

TU GRAZ
SCIENCE FOR
FUTURE

2021: KLIMA UND ENERGIE

**Mobilität & Produktion:
VOLLE ENERGIE FÜR
DEN KLIMASCHUTZ**

Viktor HACKER
Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021



Bildquellen: Lunghammer – TU Graz, Stadt; metamorworks – Anzeibach, Büro; Emilien Heterogger

www.tugraz.at/go/scienceforfuture

MOBILITY & PRODUCTION
TU Graz

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

2 Inhalt

- Fossiler Energiebedarf und CO₂-Emissionen
- Wasserstoff als Energieträger
- Transport erneuerbarer Energie
- Wasserstofferzeugung & Wasserstoffnutzung
- Wasserstoff in der Produktion
- Brennstoffzelle – F&E

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

MOBILITY & PRODUCTION
TU Graz

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

3 Fossiler Energiebedarf und CO₂-Emissionen weltweit

Jährlicher Verbrauch von Öl, Kohle und Erdgas

- 3,23·10¹⁰ bbl Erdöl
- 3,82·10¹² m³ Erdgas
- 6,01·10¹² t Hartkohle

Entspricht pro Einwohner und Jahr

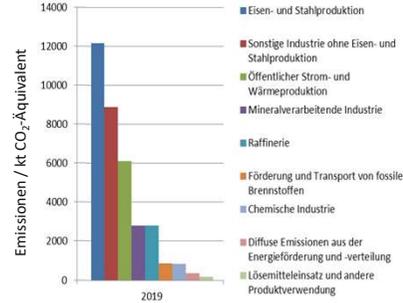
- Erdöl 6750 kWh
- Erdgas 4900 kWh
- Hartkohle 5330 kWh

Entspricht einer kontinuierlichen fossilen Heizleistung

- ca. 2 kW/Person

Weltweite CO₂-Emissionen durch fossile Brennstoffe

- 4350 kg pro Person



Treibhausgasemissionen in Österreich, statista, Statistical Review of World Energy 2021, 70th edition

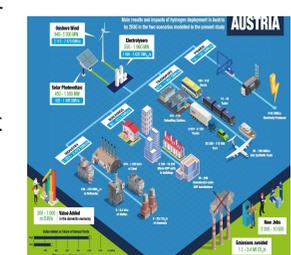
Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

MOBILITY & PRODUCTION
TU Graz

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

4 Wasserstoff als Energieträger

- aus verschiedenen Energieträgern herstellbar
- höchster Energiegehalt aller Kraftstoffe
- kann emissionsfrei verstromt werden
- zur Speicherung von Energie (GWh) geeignet
- Einsatz zur Netzstabilität und Erhöhung der Auslastung von Stromerzeugern
- Ausgangsstoff für die chemische Industrie
- Einsatz in einer Vielzahl von Industrien (Stahl, Zement, Ammoniak usw.)



https://www.fch.europa.eu/

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

MOBILITY & PRODUCTION
TU Graz

5 Herausforderungen für den Energieträger Wasserstoff

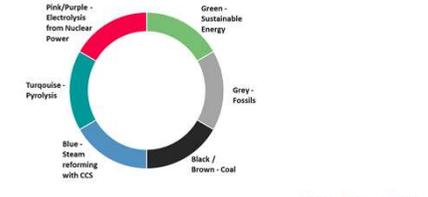
- ❑ **Herstellung:** Senkung der Kosten und weitere Steigerung der Effizienz von Technologien zur Herstellung von Wasserstoff aus Wasser, Biomasse, fossilen Brennstoffen und Abfällen.
- ❑ **Transport von großen Mengen:** innovative Technologien und Konzepte für den Wasserstofftransport (Verflüssigung, chemische Träger, usw.)
- ❑ Erhöhung der **Speicherkapazität von Wasserstoffspeichersystemen**
- ❑ Speicherung von Wasserstoff im **großen Maßstab**
- ❑ Kostengünstigere und langlebige **Brennstoffzellen (Massenfertigung)**
- ❑ Effiziente und emissionsarme **Wasserstoffturbinen**

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

6 Wasserstoffherzeugung gegenwärtig

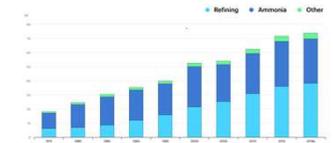
Wasserstoff 70.000.000 Tonnen H₂/a
(ca. 2.5 % der weltweiten Energieproduktion von 11 EJ/a)

- > 70% aus Erdgas
- ca. 25 % aus Kohle
- geringer Anteil aus Elektrizität



Verwendung von Wasserstoff

- Raffinerien
- Ammoniakherstellung
- Basischemikalien



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

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

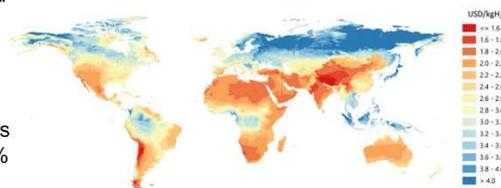
7 Kosten der Wasserstoffproduktion

“Derzeit kostet Wasserstoff aus erneuerbaren Energien etwa 5 \$/kg“

Ziel:

“... die Kosten für sauberen Wasserstoff innerhalb eines Jahrzehnts um 80 % \$/kg zu senken.“

Wasserstoffkosten aus hybriden Solar-PV- und Onshore-Windsystemen auf lange Sicht



US DOE, The Hydrogen Shot, 2021

IEA (2019). The Future of Hydrogen. IEA, Paris

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

8 Kosten des Transports von (erneuerbarer) Energie

5000 km Transport

US(1990)\$/toe

Erdöltanker ca.	7
Erdölpipeline ca.	25
Kohle per Frachter	23
LNG per Tanker	22
Erdgaspipeline	90
Wasserstofftanker fl.	150
Wasserstoffpipeline	140



• Repräsentative Konsumregion
• Repräsentative Energiebereitstellungsregion

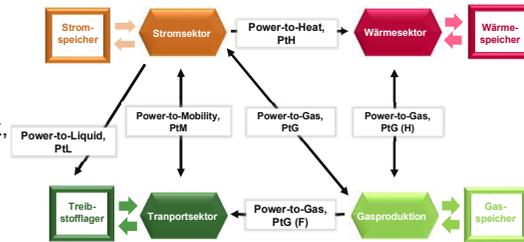
Saad, Lewis and McFarland. *Energy Environ. Sci.*, 2018, 11, 489
Takeshita and Yama. *Energy Policy*, 2008, 36, 8
Image adapted from OSevno.

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

9 Power-to-X (PtX)

Speicherung oder Nutzung von erneuerbarem Strom:

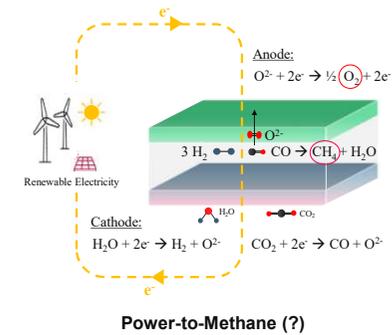
- ❑ **Power-to-Fuel** (Wasserstoff, Methan, Methanol, Ammoniak, Syngas, etc.)
- ❑ **Power-to-Chemicals** (Sektorkopplung - stoffliche Nutzung)
- ❑ **Power-to-Heat (PtH)**



10 Power-to-X (PtX)

Speicherung oder Nutzung von erneuerbarem Strom:

- ❑ **Power-to-Fuel** (Wasserstoff, Methan, Methanol, Ammoniak, Syngas, etc.)
- ❑ **Power-to-Chemicals** (Sektorkopplung - stoffliche Nutzung)
- ❑ **Power-to-Heat (PtH)**



11 Abfackelung von Erdgas aus der Ölgewinnung

- ❑ Auf ca. 7.500 Standorten werden ca. 143 Milliarden Kubikmeter Gas abgefackelt (NASA/NOAA)
- ❑ Entspricht etwa 25% des europäischen Erdgasbedarfs
- ❑ Wert zu Marktpreisen: ca. 20 Mrd. US\$

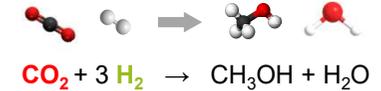


IEA (2020). Flaring Emissions. IEA. European natural gas supply-demand balance
Elvidge, Zhixin and Baugh et al., *Energies*, 2016, 9, 14

12 Verflüssigung von Brenngasen: **Methanol**

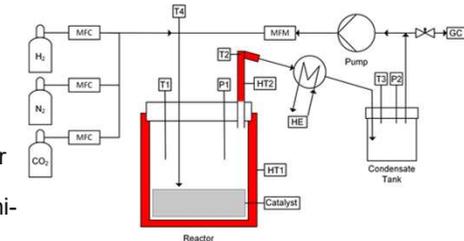
Herausforderung:

- Oxidation von Methan zu Methanol in einem einstufigen Verfahren



Laufende Arbeiten:

- Loop-Reaktorkonzept
- Cu/MgO Katalysatoren: aktiv, selektiv, robust
- Entwicklung von Katalysatoren für Hydrierung von CO₂
- Flexibilität in H₂ Zufuhr durch semi-kontinuierlichen Prozess

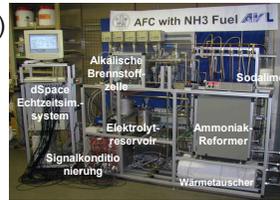


13 Bindung von Wasserstoff an Stickstoff: Ammoniak

- Eine der meist produzierten Chemikalien 150 Mt/a
- Haber-Bosch Verfahren (400-500 °C, 150-300 bar)
- ca. 1,4% des Weltenergiebedarfs

Ammoniak als Energieträger

- unter Druck flüssig (8 bar)
- keine Kohlendioxidemission
- Reaktionsprodukte: Wasser und Stickstoff

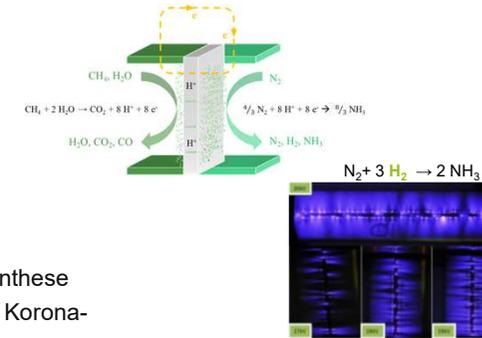


Laborprüfstand TU Graz (2000)

14 Nachhaltige Ammoniakproduktion

Herausforderung

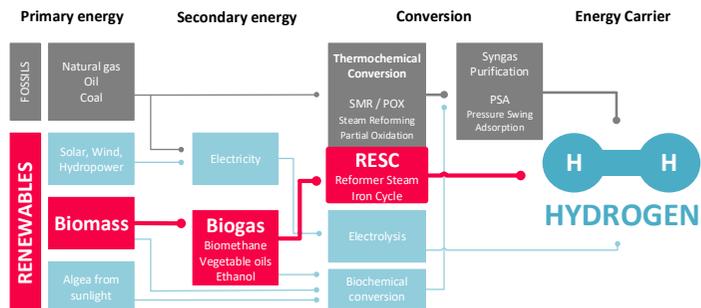
- umweltverträglich
- effizient
- kostengünstig



Technologieoptionen

- elektrochemische Synthese
- Plasmareaktoren mit Korona-Entladung

15 Wasserstoffherzeugung: der RESC Prozess



16 RESC Prozess (Chemical Looping Hydrogen)



Zweistufiges Verfahren (Reformer Steam Iron Cycle)

- I. Reduktion mit Synthesegas
- II. Oxidation mit Dampf

- Hochreiner Wasserstoff ohne nachgeschaltete Aufbereitung
- Wirkungsgrade von bis zu 75%

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

17 Demonstration eines 10 kW Laborsystems

Forschungsziele:

- Hochreiner Wasserstoff (>99,999%) ohne nachgeschaltete Aufreinigung
- Steigerung der Prozesseffizienz
- Bestimmung der kritischen Prozessschritte

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

18 Demonstration eines 10 kW Laborsystems

Ergebnisse:

- Stabile Wasserstoffproduktion über 100+ Zyklen
- Gute Übereinstimmung mit Simulationsdaten
- Hohe Wasserstoffreinheit >99,998% aus synthetischem Biogas einschließlich spezifischer Biogasverunreinigungen

Graphics adapted from: Bock, Hacker et al., 2019, RSC Advances, DOI:10.1039/C9RA03123E (CC BY 3.0)

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

19 Demonstration and Evaluierung von Biogas

Technisch-wirtschaftliche Bewertung

- ✓ 3 MW Biogas
- ✓ 63% H₂-Wirkungsgrad
- ✓ 84% Gesamtwirkungsgrad
- ✓ 2,2 €/kg_{H₂} Produktionskosten
- ✓ 4,6 - 6,2 €/kg_{H₂} Produktkosten

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

20 Mobilität: Nachhaltige Wasserstoffherzeugung aus Biomasse

- + Biomasse aus nachhaltiger Forstwirtschaft bindet CO₂
- + Wasserstoff aus Biomasse
- + Abtrennung von festen Kohlenstoff im Prozess

= CO₂ negativer Wasserstoff für Mobilität und Produktion

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

21 **Mobilität: Nachhaltige Wasserstofferzeugung aus Biomasse**

- + Grazer Wasserstofftechnologie
- + Österreichisches Biomasse Know-How
- + Industrielle Demonstration in Österreich

BIO-LOOP

= 100% österreichische H₂-Wertschöpfung

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

22 **Roheisenerzeugung: Direktreduktion mit grünem Wasserstoff**

> 60% weniger CO₂

- 33% Reduktionsmittel (basierend auf Hämatit)

Prozesstemperatur ↓↓

Metallisierungsgrad 92% bei 750°C

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

23 **Raffinerie versus Bioraffinerie**

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

24 **Papierindustrie (Kraftkochung)**

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

25 Hocheffiziente Energiewandler – die Brennstoffzelle

Fuel Cell Type	Fuel	Electrolyte	Operating Temperature
Solid Oxide Fuel Cell SOFC	H ₂ , CH ₄ , CO	Zirconia	950°C
Molten Carbonate Fuel Cell MCFC	H ₂ , CH ₄ , CO	Molten alkali carbonates	650°C
Phosphoric Acid PAFC	H ₂	Phosphoric Acid	200°C
Polymer Electrolyte Fuel Cell PEFC/DMFC	H ₂ , CH ₃ OH	Polymer-electrolyte	80°C
Alkaline Fuel Cell AFC	H ₂	Potassium hydroxide	80°C

H₂ + 1/2 O₂ → H₂O

anode electrolyte cathode

$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2e^-$ $2 H^+ + 1/2 O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

26 PEFC - die wirtschaftliche Herausforderung

LDV FC System, 2017

LDV FC-stack, 2017

Membrane electrode assembly

Preisziele 2025: 43 \$/kW_{el} (100 ksys/a) bzw. 36 \$/kW (500 ksys/a)
Zielpreis: 30 \$/kW_{el}

DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2017
Thompson et al., J. of Power Sources, 2017

V. Hacker, Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

27 PEFC Fokus - Degradation

Reference MEA

Aged MEA

CCU Test cell

EIS

Membran-Elektroden-Einheit nach 45 Gefrier-/Auftauzyklen mit unterschiedlichen Spül- und Stromdichteveränderungen

Kocher, Hacker et al., Fuel Cells, 2021

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

28 PEFC Fokus – Monitoring: Impedanzspektroskopie/THD

Anforderungen an die Echtzeitüberwachung

- Schnell und kostengünstig
- Einfach zu integrieren
- Spezifizieren der lokalen Betriebsbedingung

Stand der Technik

- Überwachung der Einzelzellenspannung

Innovative Messsysteme

- Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS)
- Ausnutzung der **gesamtharmonischen Verzerrungen** (Total Harmonic Distortion, THD)

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

29 PEFC Fokus – Monitoring: Impedanzspektroskopie/THD

Zielsetzung: Ermittlung der spezifischen Erregungsfrequenz mit großer harmonischer Verzerrung bei bestimmten Schadenszuständen.

Monitoring **des Wassermanagements** im Stapel

- Überflutung
- Austrocknung

Monitoring der **Degradation der Katalysatorschicht**

Ramschak, E., Peinecke, V., Frenninger, P., Schaffer, T., & Hacker, V. (2006). J Power Sources, 157(2), 837-840

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

30 PEFC Fokus: Entwicklung neuer Elektrodenmaterialien

- Entwicklung eines mit Polyanilin beschichteten Kohlenstoffträgers für erhöhte Nutzungsdauern
- Maschinell hergestellte MEA
- Steigerung der Katalysatoraktivität um +35% und der Lebensdauer um +43% (RDE)
- Umsetzung der Ex-situ-Ergebnisse (RDE) in Brennstoffzellen

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

31 Zusammenfassung

- Wasserstoff:** der vielseitige Allrounder mit Entwicklungsbedarf
- Energieträger:** Elektrischer Strom – Wasserstoff - ☺
- Energiespeicher:** Elektrochemisch – Wasserstoff - chemisch
- Wasserstoffherzeugung aus Biomasse:** neues CL-Verfahren umgesetzt
- Produktion:** erneuerbarer Ammoniak, grüner Stahl und Bioraffinerien
- Elektrochemische Energieumwandlung:** Verlängerung der Lebensdauer, Echtzeitüberwachung und neue Elektrodenherstellung

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021

TU GRAZ – SCIENCE FOR FUTURE
2021: KLIMA UND ENERGIE

32

Herzlichen Dank!

Viktor HACKER
Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik
Homepage: www.ceet.tugraz.at
Sommerakademie: www.tugraz.at/icsummerschool
IEA Workshop on PEFC Nov. 2021: www.ieafuelcells.tugraz.at

Viktor HACKER Institut für Chemische Verfahrenstechnik & Umwelttechnik
29. September 2021