

Wasserstoff im Mobilitätsbereich – Zukunftsorientierte Forschungsthemen

Sebastian Bock, Viktor Hacker

Institute of Chemical Engineering and Environmental Technology
Graz University of Technology

PEFCs und Wasserstoff im Mobilitätssystem

- Aussichtsreichste Anwendungsszenarien:
 - Schwerverkehr / Busse
 - Arbeitsmaschinen
 - Kopplung Industrie – Verkehr
 - *Individualverkehr*

- Wasserstoffproduktionstechnologien und Brennstoffzellen
 - technologisch ausgereift und industriell verfügbar

**Permanente technologische (Weiter-)Entwicklung
in spezifischen Themengebieten**



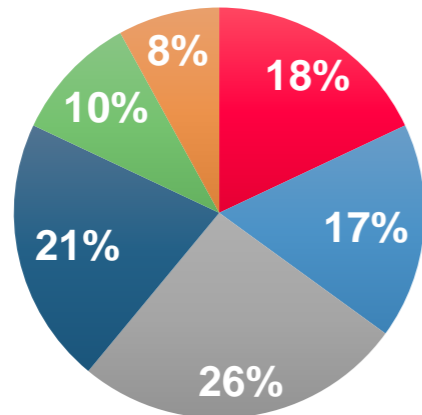
© Lunghammer / TU Graz

FCEVs im Mobilitätssystem

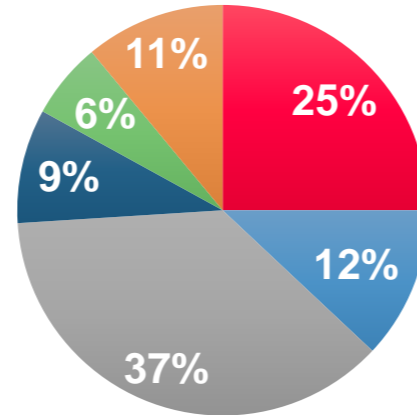
Welche Edelmetalle werden in PEFCs eingesetzt?

Nutzung von Edelmetallen in PEFCs

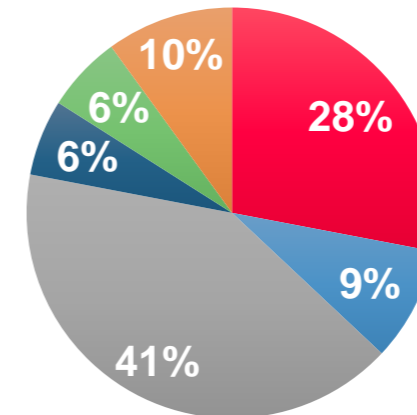
1000 Systeme / Jahr



100 000 Systeme / Jahr



500 000 Systeme / Jahr



- Bipolarplatten
- Membran
- Katalysator
- GDLS
- MEA-Frame und Dichtungen
- Balance of Stack

Anteil der BZ-Komponenten an den Produktionskosten für ein 80 kW PEFC System mit $0.125 \text{ mg}_{\text{Pt}} \text{ cm}^{-2}$

Quelle: US DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2017

Produktionskosten FCEV Stack 2025:

43 \$/kW (100.000 #/Jahr)

36 \$/kW (500.000 #/Jahr)

<30 \$/kW (final)

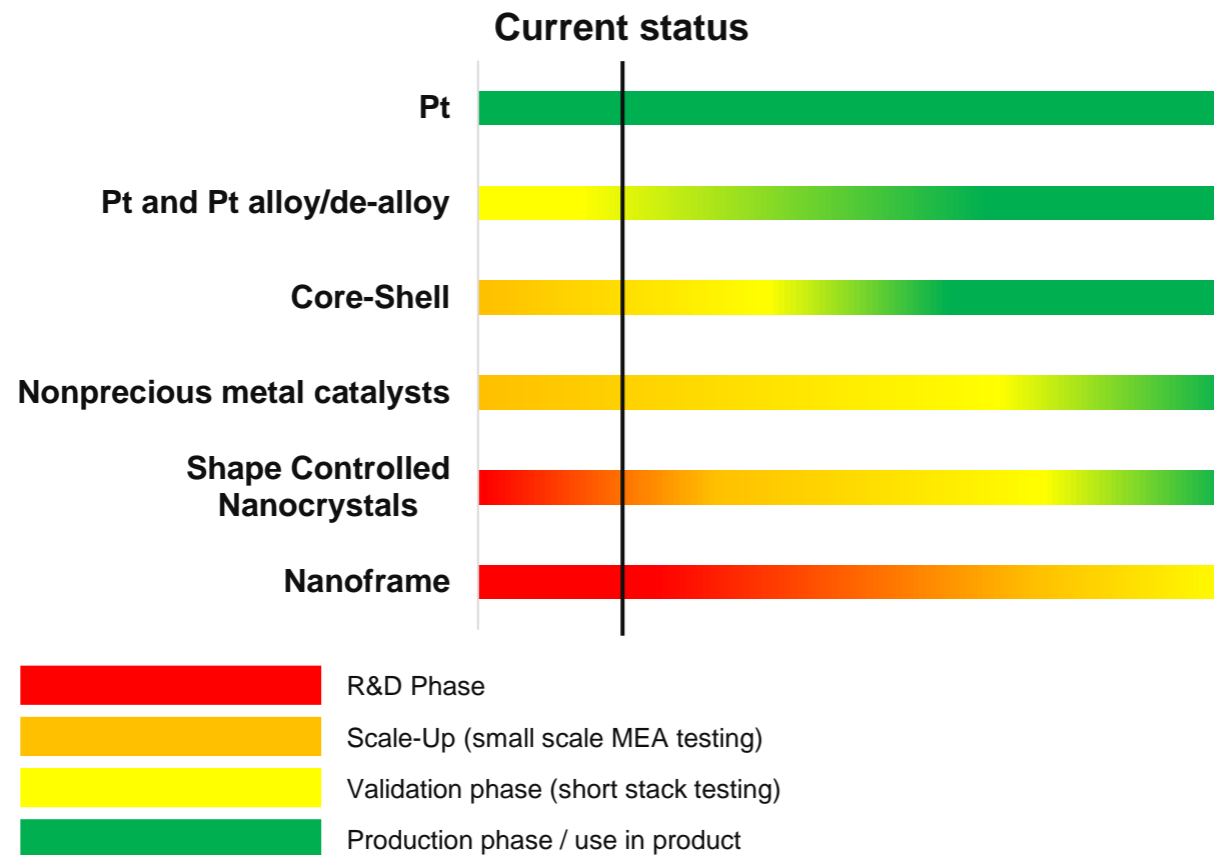
Materialeinsatz: $\sim 20 \text{ g}_{\text{Pt}}$ pro FCEV ($0,2 \text{ mg}_{\text{Pt}}/\text{cm}^2$, $\sim 0,4 \text{ g}_{\text{Pt}}/\text{kW}$)

Platinvorkommen: $\sim 30 \text{ €/g}_{\text{Pt}}$ (Weltmarktpreis 10/2020¹); Weltweite Förderung ca. $190 \text{ t}_{\text{Pt}}$ p.a.²

¹ Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/668132/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-platin-weltweit-monatlich/>

² US National Minerals Information Center, <https://www.usgs.gov/centers/nmic/platinum-group-metals-statistics-and-information>

Nutzung von Edelmetallen in PEFCs

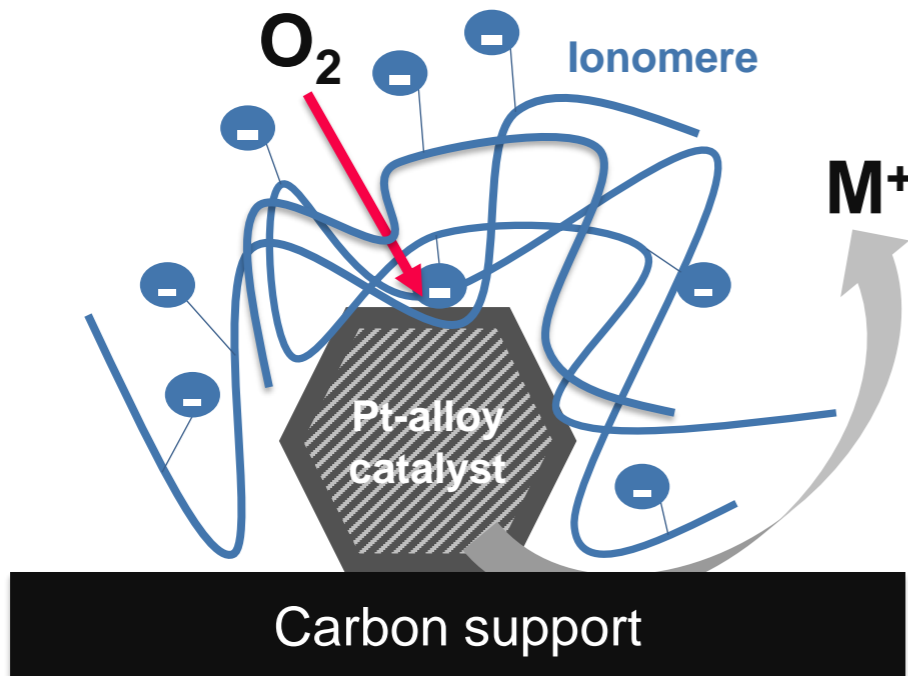


Mittelfristige Lösungen zur Reduktion des Pt-Gehaltes:

- Pt-Alloy/De-Alloy
- Core-Shell Lösungen
- Nicht-Edelmetall Katalysatoren

Quelle: Banham, D. and Ye, S., ACS Energy Lett. (2017), 2 (3), 629–638

Reduktion von Edelmetallen



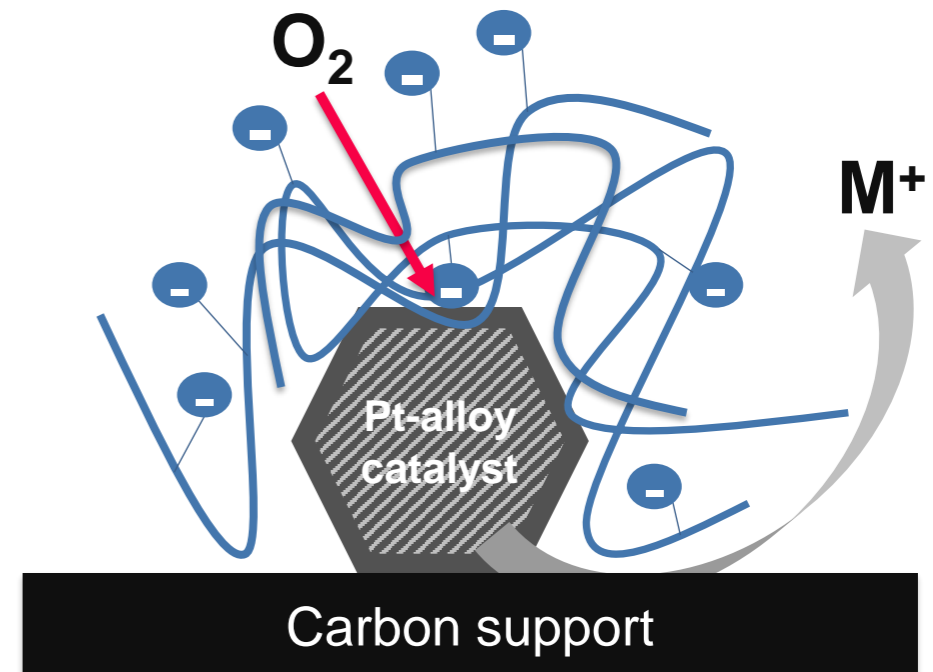
© TU Graz

- Der Platinpreis erhöht sich durch die steigende Nachfrage
- Für Pt-alloy/De-alloy und Core-Shell Ansätze
 - ist es entscheidend, das unedlere Metall zu stabilisieren.
 - erfordern eine Evaluierung hinsichtlich nachteiliger Auswirkungen gelöster Metallionen auf andere Komponenten.
- Optimierung der Aktivschicht zeit- und kostenintensiv

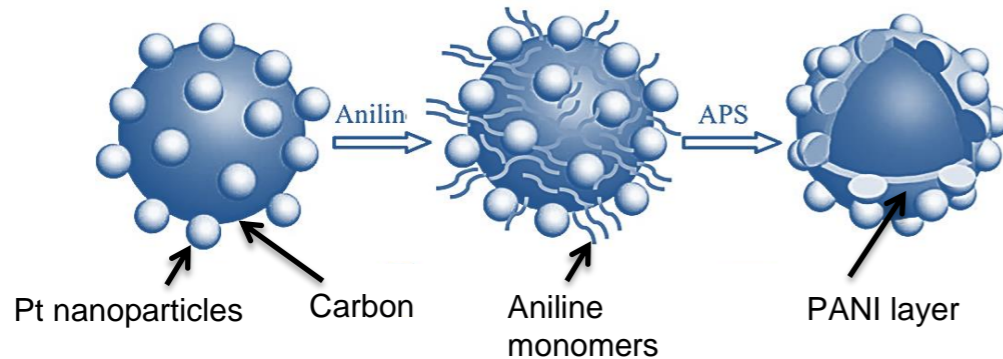
Forschungsfelder

PtCu/C Alloy/De-alloy als Kathodenkatalysator

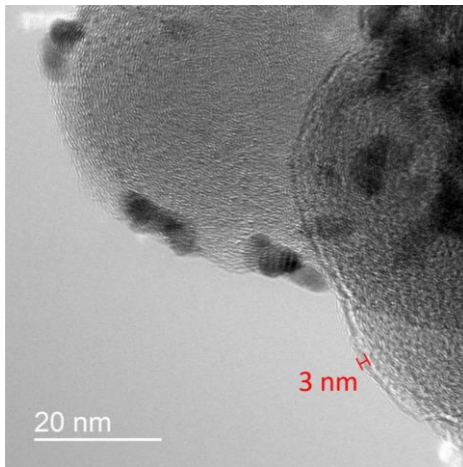
- Einsatz von PtCu/C als Alloy/De-alloy
 - Übertrifft Platin-Referenzmaterial im Betriebsbereich von FCEVs
 - Eine erhöhte Aktivität des Katalysators wurde in Einzelzellentests trotz reduzierter Pt-Beladung (-30%) nachgewiesen.
- Die gefertigten MEAs benötigen somit nachweislich deutlich weniger Platin verglichen mit konventionell gefertigten MEAs.



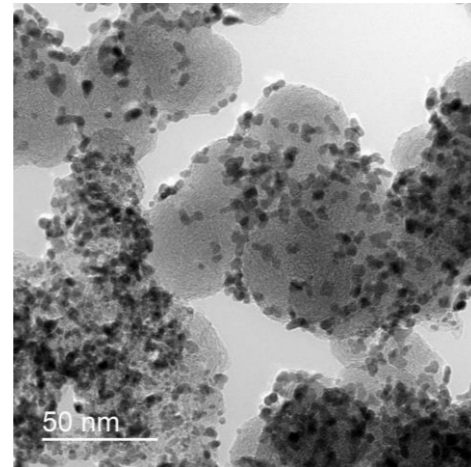
Forschungsfelder Pt/C/PANI Katalysatoren



© TU Graz



© TU Graz

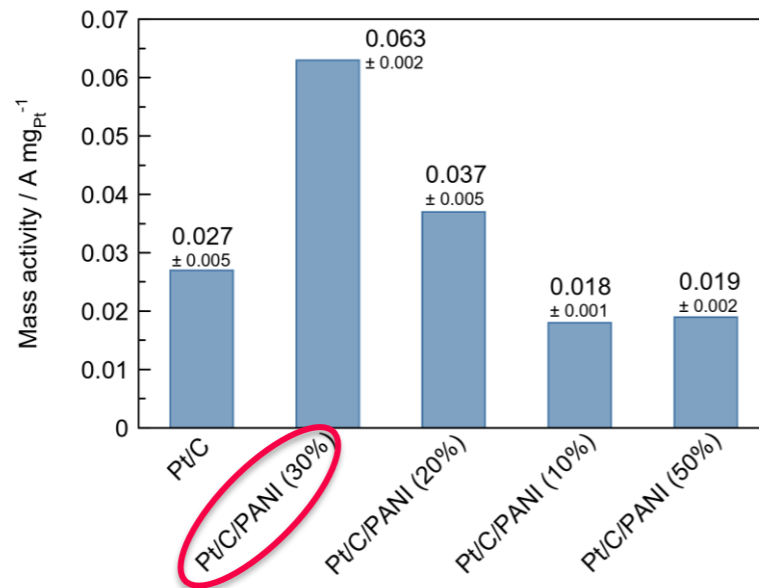


- Funktionalisierte PANI-Katalysatoren (Pt/C/PANI)
 - Hohe elektrokatalytische Aktivität
 - Hohe Stabilität

- PANI verhindert den direkten Kontakt zwischen Kohlenstoffsupport und Elektrolyt
 - Verbesserte Interaktion zwischen Pt-C
 - Räumliche Trennung von Pt

Forschungsfelder

Pt/C/PANI Katalysatoren



- Funktionalisierte PANI-Katalysatoren (Pt/C/PANI)
 - Hohe elektrokatalytische Aktivität
 - Hohe Stabilität
- PANI verhindert den direkten Kontakt zwischen Kohlenstoffsupport und Elektrolyt
 - Verbesserte Interaktion zwischen Pt-C
 - Räumliche Trennung von Pt

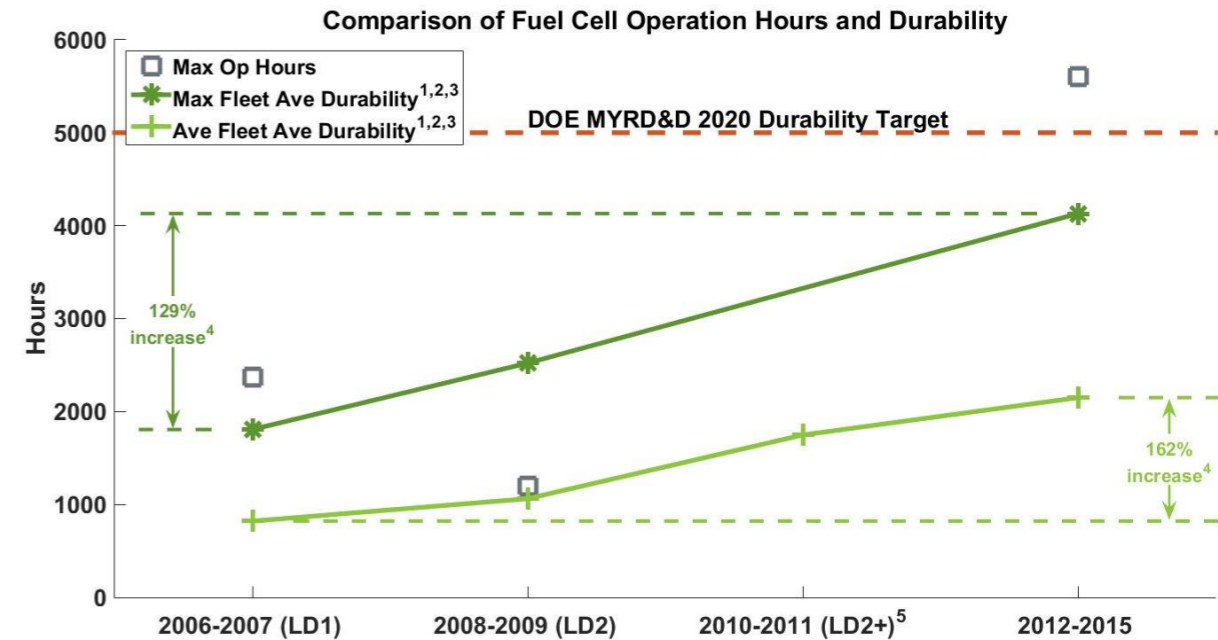
© TU Graz

FCEVs im Mobilitätssystem


Welche Faktoren beeinflussen die Lebensdauer der PEFCs?

Degradationsmechanismen von Brennstoffzellen

- Die typ. Lebensdauer eines Stacks beträgt dzt. ~ 4k Stunden
- **Ziele (US DOE):**
 - PKW: 5k Stunden (2023)
8k Stunden (langfristig)
 - LKW: 25k Stunden (2030)
30k Stunden (langfristig)



1. Durability based on voltage degradation to 10% lower than beginning of life voltage. 10% voltage drop level is a DOE metric for assessing fuel cell durability.
2. Projections using on-road data are calculated at approximately 55%-65% rated stack current.
3. 10% voltage drop is NOT an indication of an OEM's end-of-life criteria and projections do not address catastrophic stack failure.
4. Percent increases are calculated relative to Learning Demonstration 1 (LD1) (2006-2007).
5. Maximum operational hours not reported in Learning Demonstration 2 continuation (LD2+) (2010-2011).

 NREL cdp_fccev_31
Created: May-03-16 12:38 PM | Data Range: 2009Q1-2015Q4
Included Vehicles: Partial

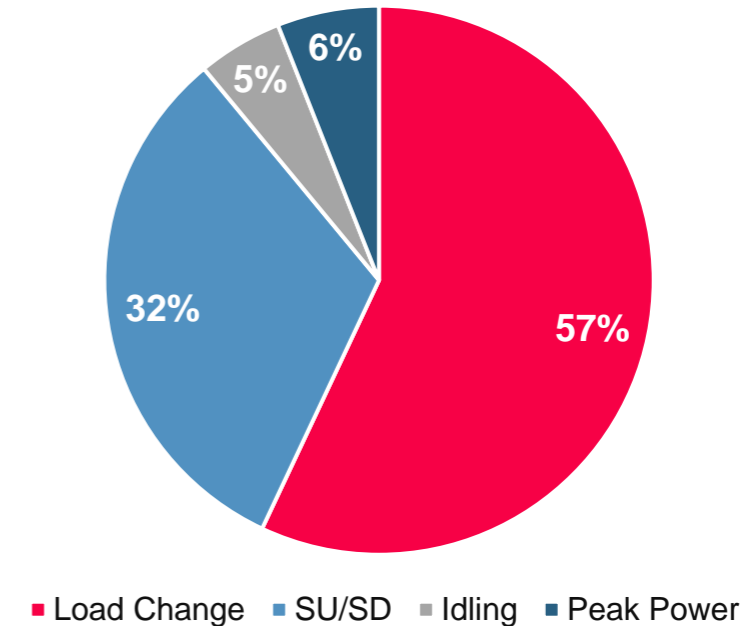
Zeitliche Entwicklung der Lebensdauer von FCEV Flotten.

Quelle: NREL; Fuel Cell Electric Vehicle Durability and Fuel Cell Performance; March 2019.

Degradationsmechanismen von Brennstoffzellen

Degradation in FCEVs wird vorwiegend verursacht durch:

- **Start-Stop-Zyklen** bei $T < 0^{\circ}\text{C}$
 - Ablösung der aktiven Schicht durch Eisbildung
 - Kohlenstoffsupport-Degradation
 - Katalysatordegradation
- **Lastsprünge**
 - Kohlenstoffsupport-Degradation
 - Katalysatordegradation



Anteil der degradationsverursachenden Betriebszustände.

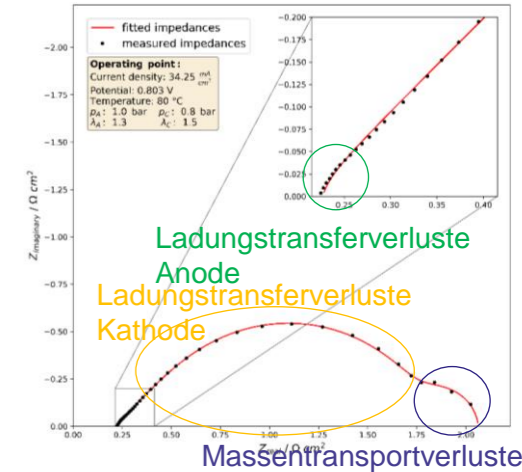
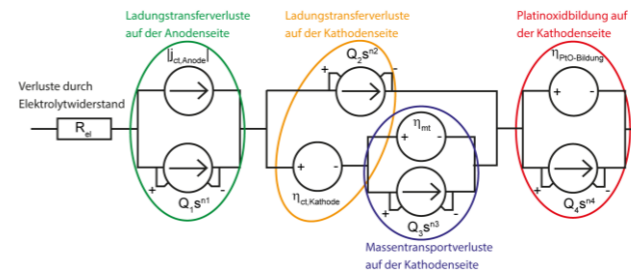
Quelle: AVL Webinar; Fuel Cell – Durability Challenges for Commercial Applications

Forschungsfelder

In-situ Charakterisierung des Betriebszustands

Impedanzspektroskopie (EIS)

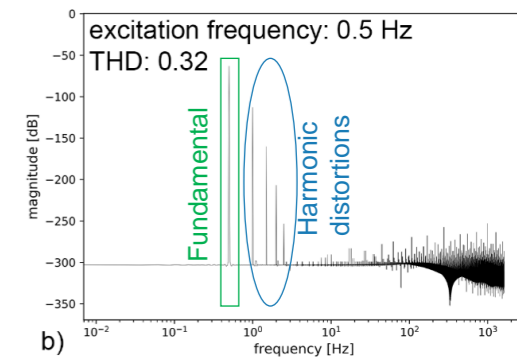
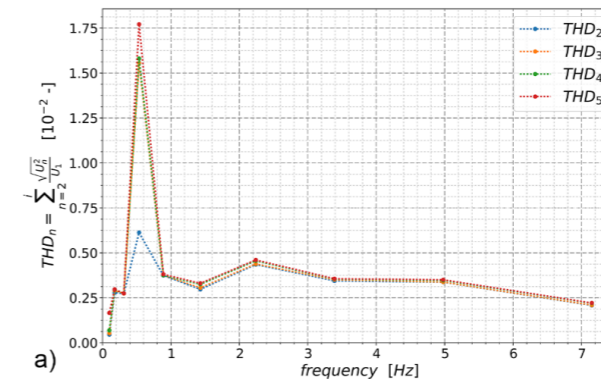
- Quantifizierung unterschiedlicher Verlustmechanismen
- Parametrisierung eines dynamischen Großersatzschaltbildes (dLSEC) zur Simulation transienter Vorgänge (z.B. Flutung der Anode/Kathode)



Klirrfaktor-Analyse (THDA)

- schadhafte Betriebsbedingung verursachen Nichtlinearitäten in der Polarisationskurve
- Harmonische Verzerrung des Antwortsignals
- Sehr schnelle, unkomplizierte Methode um schadhafte Betriebsbedingungen zu identifizieren

Nyquist-Diagramm und Ersatzschaltbild einer Brennstoffzelle.



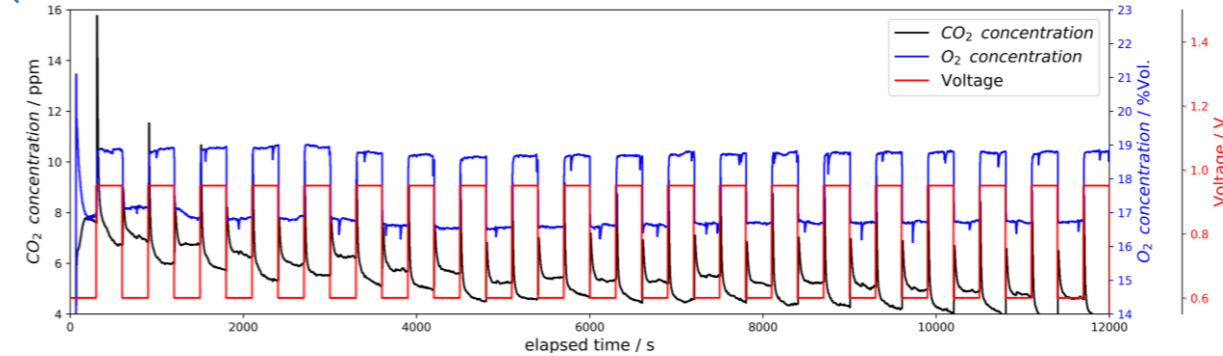
(a) Klirrfaktoranalyse bei Austrocknung der Anode und Kathode eines Brennstoffzellenstapels; (b) Simulationen mit dLSEC.

Forschungsfelder In-situ Charakterisierung des Betriebszustands

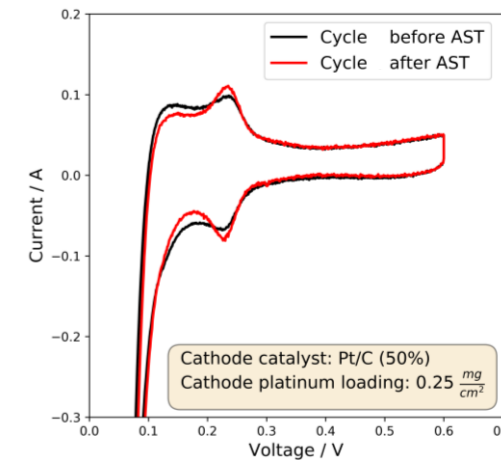
Weitere Charakterisierungsmethoden

- Online-Abgascharakterisierung
 - Detektion von Kohlenstoffsupport-Degradation durch CO₂ im ppm-Bereich

- In-situ Cyclovoltammetrie
 - Bestimmung der aktiven Oberfläche
 - Detektion von Katalysatordegradation



**CO₂ Konzentration bei Lastwechselzyklen:
0.6 V ↔ 0.95 V (5 min) führt zu Kohlenstoffdegradation.**



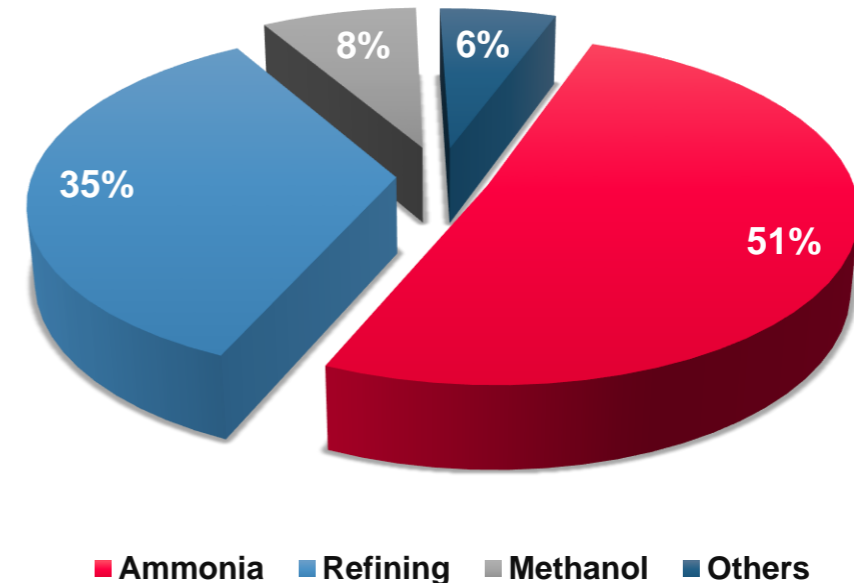
**Zyklische Voltammogramme vor und nach Stresstest (AST)
0.6 V ↔ 0.95 V (5 min) charakterisiert Katalysatordegradation.**

Wasserstoff für das Mobilitätssystem

Wie “grün” ist ein wasserstoffbasiertes Mobilitätssystem?

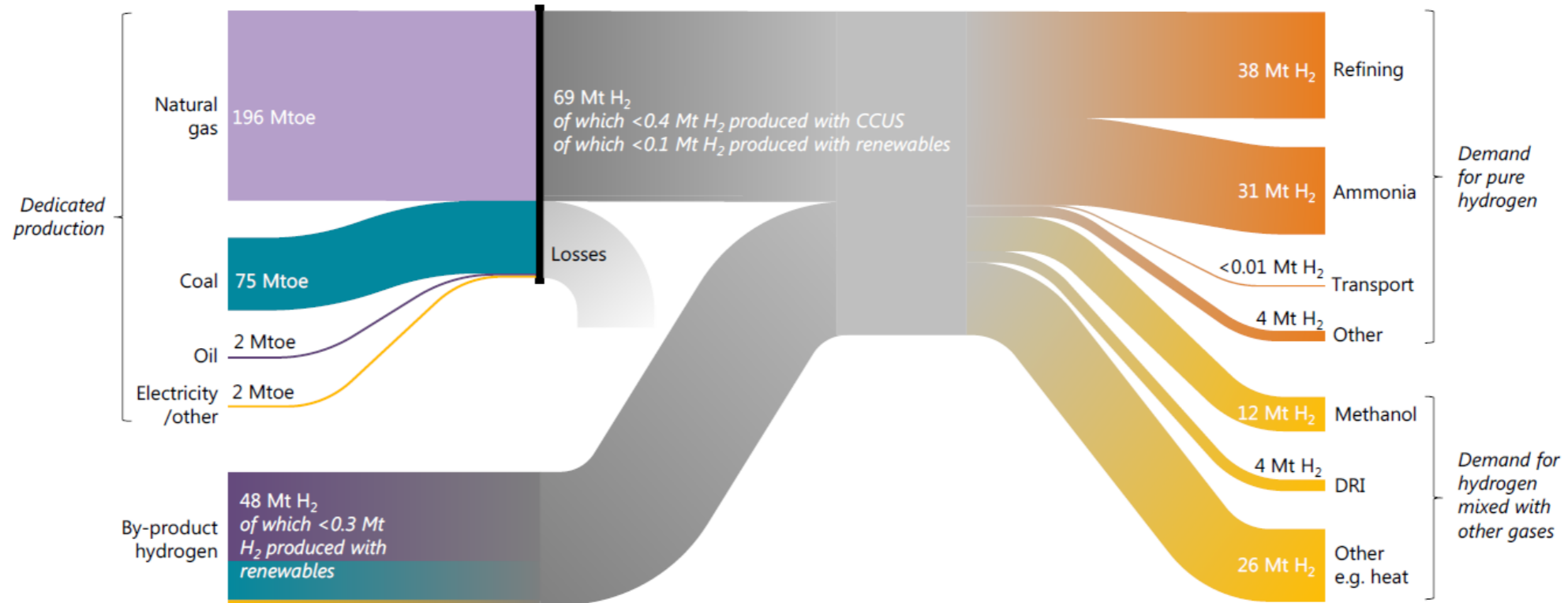
Wasserstoffproduktion heute

- $70 \cdot 10^6$ Tonnen Wasserstoff pro Jahr (dezidiert, 2019)
- Energieverbrauch ~ 11 EJ p.a.
- **Entspricht $\sim 2\%$ des weltweiten Energieverbrauchs**
- H_2 -Nutzung praktisch ausschließlich in industriellen Anwendungen



Source: IEA (2019), *The Future of Hydrogen*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

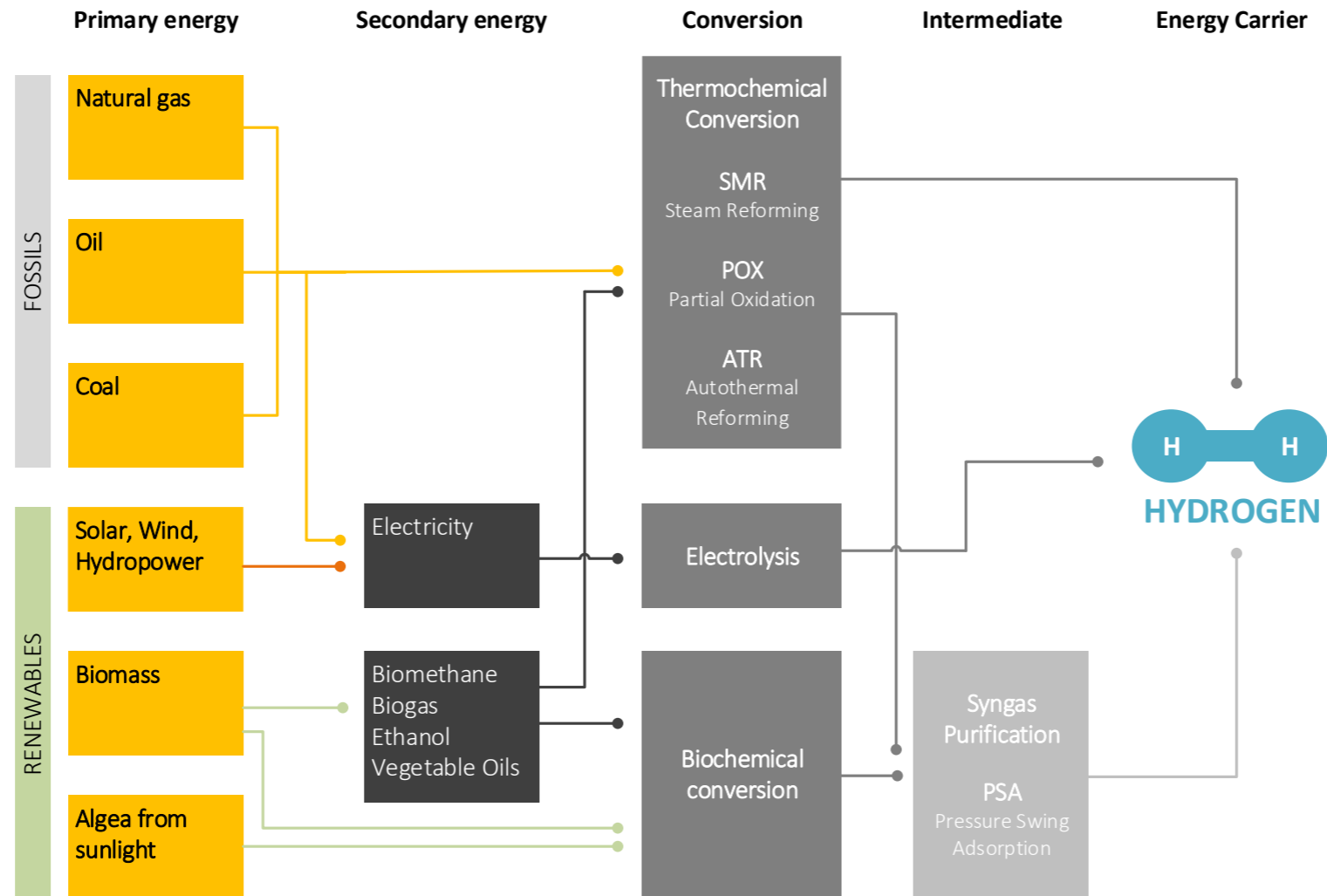
Wasserstoffproduktion heute



Source: IEA (2019), *The Future of Hydrogen*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

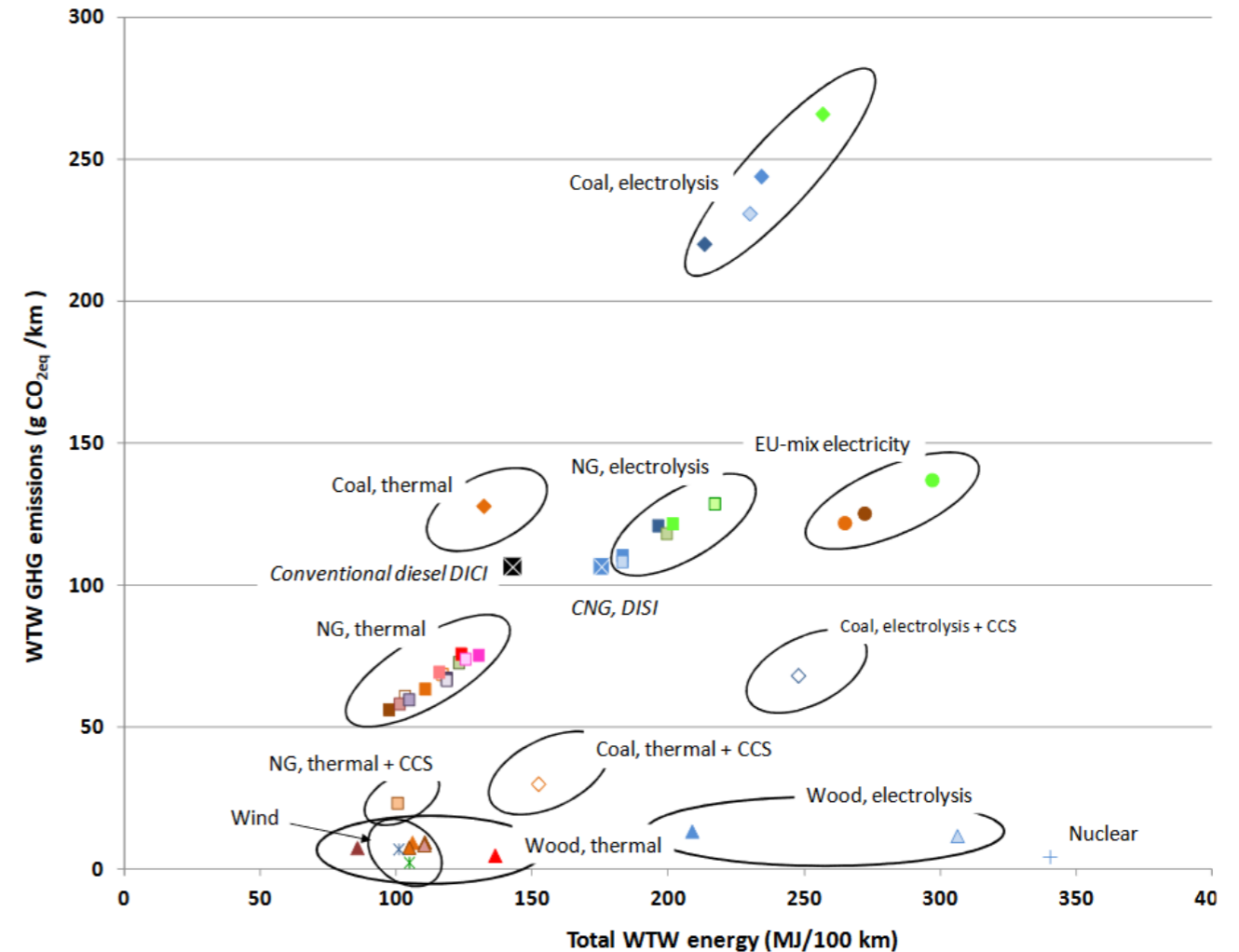
6% des Erdgases und 2% der Kohle (weltweit jährlich) werden zur Wasserstoffherstellung genutzt¹

Methoden zur Wasserstoffproduktion



CO₂-Emissionen von FCEVs

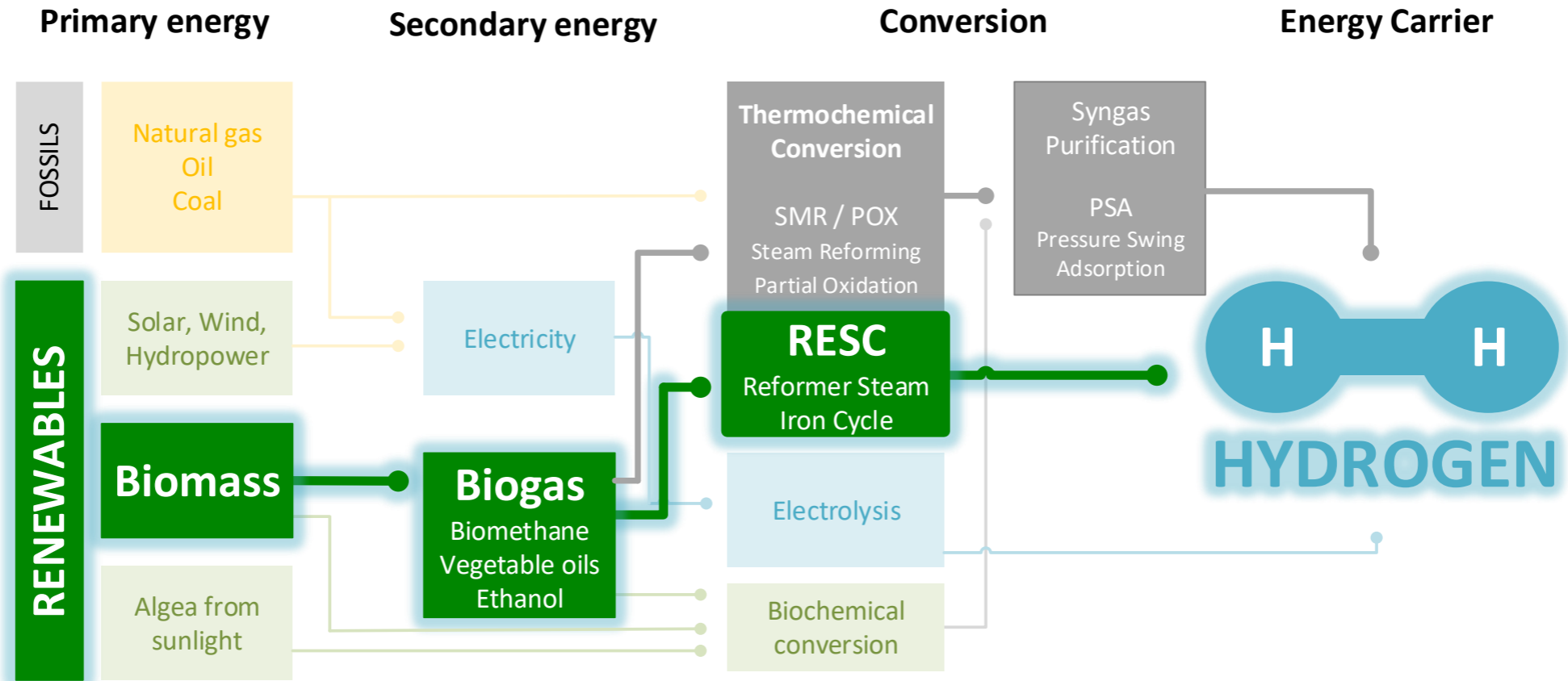
- CO₂-Emissionen sehr stark **abhängig von der Wasserstoffherstellungsmethode**
- **Low-CO₂ Pathways (<50 g_{CO2,eq}/km)**
- Renewable hydrogen:
 - H₂ aus Biomasse
 - Elektrolyse (Wind / PV)
- Low carbon hydrogen:
 - CH₄-Reforming + CCS
 - Kohlevergasung + CCS
 - Elektrolyse (Nuklear)



Source: JRC, Technical Reports – Well to tank Report v4.a (2014).
https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC85329/wwt_report_v4a%20march%202014_final.pdf

Forschungsfelder

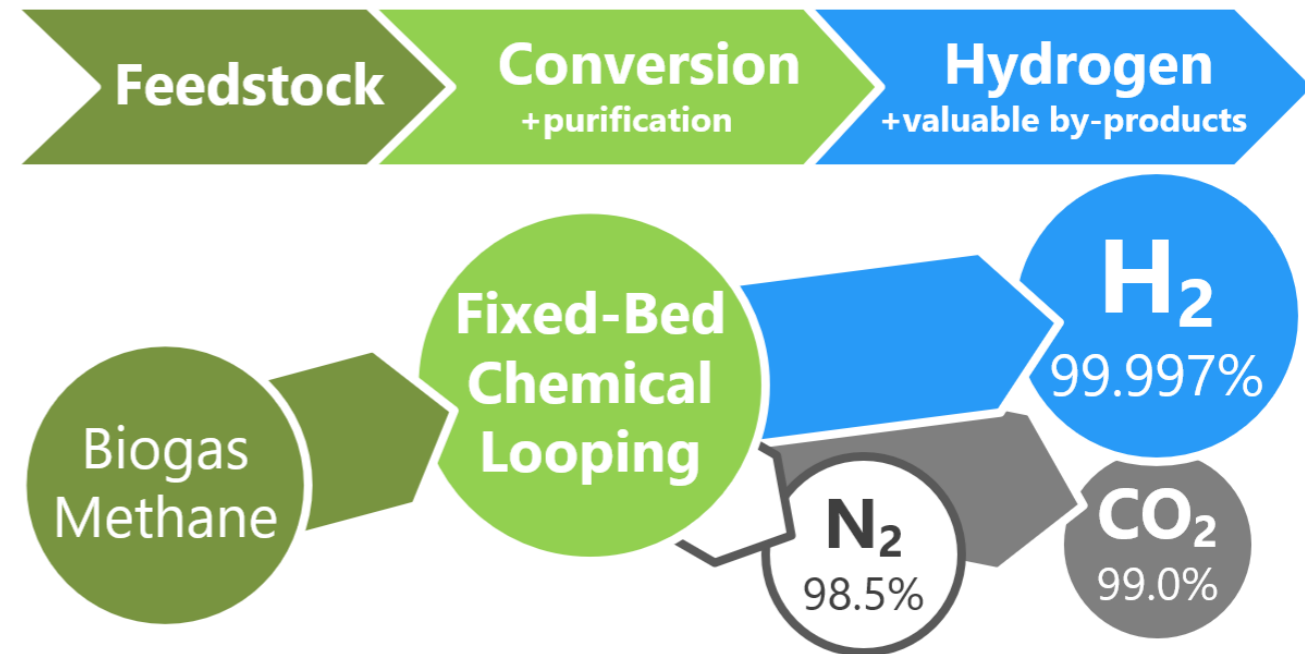
H₂-Erzeugung aus Biomasse mit negativem-CO₂ Footprint



Forschungsfelder

H₂-Erzeugung aus Biomasse mit negativem-CO₂ Footprint

- Dezentrale Versorgung mit Hochdruckwasserstoff bis 100 bar an der Tankstelle
- Einsatz lokal verfügbarer Ressourcen und Reststoffe
- Hohe H₂-Reinheit für FCEVs (99,999%; 5.0)
- **Negative CO₂-Emissionen im Gesamtlebenszyklus möglich**



Reprinted from: **Bock et al., 2020**, DOI: [10.1039/C9SE00980A](https://doi.org/10.1039/C9SE00980A)
Published by The Royal Society of Chemistry under [CC BY 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/)

PEFCs und Wasserstoff im Mobilitätssystem

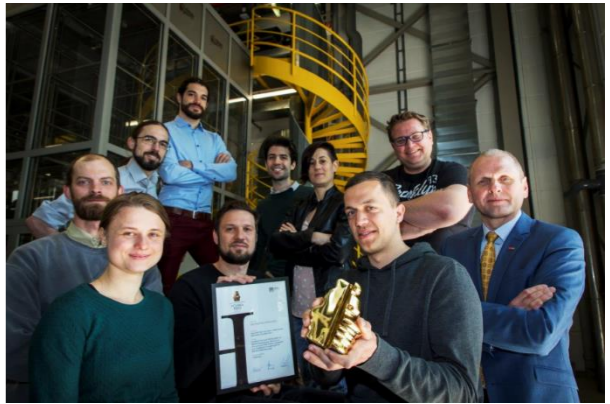
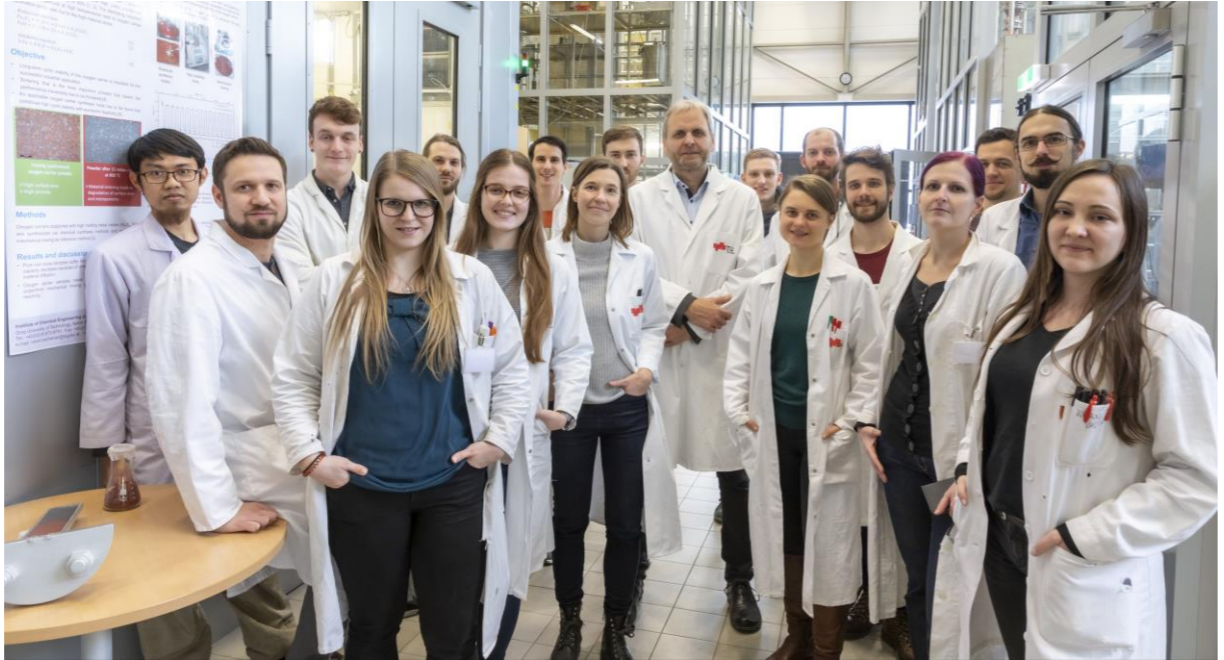
- Dezentrale Verfügbarkeit von Wasserstoff sicherstellen
- Entwicklung und Roll-Out von nachhaltigen Wasserstoffproduktionstechnologien
- Entwicklung von Lösungsansätzen für spezifische Herausforderungen von FCEVs
 - Verringerung des Ressourcenbedarfs
 - Erhöhung der Lebensdauer

Permanente technologische (Weiter-)Entwicklung in spezifischen Themengebieten



© Lunghammer / TU Graz

Working Group Fuel Cell and Hydrogen @ CEET



Public funding and support is gratefully acknowledged:



 Federal Ministry
Republic of Austria
Climate Action, Environment,
Energy, Mobility,
Innovation and Technology

 Federal Ministry
Republic of Austria
Agriculture, Regions
and Tourism

HOUSKA award 2017
State Prize Mobility 2017

Fotos: © Lunghammer / TU Graz, Rechts unten: © Zinner / BMVIT

Wasserstoff im Mobilitätsbereich – Zukunftsorientierte Forschungsthemen

Sebastian Bock, Viktor Hacker

Institute of Chemical Engineering and Environmental Technology
Graz University of Technology