

Der Weg zur nationalen H₂- Roadmap: der Wasserstoff-Kompass

Andrea Lübcke und
Kurt Wagemann



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

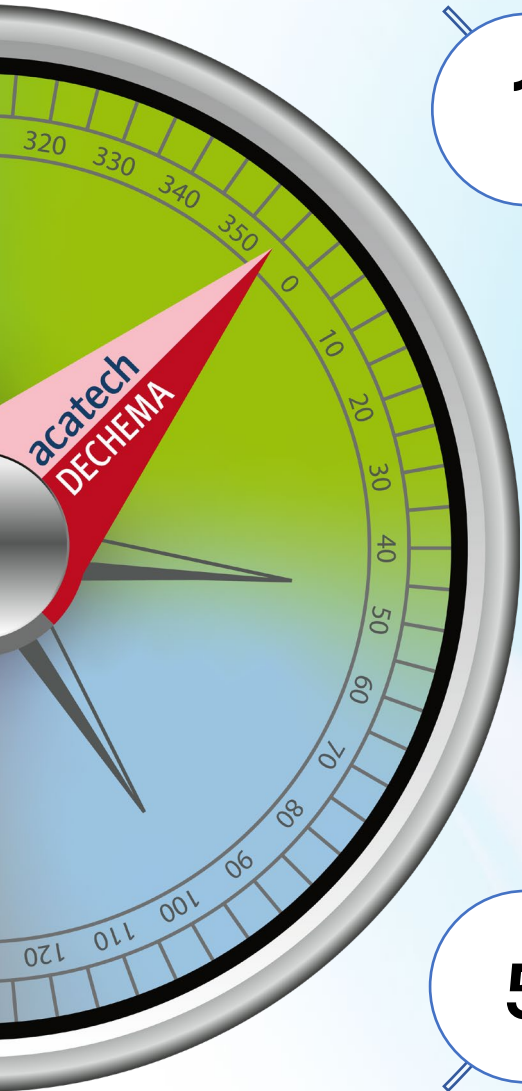
Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Agenda



1. Der Kompass und wie er funktioniert

2. Wasserstoff: farblos und doch bunt

3. Sektorale Bedarfe

4. Erzeugung von Wasserstoff

5. Importe und Rahmenbedingungen

Agenda



1. Der Kompass und wie er funktioniert

2. Wasserstoff: farblos und doch bunt

3. Sektorale Bedarfe

4. Erzeugung von Wasserstoff

5. Importe und Rahmenbedingungen

Der Wasserstoff-Kompass



Meta-Analyse

Systematische Bestandsaufnahme existierender Roadmaps und Szenarien



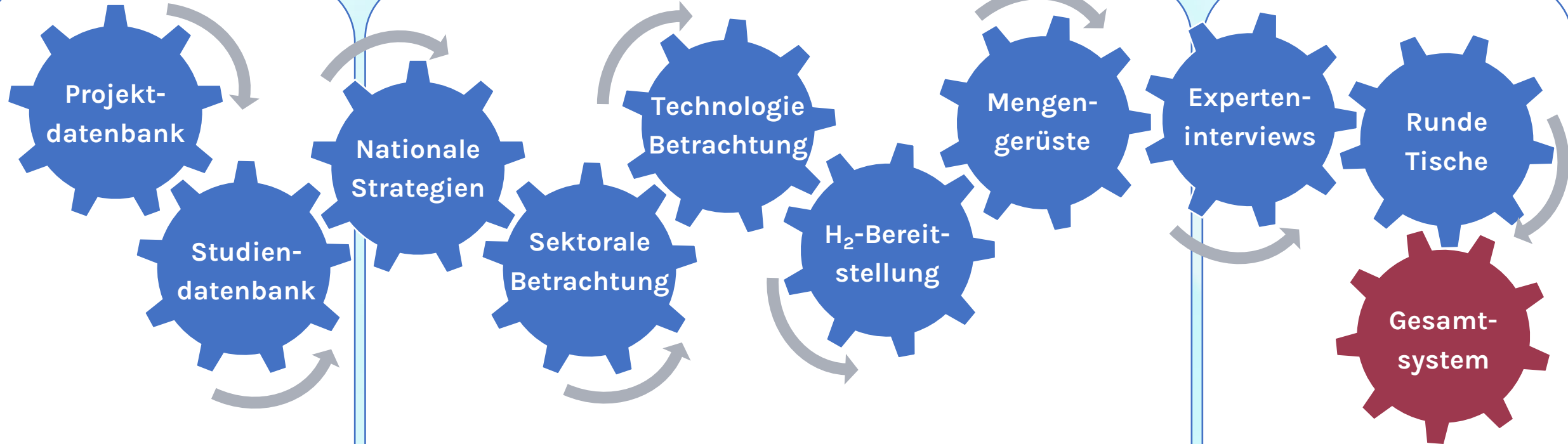
Stakeholder-Dialog

Umfrage, Workshops und eine Stakeholder-Konferenz

Erstellung des H₂-Kompasses

Grundlage für eine Roadmap zur Entwicklung der deutschen Wasserstoffwirtschaft

Metaanalyse



- ~400 europäische Projekte und Anlagen aufgeführt
- ~200 Studien gelistet
- **Fortlaufende** Erfassung von Projekten und Studien

- Auflistung der Erwartungen und politischen Zielsetzungen in **Deutschland, der EU sowie Exportländern**
- Betrachtung der Entwicklungen **in einzelnen Sektoren**
- **Technologieoffener** Ansatz
- Aktuelle und zukünftige **H₂-Bedarfe**

- Verifizierung und Diskussion
- **Einbettung in eine Gesamtsystembetrachtung**

Stakeholder-Dialog

Entwicklung eines gemeinsamen Verständnisses
einer deutschen Wasserstoffwirtschaft...

...zusammen mit
Akteur:innen aus
Wirtschaft, Wissenschaft
und Zivilgesellschaft

Dieses gemeinsame
Zielbild trägt den
vielfältigen Möglichkeiten
und Sichtweisen in der
sektor-übergreifenden
Wasserstoffnutzung
Rechnung



Der Wasserstoff-Kompass



Handlungsoptionen

Die Handlungsoptionen zeigen notwendige Technologien, Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsbedarf und behandeln auch rechtliche, ökonomische und soziale Fragen.



Bewertung

Die unterschiedlichen Optionen und Szenarien werden unter Berücksichtigung relevanter Kriterien bewertet.



Wenn-Dann-Logik

Neben den Voraussetzungen werden die Vor- und Nachteile im Sinne einer Wenn-Dann-Logik dargestellt.

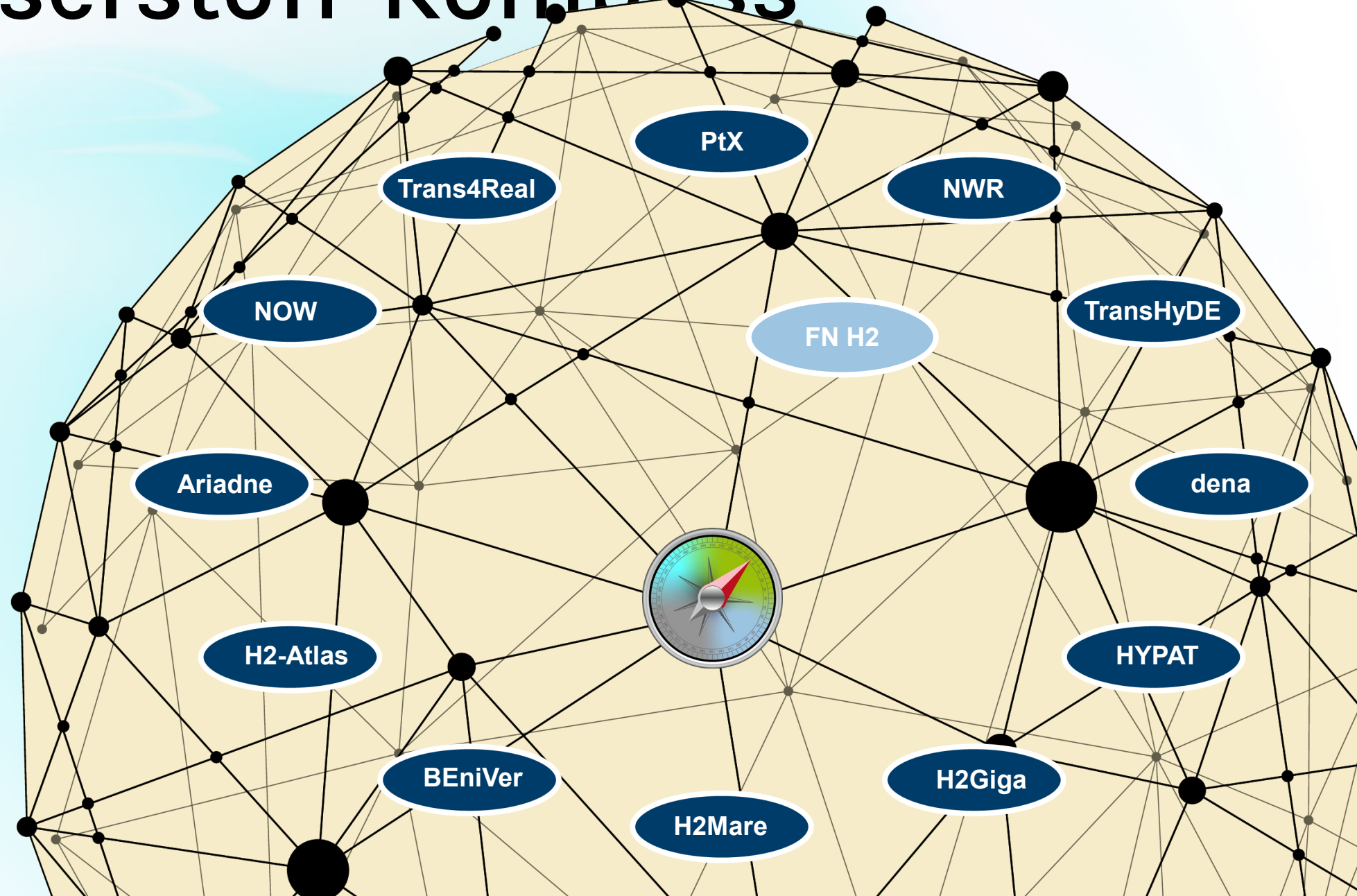


Umsetzungsschritte

Für die Umsetzung einzelner Optionen werden die dafür notwendigen Schritte und die Rollenverteilung für alle beteiligten Akteure aufgezeigt.

Der Wasserstoff-Kompass

Das Wasserstoff-Kompass Projekt ist ein Knotenpunktprojekt, das die Ergebnisse anderer relevanter Projekte bündelt.



Wasserstoff-Leitprojekte

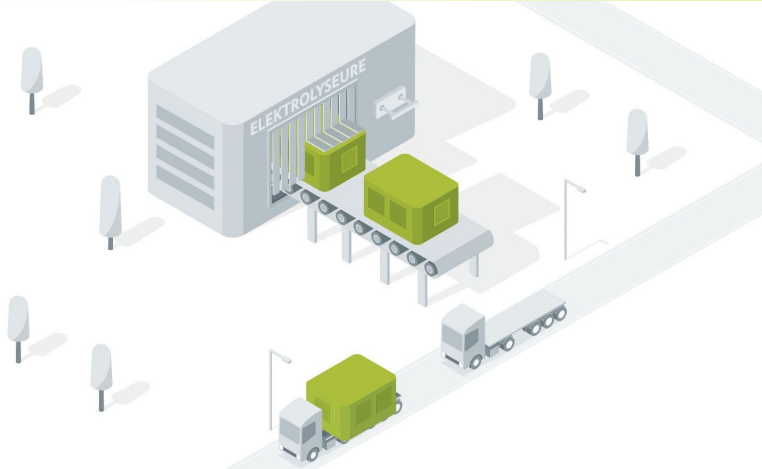
Auf dem Weg in die Wasserstoff-Wirtschaft

 **Wasserstoff**
Leitprojekte
Grün. Groß. Global.

H2Giga: Produktionshochlauf

*(Serienproduktion von Elektrolyseuren hin zu
GW Skalierung / AE, PEM, HT-SOE)*

Budget: ~ 480 Mio. €



H2Mare: Offshore *(Integration von Elektrolyseuren in offshore WKA / offshore PtX Prozesse)*

Budget: ~ 150 Mio. €

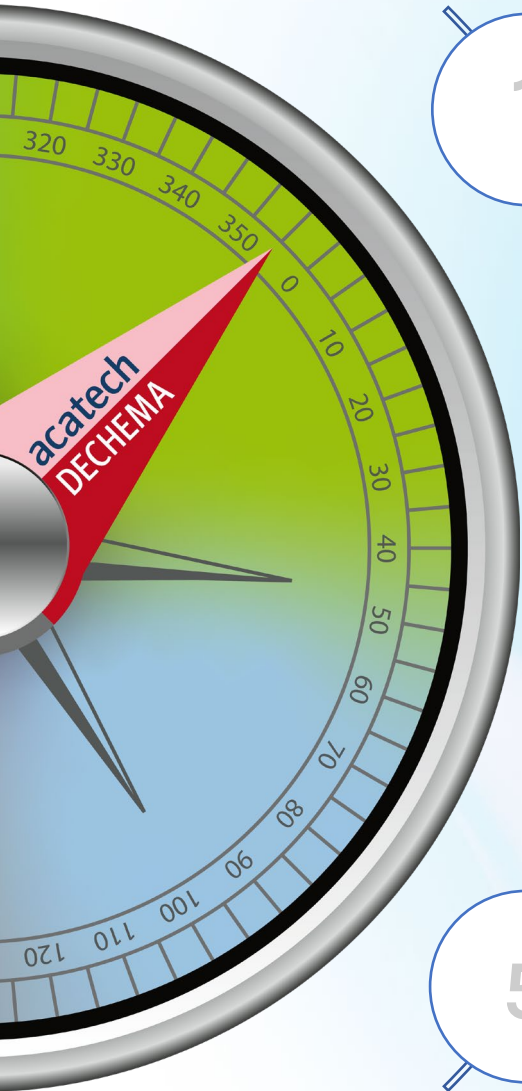


- **TransHyDE: Transportlösungen für grünen Wasserstoff** *(unter Druck, verflüssigt oder in Chemikalien gebunden / per Schiff, Pipeline oder Trailer)*

Budget: ~ 140 Mio. €



Agenda



1.

Der Kompass und wie er funktioniert

2.

Wasserstoff: farblos und doch bunt

3.

Sektorale Bedarfe

4.

Erzeugung von Wasserstoff

5.

Importe und Rahmenbedingungen

Wasserstoff - Farbenlehre



Grüner Wasserstoff

- Erzeugt durch Elektrolyse von Wasser mit Strom aus erneuerbaren Energien
- Klimaneutrale Herstellung



Blauer Wasserstoff

- Grauer Wasserstoff, wobei das CO_2 aufgefangen, abgespalten und gespeichert wird
- CO_2 -arm



Grauer Wasserstoff

- Erzeugt aus fossilem Erdgas
- Für jede Tonne Wasserstoff, entstehen 10 Tonnen CO_2 .
- CO_2 entweicht in die Atmosphäre



Türkiser Wasserstoff

- Erzeugt durch Methan-Pyrolyse
- Statt CO_2 entsteht festes C, das deponiert werden kann

Source: <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html>

Wasserstoff - Farbenlehre

Wasser-Elektrolyse



Vergasung und
Carbon Capture and Sequestration (CCS)



Dampfreformierung und Wasser-
Gas Shift (von Erdgas)

Vergasung und Wasser-Gas Shift
(z.B. von Kohle)

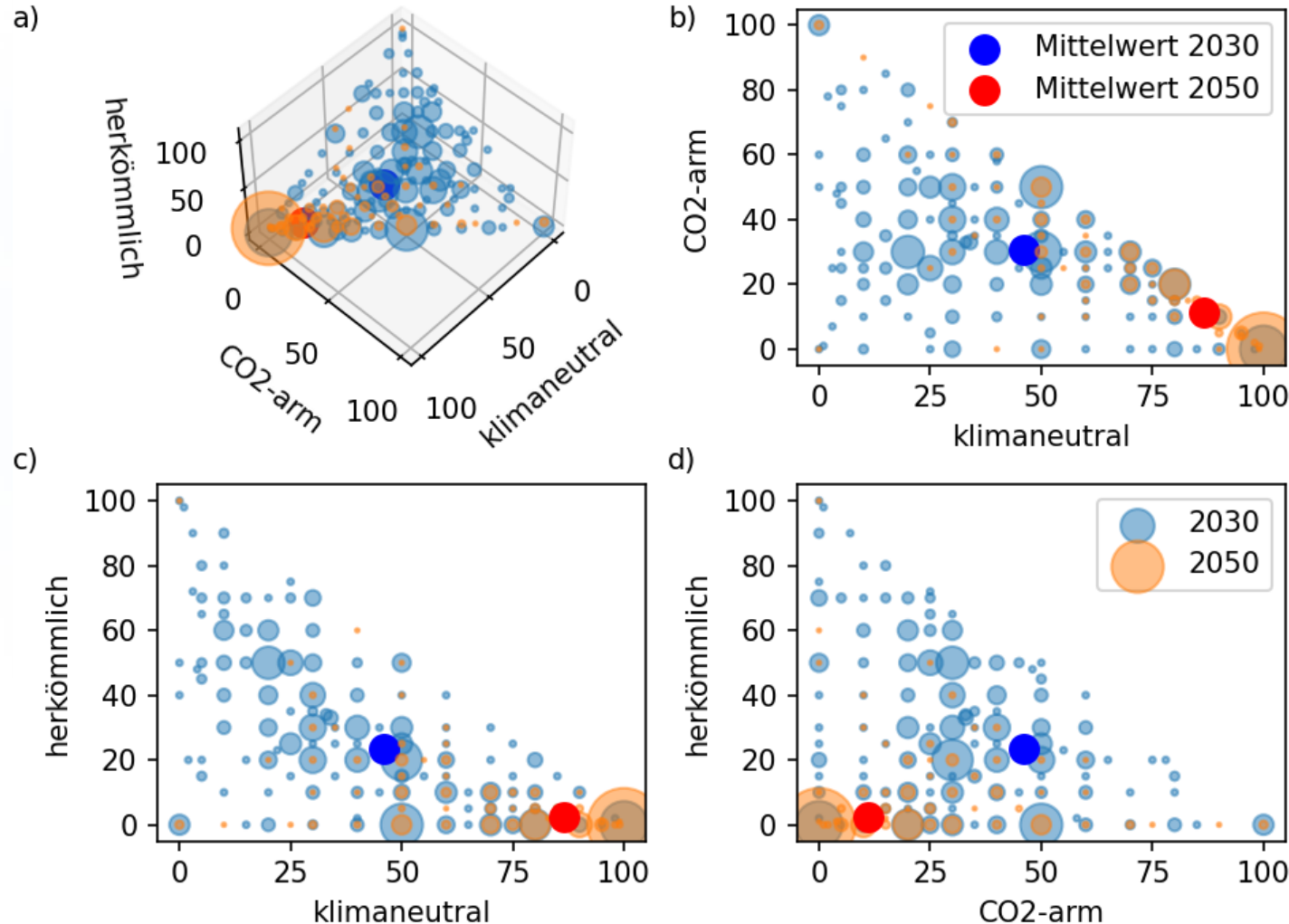
Methanpyrolyse und
Kohlenstoff-Abspaltung



Andere Optionen: Plasmaprozesse, Hochtemperatur- / chemische Prozesse,
Mikrobiologische Prozesse

CO₂-Intensität

Aus der Umfrage



- 2030: Wasserstoffherzeugung durch einen breiten Mix an Technologien mit unterschiedlicher CO₂ Intensität
- 2050: deutliche Verschiebung hin zu deutlich geringerer CO₂ Intensität
- Es gibt TN, die offenbar nicht davon ausgehen, dass 2045 die Klimaneutralität erreicht wird

Agenda



1.

Der Kompass und wie er funktioniert

2.

Wasserstoff: farblos und doch bunt

3.

Sektorale Bedarfe

4.

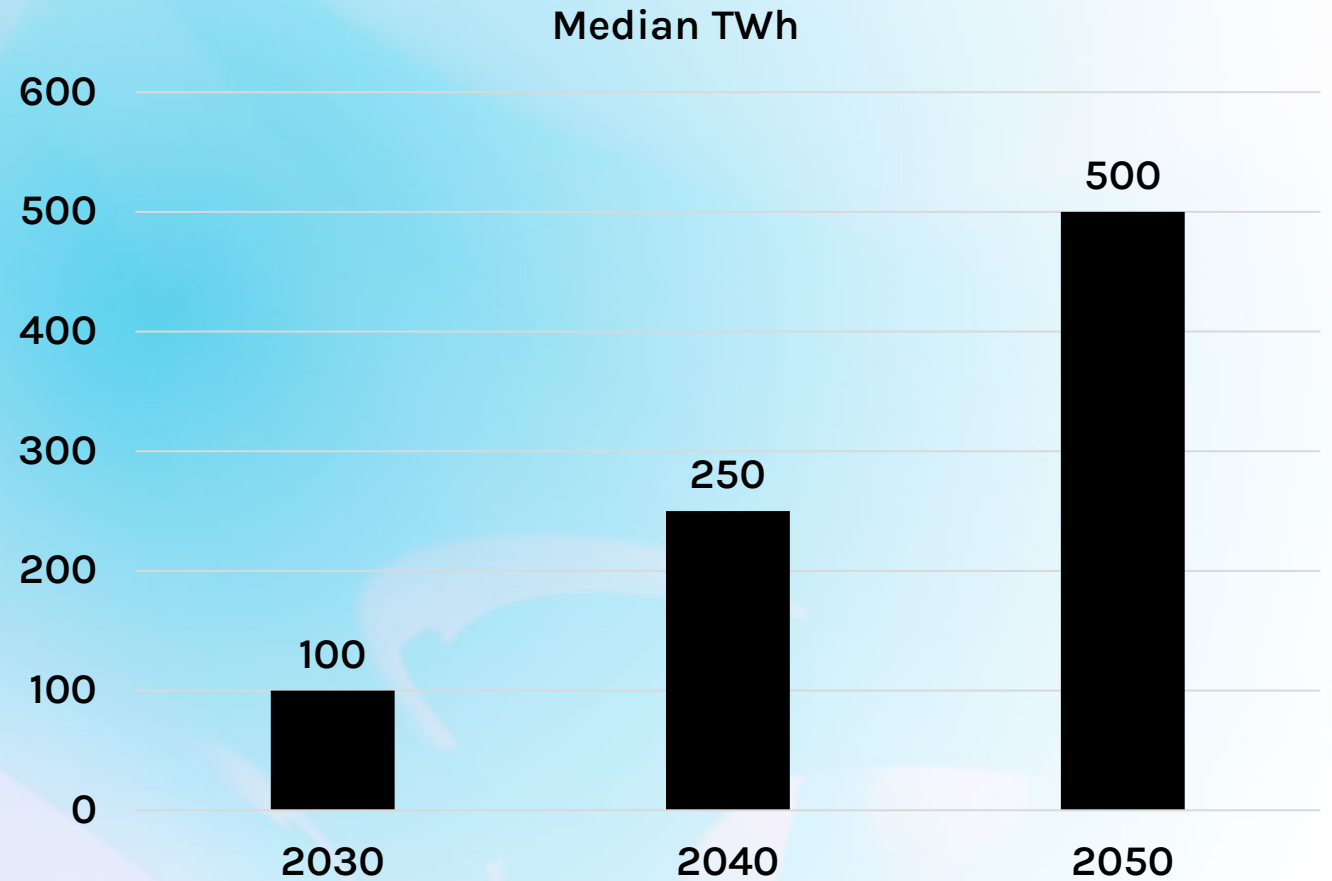
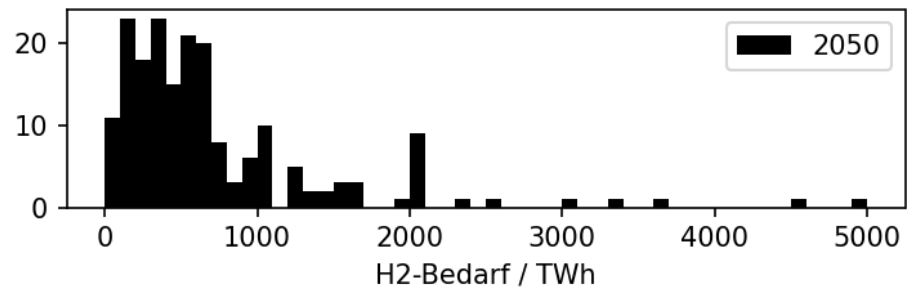
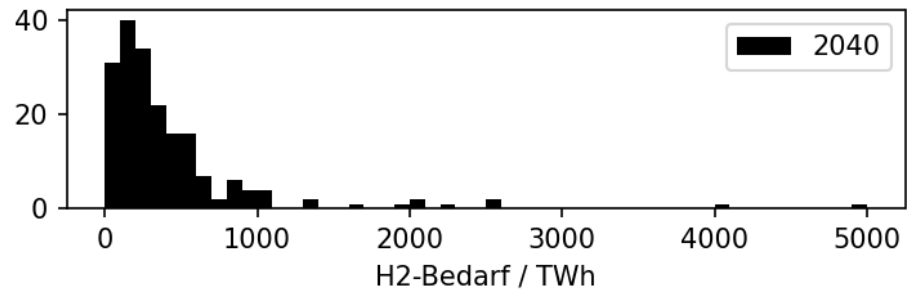
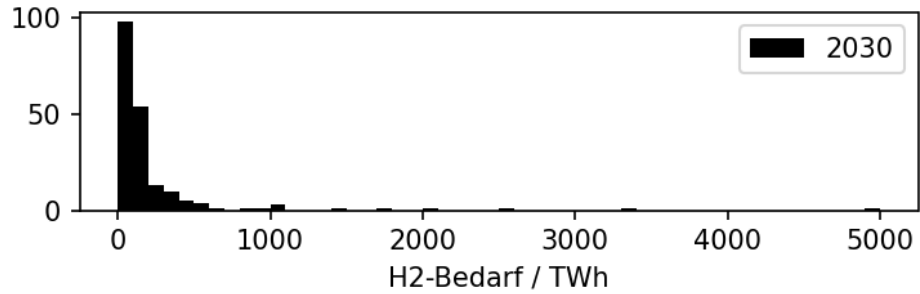
Erzeugung von Wasserstoff

5.

Importe und Rahmenbedingungen

Wasserstoffbedarfe

Aus der Umfrage



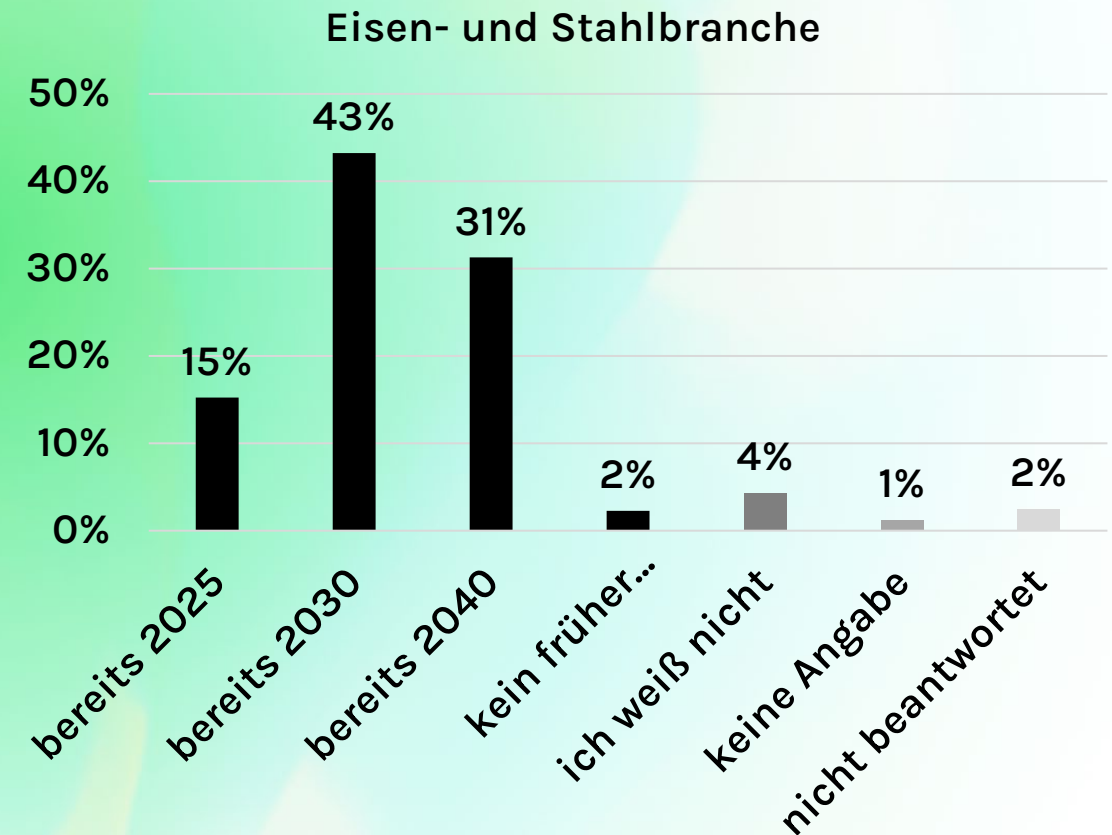
Wasserstoffeinsatz – Stahl

Aus der Umfrage

In welchen Bereichen rechnen Sie mit einem frühen, großflächigem Einsatz von CO₂-armen Wasserstoff?



GMH official; [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

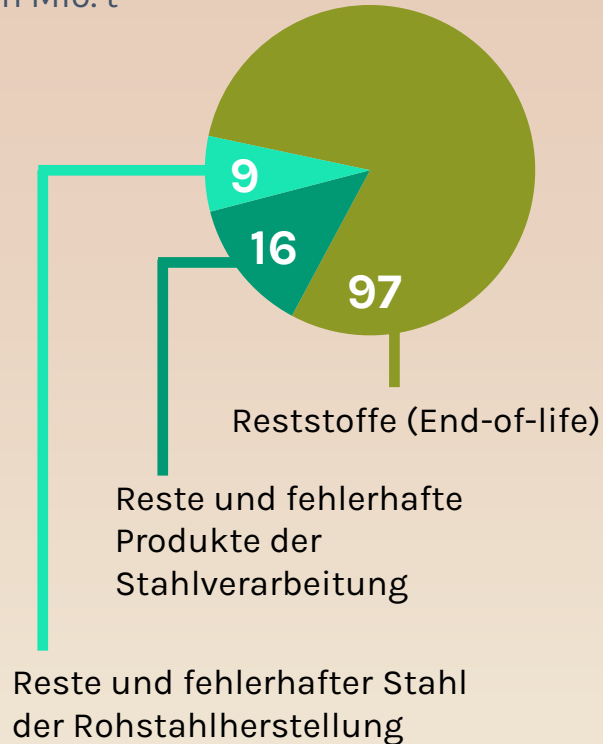


Stahlindustrie

Factsheet

Recycling-Stahl in EU28 (2030)

in Mio. t



Stahlproduktion in Deutschland



Stahlproduktion 2019: 39,6 Mio. t

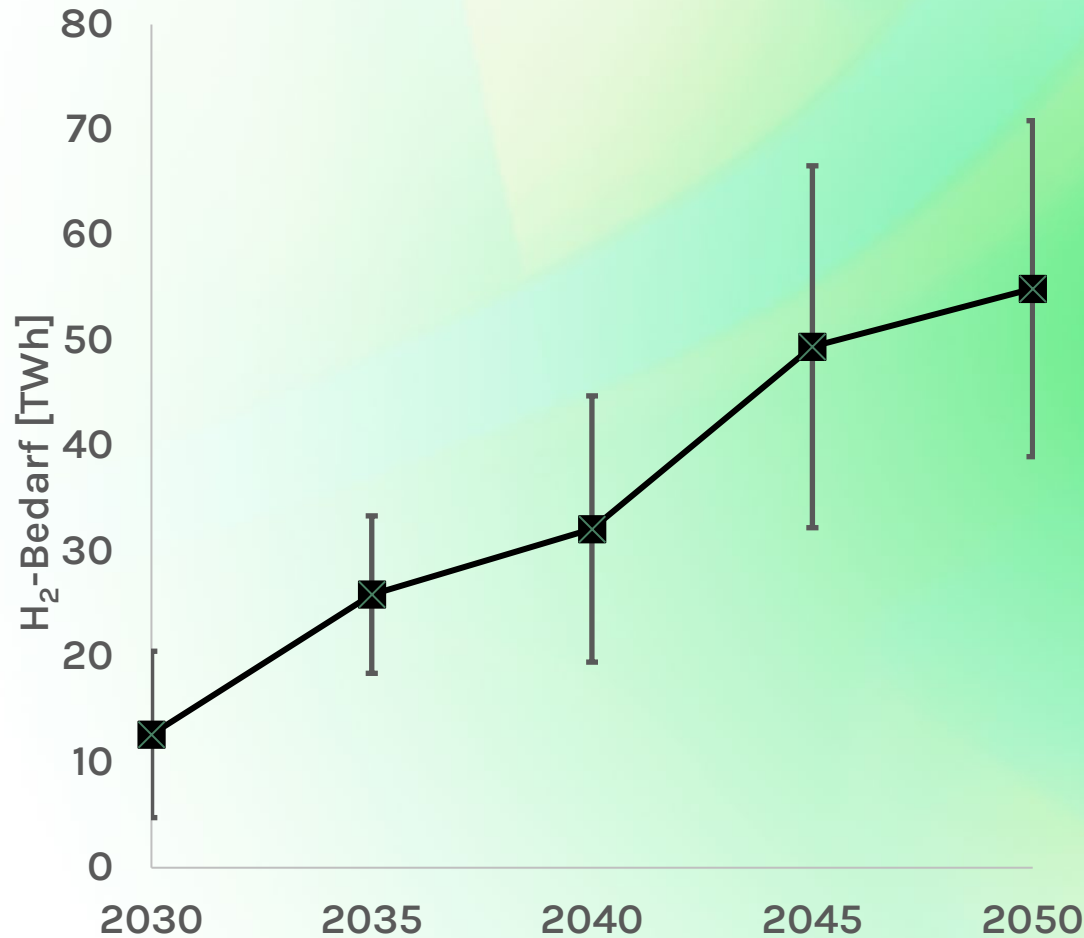


Primärstahl:
27,7 Mio. t

Sekundärstahl:
11,9 Mio. t

Wasserstoff-Bedarfe Stahl

Aus der Meta-Analyse



Voraussichtlich steigende H₂-Bedarfe:

- Primärstahlproduktion: Umstellung von der Hochofenroute auf Direktreduktion
- Energetische Nutzung von H₂
- H₂-Nutzung in Folgeprozessen (z. B. als Schutzgas)

	Mittelwert [TWh]	Standardabweichung [TWh]	Anzahl Studien
2030	13	7,9	18
2035	26	7,5	6
2040	32	12,6	12
2045	49	17,2	8
2050	55	15,9	18

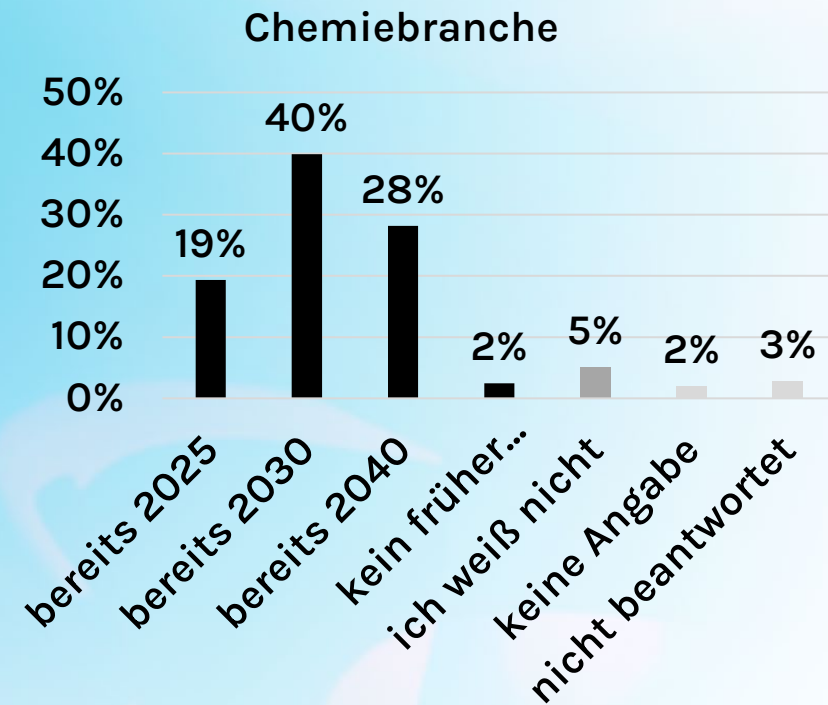
Wasserstoffeinsatz – Chemie

Aus der Umfrage

In welchen Bereichen rechnen Sie mit einem frühen, großflächigem Einsatz von CO₂-armen Wasserstoff?



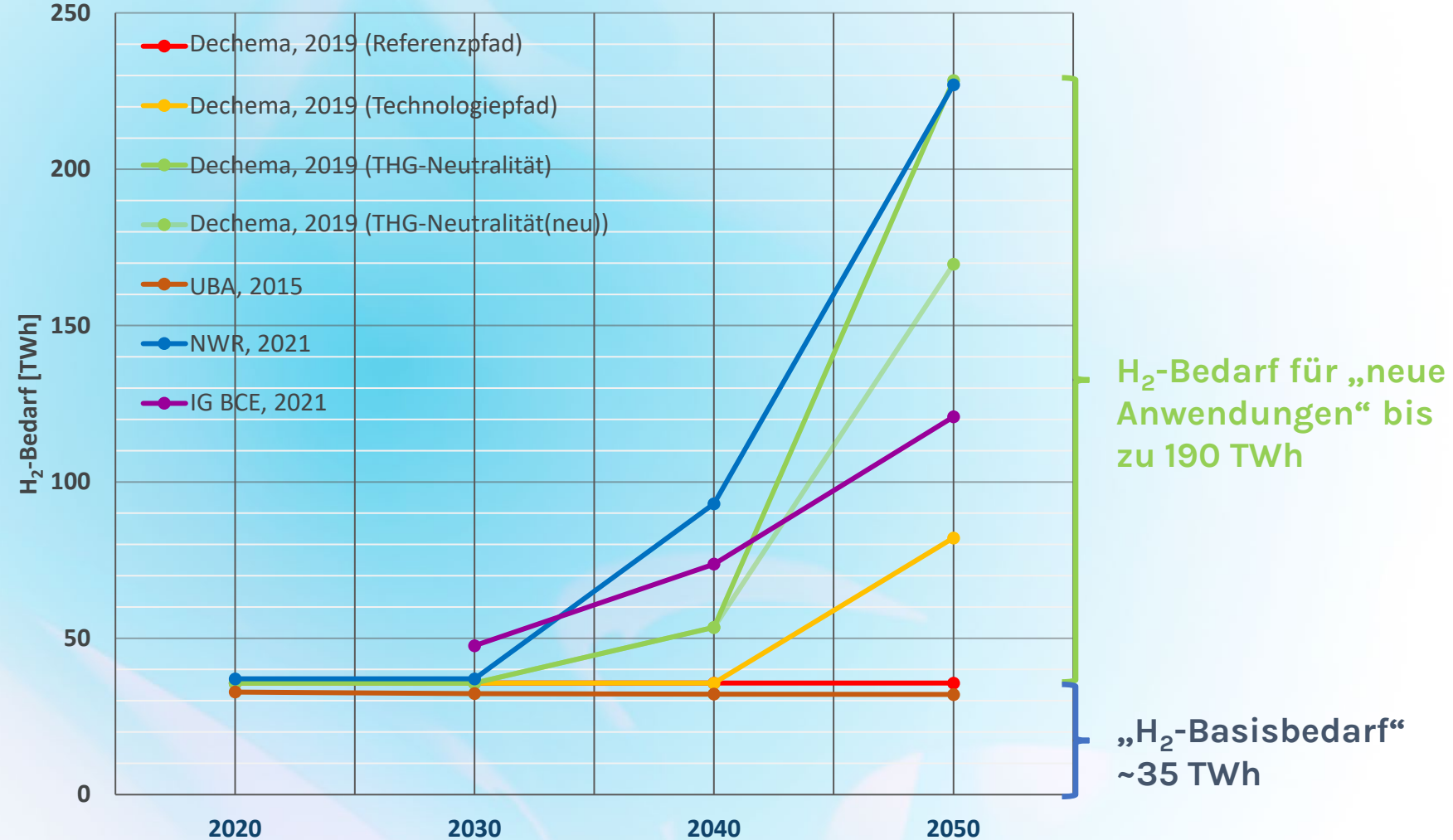
Foto: Gerd W. Zinke; [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)



Chemische Industrie

H₂-Bedarf in Deutschland

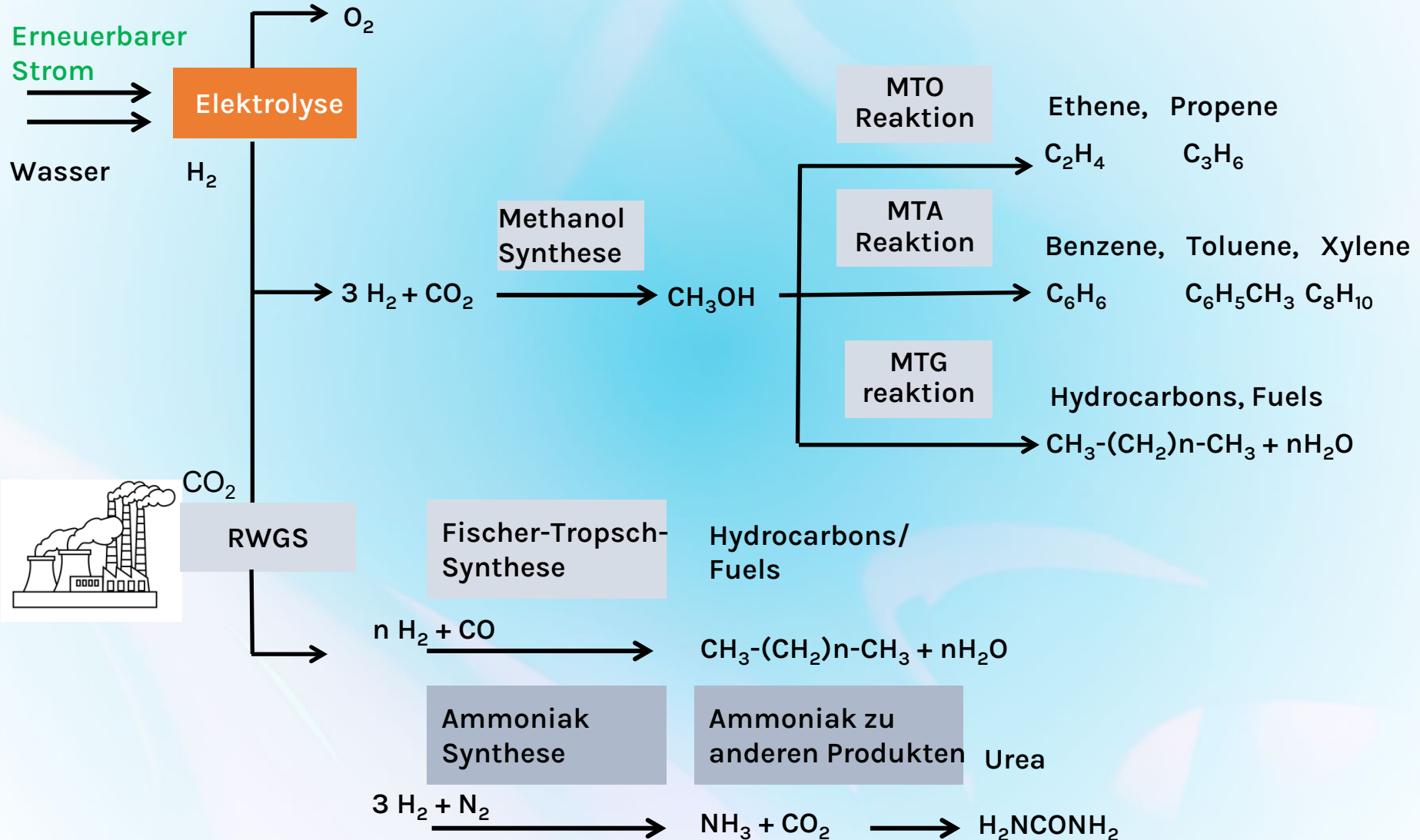
- Deckung des H₂-Basisbedarfs*
- Weitere stoffliche H₂-Nutzung
- Wärmebereitstellung**



* Bei UBA 2015 wird nur der H₂-Bedarf für Ammoniak und Methanol abgeschätzt.

** Nur bei IG BCE wird ein energetische H₂-Bedarf eingerechnet.

H₂/CO₂-basierte Routen - P2X

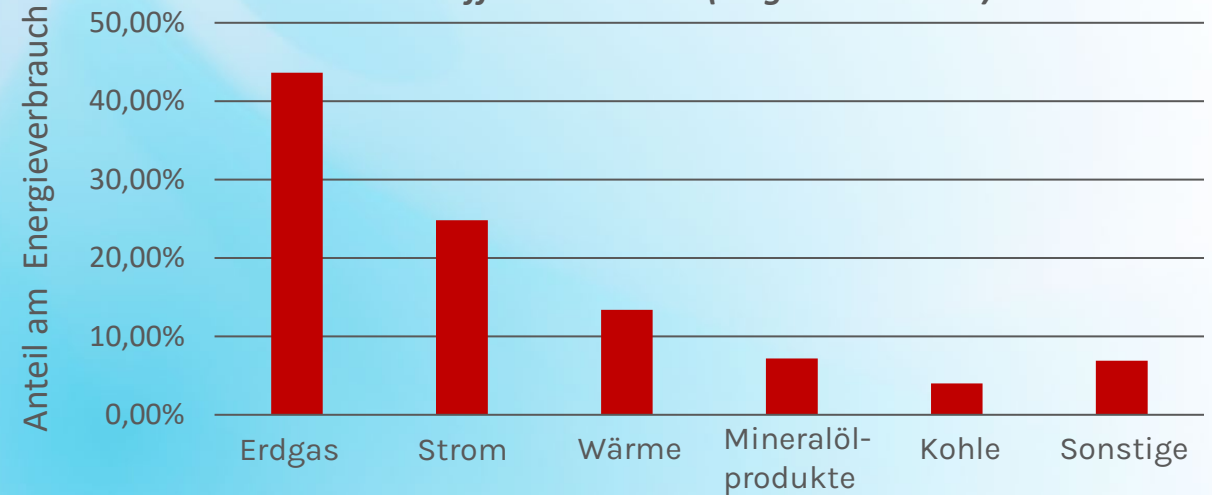


Chemische Industrie

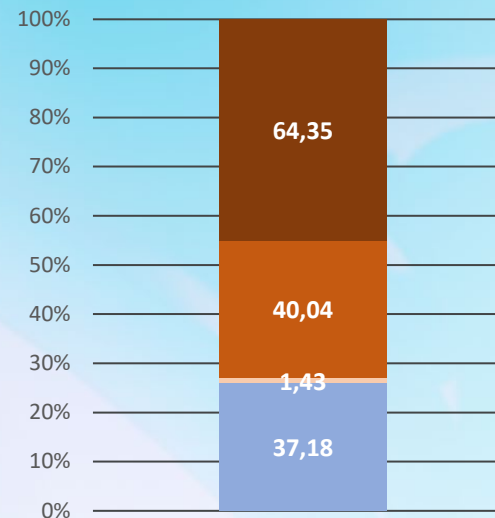
Wärmebereitstellung

- Energieträger
 - v.a. Erdgas-basiert
 - Bereits hoher Anteil Strom-basierter Wärmebereitstellung
- Temperatur-Niveaus
 - v.a. Mittel- und Hoch-Temperatur-Anwendungen
 - Nieder-Temperatur-Anwendungen kaum relevant (anders als bei der Gebäudewärme)

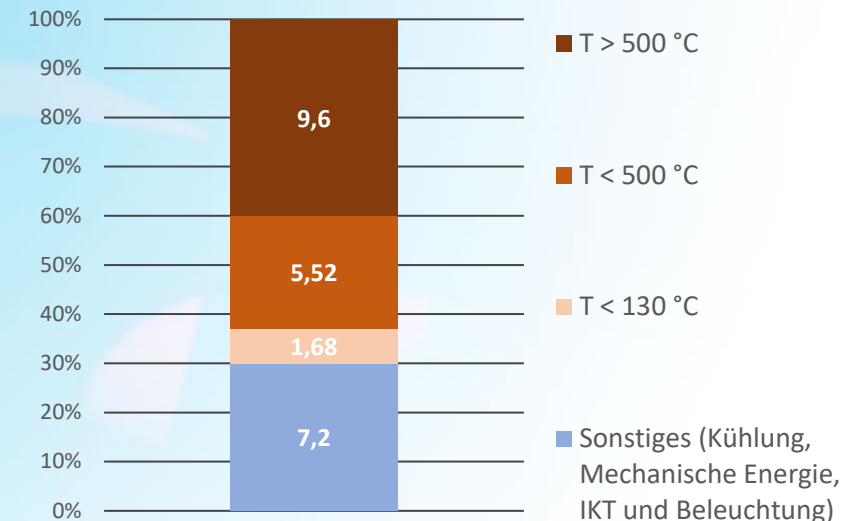
Energetischer Verbrauch der chemischen Industrie ohne stofflichen Einsatz (Insgesamt 740 PJ)



Grundstoffchemie (143 TWh)

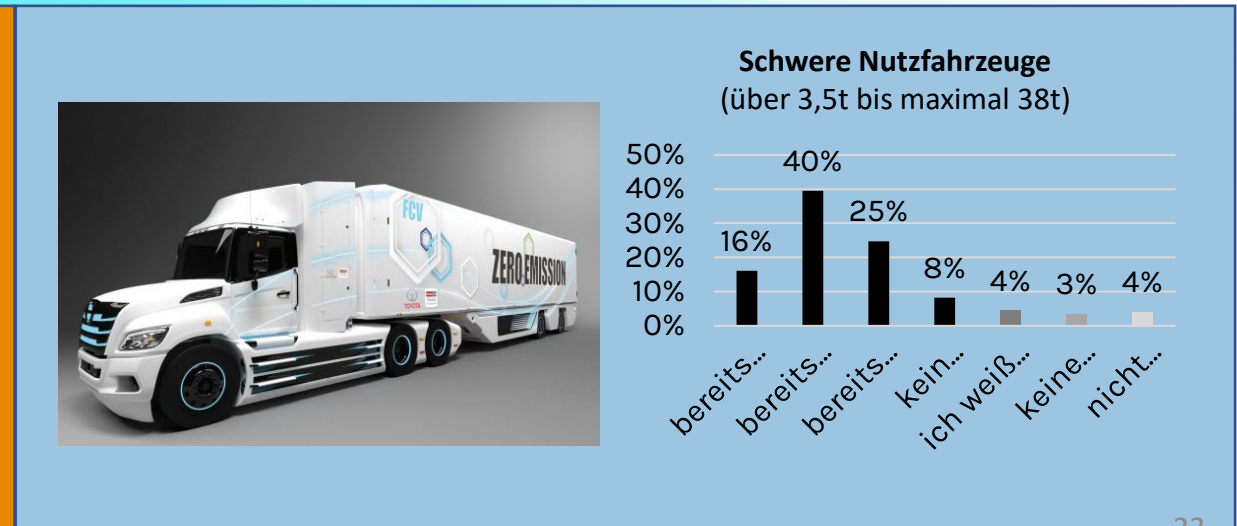
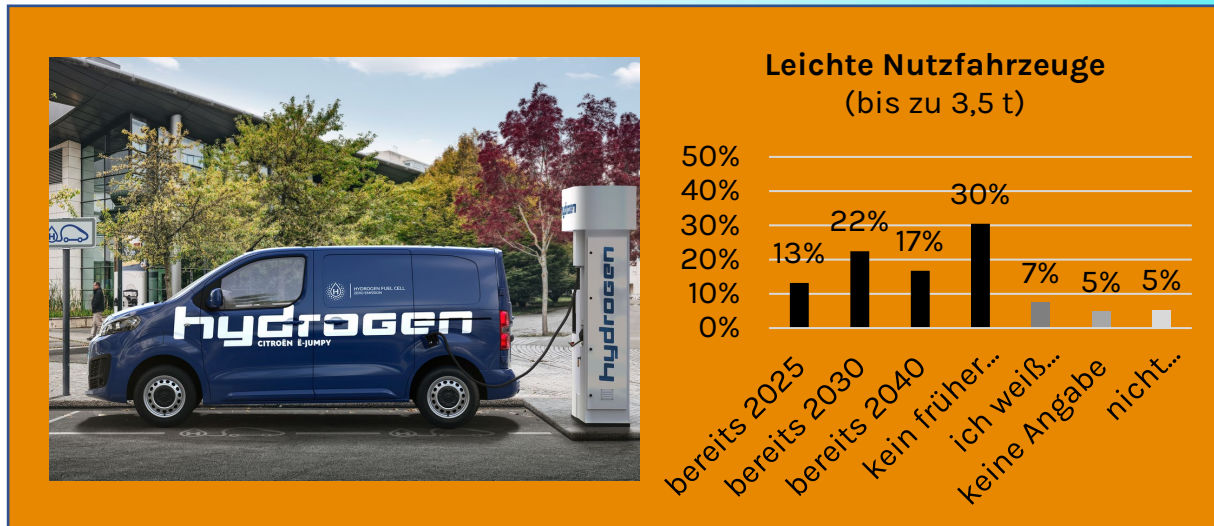
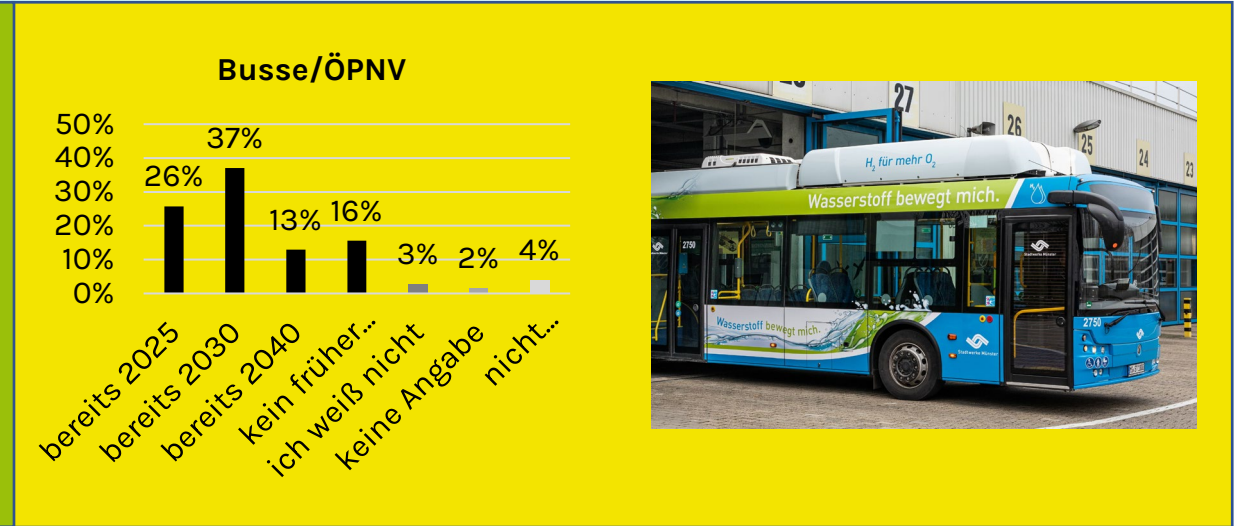
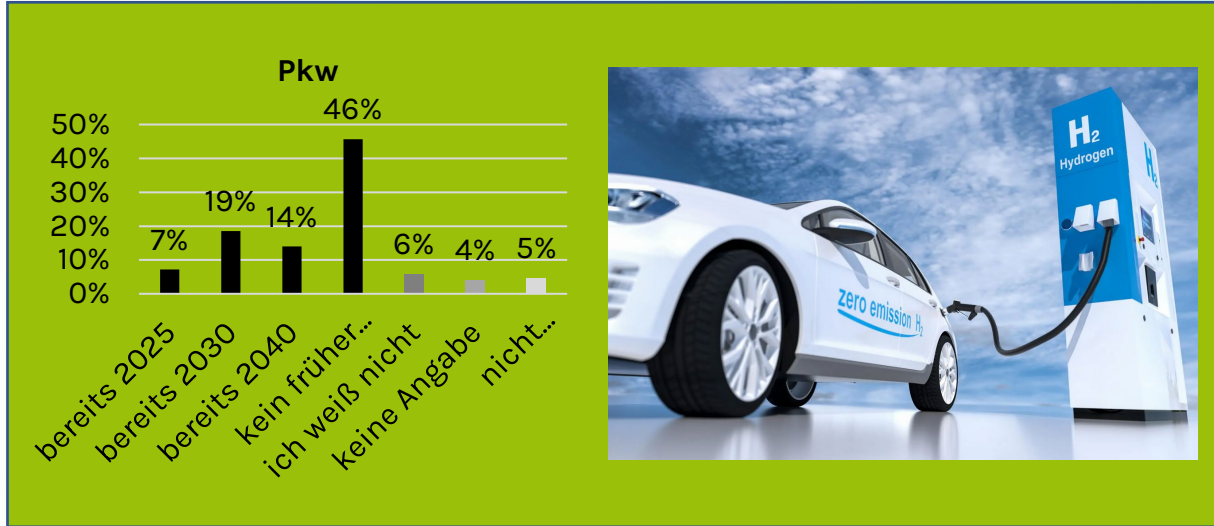


Sonstige chem. Industrie (24 TWh)



Wasserstoffeinsatz – Verkehr

Aus der Umfrage



Wasserstoffeinsatz – Verkehr

Aus der Umfrage



Foto: [ubahnverleih](#); [CC0](#)

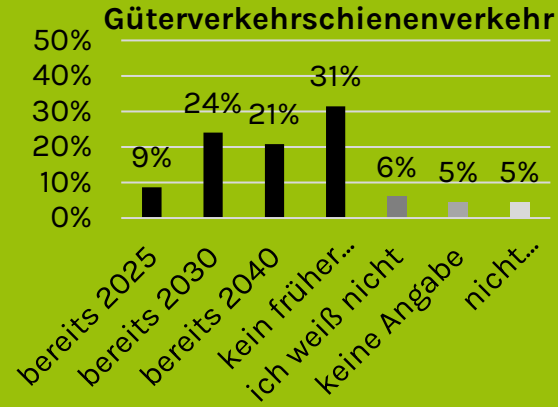
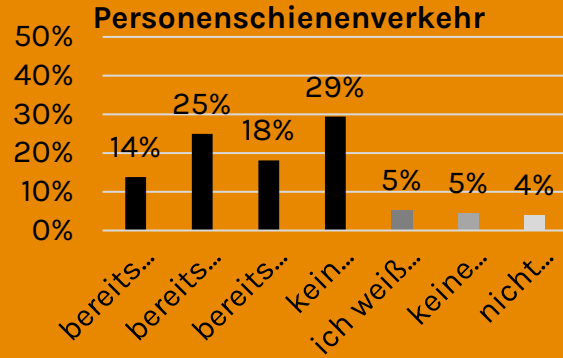


Foto: Ingo Rickmann; [CC BY-SA 3.0](#)

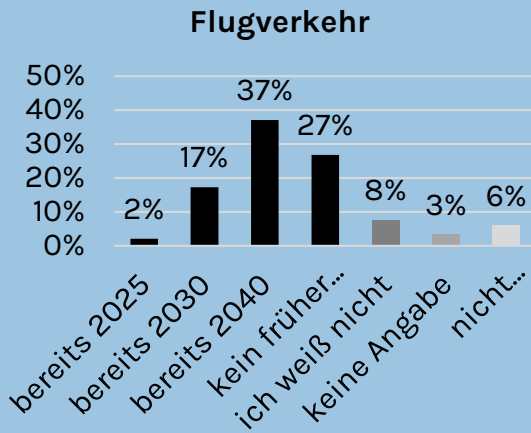
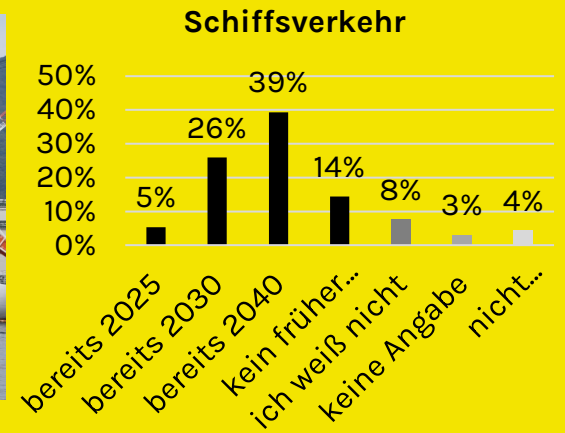
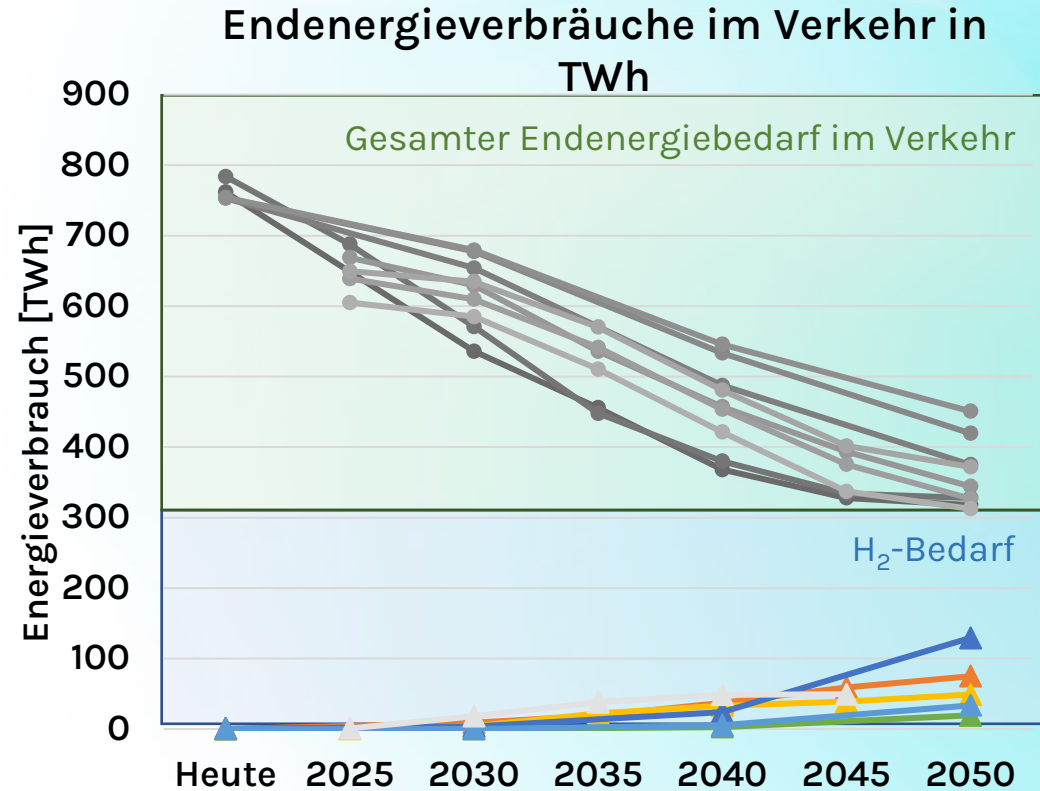


Foto: Hunini; [CC BY-SA 4.0](#)



Wasserstoffbedarfe im Verkehr

Aus der Meta-Analyse

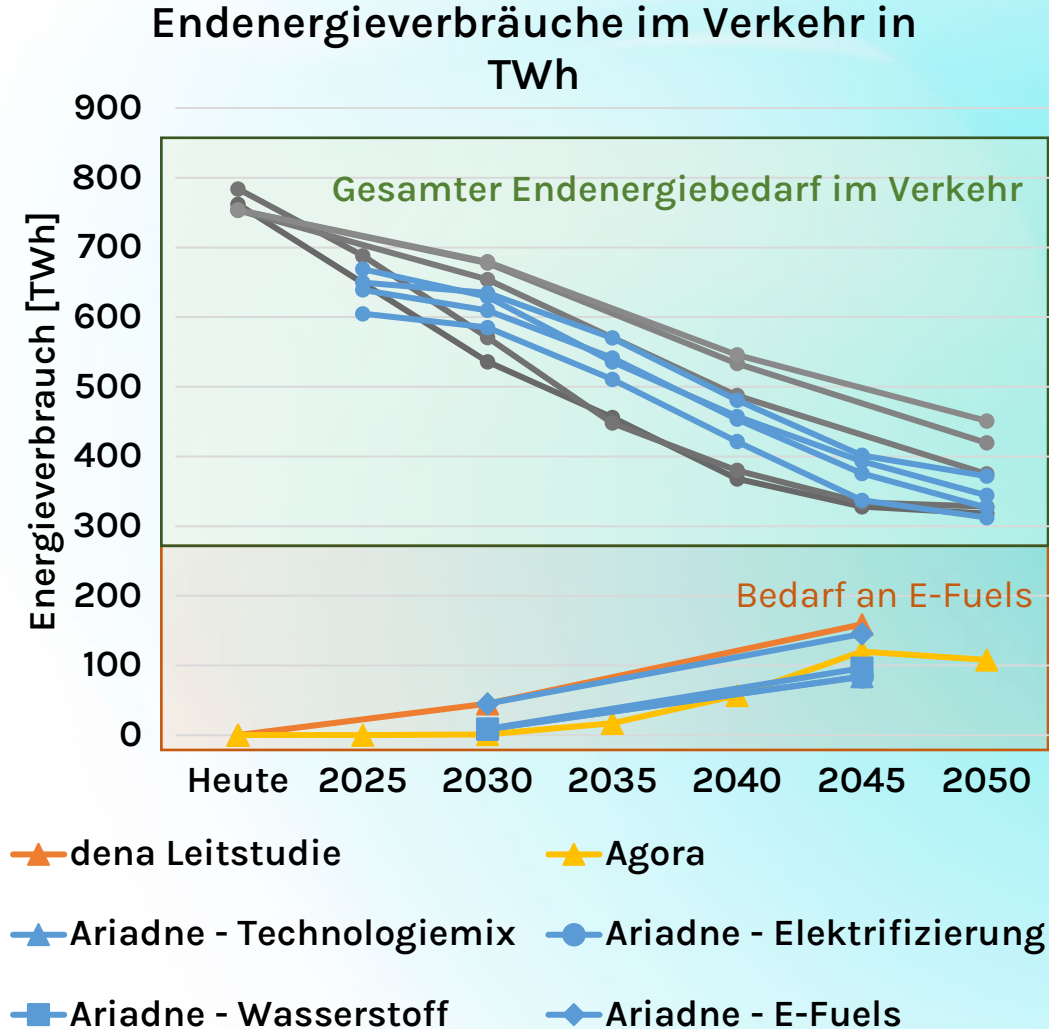


- dena Leitstudie
- Langfristsz. - TN-Strom
- Langfristsz. - TN-PtG/PtL
- Agora
- Langfristsz. - TN-H2
- Ariadne - DLR

- Endenergiebedarf: Senkung durch direkte Elektrifizierung
- H₂-Bedarf in den einzelnen Bereichen:
 - LKWs: Großteil des H₂-Bedarfs, v.a. im Schwerlastbereich
 - PKWs: Geringer H₂-Bedarf, da BEVs dominieren
 - Schiene, Schiff, Bus: geringer, absoluter H₂-Bedarf
- H₂-Bedarfsdeckung im LKW-Bereich → Ausbau des H₂-Tankstellennetzes notwendig

Wasserstoffbedarfe im Verkehr

Aus der Meta-Analyse



- Anwendungen für E-Fuels, bei denen:
 - Elektrifizierung schwer möglich ist
 - Nutzung von H₂ technisch nicht möglich ist
- Prognosen für den Bedarf an E-Fuels:
 - Luftverkehr benötigt ~70% der E-Fuels (Agora)
 - Hohe Bedarfe im Straßenverkehr, wenn Nutzung von E-Fuels vorgegeben wird (Ariadne - E-Fuels)
 - Berücksichtigung der Bestandsflotten

Deutsche OEMs

- Mehrheitlich abgewendet von FC-PKWs
- Fokus auf FC-LKWs



Globale OEMs

- v.a. Toyota und Hyundai
- Toyota erstmals mit Serienfertigung (30.000/a)

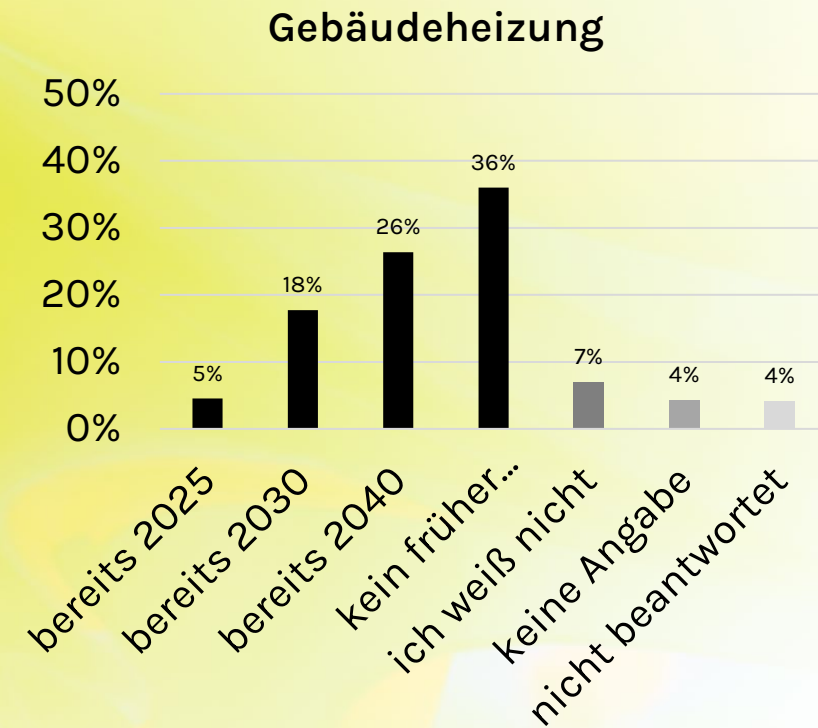
H₂-Einsatz für Gebäudewärme

Aus der Umfrage

In welchen Bereichen rechnen Sie mit einem frühen, großflächigem Einsatz von CO₂-armen Wasserstoff?

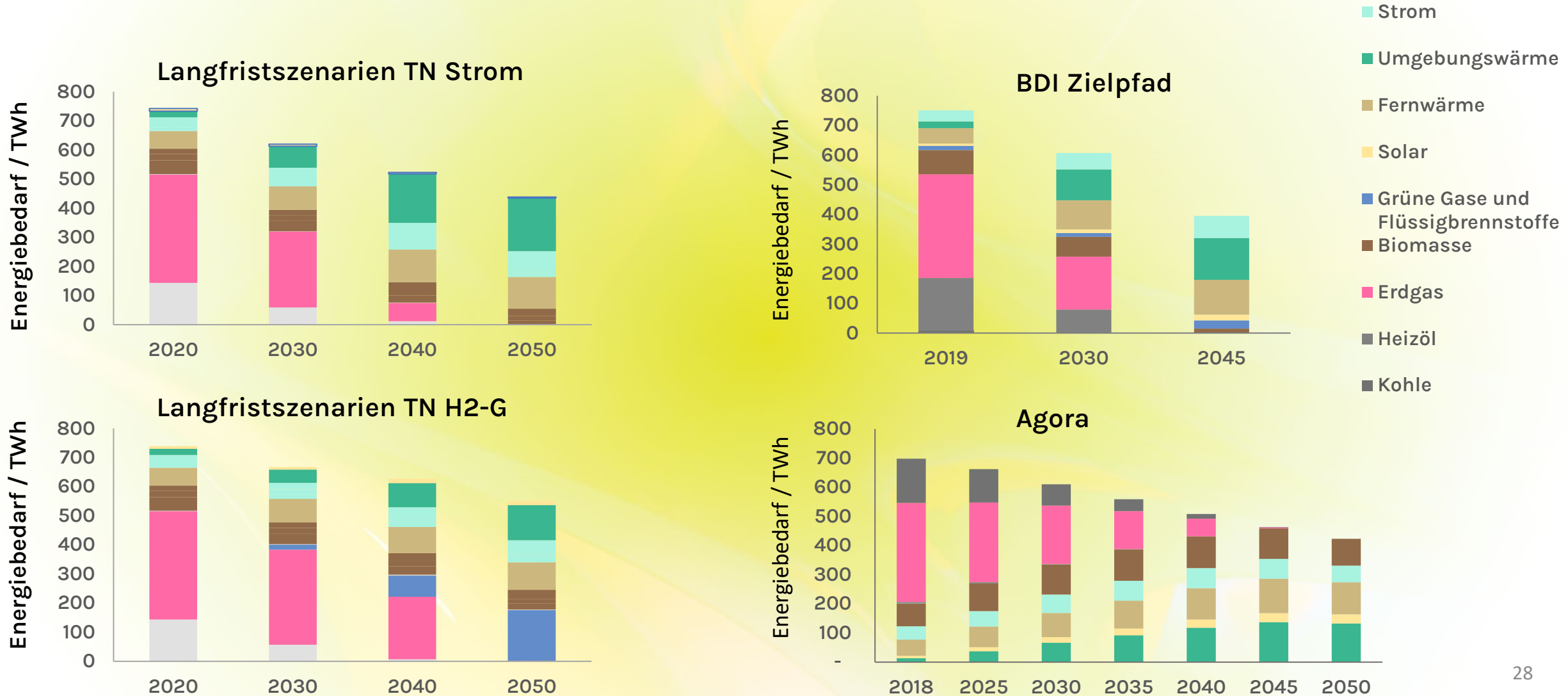


Foto: Geierunited, [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

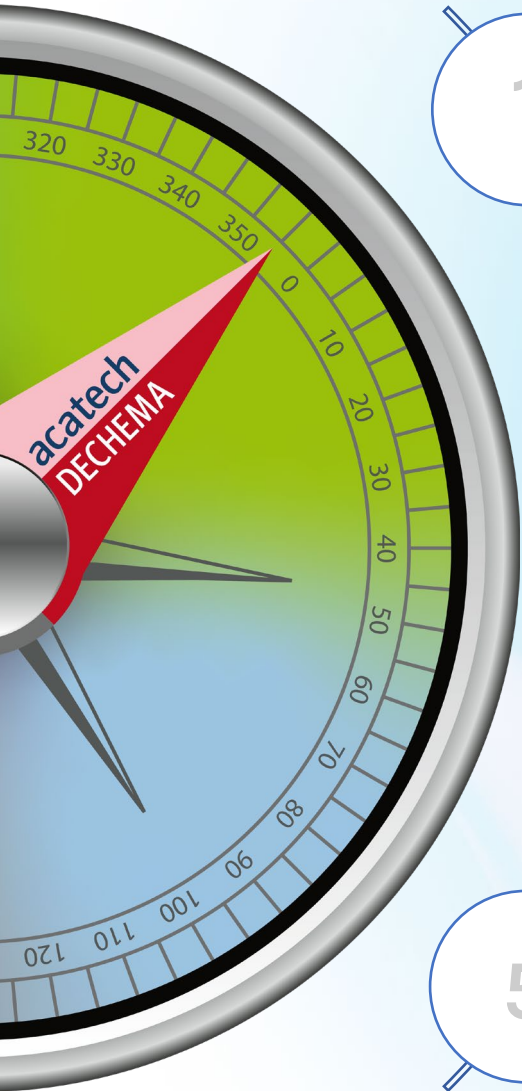


H₂-Bedarfe für Gebäudewärme

Aus der Meta-Analyse



Agenda



1.

Der Kompass und wie er funktioniert

2.

Wasserstoff: farblos und doch bunt

3.

Sektorale Bedarfe

4.

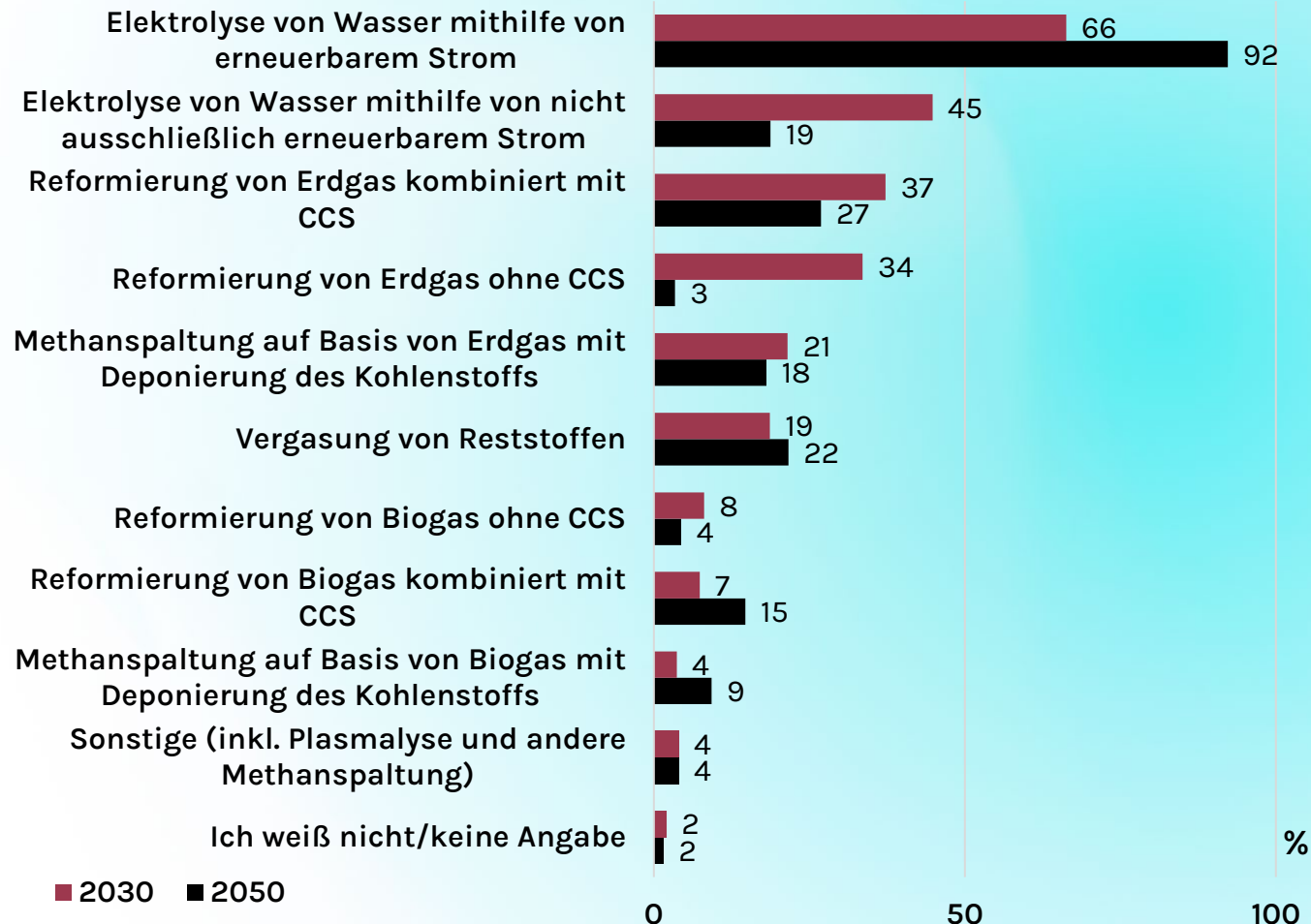
Erzeugung von Wasserstoff

5.

Importe und Rahmenbedingungen

Wasserstoffherzeugung

Aus der Umfrage

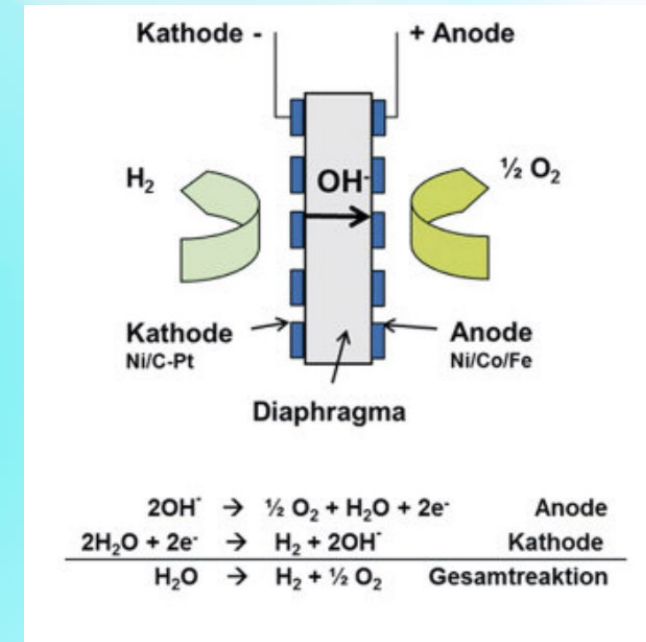
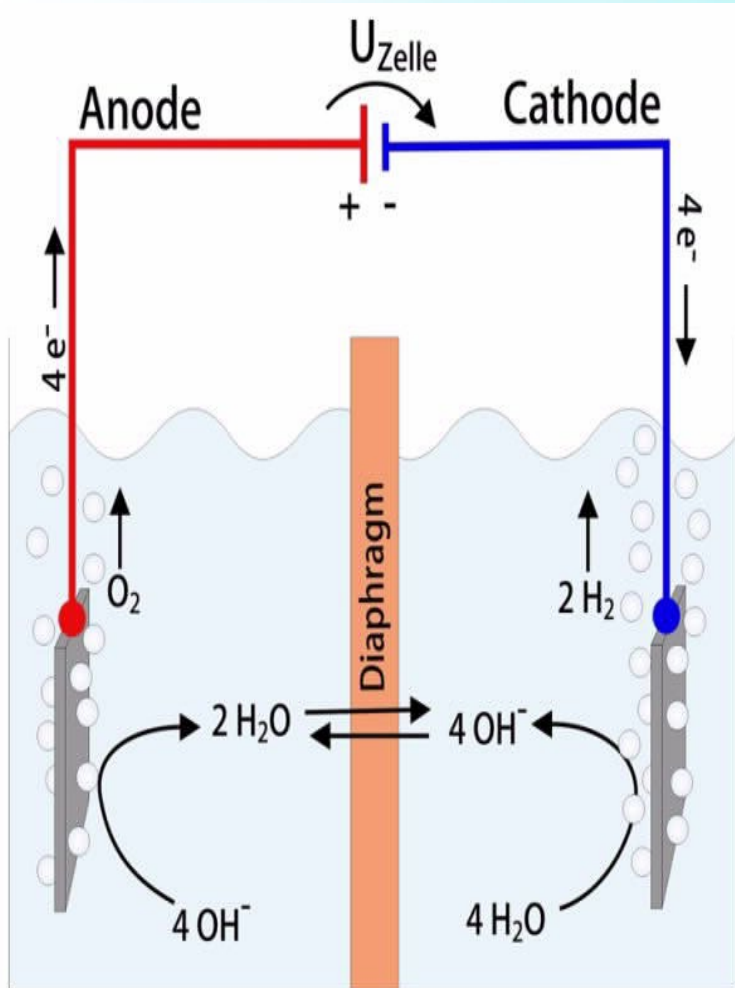


Welche Herstellungspfade haben Ihrer Ansicht nach zukünftig die größten Anteile an der Erzeugung von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten in Deutschland? Maximal drei Nennungen möglich

Wasserstoffherzeugung

Verschiedene Technologien

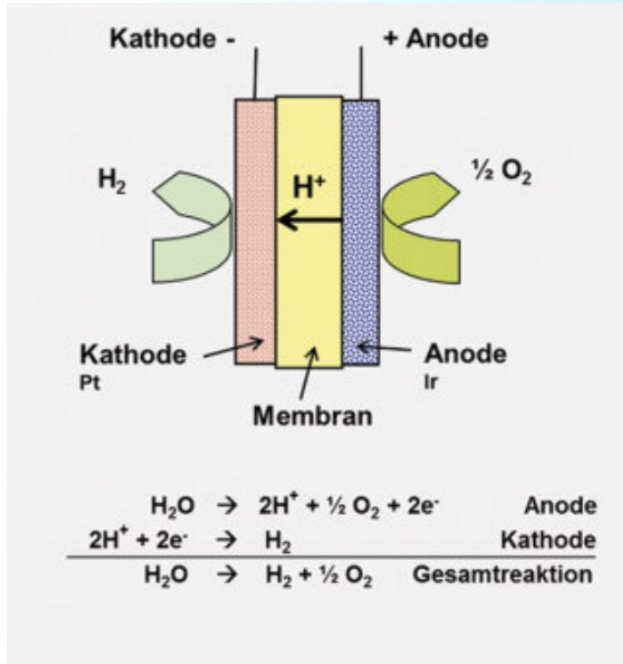
Alkalische Elektrolyse (40-90°C)



- Kommerziell verfügbar: ~ 100 MW, skalierbar
- Hohes TRL
- Kein / niedriger Bedarf an seltenen Rohstoffen (Edelmetalle)
- Lange Lebensdauer
- Dynamisch betreibbar

Wasserstoffherzeugung

Verschiedene Technologien



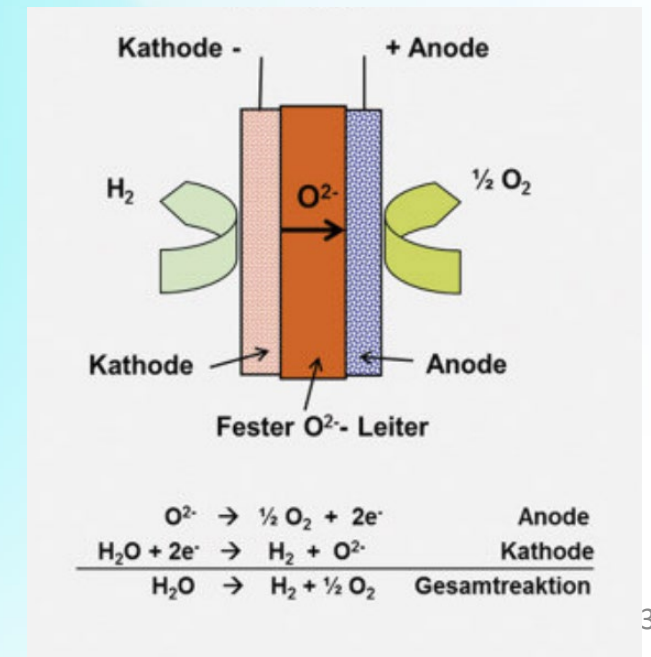
Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse / Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse (20-100°C)

- Hohe Leistungsdichte
- Hohe Effizienz
- Skalierbar, kommerziell verfügbar: ~10 MW
- Hochdynamisch betreibbar, Teillastfähigkeit
- Start/stop Fähigkeit

- Bedarf an seltenen Rohstoffen (Edelmetallen)
- Fluorierte Membranen

Hochtemperatur-Elektrolyse / Festoxid-Elektrolyse (700-1000°C)

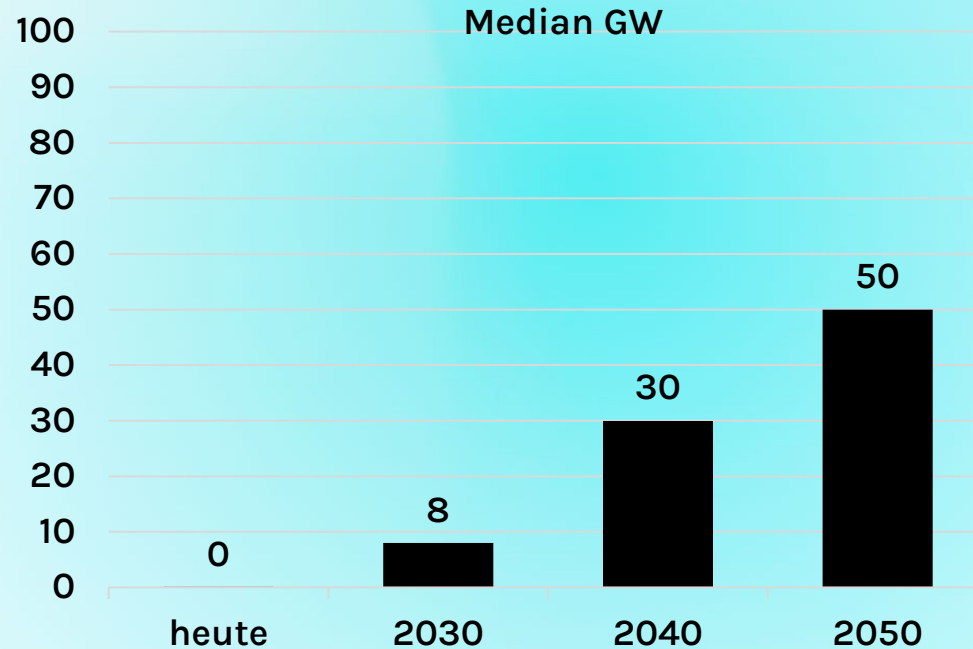
- In Entwicklung: ~ 100 kW
- Sehr hohe Effizienz durch Nutzung der Abwärme (> 70%)
- Niedriges TRL



Elektrolysekapazitäten

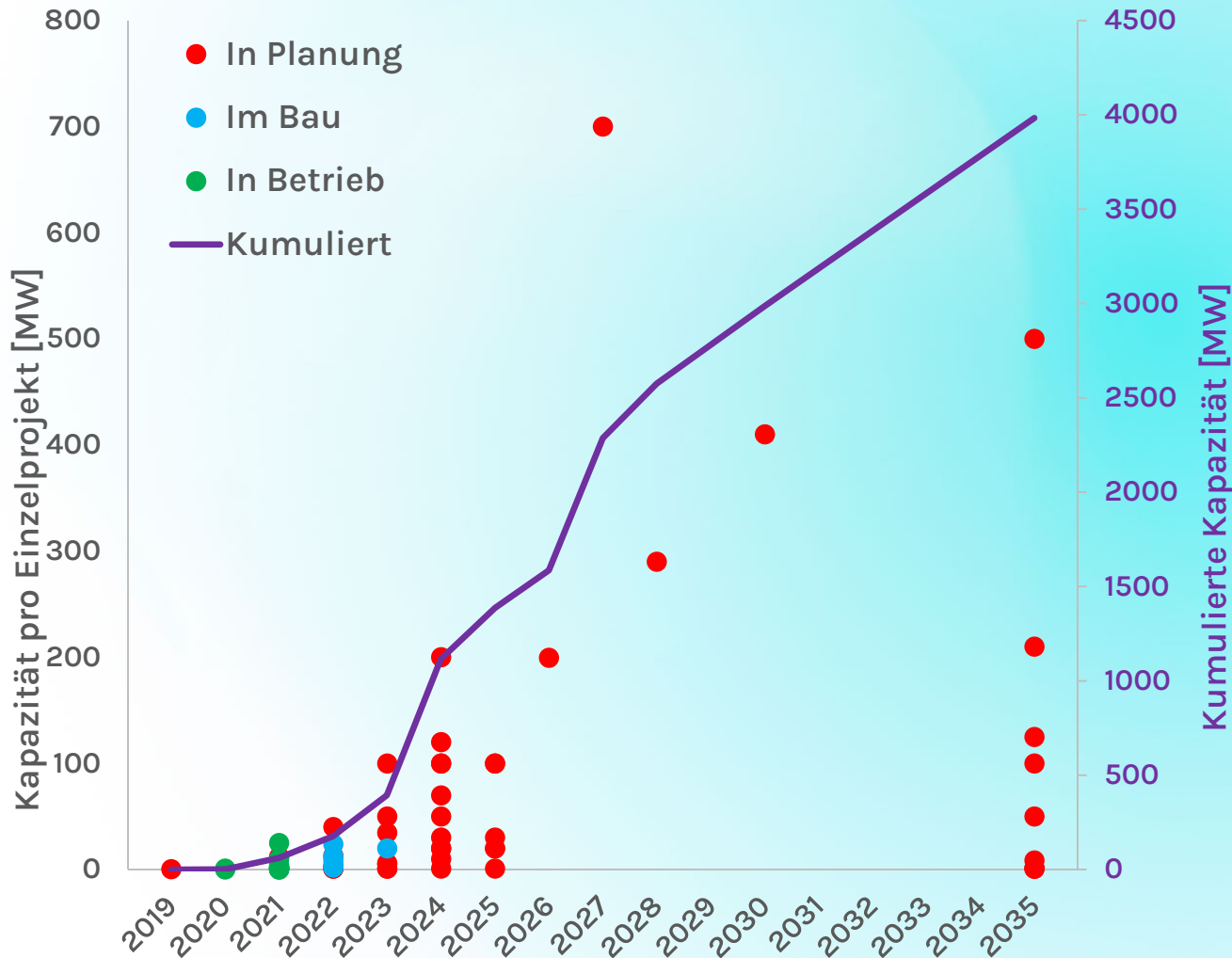
Aus der Umfrage

Geschätzte Elektrolysekapazität



Elektrolysekapazitäten

Aus der Meta-Analyse

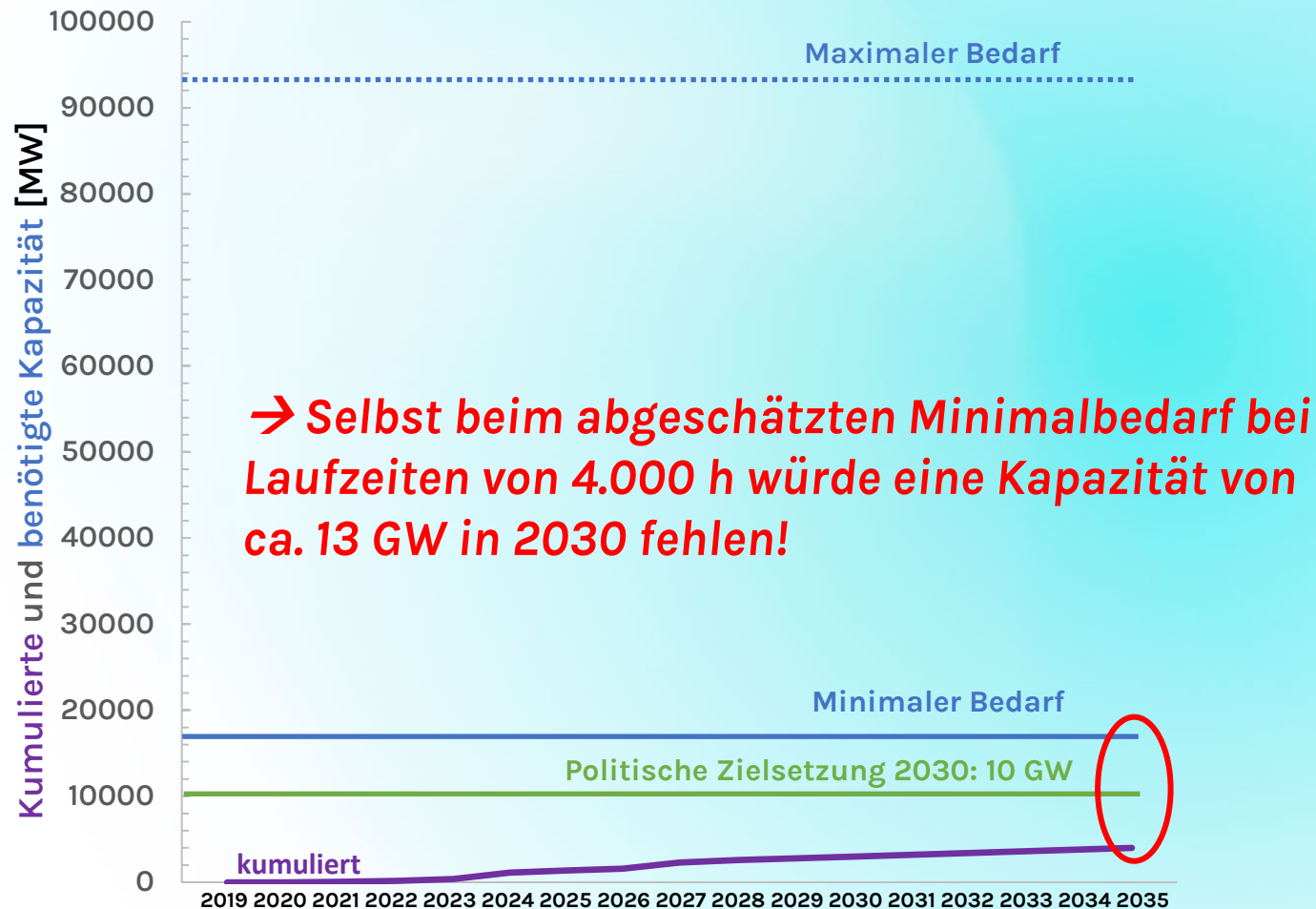


- Größenverteilung der Elektrolyseprojekte:
 - Nach Status (In Planung, Im Bau, In Betrieb)
 - Nach Zeitangabe der Realisierung (falls keine Angabe verfügbar, Zeitpunkt auf 2035 gesetzt)
 - Nach Kapazität (aber: **nicht bei allen Projekten konkrete Kapazitäten genannt!**)

→ Bei Umsetzung aller geplanten Projekte mit bekannter Kapazität würden bis 2035 nur 40% der laut Koalitionsvertrag geplanten Elektrolysekapazität (10 GW) erreicht werden

Elektrolysekapazitäten

Aus der Meta-Analyse



- Vorläufige Abschätzung für den H₂-Bedarf in Deutschland in 2030 laut Metaanalyse:
 - Minimaler H₂-Bedarf: ~50 TWh
 - Maximaler H₂-Bedarf: ~250 TWh
- Annahmen für die Berechnung:
 - Kumulierte Kapazität für 2030: ~4 GW (auf Basis der eigenen Projektdatenbank)
 - Elektrolyse-Effizienz: 70%
 - Berechnung für **4.000 Volllaststunden**
- Zum Vergleich (Laststunden in Deutschland in 2020):
 - PV: ~1.000 h
 - Onshore Wind: ~1.900 h
 - Offshore Wind: ~3.500 h

Agenda



1.

Der Kompass und wie er funktioniert

2.

Wasserstoff: farblos und doch bunt

3.

Sektorale Bedarfe

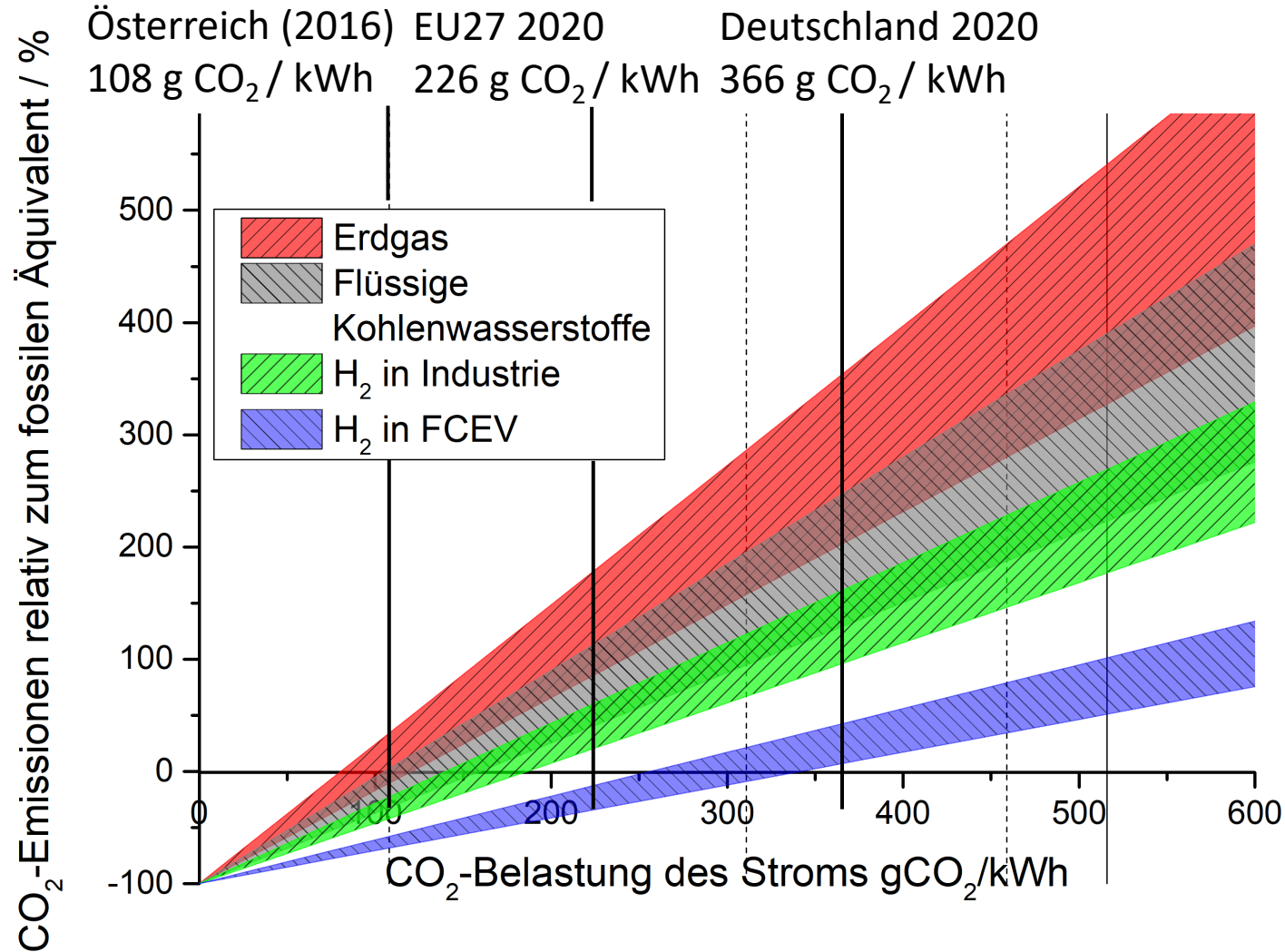
4.

Erzeugung von Wasserstoff

5.

Importe und Rahmenbedingungen

Nachhaltiger Wasserstoff?

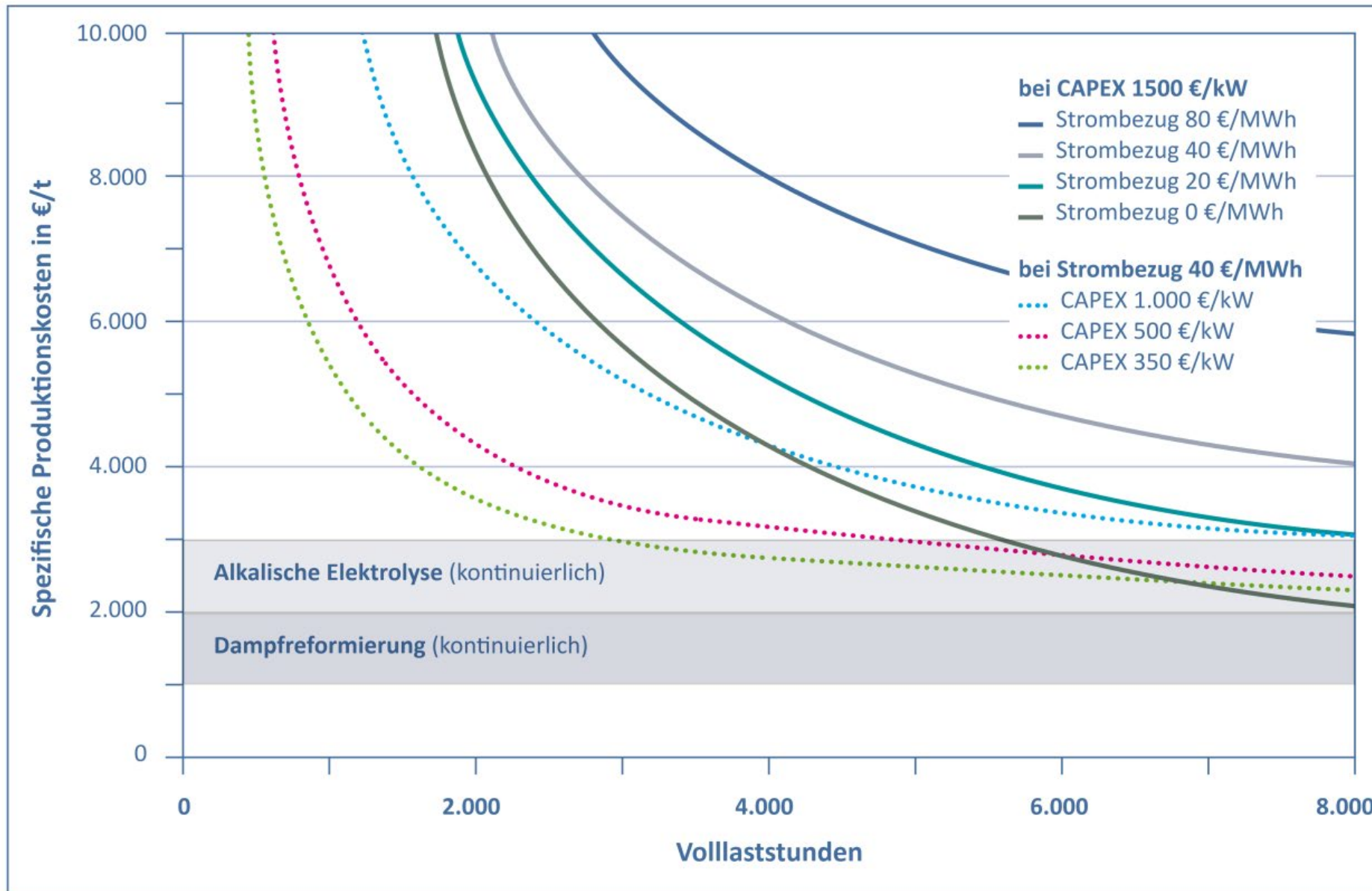


P2X-Roadmap
https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2018_Power_to_X.pdf

Aktuelle Daten

- EU27:
<https://www.weltenergieerat.de/publikationen/energie-fuer-deutschland/energie-fuer-deutschland-2021/energie-in-der-europaeischen-union-zahlen-und-fakten/>
- Deutschland:
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-26_cc-45-2021_strommix_2021_0.pdf

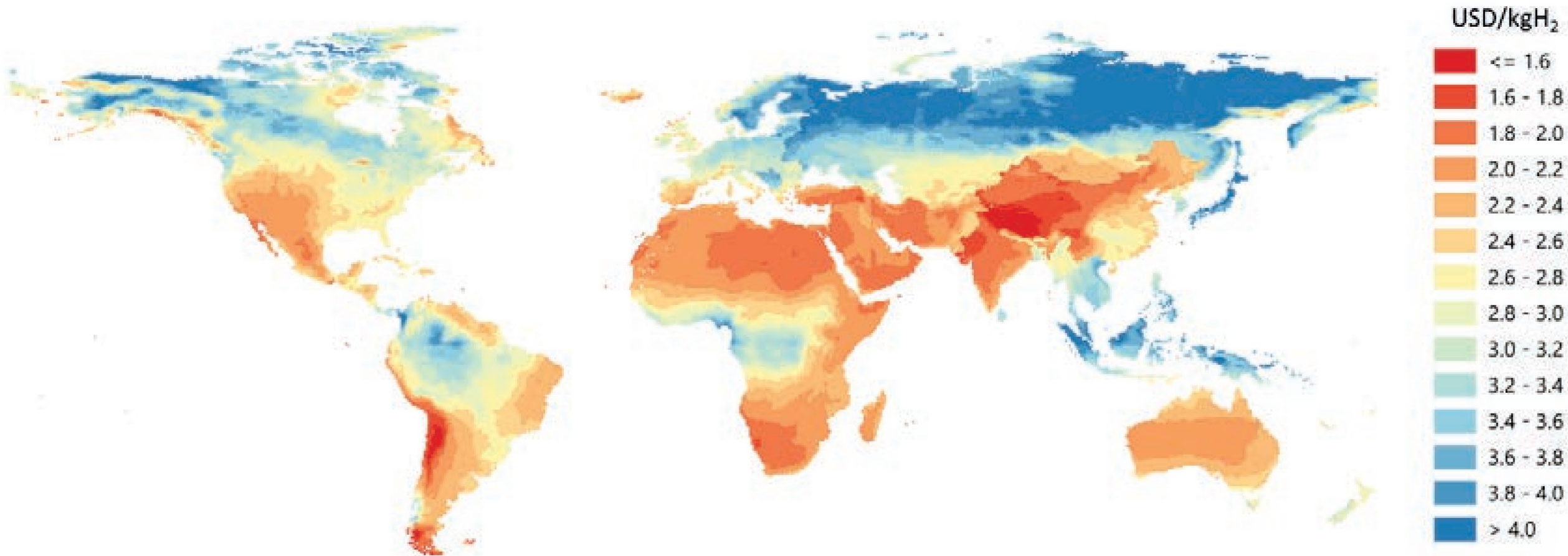
Spezifische Produktionskosten



Source: »Sektorkopplung« -
Untersuchungen
und Überlegungen zur
Entwicklung
eines integrierten
Energiesystems, 2017,
Leopoldina, acatech, Union der
deutschen Akademien der
Wissenschaften.

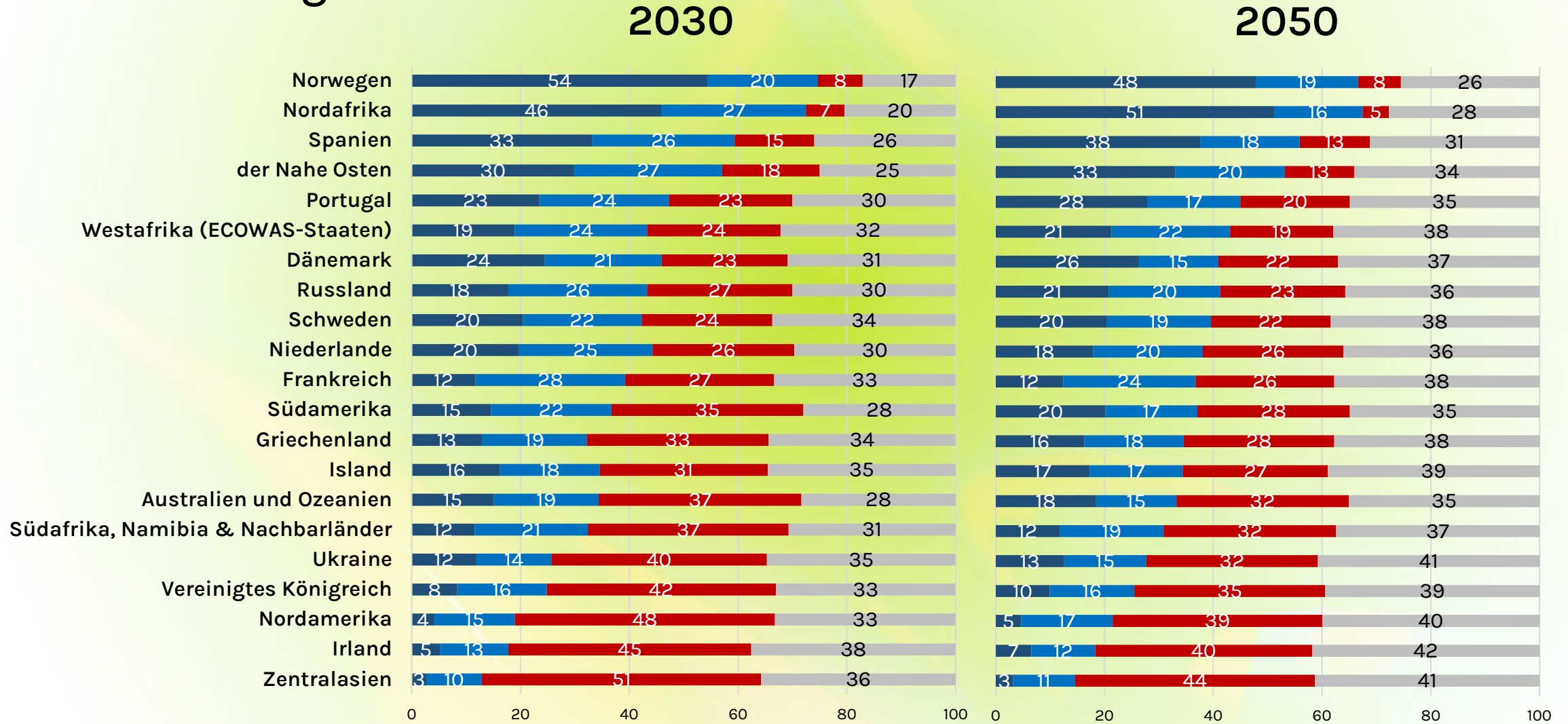
Produktionskosten von H₂

Langfristige Kosten – hybrid PV und onshore-Windenergie



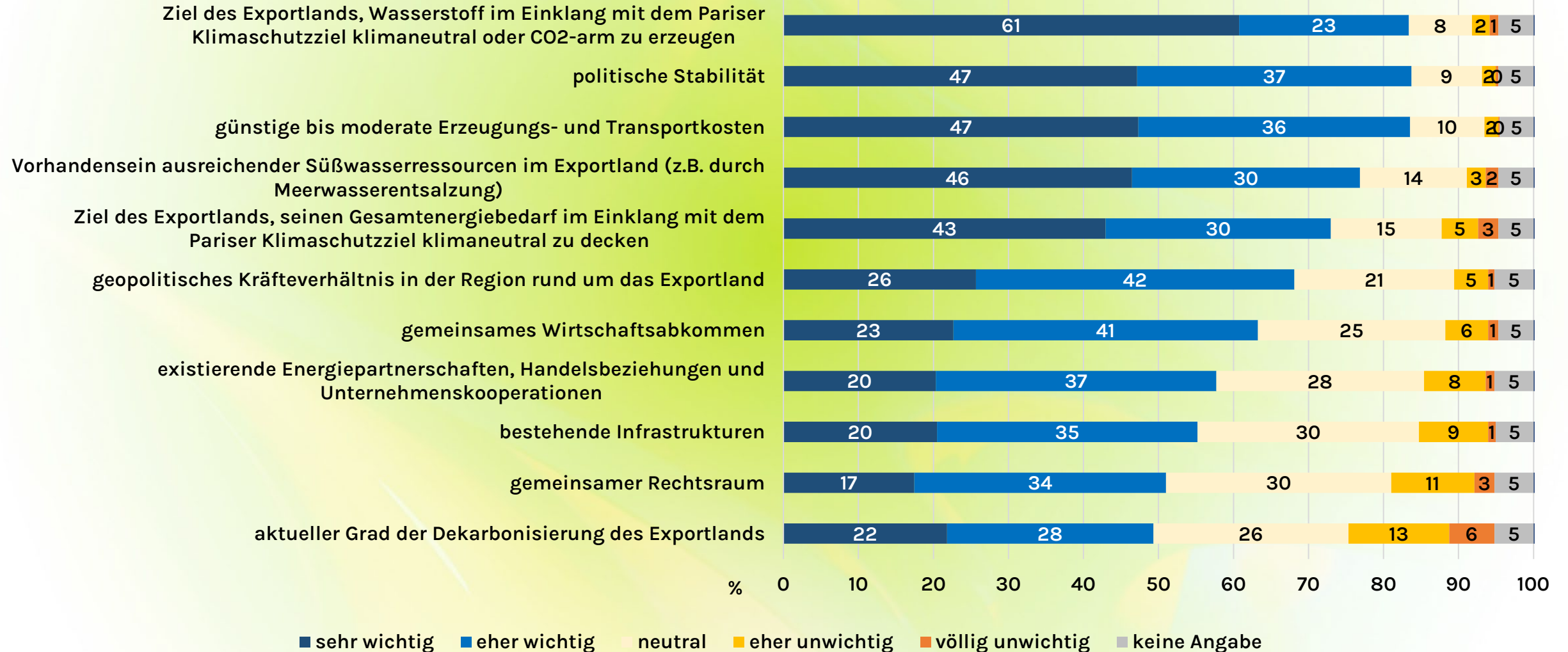
Importländer

Aus der Umfrage



Importkriterien

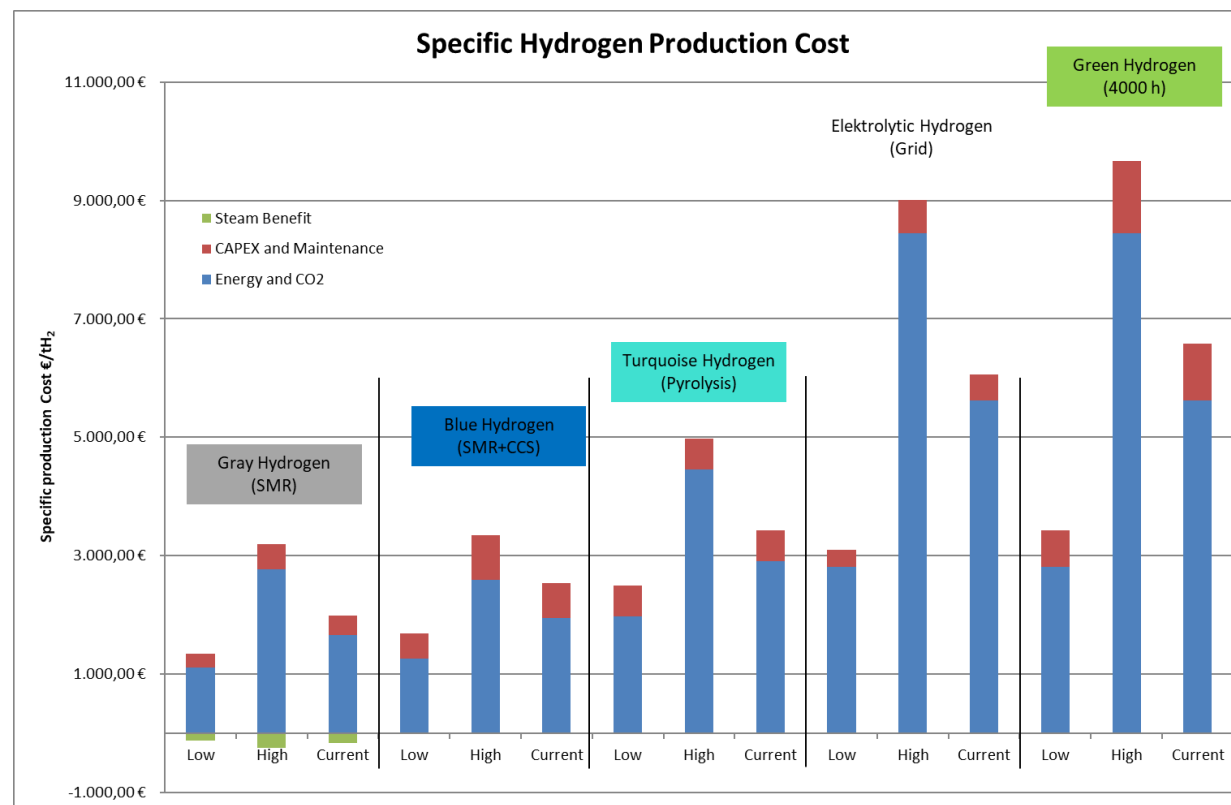
Aus der Umfrage



Vielen Dank!

H-Kompass

Assumptions:
Interest 8%
Depriciation period 20 a
€//\$= 1,2



Source: BMWI Energiedaten, IEA, Future of Hydrogen, Roadmap Chemie 2050, VCI, DECHEMA, FutureCamp