

Wasserstoff in der Energiewende – wann und wofür brauchen wir ihn?

Vortrag für die Initiative "Umwelt- und Klimaschutz leicht gemacht"



Damit Sie wissen, mit wem Sie es zu tun haben

Intro



Hintergrund

- Maschinenbau-Bachelor (THM, Friedberg)
- Zusatzqualifikation Netzingenieur Gas (FH Münster, Steinfurt)

Aktuell

- Masterstudien in
 - Energietechnik (THM, Gießen)
 - Wirtschaftsingenieurwesen (DHBW CAS, Heilbronn)
- Research Assistant bei Prof. Lechner (Energiewirtschaft und Energiesysteme)

Stationen

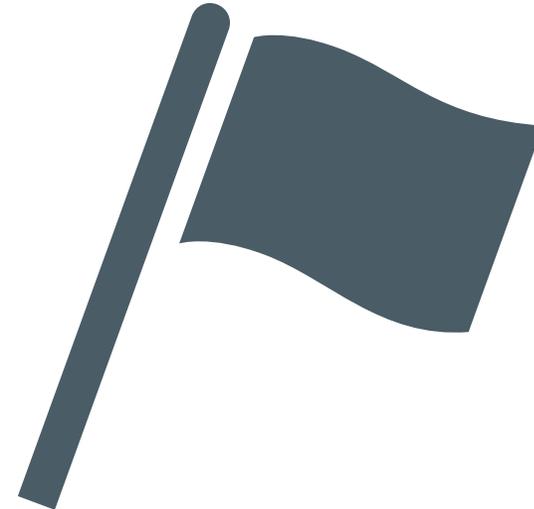
- 2017–21: DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig
- 2016/17: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Ottobrunn (München)

Mitgliedschaften bzw. Förderung

- Mittelhessische Energiegenossenschaft (MiEG)
- VDI, VWI, DVGW
- Studienstipendium Heinrich-Böll-Stiftung (2014-17, seit 04/2020)

Abendziel

- Grundgefühl und Anknüpfungspunkte vermitteln für
- Möglichkeiten und Grenzen von Wasserstoff als Energieträger
- Energiesystem(e) und Studien
- Akteure der Energiewirtschaft
- mit Ihnen Spaß dabei haben





Verständnisfragen bitte sofort, Diskussionsfragen im Anschluss



Gerne den Chat nutzen, um Fragen anzukündigen bzw. zu stellen



Mikro und Kamera gerne zum Frage stellen einschalten, sonst bitte standardmäßig aus

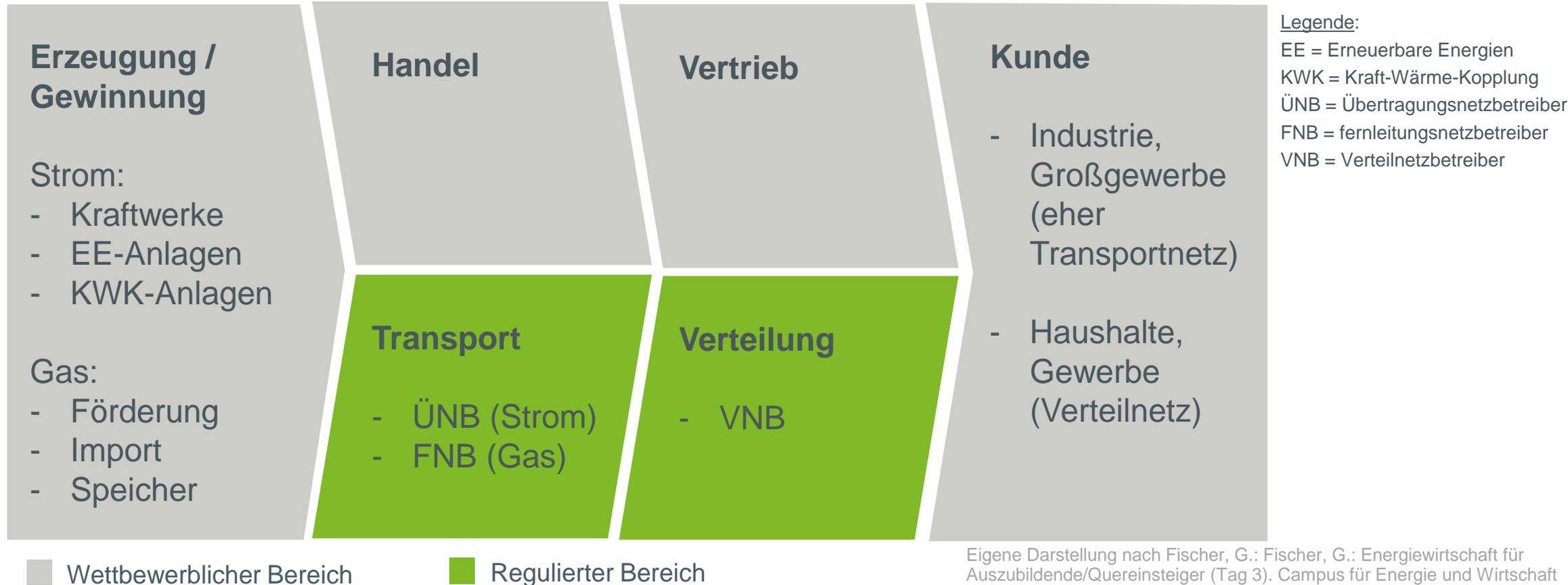
Was kommt Ihnen in den Kopf, wenn Sie an Wasserstoff denken?





Einleitung

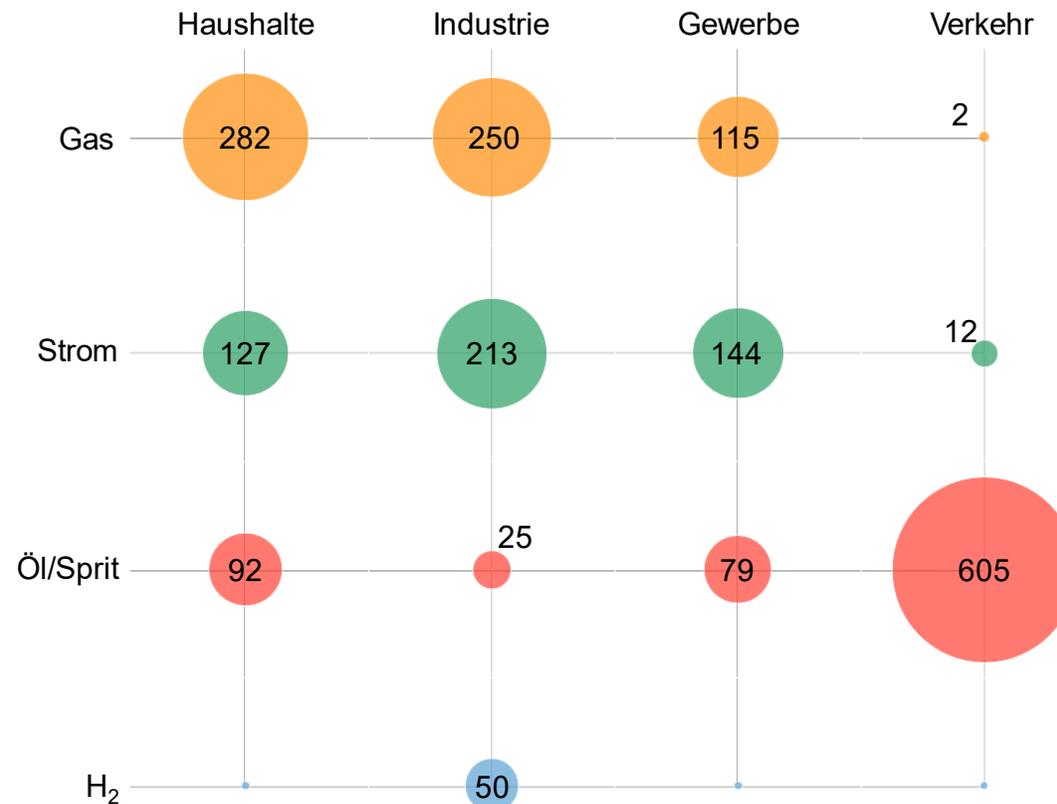
Einleitung



Eigene Darstellung nach Fischer, G.: Fischer, G.: Energiewirtschaft für Auszubildende/Quereinsteiger (Tag 3). Campus für Energie und Wirtschaft GbR und Verband der Bayerischen Energie und Wasserwirtschaft e.V.

Endenergieverbrauch

Nach Sektoren im Jahr 2021 in TWh

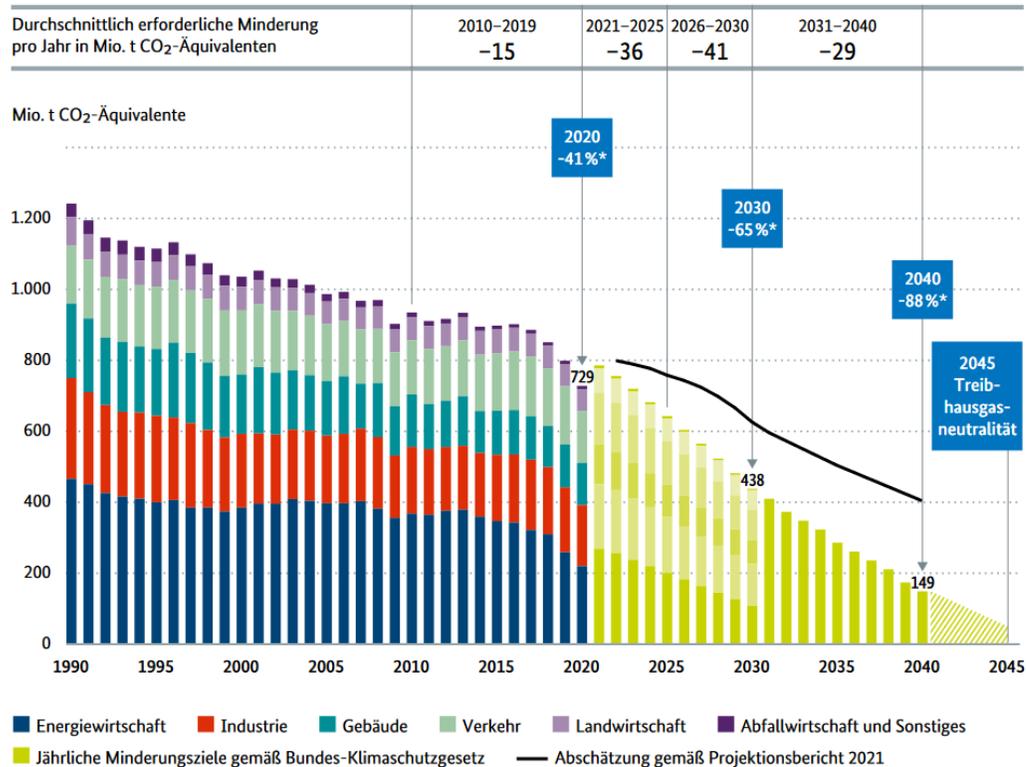


Eigene Darstellung nach ZEIT ONLINE GmbH:
EnergieMonitor - Die wichtigsten Daten zur
Energieversorgung – täglich aktualisiert. Dezember
2022. [Frei verfügbar unter
<https://www.zeit.de/wirtschaft/energiemonitor-deutschland-gaspreis-spritpreis-energieversorgung>,
Abrufdatum: 07.12.2022]

Energiewende bedeutet Einhaltung der Klimaziele im Energie- und Verkehrssektor (2045: Klimaneutralität)

Einleitung

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland



Quellen: Umweltbundesamt, Bundes-Klimaschutzgesetz

Energiewende in einer einfachen Formel

Energiewende =

Legende: Zieljahr 2045

Stromwende +

- kein Kohlekraftwerk
- Kein Gaskraftwerk mit fossilem Gas

Wärmewende +

- keine Heizung mit fossilem Gas oder Öl
- keine fossile industrielle Wärme

Verkehrswende

- kein Verbrenner mit fossilem Benzin oder Diesel
- kein Schiff mit fossilem Schiffsdiesel
- kein Flugzeug mit fossilem Kerosin

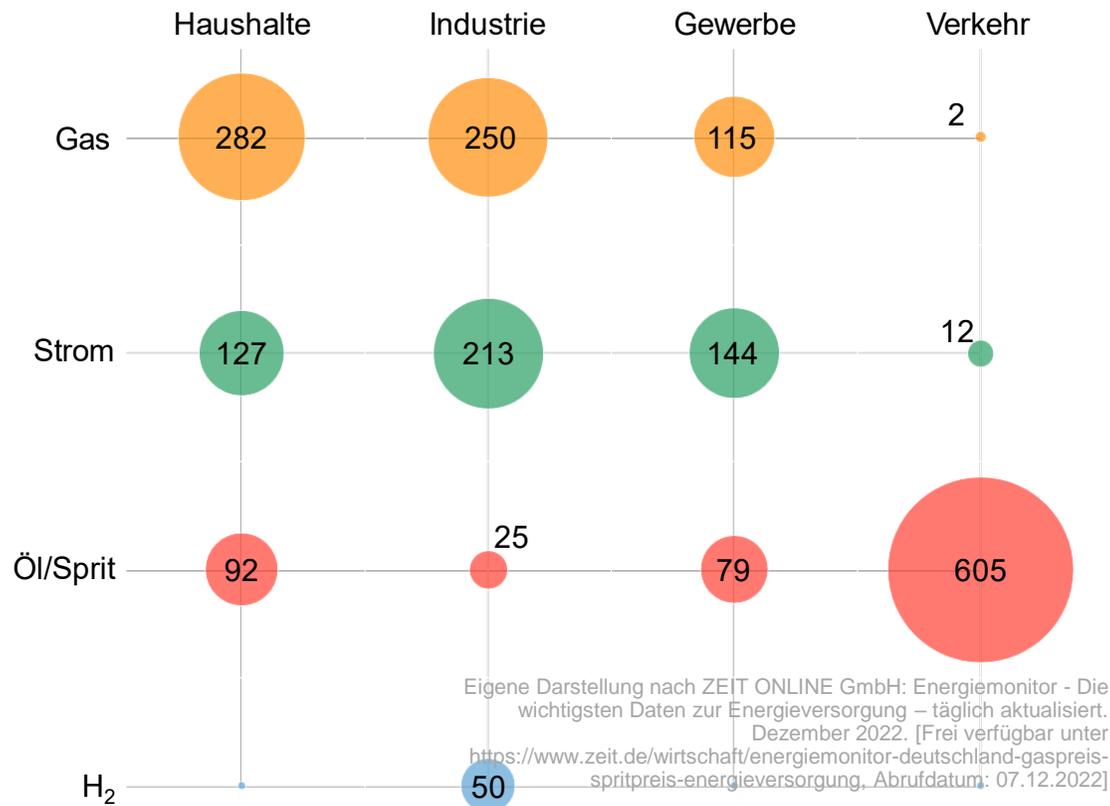
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Eröffnungsbilanz Klimaschutz. 13. Januar 2022. [Frei verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.html, Abrufdatum: 16.01.2023]

Energiewende bedeutet auch: Großteil der Endenergie (fossiles Gas und Öl) muss durch klimaneutral ersetzt werden

Einleitung

Endenergieverbrauch

Nach Sektoren im Jahr 2021 in TWh



Energiewende in einer einfachen Formel

Energiewende =

Legende: Zieljahr 2045

Stromwende +

- kein Kohlekraftwerk
- Kein Gaskraftwerk mit fossilem Gas

Wärmewende +

- keine Heizung mit fossilem Gas oder Öl
- keine fossile industrielle Wärme

Verkehrswende

- kein Verbrenner mit fossilem Benzin oder Diesel
- kein Schiff mit fossilem Schiffsdiesel
- kein Flugzeug mit fossilem Kerosin

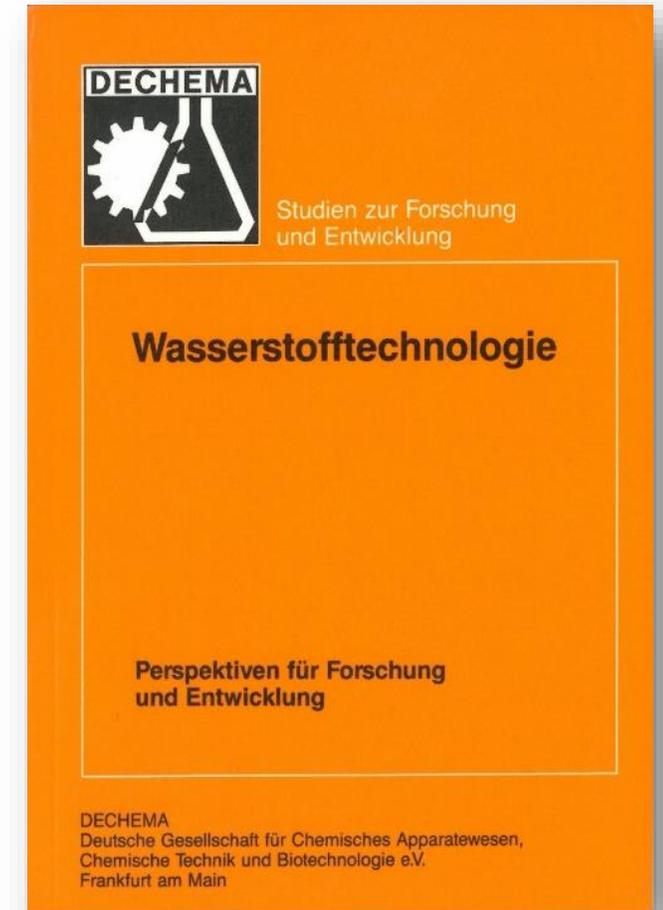
Anschlussfrage: Welche Rolle kann Wasserstoff in der Energiewende spielen?

”

„Die Wasserstoffwirtschaft hat also zwei Bedeutungen: Einmal umfaßt sie die bestehenden Anwendungen und die derzeitige Herstellung des Wasserstoffs in der Chemischen Technik, zum anderen aber kann ich eine Wasserstoffwirtschaft als Energiesystem entwickeln, in dem Wasserstoff den zentralen Sekundärenergieträger darstellt.“

“

In: Behrens, D.: Wasserstofftechnologie - Perspektiven für Forschung und Entwicklung. DECHEMA, Frankfurt am Main, 1986.



Agenda



Einleitung



Grundlagen



Stand der Forschung



Öffentlicher Diskurs



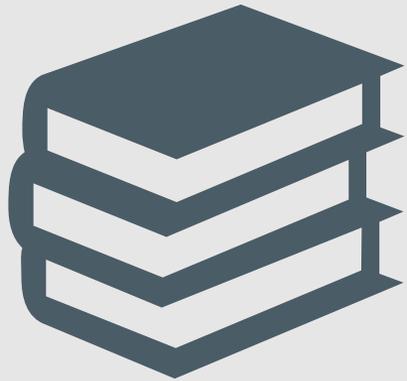
Zusammenfassung



Fragen und Diskussion



Grundlagen



Grundlagen

- Wasserstoff allgemein

Wasserstoff auf einen Blick: leicht, nicht giftig, als Energieträger universell verwendbar

Grundlagen - Wasserstoff allgemein

Wasserstoff:

- Wasserstoff ist ein **farb- und geruchloses Gas** (unter Normalbedingungen).
- Wasserstoff **ist leichter als Luft** und entweicht schnell nach oben.
- Wasserstoff hat einen hohen Diffusionskoeffizienten (viermal größer als Methan) und **verdünnt sich rasch in Luft**.
- Wasserstoff hat deutlich engere Detonations- als Explosionsgrenzen – bei früher Zündung brennt er, bevor die Detonationsgrenzen erreicht werden.
- Wasserstoff **brennt mit unsichtbarer Flamme**, die sehr wenig Wärme abstrahlt.

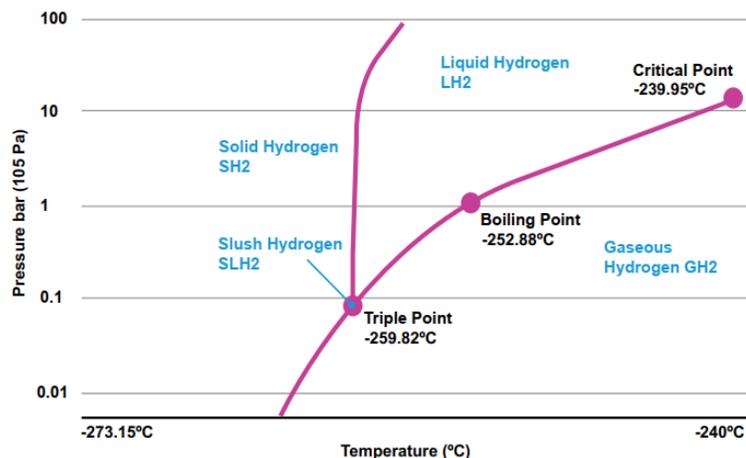
Wasserstoff ist...

- nicht giftig, nicht ätzend, nicht radioaktiv
- nicht wassergefährdend, nicht fruchtschädigend, nicht krebserzeugend
- nicht selbstentzündlich, nicht detonativ im Freien, nicht brandfördernd
- nicht korrosiv, nicht oxidierend

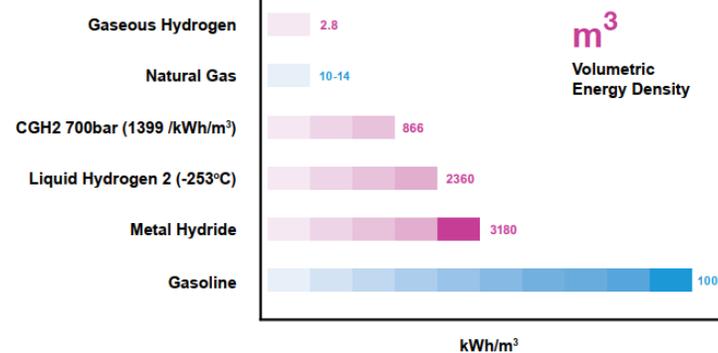
... hat das Potential

- zum universellen Energieträger
 - Rohstoff in Industrie
 - Kraftstoff im Verkehr
 - Rückverstromung
 - Einspeisung ins Gasnetz
 - ..
- zur Schnittstelle zwischen Sektoren

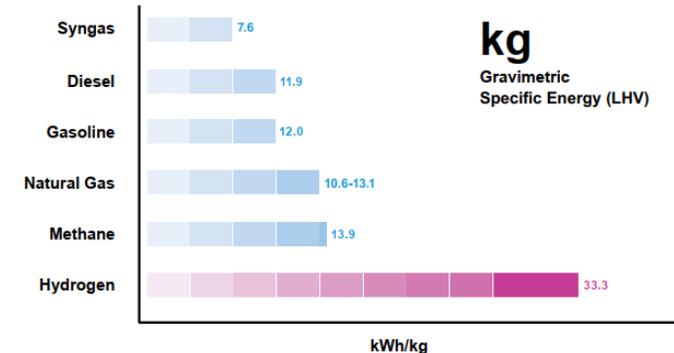
Hydrogen phase diagram



Gaseous diagram



Weight diagram

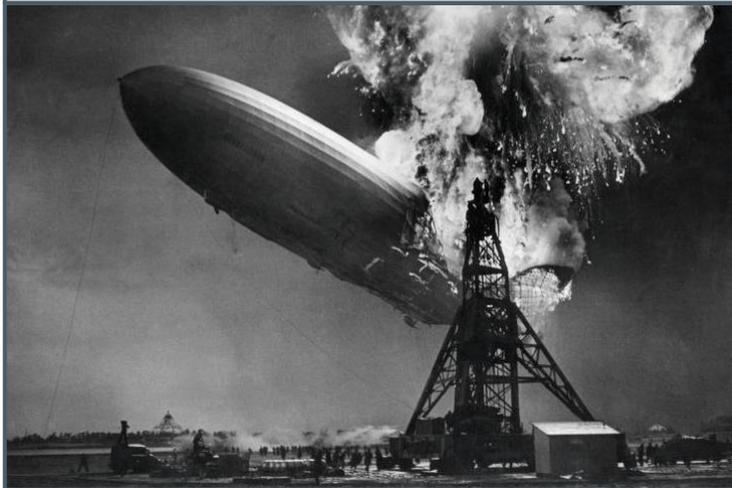


Compressed gaseous hydrogen (CGH₂) is the preferred form in most practical applications.

Wasserstoff ist gefährlich, wie auch Sprit oder Erdgas, aber technisch sicher seit Jahrzehnten!

Grundlagen - Wasserstoff allgemein

LZ129 Hindenburg (1939)



https://de.wikipedia.org/wiki/LZ_129#/media/Datei:Hindenburg_disaster.jpg

Abbeystead explosion (1984)

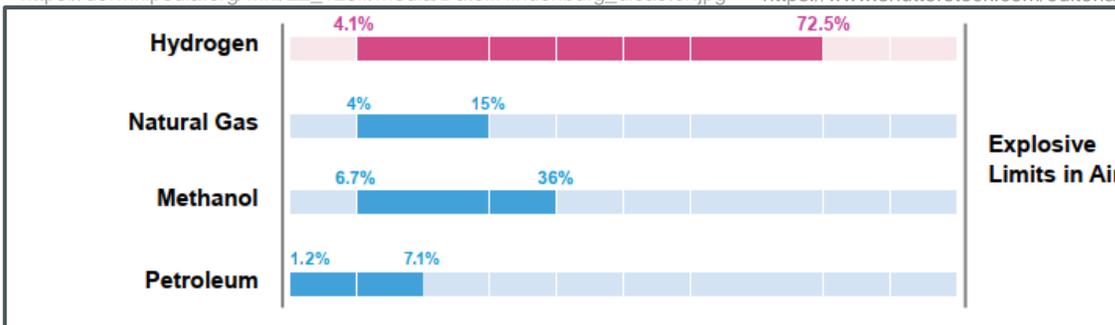


<https://www.shutterstock.com/editorial/image-editorial/scene-explosion-pumping-station-abbeystead-disaster-occurred-1704788a>

Buncefield petroleum fire (2005)



<https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Buncefield2.jpg>



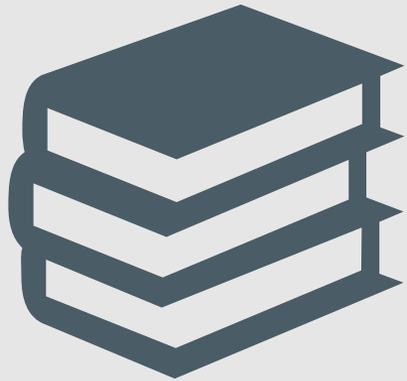
„Der sichere Umgang mit explosionsfähigen Brenngasen muss bei Planung, Bau und Betrieb oberste **Priorität** haben und dem Grundsatz folgen:

Es darf zu keinem Zeitpunkt eine betriebliche Situation entstehen, in der es zu einem explosionsfähigen Brennstoff-(Luft-)Sauerstoff-Gemisch kommen kann.“

Quelle(n):

ARUP: Five Minute Guide to Hydrogen. Februar 2016.

Schmidt, T.: Wasserstofftechnik - Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft. 1.Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2020.



Grundlagen

- Anwendung

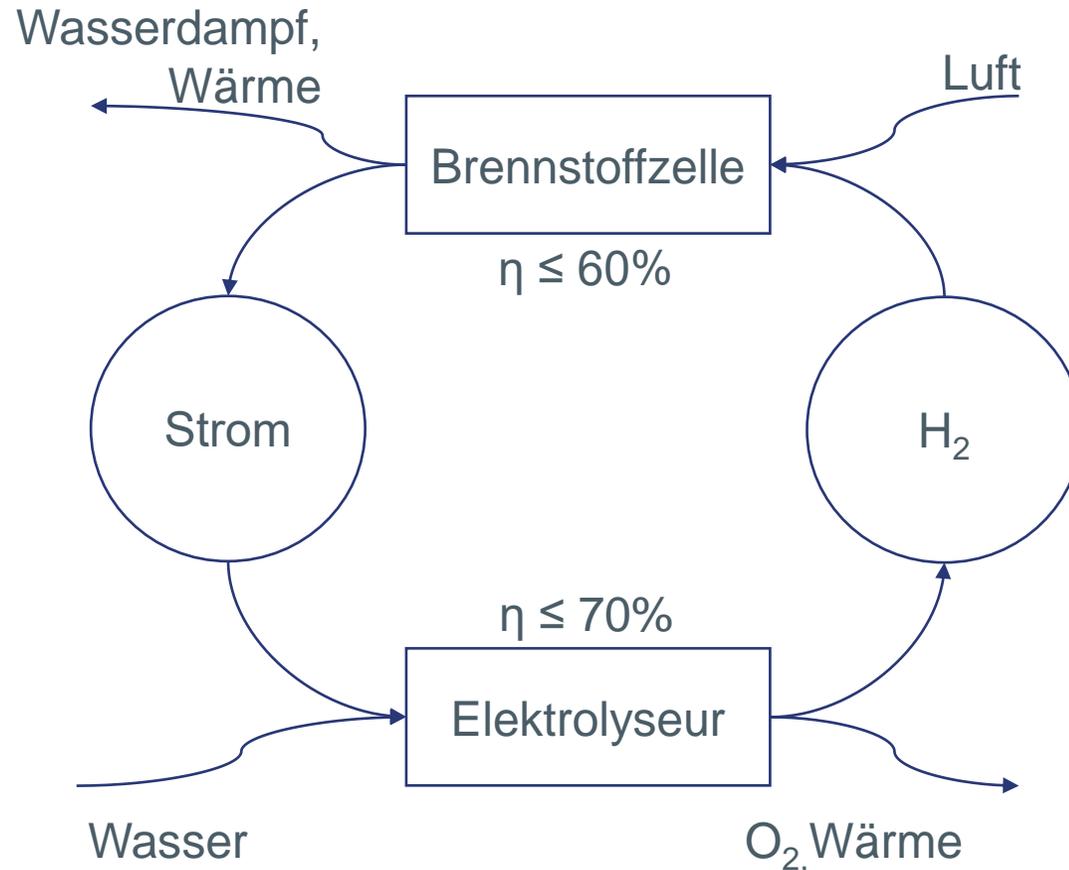
Die Landschaft der Wasserstoff-Anwendungen – ein technologischer Ausschnitt

Grundlagen - Anwendung

		Produkt	Effizienz el.	Effizienz el.+th.	Stationär	Mobil	
Wasserstoff-Anwendungen	Energetisch	Brennstoffzelle	Strom, (Wärme)	35 ..60%	75 ... 95%	KWK	Antrieb (Auto, Zug, Schiff, etc.)
		Gasturbine	Strom, (Wärme)	40 ... 60% (GuD)	>90%	Kraftwerke, (Gebäude)	n.a.
		Verbrennungsmotor	Strom, (Wärme)	25 ... 40 %	80 ..90%	KWK	Antrieb (Auto, Zug, Schiff, etc.)
		Brennwertkessel	Wärme	n.a.	95%	Gebäude	n.a.
		Power-to-Liquid (PtL)	CxHy (Kerosin, Benzin etc.)	n.a.	n.a.	Alle Anwendungen von flüssigen Kohlenwasserstoffe	
		Nicht-energetisch	Ammoniak-Synthese	NH3	<p>Legende: El. = elektrisch Th. = thermeisch KWK = Kraft-Wärme-Kopplung FCEV = Fuel Cell Electric Vehicle n.a. = nicht anwendbar</p>		
Hydrierung	z.B. Fette, Öle						
Entschwefelung	Kraftstoffe						
Reduktion (Metallurgie)	Eisen						
Power-to-X (PtX)	Chemische Grundstoffe						

Brennstoffzelle: Wasser, Strom und Wasserstoff sind Kern der grünen Wasserstoffwirtschaft

Grundlagen - Anwendung



Eigene Darstellung

Es gibt unterschiedliche Brennstoffzelle-Technologien mit Vor- und Nachteilen

Grundlagen - Anwendung

Table 10: Current performance of key hydrogen conversion, T&D and storage technologies

<i>Application</i>	<i>Power or capacity</i>	<i>Efficiency *</i>	<i>Initial investment cost</i>	<i>Life time</i>	<i>Maturity</i>
Alkaline FC	Up to 250 kW	~50% (HHV)	USD 200-700/kW	5 000-8 000 hours	Early market
PEMFC stationary	0.5-400 kW	32%-49% (HHV)	USD 3 000-4 000/kW	~60 000 hours	Early market
PEMFC mobile	80-100 kW	Up to 60% (HHV)	USD ~500/kW	<5 000 hours	Early market
SOFC	Up to 200 kW	50%-70% (HHV)	USD 3 000-4 000/kW	Up to 90 000 hours	Demonstration
PAFC	Up to 11 MW	30%-40% (HHV)	USD 4 000-5 000/kW	30 000-60 000 hours	Mature
MCFC	KW to several MW	More than 60% (HHV)	USD 4 000-6 000/kW	20 000-30 000 hours	Early market

Legende:

FC = Fuel Cell
 PEM = Polymer Exchange Membrane
 SO = Solid Oxide
 PA = Phosphoric Acid
 MC = Molten Carbonate
 HHV = Higher Heating Value (Brennwert)

Quelle:

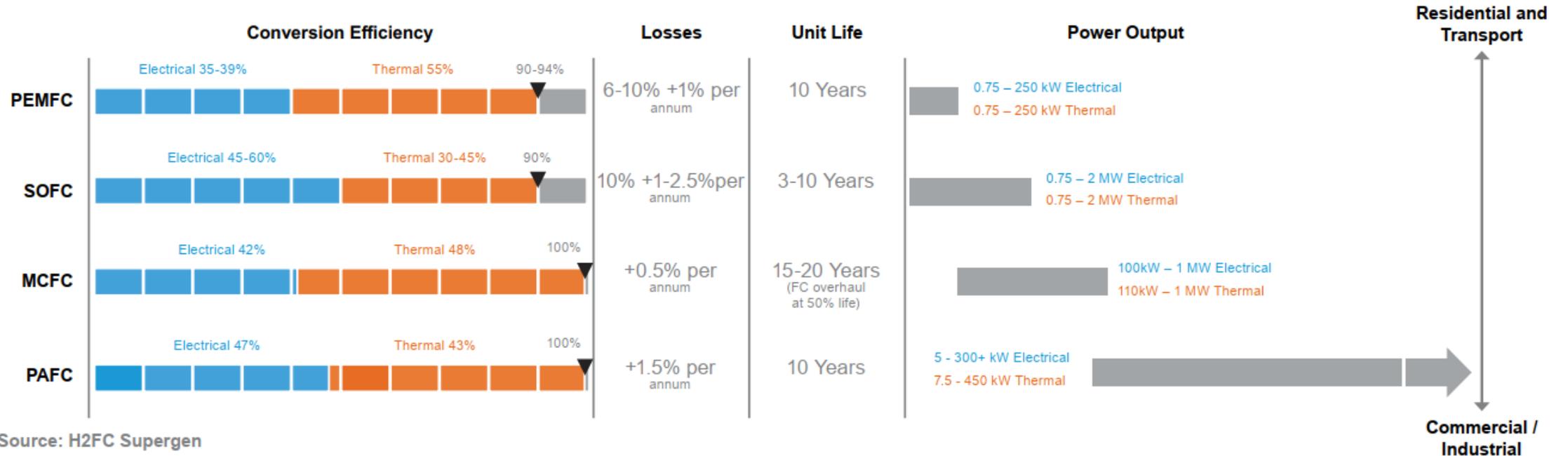
International Energy Agency (IEA): Technology Roadmap - Hydrogen and Fuel Cells. Paris: Juni 2015. [Kommerziell verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydrogen-and-fuel-cells>, Stand: 23.06.2020]

Es gibt unterschiedliche Brennstoffzelle-Technologien mit Vor- und Nachteilen

Grundlagen - Anwendung



TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN



Source: H2FC Supergen

ARUP: Five Minute Guide to Hydrogen. Februar 2016.

[Frei verfügbar unter <https://www.arup.com/perspectives/publications/promotional-materials/section/five-minute-guide-to-hydrogen>, Abrufdatum: 05.01.2023]

Der enge Effizienzvergleich im Heizungskeller fällt für Wasserstoff schlecht aus ...



TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN

Grundlagen - Anwendung

Effizienz-Vergleich von verschiedenen Heizsystemen auf Basis von erneuerbarem Strom

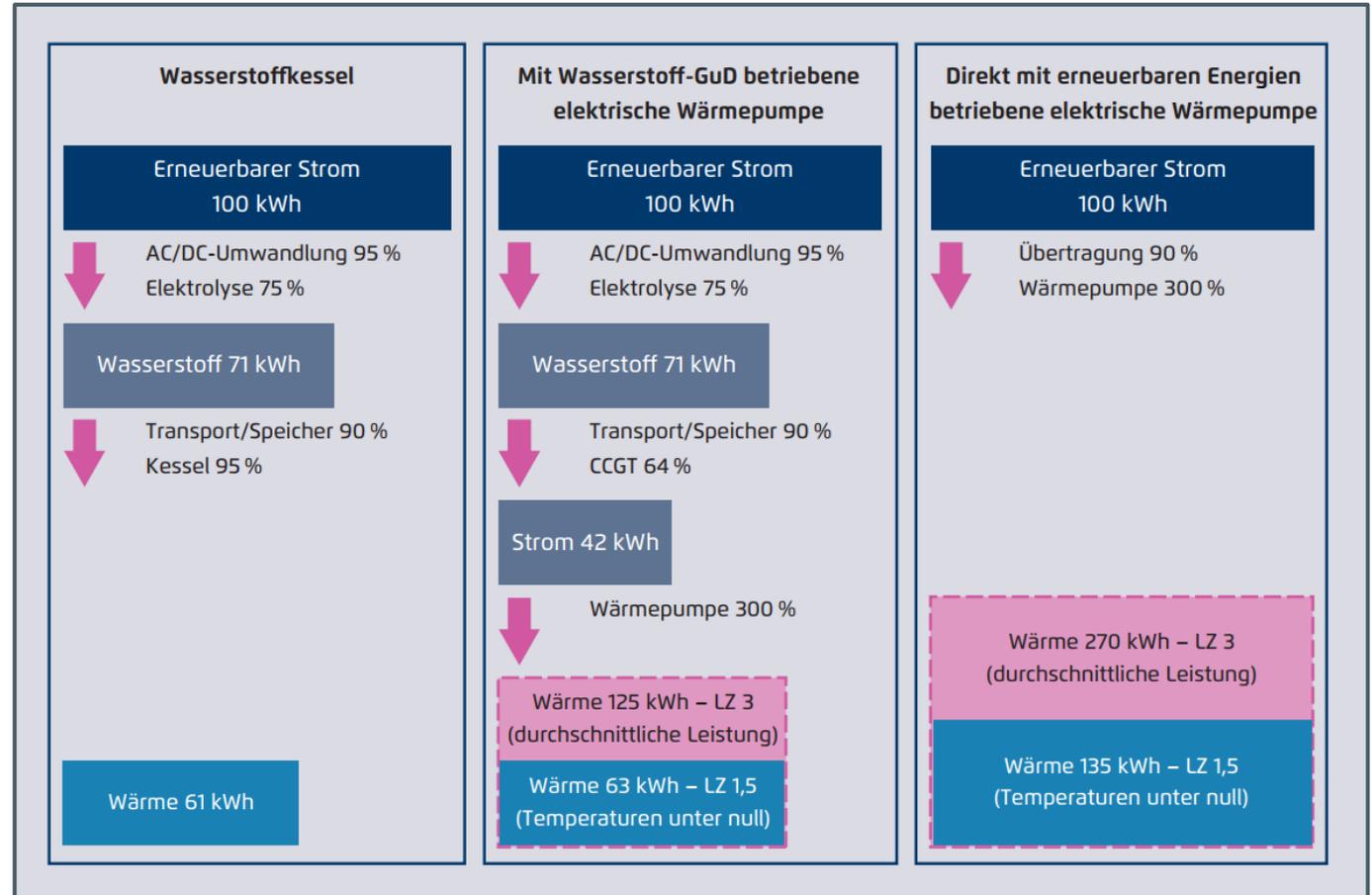
„Agora Energiewende angelehnt an LETI (2021) und Fraunhofer ISE (2011).

Anmerkung: Eigene Berechnungen angelehnt an LETI (2021) und Fraunhofer ISE (2011). Die Leistung von Wärmepumpen hängt von der

Außentemperatur ab. Die Leistungszahl (LZ) der Wärmepumpen beruht auf der durchschnittlichen saisonalen Leistung (LZ = 3) und der

Leistung bei Temperaturen unter null in den Wintermonaten (LZ = 1,5). GuD = Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk“

Quelle: Flis, G.; Deutsch, M.: 12 Thesen zu Wasserstoff- Impuls. Berlin: Agora Energiewende, April 2022. [Frei verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/12-thesen-zu-wasserstoff-publication/>, Abrufdatum: 05.01.2023]



Der enge Effizienzvergleich im PKW fällt für Wasserstoff schlecht aus ...

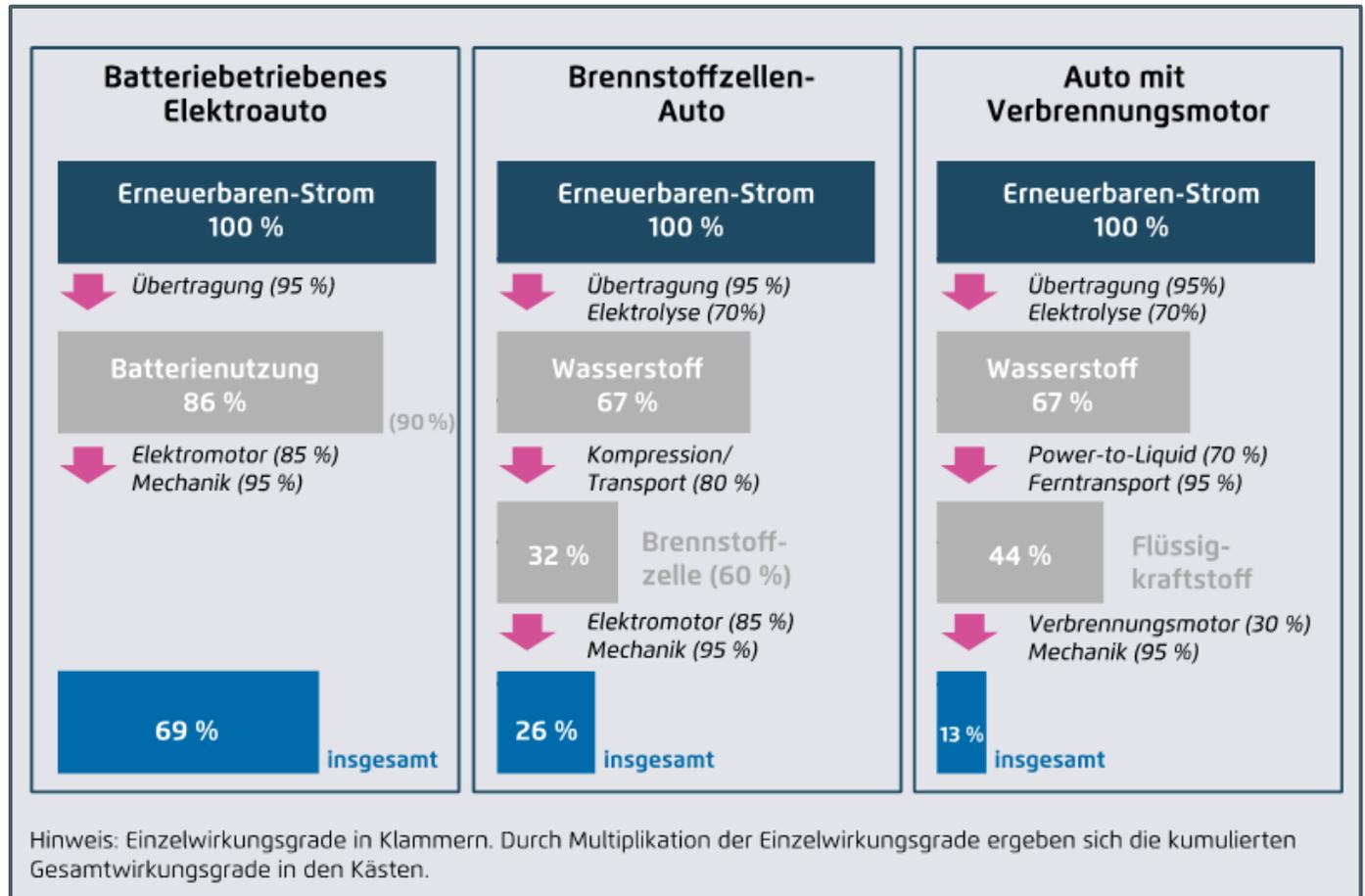
Grundlagen - Anwendung

Einzel- und Gesamtwirkungsgrade von Pkw mit unterschiedlichen Antriebskonzepten ausgehend von erneuerbar erzeugtem Strom

„eigene Berechnung auf der Grundlage von acatech et al. (2017a), Abbildung 5

Hinweis: Einzelwirkungsgrade in Klammern. Durch Multiplikation der Einzelwirkungsgrade ergeben sich die kumulierten Gesamtwirkungsgrade in den Kästen.“

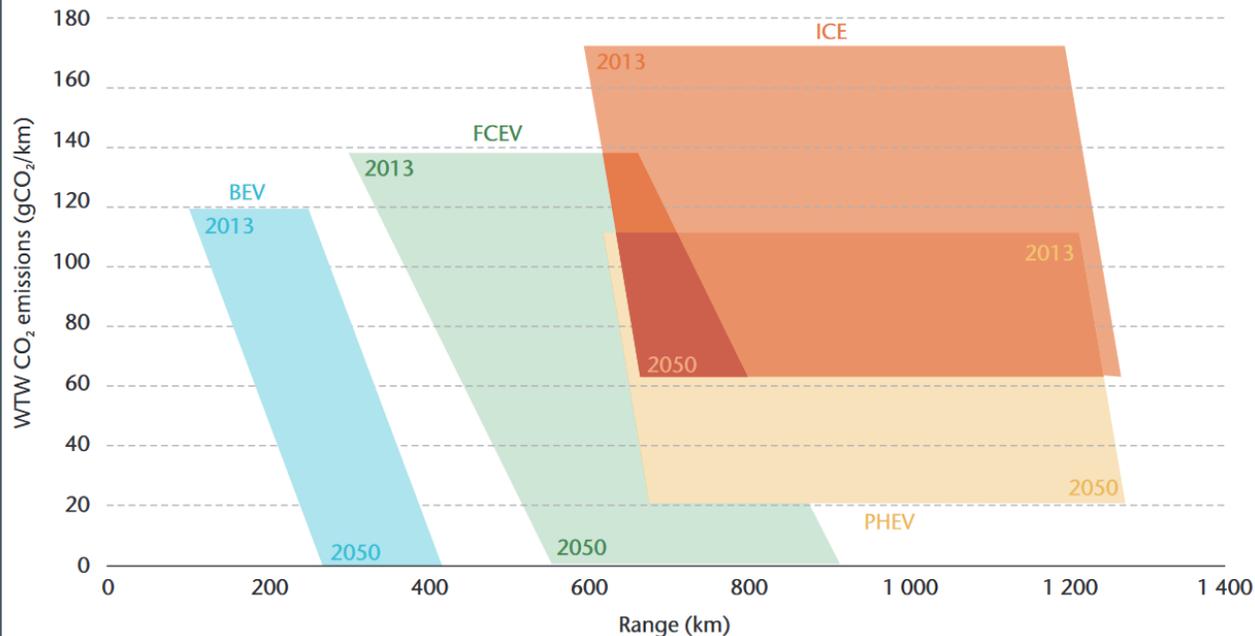
Quelle: Perner, J.; Unteutsch, M.; Lövenich, A. (Frontier Economics Ltd): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Berlin: Agora Energiewende, Juli 2018. [Frei verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/die-zukuenftigen-kosten-strombasierter-synthetischer-brennstoffe-1/>, Abrufdatum: 05.01.2023]



... aber Brennstoffzellen-PKW können Verbrenner-Nutzungskomfort (Reichweite, Betankungsdauer) bieten

Grundlagen - Anwendung

Figure 2: Well-to-wheel (WTW) emissions vs. vehicle range for several technology options



Notes: gCO₂/km = grams carbon dioxide per kilometre; WTW = wheel-to-wheel; the upper range of BEV emissions takes into account today's average world power generation mix, the lower range is based on 100% renewable electricity; the upper range of FCEV emissions takes into account a hydrogen production mix of 90% NG SMR and 10% grid electricity, the lower range is based on 100% renewable hydrogen; the lower range of PHEV emissions takes into account 65% electric driving; by 2050, a biofuel share of 30% is assumed for PHEVs and ICEs.

Brennstoffzellen-PKW

Vorteile:

- Brennstoffzelle mit gewohntem Komfort von Benzin und Diesel
 - Reichweite 500 ... 800 km (700 bar)
 - Betankungsdauer ± 3 min

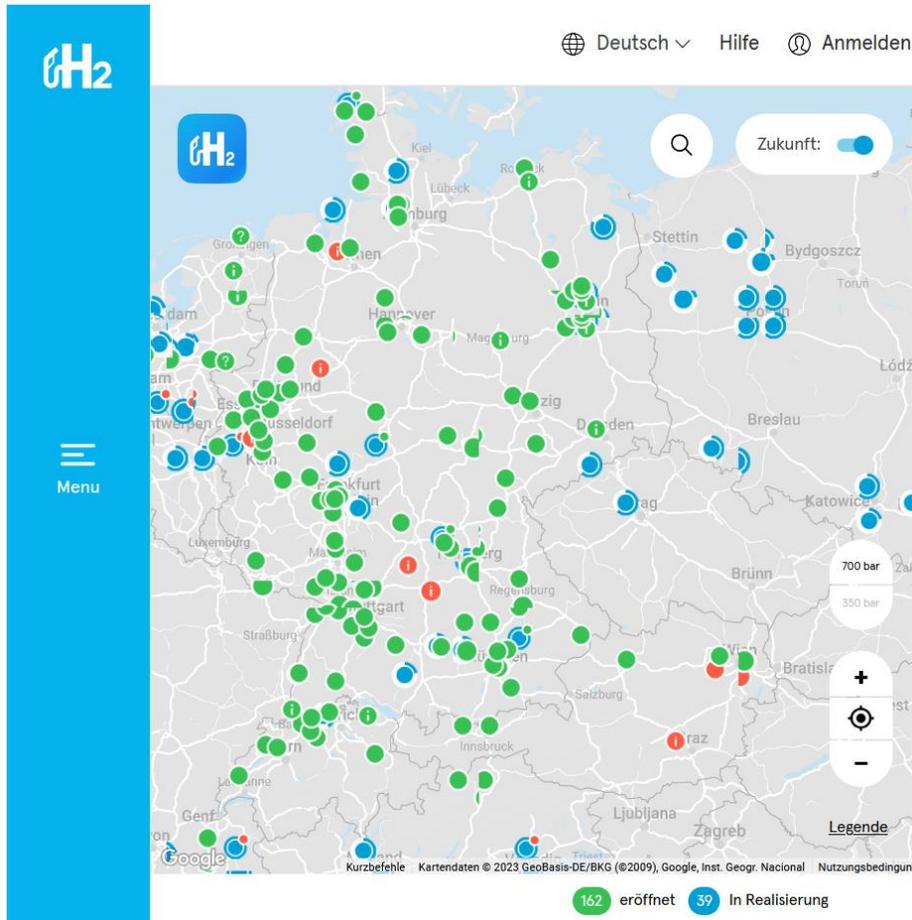
Nachteile:

- Eigene Tankstellen-Infrastruktur erforderlich (vgl. nächste Folie)
- Kosten Fahrzeug?

Quelle: International Energy Agency (IEA): Technology Roadmap - Hydrogen and Fuel Cells. Paris: Juni 2015. [Kommerziell verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydrogen-and-fuel-cells>, Stand: 23.06.2020]

Stand heute: 162 eröffnete Wasserstofftankstellen und 39 in Bau und 2 PKW-Modelle am Markt

Grundlagen - Anwendung



Toyota MIRAI II

Brennstoffzellenfahrzeug

Reichweite: 650 km

Elektromotor: 184 PS

Tankinhalt: 5,6 kg

Kraftstoffverbrauch (H2) kombiniert: 0,76 kg/100 km;

CO₂-Emissionen kombiniert 0 g/km (NEFZ*)

Typ: Limousine

Preis: 63.900 €

* gesetzl. vorgeschriebene Angaben gem. Pkw-EnVKV, basierend auf NEFZ-Werten. Die Kfz-Steuer richtet sich nach den häufig höheren WLTP-Werten



Hyundai NEXO

Brennstoffzellenfahrzeug

Reichweite: 756 km

Elektromotor: 120 kW/163 PS

Tankinhalt: 6,33 kg

Kraftstoffverbrauch (H2) kombiniert: 0,84 kg/100km (NEFZ*)

CO₂-Emissionen kombiniert: 0 g/km

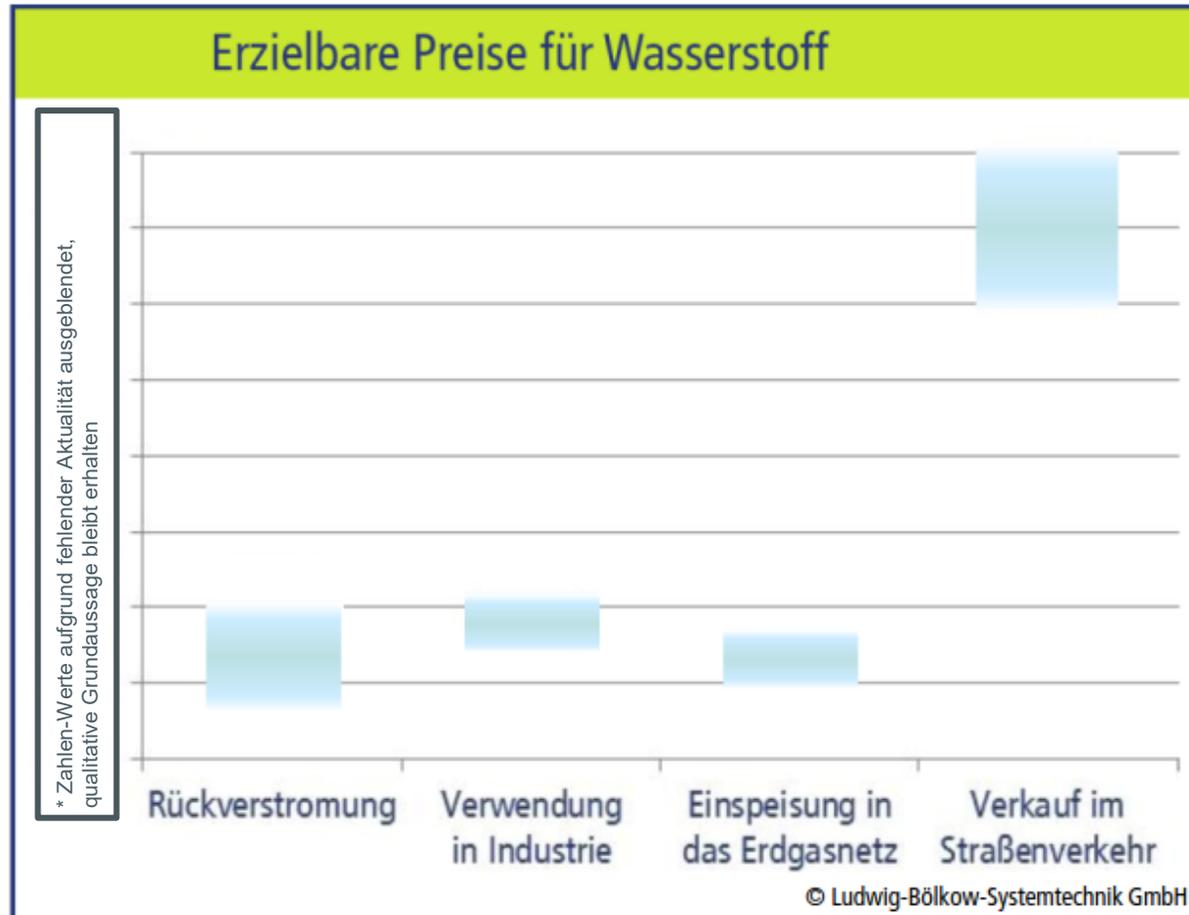
Typ: SUV

Preis: 77.008,40 €

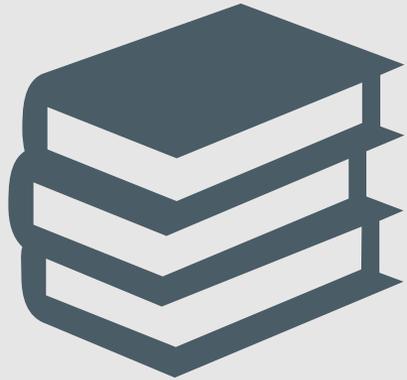
* Die angegebenen Verbrauchs- und CO₂-Emissionswerte wurden nach dem vorgeschriebenen WLTP-Messverfahren ermittelt und in NEFZ-Werte umgerechnet.

Im Mobilitätsmarkt ist Wasserstoff grundsätzlich am wertvollsten (= Zahlungsbereitschaft am höchsten)

Grundlagen - Anwendung



Quelle:
Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
(LBST)

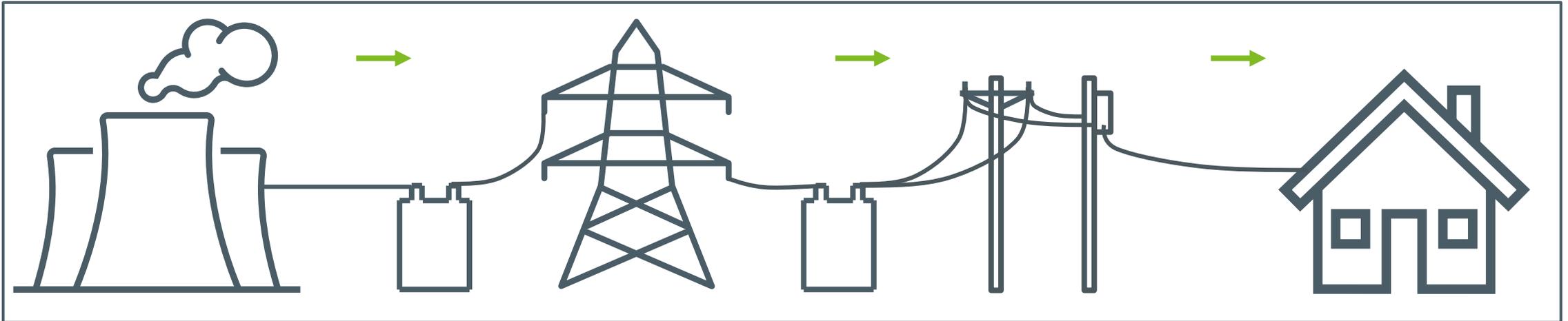


Grundlagen

- (Energie-)Speicherung

Das Stromnetz ist mit steigendem Anteil von Wind+PV „unter Druck“ - vor allem bei kalten Dunkelflauten

Grundlagen - (Energie-)Speicherung



„Kalte Dunkelflaute“



Grundregel Stromnetze

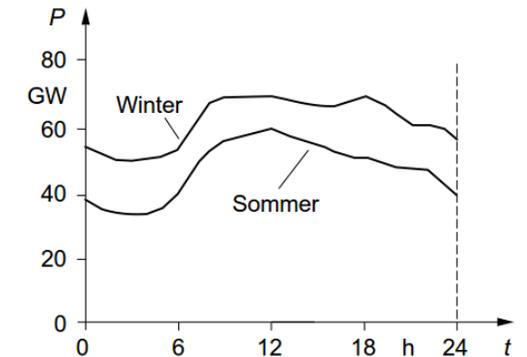
Energie rein = Energie raus (jederzeit, kaum Toleranz)

„Systemdienstleistungen“

- Frequency control
- System restoration
- Voltage control
- System control

Heuck, K.; Dettmann, K.-D.; Schulz, D.: Überblick über die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieversorgung. In: Elektrische Energieversorgung, 9.Auflage, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013, pp. pp. 1 - 5.

Verbrauchsprofil Strom



Wasserstoff ist der einzige großtechnische, saisonale Energiespeicher für die Energiewende



THM

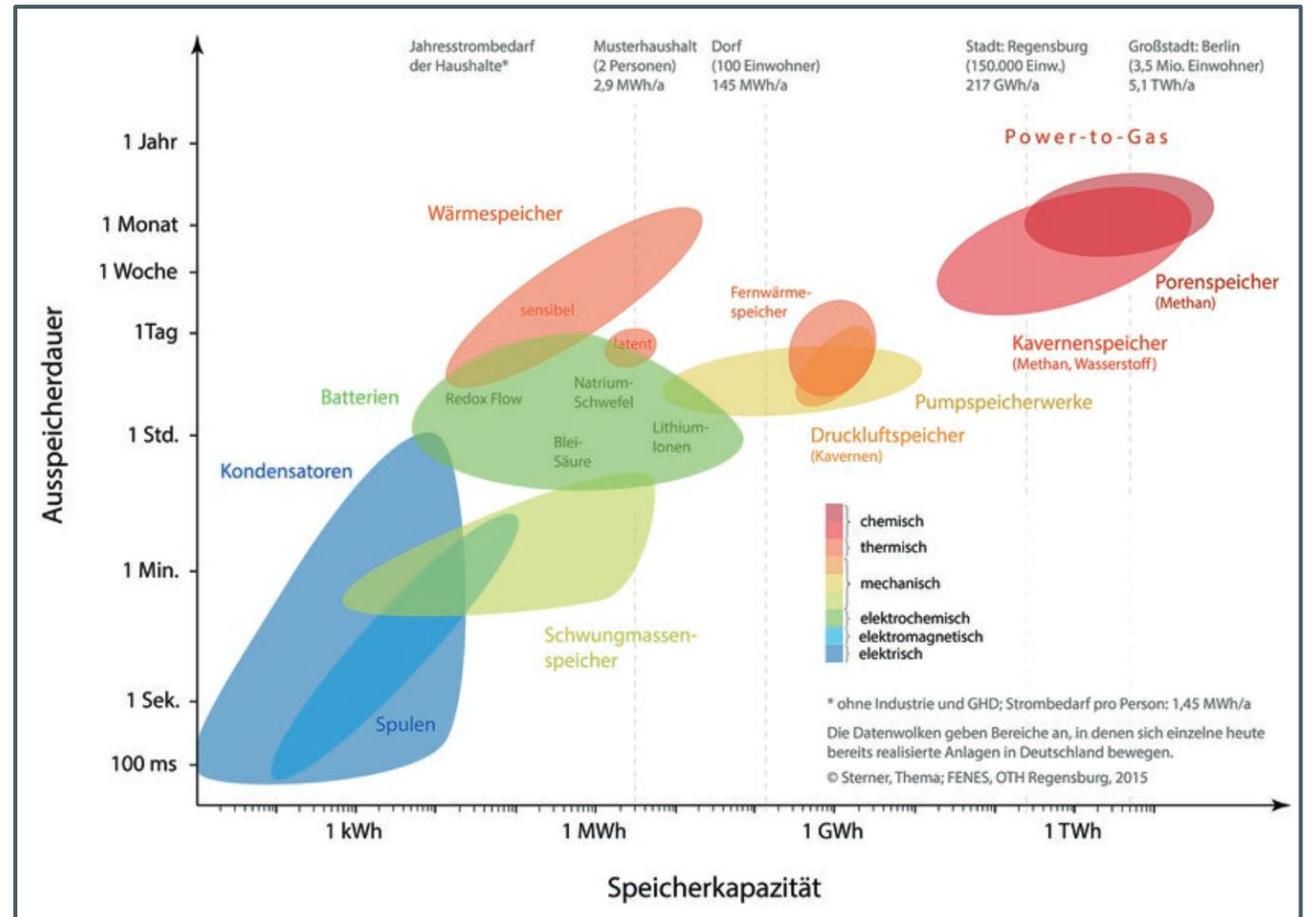
TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN

Grundlagen - (Energie-)Speicherung

Speicherarten im Vergleich nach Speicherkapazität und Ausspeicherdauer

- „Ragone-Diagramm“
- „Die Datenwolken repräsentieren in Deutschland existierende Anlagen im Jahr 2016“

Quelle: Sterner, M.; Stadler, I.: Energiespeicher- Bedarf - Technologien - Integration. 2.Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2017.



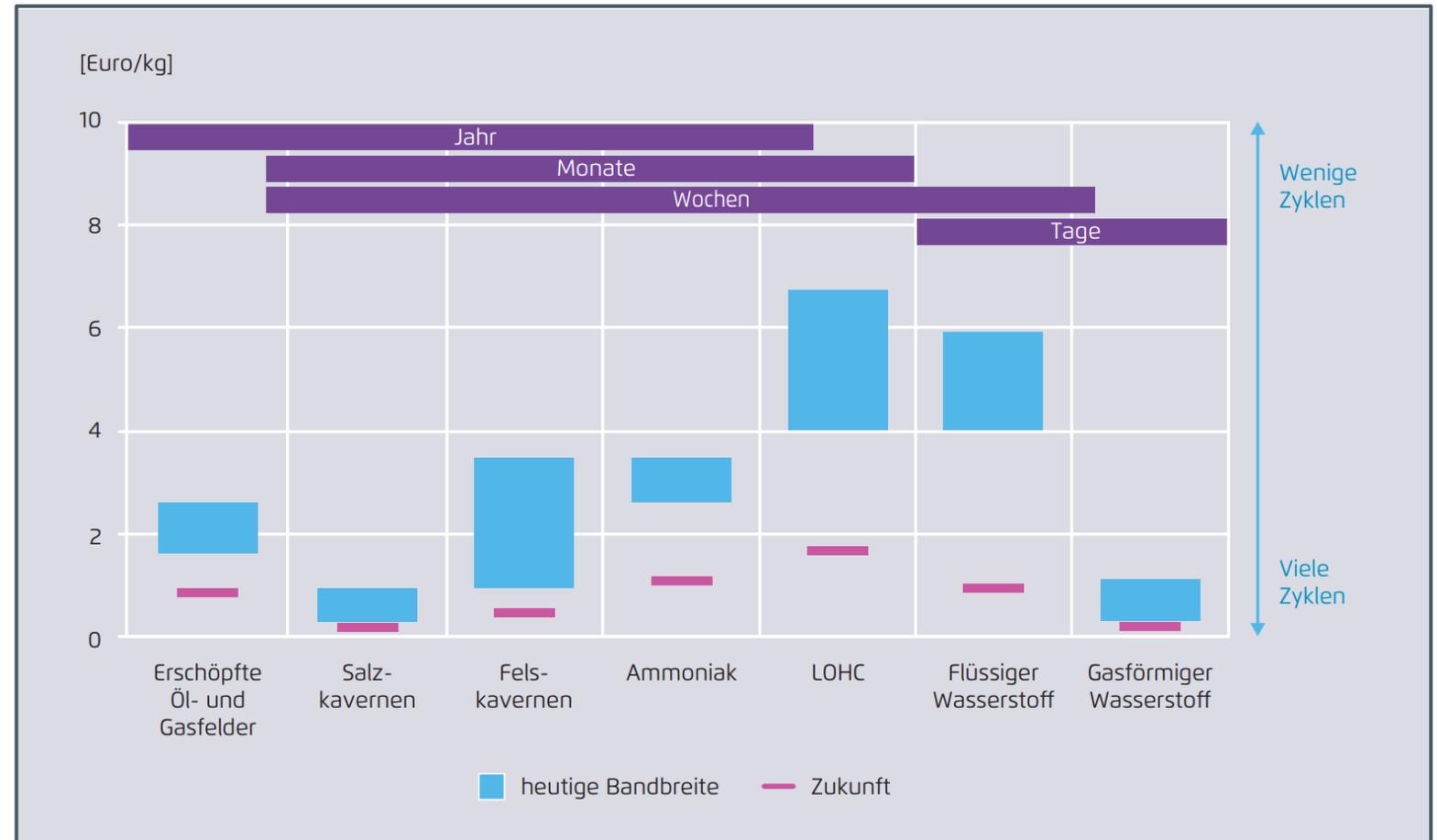
Kavernenspeicher mit Wasserstoff ist der günstigste großtechnische Energiespeicher für „kalte Dunkelflauten“

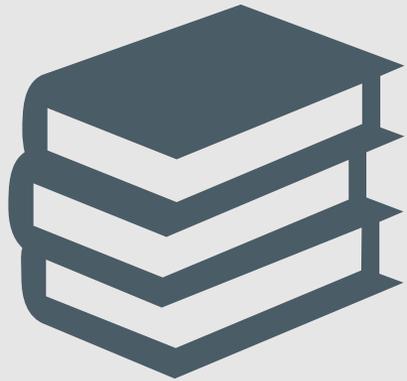
Grundlagen - (Energie-)Speicherung

Wasserstoff-Speicherkosten

- „BloombergNEF (2020), J. Doomernik et al (2020).
- Anmerkung: LOHC = flüssige organische Wasserstoffträger (Liquid Organic Hydrogen Carrier)“

Quelle: Flis, G.; Deutsch, M.: 12 Thesen zu Wasserstoff- Impuls. Berlin: Agora Energiewende, April 2022. [Frei verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/12-thesen-zu-wasserstoff-publikation/>, Abrufdatum: 05.01.2023]



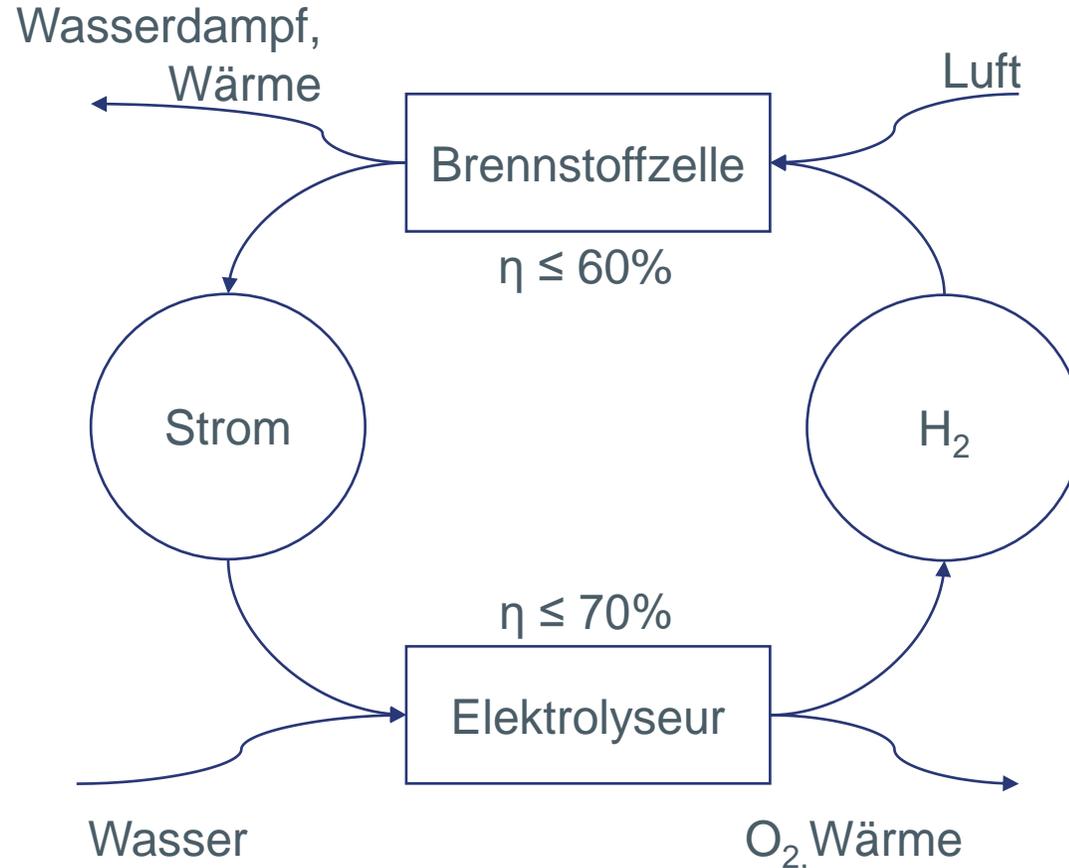


Grundlagen

- Gesteiner („Erzeugung“)

Elektrolyse: Wasser, Strom und Wasserstoff sind Kern der grünen Wasserstoffwirtschaft

Grundlagen - Anwendung



Eigene Darstellung

Es gibt unterschiedliche Elektrolyse-Technologien mit Vor- und Nachteilen

Grundlagen - Gestehung („Erzeugung“)

Application	Power or capacity	Efficiency	Initial investment cost	Life time	Maturity
Steam methane reformer, large scale	150-300 MW	70-85%	400-600 USD/kW	30 years	Mature
Steam methane reformer, small scale	0.15-15 MW	~51%	3 000-5000 USD/kW	15 years	Demon-
Alkaline electrolyser	Up to 150 MW (stacks) Up to 1 MW (systems)	65-82% (HHV)	850-1 500 USD/kW	60000-90000 hours	Mature
PEM electrolyser	Up to 150 kW	65-78% (HHV)	1 500-3 800 USD/kW	20000-	Early market
SO electrolyser	Lab scale	85-90% (HHV)		-1 000h	R&D

Quelle: International Energy Agency (IEA): Technology Roadmap - Hydrogen and Fuel Cells. Paris: Juni 2015. [Kommerziell verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydrogen-and-fuel-cells>, Stand: 23.06.2020]

Es gibt unterschiedliche Elektrolyse-Technologien mit Vor- und Nachteilen

Grundlagen - Gestehung („Erzeugung“)

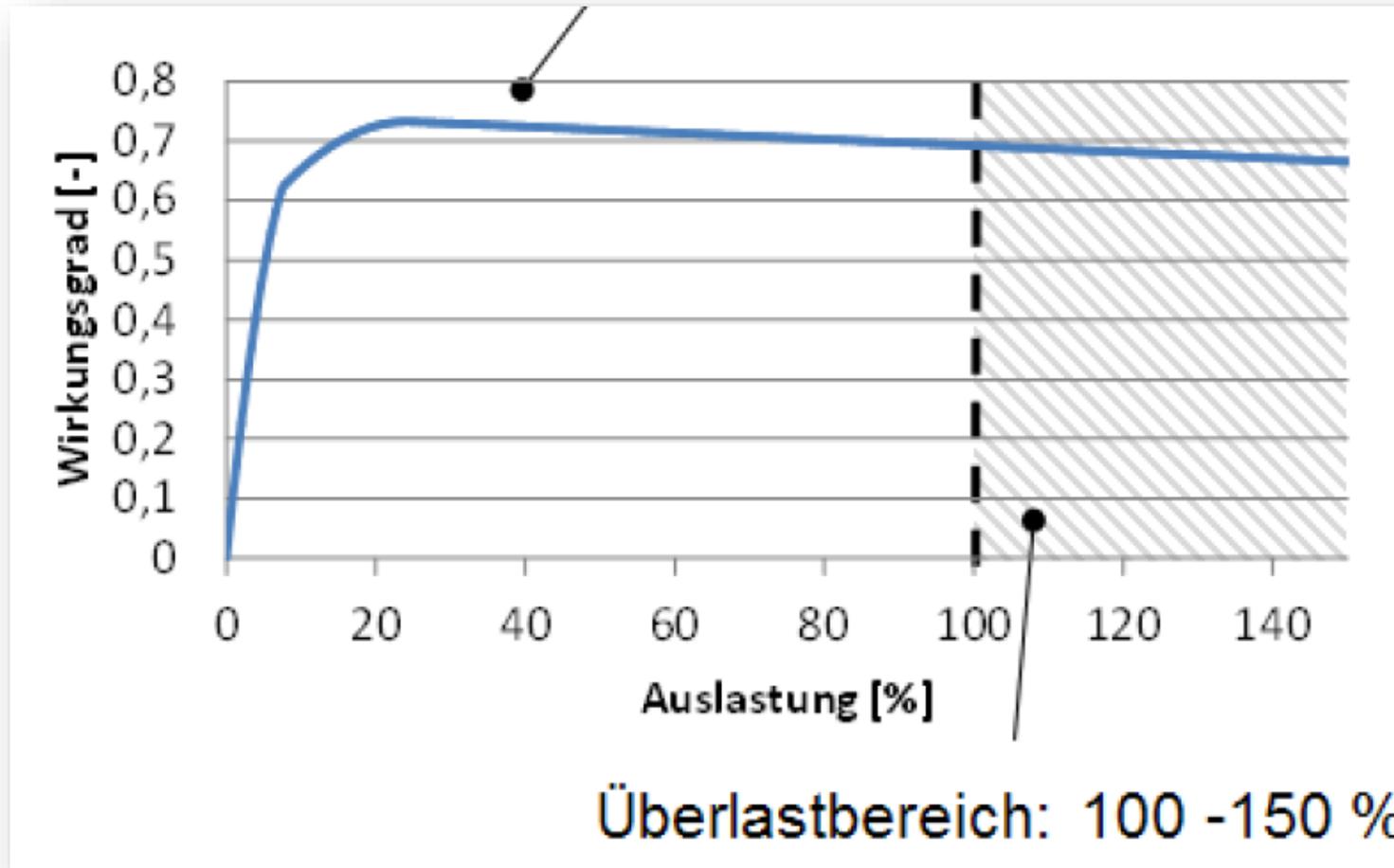
		Alkaline	PEM	AEM
Development status		Commercial	Commercial medium and small scale applications (≤ 300 kW)	Commercial in limited applications
System size range	Nm ³ _{H₂} /h	0.25 – 760	0.01 – 240	0.1 – 1
	kW	1.8 – 5,300	0.2 - 1,150	0.7 – 4.5
Hydrogen purity ⁶		99.5% – 99.9998%	99.9% – 99.9999%	99.4%
Indicative system cost	€/kW	1,000-1,200	1,900 – 2,300	N/A

Table 1: Overview of commercially available electrolyser technologies

Bertuccioli, L. (E4tech); Chan, A. (Element Energy); Hart, D.; Lehner, F. (E4tech); Madden, B.; Standen, E. (Element Energy): Development of Water Electrolysis in the European Union. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), Februar 2014. [Frei verfügbar unter <https://wayback.archive-it.org/12090/20220604224431/https://www.fch.europa.eu/node/783>, Abrufdatum: 06.01.2023]

Elektrolyseure (und Brennstoffzellen) haben bei Teillast oft höhere Effizienz als im Nennpunkt

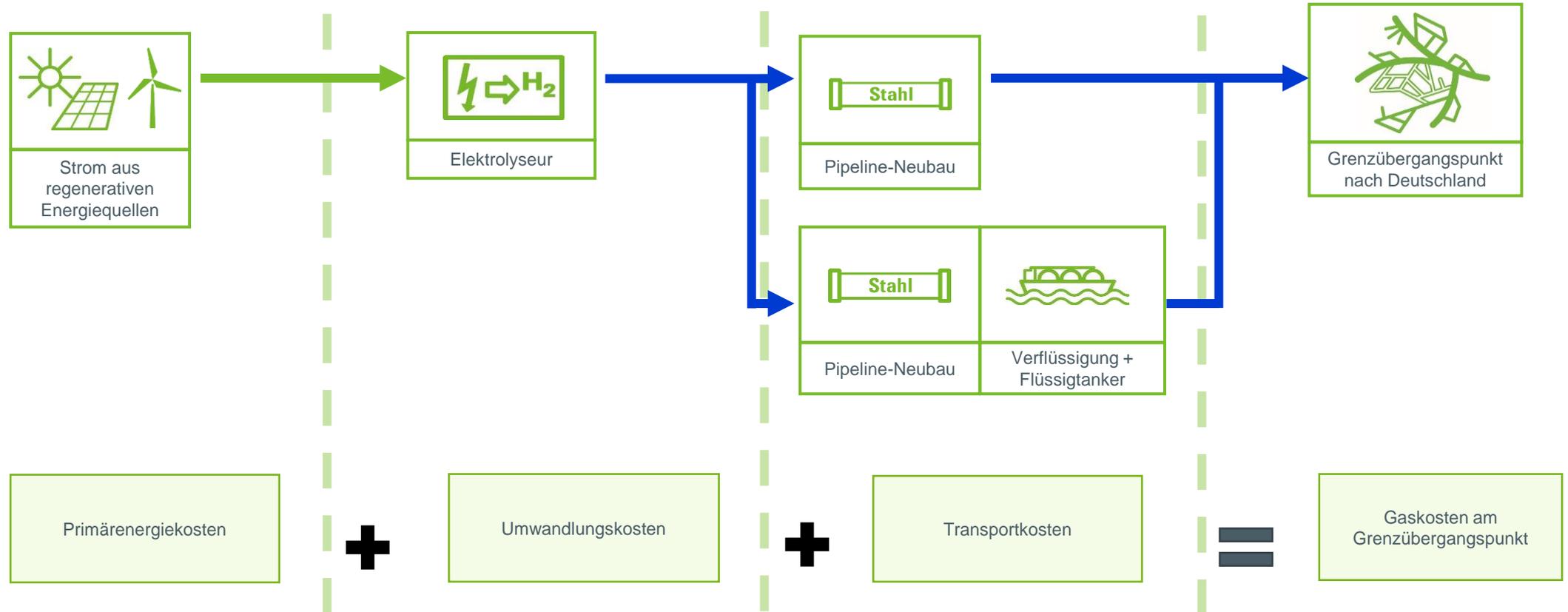
Grundlagen - Gestehung („Erzeugung“)



Specker, T.: Alkalische und Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse zur Produktion von Wasserstoff im Vergleich - Studienarbeit. Stuttgart: Institut für Raumfahrtssysteme Universität Stuttgart, 2013.

Die Wertschöpfungskette von importiertem, grünem Wasserstoff bis zur Staatsgrenze...

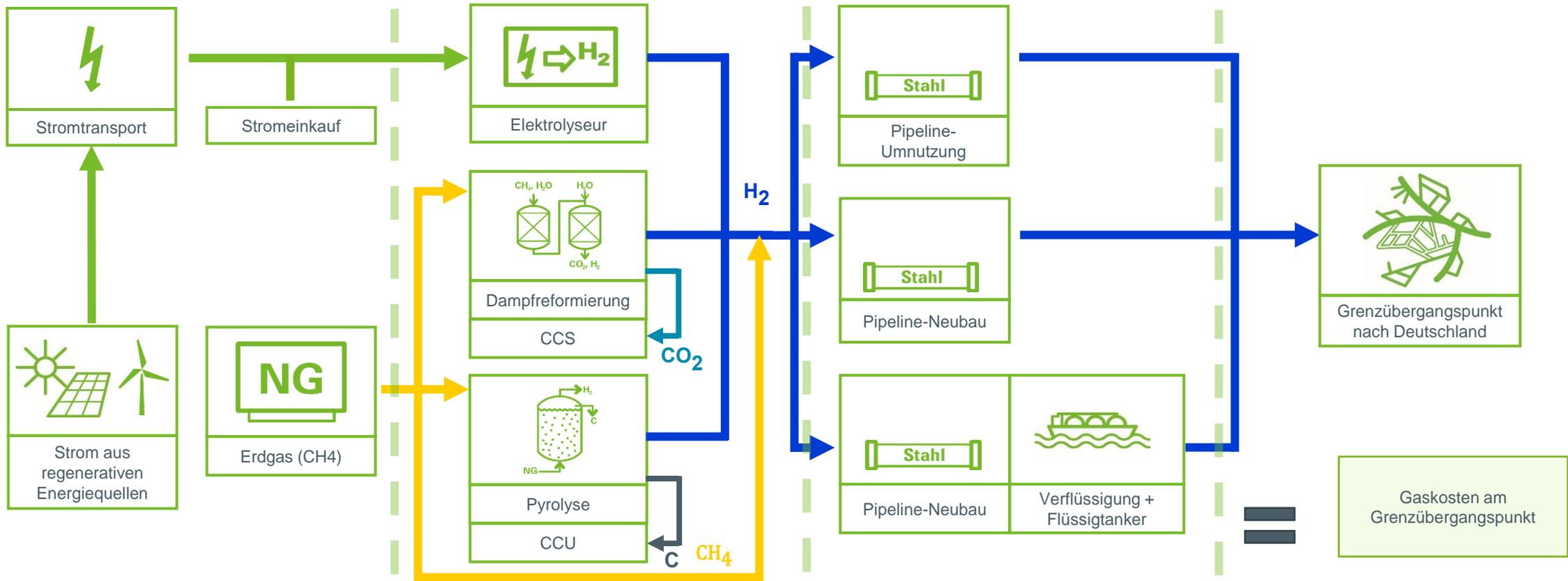
Grundlagen - Gestehung („Erzeugung“)



Neubert, M.: Bestimmung zukünftiger Importrouten und Berechnung der spezifischen Kosten für den Import von „blauem“ und „grünem“ Wasserstoff nach Deutschland- Masterarbeit. Leipzig: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig - Fakultät Maschinenbau und Energietechnik, August 2020. [Nicht öffentlich verfügbar - mit freundlicher Genehmigung von DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH]

... und zusätzlich die Wertschöpfungskette für blauen und türkisen Wasserstoffimport!

Grundlagen - Gestehung („Erzeugung“)

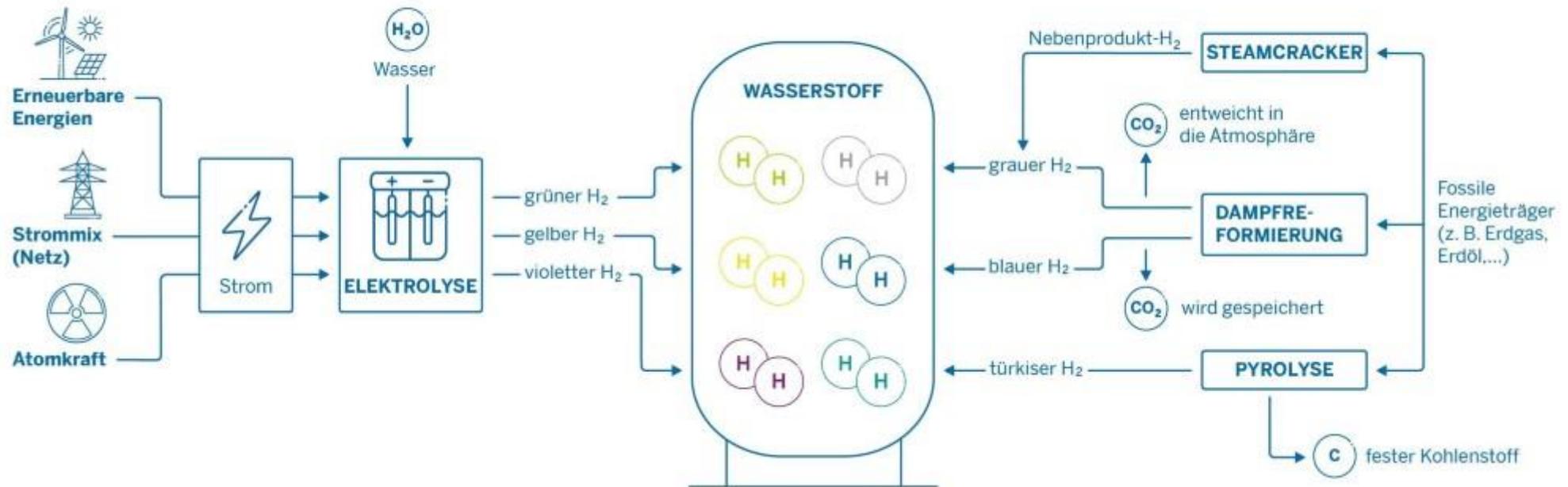


Neubert, M.: Bestimmung zukünftiger Importrouten und Berechnung der spezifischen Kosten für den Import von „blauem“ und „grünem“ Wasserstoff nach Deutschland- Masterarbeit. Leipzig: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig - Fakultät Maschinenbau und Energietechnik, August 2020. [Nicht öffentlich verfügbar - mit freundlicher Genehmigung von DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH]

Menschen reden als über Wasserstoff mit Farben – hier die verbliebenen Farben!

Grundlagen - Gesteherung („Erzeugung“)

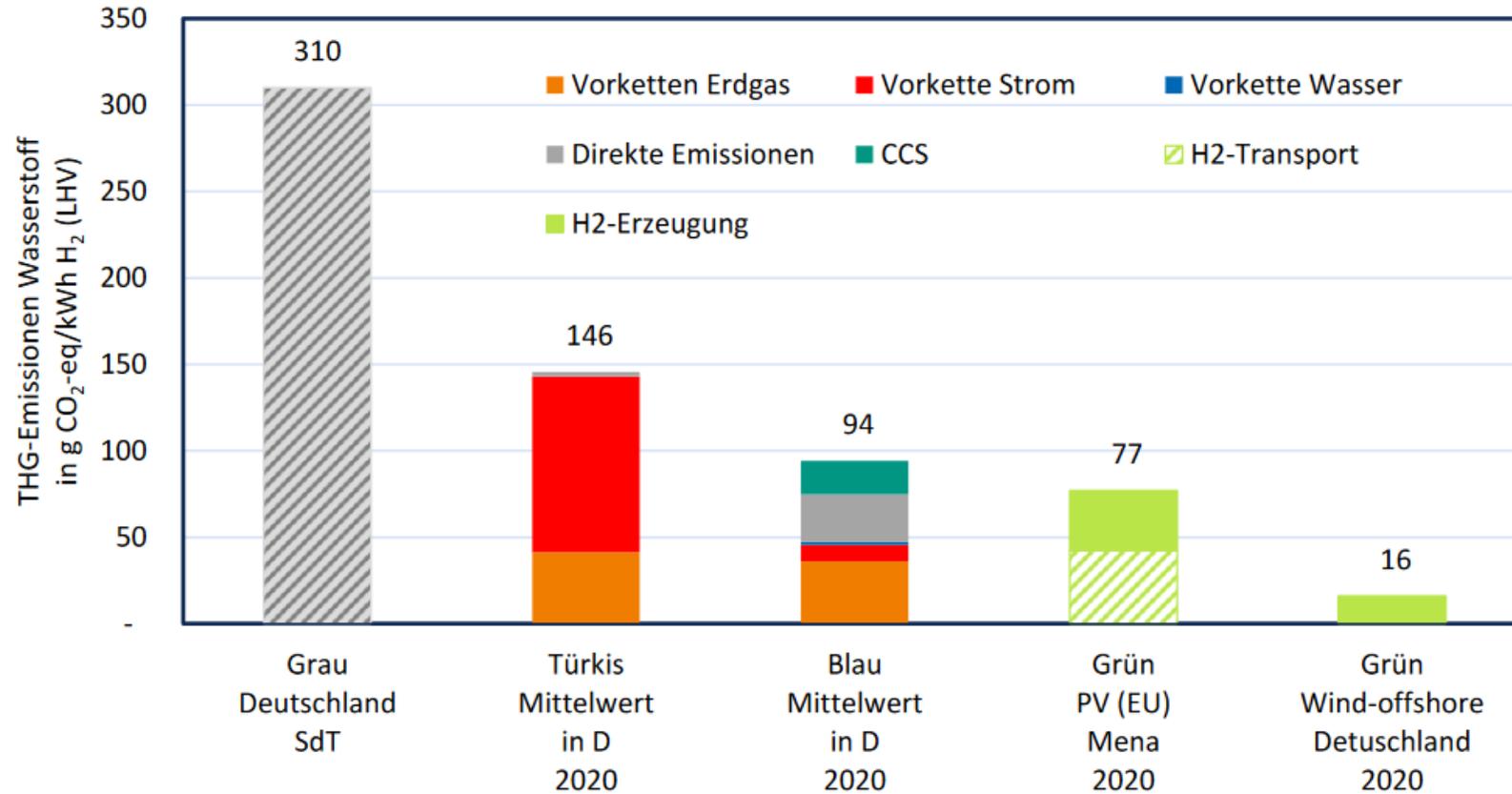
Die Farben des Wasserstoffs



Kölner, C.: Was verbirgt sich hinter der H₂-Farbpalette? Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 26. Oktober 2021. [Frei verfügbar unter <https://www.springerprofessional.de/wasserstoff/verfahrenstechnik/was-verbirgt-sich-hinter-der-h2-farbpalette-/19739370>, Abrufdatum: 16.01.2023]

Die unterschiedlichen Wasserstoff-Farben bedeuten unterschiedliche CO₂-Rucksäcke

Grundlagen - Gesteherung („Erzeugung“)

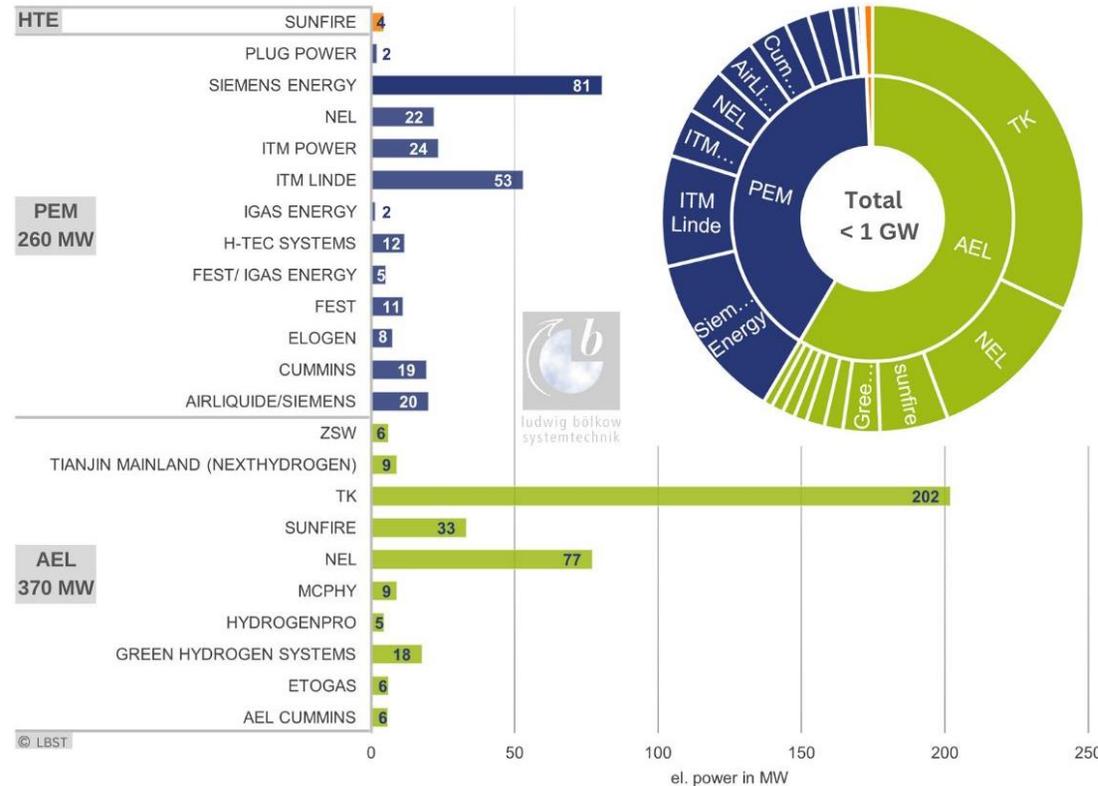


Mörs, F.; Heneka, M.: CO₂-Footprint von Wasserstoff – von blau über türkis bis grün. Online: DVGW Lunch&Learn, 03.Mai 2022. [Frei verfügbar unter <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/events/h2-lunch-learn-03052022-erzeugungsverfahren-fmoers.pdf>, Abrufdatum: 16.01.2023]

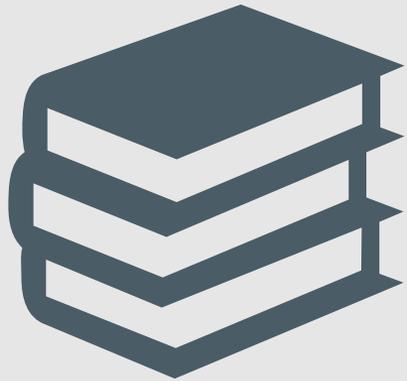
In Europa sind Ende 2022 624 MW Elektrolyse-Leistung für PtX installiert

Grundlagen - Gesteherung („Erzeugung“)

Electrolysers in operation / construction in European PtX plants



Quelle:
LBST-PtX-database, Data as 22.12.2022
Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)

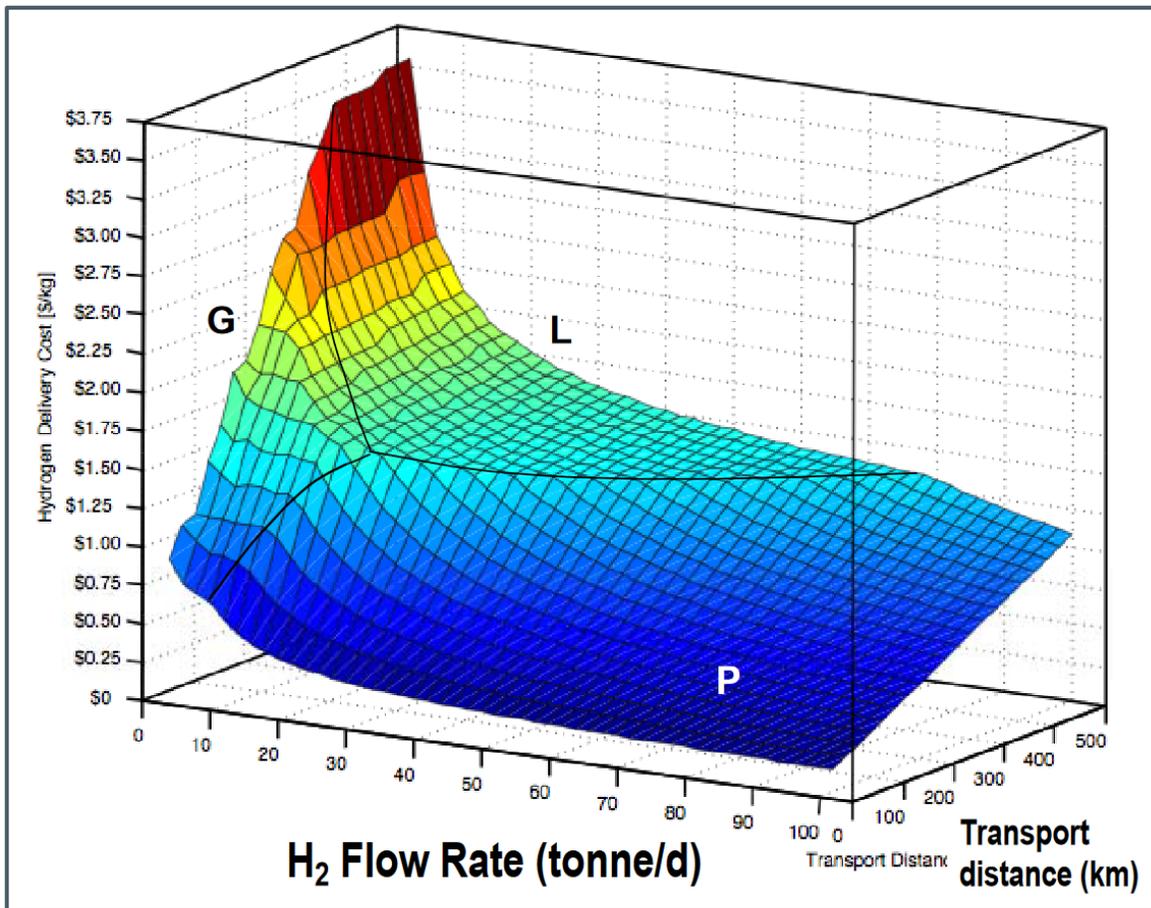


Grundlagen

- Transport

Beim inländischen Wasserstofftransport kommts drauf an: je mehr desto günstiger, je weiter desto teurer!

Grundlagen - Transport



Wasserstoff-Transportkosten

- Levelized hydrogen transmission costs (\$/kg) as a function of hydrogen flow rate (tonne/day) and transport distance (km), for three delivery methods: compressed gas truck
- delivery (G), liquid hydrogen truck delivery (L), and compressed gas pipeline delivery (P).
- Transmission includes compression or liquefaction and storage at the central production site, but not refueling stations

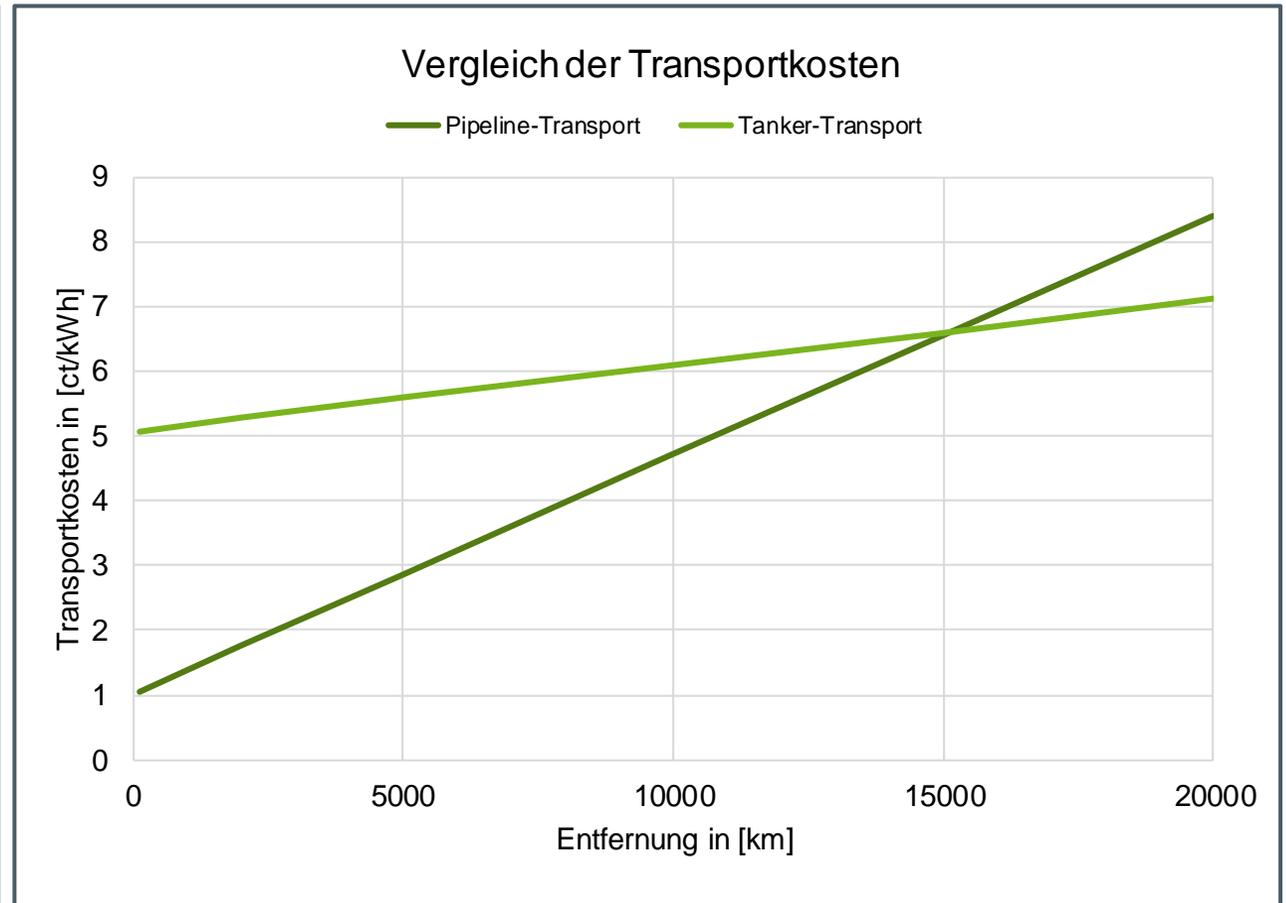
Ogden, J.; Yang, C.: Implementing a Hydrogen Energy Infrastructure: Storage Options and System Design. In: Materials Research Society symposia proceedings, Januar 2005.

Internationaler Wasserstofftransport: bis ca. 15.000 km Pipeline günstiger als Schiff

Grundlagen - Transport

Internationale Transportkosten Wasserstoff

- **Transportkosten Pipeline-Neubau:**
 - Norwegen: 1,0 – 1,2 ct/kWhH₂
 - Russland: 1,2 – 1,3 ct/kWhH₂
 - Nordafrika: 1,8 – 2,0 ct/kWhH₂
- Pipeline-Umnutzung bei Erdgas Betriebsdruck ca. 0,2 ct/kWhH₂ kostengünstiger als Pipeline-Neubau
- Transport über Flüssigtanker erst ab einer Distanz von ca. 15.000 km kostengünstiger



Agenda



Einleitung



Grundlagen



Stand der Forschung



Öffentlicher Diskurs



Zusammenfassung



Fragen und Diskussion



Stand der Forschung

- Dargebot

Exportpotential für grünen Wasserstoff in Nordafrika (immens) und Norwegen (niedrig)

Stand der Forschung - Dargebot

Potentialanalyse „grüner“ Wasserstoff

- **Exportpotential „grüner“ Strom Nordafrika:**
 - Photovoltaik-Strom: 109.000 TWh/a
 - Onshore Windkraft: 130.000 TWh/a
- **Exportpotential „grüner“ Strom Norwegen:**
 - Wasserkraft: 128 TWh/a
 - Offshore Windkraft: 43 TWh/a
- **Einflussfaktoren auf die Potentiale:**
 - Politische Interessen
 - Wirtschaftliche Interessen
 - Technologische Lernkurven



Neubert, M.: Bestimmung zukünftiger Importrouten und Berechnung der spezifischen Kosten für den Import von „blauem“ und „grünem“ Wasserstoff nach Deutschland- Masterarbeit, Leipzig: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig - Fakultät Maschinenbau und Energietechnik, August 2020. [Nicht öffentlich verfügbar - mit freundlicher Genehmigung von DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH]

Exportpotential für blauen Wasserstoff in Russland (immens) und Norwegen (niedrig)



THM

TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN

Potentialanalyse „blauer“ Wasserstoff

• Exportpotential Erdgas Norwegen:

- Gesicherte Erdgasvorkommen: $1600 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3/\text{a}$
- Jährliches Exportvolumen 2018: $119 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3/\text{a}$
- Berechnete Erdgasförderjahre: 13 Jahre

• Exportpotential Erdgas Russland:

- Gesicherte Erdgasvorkommen: $35.200 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3/\text{a}$
- Jährliches Exportvolumen 2018: $670 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3/\text{a}$
- Berechnete Erdgasförderjahre: 53 Jahre



Neubert, M.: Bestimmung zukünftiger Importrouten und Berechnung der spezifischen Kosten für den Import von „blauem“ und „grünem“ Wasserstoff nach Deutschland- Masterarbeit. Leipzig: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig - Fakultät Maschinenbau und Energietechnik, August 2020. [Nicht öffentlich verfügbar - mit freundlicher Genehmigung von DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH]

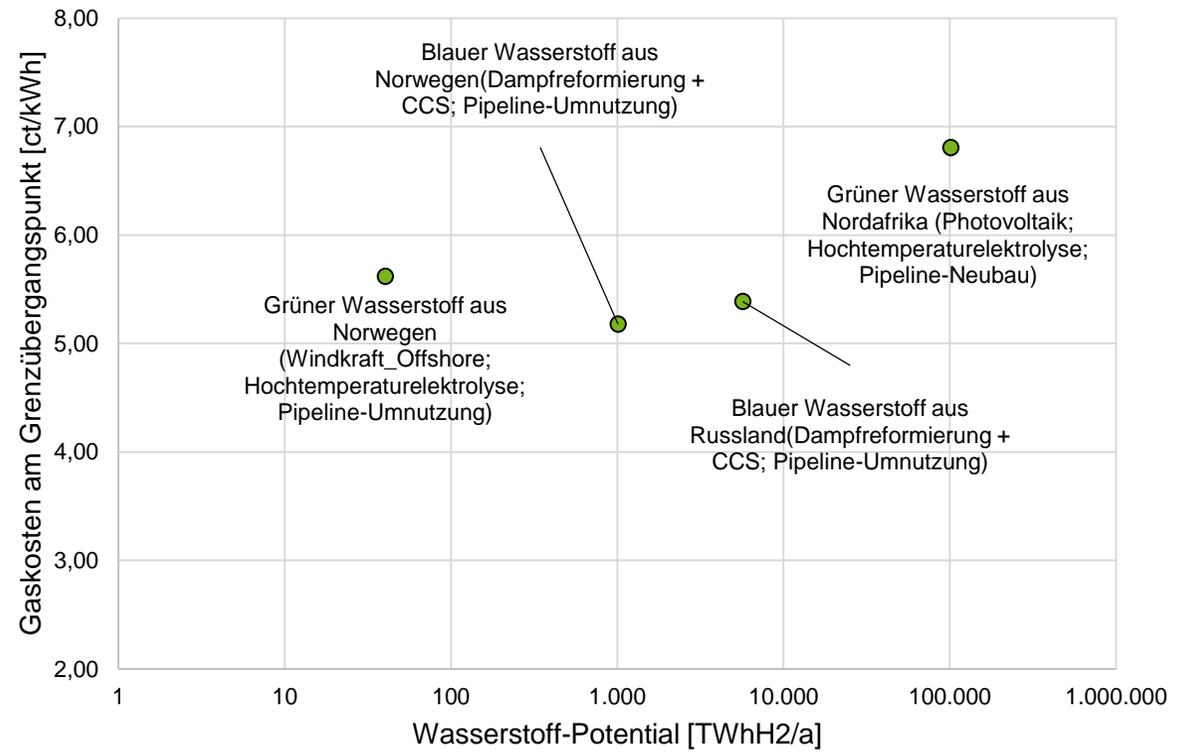
Wasserstoffkosten liegen für 2050 für grün und blau in ähnlicher Größenordnung von Erdgaspreis 2020

Stand der Forschung - Dargebot

Gaskosten Grenzübergabepunkt (GÜP) 2050

- Kostengünstigster Importpfad 2050:
 - Blauer Wasserstoff aus Norwegen über Dampfreformierung + CCS
 - Gaskosten am GÜP = 5,2 ct/kWh₂
 - Potential (1.000 TWh₂/a) ausreichend zur Deckung des Deutschen Bedarfs
- Kostengünstigster Importpfad „grüner“ Wasserstoff 2050:
 - Grüner Wasserstoff aus Norwegen über offshore Windkraft und Hochtemperaturelektrolyse
 - Gaskosten am GÜP = 5,6 ct/kWh₂
 - Potential (43,2 TWh₂/a) nicht ausreichend zur Deckung des Deutschen Bedarfs
- Erdgas-Preis 2020 (Benchmark): 6 ct/kWh

Gaskosten am Grenzübergangspunkt und Potentiale ausgewählter Importpfade 2050



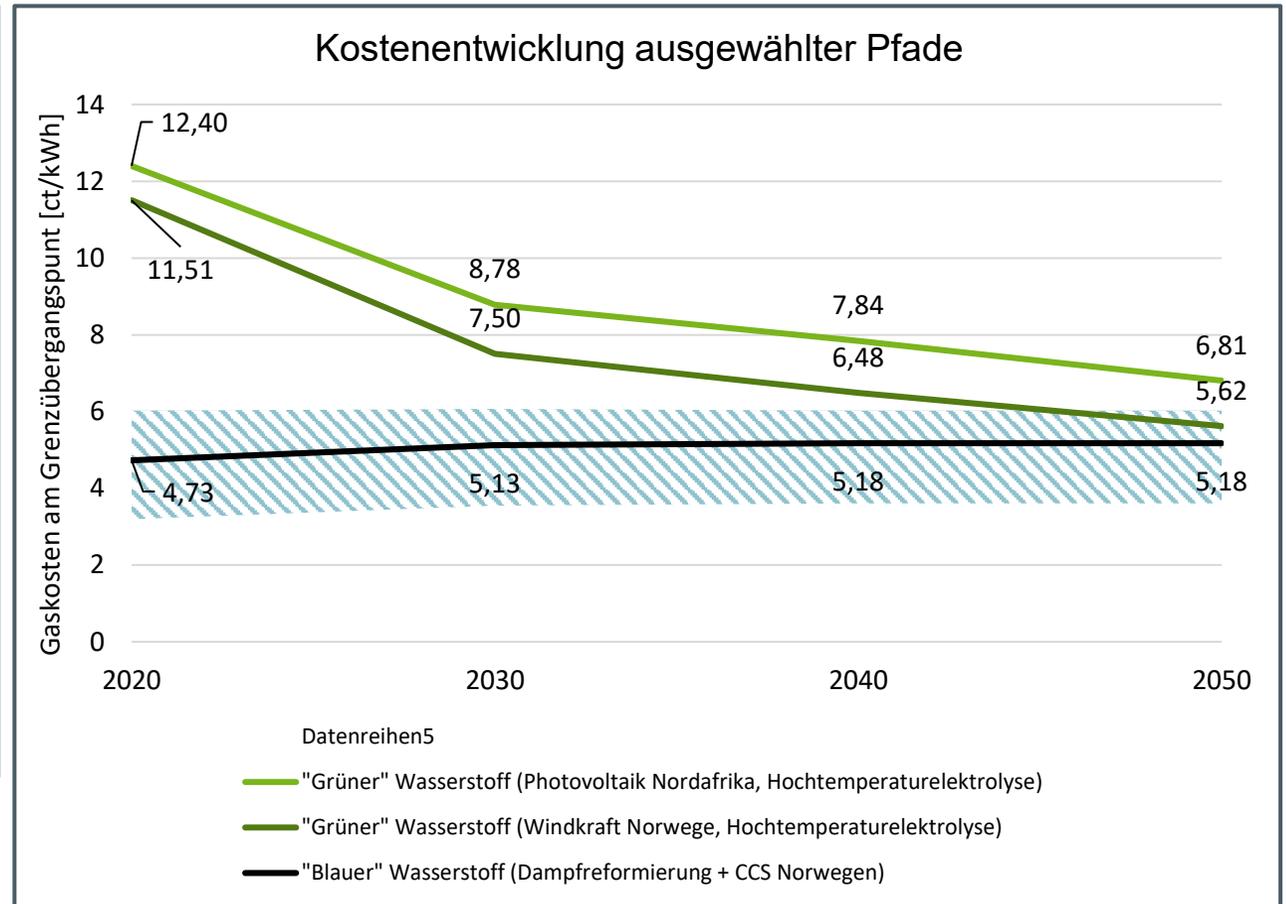
Technologielernkurven für grünen Wasserstoff führen bis 2050 zu Kostensenkung um 50%

Stand der Forschung - Dargebot

Kostenentwicklung

- **Kostenbetrachtung 2020:**
 - „Grüner“ Wasserstoff mindestens 5,5 ct/kWh_{H2} teurer als „blauer“ Wasserstoff
- **Kostenbetrachtung 2050:**
 - Ermittelte Lernkurven des „grünen“ Wasserstoffs führen zu Kostensenkung um ca. 50 %
 - „Grüner“ Wasserstoff aus Norwegen ab 2045 unter Umständen kostengünstiger als „blauer“ Wasserstoff

Neubert, M.: Bestimmung zukünftiger Importrouten und Berechnung der spezifischen Kosten für den Import von „blauem“ und „grünem“ Wasserstoff nach Deutschland- Masterarbeit. Leipzig: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig - Fakultät Maschinenbau und Energietechnik, August 2020. [Nicht öffentlich verfügbar - mit freundlicher Genehmigung von DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH]





Stand der Forschung

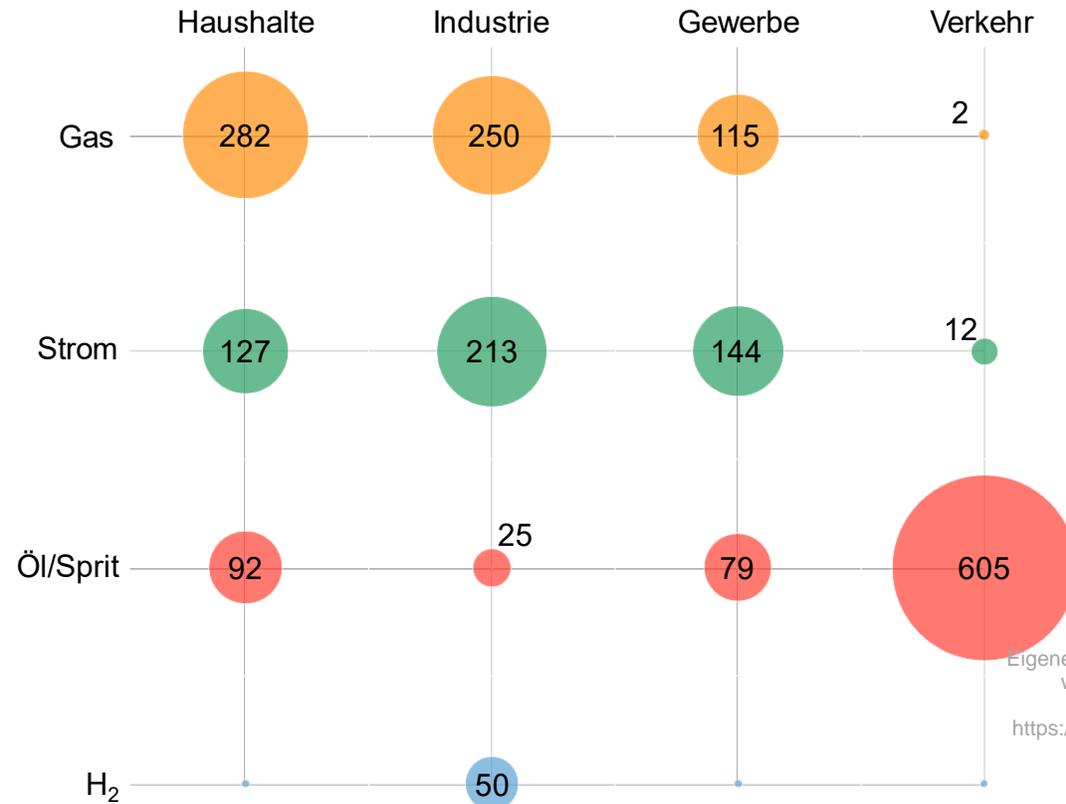
- Gesamtsystem

Eine Landkarte über die Energieversorgung in Deutschland

Stand der Forschung - Gesamtsystem

Endenergieverbrauch

Nach Sektoren im Jahr 2021 in TWh



Eigene Darstellung nach ZEIT ONLINE GmbH: Energiemonitor - Die wichtigsten Daten zur Energieversorgung – täglich aktualisiert. Dezember 2022. [Frei verfügbar unter <https://www.zeit.de/wirtschaft/energiemonitor-deutschland-gaspreis-spritpreis-energieversorgung>, Abrufdatum: 07.12.2022]

Die Rolle von Wasserstoff in der Energiewende wird wissenschaftlich kontrovers diskutiert!

Stand der Forschung - Gesamtsystem



TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN

Fraunhofer IEG Fraunhofer ISE Fraunhofer ISI

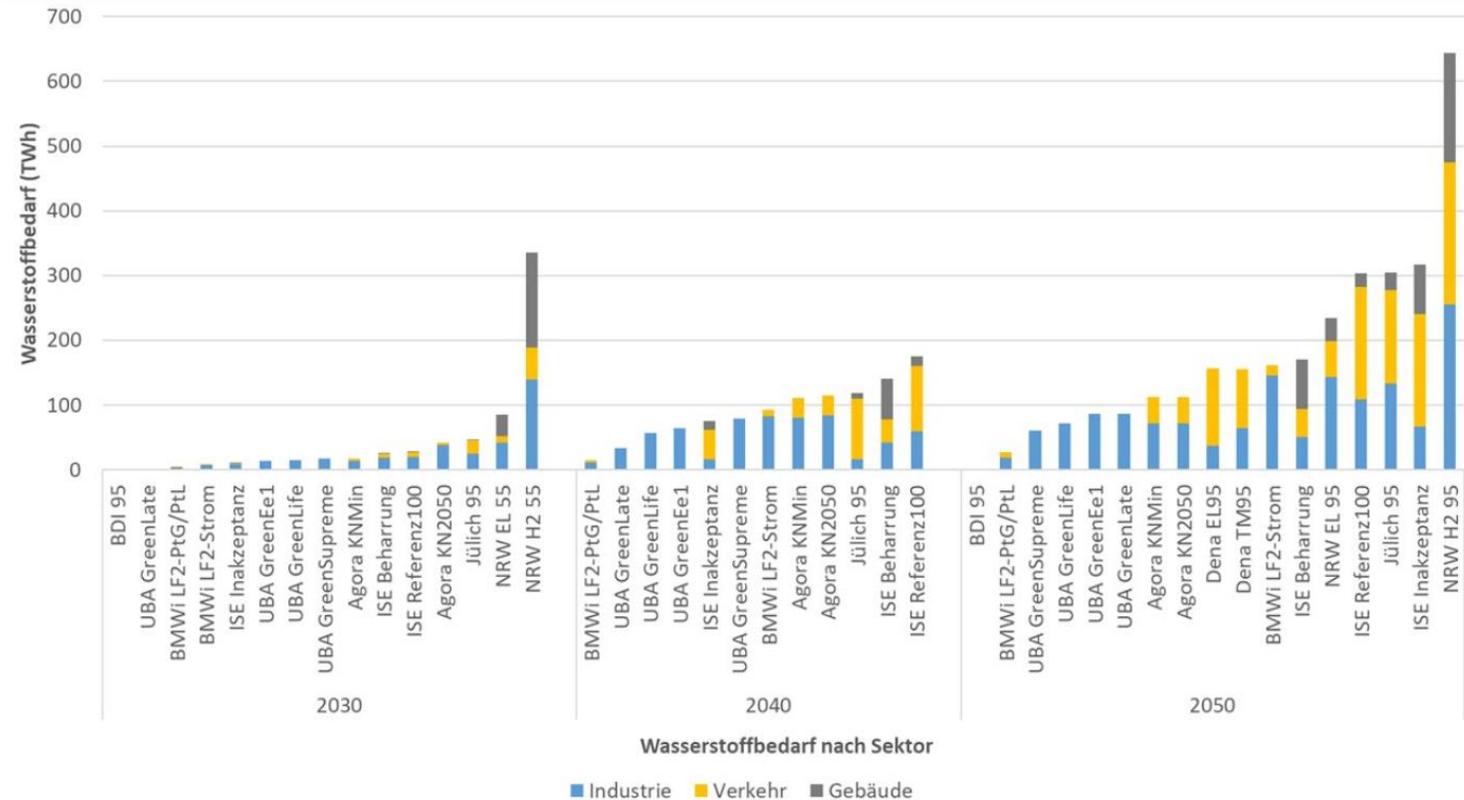


Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien

Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats

Ort: Karlsruhe, Freiburg, Cottbus
Datum: 04.06.2021

Wasserstoffnachfrage Deutschland



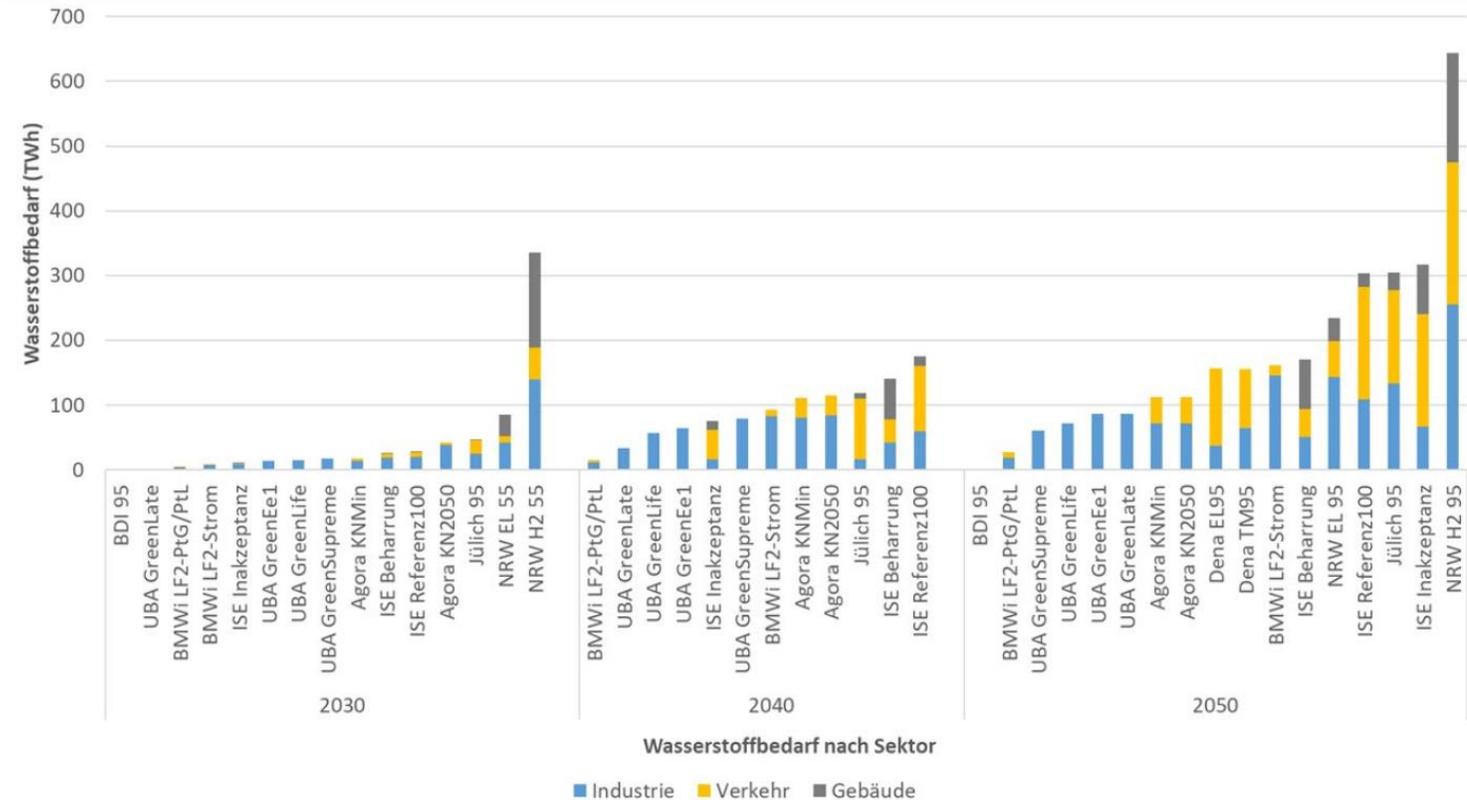
Wietschel, M.; Zhong, L.; Arens, M.; Hebling, C.; Ranzmeyer, O.; Schaadt, A.; Hank, C.; Sternberg, A.; Herkel, S.; Kost, C.; Ragwitz, M.; Herrmann, U.; Pflüger, B.: Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien- Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Karlsruhe, Freiburg, Cottbus: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEG, Juni 2021.

Die Rolle von Wasserstoff in der Energiewende wird wissenschaftlich kontrovers diskutiert!

Stand der Forschung - Gesamtsystem

- Rolle von Wasserstoff bei der Erreichung von Treibhausgasneutralität der vorwiegend öl- und gasversorgten Sektoren Wärme und Verkehr wissenschaftlich kontrovers diskutiert
- Alle Studien enthalten Wasserstoff (anders als noch vor Jahren)
- **Praktische Folgen: z.B. auf der Grundlage Leitungen bauen!**

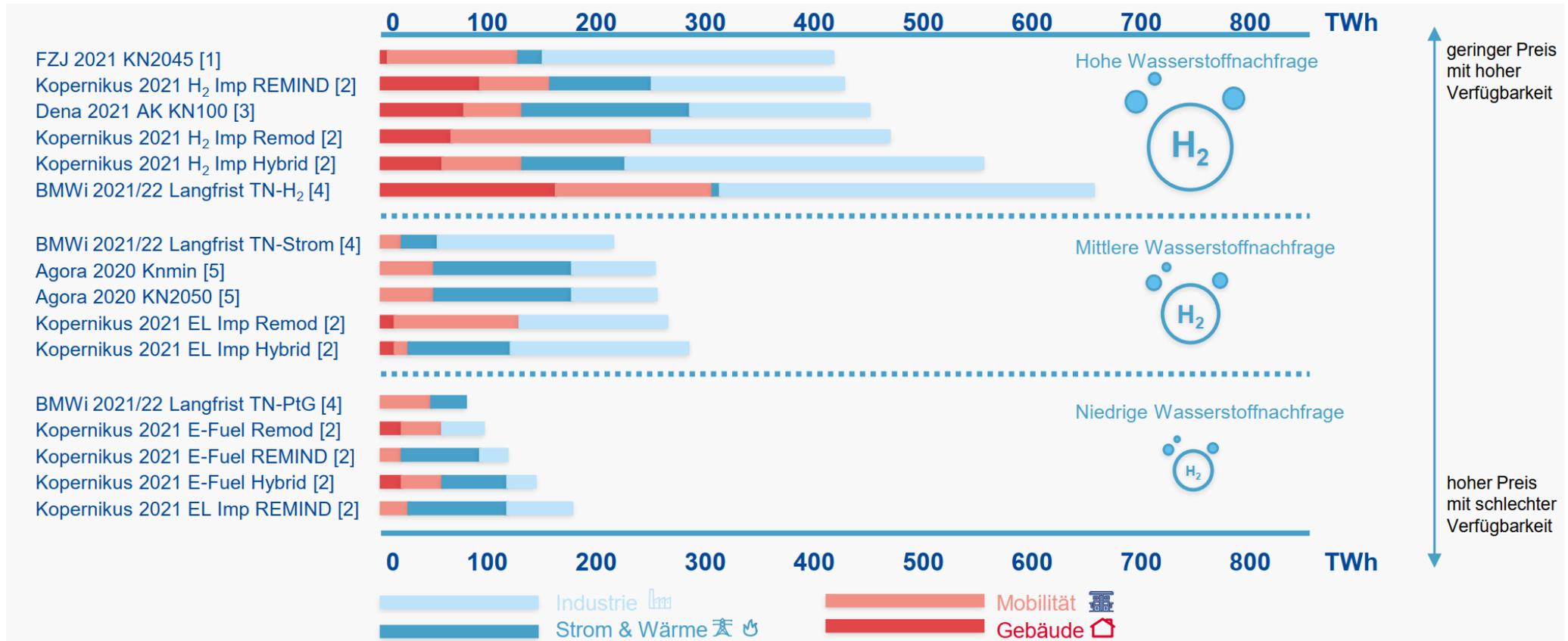
Wasserstoffnachfrage Deutschland



Wietschel, M.; Zhong, L.; Arens, M.; Hebling, C.; Ranzmeyer, O.; Schaadt, A.; Hank, C.; Sternberg, A.; Herkel, S.; Kost, C.; Ragwitz, M.; Herrmann, U.; Pfluger, B.: Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien- Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Karlsruhe, Freiburg, Cottbus: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEG, Juni 2021.

Regierungsnahе Energieversorgungsszenarien ebenfalls mit großer Wasserstoff-Bandbreite

Stand der Forschung - Gesamtsystem



Quellen: [1] Forschungszentrum Jülich (2021/2022) – Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045; [2] Kopernikus Projekte (2021) – Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität; [3] DENA (2021) – dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität (2020); [4] BMW i (2021/2022) – Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystem in Deutschland; [5] Agora Energiewende (2021) – Klimaneutrales Deutschland 2045

Peetzen, J.; Bick, D.; Hellfaier, D.: Wie funktioniert die Energieversorgung von morgen? Wasserstoff in Ihrem Netz. - Webinar. Online: Open Grid Europe GmbH (OGE), 12. Dezember 2022.



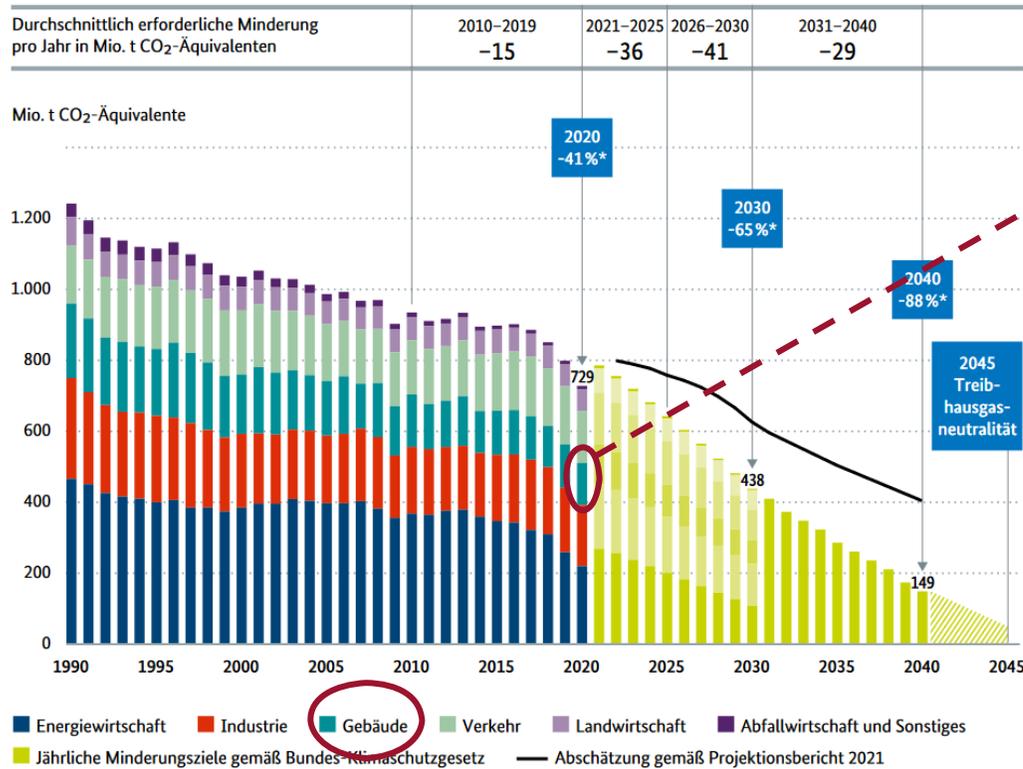
Stand der Forschung

- Wärmesektor

Gebäudesektor als ein Sorgenkind der Energiewende zwischen Anspruch und Wirklichkeit

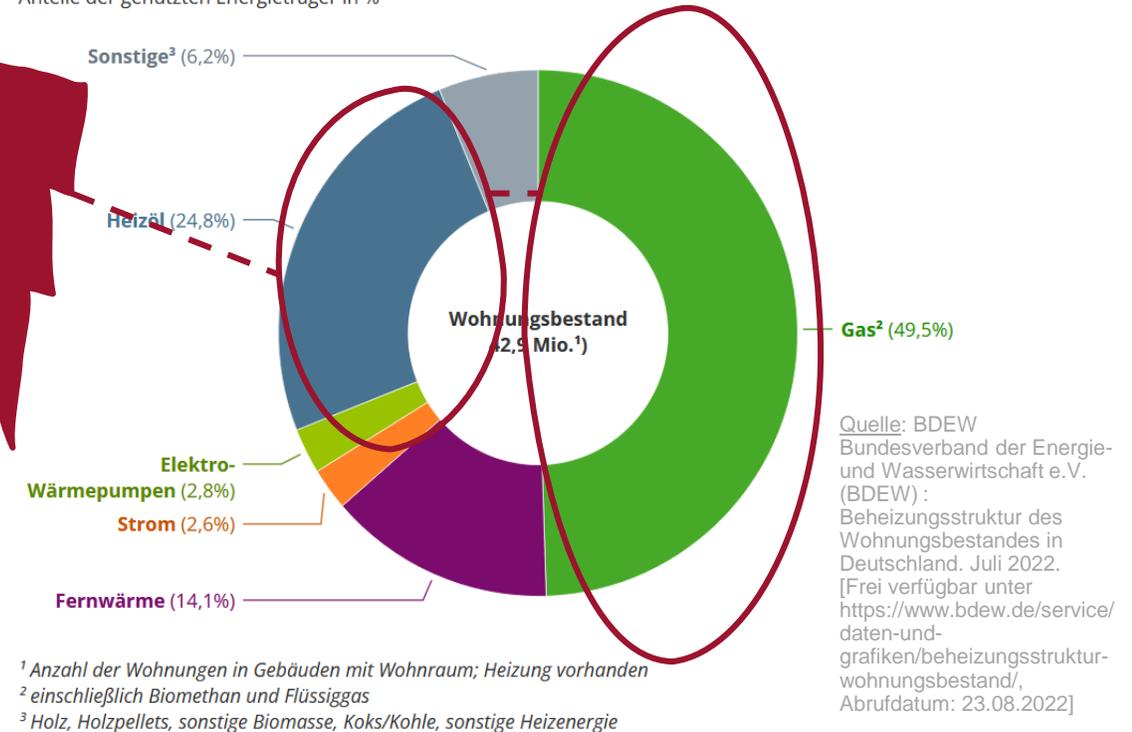
Stand der Forschung - Wärmesektor

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland



Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland 2021

Anteile der genutzten Energieträger in %



Stand: 07/2022

Quelle: BDEW; teilweise geschätzt • Daten • Grafik

Quellen: Umweltbundesamt, Bundes-Klimaschutzgesetz

Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz; Eröffnungsbilanz Klimaschutz. 13. Januar 2022.

bdew
Energie. Wasser. Leben.

Fraunhofer-Studie zum Wärmesektor für Nationalen Wasserstoffrat frisch erschienen

Stand der Forschung - Wärmesektor



FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE
FRAUNHOFER INSTITUT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT UND ENERGIESYSTEMTECHNIK IEE

Bottom-Up Studie zu Pfadoptio- nen einer effizienten und sozialverträglichen Dekarbonisierung des Wärmesektors

Endbericht

Datum: 8. Dezember 2022

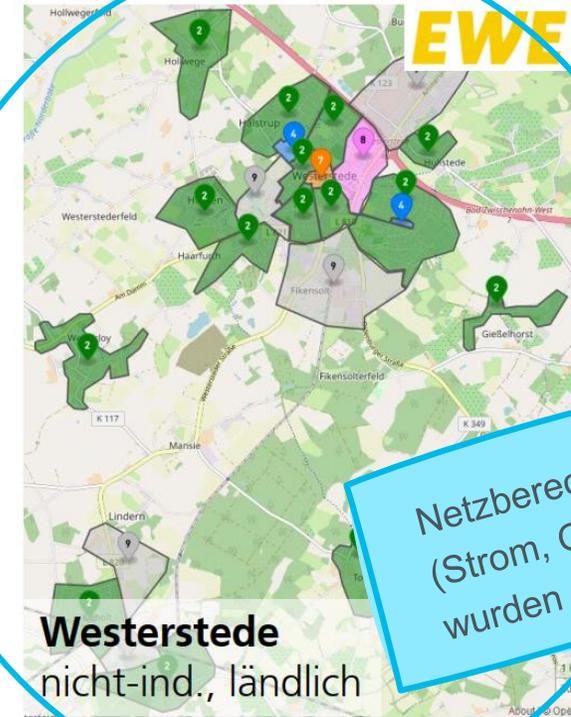
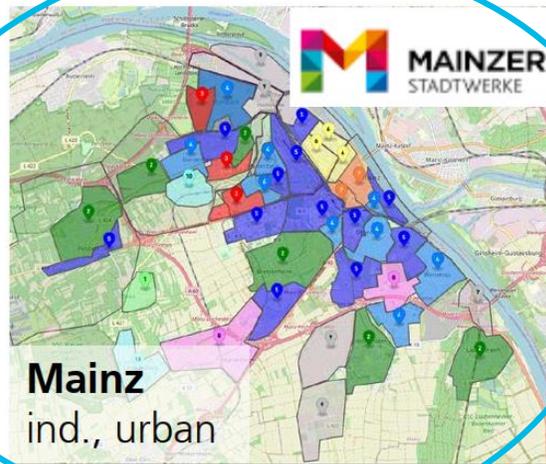
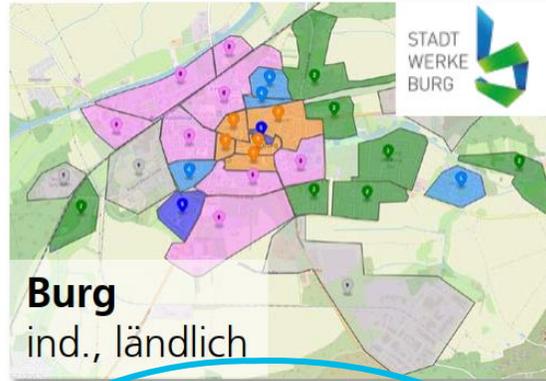
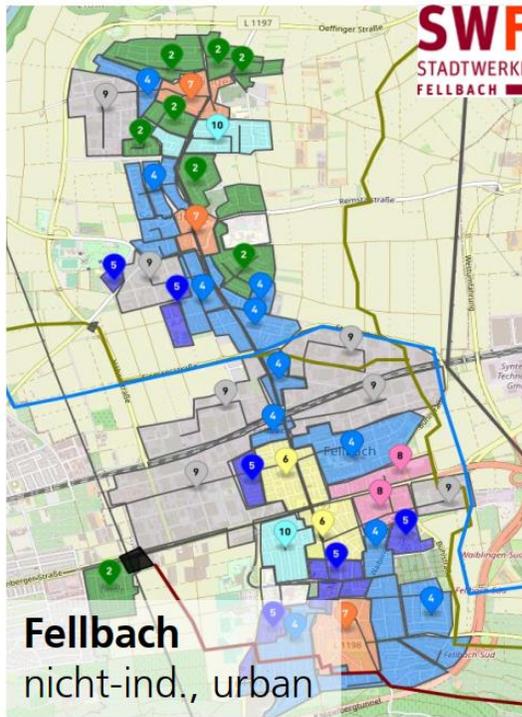
Ziel und Studienansatz im Überblick

- Ziel: kostengünstigste, klimaneutrale Wärmebereitstellung für beispielhafte Untersuchungsgebiete identifizieren
- Studienansatz:
 - „bottom-up“-Ermittlung der günstigsten Systemkonfiguration für vier beispielhafte Untersuchungsgebiete (zwei davon mit Netzberechnungen):
 - Urban mit hoher Energienachfrage durch Industrie: Stadtgebiet Mainz
 - Urban mit mittlerer Energienachfrage durch Industrie: Stadtgebiet Fellbach (bei Stuttgart)
 - Ländlich mit hoher Energienachfrage durch Industrie: Stadtgebiet Burg (bei Magdeburg)
 - Ländlich mit mittlerer Energienachfrage durch Industrie: Stadtgebiet Westerstede (bei Oldenburg)
 - Drei bzw. fünf verschiedene Szenarien (Sanierung, Innovation, Erneuerbare Energien, H2-Backbone)

Thomsen, J.; Fuchs, N.; Meyer, R.; Wanapinit, N.; Bavia Bampi, B.; Gorbach, G.; Engelmann, P.; Herkel, S.; Kost, C. (Fraunhofer ISE); Ulfers, J.; Lohmeier, D.; Prade, E.; Sanina, N.; Braun, M.; Lenz, M. (Fraunhofer IEE): Bottom-Up Studie zu Pfadoptio-
nen einer effizienten und sozialverträglichen Dekarbonisierung des Wärmesektors. Berlin: DER NATIONALE WASSERSTOFFRAT, Dezember 2022.

Fraunhofer-Studie zum Wärmesektor mit vier beispielhaften Untersuchungsgebieten

Stand der Forschung - Gesamtsystem



Netzberechnungen
(Strom, Gas)
wurden durchgeführt!

Thomsen, J.; Fuchs, N.; Meyer, R.; Wanapinit, N.; Bavia Bampi, B.; Gorbach, G.; Engelmann, P.; Herkel, S.; Kost, C. (Fraunhofer ISE); Ulfers, J.; Lohmeier, D.; Prade, E.; Sanina, N.; Braun, M.; Lenz, M. (Fraunhofer IEE): Bottom-Up Studie zur Pfadoptionen einer effizienten und sozialverträglichen Dekarbonisierung des Wärmesektors. Berlin: DER NATIONALE WASSERSTOFFRAT, Dezember 2022.

Fraunhofer-Studie zum Wärmesektor mit fünf Szenarien je Untersuchungsgebiet

Stand der Forschung - Wärmesektor

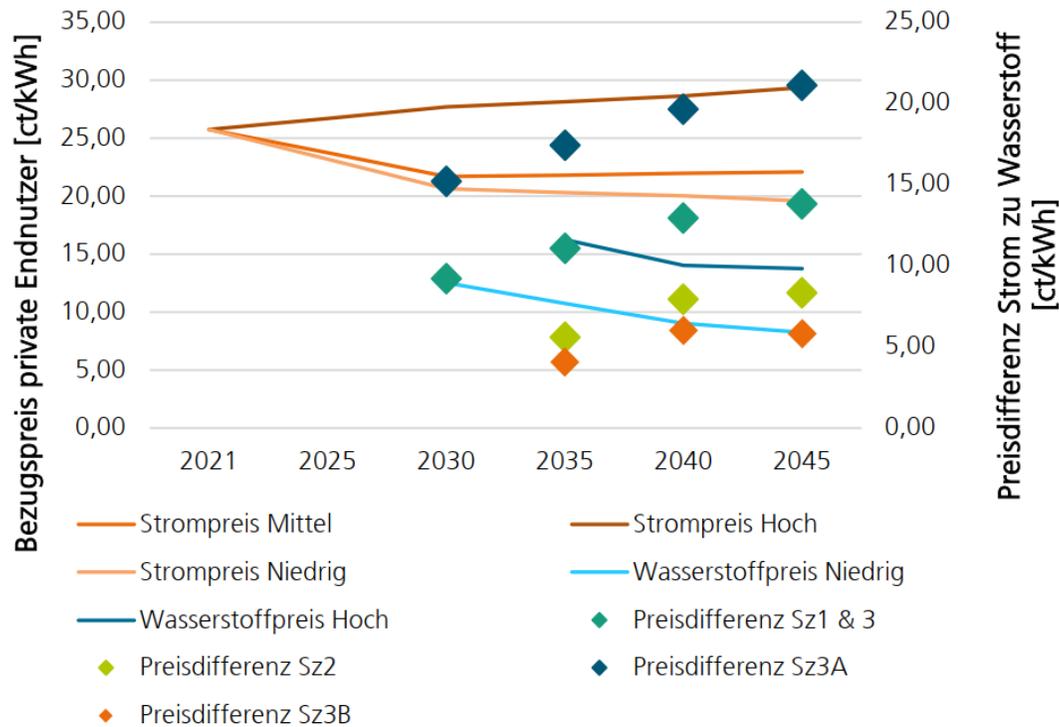
	Szenario 1 »Mäßige Sanierung & hohe Innovationsaffinität«					Szenario 2 »Sanierungsfortschritt & Innovationsskepsis«					Szenario 3 »Hohe Verfügbarkeiten Erneuerbare Energien & Wasserstoff«					Szenario 3A »Niedriger Wasserstoffpreispfad«					Szenario 3B »Hoher Erneuerbare-Energien Ausbau«				
 Sanierungsrate / -tiefe	1,2 % / KfW 70					1,8 % / KfW 70					1,8 % / KfW 70					1,8 % / KfW 70					1,8 % / KfW 70				
H₂-Backbone am Case verfügbar	2030					2035					2030					2030					2035				
 H₂-Kosten & Verfügbarkeit	Niedrig, Hoch					Hoch, Niedrig					Niedrig, Hoch					Niedrig, Hoch					Hoch, Niedrig				
Jahr	2025	2030	2035	2040	2045	2025	2030	2035	2040	2045	Siehe Szenario 1					Siehe Szenario 1					Siehe Szenario 2				
Haushalt [$\frac{ct_{\text{€}}}{kWh}$]	-	12,5	10,8	9,0	8,3	-	-	16,3	14,0	13,8	Siehe Szenario 1					Siehe Szenario 1					Siehe Szenario 2				
Industrie [$\frac{ct_{\text{€}}}{kWh}$]	-	10	9	8	7,5	-	-	14,5	13,0	12,5	Siehe Szenario 1					Siehe Szenario 1					Siehe Szenario 2				
Strompreise	Mittel					Mittel					Mittel					Hoch					Niedrig				
Jahr	2025	2030	2035	2040	2045	Siehe Szenario 1					Siehe Szenario 1					2025	2030	2035	2040	2045	2025	2030	2035	2040	2045
Haushalt [$\frac{ct_{\text{€}}}{kWh}$]	23,7	21,7	21,8	21,9	22,1	Siehe Szenario 1					Siehe Szenario 1					26,7	27,6	28,1	28,6	29,4	23,2	20,6	20,3	20,0	19,6
Industrie [$\frac{ct_{\text{€}}}{kWh}$]	13,5	11,5	11,6	11,7	11,9	Siehe Szenario 1					Siehe Szenario 1					16,5	17,5	17,9	18,4	19,2	13,0	10,4	10,1	9,8	9,4
 Technologiekosten	Mittel					Hoch					Mittel					Mittel					Mittel				
 Wärmepumpe-austauschrate	Mittel					Mittel					Hoch					Hoch					Hoch				
 EE-Strom Verfügbarkeit	Hoch					Mittel					Hoch					Niedrig					Hoch				
 Fernwärme	Hohe Austauschrate					Mittlere Austauschrate					Hohe Austauschrate					Hohe Austauschrate					Hohe Austauschrate				

Thomsen, J.; Fuchs, N.; Meyer, R.; Wanapinit, N.; Bavaria Bampi, B.; Gorbach, G.; Engelmann, P.; Herkel, S.; Kost, C. (Fraunhofer ISE); Uffers, J.; Lohmeier, D.; Prade, E.; Sanina, N.; Braun, M.; Lenz, M. (Fraunhofer IEE); Bottom-Up Studie zu Pfadoptionen einer effizienten und sozialverträglichen Dekarbonisierung des Wärmesektors. Berlin: DER NATIONALE WASSERSTOFFFRAT, Dezember 2022.

Fraunhofer-Studie zum Wärmesektor mit Annahmen für H2-Bezug und H2-Verfügbarkeit

Stand der Forschung - Wärmesektor

Annahmen: Bezugspreise Strom & H2



* alle Bezugspreise netto mit Umlagen und Entgelten

Annahmen: H2-Verfügbarkeit Deutschland

	Jahr	Niedrig	Mittel	Hoch
H ₂ -Verfügbarkeit DE [TWh]	2020	0	0	0
	2025	0	31	96
	2030	0	63	193
	2035	19	143	437
	2040	38	223	683
	2045	132	298	976
	2050	226	373	1270

Thomsen, J.; Fuchs, N.; Meyer, R.; Wanapinit, N.; Bavia Bampi, B.; Gorbach, G.; Engelmann, P.; Herkel, S.; Kost, C. (Fraunhofer ISE); Ulfers, J.; Lohmeier, D.; Prade, E.; Sanina, N.; Braun, M.; Lenz, M. (Fraunhofer IEE): Bottom-Up Studie zu Pfadoptionen einer effizienten und sozialverträglichen Dekarbonisierung des Wärmesektors. Berlin: DER NATIONALE WASSERSTOFFRAT, Dezember 2022.

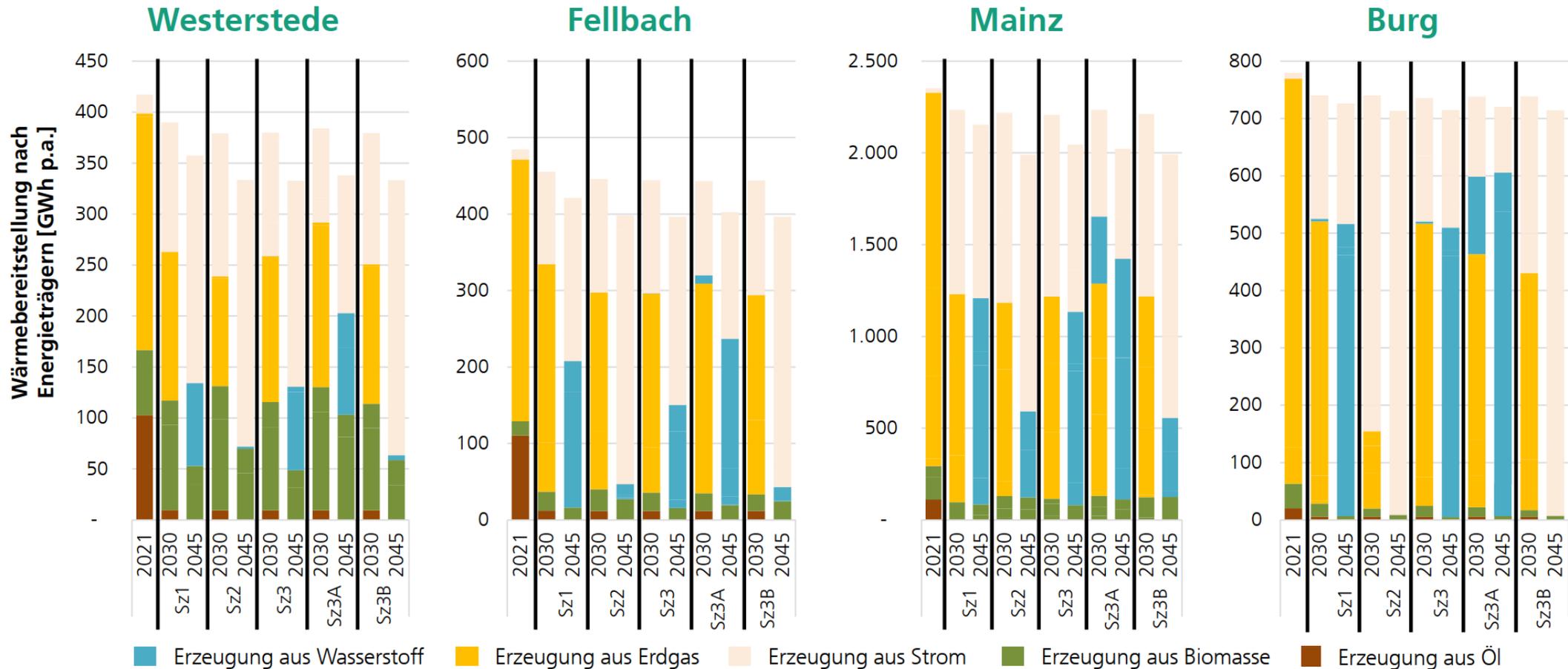
FH-Studie: sofern Wasserstoff verfügbar, wird er im Wärmemarkt auch eine Rolle spielen

Stand der Forschung - Wärmesektor



THM

TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN



Thomsen, J.; Fuchs, N.; Meyer, R.; Wanapinit, N.; Bavia Bampi, B.; Gorbach, G.; Engelmann, P.; Herkel, S.; Kost, C. (Fraunhofer ISE); Uffers, J.; Lohmeier, D.; Prade, E.; Sanina, N.; Braun, M.; Lenz, M. (Fraunhofer IEE): Bottom-Up Studie zu Pfadoptionen einer effizienten und sozialverträglichen Dekarbonisierung des Wärmesektors. Berlin: DER NATIONALE WASSERSTOFFFRAT, Dezember 2022.

FH-Studie: sofern Wasserstoff verfügbar, wird er im Wärmemarkt auch eine Rolle spielen

Stand der Forschung - Wärmesektor

Bottom-Up Studie zu Pfadoptionen einer effizienten und sozialverträglichen Dekarbonisierung des Wärmesektors

Endbericht

Datum: 8. Dezember 2022

Ableitung (8) zu Wasserstoff

„Der Einsatz von Wasserstoff sichert das Erreichen der langfristigen Klimaziele (nach 2030) in der Industrie und Energieerzeugung (Fernwärme) ab.

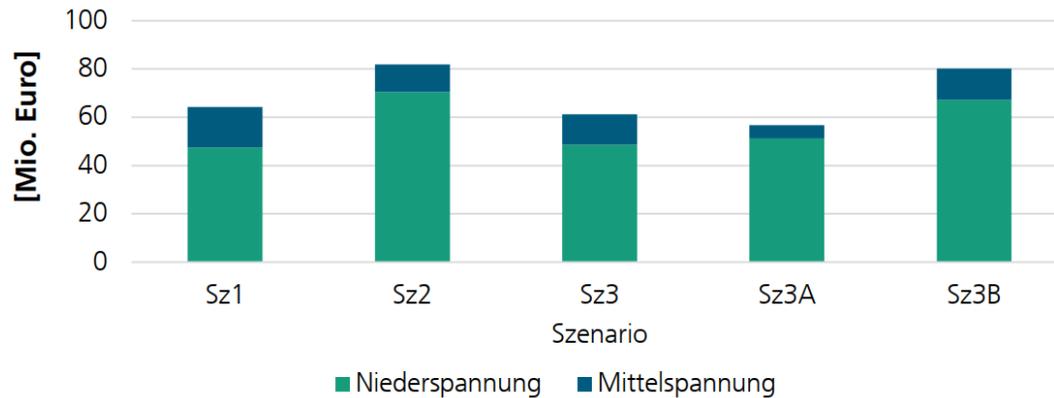
Sofern die Marktentwicklung zu niedrigen Wasserstoffendkundenpreisen führt, erweitert sie den Lösungsraum für die Dekarbonisierung der privaten Haushalte. Die Szenarien zeigen, dass für die ökonomische Attraktivität des Einsatzes von Wasserstoff in der dezentralen Raumwärme die Wasserstoffendkundenpreise höchstens halb so hoch wie die Stromendkundenpreise sein sollten.

Zusätzlich zum Hochlauf des Erzeugungsmarktes ist ein vorausschauender Aus- bzw. Umbau der notwendigen Infrastrukturen zwingend erforderlich.“

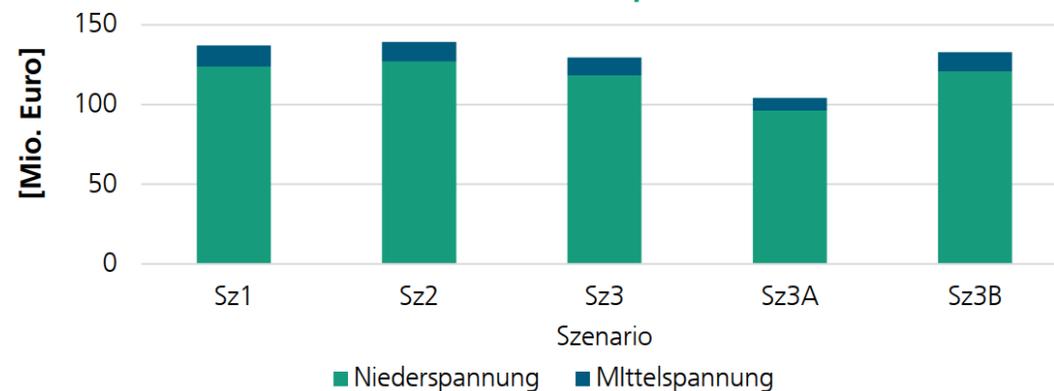
FH-Studie: Ausbaubedarf Strom-Verteilnetze quantifiziert, Wasserstoff reduziert diesen

Stand der Forschung - Wärmesektor

Netzausbaukosten am Beispiel Westerstede 2045



Netzausbaukosten am Beispiel Mainz 2045



- In allen Szenarien fallen Netzausbaukosten für die Strom-Verteilnetze an (Diagramm links).

Netzlängen in km

Mainz	Niederspannung	690
	Mittelspannung	620
Westerstede	Niederspannung	381
	Mittelspannung	217

- „Die Verfügbarkeit niedrigpreisigen Wasserstoffs führt in Szenario 3A zu einem rund 20 % geringerem Netzausbau im Vergleich zu Szenario 2 und 3B, da insbesondere die geringere elektrische Wärmeezeugung die Netze entlastet.“



Stand der Forschung

- Verkehrssektor - Personenverkehr

Nicht weniger Sorgenkind der Energiewende (als Wärme) ist der Verkehr

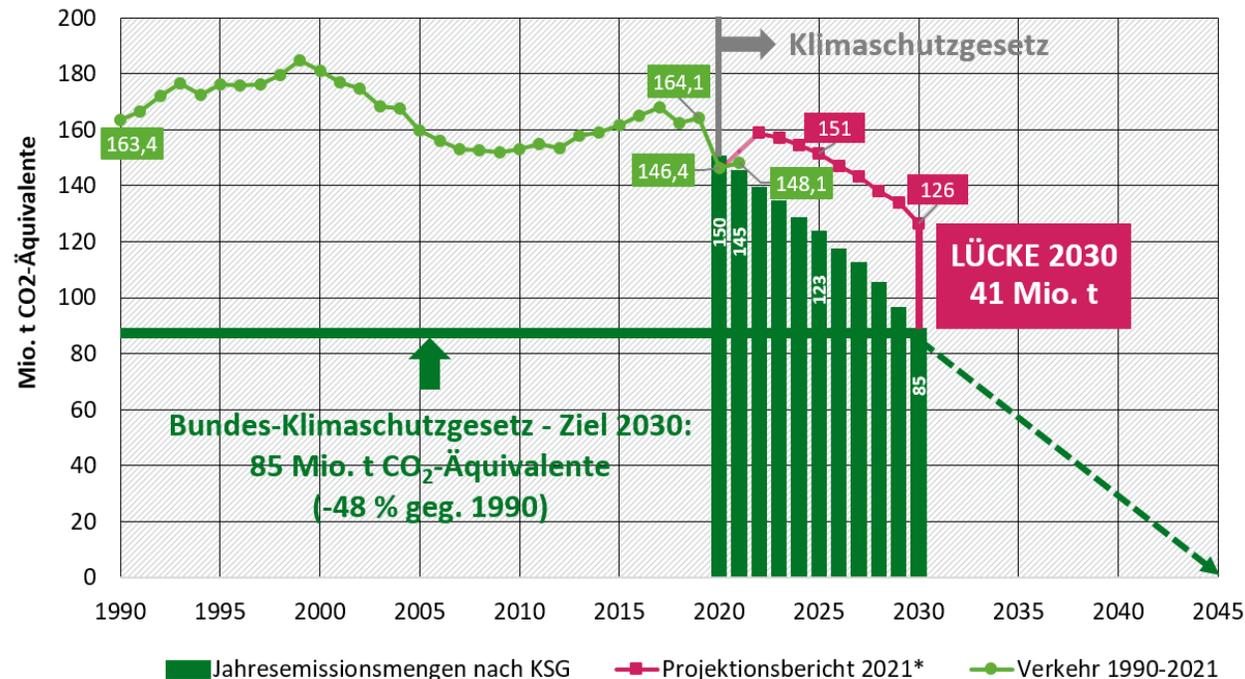
Stand der Forschung – Verkehrssektor - Personenverkehr



THM

TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN

Entwicklung und Zielerreichung der Treibhausgasemissionen in Deutschland im Sektor Verkehr des Klimaschutzgesetzes (KSG)



* Berechnete Werte des „Projektionsbericht 2021“ (rote Linie, basierend auf Daten mit Stand August 2020) weichen für die Jahre 2020 und 2021 von den später veröffentlichten offiziellen IST-Werten (grüne Linie) ab.

Quelle: UBA
22.03.2022

Quelle:

Umweltbundesamt (UBA):
Klimaschutz im Verkehr -
Klimaschutzziele im Verkehrssektor.
20.Mai 2022. [Frei verfügbar unter
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/klimaschutz-im-verkehr>, Abrufdatum: 16.01.2023]



Gefördert durch die
ADAC Stiftung

Infrastrukturbedarf E-Mobilität

Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von
Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland

Bericht zum Forschungsprojekt der Ludwig-Bölkow-Stiftung
gefördert durch die ADAC Stiftung

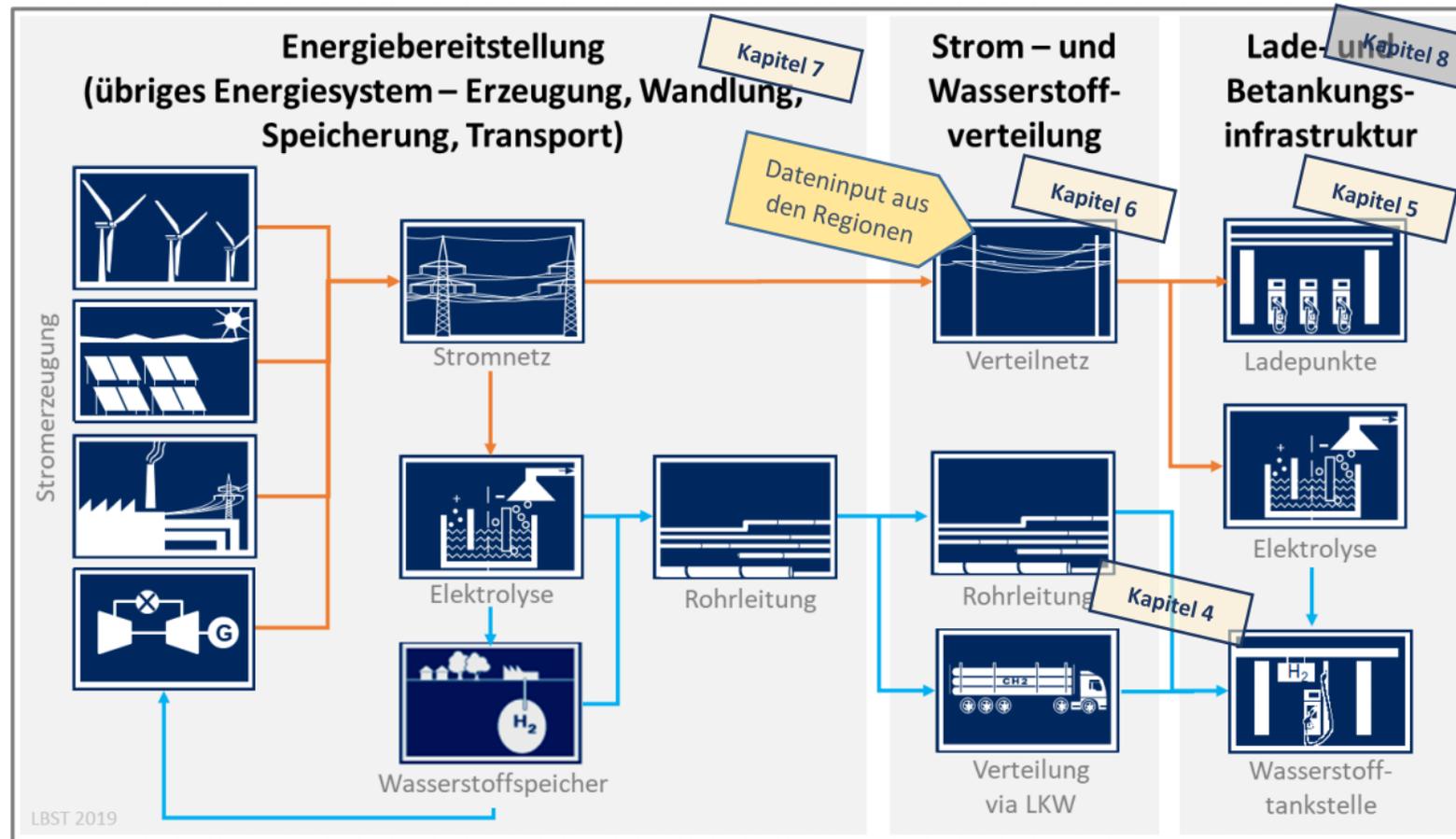
Ziel und Studienansatz im Überblick

- Ziel: kostengünstigste Energieersorgungsinfrastruktur für deutschlandweite PKW-Flotten-Mischung aus batterieelektrischen Fahrzeugen und brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen identifizieren
- Studienansatz:
 - Modellierung der Energieersorgungsinfrastruktur für bestimmte PKW-Flotten-Mischung aus batterieelektrischen Fahrzeugen und brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen
 - 3 Szenarien über die Stützjahre 2030, 2040, 2050
 - Bestimmung der kostengünstigen Flottenzusammensetzung aus Infrastruktursicht

Quelle: Bünger, U.; Nicolai, S.; Zerhusen, J.; Monsalve, C.; Kharboutli, S.; Michalski, J.; Ruhe, S.; Albrecht, U.: Infrastrukturbedarf E-Mobilität - Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland. Ottobrunn: Ludwig-Bölkow-Stiftung, 2019.

Diese Versorgungspfade werden betrachtet

Stand der Forschung – Verkehrssektor - Personenverkehr

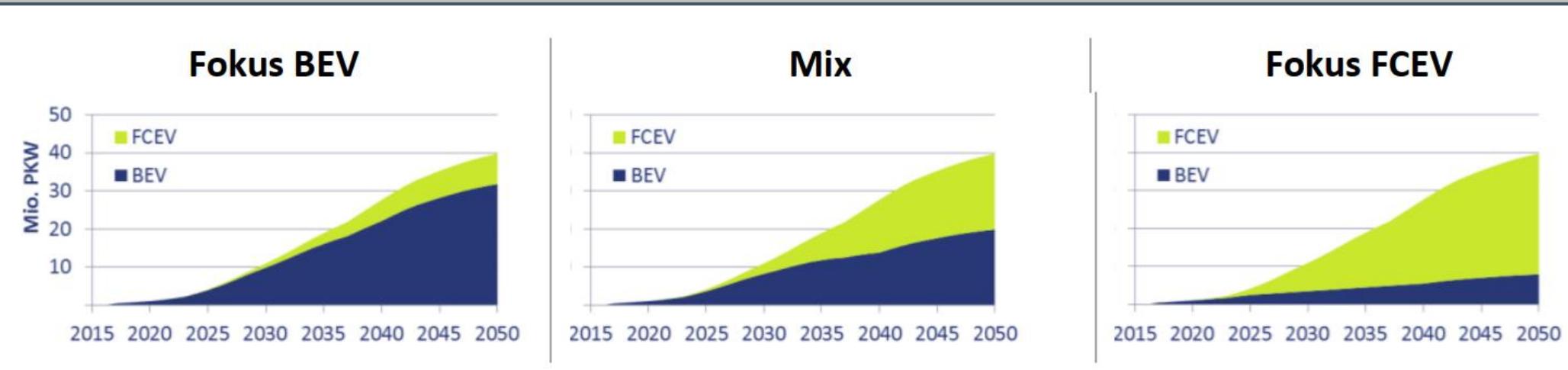


Quelle: Bünger, U.; Nicolai, S.; Zerhusen, J.; Monsalve, C.; Kharboutli, S.; Michalski, J.; Ruhe, S.; Albrecht, U.: Infrastrukturbedarf E-Mobilität - Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland. Ottobrunn: Ludwig-Bölkow-Stiftung, 2019.

Drei Szenarien mit unterschiedlichen PKW-Flotten-Zusammensetzungen aus Batterie und Brennstoffzelle

Stand der Forschung – Verkehrssektor - Personenverkehr

Entwicklung der Anzahl an Nullemissions-PKW in Szenarien

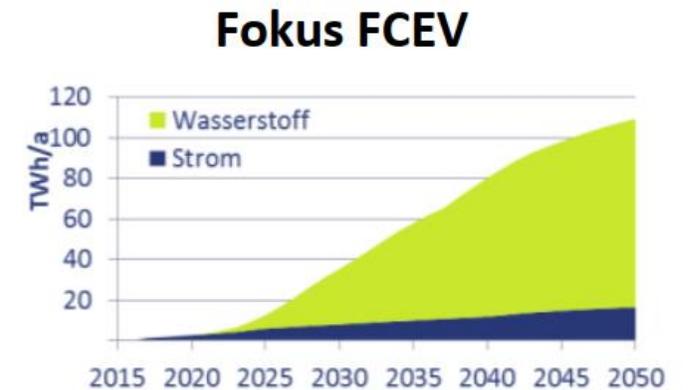
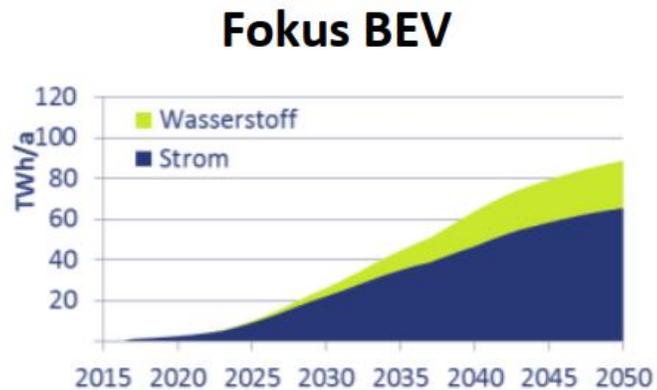


Quelle: Bünger, U.; Nicolai, S.; Zerhusen, J.; Monsalve, C.; Kharboutli, S.; Michalski, J.; Ruhe, S.; Albrecht, U.: Infrastrukturbedarf E-Mobilität - Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland. Ottobrunn: Ludwig-Bölkow-Stiftung, 2019.

Anteile BEV und FCEV an Nullemissions-PKW in Szenarien

Szenario	Anteil BEV	Anteil FCEV	Anteil BEV	Anteil FCEV
	2020	2020	ab 2040	ab 2040
	Bezogen auf Nullemissions-Pkw		Bezogen auf Nullemissions-Pkw	
Fokus BEV	100 %	0 %	80 %	20 %
Mix	100 %	0 %	50 %	50 %
Fokus FCEV	100 %	0 %	20 %	80 %

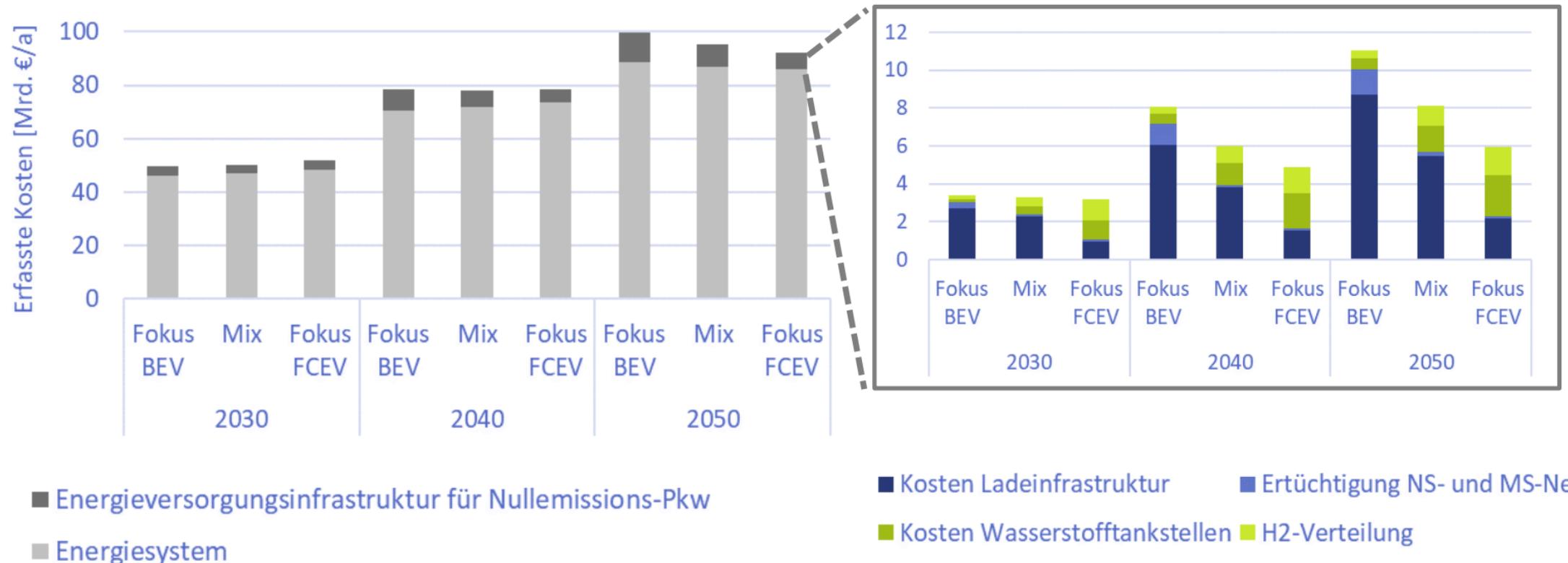
Erforderlicher Energiebedarf in Szenarien



Quelle: Bünger, U.; Nicolai, S.; Zerhusen, J.; Monsalve, C.; Kharboutli, S.; Michalski, J.; Ruhe, S.; Albrecht, U.: Infrastrukturbedarf E-Mobilität - Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland. Ottobrunn: Ludwig-Bölkow-Stiftung, 2019.

Die Gesamtkosten liegen für alle Szenarien und Stützjahre in ähnlichen Größenordnungen

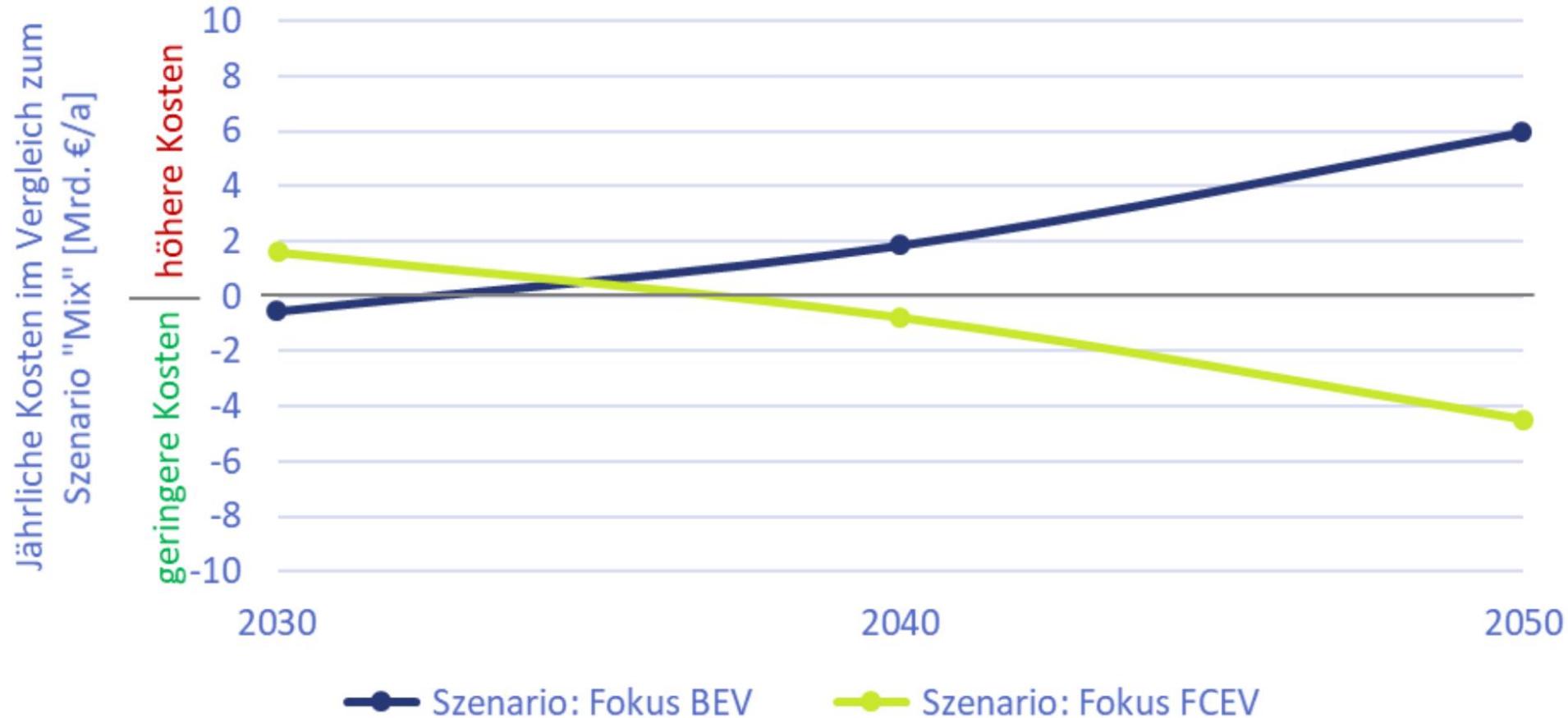
Stand der Forschung – Verkehrssektor - Personenverkehr



Quelle: Bünger, U.; Nicolai, S.; Zerhusen, J.; Monsalve, C.; Kharboutli, S.; Michalski, J.; Ruhe, S.; Albrecht, U.: Infrastrukturbedarf E-Mobilität - Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland. Ottobrunn: Ludwig-Bölkow-Stiftung, 2019.

Infrastruktur für batterieelektrisch ist anfangs (bei kleiner Flottengröße) günstiger, wird später jedoch teurer

Stand der Forschung – Verkehrssektor - Personenverkehr



Quelle: Bünger, U.; Nicolai, S.; Zerhusen, J.; Monsalve, C.; Kharboutli, S.; Michalski, J.; Ruhe, S.; Albrecht, U.: Infrastrukturbedarf E-Mobilität - Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland. Ottobrunn: Ludwig-Bölkow-Stiftung, 2019.

Agora Energiewende trifft es ziemlich gut

Öffentlicher Diskurs

Grüne Moleküle benötigt?	Industrie 	Verkehr 	Energie-sektor 	Gebäude 
No-regret	<ul style="list-style-type: none"> · Reaktionsmittel (Stahl aus Direktreduktion) · Stoffliche Nutzung (Ammoniak, Chemikalien) 	<ul style="list-style-type: none"> · Langstrecken-Luftverkehr · Langstrecken-Schiffsverkehr 	<ul style="list-style-type: none"> · Langzeitspeicher zum Back-up variabler erneuerbarer Energien 	<ul style="list-style-type: none"> · Fernwärme (Residuale Wärmelast*)
Umstritten	<ul style="list-style-type: none"> · Hochtemperatur-Wärme 	<ul style="list-style-type: none"> · Lkw & Busse** · Kurzstrecken-Luftverkehr · Kurzstrecken-Schiffsverkehr · Schienenverkehr*** 	<ul style="list-style-type: none"> · Größe des Bedarfs angesichts anderer Flexibilitäts- und Speicheroptionen 	
Nicht empfehlenswert	<ul style="list-style-type: none"> · Niedertemperatur-Wärme 	<ul style="list-style-type: none"> · Pkw · Kleinere Nutzfahrzeuge 		<ul style="list-style-type: none"> · Einzelne Gebäude

* nach Erneuerbaren Energien sind Umgebungs- und Abwärme so weit wie möglich zu nutzen. Besonders relevant für große bestehende Fernwärmesysteme mit hohen Vorlauftemperaturen.
Hinweis: Fernwärme wird gemäß dem UNFCCC-CRF-Berichtsformat als Teil des Stromsektors gemeldet.

** Die Serienproduktion von Batterie-Lkw und -Bussen ist derzeit weiter fortgeschritten als die von Brennstoffzellen-Lkw und -Bussen.

*** Je nach Distanz, Nutzungsfrequenz und Energieversorgungsoptionen.

Flis, G.; Deutsch, M.: 12 Thesen zu Wasserstoff- Impuls.
Berlin: Agora Energiewende, April 2022. [Frei verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/12-thesen-zu-wasserstoff-publikation/>, Abrufdatum: 05.01.2023]

Agenda



Einleitung



Grundlagen



Stand der Forschung



Öffentlicher Diskurs



Zusammenfassung



Fragen und Diskussion



Zusammenfassung

Fazit

- Lange war umstritten, ob Wasserstoff in der Energiewende eine Rolle spielen wird. Mittlerweile ist klar, dass wir ihn sehen werden. Die Frage bleibt, wann und wo.
- Wann und in welchen Sektoren wird maßgeblich vom Preis, also Angebot (Verfügbarkeit) und Nachfrage, abhängen. Insgesamt setzt ein Markt in den Sektoren ein Minimum an Infrastrukturen (Wasserstoffnetz, tlw. Tankstellen) voraus.
- Auch Wasserstofftechnologien, Elektrolyse und Brennstoffzelle, sind zentral. Diese müssen in den nächsten Jahren durch eine ähnliche Lernkurve durchlaufen wie PV und Wind.
- In vielen Industrien ist Wasserstoff als Defossilisierungsoption gesetzt oder es führt kein Weg an ihm vorbei (Bsp. Luft- und Schifffahrt).
- Wasserstoff stellt in Kombination mit Untergrundgasspeichern die einzige großtechnische Energiespeicher-Technologie dar, die wir zur Verfügung haben, für die sog. „kalte Dunkelflaute“.
- Umstritten bleiben vor allem Teile der beiden Sektoren Verkehr (PKW, LKW) und Wärme (private Heizungskeller).
- Stromverteilnetze werden bislang stiefmütterlich beforscht, werden jedoch die Hauptlasten der Energiewende tragen und sich anpassen müssen. Dies wird bis 2045 dreistellige Milliardenbeträge kosten. Wasserstoff kann diese Beträge reduzieren.



Wasserstoff in der Energiewende – wann und wofür brauchen wir ihn?

Vortrag für die Initiative "Umwelt- und Klimaschutz leicht gemacht"



TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN



Vielen Dank für Ihr Interesse!

Danke auch an

- Jan Zerhusen, Dr. Jan Michalski, Dr. Ulrich Bünger
- Lena Bühre, Leon Schumm
- Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
- DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH

Agenda



Einleitung



Grundlagen



Stand der Forschung



Öffentlicher Diskurs



Zusammenfassung



Fragen und Diskussion



Fragen und Diskussion