
BEDEUTUNG DES WASSERSTOFFES IM ZUKÜNFTIGEN ENERGIEMIX

J. Richter, M. Jahn, M. Stelter, I. Voigt
ThEGA-Forum, 24.10.2019



Management System
ISO 9001:2015
ISO 14001:2015

www.tuv.com
ID 1100005194



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 768945



EUROPEAN UNION
European Social Fund



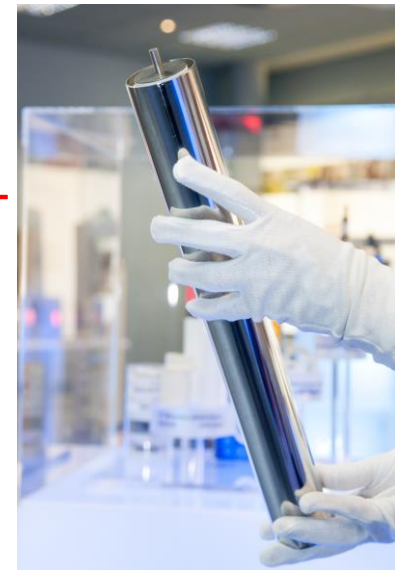
AGENDA

- Fraunhofer IKTS
- Wasserstoff
 - Eigenschaften, Erzeugung, Anwendung
- Wasserstoff und IKTS
- Ausblick

Fraunhofer IKTS

„Geschäftsfeld Umwelt- und Verfahrenstechnik“

cerenergy® G1
Rundzelle 100 Ah
Weltrekord:
**Größte Na/NiCl₂-
Zelle der Welt!**



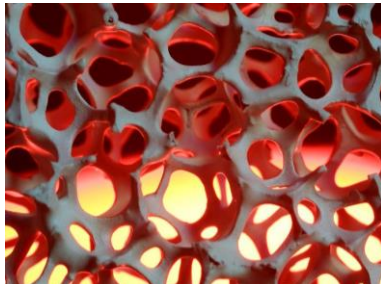
- 8 Geschäftsfelder
- „Energie“: Brennstoffzellen, Elektrolyseure, Energiespeicher, PV usw.

Katalysatoren



Metalle
Edelmetalle
Mischoxide

Filter



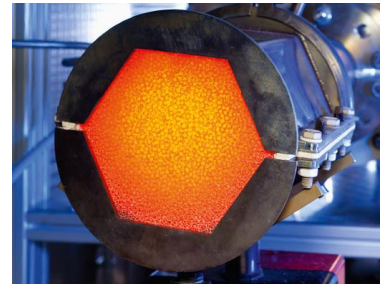
Partikelfilter
Heißgasfilter

Membranen



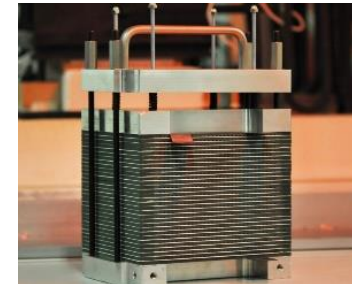
H₂-Membranen
CO₂-Membranen
H₂O-Membranen
O₂-Membranen

Reaktoren



Festbettreaktor
Rohrbündelreaktor
Membranreaktor

Elektrolyse



HT-Elektrolyse
(SOEC)
CO₂-Coelektrolyse

Anlagen

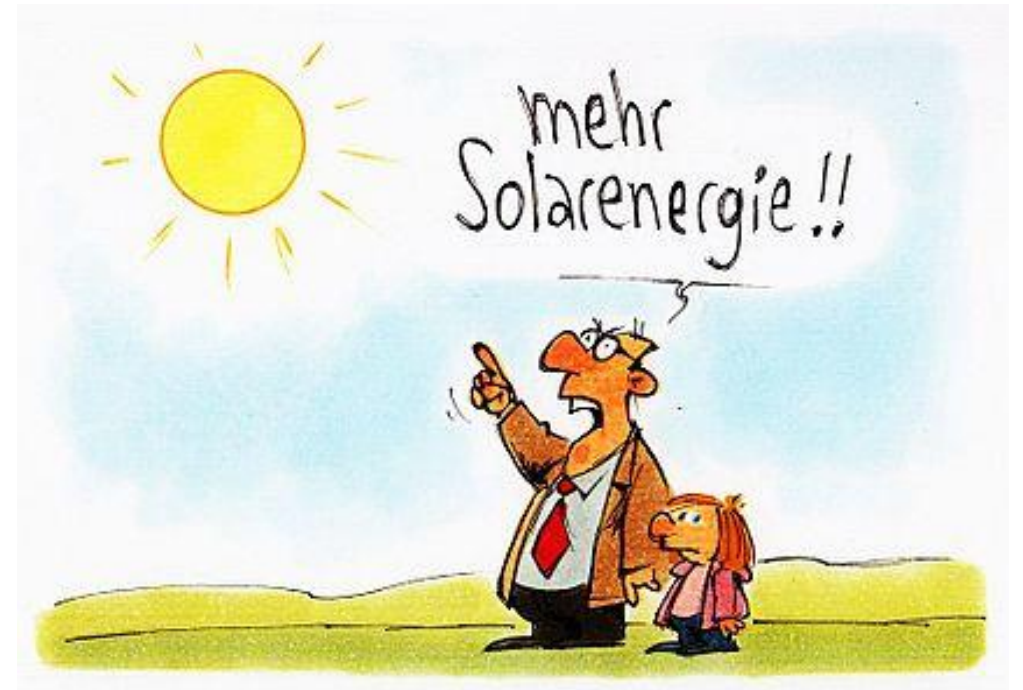


Membrananlagen
FT-Anlage
Methanisierung

Basis: Speicherbarkeit erneuerbarer Energien

Sonnenenergie
auf Landfläche
 $3,1 \cdot 10^{17}$ kWh/a

Weltenergiebedarf
 $1,6 \cdot 10^{14}$ kWh/a



Ausreichend erneuerbare Energie vorhanden

Basis: Speicherbarkeit erneuerbarer Energien

Sonnenenergie
auf Landfläche
 $3,1 \cdot 10^{17}$ kWh/a

Weltenergiebedarf
 $1,6 \cdot 10^{14}$ kWh/a

Ausreichend erneuerbare Energie vorhanden



Basis: Speicherbarkeit erneuerbarer Energien

Sonnenenergie
auf Landfläche
 $3,1 \cdot 10^{17}$ kWh/a

Weltenergiebedarf
 $1,6 \cdot 10^{14}$ kWh/a

Ausreichend erneuerbare Energie vorhanden



Basis: Speicherbarkeit erneuerbarer Energien

Sonnenenergie
auf Landfläche
 $3,1 \cdot 10^{17}$ kWh/a

Weltenergiebedarf
 $1,6 \cdot 10^{14}$ kWh/a

Ausreichend erneuerbare Energie vorhanden



Presseschau

FAZ (21.02.2018):
„Am Ende kommt der Wasserstoff“

Süddeutsche Zeitung (14.10.2018):
„Wasserstoff gegen Batteriepanzer“

Zeit (31.05.2019): „Wasserstoff in Dieselform“
„...Der Wasserstoff wird in einer Trägerflüssigkeit gespeichert...“ → LOHC

Süddeutsche Zeitung (05.02.2019):
„Warum die deutschen Autohersteller
beim Wasserstoffantrieb zögern“
„...Wasserstoff hat die geringste Priorität in der
Automobilindustrie...“

FAZ (05.09.2019):
„Hamburg will große Wasserstoff-Anlage im Hafen bauen“
[100 MW \cong 2 t/h bzw. 22.000 m³/h]

Augsburger Allgemeine (08.06.2018):
„Alternative Wasserstoff:
Hat das überhaupt Zukunft?“

Passauer Neue Presse (17.01.2019):
„Das erste Wasserstoff-Mountainbike“

Spiegel (10.12.2018):
„Die Brennstoffzelle wird sich durchsetzen“

Spiegel (05.09.2019):
„Energiewende: Hamburg plant weltgrößte
Anlage für Wasserstoff-Elektrolyse“

Stuttgarter Zeitung (26.08.2018): „Japan glaubt fest an seine Wasserstoffzukunft“
„...setzt auf eine Technologie, die hierzulande stiefmütterlich behandelt wird und viele Kritiker hat...“

Folgerungen aus Presseschau

- Schwerpunkt Mobilität / Verkehr (energetische Nutzung)
 - „Kampf der e-Antriebssysteme“: Wasserstoff \leftrightarrow Batterie
 - Reichweiten e-Mobilität: Brennstoffzellen-Antrieb \leftrightarrow Batterie-Antrieb
 - Dauer eines Tank- bzw. Ladevorganges vs. Infrastruktur: H₂-Tankstellen \leftrightarrow Ladesäulen
 - Gefahr durch Wasserstoff? (Druck / Verflüssigen / alternative Speichermöglichkeiten)
 - Reichweiten Rohstoffe zur Herstellung der Peripherie (seltene Erden)
- Einsatz H₂ in technologischen Bereichen / Industrie? (stoffliche Nutzung)
- Sektoren Wärme und Energie (Rückverstromung)?
- gesellschaftliche Akzeptanz: Umgang mit einer „neuen“ Technologie (vgl. CCS)

Wasserstoff – Eigenschaften, Erzeugung, Anwendung

■ überschlägige (!) Wirkungsgradbetrachtungen

Wasserstoffwirtschaft	η in %
Wasserstoff thermochemisch aus Biomasse	0,75
Wasserstoff aus Elektrolyse	0,80
Wasserstofftransport im Gasnetzwerk	0,99
Strom und Wärme aus Brennstoffzellenheizung	0,85
Brennstoffzelle elektrisch	0,60
Lithium-Ionen-Akku	0,94
Elektromotor	0,95
Wasserstoff Verdichtung auf 700 bar	0,88

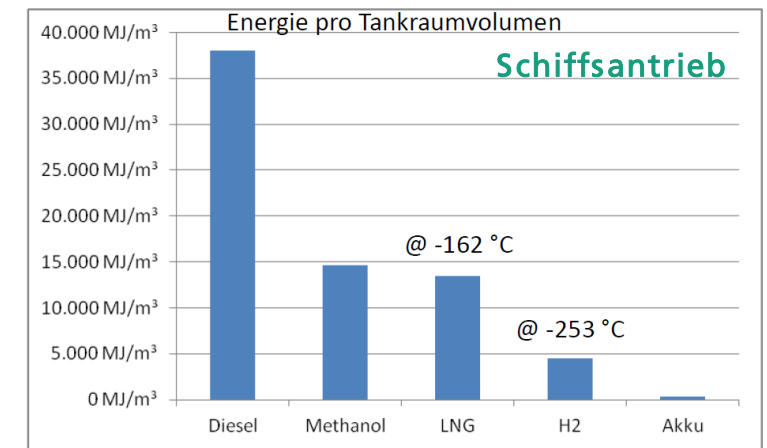
Fossile Energiewirtschaft	η in %
Wasserstoff aus Erdgasreformation	0,75
Strom aus Kohlekraftwerken	0,38
Stromtransport	0,92
Transport und Aufbereitung Benzin	0,85
Ottomotor	0,24
Gasturbine	0,40

PV / Wind	η in %
Wechselrichter	0,90

PtX-Technologien (CO ₂ +H ₂)	η in %
Methan	0,80
Methanol	0,20

- Fahrzeug Ottomotor: $0,85 \times 0,24 = 0,20$
- E-Mobilität Akku: $0,90 \times 0,94 \times 0,94 \times 0,95 = 0,76$
- E-Mobilität Brennstoffzelle: $0,90 \times 0,80 \times 0,99 \times 0,88 \times 0,60 \times 0,95 = 0,36$
- Verstromung (SNG): $0,90 \times 0,80 \times 0,80 \times 0,40 = 0,23$

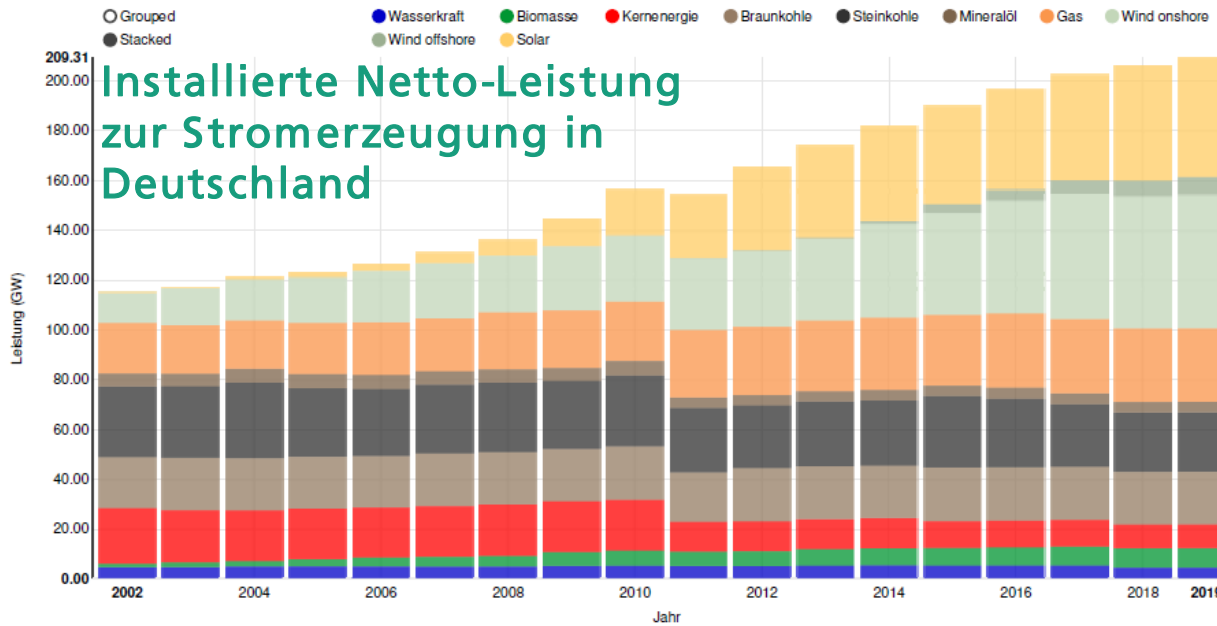
- Reichweitenverringern Winter? Betankungszeit? Peripherie? Speicherbarkeit?
- Partikel, NO_x, CO₂, ...?



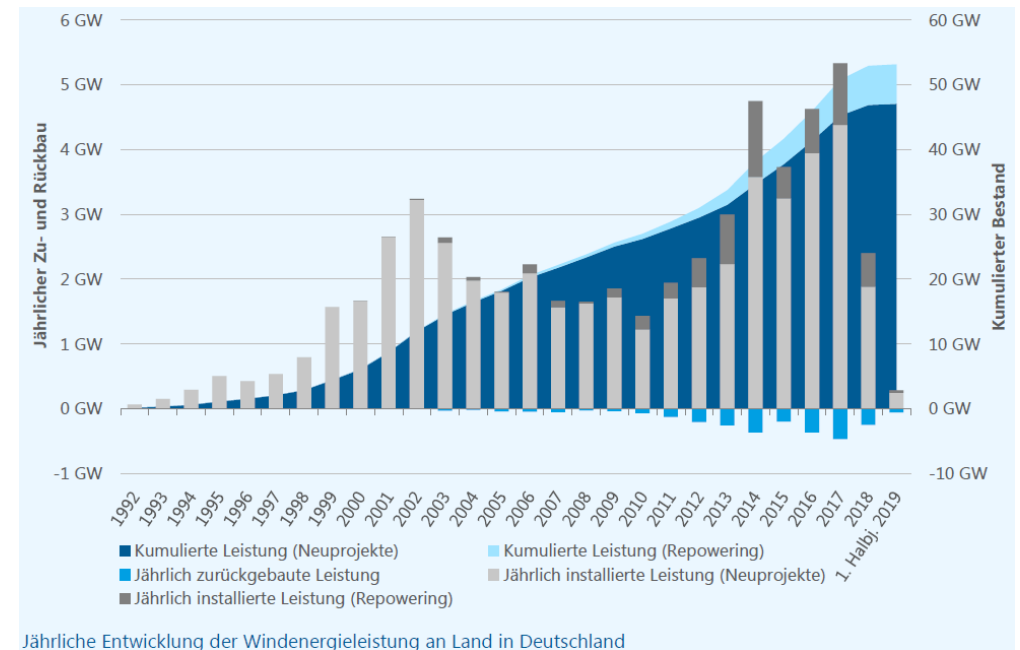
Darstellung Meyer-Werft, Projektpartner im EU-Projekt „Hy-Meth-Ship“

Wasserstoff – Eigenschaften, Erzeugung, Anwendung

- Energiewende: Nutzungsmöglichkeiten regenerativer Energien, Wind und PV prominent
- fluktuierende Leistungen, limitierte Speichermöglichkeiten (Stromnetz: ~0,04 TWh)
→ **Speicherung** notwendig



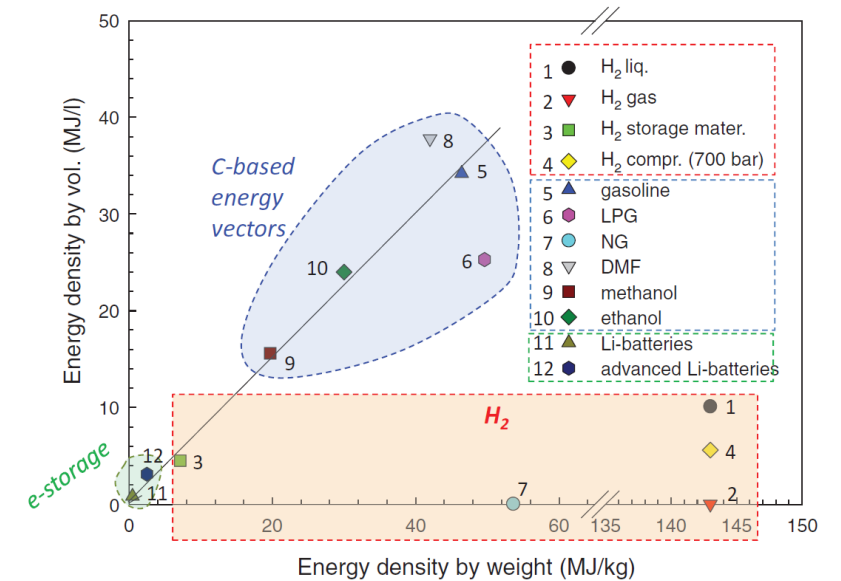
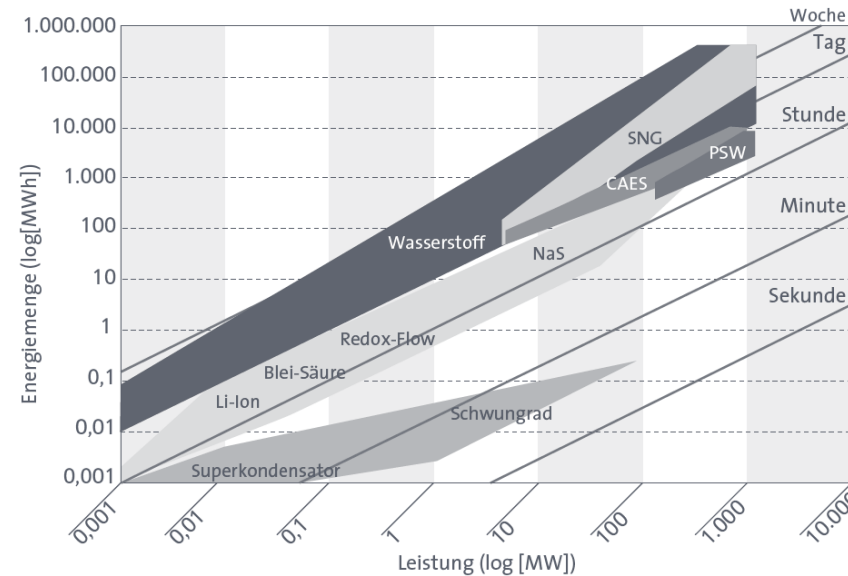
Datenquelle: AGEE, BMWi, Bundesnetzagentur
letztes Update: 30 Sep 2019 23:41



Jährliche Entwicklung der Windenergieleistung an Land in Deutschland

Wasserstoff – Eigenschaften, Erzeugung, Anwendung

- Speicherkapazität
- Energiedichte
- Reaktionszeit
- Zyklenfestigkeit
- Kosten für Bau / Betrieb
- Wirkungsgrad
- Speicherdauer
- Leistung
- ...



- größere Energiemengen, höhere Leistungen, längerfristige Speicherdauer → **chemische Speicher**
- PtG/PtL/PtCh/PtX → erste Umwandlungsstufe: power-to-gas, d.h. Strom zu Wasserstoff
→ zweite Umwandlungsstufe: H₂ mit CO₂ zu CH₄ (Erdgasnetz: >200 TWh), CH₃OH, ...

Wasserstoff – Eigenschaften, Erzeugung, Anwendung

- Jules Verne „Die geheimnisvolle Insel“ (1875)
→ Vision: **Wasserstoff und Sauerstoff als Energiequelle**
- Wasserstoffwirtschaft (Wasserstoff als einziger Energieträger) bisher in keinem Land der Welt verwirklicht
- chemisch: Primärenergieträger $\leftarrow \rightarrow$ praktisch: nicht in freier Form in der Natur vorhanden
 - Wasserstoffherstellung durch andere Energieträger (!)
 - fossil = „grauer Wasserstoff“ bzw. regenerativ = „**grüner Wasserstoff**“

→ Nachhaltigkeit einer Wasserstoffwirtschaft abhängig von der Nachhaltigkeit der eingesetzten Primärenergie

Wasserstoff – Eigenschaften, Erzeugung, Anwendung

- Dampfreformierung (steam reforming) von Kohlenwasserstoffen (Erdgas): $\eta \sim 60 \dots 70\%$
 - „grauer Wasserstoff“
 - $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ (+206 kJ/mol)
 - Reaktionswärme: $2 \text{CH}_4 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{CO} + 4\text{H}_2$ (-71 kJ/mol)
 - anschließend Wassergas-Shift: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ (-41,2 kJ/mol)
- Wasser-Elektrolyse (alkalisch, SOEC, ...): $\eta \sim 70 \dots 80\%$
 - „grüner Wasserstoff“ (bei Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom)
 - $2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightarrow 2\text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g})$
- thermische Verfahren (Kværner-Verfahren, Pyrolyse, thermochemische Spaltung, ...)
- biologische Verfahren (Biomasse, Fermentation, photobiologisch, ...)

Wasserstoff – Eigenschaften, Erzeugung, Anwendung

Alkalische Elektrolyse



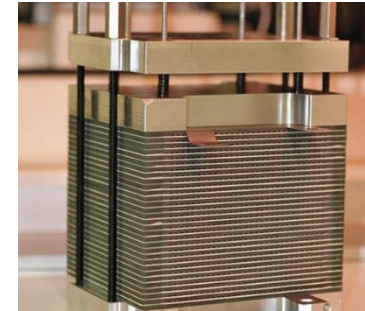
- industriell etabliert
- korrosive Medien
- geringe Stromdichten
- 4,2–5,9 kWh/Nm³ H₂
- 1000-1200 €/kW
(2030: <1000 €/kW)*

PEM-Elektrolyse



- Demo/Anwendung
- geringere Lebensdauer
- 4,2–5,6 kWh/Nm³ H₂
- 1800-2300 €/kW
(2030: <1000 €/kW)*

Hochtemperaturelektrolyse



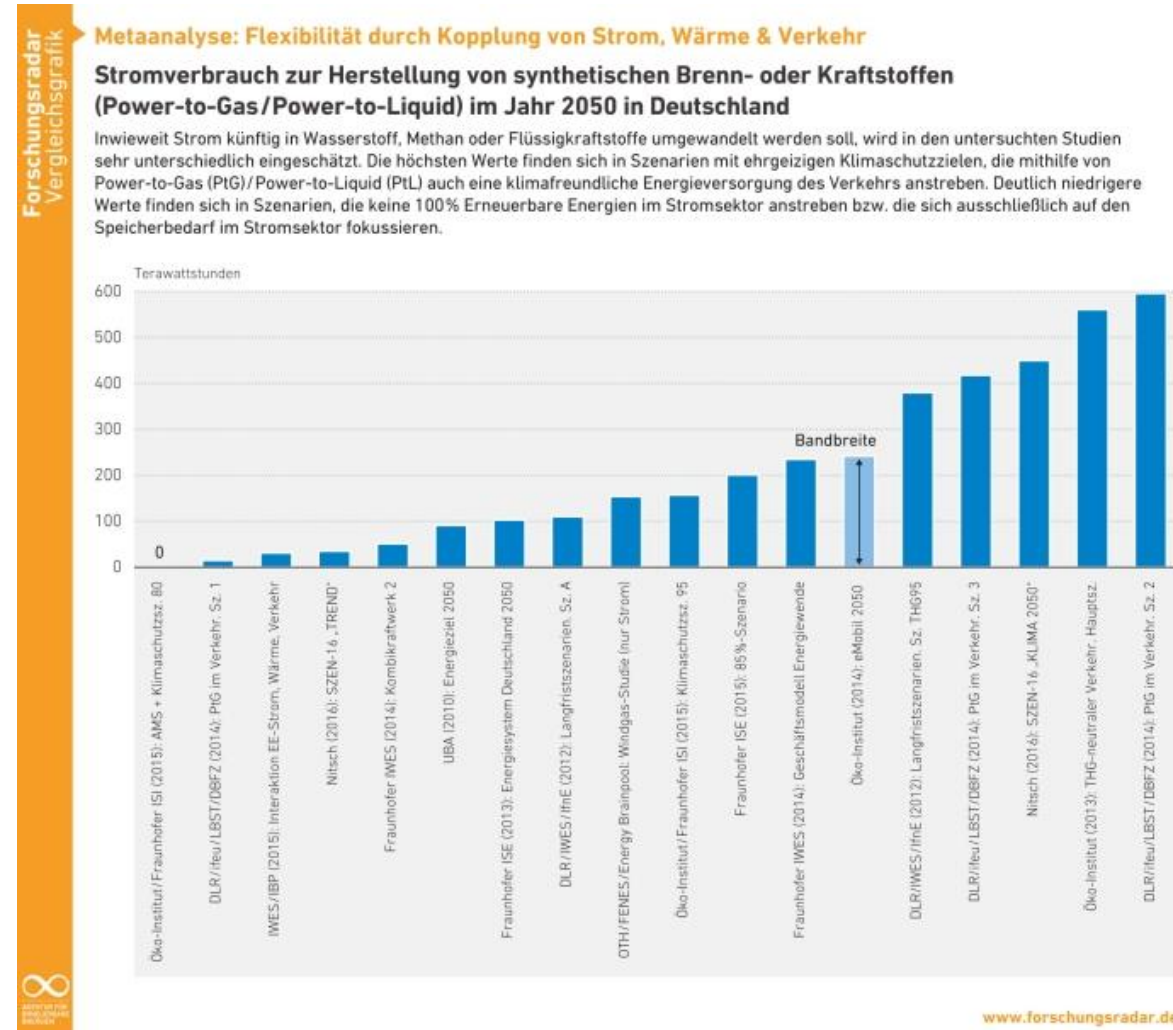
- Labor/Demo
- Temperatur: ~800 °C
- 3,0–4,5 kWh/Nm³ H₂ + CO
- >2000 €/kW
(2030: ~1000 €/kW)*

*O. Schmidt, A. Gambhir, I. Staffell, A. Hawkes, J. Nelson, S. Few, Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study, International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017) 30470–30492.

Wasserstoff – Eigenschaften, Erzeugung, Anwendung

■ Speicherung

- Druckgasspeicher (Hochdruckspeicher 700bar+)
- Flüssiggasspeicher (Wärmedämmung Tank)
- Adsorptionsspeicherung (hochporöse Materialien: MOFs, Zeolithe, ...)
- Metallhydridspeicher
- chemische Verbindungen
 - als Transportmedium im Kreislauf (LOHC, ...)
 - zur stofflichen oder energetischen Nutzung (NH_3 , CH_4 , CH_3OH , ...)
- im (deutschen) Erdgasnetz bis zu 5 Vol.-% (Endgeräte!)
 - „Gasblasen“ vs. Technologie, Beispiel Glaswanne
- Kavernen



<http://www.forschungsradar.de/metaanalysen/einzelansicht/news/metaanalyse-zur-flexibilitaet-durch-sektorkopplung.html>

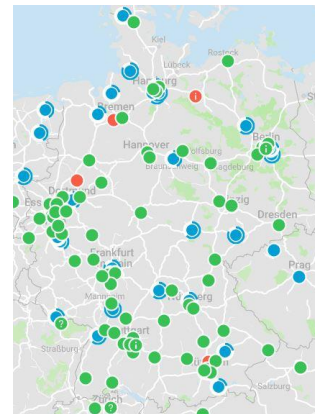
Wasserstoff – Eigenschaften, Erzeugung, Anwendung: Verkehrssektor

■ Handlungsbedarf!

- Infrastruktur ↔ Anzahl Fahrzeuge ↔ Art Fahrzeuge
- ab ca. 250km FCEV klimafreundlicher als BEV*
- Demo-Projekte im kommunalen Bereich (Nutzfahrzeuge)

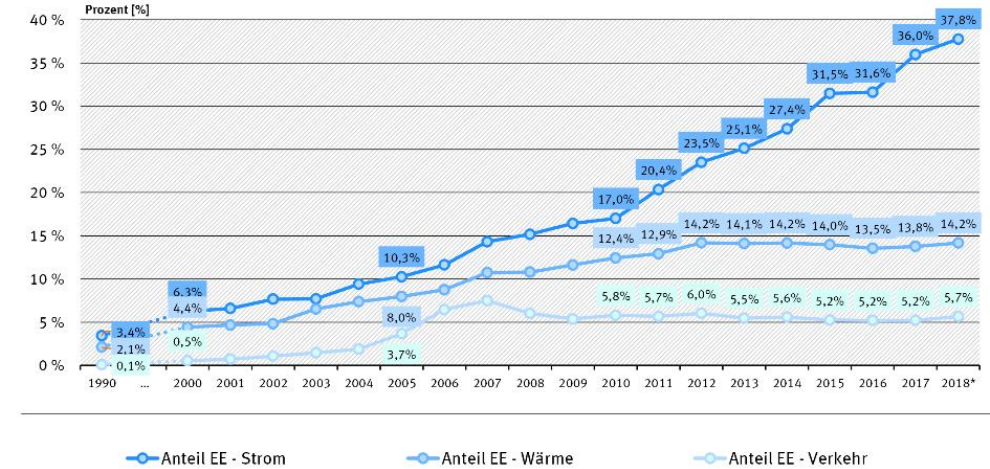
■ Schwerlast / Schiffe / ...: H₂, CH₄, PtL (syn-fuels)

Fahrzeug Ottomotor: ~ 0,20
 E-Mobilität Akku: ~ 0,76
 E-Mobilität Brennstoffzelle: ~ 0,36



H ₂ -Tankstellen in Europa	
In Betrieb	~120
In Realisierung	~50

Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch, am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte sowie am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor
 Entwicklung von 1990 bis 2018



* vorläufige Werte

Quelle: Umweltbundesamt (UBA) auf Basis AGEE-Stat
 Stand 08/2019

Deutschland	BEV	FCEV
Ladestation / Tankstelle	~16.000	~75
Reichweite [km]	100...400	500...800
Ladedauer	10h ... <1 h (fast charge)	3 min
Fahrzeuge / Ladestelle / Tag	60...80	250
Bedarf	Anschluss 300kW (permanent)	50 kg/h H ₂

Infografik ThEGA, Presseinformation 23.05.2019

<https://h2.live/> Stand:13.09.2019

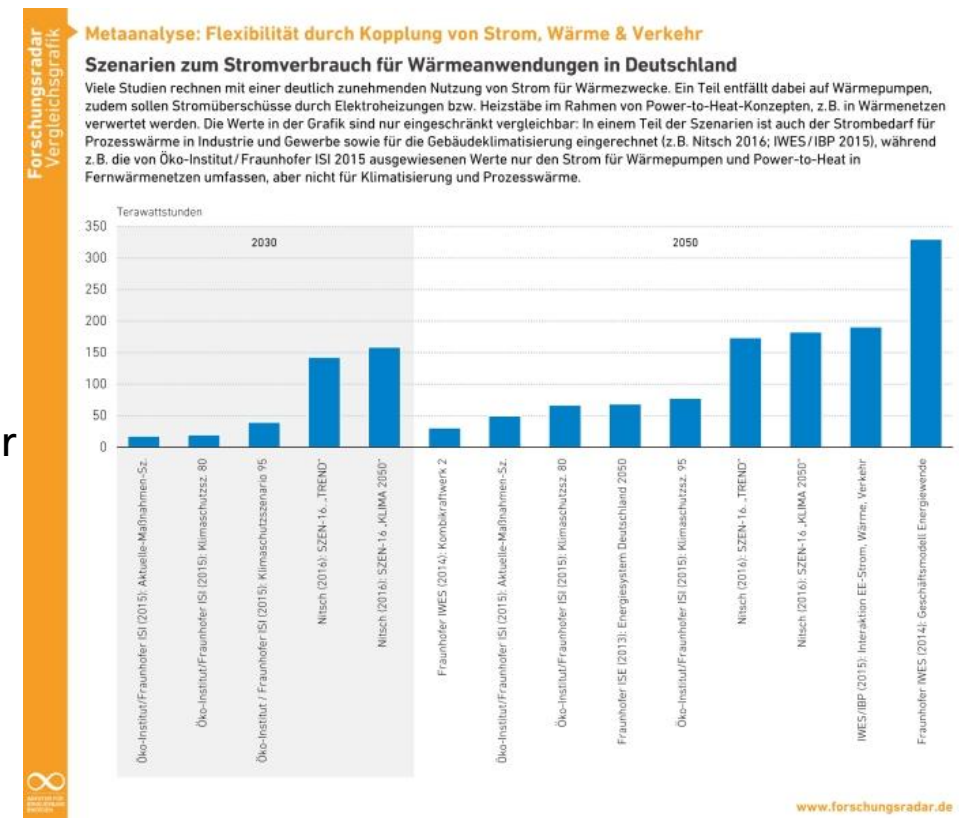
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen>

*https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf

© Fraunhofer

Wasserstoff – Eigenschaften, Erzeugung, Anwendung: Wärmesektor

- Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme: ~50% des Endenergiebedarfes (D, 2017)
 - starker Handlungsbedarf (Gebäudedämmung, Heizungsanlagen)
- Heizungsanlagen langlebig (~20 Jahre)
 - Umstellung auf höheren H₂-Gehalt im Erdgasnetz
- viele Studien rechnen mit Zunahme von Strom im Wärmesektor
 - power-to-heat (PtH) / Wärmepumpen
 - Hochtemperatur-Prozesswärme nicht über direkte Stromnutzung möglich → PtG (H₂, CH₄)
 - KWK, Gas-BHKW (Strom, Wärme aus H₂, syn. CH₄)
 - Brennstoffzellensysteme (SOFC für Privathaushalte)



<http://www.forschungsradar.de/metaanalysen/einzelansicht/news/metaanalyse-zur-flexibilitaet-durch-sektorkopplung.html>

Zwischenfazit

- **Energieeinsparung** durch Minimierung Verluste und Optimierung Prozesse
- es wird sich nicht ein einzelnes Energiesystem etablieren, sondern ein Mix verschiedener Systeme
 - Wasserstoff ideal zur Sektorenkopplung (speziell Wärme und Verkehr ausbaufähig)
 - Studien konvergieren langsam:
Elektrolyse (H₂) benötigt, synthetische KW eher bei ehrgeizigen Zielen >95% THG-Reduktion
- zukünftiges Energiesystem:
 - chemische (Langfrist-)Speicher (H₂, CH₄, ...) auf Basis regenerativer Energien notwendig
 - „grüner Wasserstoff“ benötigt große Mengen regenerativen Stromes
 - geringer Langfristspeicherbedarf aufgrund geringer Wirkungsgrade bei Umwandlungsketten (Beispiel Strom → H₂ → CH₄ → Strom)

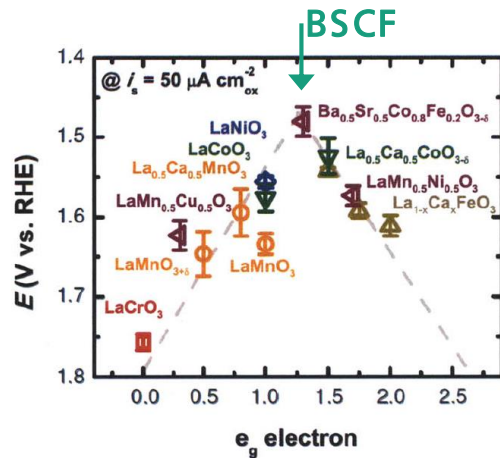
Zwischenfazit

- Zeitschiene beachten – kein digitales Umschalten, sondern Energiemix
 - PV & Wind & Biomasse & Wasser
 - BEV & FCEV
 - Strom & Wasserstoff
 - Wasserstoff & synthetische Kraftstoffe
- Brückentechnologien zur Emissionsminimierung nicht vergessen
 - CCU / CCS
 - Bsp. oxycoal: mit ~10% Mehraufwand Energie CCS möglich
- politische Rahmenbedingungen müssen passen und Energiewende fördern

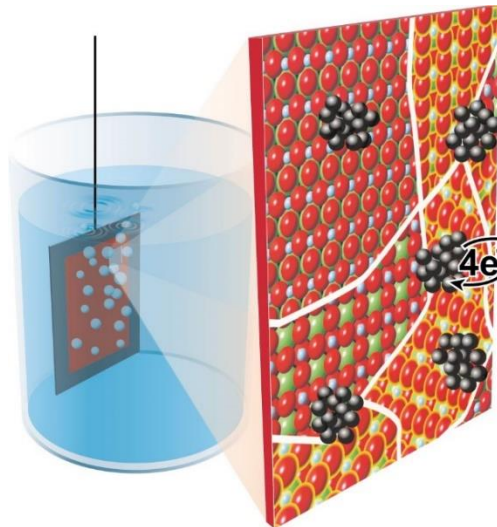
Wasserstoff und IKTS

Elektrodenbeschichtung alkalische Wasserelektrolyse (PADES)

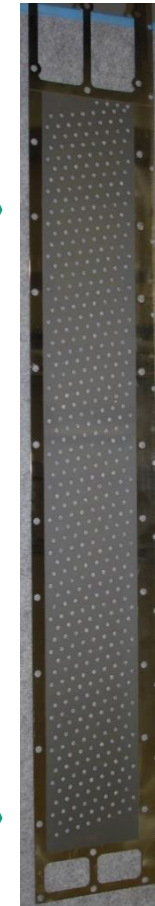
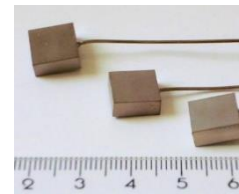
2011: BSCF
(Mischleiter für O₂-Separation)
= anod. Elektro-Kat. für nachhaltige H₂-Produktion (AEL)



2012: Kontakt Kumatec
Vorversuche im Direktauftrag



2014: Auswahl und Up-Scaling Beschichtungsverfahren



Elektroden: 1395 x 179,5 x 0,5 mm

2016:

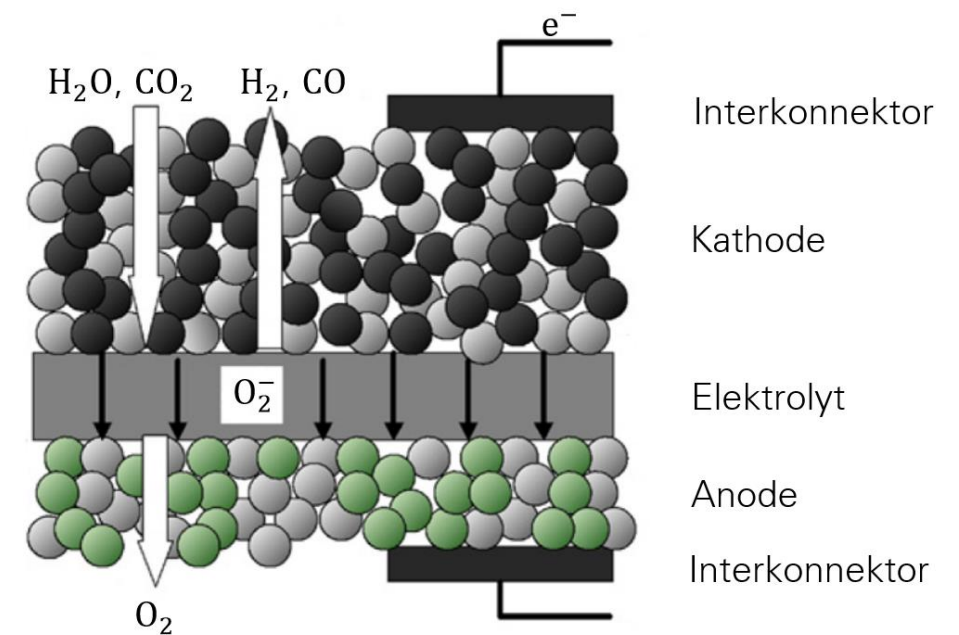
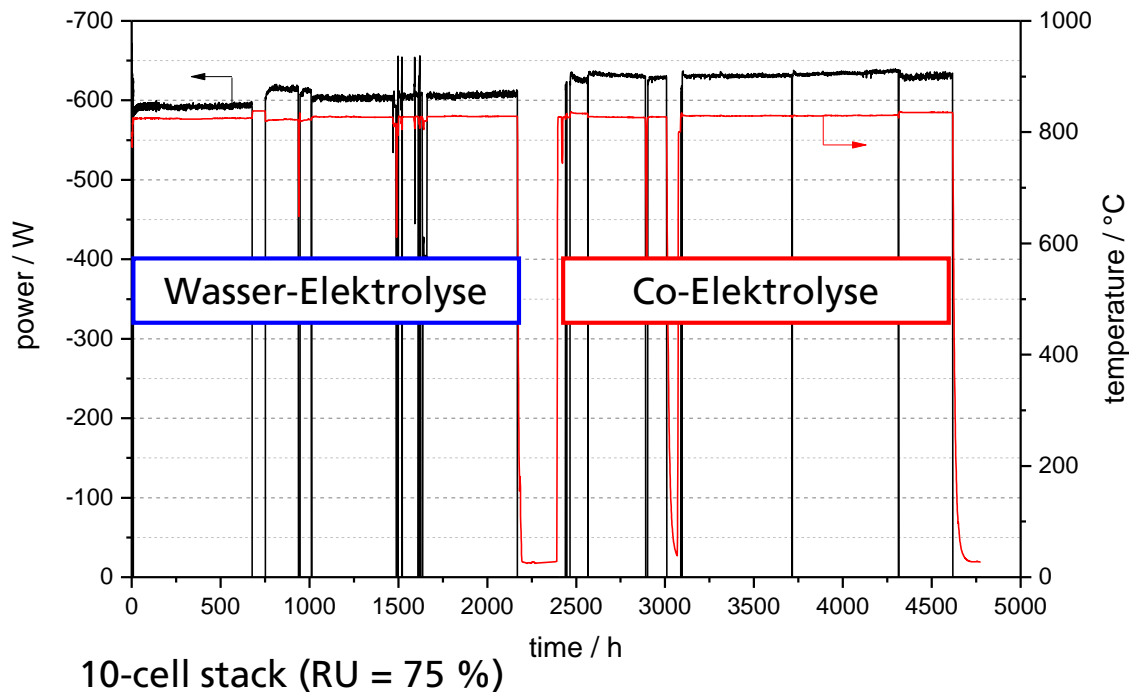
$\Delta\eta \uparrow$
+ 10 %



Wasserstoff und IKTS

Hochtemperaturelektrolyse: Co-Elektrolyse → SynGas

- Langzeitstabilität demonstriert
- SOEC-Stacks und -Module werden am IKTS entworfen und gefertigt
- Demo an einem Kalkwerk inkl. CO₂-Abtrennung, Co-Elektrolyse und FT-Synthese (synth. Wachse) (HYPOS)

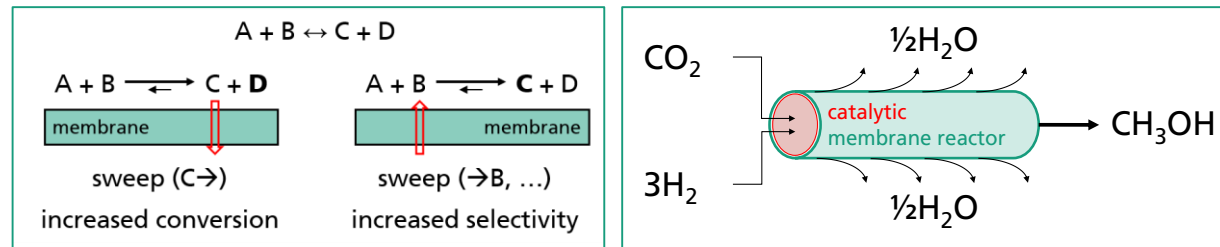


Wasserstoff und IKTS

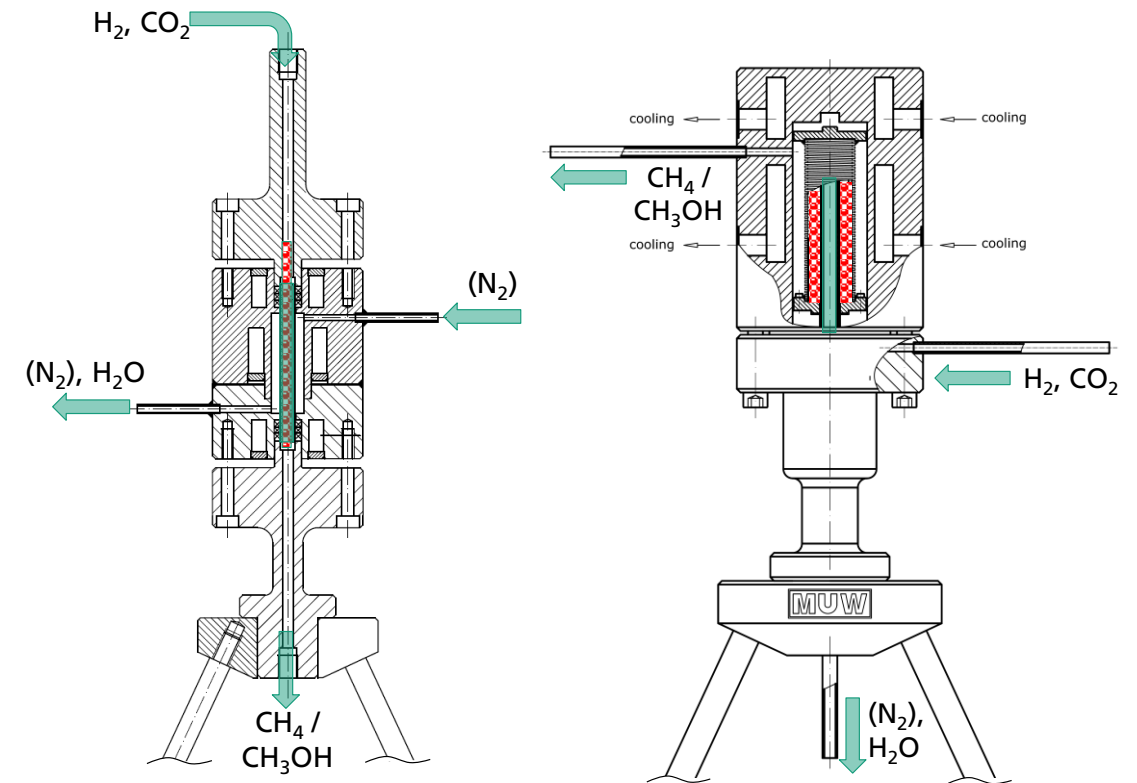
Methanisierung / Methanolsynthese aus H_2 im Membranreaktor

- Methan / Methanol ($H_2 + CO_2$) → jede Umwandlung führt zu **Verlusten (Wirkungsgrad)**

→ **Ausbeutesteigerung im Membranreaktor**
(Reaktion und Stofftrennung im gleichen Reaktor)



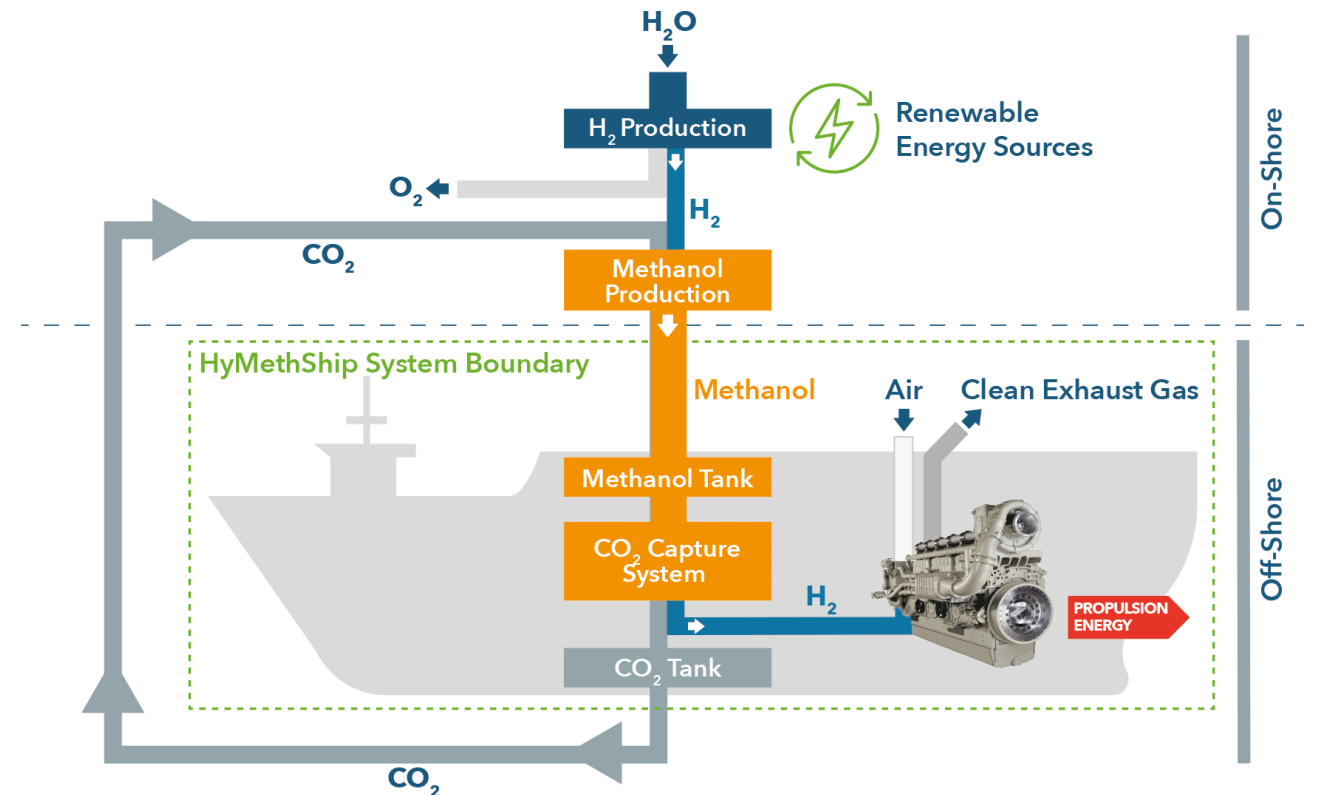
- C-Membranen, Zeolith-Membranen
- Membranen widerstehen Prozessbedingungen (Temperatur, Druck, Δp)



Wasserstoff und IKTS

Methanol als H₂-Speicher

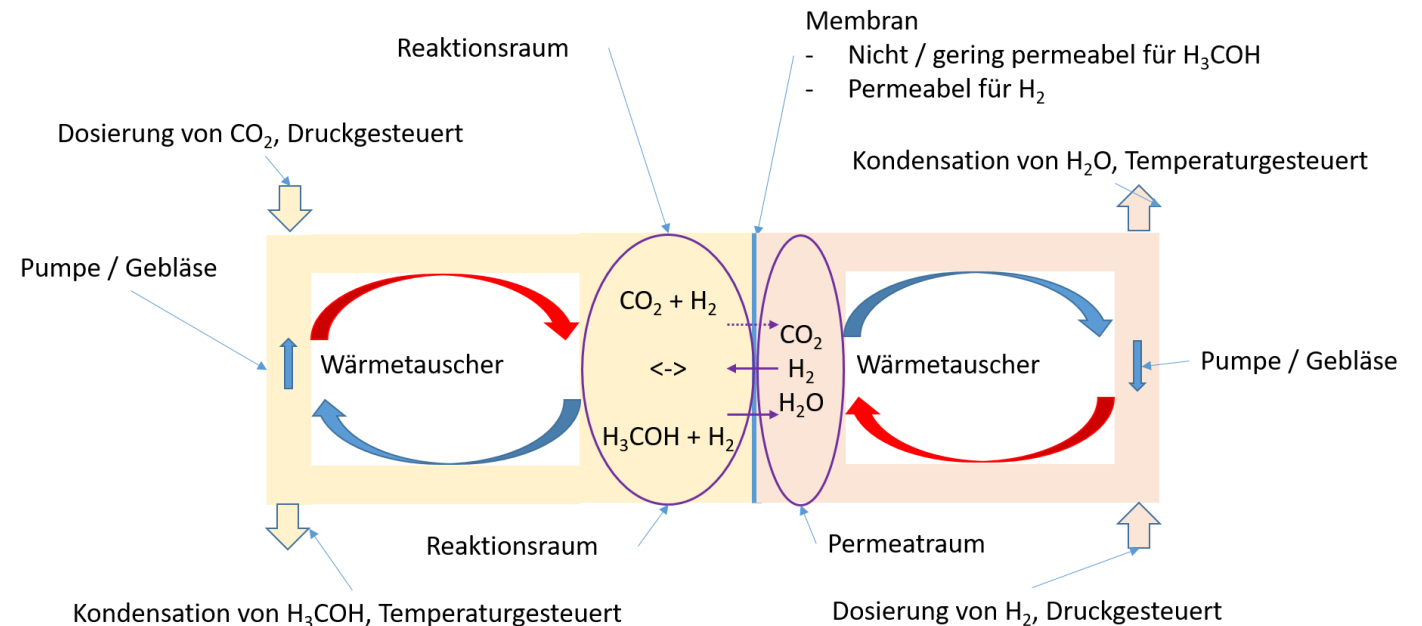
- EU-Projekt HyMethShip: Methanol-Reformierung als Antriebssystem für Schiffe
- Reforming von CH₃OH zu H₂ und CO₂
- $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$
- Abtrennung von H₂ mittels Membran zur Versorgung des Gasmotors
- Auskondensieren des Restwassers
- Auskondensieren des CO₂
- Vertankung in Kombitanks
- Gasrückführung in Reaktor
- H₂-Überführung an Gasmotor
- Leistung: 1800 – 2000 kW elektrisch bei 45% Wirkungsgrad



Wasserstoff und IKTS

Wirtschaftlichkeit Biogasanlage: Methanolsynthese im Membranreaktor

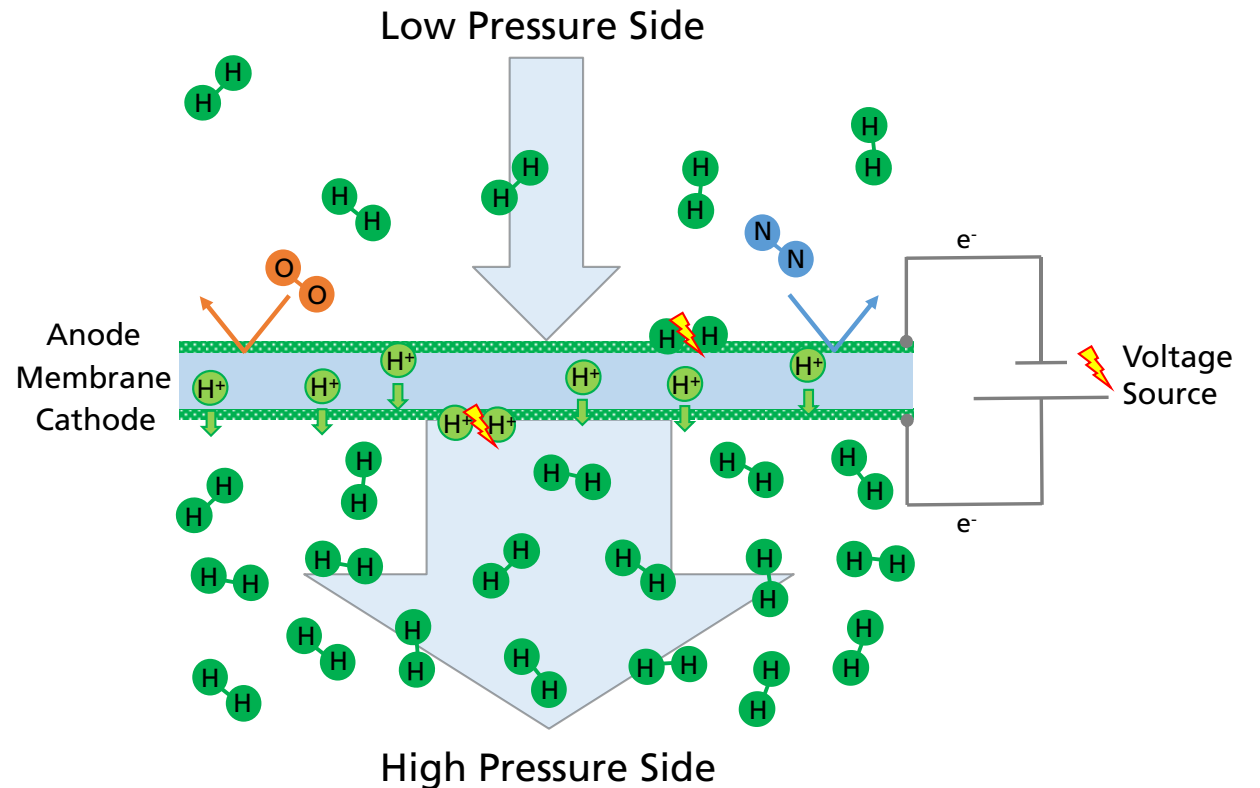
- TAB-Projekt Biogas+: Methanolsynthese an einer Biogasanlage
- Energie- und Wasserstoffspeicherung
- Methanolsynthese durch neuartige, druckgesteuerte Membranreaktoren
- Hintergrund: Grundlastfähigkeit Biogasanlagen Auslaufen EEG-Förderung



Wasserstoff und IKTS

elektrochemische Verdichtung (+Aufreinigung) von H₂

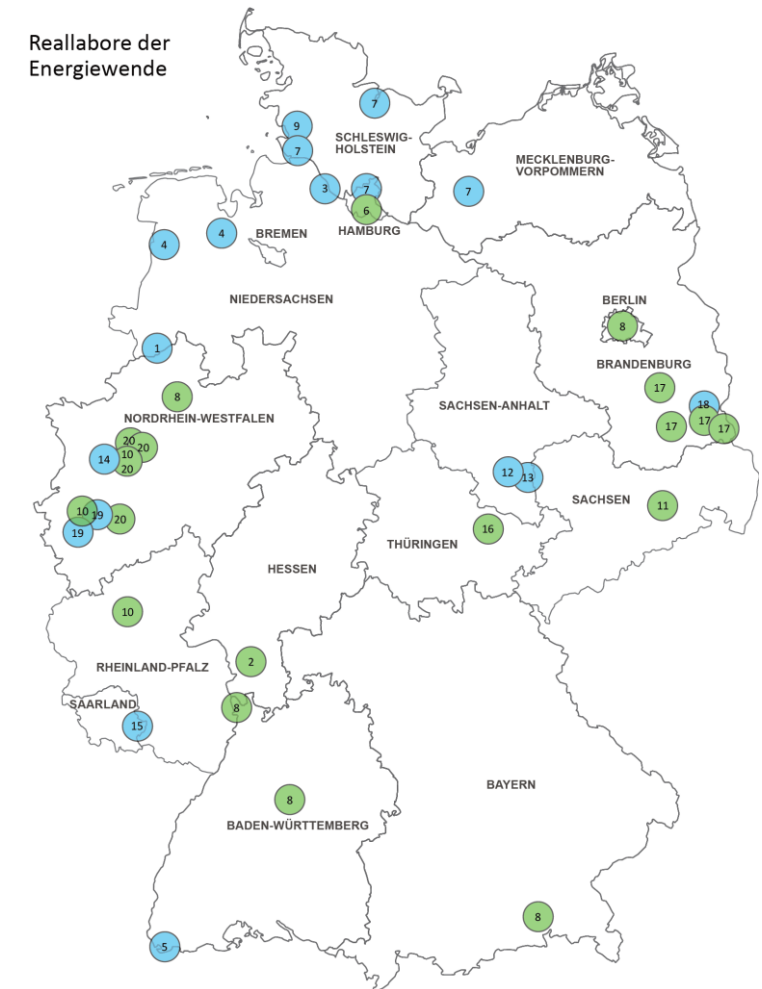
- BMBF WIR H₂-WELL Projektidee Protonenpumpe
- Wasserstoff als Energieträger
- Basis für Speicherung und eine weitere Nutzung ist H₂ unter Druck (viele Umwandlungsverfahren benötigen hohen Druck)
- Reinheit > 99% wird oft für viele Katalysatoren/Prozesse benötigt
- kombinierte Druckerhöhung und Aufreinigung ermöglicht Prozess-Intensivierung



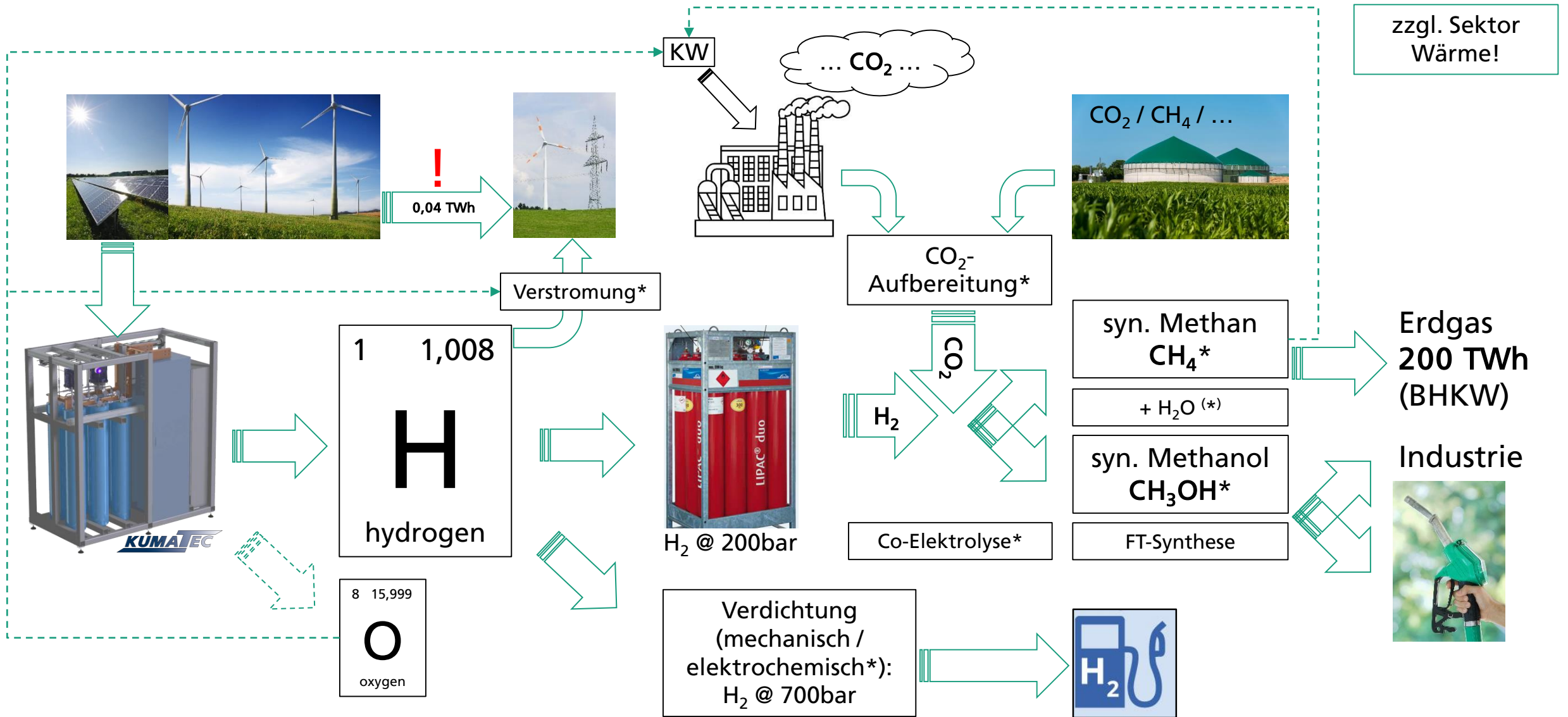
Wasserstoff und IKTS

REALLABOR: Vision power-to-X mit regionalen Partnern (Biogasanlagen)

Reallabor	Sektor-kopplung	Wärme	CO ₂ -Nutzung	Elektrolyse + H ₂ -Nutzung	CH ₄	CH ₃ OH	Sonstiges
1 CCU P2C Salzbergen			X		X	(X)	
2 DELTA	X						
3 DOW Stade – Green MeOH			X			X	
4 Element Eins	(X)			X			
5 H2 Whylen				X			
6 IW3		X					
7 Norddeutsches Reallabor	(X)			X			
8 Reallabor GWP		X					
9 ReWest100			(X)	X		(X)	
10 SmartQuart	X						
11 CityImpuls DD		X					
12 EnergieparkBL				X		(X)	
13 GreenHydroChem				X		X	
14 H2Stahl				(X)			H ₂ im Stahlwerk
15 HydroHub Fenne				X			
16 JenErgieReal	X						
17 Reallabor Lausitz	(X)						Quartiere, Verkehr
18 RefLau				X			
19 StoreToPower		X					Flüssigsalzspeicher
20 TransUrbanNRW		X					



Wasserstoff und IKTS



*mögliche Membrananwendungen

Wasserstoff und Thüringen

- Regierung / Ministerien / TAB / Firmen / Unis / Forschungsinstitute / ...

- Thüringer Klimagesetz: Reduktion der Treibhausgase um 80...95% bis 2050
- „Eckpunkte Thüringer Wasserstoffstrategie“ + „...strategische Entwicklung Wasserstoffwirtschaft...“ (Freistaat Thüringen)
- „Wasserstoff in Thüringen“ (ThEGA → Bauhaus-Universität Weimar)
- Veranstaltungen verschiedener Netzwerke, Bündnisse, Arbeitskreise
- viele Thüringer Firmen mit speziellem know-how
- starke Forschungslandschaft
- Ziel: weitere Demo-Projekte mit gesellschaftlicher Sichtbarkeit



- Potential: viele Anlagen (Wind, Biogas) fallen demnächst aus EEG-Vergütung

- Alternativen für wirtschaftlichen Betrieb finden

Kommentare

- ...was hat wohl der erste Liter FT-Benzin gekostet?
 - Einführung einer (neuen) Technologie ist nicht sofort konkurrenzfähig
 - technologische Reife und Akzeptanz → System-Umstellung benötigt Koordination und Zeit
- ...was ist uns unsere Zukunft wert? Lässt sich das in € ausdrücken?
 - Energiewende muss für den Verbraucher dennoch finanzierbar sein
- ...wir haben ziemlich viel in der Hand – lassen wir es nicht los, sondern packen es an!
...am besten gemeinsam!
- ...das IKTS ist nicht nur dabei, sondern geht auch voran

- Vielen Dank!
- Kommen Sie gern auf uns zu!

Dr. Jörg Richter

Gruppenleiter Katalyse und Materialsynthese

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien
und Systeme IKTS
Michael-Faraday-Str. 1
07629 Hermsdorf

+49 (0) 36601 / 9301-2327
joerg.richter@ikts.fraunhofer.de

