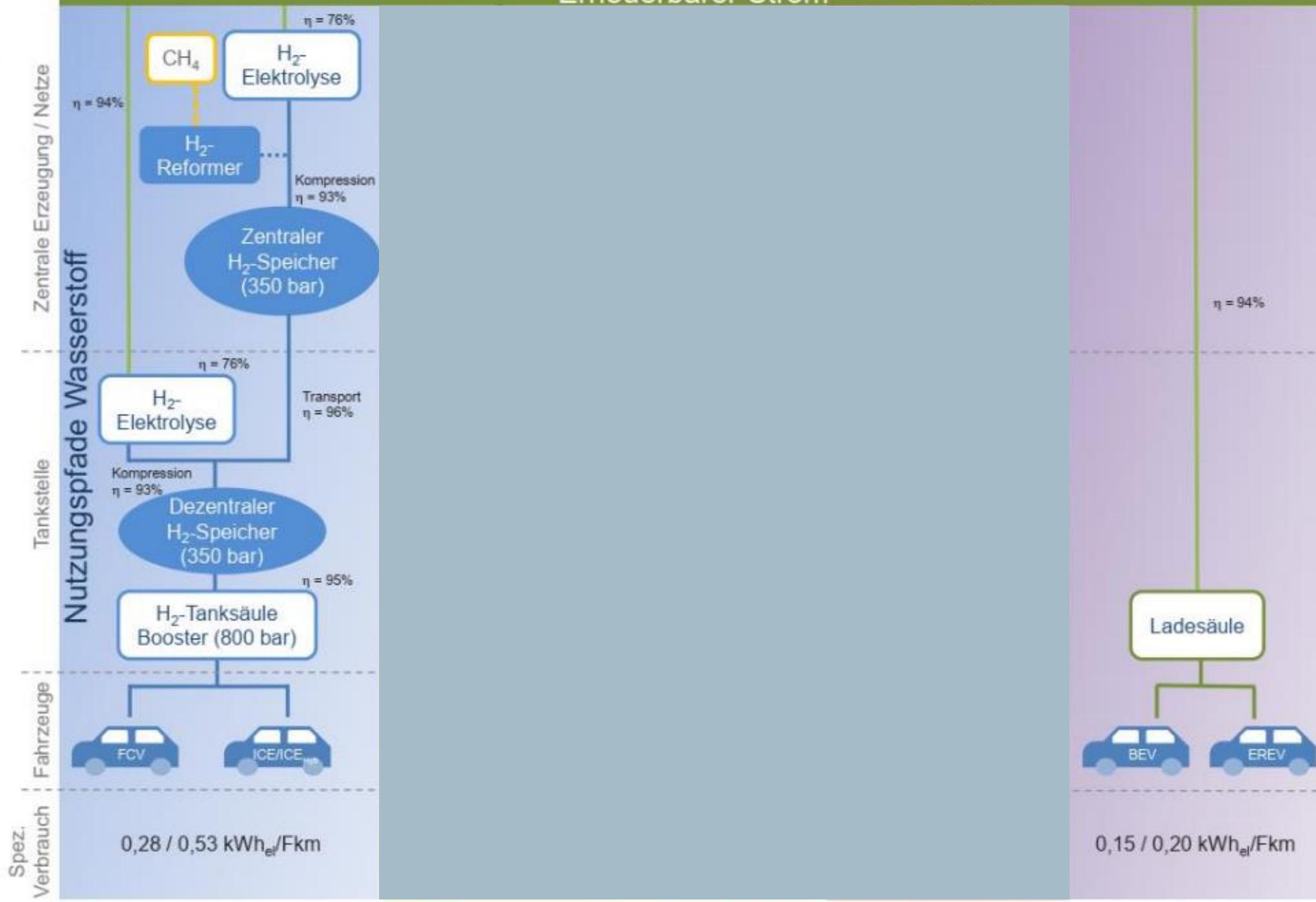
Quelle: Energy efficiency and economic assessment of imported energy carriers based on renewable electricity, C. Hank et al, Journal of Sustainable Energy Fuels, 2020, 4, 2256-2273, DOI: 10.1039/d0se00067a

Kapitel 03

Wasserstoff in der Mobilität: Nutzung und Anwendungen

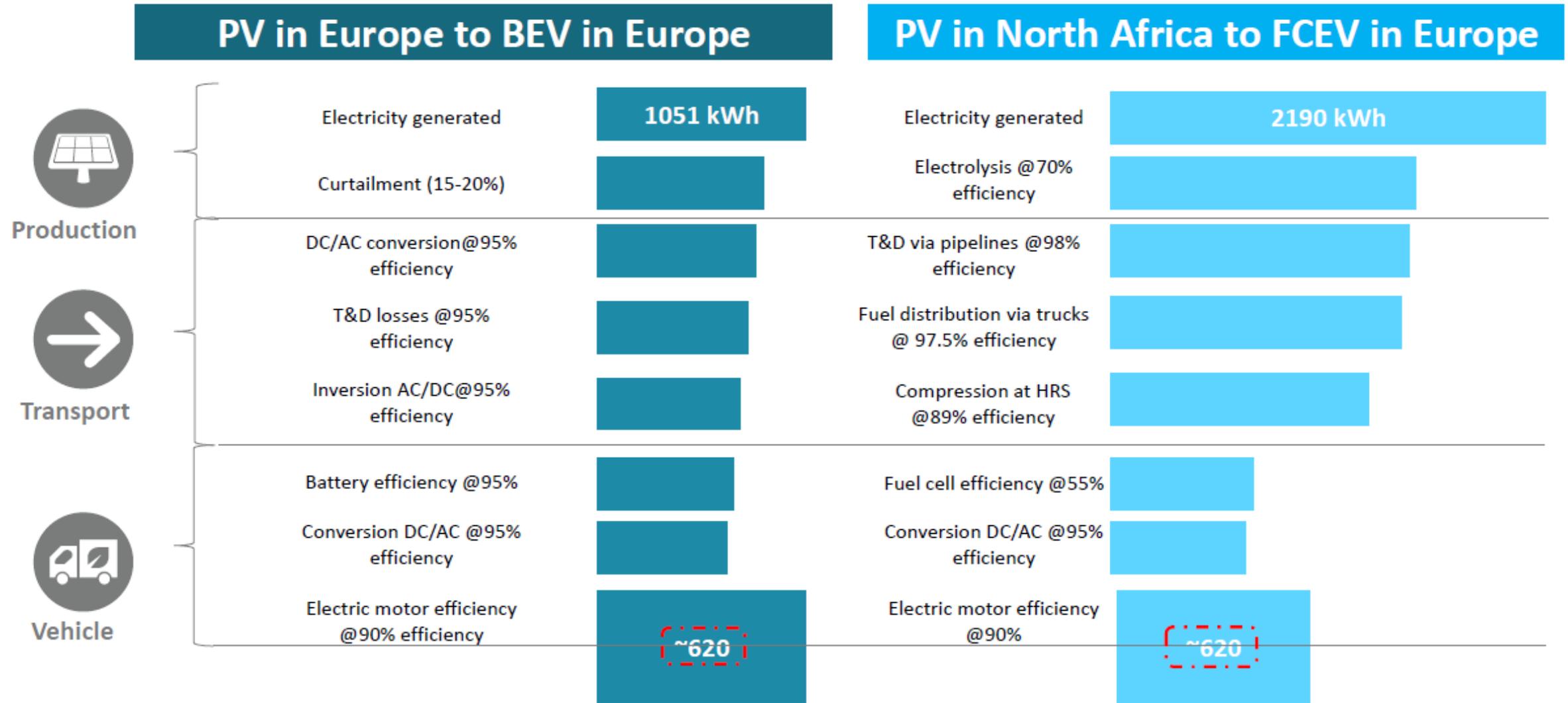
Regenerative Antriebe

Erneuerbarer Strom



Quelle: DLR, Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende – Teil 2, 2020

Well-to-Wheel Energieerträge im lokalen / globalen Vergleich



Quelle: J. Chatzimarkakis, Hydrogen Europe, NOW-Beirat, 2021c

Wasserstoff in der Mobilität

Wasserstoff kann unterschiedlich genutzt werden



Verbrennungsmotor

Mechanische Energie

Lkw, Baufahrzeuge

+ Kosten, Gasreinheit, MRL

- Wirkungsgrad, Emissionen, Vibrationen



© Daimler Truck AG

Brennstoffzelle

Elektrische Energie

Lkw, Pkw, Züge

+ Effizienz, Emissionen, Skalierung

- Kosten, Gasreinheit, MRL



Turbine

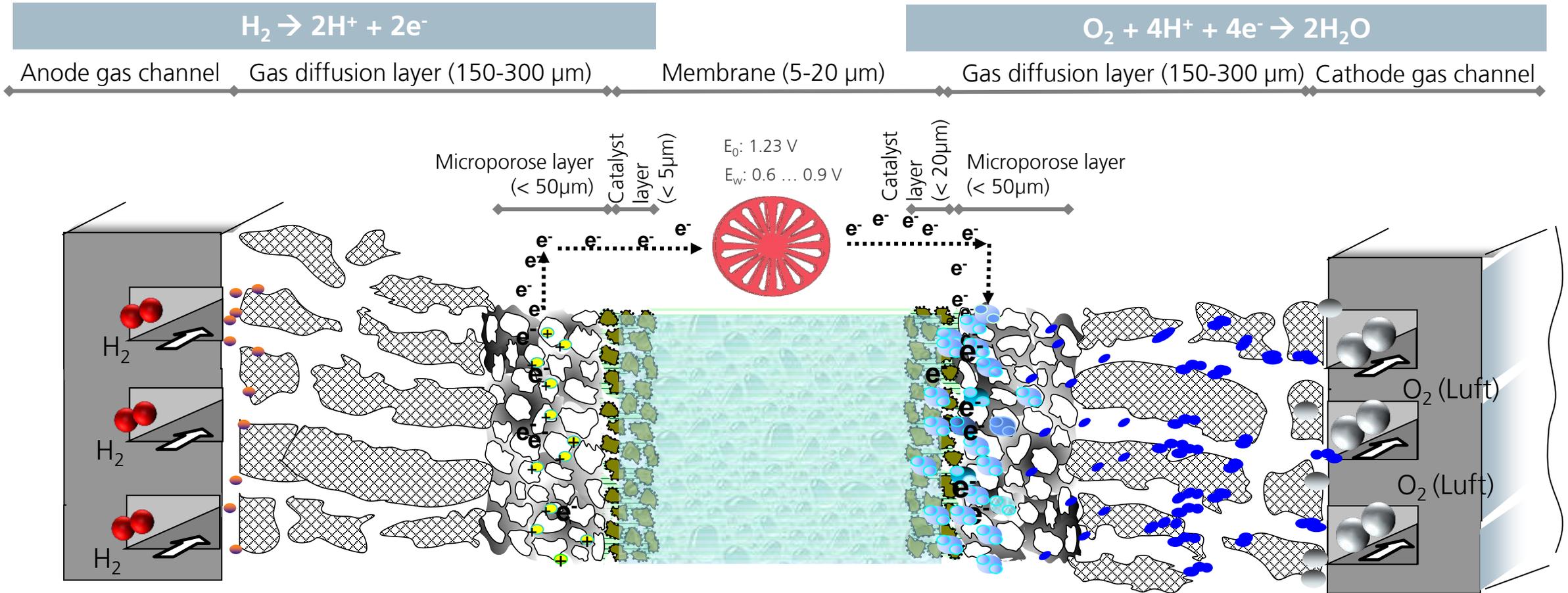
Strömungs- / mechanische Energie

Flugzeuge

Strahltriebwerk, Turboprop

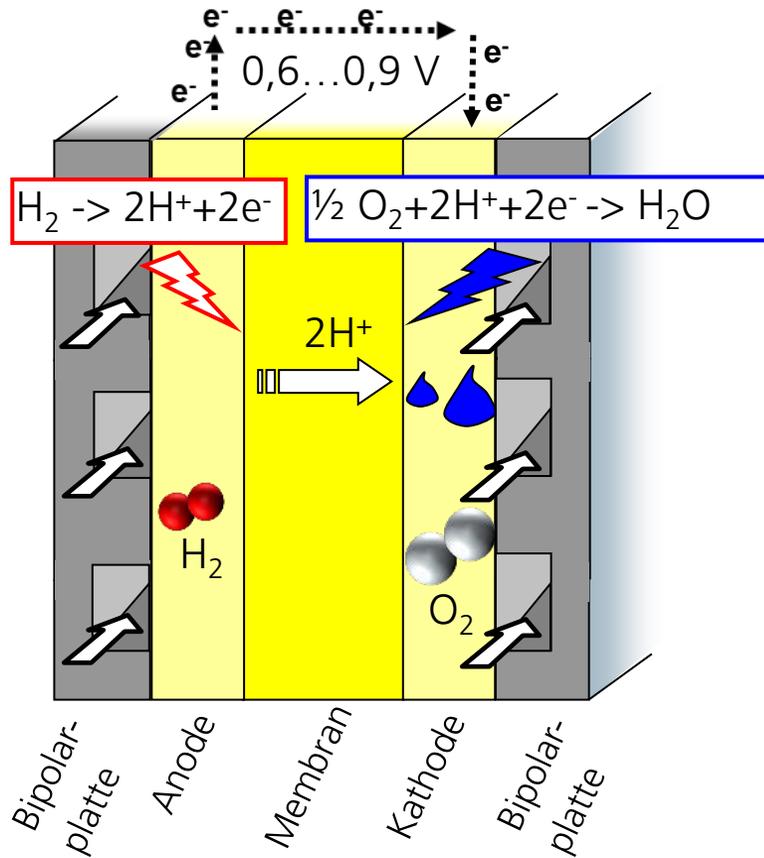
Wasserstoff und Brennstoffzelle

Direkte Umwandlung von chemischer in elektrische und thermische Energie



Die Brennstoffzelle

Von der Einzelzelle zum System



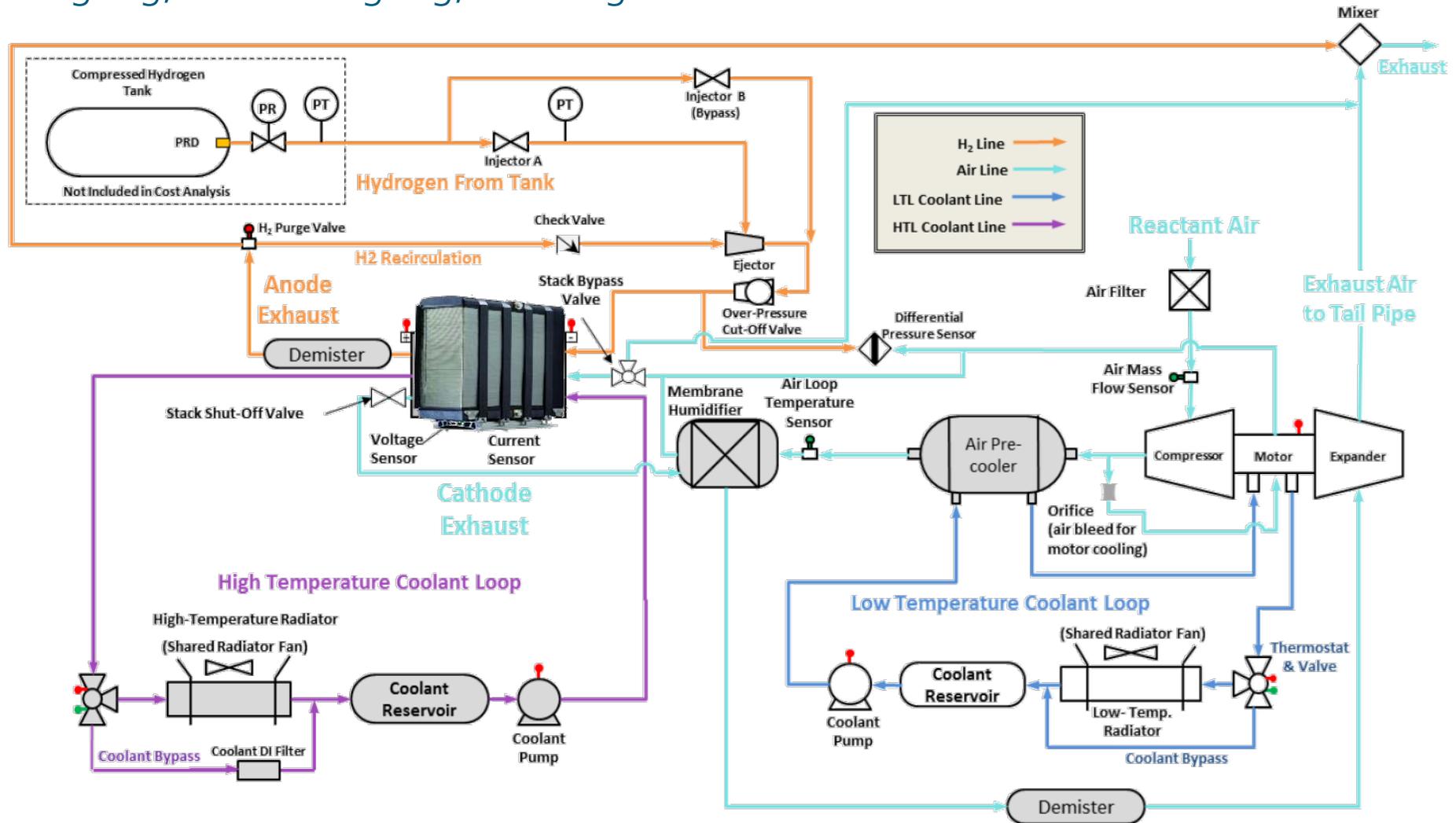
Brennstoffzelle



Brennstoffzellenstapel

Was wird für den Betrieb einer Brennstoffzelle benötigt?

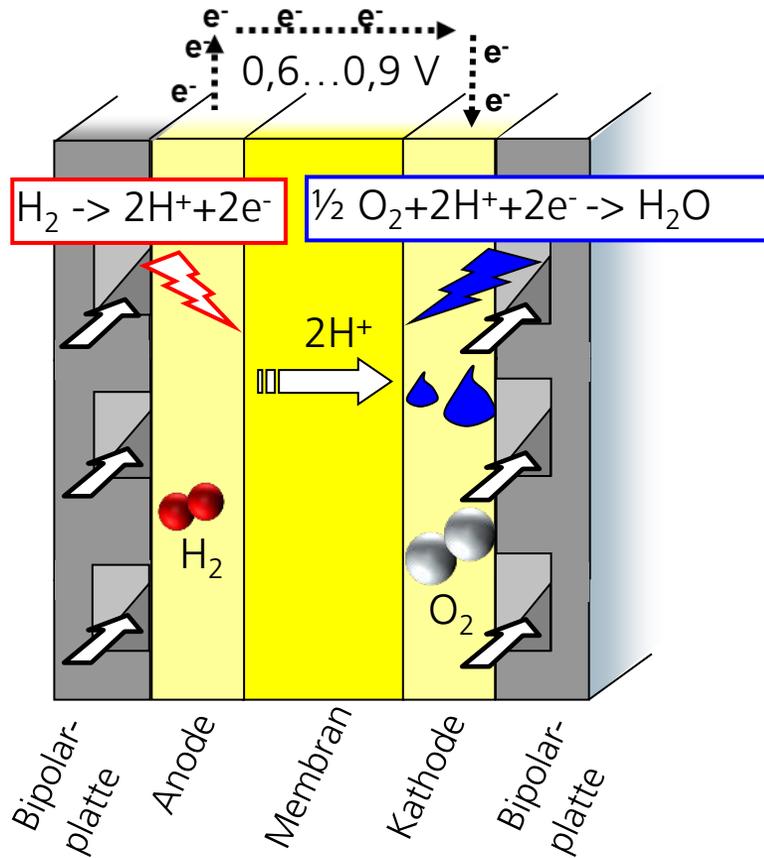
Wasserstoffversorgung, Luftversorgung, Kühlung



Quelle: B. D. James et al: Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update

Wasserstoff und Brennstoffzelle

Direkte Umwandlung von chemischer in elektrische und thermische Energie



Brennstoffzelle



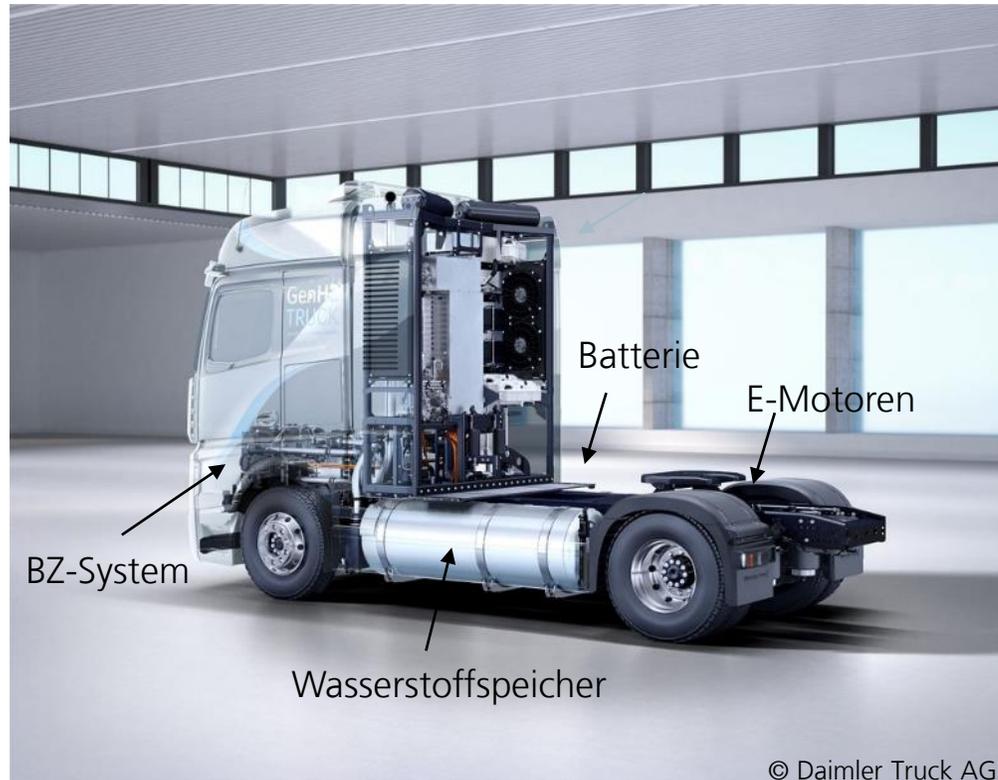
Brennstoffzellenstapel



Brennstoffzellensystem

Die Brennstoffzelle in der mobilen Anwendung

Brennstoffzelle und Batterie arbeiten zusammen



Hybrider Antriebsstrang

- Fahrtrieb durch Elektromotor
- Batterie unterstützt bei dynamischer Fahrt
- Brennstoffzelle kann schonend betrieben werden
- Rekuperation möglich
- Niedriger Verbrauch
- Hohe Reichweite
- Schnelle Betankung

Die Brennstoffzelle in der mobilen Anwendung

Leichte und schwere Nutzfahrzeuge

Große Bandbreite

- Kleintransporter
- Solo-Lkw
- Sattelzugmaschine

Einsatz im Fernverkehr interessant

- Große Reichweite ~1.000 km (flüssig-H₂)
- Schnelle Betankungszeit ~15 min
- Flexible Routenplanung
- Leise, vibrationsarm und stark
z.B. 460 / 660 kw Dauer- / Spitzenleistung
- Nahezu vollwertiger Diesel-Ersatz
- Keine schädlichen Emissionen



© Schaeffler (Daniel Karmann)



© Robert Bosch GmbH



© Stellantis Germany GmbH



© Quantron AG



© Hyundai Motor Deutschland GmbH



© Fraunhofer ISE



© Daimler Truck AG



© Nikola Corporation



© 2023 PACCAR Inc

Die Brennstoffzelle in der mobilen Anwendung

Brennstoffzellenautos und -kleintransporter



© H2 MOBILITY

Toyota Mirai II



© H2 MOBILITY

Hyundai Nexo



© H2 MOBILITY

Peugeot e-Expert Hydrogen



© BMW AG, München (Deutschland)

BMW iX5 Hydrogen



© Viritech

Viritech Apricale



© GreenGT

GreenGT H24

Die Brennstoffzelle in der mobilen Anwendung

ÖPNV

Schiene

- Geräuscharmer, emissionsfreier Betrieb
- Einsatz auf nichtelektrifizierten Strecken
- Hohe Reichweite, kurze Betankungszeit



Straße

- Flexibler Einsatz auch auf anspruchsvollen Routen
- Geräuscharmer, emissionsfreier Betrieb
- Abwärme für Fahrgastraum nutzbar



Die Brennstoffzelle in der mobilen Anwendung

Flugzeuge, Schiffe, Spezialfahrzeuge

Luftfahrt

- Kurz- und Mittelstrecke
- Propeller und Strahltriebwerke



© Airbus



© Universal Hydrogen Co



© H2FLY GmbH

Schifffahrt

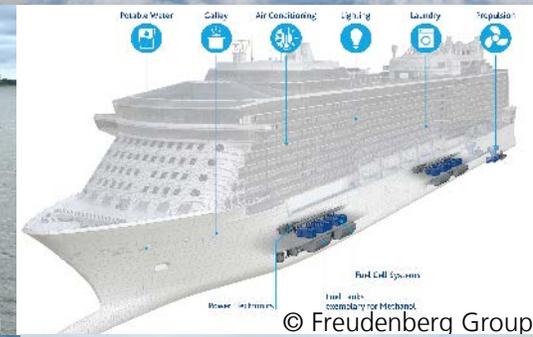
- Bordstromversorgung, Hafenbetrieb
- Binnenschifffahrt auch Hauptantrieb



© Norled AS



© Future Proof Shipping



© Freudenberg Group
© J C Bamford Excavators Ltd

Mobile Arbeitsmaschinen

- Bagger, Muldenkipper, Radlader
- Baustellen ohne Stromanschluss



© LADOG-Fahrzeugbau u.
Vertriebs-GmbH



© Anglo American plc



Zusammenfassung

Kernaussagen ...

1

Um den Klimawandel zu stoppen braucht es ein Energiesystem, das zu **100 % auf erneuerbaren Energien basiert**

2

Dieses Energiesystem benötigt einen **stofflichen Energieträger** für Import, Transport, Speicherung und Sektorenkopplung

3

In der Mobilität ermöglicht Wasserstoff **große Reichweiten und kurze Tankzeiten**, Änderungen im Nutzungsverhalten sind kaum nötig

4

Neben Pkw, Bussen, Zügen, Schiffen und Flugzeugen bietet vor allem der **Lkw Fernverkehr** gute Voraussetzungen für den Einsatz von Wasserstoff

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit

Stefan Keller, Ulf Groos, Kläre Christmann
stefan.keller@ise.fraunhofer.de
www.h2-ise.com
www.ise.fraunhofer.com