

— LES VOYAGES EXTRAORDINAIRES —

L'ILE MYSTERIEUSE

PAR
Jules VERNE
154 Dessins par J. VERAS



COLLECTION HETZEL

„Ich bin davon überzeugt, dass Wasser einmal als Brennstoff Verwendung finden wird, dass seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zur unerschöpflichen und ganz ungeahnten Quelle von Wärme und Licht werden“

Die Figur „Cyrus Smith“
in
„Die geheimnisvolle Insel“

von Jules Verne (1875)

Wasserstoff Energieträger und Sektorenkoppler im Spannungsfeld zwischen stofflicher und energetischer Nutzung

**Projekt TraForce
Wissen/Sieg**

12. März 2024

Prof. Dr. Oliver Türk
Transferstelle Bingen

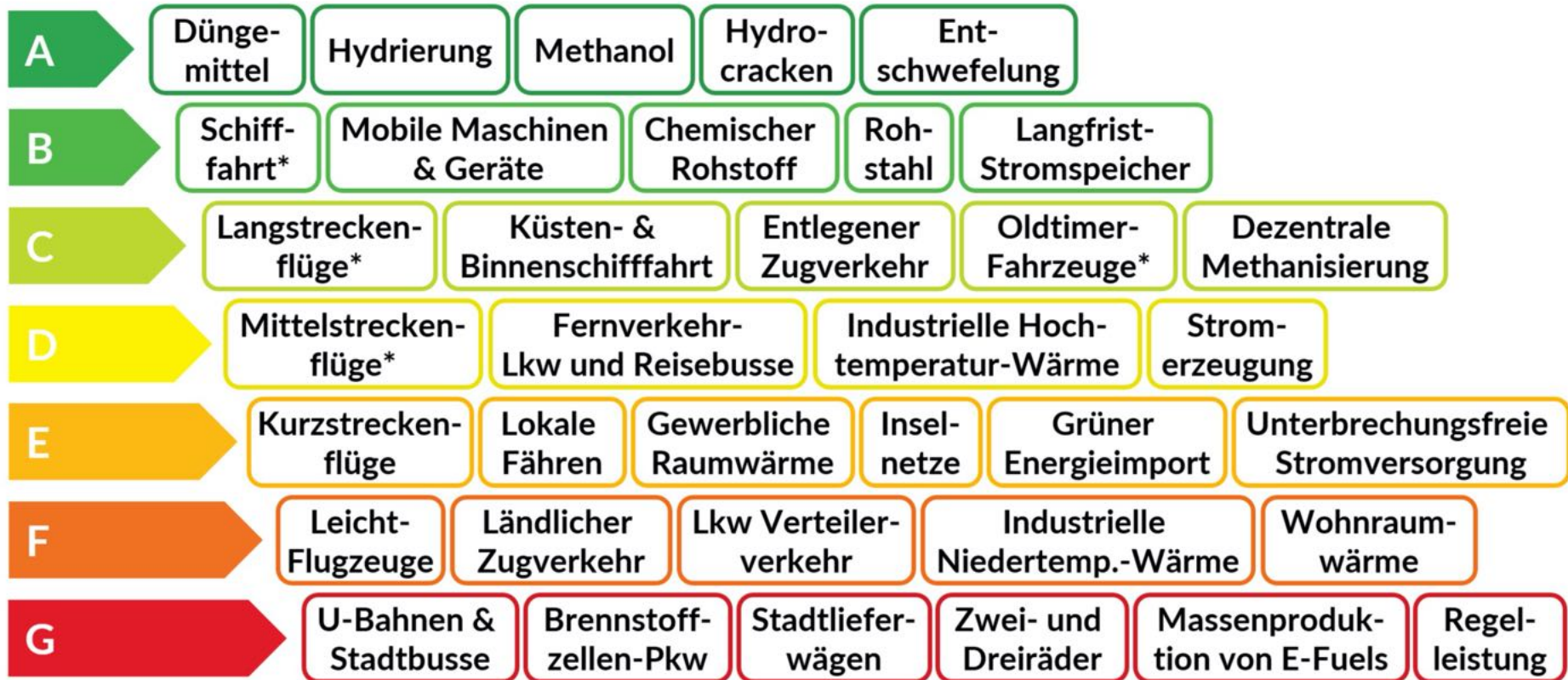


Nehmen wir mal das Fazit vorweg!

Einsatzbereiche sauberen Wasserstoffs

(Schätzungen, nach Michael Liebreich, 2021)

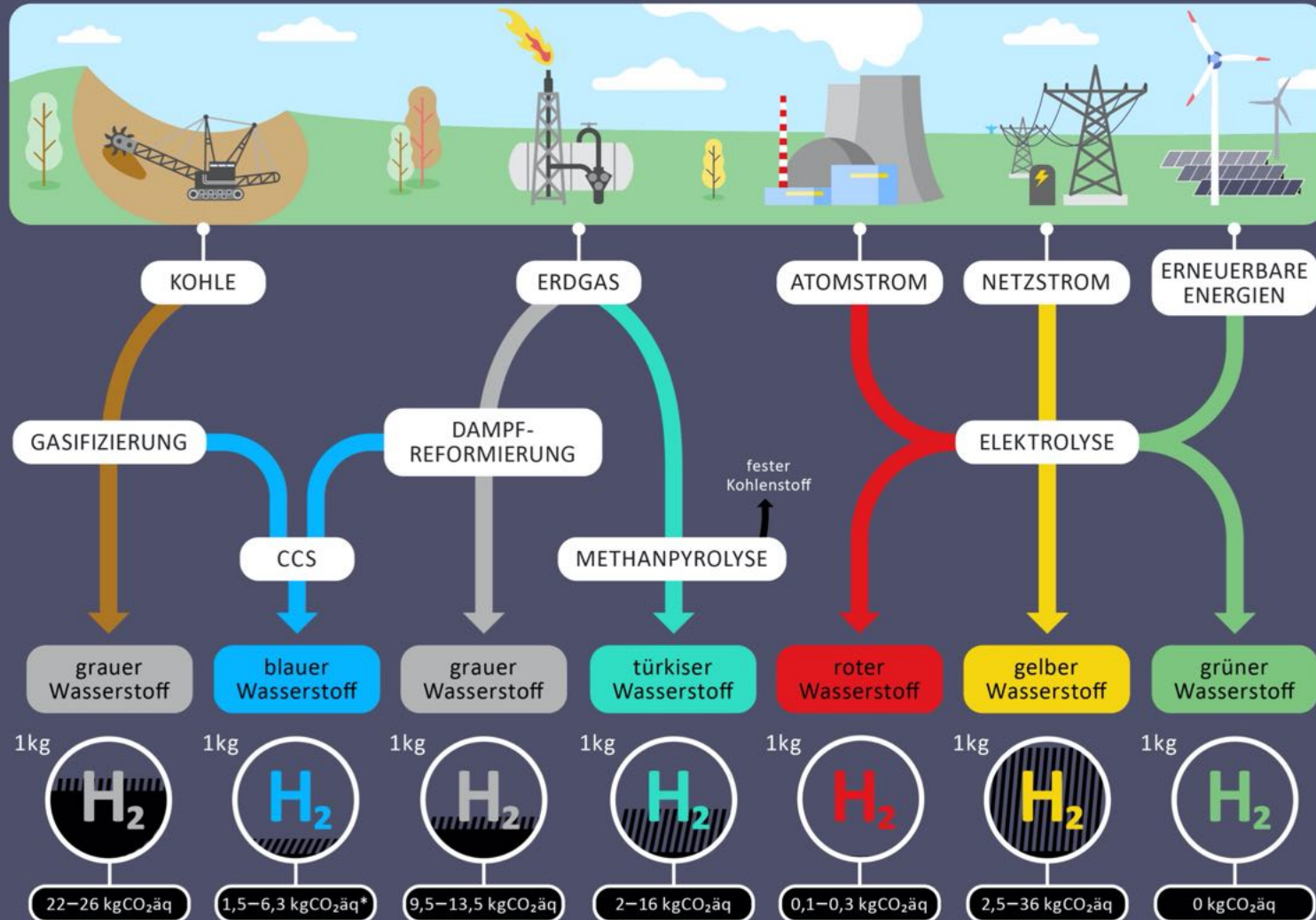
Alternativlos



Unwirtschaftlich

* Sehr wahrscheinlich in Form von mittels Wasserstoff erzeugten E-Fuels oder Ammoniak.

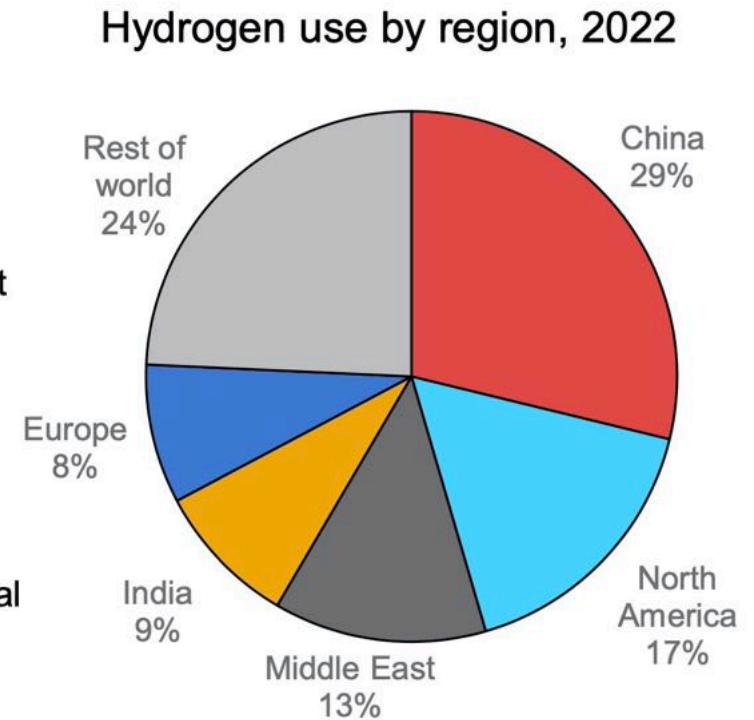
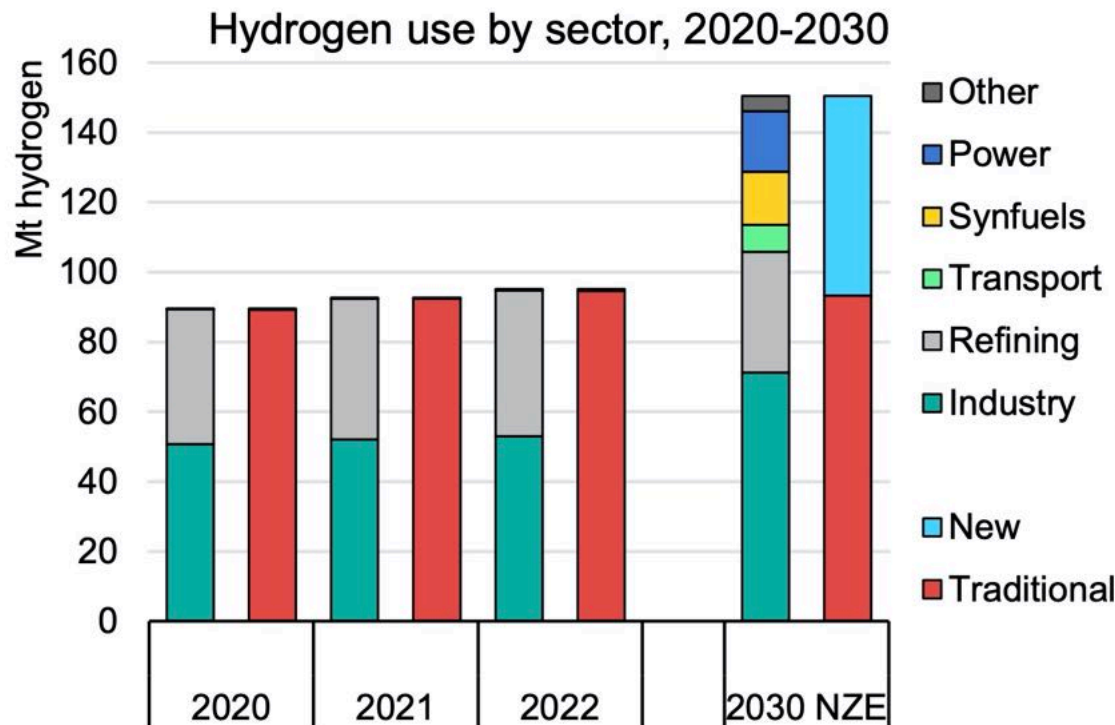
Wie viel CO₂ entsteht bei der Herstellung von 1 kg Wasserstoff?



**Ausgangssituation:
Vor allem stoffliche Nutzung!**

H₂-Nutzung stofflich: Ammoniak, Methanol, Stahl, Raffinerie

Figure 2.1 Hydrogen use by sector and by region, historical and in the Net Zero Emissions by 2050 Scenario, 2020-2030

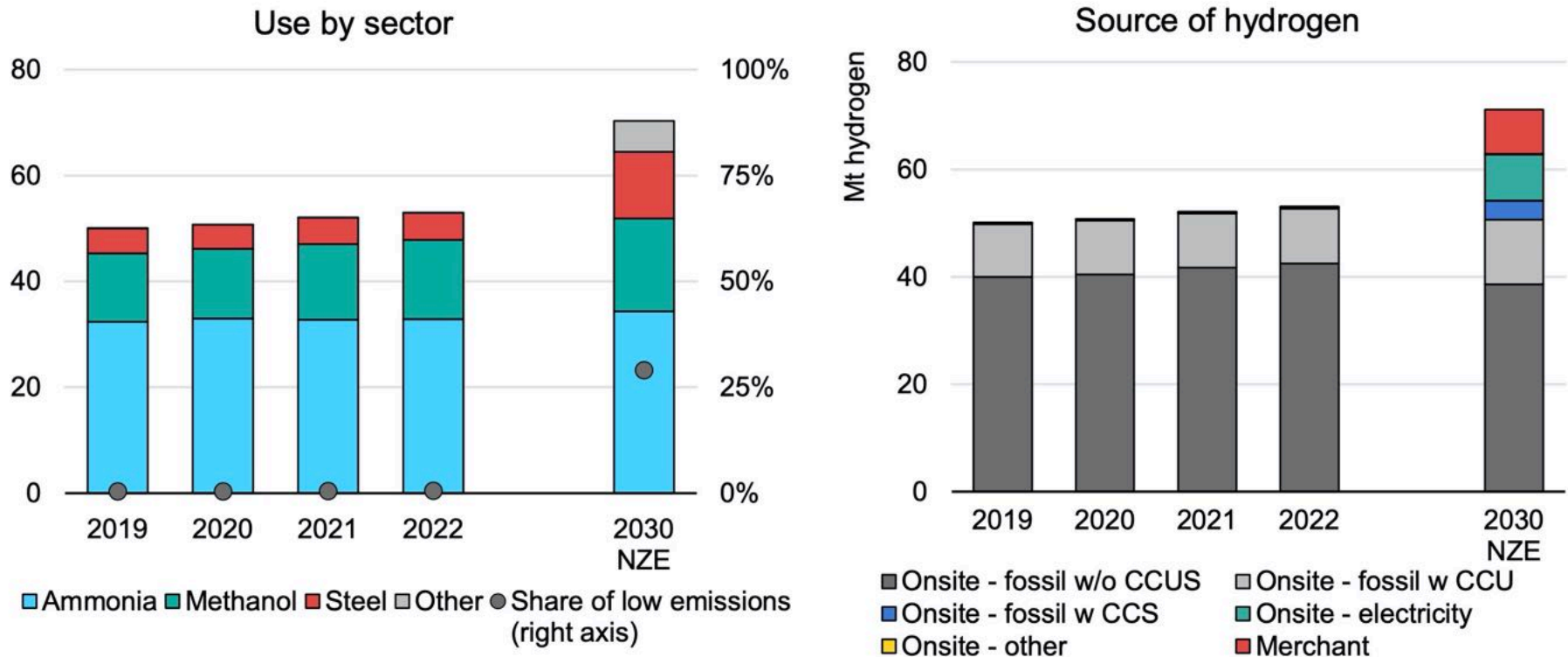


IEA. CC BY 4.0.

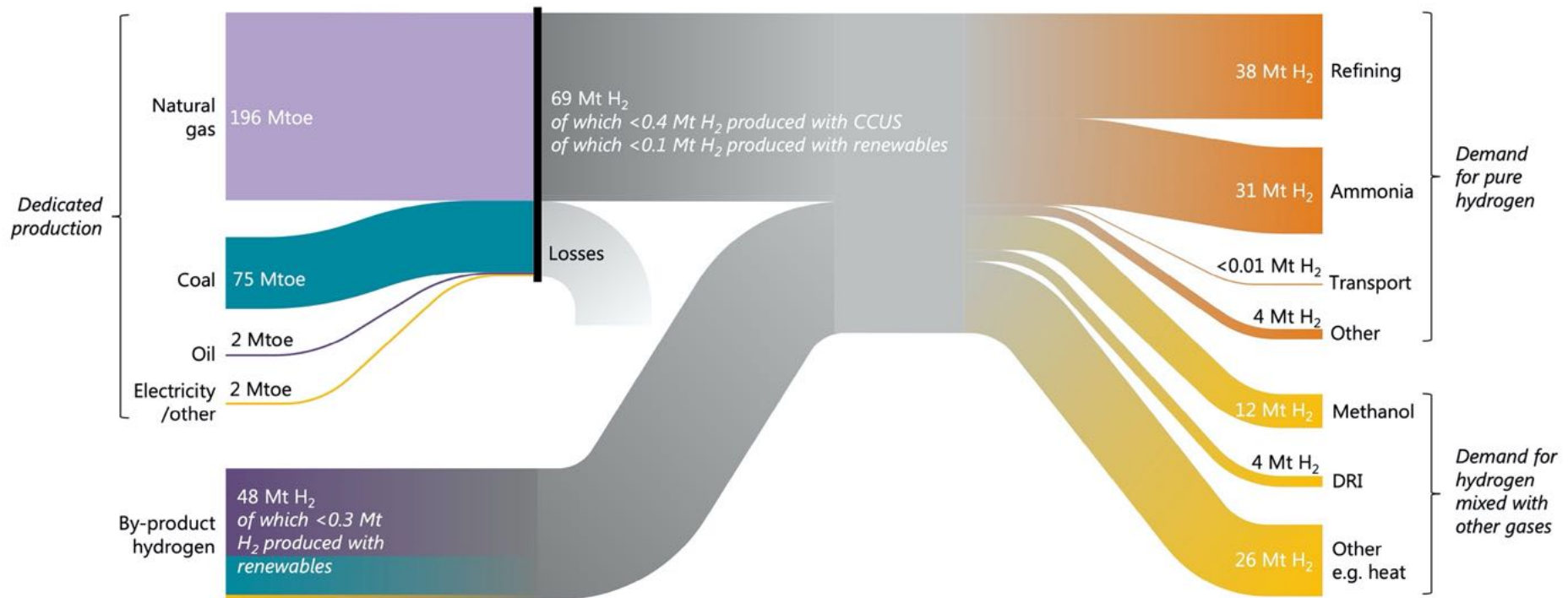
Notes: NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario. "Other" includes buildings and biofuels upgrading.

H₂-Produktion: fossil dominiert

Figure 2.4 Hydrogen use in industry by subsector and by region and source of hydrogen, historical and in the Net Zero Emissions by 2050 Scenario, 2019-2030



H₂ – Quellen und Senken meist räumlich stark benachbart



Mobilität

Figure 2.7 Fuel cell electric vehicle stock by segment and region, 2019-2023

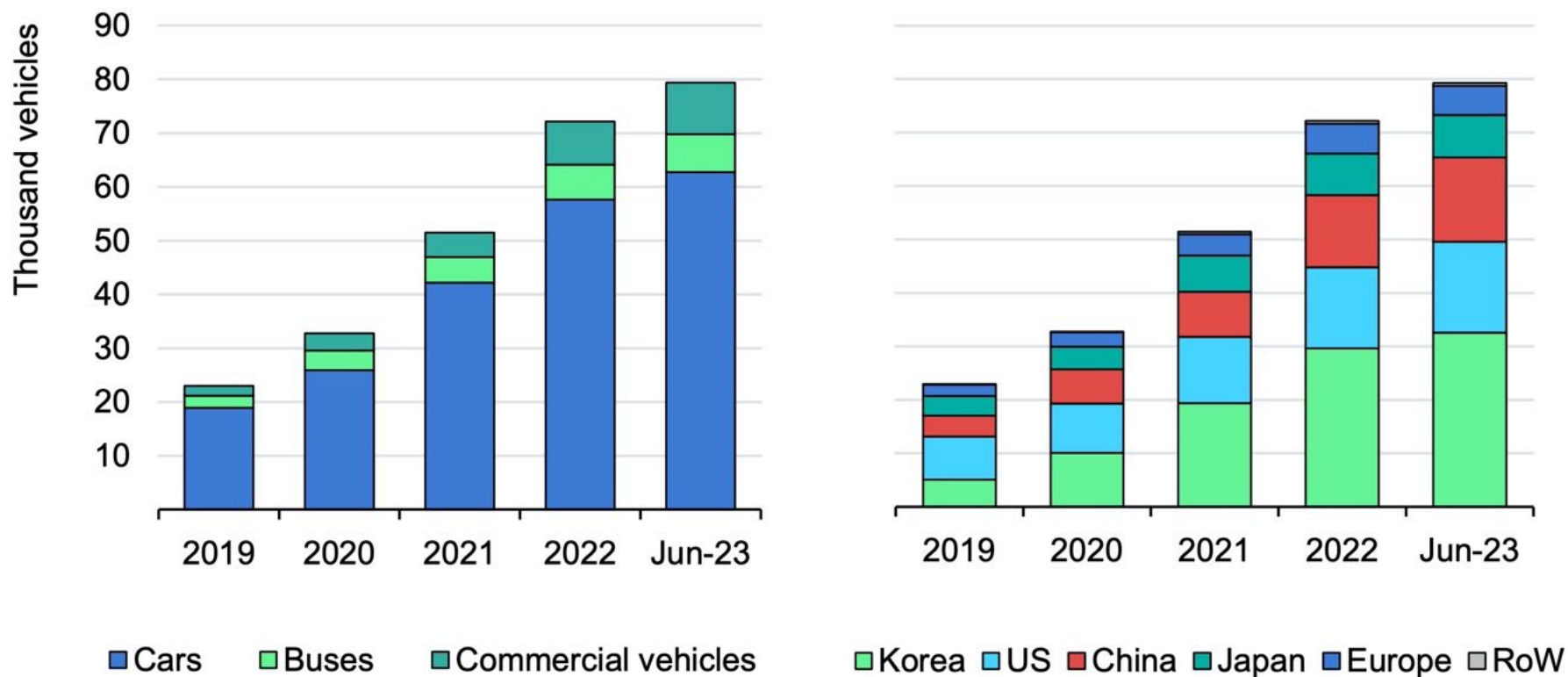
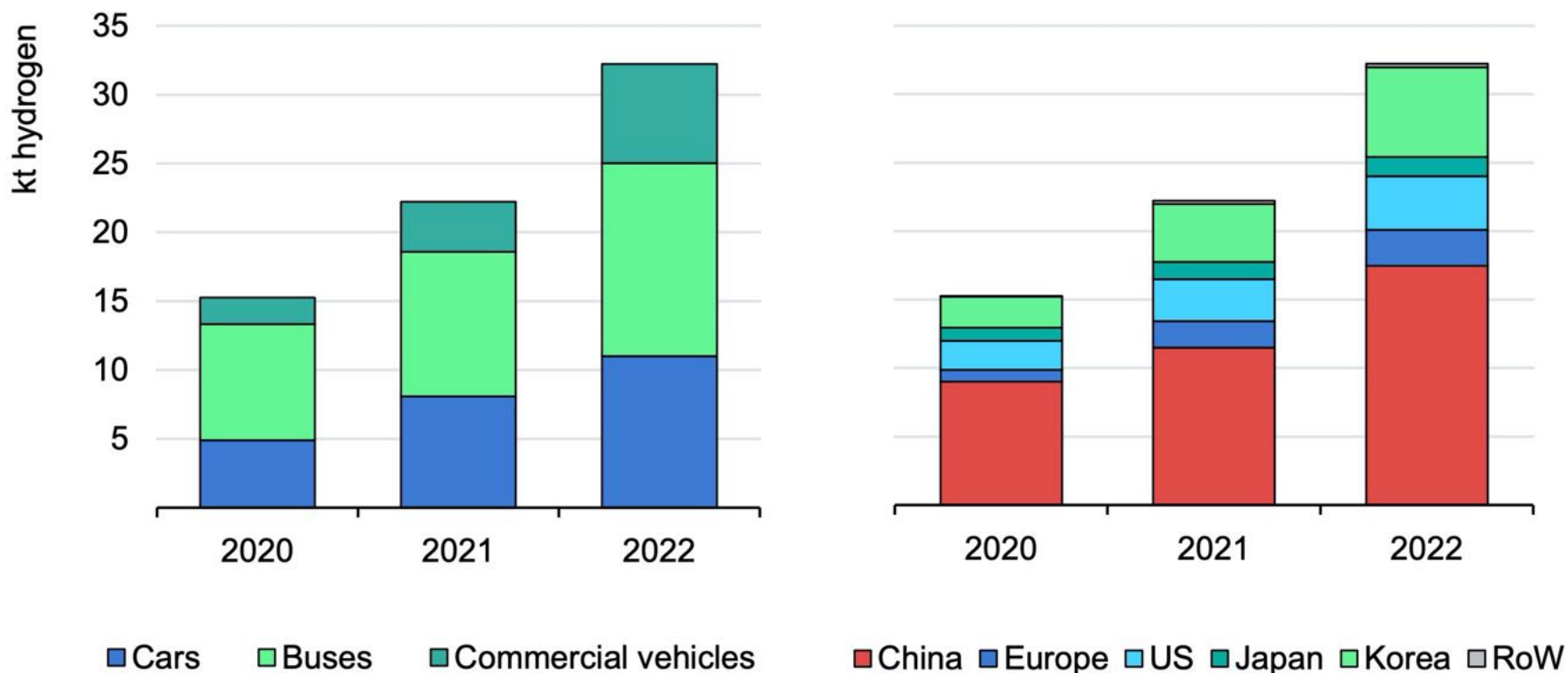


Figure 2.6 Hydrogen consumption in road transport by vehicle segment and region, 2020-2022



AMMONIAK-VERBRENNER VON GAC UND TOYOTA

Dieser China-Motor stößt kein CO2 aus

Auf der Suche nach der grünen Mobilität hat der chinesische Autohersteller GAC jetzt einen Verbrennungsmotor entwickelt, der mit Ammoniak betrieben wird. Aber ist das nicht giftig?

Markus Schönfeld • 03.07.2023



Foto: GAC/Schönfeld



Donnerstag, 13. Juli 2023

Erster Ammoniakmotor-Test erfolgreich abgeschlossen

Die erfolgreich durchgeführte Verbrennung von Ammoniak in einem MAN B&W Zweitaktmotor ist ein „historischer“ Schritt für das Unternehmen und die Seeschifffahrt

Prozesswärme

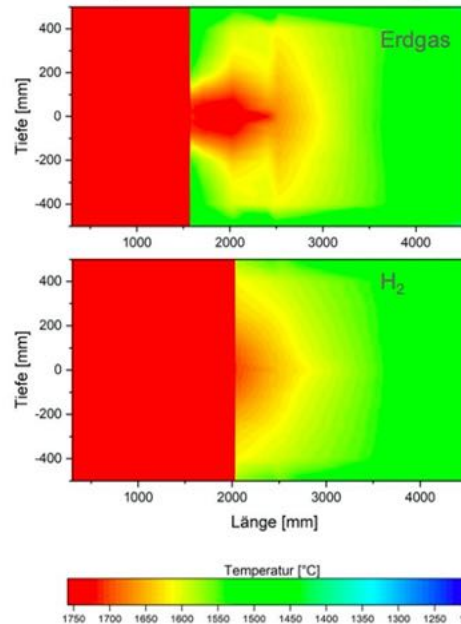
Schott hat erfolgreich Wasserstoff getestet

Feldmessungen-GWI (300-400 kW)



Kühlrohröffnungen Sondenöffnungen

Temperaturfeld Messungen



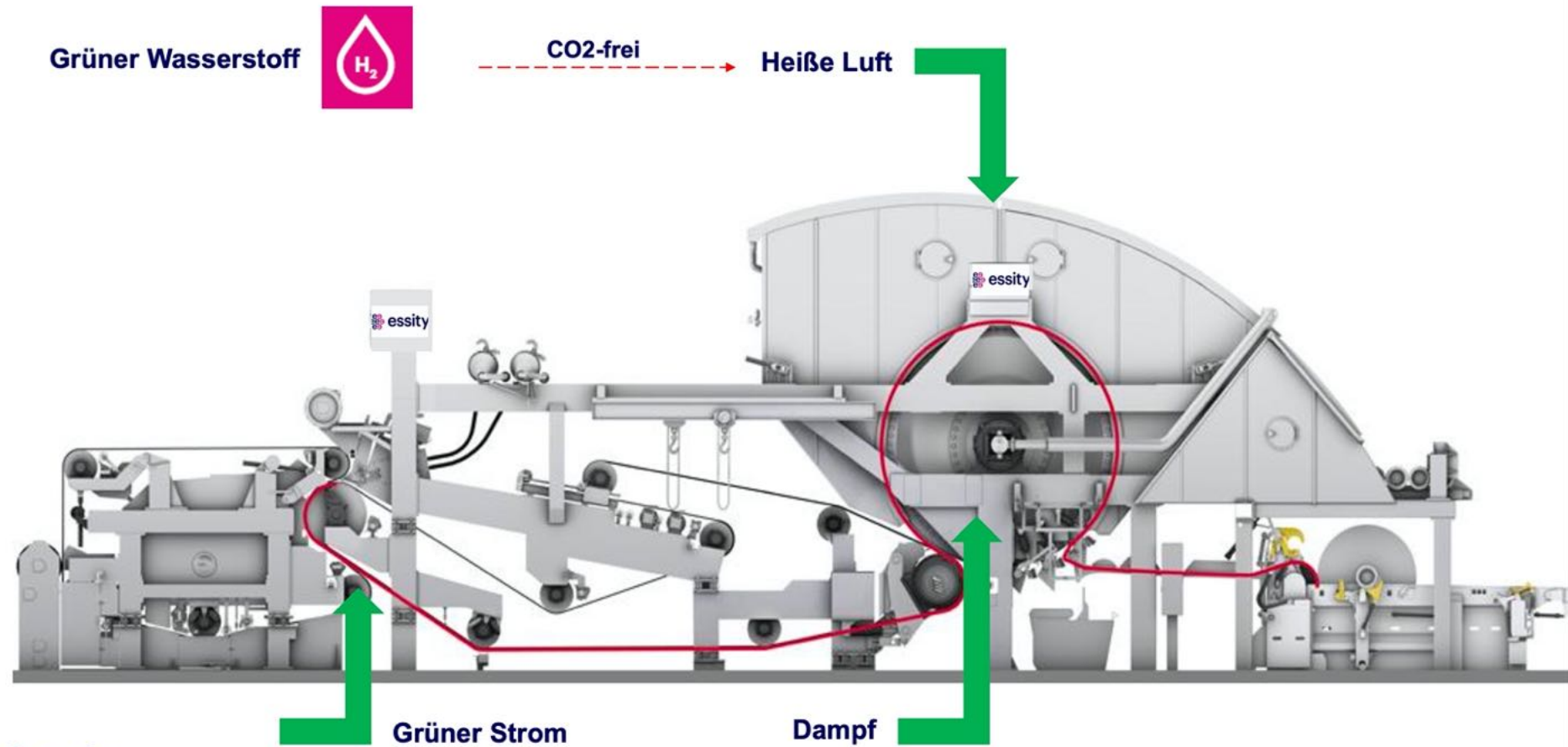
Es wurden 5 kommerziell verfügbare Brenner getestet

Alle getesteten 5 Brenner problemlos mit Erdgas, H₂ und H₂/Erdgas-Mischungen betreibbar

Flamme (Flammenwurzel) bei H₂ heißer.

Essity ebenso erfolgreich mit H₂

Grüner Wasserstoff schafft Durchbruch



H₂TO – BMBF, KlimPro – Industrie

Entwicklung einer innovativen wasserstoffbasierten Ofentechnologie zur Herstellung tonkeramischer Werkstoffe

Handlungsstrang a: Entwicklung Energiekonzept

Jahresenergiebedarf (KTS, 2022):

Hauptenergieverbraucher sind der Tunnelofen (TO) und die Tonmühle (TM)

Erdgas ca. 14,4 GWh/a bzw. 1.650 kWh/h (44% TO, 55% TM)
entspricht ca. 435.000 kg H₂/a bzw. 50 kg H₂/h

Strom ca. 1,7 GWh/a bzw. 195 kWh/h (33% TO, 60% TM)
12.000 m² PV-Anlage auf den Hallendächern stellen 1.600 kW
bereit (2MW Peak)

Erzeugung von 50 kg H₂ (555 Nm³) pro h durch alkalische
Elektrolyse:
465 L Wasser + 2,3 MW Strom → 50 kg H₂ + 445 kg O₂ (312
Nm³)

Alternative, (ergänzende), wasserunabhängige H₂-Quellen unter
Betrachtung, zur Sicherstellung der Produktion während
Trockenperioden.



KTS-Werk in Mülhei-Kärlich im Rheintal bei Koblenz

Gebäudewärme

Energiepark Mainz: Einspeisung läuft!

PRAKTISCHE ERFAHRUNGEN AUS FÜNF JAHREN POWER-TO-GAS ANLAGENBETRIEB BEWERTUNG DER TECHNIK IM ENERGIEPARK MAINZ



LEARNINGS TECHNIK:

- ▶ Degradation von Zellen der Elektrolyse erkennbar
- ▶ Hohe Speisewasserqualität ist essentiell für die Langlebigkeit des Elektrolysesystems
- ▶ H₂-Verdichtung im dynamischen Betrieb herausfordernd
- ▶ Fehlende Redundanz bei der Verdichtung führt regelmäßig zu Stillständen und/oder Erlösausfällen
- ▶ Trailer-Betankung und -Logistik sind technisch und organisatorisch ausgereift, Markt für (grauen) Wasserstoff besteht
- ▶ Die Gasnetzeinspeisung funktioniert fast fehlerfrei, die eichrechtskonforme Nutzung von Wasserstoff im Erdgasnetz ist heute möglich

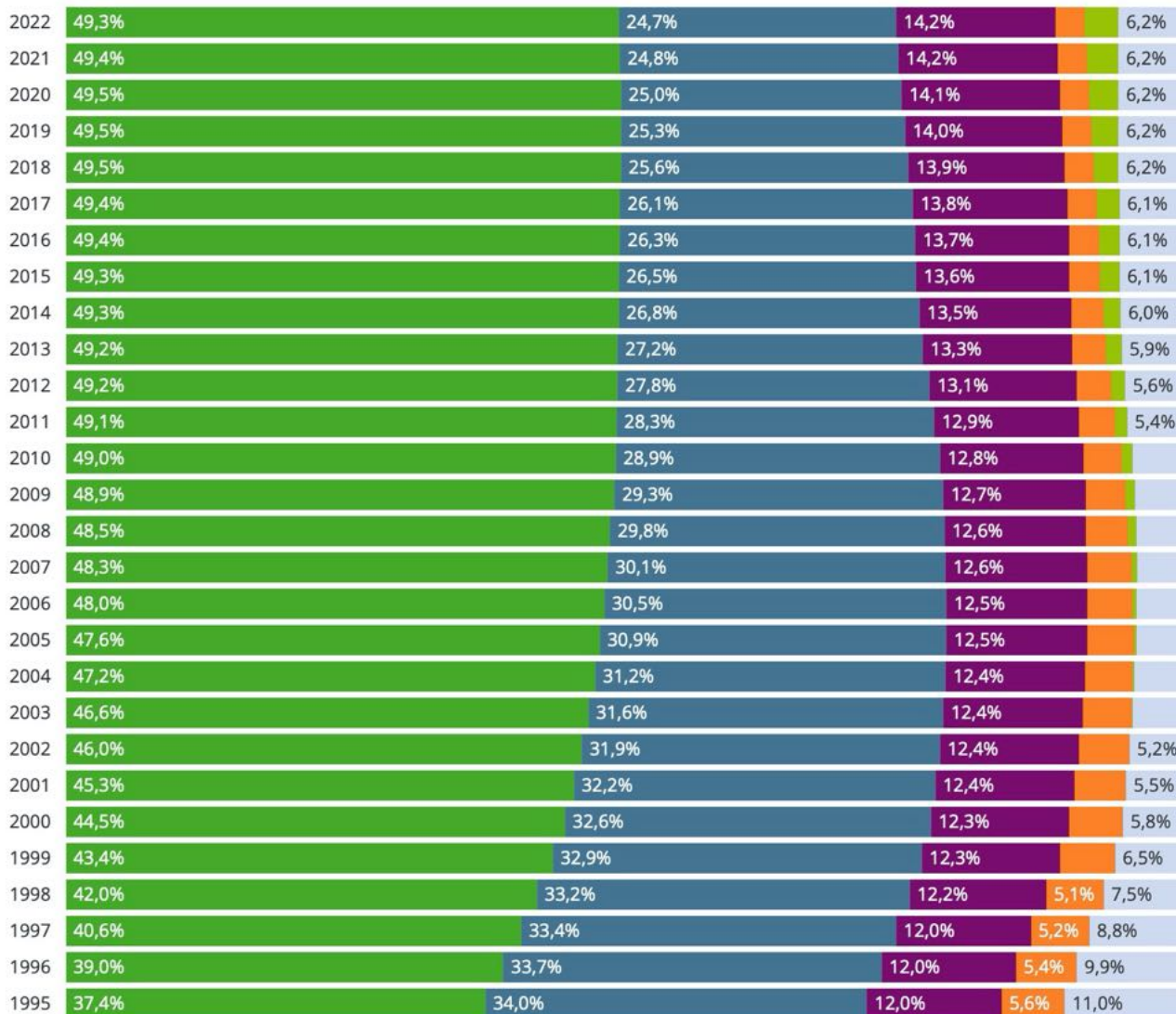


H₂ – Chance im Gebäudesektor?

Entwicklung der Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes¹ in Deutschland

Anteile der Energieträger in %

Gas² Heizöl Fernwärme Strom Elektro-Wärmepumpen Sonstige³

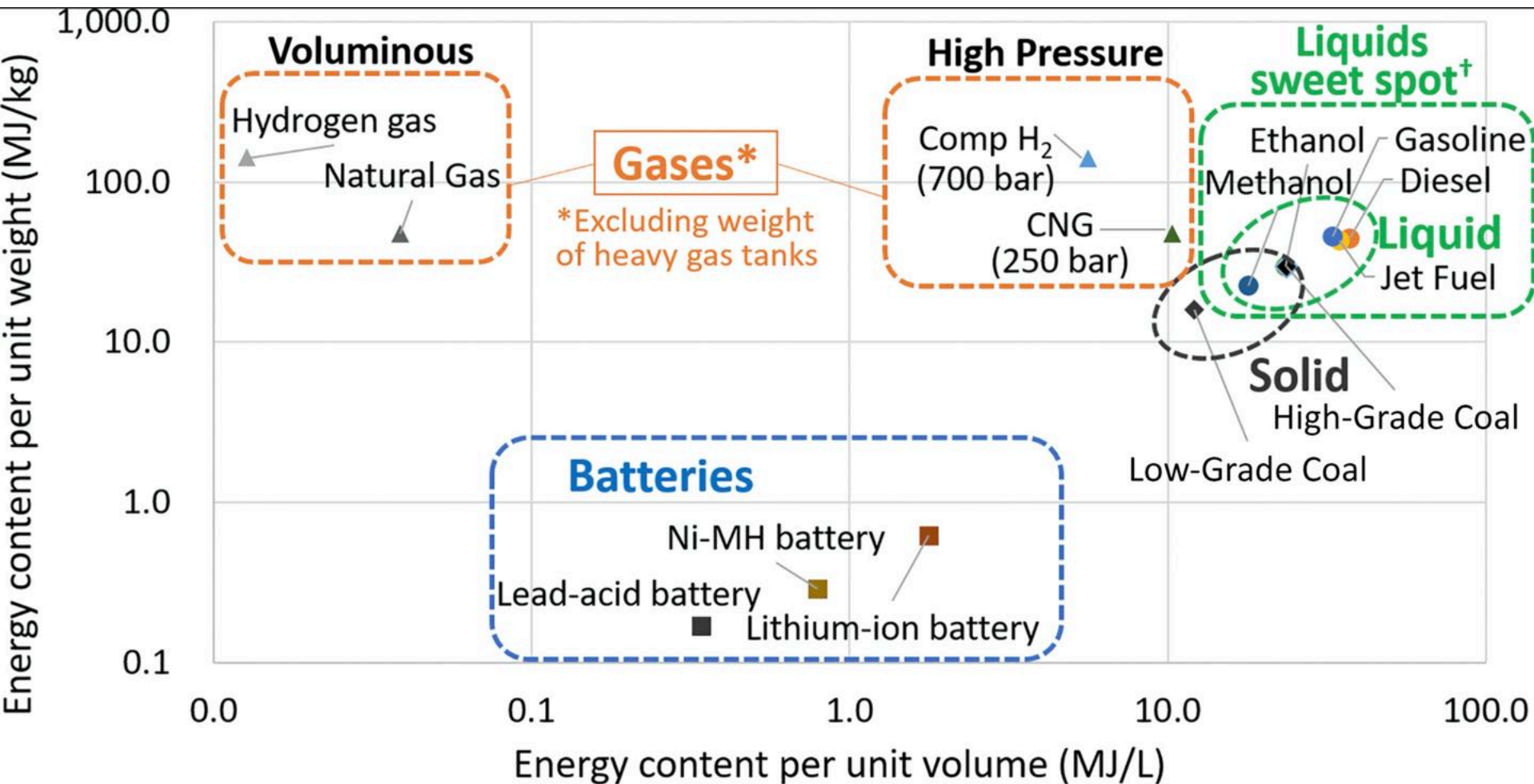


Derivate

Das Ammoniak

	Energy content (LHV) [MJ/Kg]	Energy content (LHV) [MJ/L]	Density [kg/m ³]	Octane [RON]	Flame-velocity [m/s]	Flammability-limits [vol/%]	Minimum Ignition Energy [mJ]
Cooled Ammonia (Liquefied)	18.6	12.69 (1 atm, -33°C)	682	>130	0.067	15-28	680
Compressed Ammonia (Liquefied)	18.6	11.65 (300 bar, 25°C)	626.	>130	0.067	15-28	680
Cooled Hydrogen (Liquefied)	120	8.5 (1atm, -253°C)	70.85	>130	3.25	4.7-75	~0.016
Compressed Hydrogen (gaseous)	120	2.46 (300 bar, 25°C)	20.54	>130	3.25	4.7-75	~0.016
Diesel (n-dodecane)	44.11	32.89 (1 atm, 25°C)	745.7 ^[12]	<20	~0.80	0.43-0.6	~0.23
Gasoline (iso-octane)	44.34	(n-octane) 30.93 (1 atm, 25°C)	(n-octane) 697.6	100	0.41 ~0.58 (RON 90-98)	0.95-6 0.6-8 (RON 90-98)	1.35 ~0.14 (RON 90-98)
Methanol	19.90	15.65 (1 atm, 25°C)	786.3	108.7	0.56	6.7-36	~0.14
Ethanol	26.84	21.07 (1 atm, 25°C)	785.1	108.6	0.58	3.3-19	0.6

„The liquid sweet spot“



†Sweet Spot: high energy density by weight and volume; stable, easy to store, transport, distribute

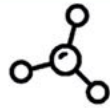
Ammoniak infrastrukturell einfach

H2Rail:

In welchen Formen kann Wasserstoff transportiert werden?



Gasförmiger
Wasserstoff (H₂)



MEGC
(Multi Element Gas Container)



Druckstufen 60 – 500bar
Ca. 1.300 kg H₂ /1x 40' Behälter
Hohe Anschaffungskosten

Wasserstoffderivate



Ammoniak

Methanol

LOHC

Kesselwagen
(auch als Container möglich)



Transport in flüssiger Form
Bsp. Ammoniak: ca. 55.000 kg Inhalt
Equipment = Marktstandard

**Fokus
BTT**

Flüssig tiefkalter
Wasserstoff (LH₂)



Cryo-Container



40' Behälter für ca. 3.000 kg H₂
(bei ca. -256 °C)

In Bearbeitung

Ammoniak mit einigen Vorteilen

Einschätzung der DB Cargo BTT GmbH

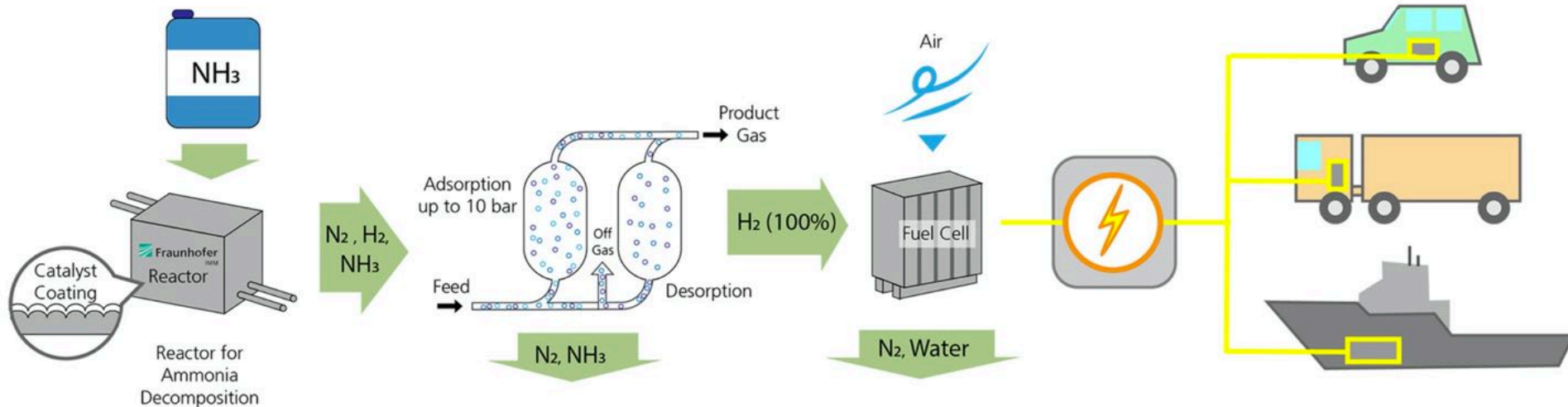
Welche Sicht hat die BTT aktuell auf die unterschiedlichen Wasserstoffformen?



	Anwendungsbereiche	Equipment	Transportaspekte	Verfügbarkeit
Wasserstoff unter Druck		MEGC	Equipmentkosten: ● Transportkapazität: ● Transportkomplexität: ● Direkte Nutzung H2: ● Transformationskosten: ●	
Ammoniak		Tankcontainer Kesselwagen	Equipmentkosten: ● Transportkapazität: ● Transportkomplexität: ● Direkte Nutzung H2: ● Transformationskosten: ● Nutzung als Endprodukt: ●	
Methanol		Tankcontainer Kesselwagen	Equipmentkosten: ● Transportkapazität: ● Transportkomplexität: ● Direkte Nutzung H2: ● Transformationskosten: ● Nutzung als Endprodukt: ●	
LOHC		Tankcontainer Kesselwagen	Equipmentkosten: ● Transportkapazität: ● Transportkomplexität: ● Direkte Nutzung H2: ● Transformationskosten: ● Nutzung als Endprodukt: ●	
Tiefkalter Wasserstoff		Cryo-Container	Equipmentkosten: ● Transportkapazität: ● Transportkomplexität: ● Direkte Nutzung H2: ● Transformationskosten: ● Nutzung als Endprodukt: ●	

NH₃ -> H₂ – sehr effektiv!

AMMONPAKTOR: 50 kW hydrogen supply from ammonia for fuelling Stations, smaller scale maritime



Efficiency of Ammonia decomposition: 88% (without heat utilization)

Overall process efficiency: 50%

Transport

Ecology of Scale



24.004 Container

240.000 Tonnen Fracht

Größtes Containerschiff der Welt hat Hamburg wieder verlassen

Stand: 24.09.2022 16:06 Uhr

Immer neue Rekorde in Hamburg: Fast eine Woche lang hat das größte Containerschiff der Welt im Hafen gelegen. Die "Ever Alot" war am Montag mit dem Mittagshochwasser eingelaufen und hatte am Containerterminal Burchardkai in Waltershof festgemacht. Am Sonnabendnachmittag legte sie wieder ab - in Richtung Suezkanal, um dann weiter bis nach China zu fahren.

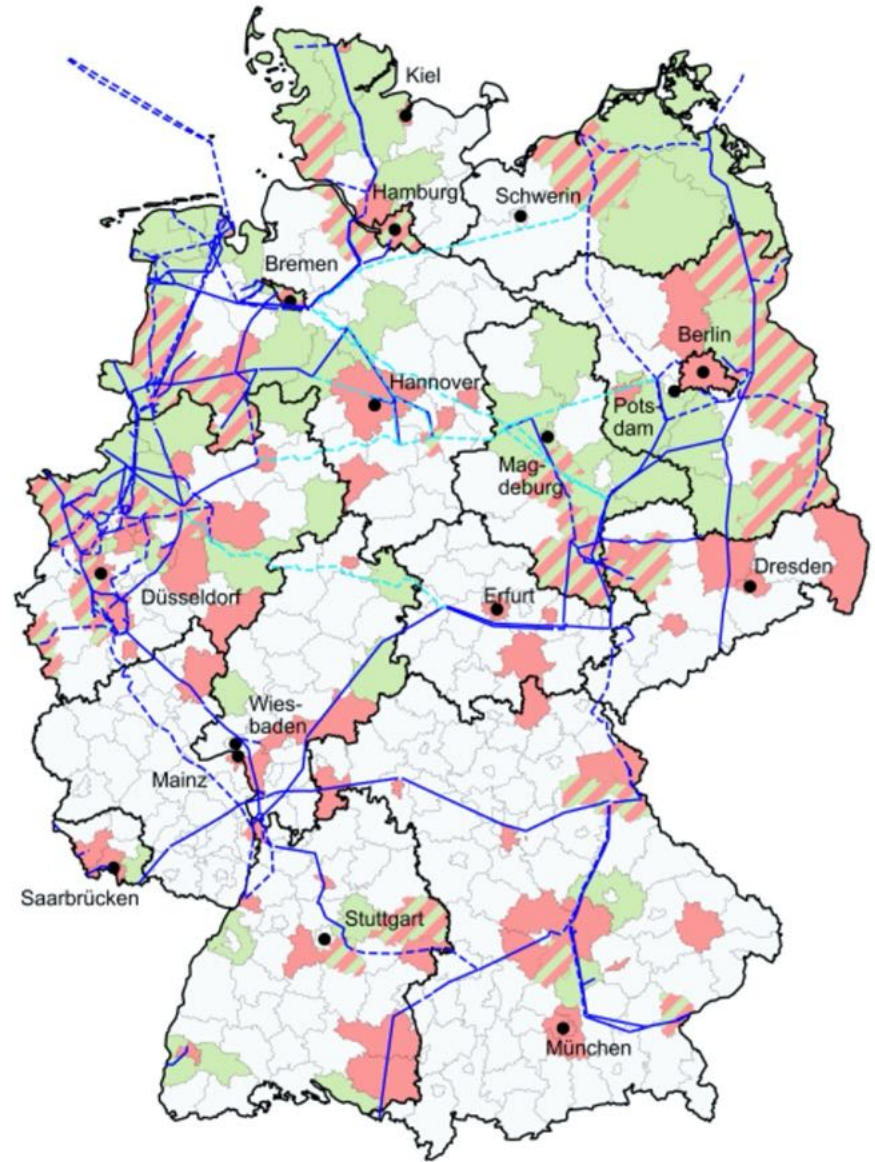
Ecology of Scale: deep sea shipping

Ecology of scale - cost per unit

Number of containers	24.000	
payload per container	10	t
payload per container	10.000	kg
payload ship	240.000.000	kg
payload ship	240.000	t
Weight of unit	1	kg
number of units	240.000.000	
Carbon dioxide /	14	g / ton km
Carbon dioxide /	0,014	kg / ton km
nautical miles Auckland - Rotterdam	11.355	
Km	21.029	
Total CO2 emission	70.658.986	kg
Total CO2 emission	70.659	t
Carbon dioxide per unit total distance	0,29	kg
cost of CO2 certificate	25	Euro / t
cost of CO2 certificate	0,025	Euro / kg
cost of CO2 emission per unit	0,007	Euro

Wasserstoffkernnetz

Aktueller Planungsstand (12.07.2023) des Wasserstoff-Kernetzes



Kreisscharfe Ein- und Ausspeisung

● Einspeisung

● Ausspeisung

— Umstellungsleitung

- - - Neubauleitung

- - - Beispiel für Transportalternativen

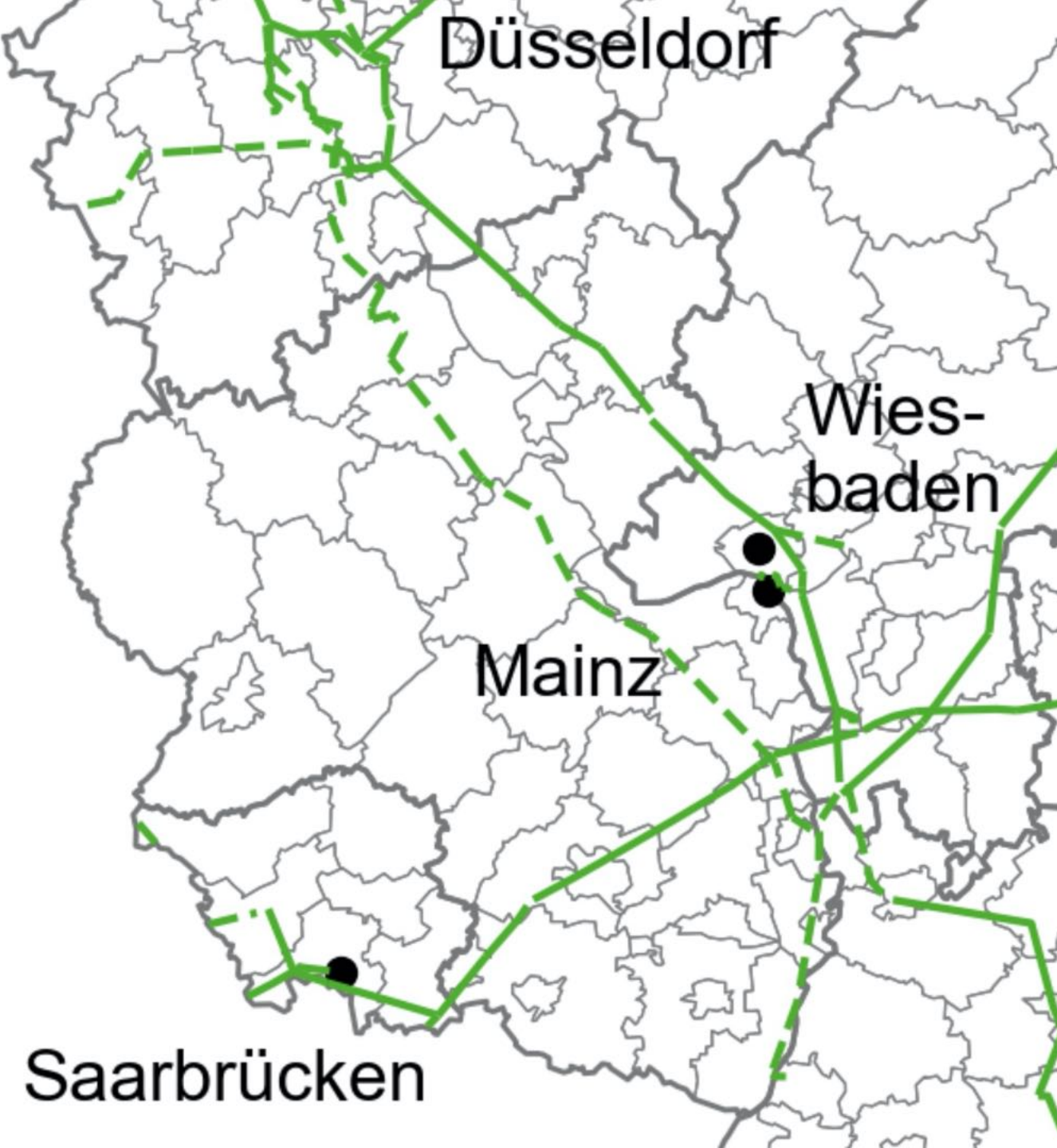
Düsseldorf



Wiesbaden

Mainz

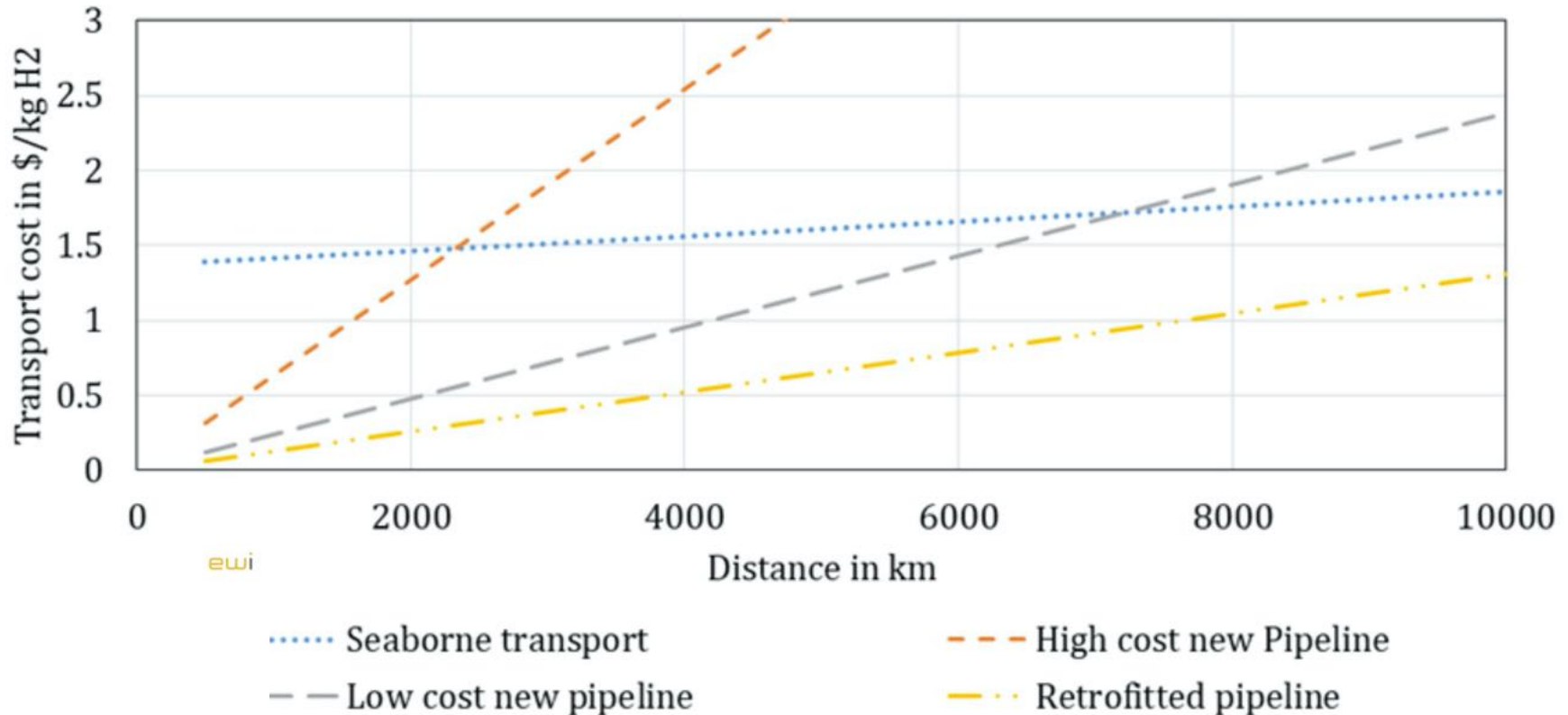
Saarbrücken



Kosten

H₂-Versorgung: Schiff vs. Pipeline

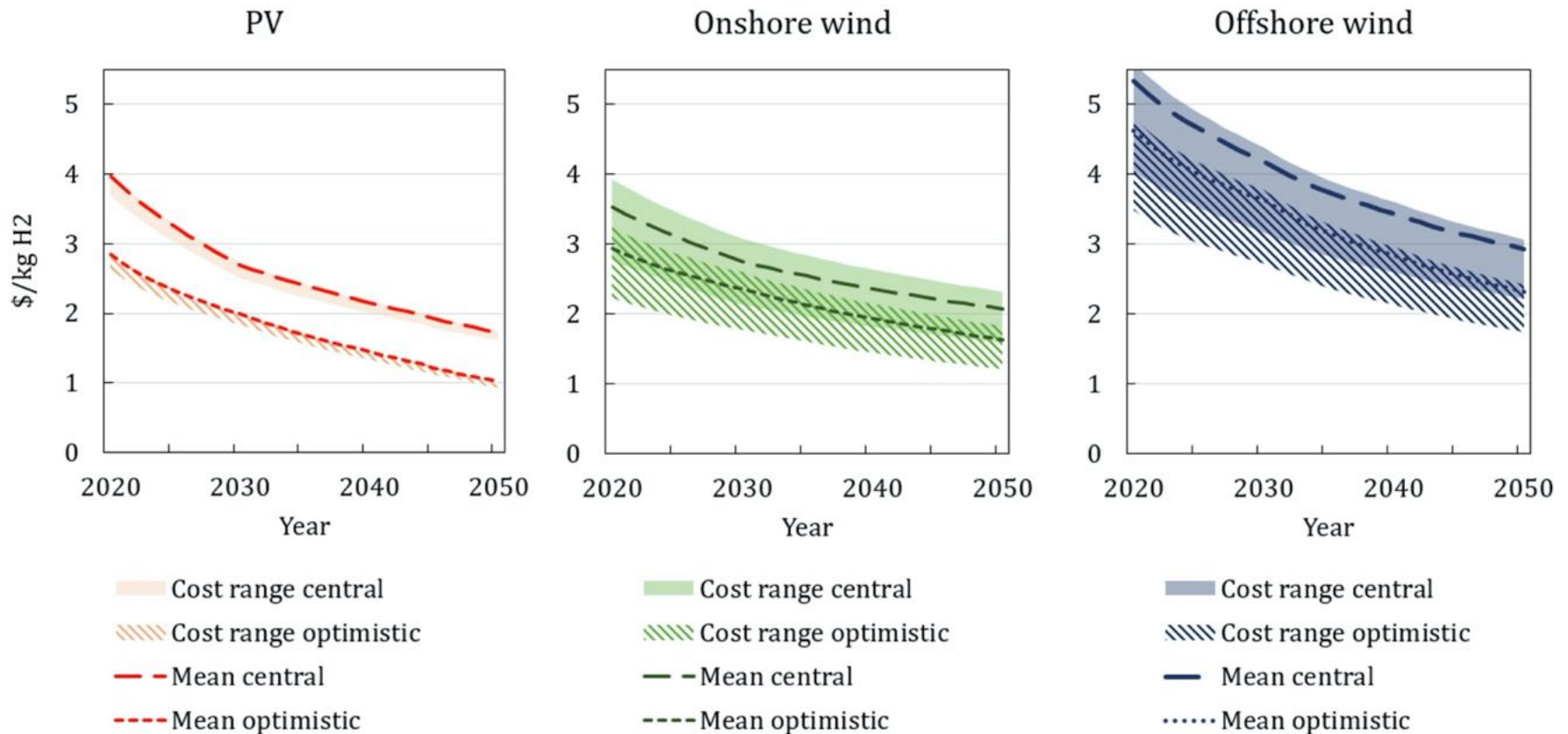
Figure 7: Comparison of options for long-distance hydrogen transportation



H₂-Transportkosten

	High cost	Low cost	Retrofit
Technical Lifetime (years)	40	40	40
CAPEX (\$/tpa/km)	3.56	1.33	0.73
OPEX & Fuel (% of CAPEX/a)	5	5	5
Utilisation (%)	75	75	75
Cost of pipeline transport (\$/1000km/kg H ₂)	0.64	0.24	0.13

H₂-Gestehungskosten, global, „günstige Länder“



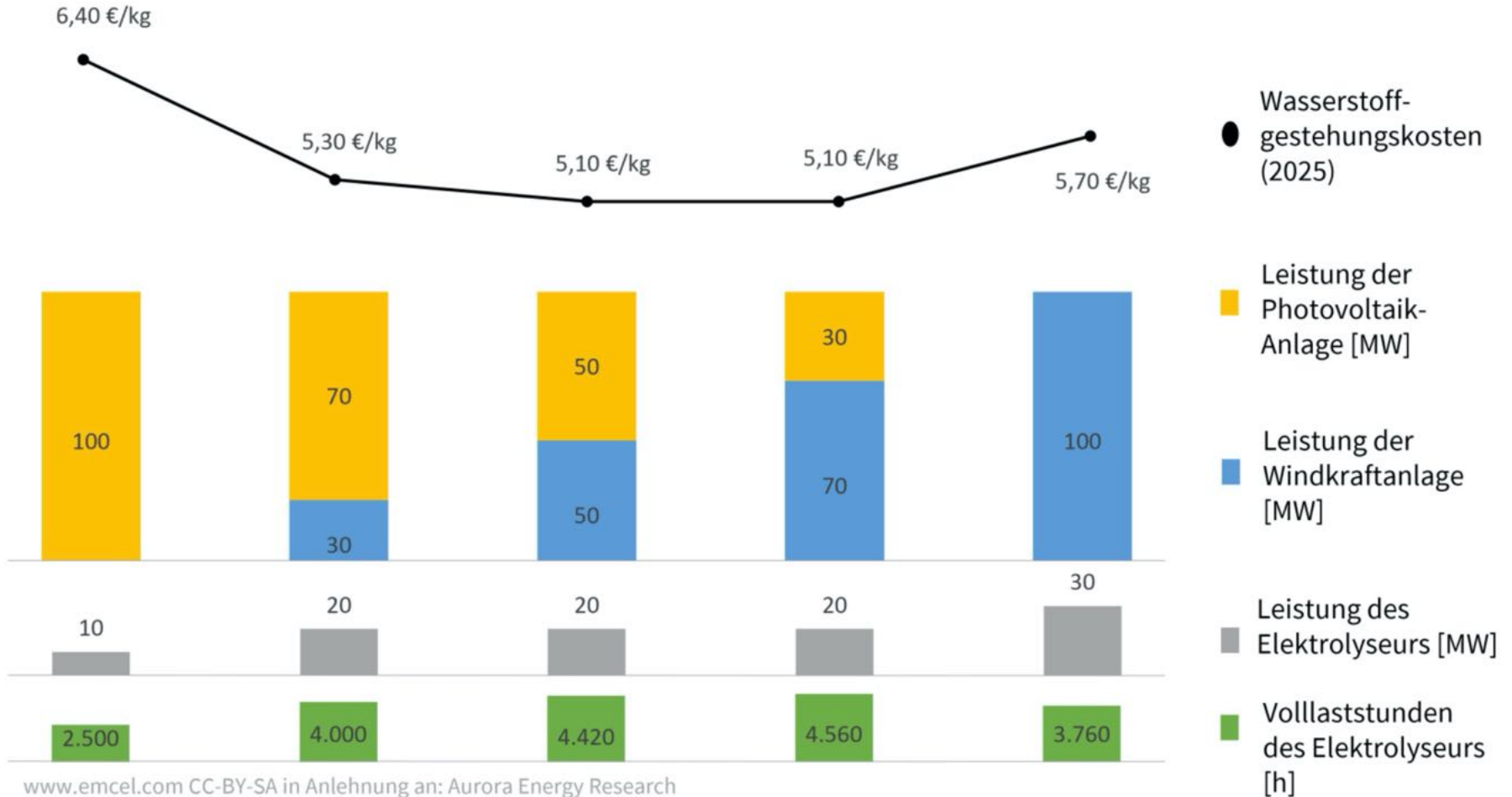
H₂-Versorgung Deutschland Kosten aus „günstigen Ländern“

Table 5: Top ten lowest-cost sources of supply of hydrogen from RES to Germany in 2050 under baseline assumptions

Country	RES resource class	RES potential (GW)	H ₂ potential (Mt/a)	LCOH (\$/kg)	H ₂ supply cost (\$/kg)	
					retrofitted pipe	new pipe
Spain	PV 2	3.9	0.2	1.7	1.9	2.6
Italy	PV 3	2.9	0.1	1.8	2.0	2.4
Norway	Onshore 1	33.8	2.7	1.8	2.0	2.7
France	Onshore 1	2.7	0.2	1.9	2.0	2.3
Greece	PV 2	16.9	0.7	1.8	2.0	2.8
Netherlands	Onshore 1	7.6	0.6	1.9	2.0	2.3
Spain	PV 3	197.6	7.4	1.8	2.0	2.7
Morocco	PV 2	355.9	14.1	1.8	2.1	3.1
Denmark	Onshore 1	1.5	0.1	2.0	2.1	2.3
Greece	PV 3	169.4	6.2	1.8	2.1	2.9

Table sorted by supply cost using retrofitted natural gas pipelines. Costs for hydrogen supplies via new pipelines are based on the high-cost pipeline assumptions from [IEA \(2019a\)](#).

H₂-Gestehungskosten Deutschland

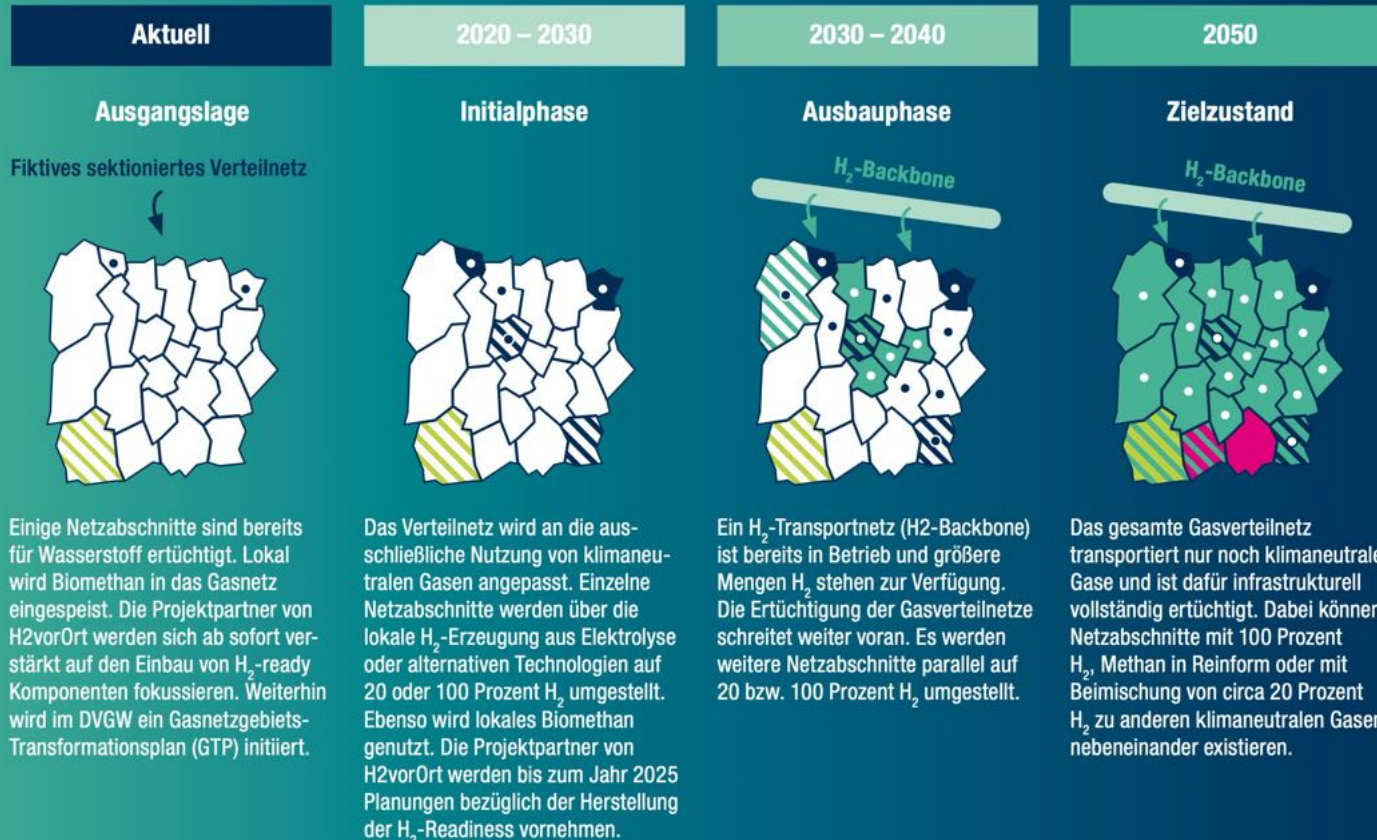


www.emcel.com CC-BY-SA in Anlehnung an: Aurora Energy Research











Chancen für die Region

Chancen für die Region Nähe zum Wasserstoffkernnetz!

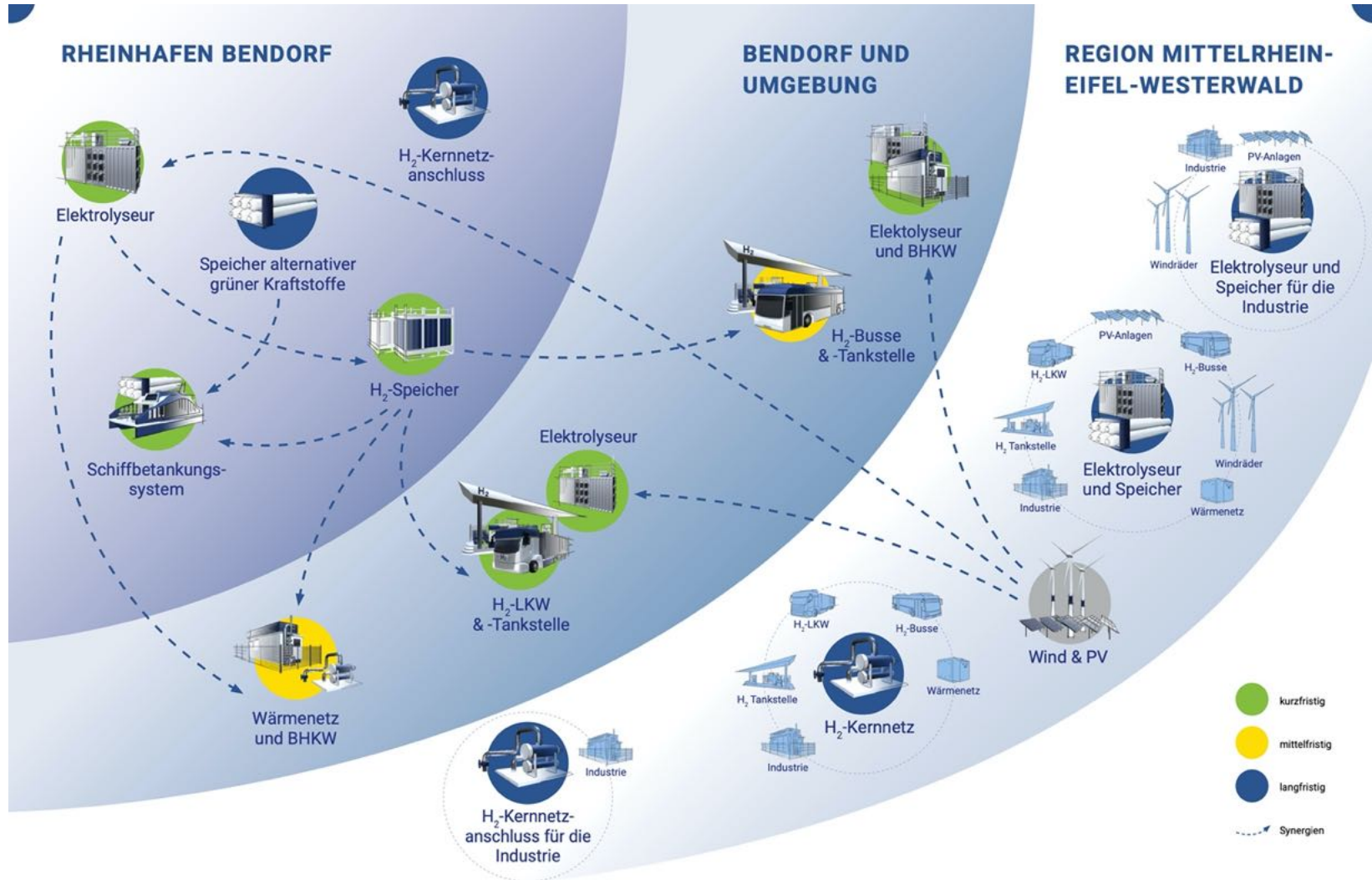
Ebene III. Gasverteilnetze individuell vor Ort umstellen



Legende

 Versorgung mit Erdgas	 100% H ₂ regional erzeugt	 100% Erneuerbares Methan
 Biomethaneinspeisung	 20% H ₂ aus Backbone	 80% Erneuerbares Methan und 20% H ₂ aus Backbone
 H ₂ -ready	 100% H ₂ aus Backbone	
 20% H ₂ regional erzeugt	 Biomethan mit 20% H ₂	

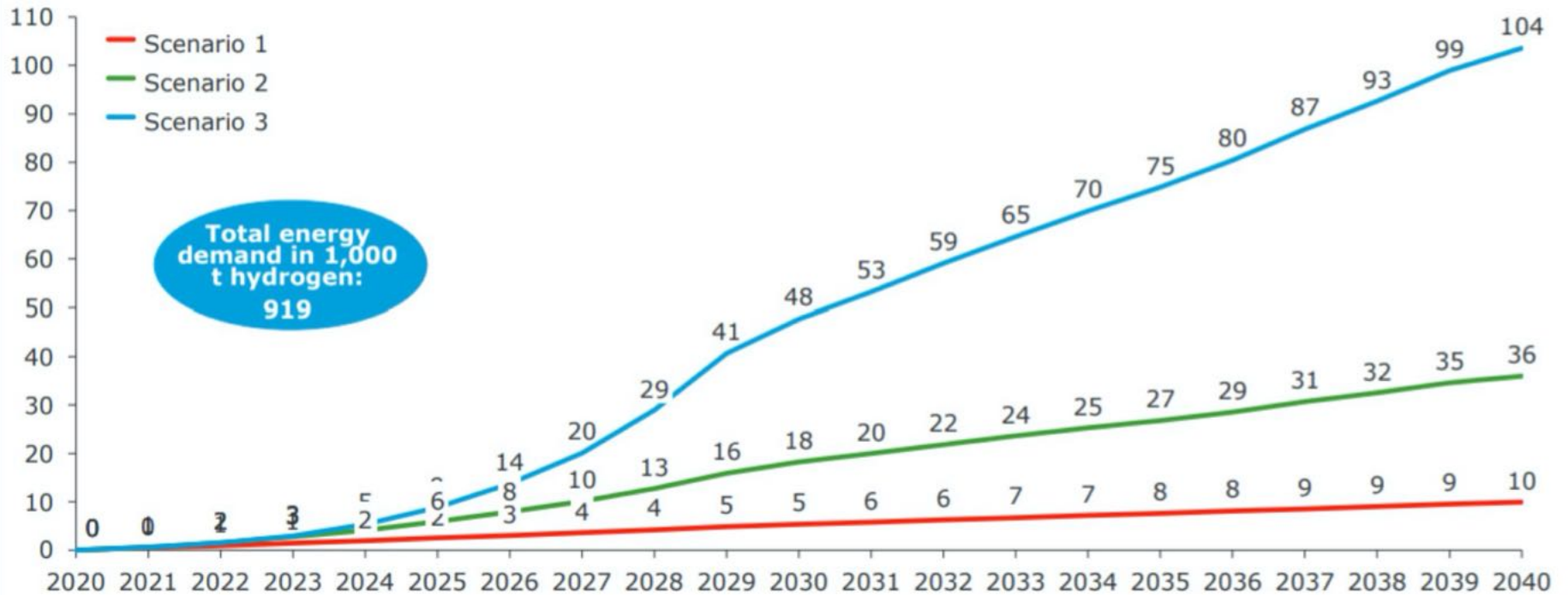
Chancen für die Region Transformation Hafen Bendorf!



NOW

Chancen für die Region Transformation Hafen Bendorf! -> das Projekt RH₂INE

Hydrogen consumption of inland waterway vessels on the Rhine –
All scenarios [in 1,000 t/year]



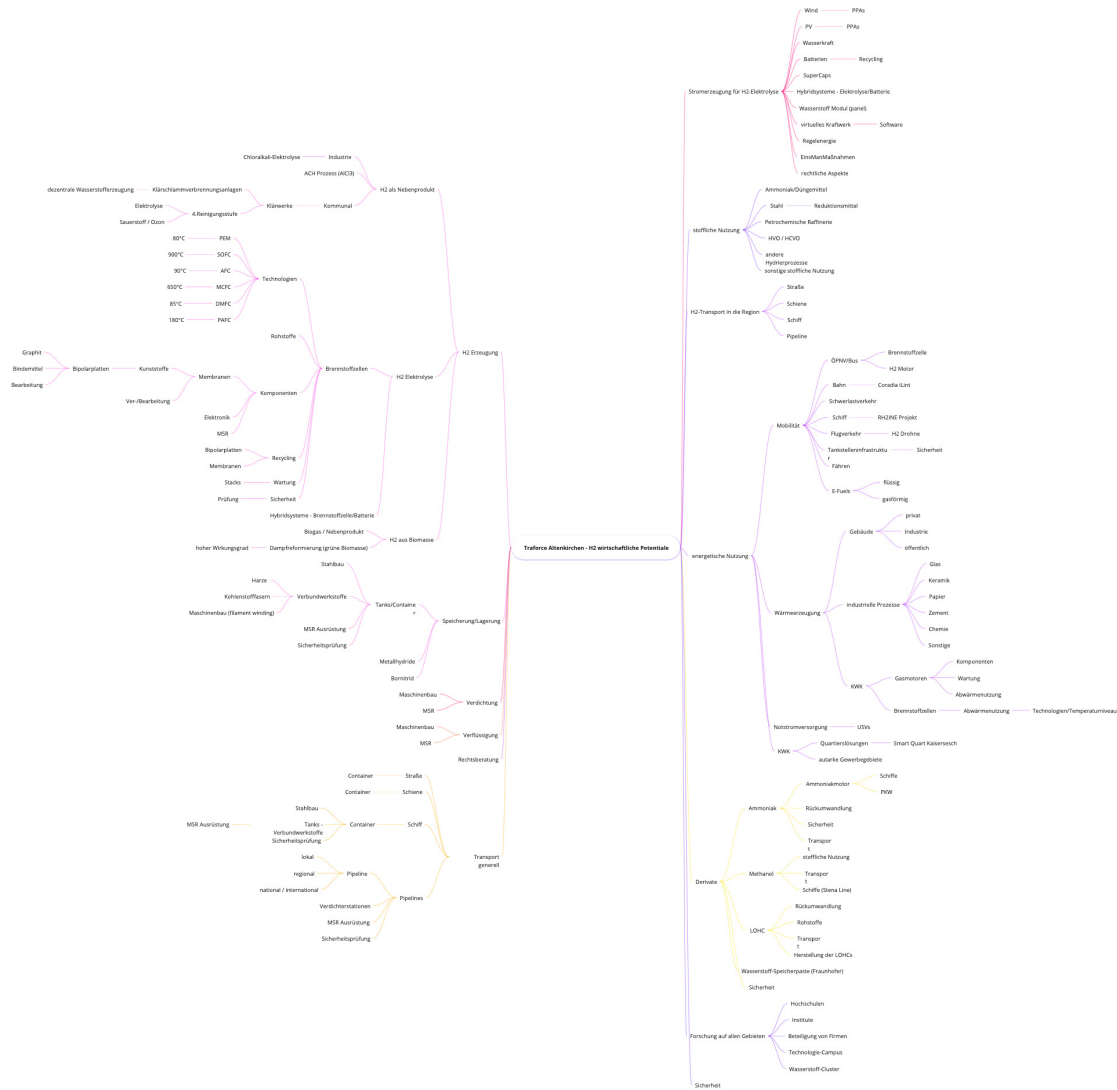
Source: DNV

Chancen für die Region

Unternehmensanalyse

Böhmer Anlagenbau GmbH	Mudersbach	Auf der Hütte 56	57555		Hersteller für Wärmetauscher
Horst Rottler Maschinenbau GmbH	Mudersbach	Hauptstr. 39	57555		Werkzeughersteller
RoSta- Maßbleche GmbH	Mudersbach	Industriestr. 19	57555		Metallverarbeitung
WRT Wäretauscher u. Rohrsystem-Technik	Mudersbach	Industriestr. 7	57555		Hersteller für Behälter, rohre und Wärmetauscher
ProAs Profilbiegetechnik GmbH & Co. KG	Mudersbach	Industriestr. 7	57555		Metallverarbeitung
Starka & Hartmann GmbH	Mudersbach	Industriestr. 7	57555		Hersteller für Kühlanhänger
Dirk Hoffmann mechanische Werkstatt	Mudersbach	Stahlwerkstraße 23	57555		Metallverarbeitung. Adresse Industriestraße 7
Walter Patz GmbH	Mudersbach	Stahlwerkstr. 12	57555		Stahlwerk
Rüdiger Noll GmbH & Co. KG	Mudersbach	Stahlwerkstr. 22	57555		Spedition
Schmidt extrastahl GmbH	Mudersbach	Stahlwerkstr. 12	57555		Stahlwerk
FECKLER GmbH	Mudersbach	Stahlwerkstr. 30	57555		Metallverarbeitung. Heißt jetzt Siegtec GmbH
Knauf Interfer Stahl Service Center GmbH	Mudersbach	Walter-Patz-Str. 1	57555		Stahlwerk/Händler
Walter Patz GmbH	Mudersbach	Bahnhofstr. 76	57555		doppelt mit Walter-Patz-Str?
Schultes Nachf. GmbH	Wissen	Walzwerkstr. 13	57537		Baumaschinenvermietung
AWZ für Verkehr u. Logistik (CJD)	Wissen	Walzwerkstr. 24	57537		Spedition. Gleich wie Bruchseifer?
Brucherseifer Transport + Logistik GmbH	Wissen	Walzwerkstr. 24	57537		Spedition
Feprotec Wissen GmbH	Wissen	Walzwerkstr. 6	57537		Metallverarbeitung
SHT Steib GmbH	Wissen	Walzwerkstr. 7	57537		Metallverarbeitung (wahrscheinlich elektrisch)
KLEUSBERG	Wissen	Frankenthal 1	57537		Bauunternehmen
Nimak GmbH	Wissen	Frankenthal 2/ 2a	57537		Maschinenbau
KLEUSBERG GmbH & Co KG	Wissen	Wisserhof 5	57537		Bauunternehmen (deutlich außerhalb von Wissen)
CAMForm Werkzeug Maschinenbau GmbH	Wissen	Köttinger Weg 118	57537		Werkzeugherstellung
Weberit Werke Dräbing GmbH	Wissen	Blähastr. 1	57537		Werkzeug und Kunststoffherstellung
Rödder Transport & Handel e.K.	Wissen	Alte Hütte 6	57537		Spedition

Chancen für die Region Unternehmensanalyse



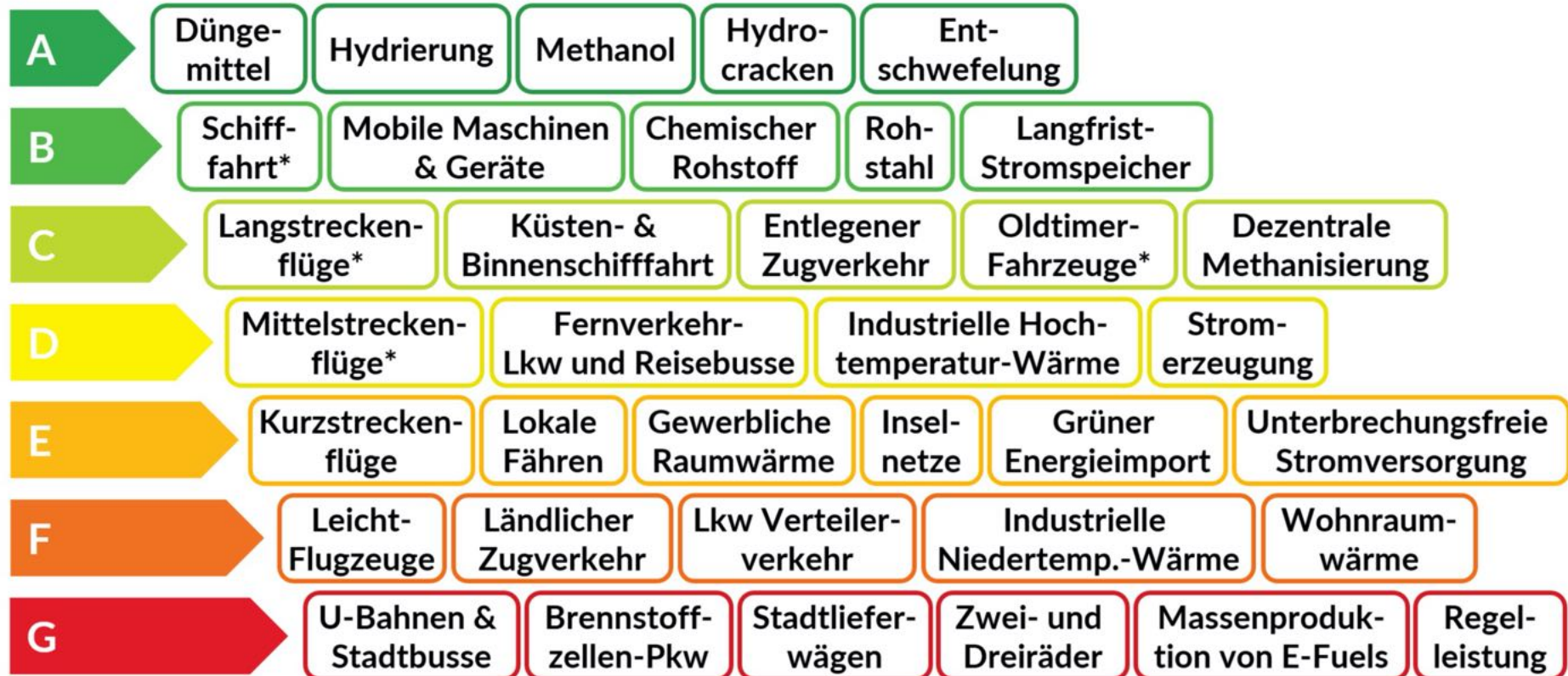
Fazit

H₂ – Wofür und für wen?

Einsatzbereiche sauberen Wasserstoffs

(Schätzungen, nach Michael Liebreich, 2021)

Alternativlos



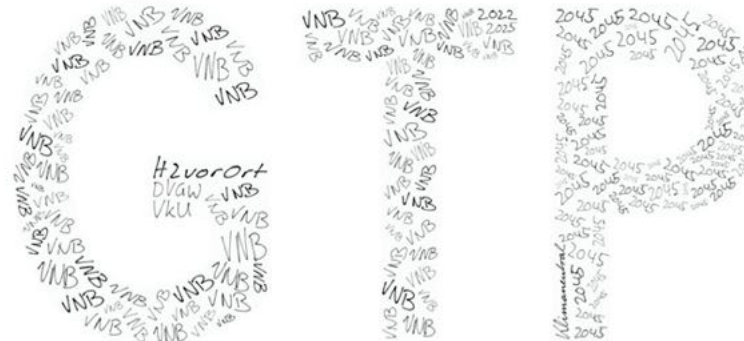
Unwirtschaftlich

* Sehr wahrscheinlich in Form von mittels Wasserstoff erzeugten E-Fuels oder Ammoniak.

Noch mehr Spannungsfelder



Gasnetzgebiets- transformationsplan



Wasserstoff über die Gasverteilnetze für alle nutzbar machen

LEITFADEN 2024

Version 1.0, 06.02.2024

Noch mehr Spannungsfelder



Wasserstoff nicht verheizen!



Online Seminar am 29.2. und 5.3.2024

Wichtigste Quellen

<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>

<https://www.ewi.uni-koeln.de/de/tools/schaetzung-der-langfristigen-globalen-versorgungskosten-fuer-kohlenstoffarmen-wasserstoff/>

<https://www.tsb-energie.de/projekte/projektdetail/mahynzexperts-mainz/Aktion/>

https://rh2ine.eu/fileadmin/user_upload/content/download_documents/RH2INE_Kickstart_Study.pdf

<https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoffspeicherung>

https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale_Empfehlungen/2024_ESYS_Kurz_erkl%C4r_t_Was_serstoff.pdf

<https://www.hy.land/wp-content/uploads/2023/10/hystarter-ii-stadt-bendorf-abschlussbericht.pdf>

<https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/>

<https://umweltinstitut.org/wp-content/uploads/2024/03/2024-03-05-Wasserstoff-nicht-verheizen.pdf>

https://www.h2vorort.de/fileadmin/Redaktion/PDF/gtp-2024-Leitfaden_1.0.pdf

**Die TSB:
Mit Energie und Effizienz
in mehr als 2.300 Projekten seit 1989!**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Prof. Dr. Oliver Türk
tuerk@tsb-energie.de