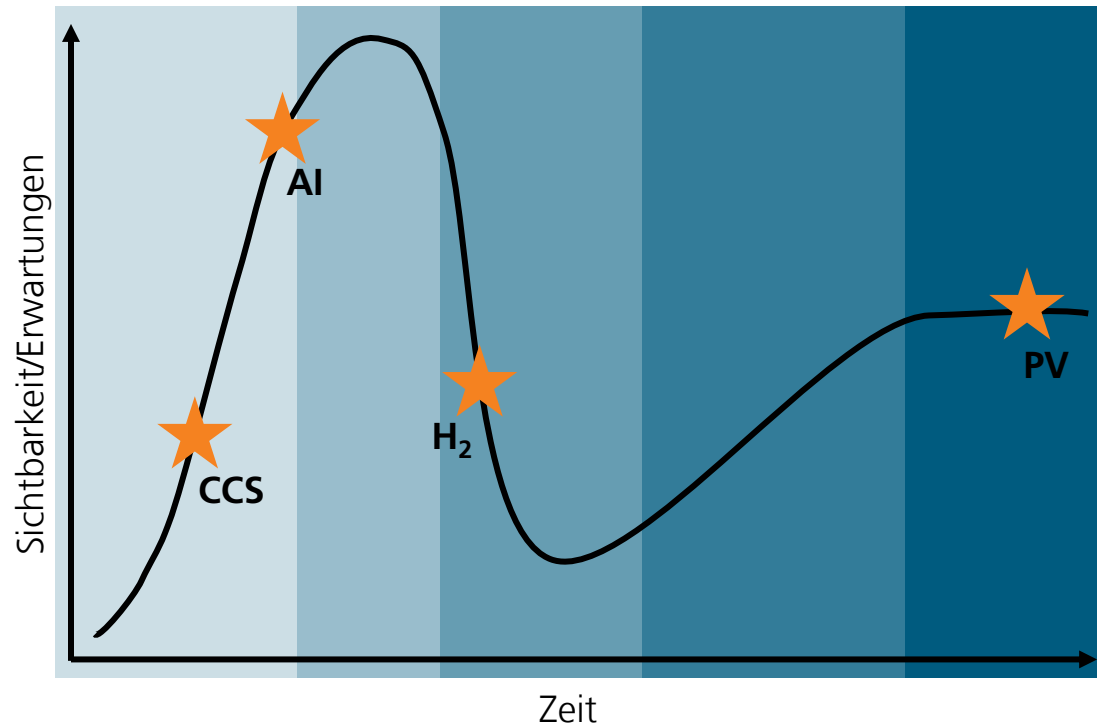


Chancen und Grenzen der Energiespeichertechnologie – Einblicke in die Batterie, Brennstoffzellen und Wasserstofftechnologien

Prof. Dr.-Ing. Sabrina Zellmer



Wasserstoff als globaler Hoffnungsträger zur Erreichung der Klimaziele



Technologischer Auslöser:

Technischer Durchbruch erregt Aufmerksamkeit, Pilotanlagen, Start-ups

Gipfel der überzogenen Erwartungen:

Erste Anwendungen auf dem Markt, enormer Medienrummel, viel Unbekannte

Tal der Enttäuschungen:

Versprechen treffen auf Herausforderungen, First-Mover-Nachteil, natürlicher Schritt zur Marktreife

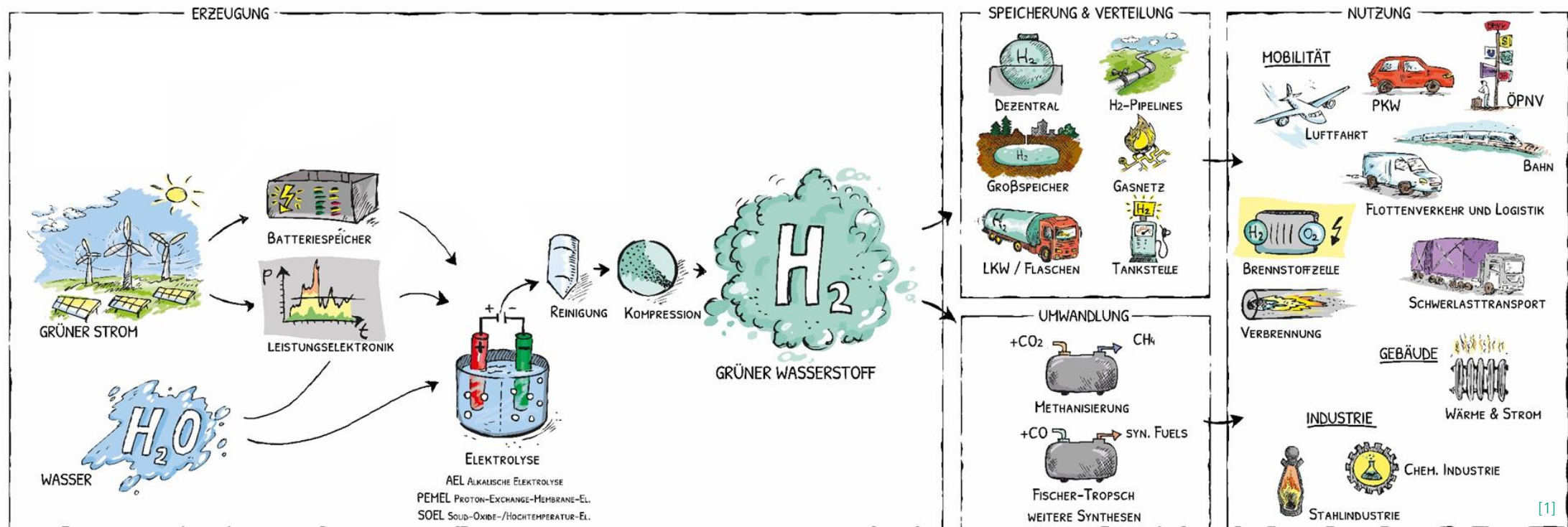
Pfad der Erleuchtung:

Kritische Probleme werden gelöst, katalytische Investitionen getätigt, viele Vorreiter scheitern

Plateau der Produktivität:

Breite Akzeptanz, bestehende Anwendungen und Geschäftsmodelle, langfristige Stabilität, Auswirkungen auf Gesellschaft und Wirtschaft

Die Wasserstoff-Wertschöpfungskette birgt (noch) viele Herausforderungen



Wie kann grüner Wasserstoff erzeugt werden?

Wo leistet Wasserstoff den größten Beitrag zum Klimaschutz?

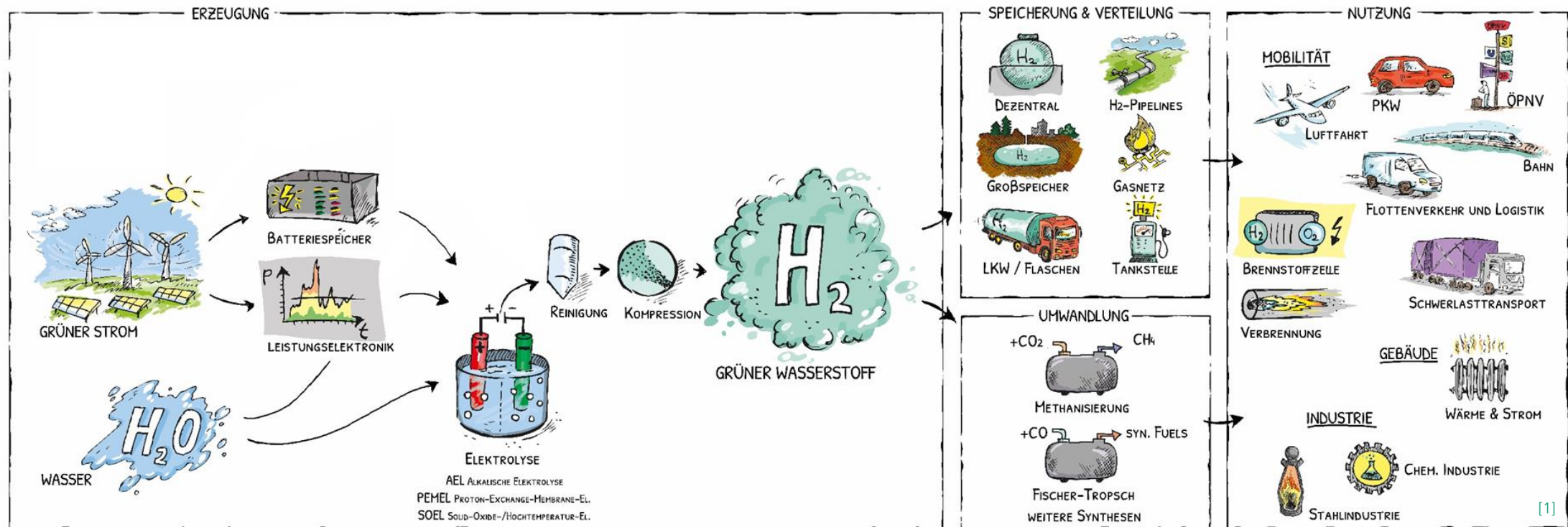
Wie entwickelt sich der Bedarf und kann dieser gedeckt werden?

Wie kommt der Wasserstoff vom Erzeuger zum Verbraucher?

Wie gelingt der Einsatz von H₂-Technologien in der bestehenden Fabrik?

H₂-Technologien vs. Batterietechnologien in der Mobilität?

Die Wasserstoff-Wertschöpfungskette birgt (noch) viele Herausforderungen



Wie kann grüner Wasserstoff erzeugt werden?

Wo leistet Wasserstoff den größten Beitrag zum Klimaschutz?

Wie entwickelt sich der Bedarf und kann dieser gedeckt werden?

Wie kommt der Wasserstoff vom Erzeuger zum Verbraucher?

Wie gelingt der Einsatz von H₂-Technologien in der bestehenden Fabrik?

H₂-Technologien vs. Batterietechnologien in der Mobilität?

Der Weg zur kohlenstoffarmen Wasserstoffwirtschaft

Farbenlehre beschreibt die Herstellungsrouten mit unterschiedlichen CO₂-Emissionsfaktoren

Grauer Wasserstoff

Gewinnung aus: **fossilen Kohlenwasserstoffen**
Verfahren: **Dampfreformierung (Erdgas), Kohlevergasung**

CO₂-Emissionsfaktor:
ca. 10 t_{CO2}/t_{H2} (aus Erdgas),
ca. 18 t_{CO2}/t_{H2} (aus Kohle)

Blauer Wasserstoff

Gewinnung aus: **fossilen Kohlenwasserstoffen**
Verfahren: **Dampfreformierung und CO₂-Abscheidung/-speicherung (CCS)**

CO₂-Emissionsfaktor: **< 1 t_{CO2}/t_{H2}**
bei **CO₂-Abscheidung von bis zu 90%**
(technisch heute möglich) ¹

Türkiser Wasserstoff

Gewinnung aus: **Methan**
Verfahren: **Methanpyrolyse**
(bisher nicht marktreif)

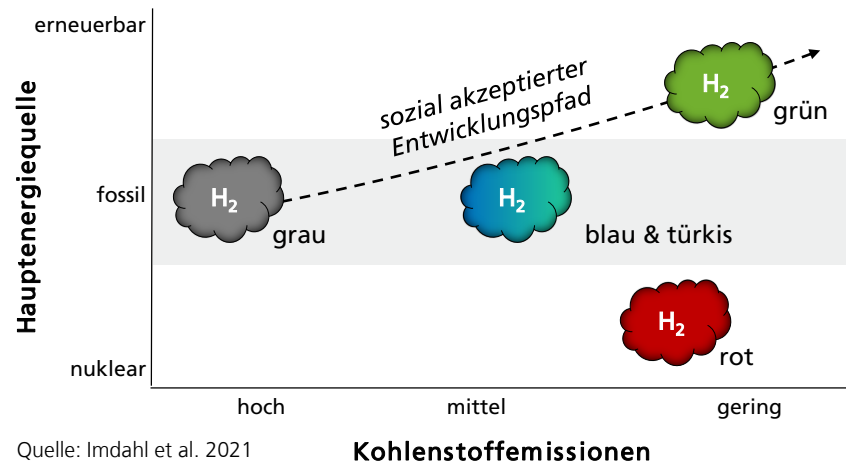
CO₂-Emissionsfaktor:
CO₂-Neutralität möglich

Grüner Wasserstoff

Gewinnung aus: **Wasser**
Verfahren: **Elektrolyse** unter Nutzung von 100 % erneuerbarer Energie

CO₂-Emissionsfaktor: **CO₂-frei**

Quellen: BMWi 2020, ¹ IEA 2019

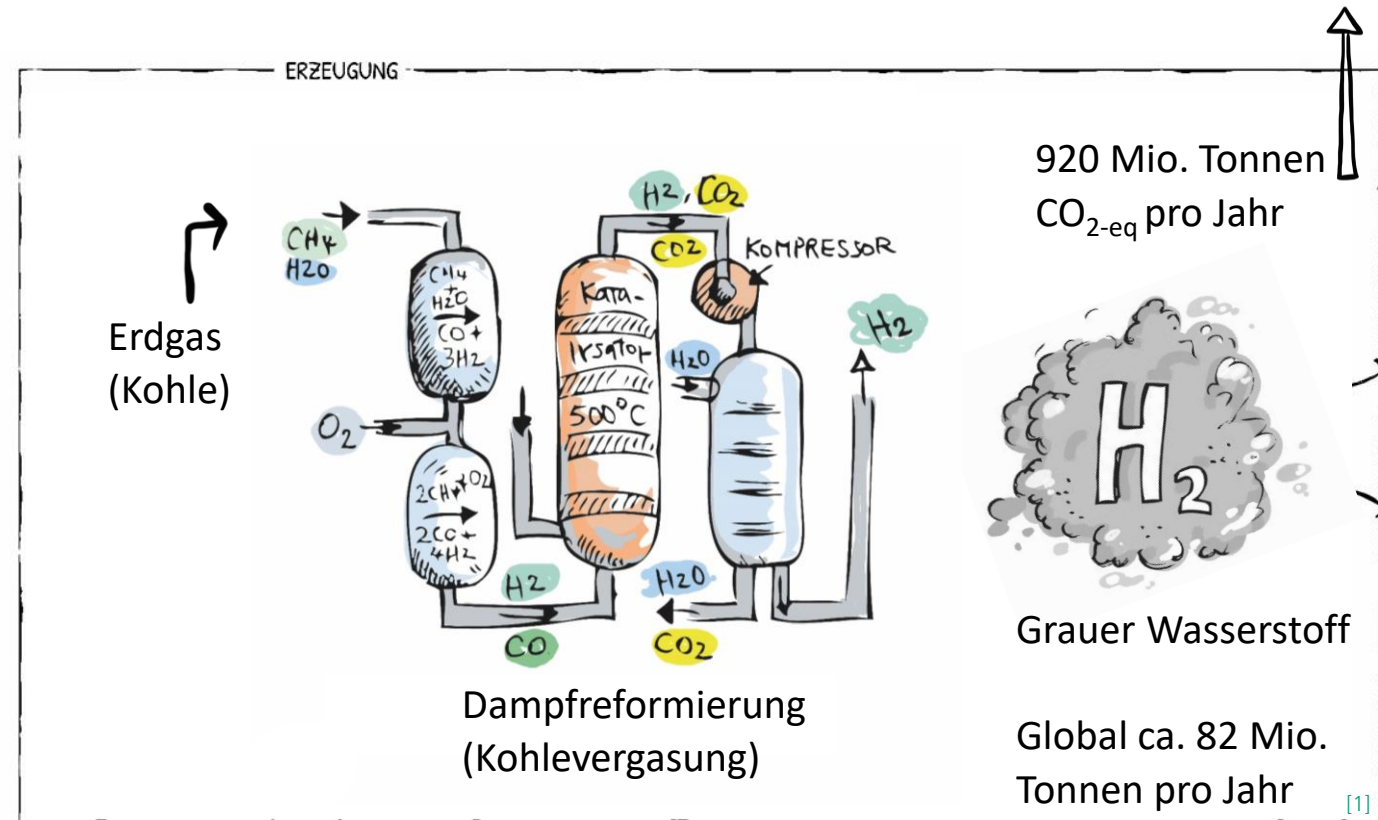


Handel und Einsatz von »Renewable Fuels of Non-Biological Origin« (RFNBO)

- **THG-Reduktion von 80 % im Vergleich zu fossilen Komparator von 74 gCO₂-Äq./MJ**
- **Kein Strom aus Biomasse zulässig**

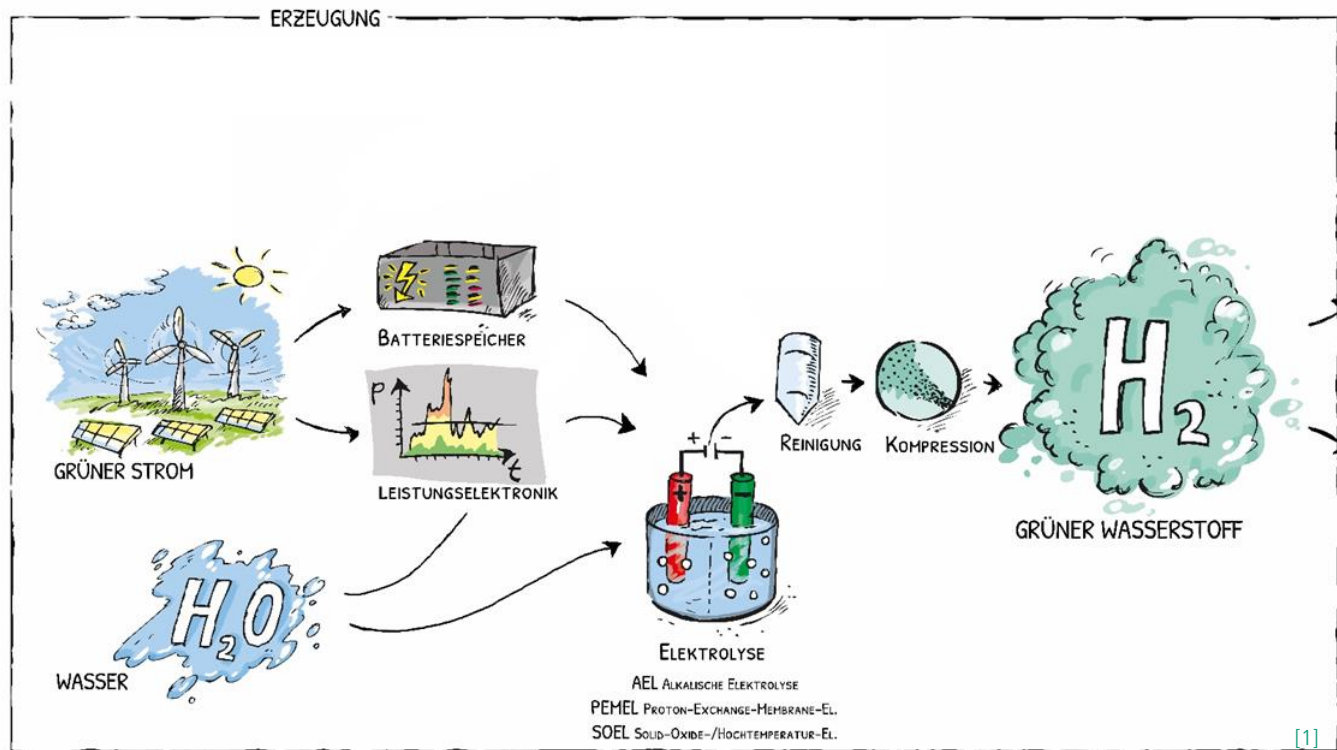
Quelle: www.now-gmbh.de

Die heutige (graue) Wasserstoffwirtschaft basiert auf fossilen Energieträgern



Heutige H_2 -Erzeugung emittiert ca. 920 Mio. $\text{t}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/\text{a}$

Grüner Wasserstoff als Hoffnungsträger der Energiewende



Grüner Wasserstoff wird durch das Elektrolyse-Verfahren hergestellt, indem **Wasser** mit Hilfe von **Strom** aus **ausschließlich erneuerbaren Energien** in seine Bestandteile Sauerstoff und **Wasserstoff** aufgespalten wird.

Die Produktion erfolgt somit **CO₂-frei**, da nur **Strom aus 100% erneuerbaren Quellen** eingesetzt wird.

Für **eine Tonne H₂** werden in modernen Elektrolyseuren ca. **51 MWh Strom** eingesetzt (elektr. Wirkungsgrad von 65%_{LHV})

Grüner Wasserstoff steht im Fokus der H₂-Strategien in EU & GER

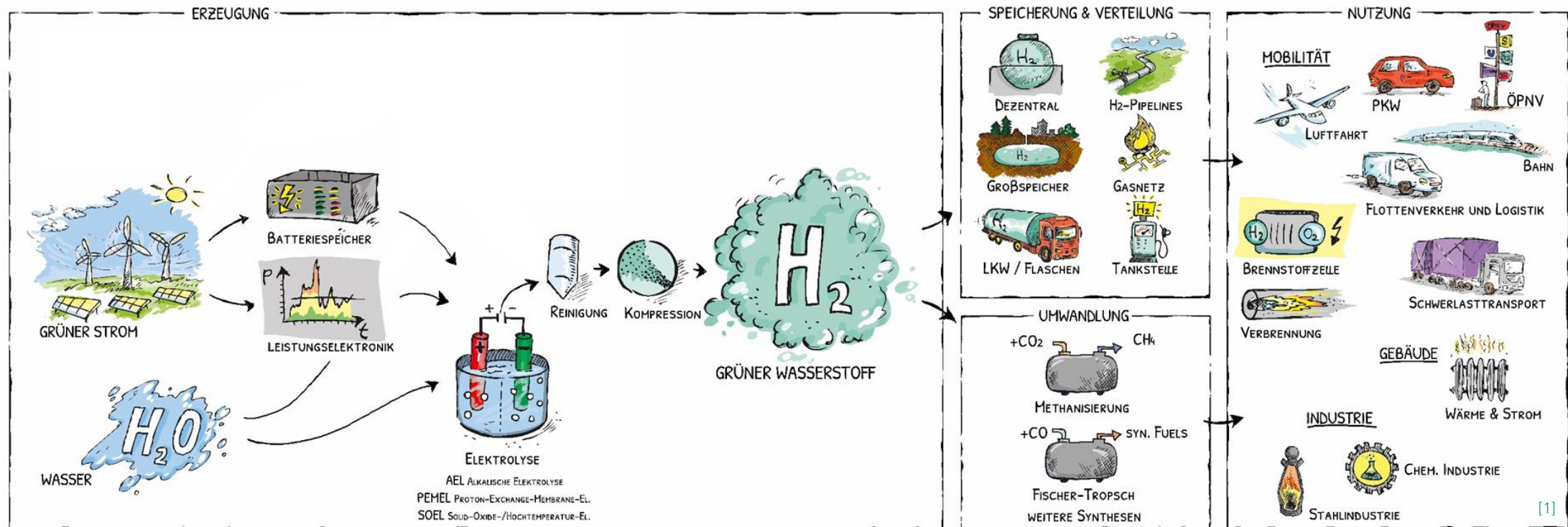
Die Elektrolýsetechnologien

Status & Vor- und Nachteile

	Alkalische-Elektrolyse (AEL)	Protonen-Austauschmembran-Elektrolyse (PEMEL)	Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL) bzw. Feststoffoxid-Elektrolyse	Anion-Austauschmembran-Elektrolyse (AEM)
Technologiereifegrad¹	▪ TRL 9	▪ TRL 9	▪ TRL 7-8	▪ TRL 7-8
Vorteile	▪ Hohe Stack-Lebensdauer	▪ dynamischer Betrieb, weiter Lastbereich, hoher Ausgangsdruck, Wasser als Elektrolyt	▪ Keramischer Elektrolyt und geringe Materialkosten, hohe Effizienz bei Integration von Abwärme	▪ Durch die alkalische Umgebung wird die Verwendung von unedlen Katalysatoren wie Nickel oder Eisen ermöglicht.
Nachteile	▪ Kaliumhydroxid als Elektrolytlösung (Recycling), Platzbedarf	▪ Membran- u. Elektrodenmaterial aus Platinmetallen	▪ (noch) niedrige Stack-Lebensdauer	▪ (noch) niedrige Lebensdauer (Polymermembran) und Effizienz
Status	▪ Anlagen in Planung/Realisierung bis 100 MW _{el}	▪ Anlagen in Planung/Realisierung bis 100 MW _{el}	▪ Weltweit größte Anlage (2,6 MW _{el}) »MultiPLHY« bei Neste's Raffinerie in Rotterdam (2023)	
Betriebstemperatur	▪ 70 - 90 °C	▪ 50 - 80 °C	▪ 700 - 850 °C	▪ 40 - 60 °C
Systemwirkungsgrad (heute → Potenzial)²	▪ 64 % → > 74 %	▪ 65 % → > 74 %	▪ > 66 % → > 83 %	▪ 58 % → > 74 %
CAPEX (heute)	▪ 500 – 1.000 €/kW_{el}³	▪ 700 – 1.400 €/kW_{el}³	▪ 2.800 – 5.600 €/kW_{el}	▪ Wenige Referenzen

Quellen: ¹ Fraunhofer ISI & ISE H₂-Roadmap 2019, ² IEA 2019, ³ Chatenet et al. 2022 <https://doi.org/10.1039/D0CS01079K>

Die Wasserstoff-Wertschöpfungskette birgt (noch) viele Herausforderungen



Wie kann grüner Wasserstoff erzeugt werden?

Wo leistet Wasserstoff den größten Beitrag zum Klimaschutz?

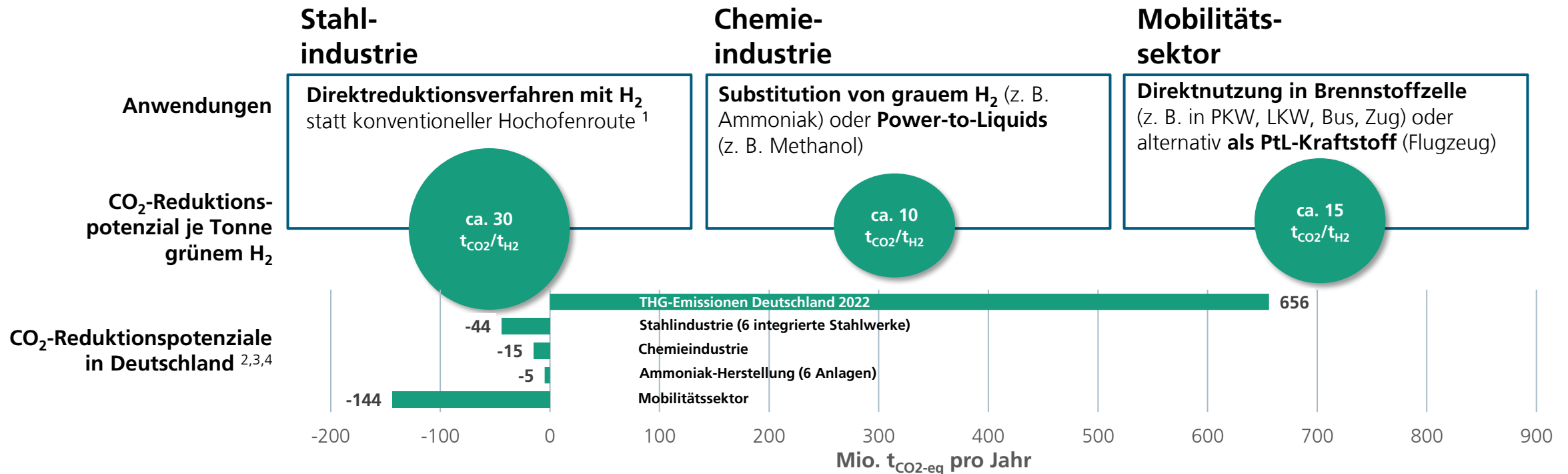
Wie entwickelt sich der Bedarf und kann dieser gedeckt werden?

Wie kommt der Wasserstoff vom Erzeuger zum Verbraucher?

Wie gelingt der Einsatz von H_2 -Technologien in der bestehenden Fabrik?

H_2 -Technologien vs. Batterietechnologien in der Mobilität?

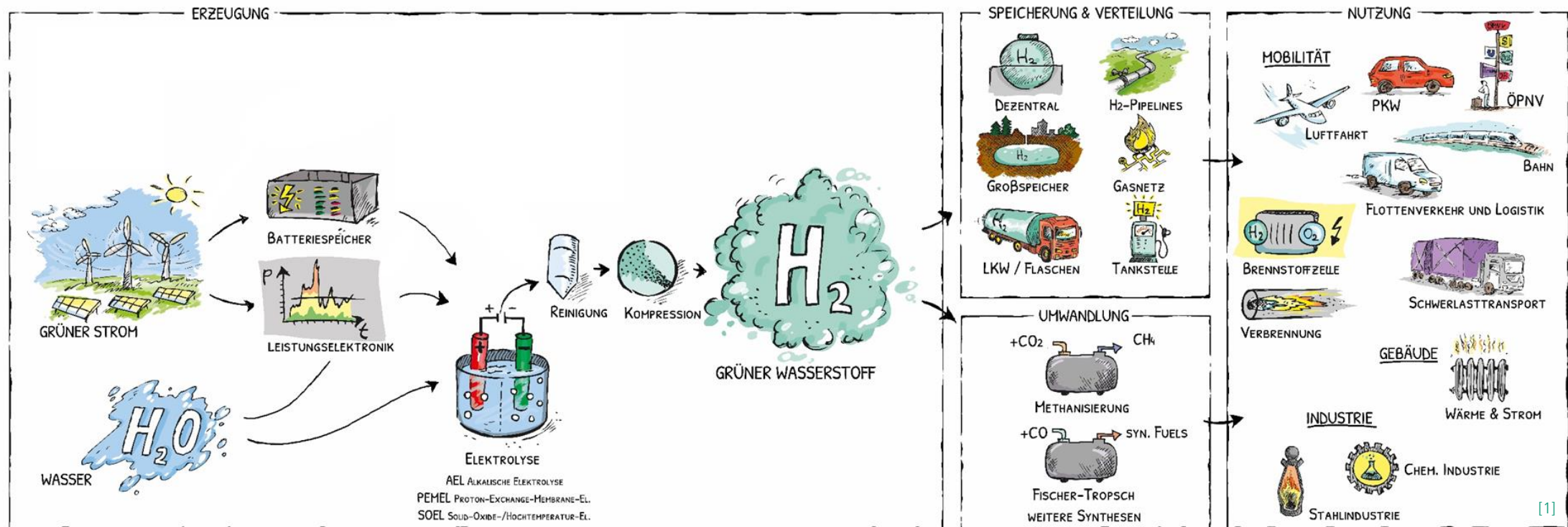
Priorisierung der industriellen H₂-Anwendung erscheint derzeit sinnvoll



- **Effektivster Einsatz** zur Dekarbonisierung im **Stahlsektor**, aber hohe Anlageninvestitionen
- Kurzfristiger Einsatz in der **Chemieindustrie** sinnvoll, da direkte Substitution von grauem H₂
- Hohes Potenzial für **begrenzt elektrifizierbare Mobilitätsanwendungen** (Schwerlast, Bahn, Flugzeug)

Quellen: ¹Agora Energiewende 2025, ²Fraunhofer ISE H₂-Roadmap 2019, ³www.umweltbundesamt.de, ⁴WWF 2023 The Dirty Thirty

Die Wasserstoff-Wertschöpfungskette birgt (noch) viele Herausforderungen



Wie kann grüner Wasserstoff erzeugt werden?

Wo leistet Wasserstoff den größten Beitrag zum Klimaschutz?

Wie entwickelt sich der Bedarf und kann dieser gedeckt werden?

Wie kommt der Wasserstoff vom Erzeuger zum Verbraucher?

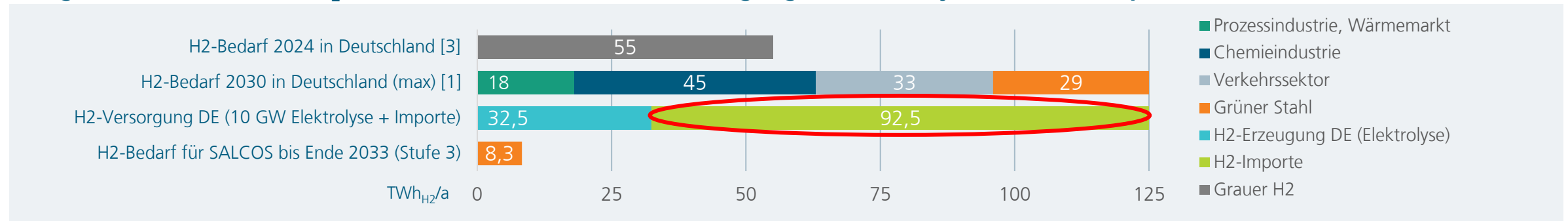
Wie gelingt der Einsatz von H₂-Technologien in der bestehenden Fabrik?

H₂-Technologien vs. Batterietechnologien in der Mobilität?

H₂-Importe sind notwendig zur Versorgung erster Großabnehmer in 2030

Paralleler Aufbau von Importinfrastrukturen für Pipeline- und Schiffstransporte

Prognose des maximalen H₂-Bedarfs in DE 2030 und der Versorgung aus Elektrolyse in DE und Importen nach DE ¹



1) Importe

2) Eigenerzeugung



3) H₂-Einsatz Bsp.
Grüne
Primärstahlproduktion
(Bsp. Salzgitter)

SALCOS®-Transformation der Salzgitter AG mit H₂-Einsatz in der Eisenerzdirektreduktion (»Salzgitter Low CO₂ Steelmaking«)

Bedarf ~ 250.000 Tonnen H₂ (8,3 TWh H₂) in 2033 (Stufe 3)

Grüne Rohstahlproduktion ~ 4,3 Mio. Tonnen

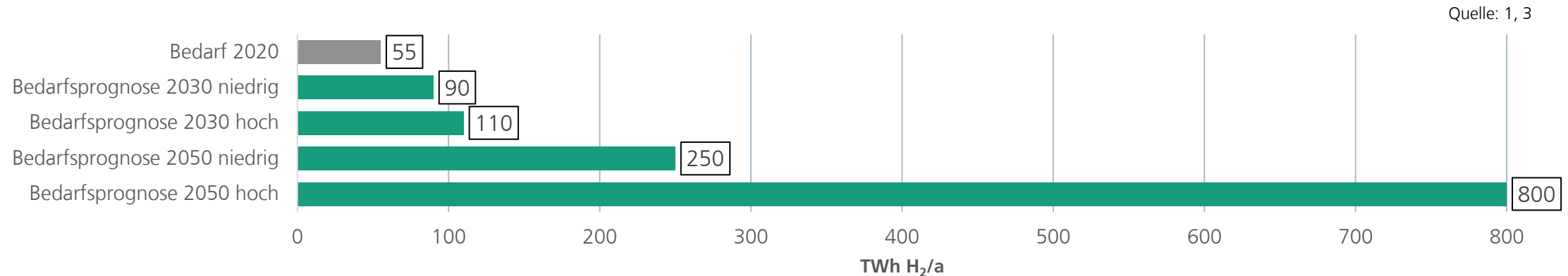
~ 95% CO₂-Einsparung ~ 7,6 Mio. t CO₂

➔ **Prognose 2030: H₂-Importbedarf bei ca. 50 – 70 % des H₂-Bedarfs in DE von 95-130 TWh ²**

Aktueller Wasserstoffbedarf in Deutschland und Prognosen bis 2050

Deutscher Wasserstoffbedarf (2020)¹

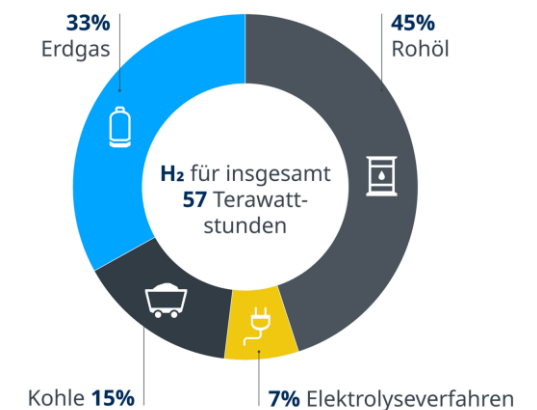
- Jährlich ca. **1,6 Mio. t_{H2}** bzw. **55 TWh_{H2}** (ca. 2% des globalen Bedarfs)



- Einsatz hpts. Petrochemie (Herstellung konventioneller Kraftstoffe) und Grundstoffchemie (Herstellung von Ammoniak, Methanol etc.)
- Deckung fast ausschließlich durch grauen Wasserstoff

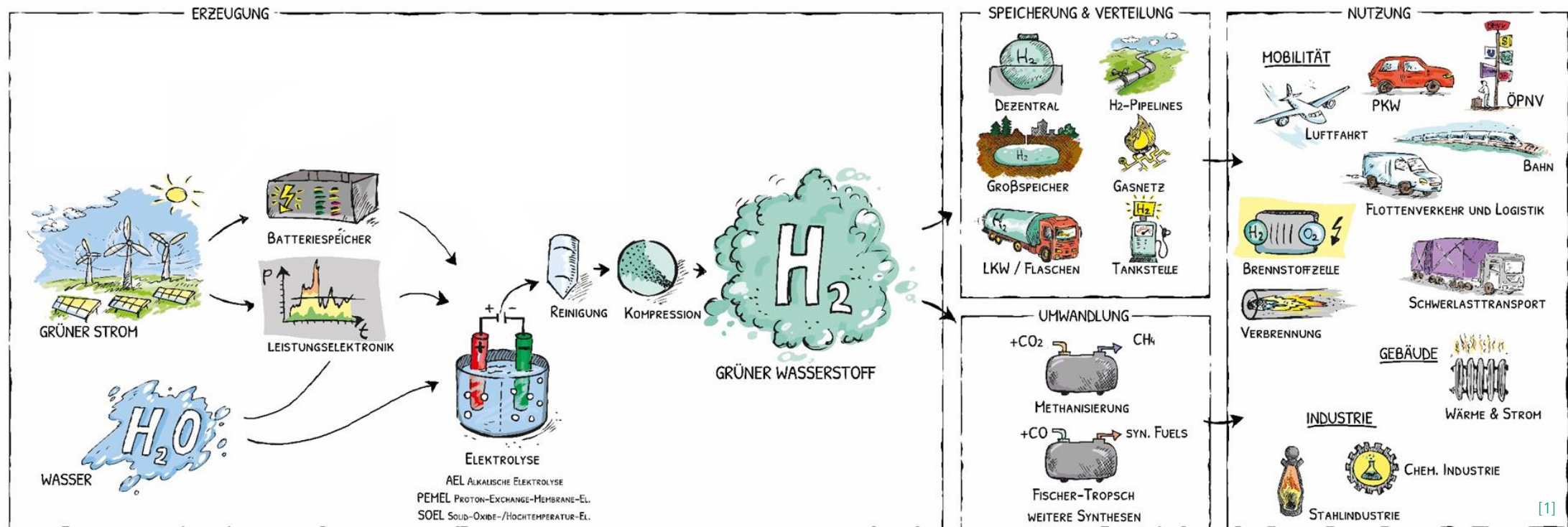
- Verdoppelung der H₂-Nachfrage bis 2030 erwartet**
- Entwicklung bis 2050 mit großer Unsicherheit je nach Studiendesign**

Grauer H₂-Bedarf in Deutschland (2015)²



Quelle: 1 BMWI (2020) Nationale H₂-Strategie, 2 Dena (2015), 3 Fraunhofer ISI & ISE (2019) »Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland«

Die Wasserstoff-Wertschöpfungskette birgt (noch) viele Herausforderungen



Wie kann grüner Wasserstoff erzeugt werden?

Wo leistet Wasserstoff den größten Beitrag zum Klimaschutz?

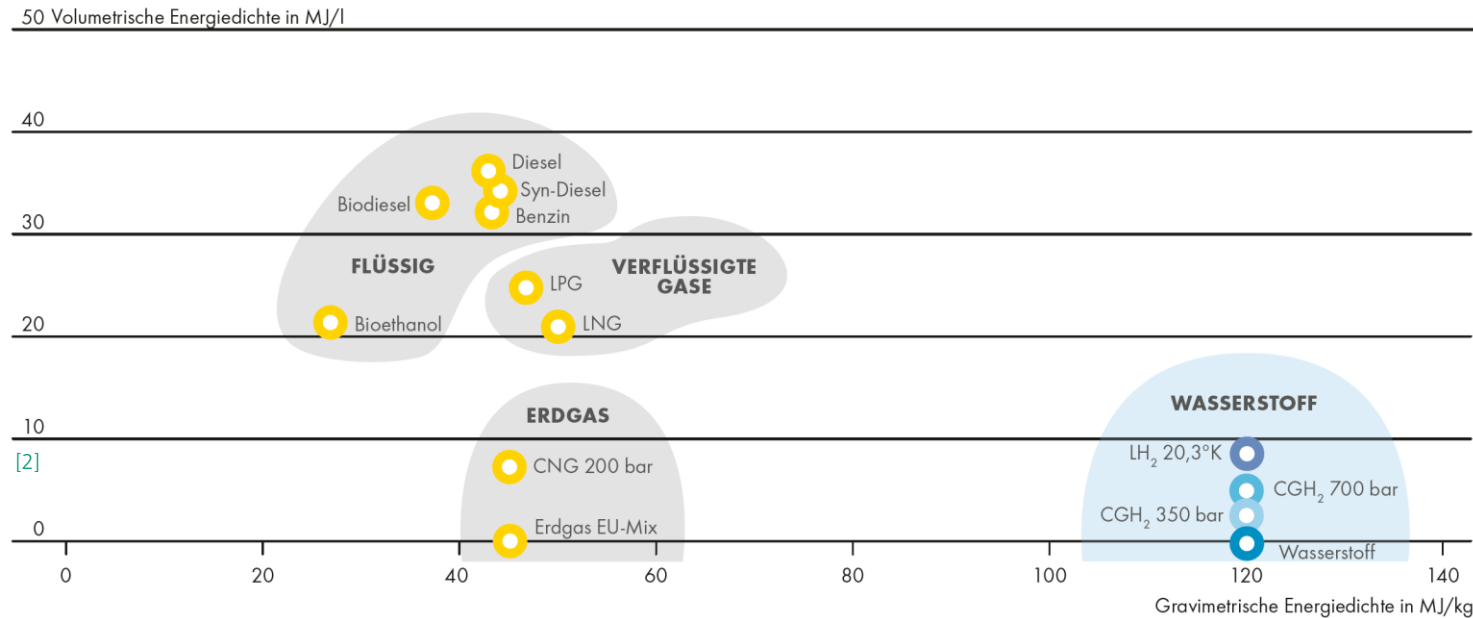
Wie entwickelt sich der Bedarf und kann dieser gedeckt werden?

Wie kommt der Wasserstoff vom Erzeuger zum Verbraucher?

Wie gelingt der Einsatz von H_2 -Technologien in der bestehenden Fabrik?

H_2 -Technologien vs. Batterietechnologien in der Mobilität?

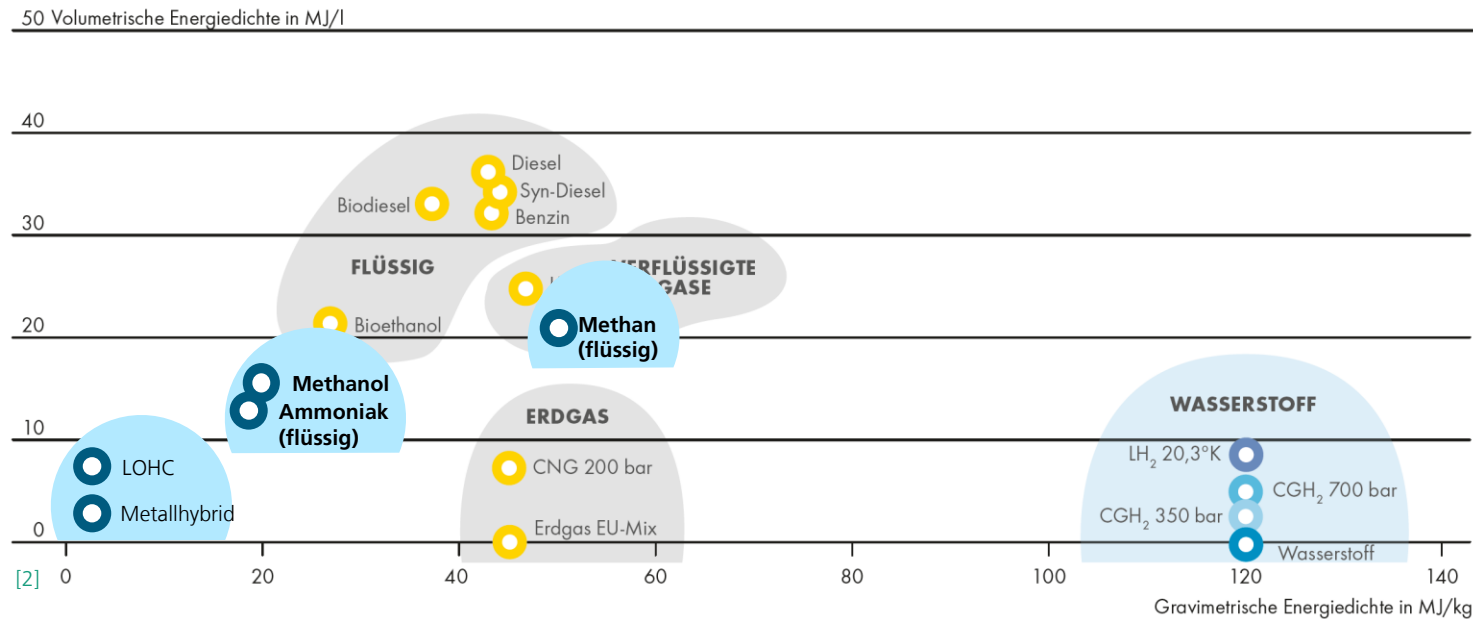
Speicher- und Transportmöglichkeiten für H₂ und H₂-Syntheseprodukte



- H₂ besitzt eine **sehr hohe gravimetrische Energiedichte** von ~120 MJ/kg (~ Faktor 3 im Vergleich zu flüssigen Kraftstoffen)+
- Unter Umgebungsbedingungen weist H₂ eine vergleichsweise **niedrige volumetrische Energiedichte** auf
- **Anwendung erfordert entsprechende Speicherung** bei gleichzeitiger Erhöhung der volumetrischen Energiedichte

Quelle: Abb. aus SHELL WASSERSTOFF-STUDIE ENERGIE DER ZUKUNFT?, 2017; TÜV Süd, 2021

Speicher- und Transportmöglichkeiten für H₂ und H₂-Syntheseprodukte



➔ **Umwandlung in Ammoniak, Methan oder Methanol für Schiffstransporte**

Druckspeicherung

(Compressed Gaseous Hydrogen, CGH₂)

- erfordert entsprechende Hochdruckspeicher, Herausforderung Wasserstoffversprödung bei hochfesten Stählen, daher heute zumeist aus Verbundmaterial (Problem: Recycling)
- Anwendung: kleine Speichermengen in mobilen Anwendungen (PKW, Nutzfahrzeuge, Züge)

Flüssige Speicherung

(Liquid Hydrogen, LH₂)

- Aufwand für Verflüssigung (−253 °C), Speicher sind meist doppelwandig und mit Dämmung (Reduktion der Verluste durch Verdampfen)
- Anwendung: z.B. Raumfahrt als Raketentreibstoff, stationäre Speicherung (insb. mit beschränkten Platz)

Metallhydridspeicher

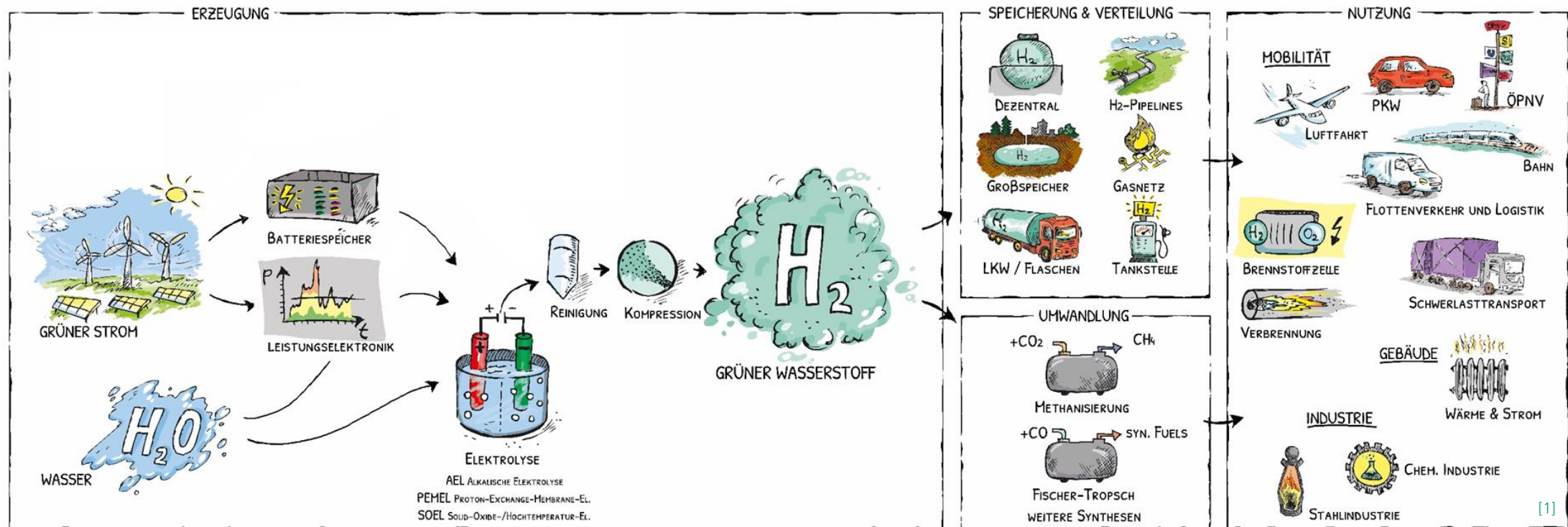
- relativ schwer, Spezialanwendungen: z.B. Kleinstspeicher, U-Boote

Chemische Speicher

(Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC)

- relativ schwer, aber einfachere Handhabung

Die Wasserstoff-Wertschöpfungskette birgt (noch) viele Herausforderungen



Wie kann grüner Wasserstoff erzeugt werden?

Wo leistet Wasserstoff den größten Beitrag zum Klimaschutz?

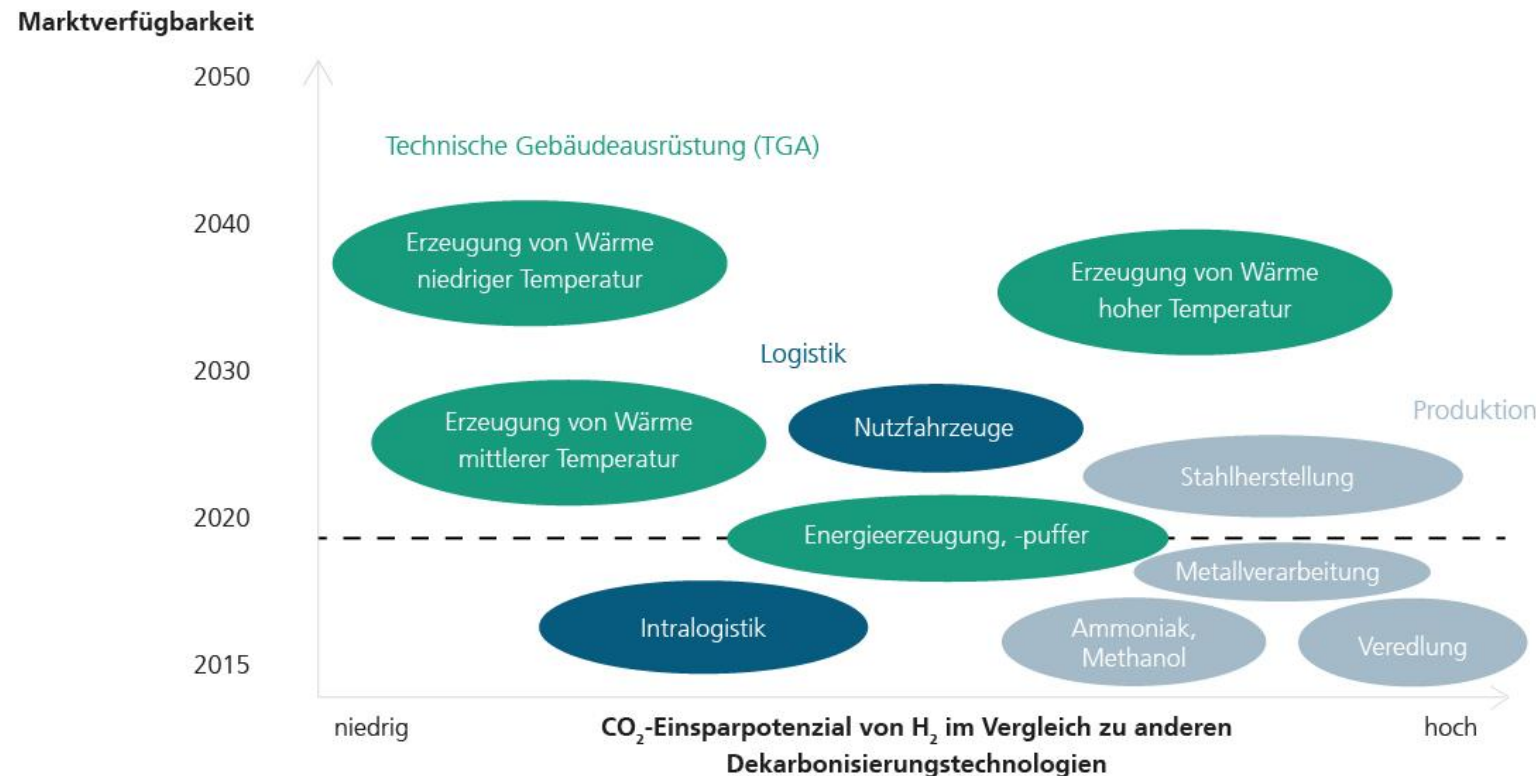
Wie entwickelt sich der Bedarf und kann dieser gedeckt werden?

Wie kommt der Wasserstoff vom Erzeuger zum Verbraucher?

Wie gelingt der Einsatz von H₂-Technologien in der bestehenden Fabrik?

H₂-Technologien vs. Batterietechnologien in der Mobilität?

Welche Anwendungen gibt es für Wasserstoff im Fabrikssystem?



Quelle: Imdahl et al. 2021

Priorisierung von Maßnahmen im Projekt Fabriktransformation

1) H₂ zur Erzeugung von erneuerbarem **Strom** und **Wärme**

- bei den meisten Fabrikssystemen einsetzbar

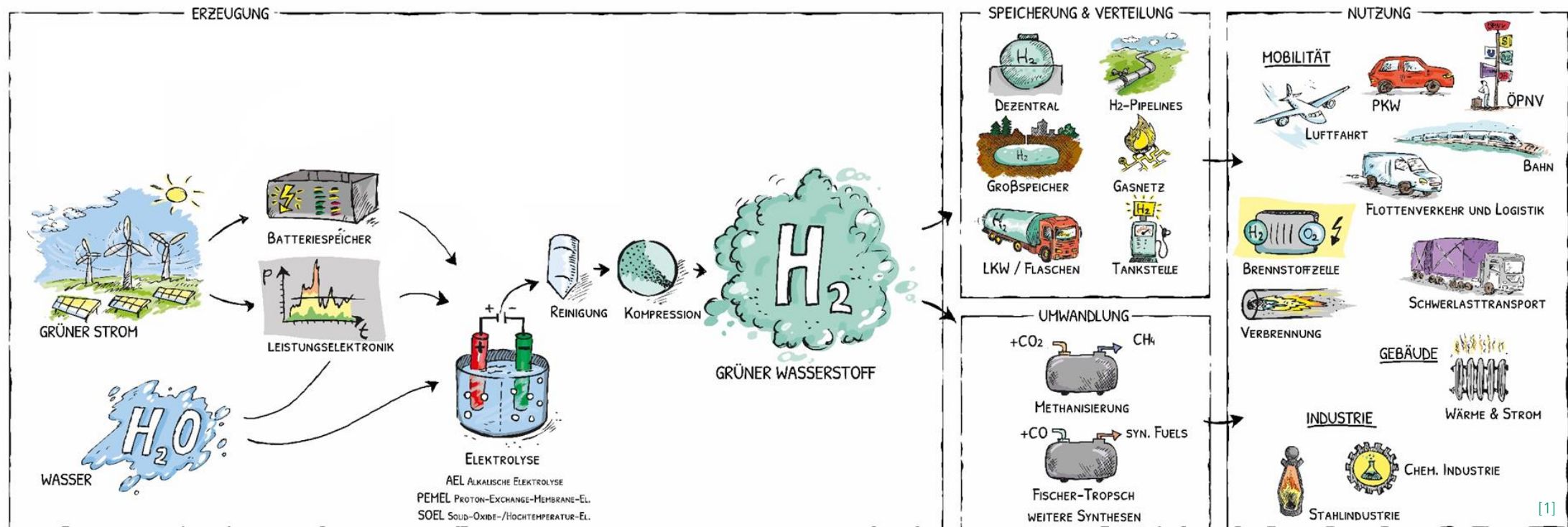
2) H₂ als **Treibstoff** zum Antrieb von **Fahrzeugen**

- CO₂-Einsparpotenzial nur bei **konventionellen Antrieben**

3) H₂ als **Prozessgas** in **Produktionsprozessen**

- Hohes CO₂-Einsparpotenzial**, aber nur **spezifisch** anwendbar

Die Wasserstoff-Wertschöpfungskette birgt (noch) viele Herausforderungen



Wie kann grüner Wasserstoff erzeugt werden?

Wo leistet Wasserstoff den größten Beitrag zum Klimaschutz?

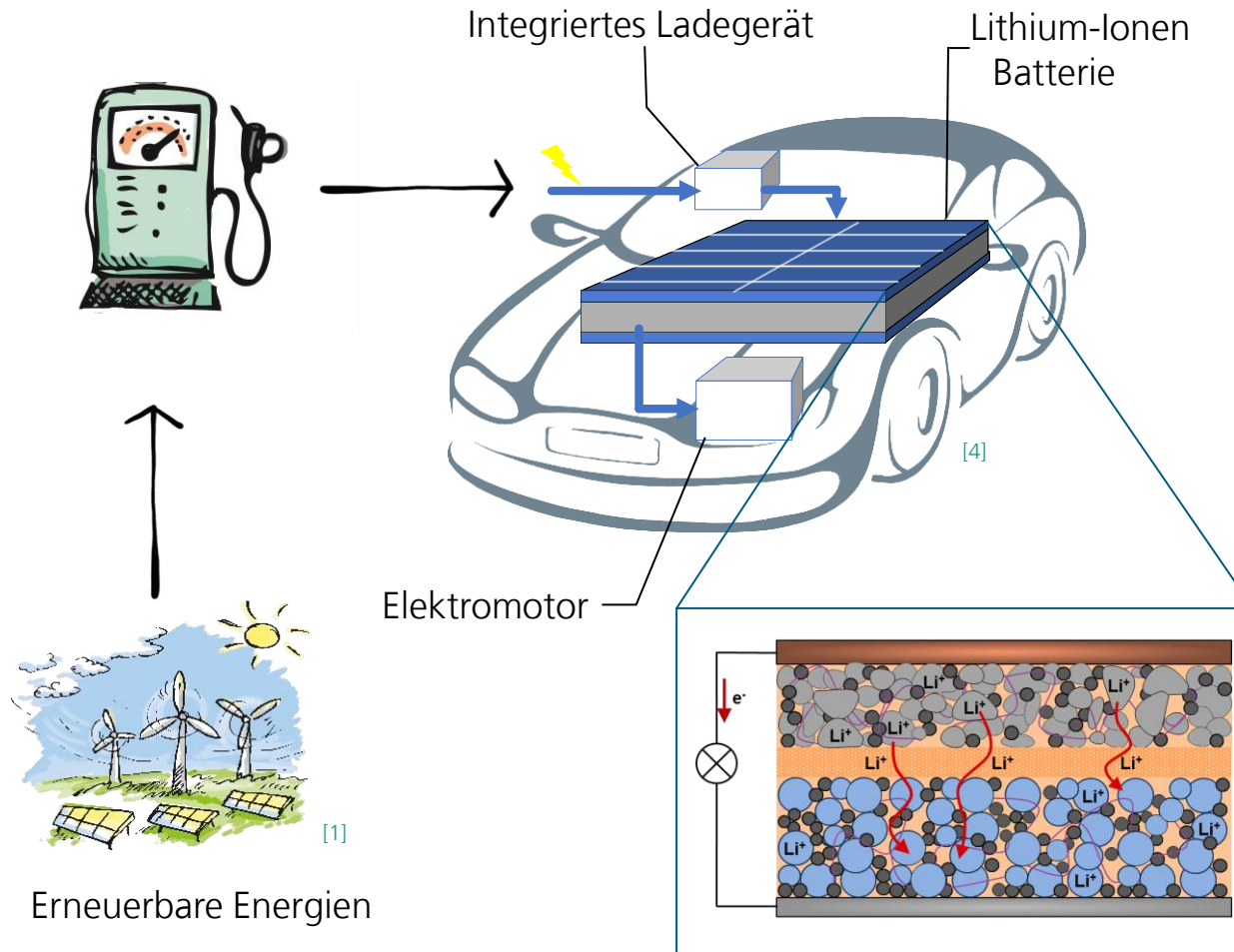
Wie entwickelt sich der Bedarf und kann dieser gedeckt werden?

Wie kommt der Wasserstoff vom Erzeuger zum Verbraucher?

Wie gelingt der Einsatz von H₂-Technologien in der bestehenden Fabrik?

H₂-Technologien vs. Batterietechnologien in der Mobilität?

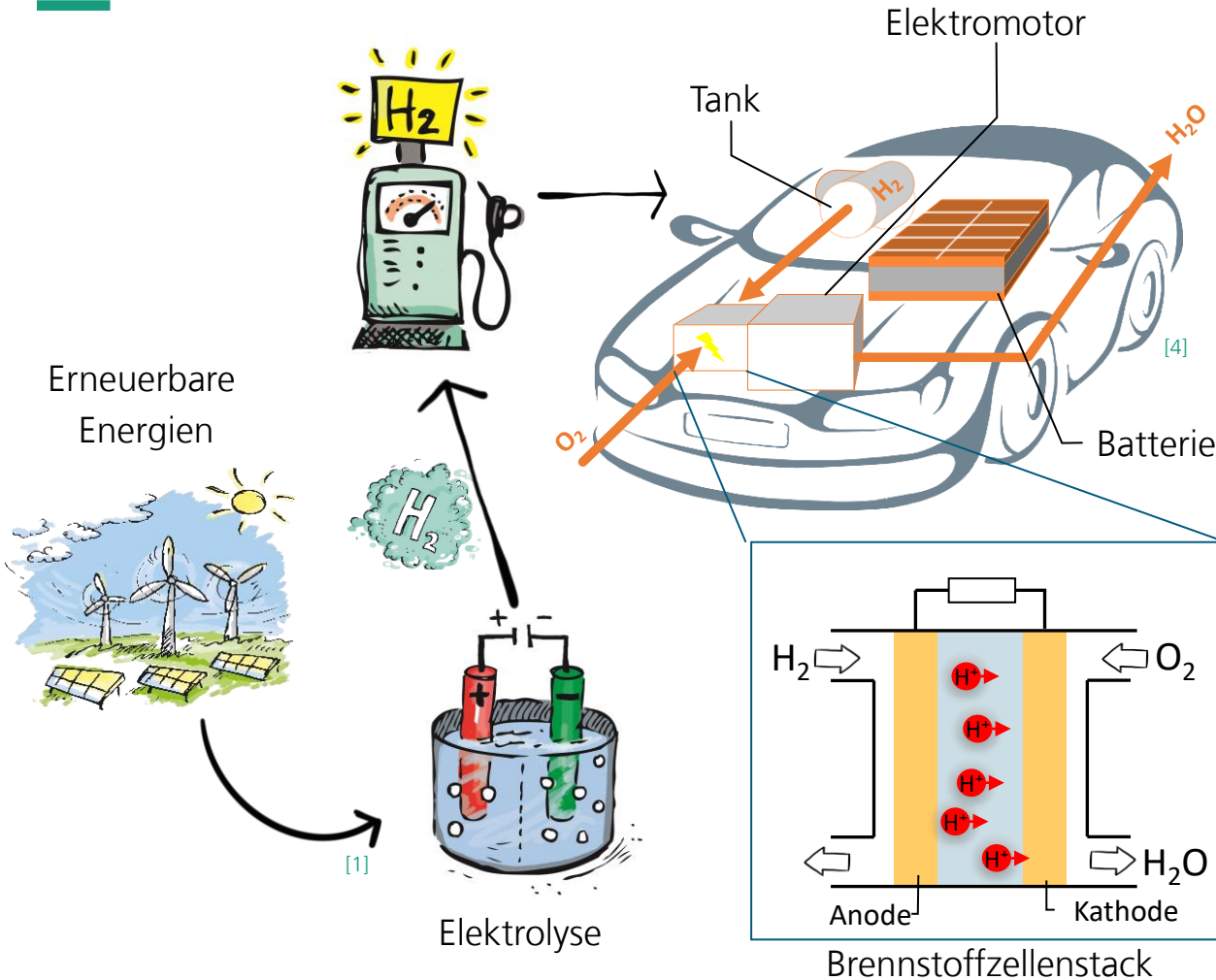
Wasserstoff vs. Batterien in der Mobilität



Batterieelektrische Antrieb

- Seit 2014 PKW in Serieneinsatz in stetig steigender Stückzahl am Markt
- LKW in zunehmend höheren Gewichtsklassen bei nahezu allen Herstellern verfügbar (Reduzierte Nutzlast durch Gewicht der Batterien → 2,5 – 4 t)
- Einsatz von Graphit, Kobalt, Nickel und Lithium

Wasserstoff vs. Batterien in der Mobilität



Brennstoffzellenantrieb

- Erweiterung eines Elektrofahrzeugs um Brennstoffzelle und Wasserstofftank
- Alle großen Hersteller arbeiten an Technologie, LKW in Kleinserien verfügbar
- Kleinere Batterien möglich, sodass Nutzlast ggü. BEV-LKW erhöht wird
- Antriebskosten durch Komplexität erhöht

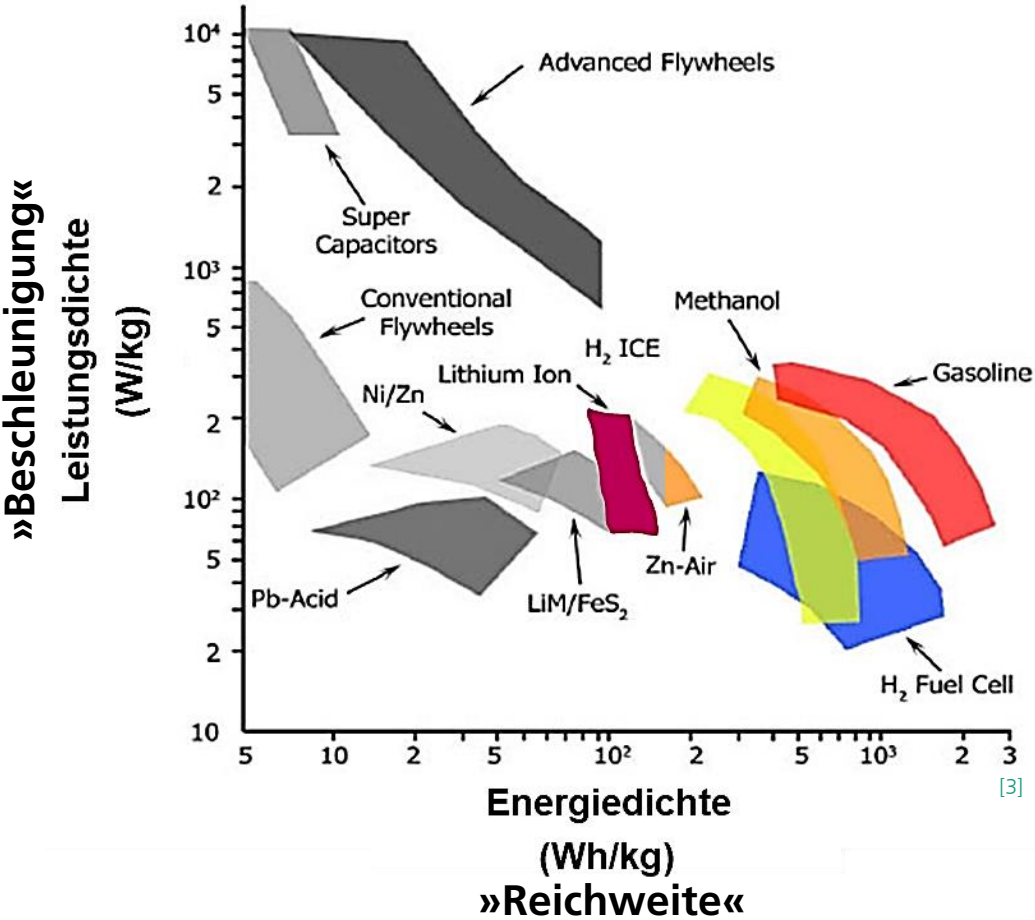
Wasserstoff vs. Batterien in der Mobilität

Entscheidend für die Auswahl der Antriebsart sind:

- Anwendung
- Betriebskosten
- Verfügbarkeit des Energieträgers

	E-LKW	BZ-LKW
Preis des Energieträgers	0,7 €/kWh	20 €/kg H ₂
Verbrauch	110 kWh/100 km	8 kg/100 km
Preis pro km	0,77 €	1,6 €

(NOW, 2024)



Wasserstoff vs. Batterien in der Mobilität

Entscheidend für die Auswahl der Antriebsart sind:

Anwendung

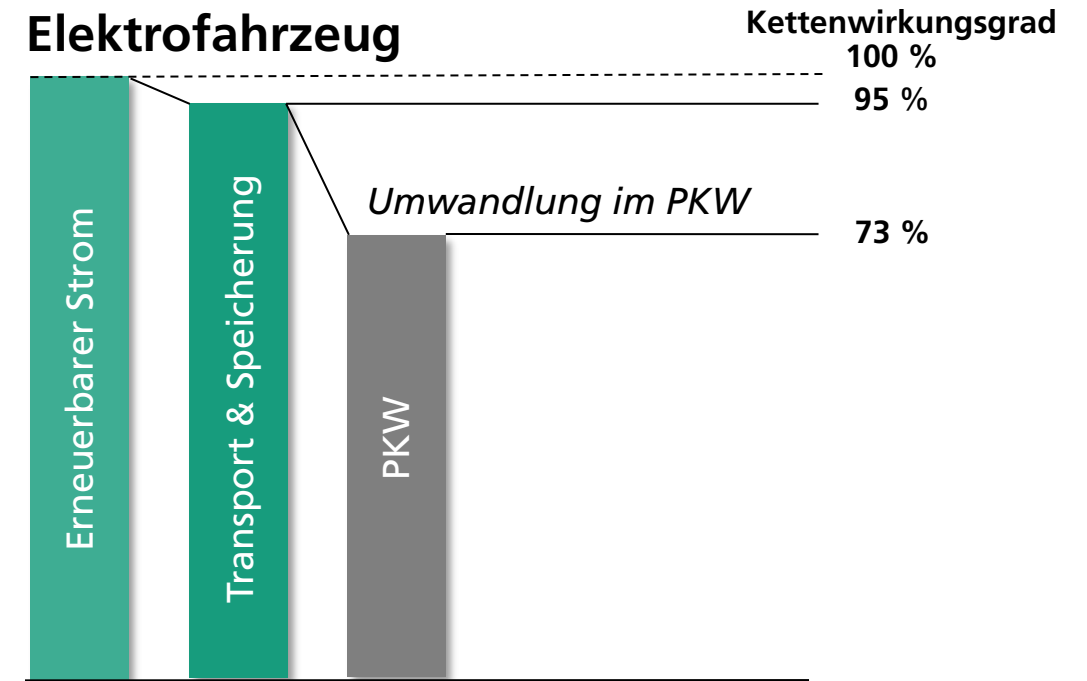
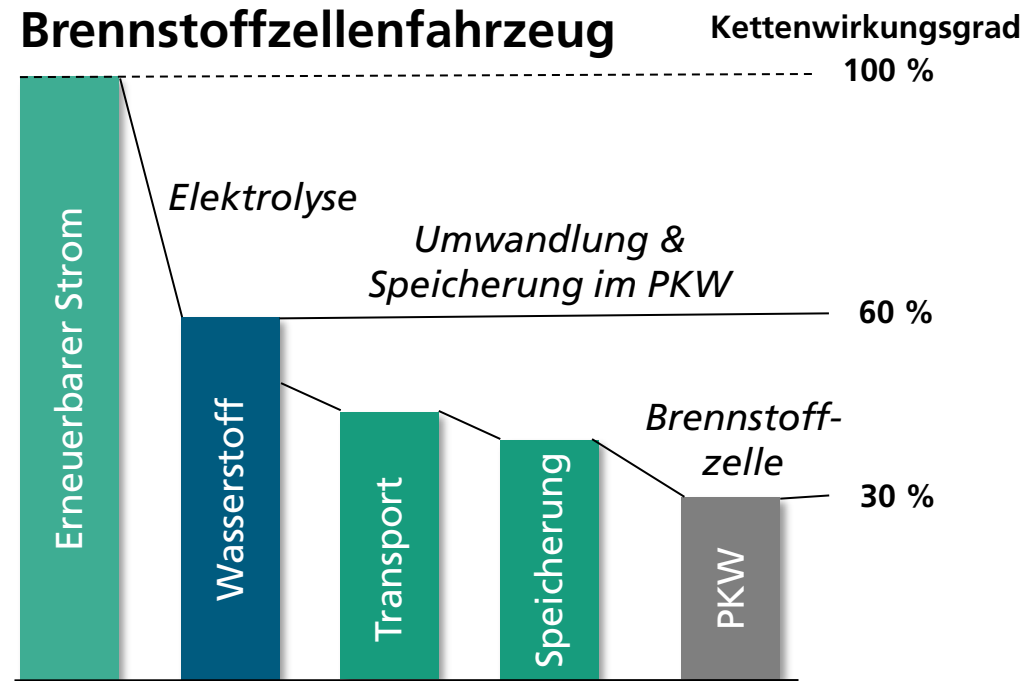
Betriebskosten

Verfügbarkeit des Energieträgers

- **Ladestationen** für Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge im Nutzfahrzeugsektor **nicht ausreichend verfügbar**
- Betankung von **Brennstoffzellen-LKW** in etwa so lange wie die Betankung mittels Diesel (< 5 Minuten)
- Laden von **E-LKW** in Ruhepausen **9-11 Stunden**
- Bis 2030 werden **35.000 Ladesäulen** in Europa mit Ladeleistung von **min. 400 kW** für E-LKW benötigt
Aktuell: 122 Ladesäulen an 54 Standorten
- **140 H₂-Tankstellen** in Deutschland reichen mittelfristig, um den Bedarf von **250.000 Brennstoffzellen-LKW** zu decken

Unterschiede zwischen Batterien und Brennstoffzellen

Energiewandlungsketten

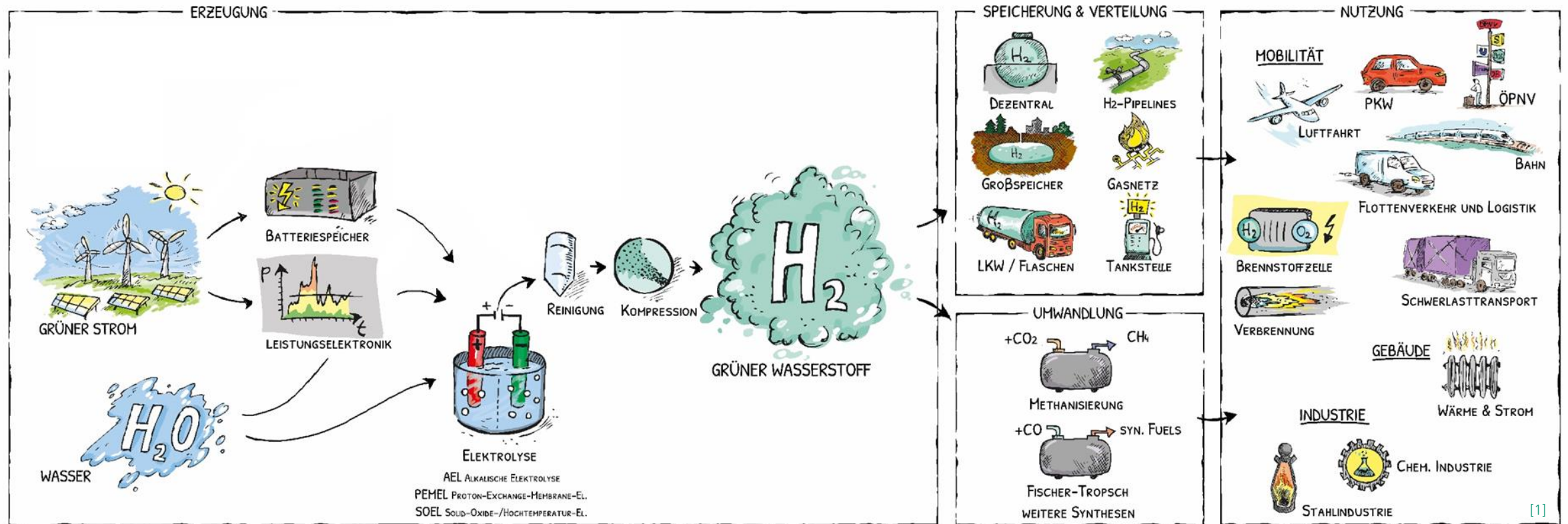


Aufgrund der hohen Verluste sollte Wasserstoff primär dort eingesetzt werden, wo

1. keine effizienteren Alternativen zur Dekarbonisierung zur Verfügung stehen
2. ein hohes CO₂-Reduktionspotenzial je eingesetzter H₂-Menge vorhanden ist

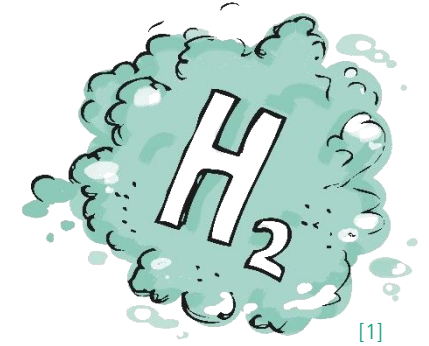
Grüner Wasserstoff als Hoffnungsträger der Energiewende

Komplexe Wertschöpfungsketten und eine Vielzahl potenzieller Anwendungen



Komplexe Wertschöpfungsketten und eine Vielzahl (zukünftiger) Anwendungen

Zusammenfassung



- Grüner Wasserstoff nimmt eine **zentrale Rolle in der Energiewende** ein
- Einheitliche **Zertifizierung von grünem Wasserstoff** ist zwingend erforderlich (THG-Intensität)
- **Elektrolyseanlagen** sollten in **großen Maßstab erprobt** und die **Produktionskapazitäten** schnell ausgeweitet werden
- Durch **Skalierungseffekte** reduzieren sich die **CAPEX** von Elektrolyseuren bis **2030** deutlich – **Kostenziel < 2,5 €/kg_{H2} erreichbar**
- **Grüner H₂** ist insbesondere Schlüsselement in der **Dekarbonisierung kohlenstoffintensiver Industrien wie Stahl- und Chemieindustrie**
- Derzeitige Planungen sehen **Deutschland** hauptsächlich als **H₂-Importeur** vor – begrenzte Eigenversorgung trotz **10 Gigawatt-Elektrolyseleistung**
- Importmöglichkeiten für grünen H₂ müssen schnell erschlossen werden, dies beinhaltet auch **Investitionen in ausländische Erzeugungskapazitäten** und die **Weiterentwicklung von Speichertechnologien** (z.B. Verflüssigung und Tanks für LH₂)

Zusammenfassung



- In **Fabriksystemen** ist der Einsatz von grünem H_2 vor allem in der **TGA als Querschnittstechnologie** geeignet, um branchenübergreifend Strom und Wärme zu erzeugen
- Für **Mobilitätsanwendungen** ist ein **Ausbau der Ladeinfrastruktur** vor allem im **Nutzfahrzeugsektor** nötig, um batterieelektrische und brennstoffzellenbetriebene Antriebe zu unterstützen
- Die Anwendung von **batteriebetriebenen** und **brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen** ist abhängig von den **Investitionskosten, Preis der Energieträger** und **verfügbarer Ladeinfrastruktur**
- Der **Kettenwirkungsgrad** von **Elektrofahrzeugen** ist **deutlich höher als** der von **Brennstoffzellenfahrzeugen**, weshalb der Einsatz von H_2 im Mobilitätssektor nur im Falle von **fehlenden Alternativen zur Dekarbonisierung** oder bei **hohem CO_2 -Einsparpotenzial** zu empfehlen ist

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Urheberrechtshinweis

Die Inhalte dieser Präsentation (Texte, Grafiken, Fotos, Logos etc.) und die Präsentation selbst sind urheberrechtlich geschützt. Sie wurden durch das Fraunhofer IST selbstständig erstellt. Ohne schriftliche Genehmigung des Fraunhofer IST dürfen dieses Dokument und/oder Teile daraus nicht weitergegeben, modifiziert, veröffentlicht, übersetzt oder reproduziert werden, weder durch Fotokopien, Mikroverfilmung, noch durch andere – insbesondere elektronische – Verfahren. Der Vorbehalt erstreckt sich auch auf die Aufnahme in oder die Auswertung durch Datenbanken. Zuwiderhandlungen werden gerichtlich verfolgt.

© Copyright Fraunhofer IST, 2025

Bei Fragen wenden Sie sich bitte an:

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST
Dr. Simone Kondruweit | Riedenkamp 2 | 38108 Braunschweig
info@ist.fraunhofer.de

Bildnachweise

[1] Workshop Grüner Wasserstoff, Marén Gröschel

[2] SHELL WASSERSTOFF-STUDIE ENERGIE DER ZUKUNFT?, TÜV Süd, 2017

[3] Needs, resources and climate change: Clean and efficient conversion technologies, Ahmed F. Ghoniem, 2011

[4] Automobile, Vehicle, Noble royalty-free stock illustration, Pixabay, 2015