

Kurzstudie: Bedingungen für eine ökologisch und sozial verträgliche
Entwicklung von Wasserstofftechnologien

Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e.V.



Bearbeiter*innen:

Tapio Schmidt-Achert

Dr. Anika Neitz-Regett

Sofia Haas

Katharina Gruber

Auftraggeber:



NABU (Naturschutzbund Deutschland) e. V.

Charitéstraße 3

10117 Berlin

www.NABU.de

Ansprechpartnerin:

Dr. Arianna Ferrari

Referentin für neue Technologien

Arianna.Ferrari@NABU.de

München, 8.2.2022

Impressum: Erstellt im Auftrag des NABU Bundesverbands.



Bedingungen für eine ökologisch und sozial verträgliche Entwicklung von Wasserstofftechnologien

Tapio Schmidt-Achert, Anika Neitz-Regett, Sofia Haas,
Katharina Gruber

08.02.2022

Inhaltsverzeichnis

Aktuelles

Teil 1 „Überblick über die Nachhaltigkeit von Wasserstofftechnologien“:

1. Wasserstoffarten und -prozessketten
2. Life Cycle Assessment (LCA) der H₂-Produktion
3. Weitere Nachhaltigkeitskriterien






Teil 2 „Einordnung der Rolle von Wasserstoff im Energiesystem“

1. Aktuelle Szenarien
2. Mögliche Anwendungen und deren Bewertung

Aktuelles

Die Vermeidung von Methan-Emissionen nimmt im Gaspaket der EU eine zentrale Rolle ein

Teil des Gaspakets ist ein Gesetzesvorschlag zur Reduktion von Methan-Emissionen im Energiesektor:

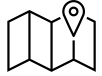
-  • Verpflichtung des Öl-, Gas- und Kohlesektors, Methan-Emissionen zu messen, zu melden und zu überprüfen
-  • Strengere Vorschriften zur Erkennung und Reparatur von Methan-Leckagen
-  • Absichtliches Ablassen und Abfackeln von Gas nur noch in absoluten Ausnahmefällen erlaubt
-  • Verpflichtung der Mitgliedsstaaten zur Entwicklung von Plänen zur Verringerung der Methan-Emissionen
-  • Implementierung von Tools zur Verbesserung der Transparenz von Methan-Emissionen
 - Transparenz-Datenbank: Veröffentlichung der Daten von Importeuren und europäischen Betreibern
 - Monitoring der Methan-Emissionshotspots innerhalb und außerhalb der EU mithilfe von Satelliten

→ Flüchtige Methan-Emissionen als ein wichtiger Treiber für die Klimabilanz erdgasbasierter Produkte (wie z.B. blauer Wasserstoff) wird auf EU-Ebene durch das Gaspaket adressiert.

Herkunft und Anwendungsfelder von Wasserstoff im Ampel-Koalitionsvertrag



Quelle: Koalitionsvertrag [2]



Herkunft:

- Erste Priorität hat einheimische Erzeugung von H₂ aus Erneuerbaren Energien
- Verdopplung der Elektrolyseleistung ggü. H₂-Strategie (10 GW bis 2030) insb. in Verbindung mit Offshore-Wind + Aufbau der benötigten Infrastruktur
- Aber: Für einen schnellen Hochlauf und bis zu günstiger Versorgung mit grünem H₂ wird auf eine technologieoffene Ausgestaltung der H₂-Regulatorik gesetzt
- Raum für z.B. blauen H₂, Rolle von H₂ aus Kernenergie unklar
- Neben einheimischer Produktion: Importpartnerschaften mit Europa und weltweit (z.B. Chile, Saudi-Arabien, Australien, Namibia)
- Dabei Berücksichtigung klimapolitischer Auswirkungen und fairer Wettbewerbsbedingungen für deutsche Wirtschaft + einheitliche H₂-Zertifizierung auf EU-Ebene



Anwendungen:

- Keine Begrenzung auf bestimmte Anwendungen, aber vorrangige Nutzung in Wirtschaftssektoren, in denen es nicht möglich ist direkt zu elektrifizieren

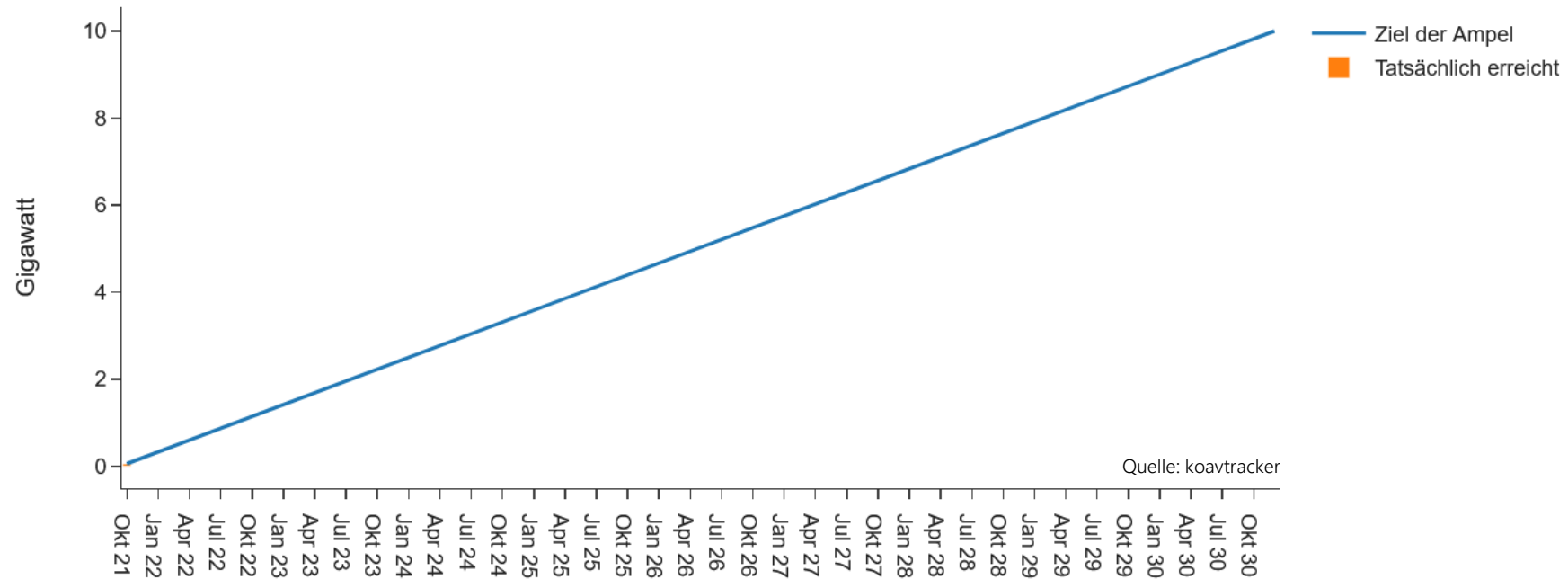
Fazit: Fokus grüner H₂ aus DE in nicht-elektrifizierbaren Anwendungen, aber ergänzende Importe notwendig und Raum für blauen H₂ als Brückentechnologie



10 GW Elektrolyse bis 2030



Installierte Leistung Elektrolyse



Ende September 2021: 0,061 GW

→ Bis Ende 2030 muss im Durchschnitt 1 GW (Leistung Datteln IV) pro Jahr zugebaut werden

Literatur

- [1] Europäische Kommission (2021): Commission proposes new EU framework to decarbonise gas markets, promote hydrogen and reduce methane emissions; https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6682
- [2] Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen – Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit

Teil 1

Überblick über die
Nachhaltigkeit von
Wasserstofftechnologien

1. Wasserstofffarben und -prozessketten

Die Wasserstoff-Farbenlehre – Betrachtete H₂-Produktionsrouten

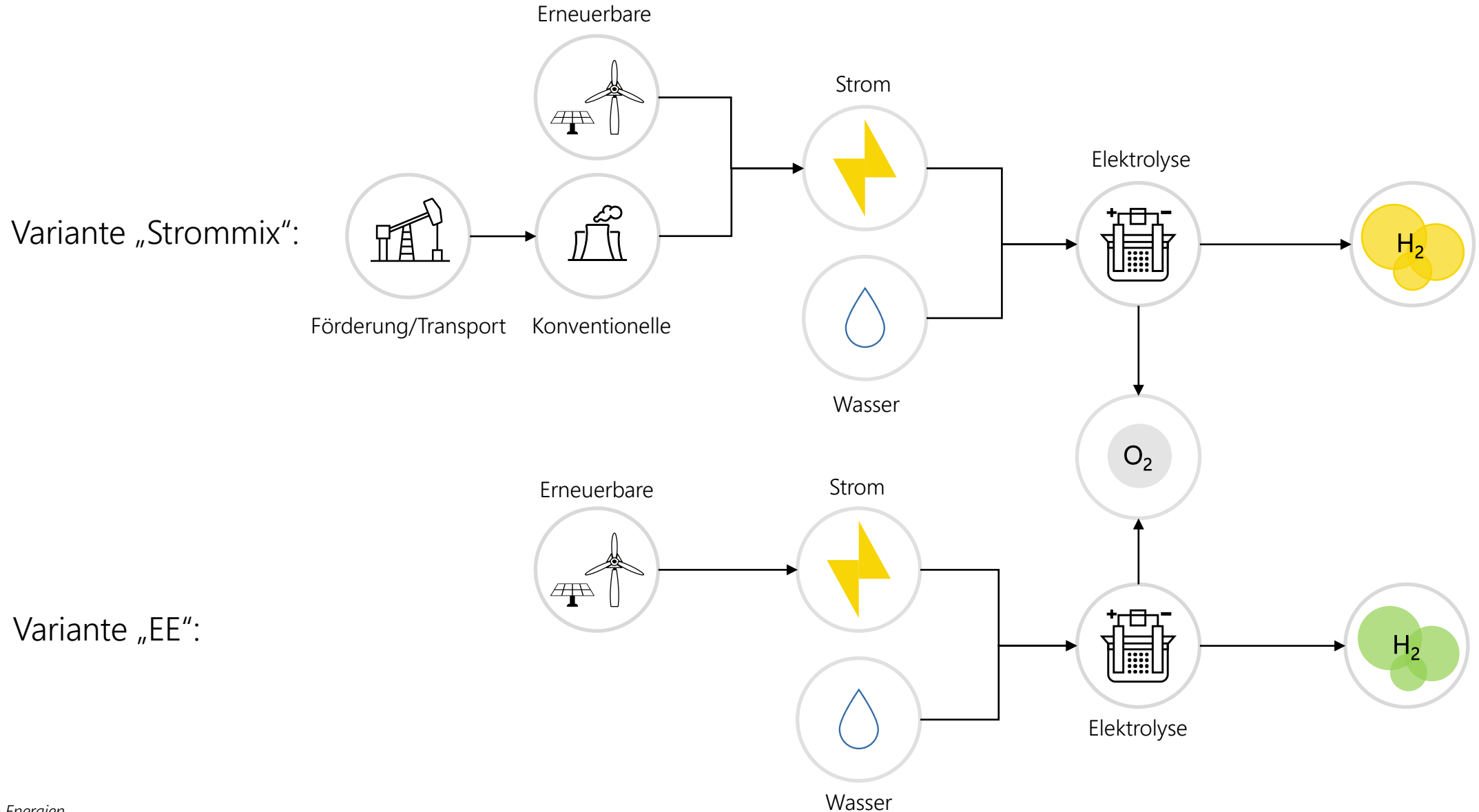
Schlüsselressource	Prozess	Kohlenstoff	Wasserstoff-Farbe	Technology Readiness Level (TRL)
<p>Fossiler Brennstoff</p>	<p>Referenz: Erdgasreformierung</p>	<p>Gasförmig - frei</p>	<p>H₂ Grau</p>	Erdgasreformierung: 9
	<p>Erdgasreformierung + CCS</p>	<p>Gasförmig - gespeichert</p>	<p>H₂ Blau</p>	Erdgasreformierung: 9 CCS: 7-8 [2]
<p>Erneuerbare Energie</p>	<p>Pyrolyse</p>	<p>Fest</p>	<p>H₂ Türkis</p>	Katalytisch: 4 [1] Thermisch: 4 [1] Plasma: 8 [1]
	<p>Elektrolyse</p>		<p>H₂ Grün</p>	AEL: 9 [1] PEM: 7 [1] SOEC: 6 [1]
<p>Strommix</p>	<p>Elektrolyse</p>		<p>H₂ Gelb</p>	AEL: 9 [1] PEM: 7 [1] SOEC: 6 [1]

Bedeutung der Technology Readiness Level

Definition der TRL laut NASA [3]

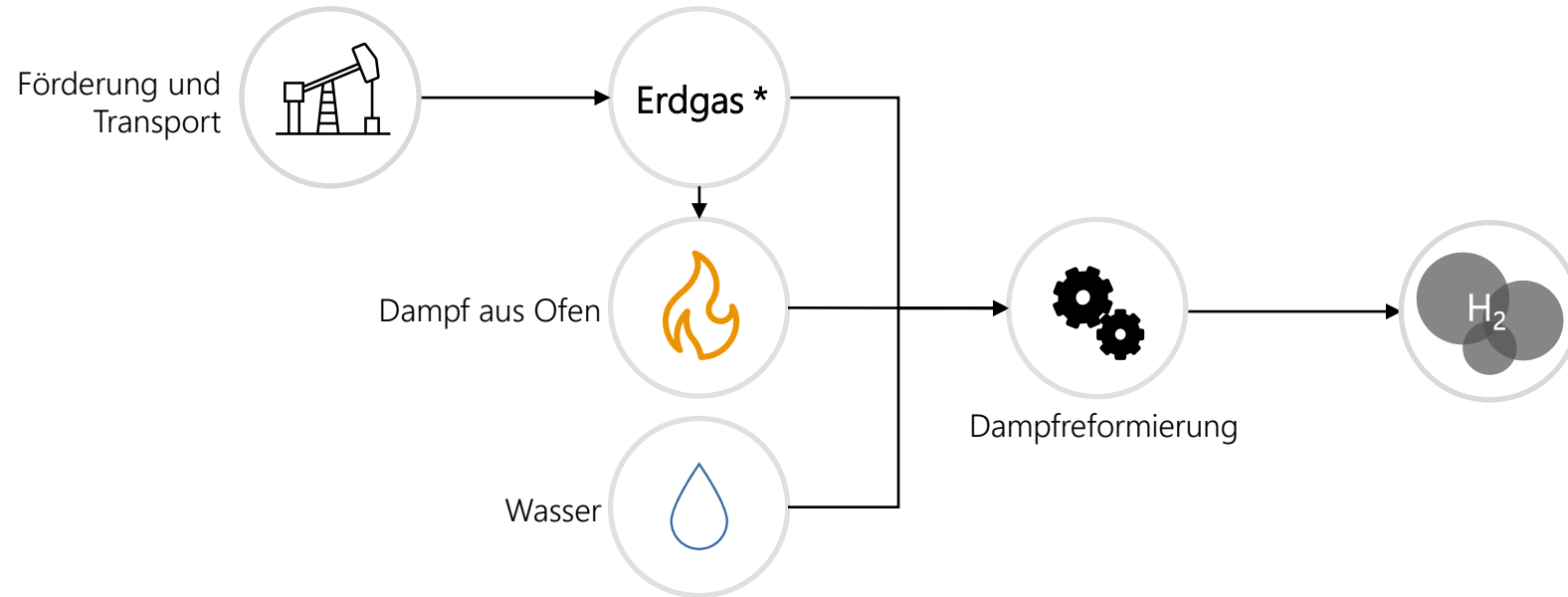
Technology Readiness Level (TRL)/ Technologie-Reifegrad	Beschreibung
TRL 1	Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips
TRL 2	Beschreibung der Anwendung einer Technologie
TRL 3	Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie
TRL 4	Versuchsaufbau im Labor
TRL 5	Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
TRL 6	Prototyp in Einsatzumgebung
TRL 7	Prototyp im Einsatz
TRL 8	Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich
TRL 9	Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

Schematische Prozesskette für H₂ aus Elektrolyse

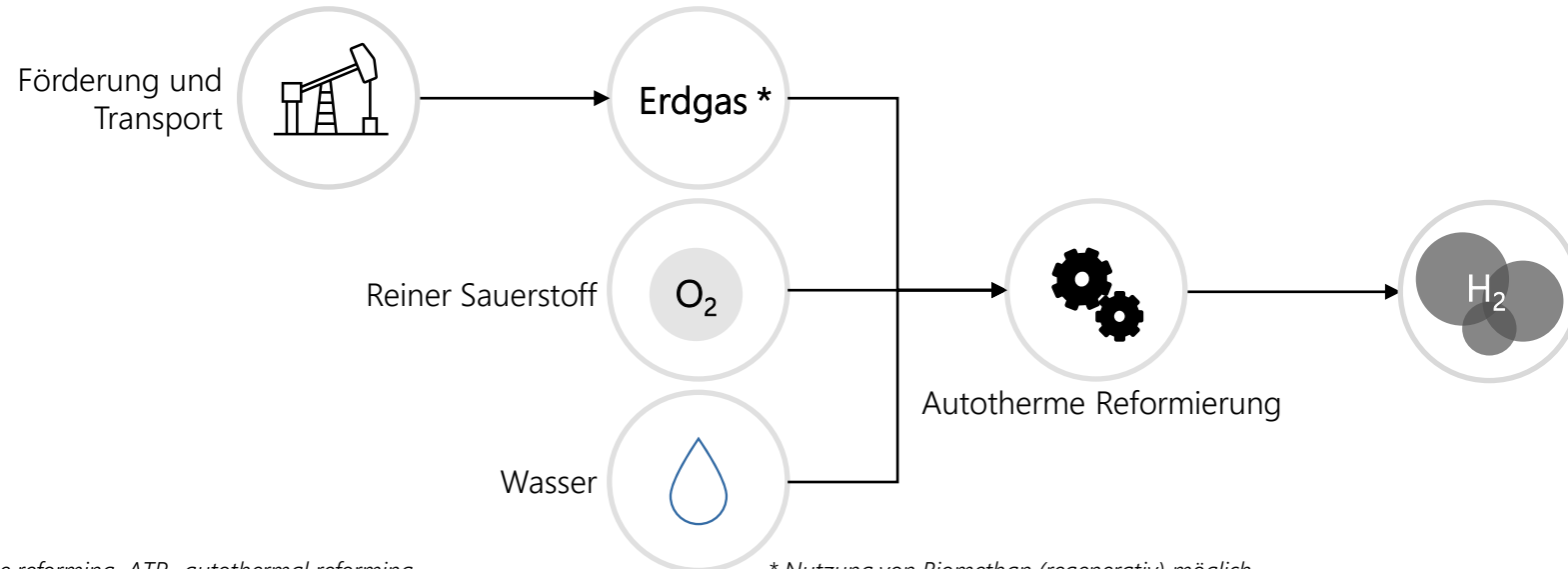


Schematische Prozesskette für H₂ aus Reformierung ohne CCS

Variante „SMR“:

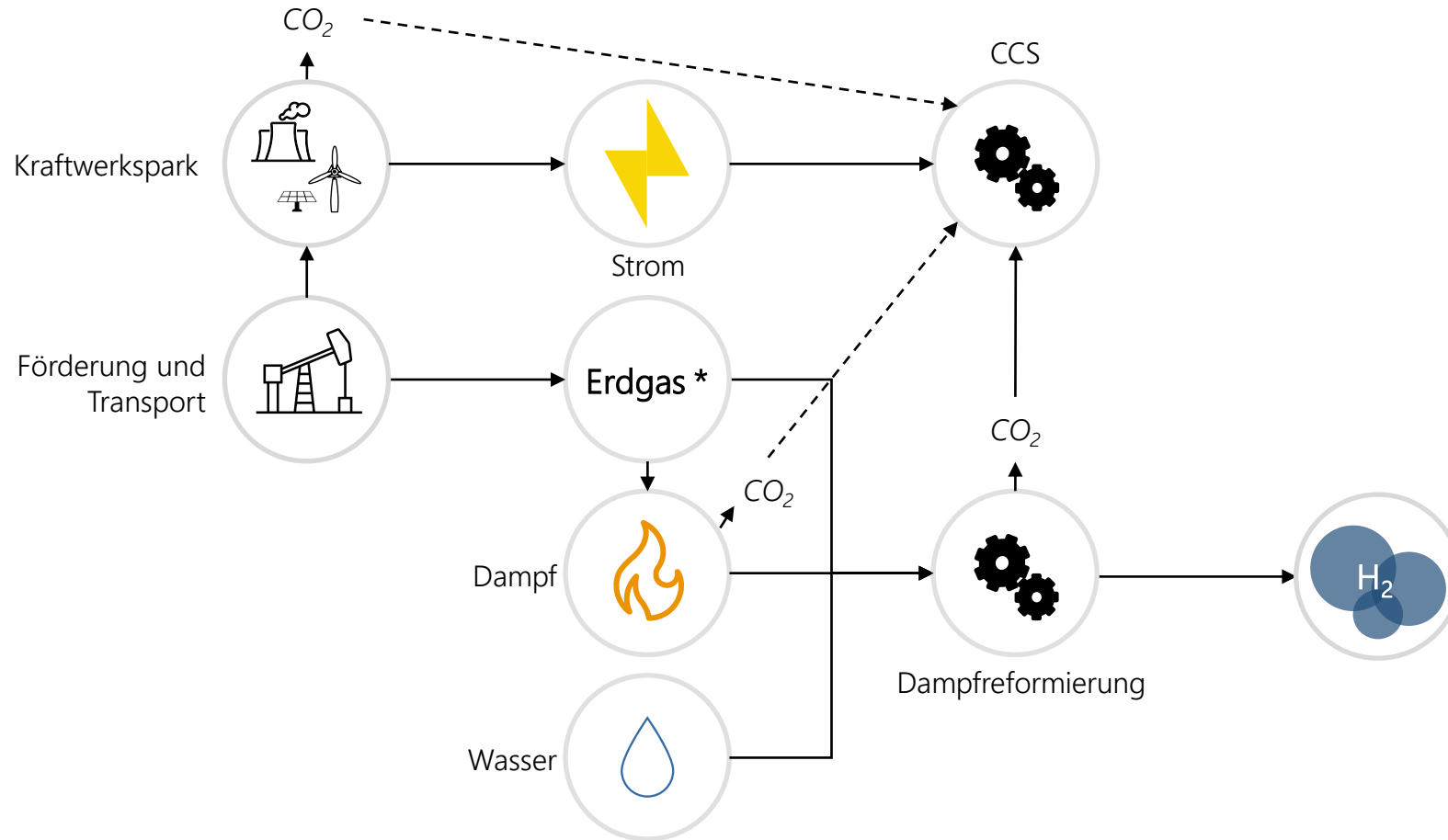


Variante „ATR“:

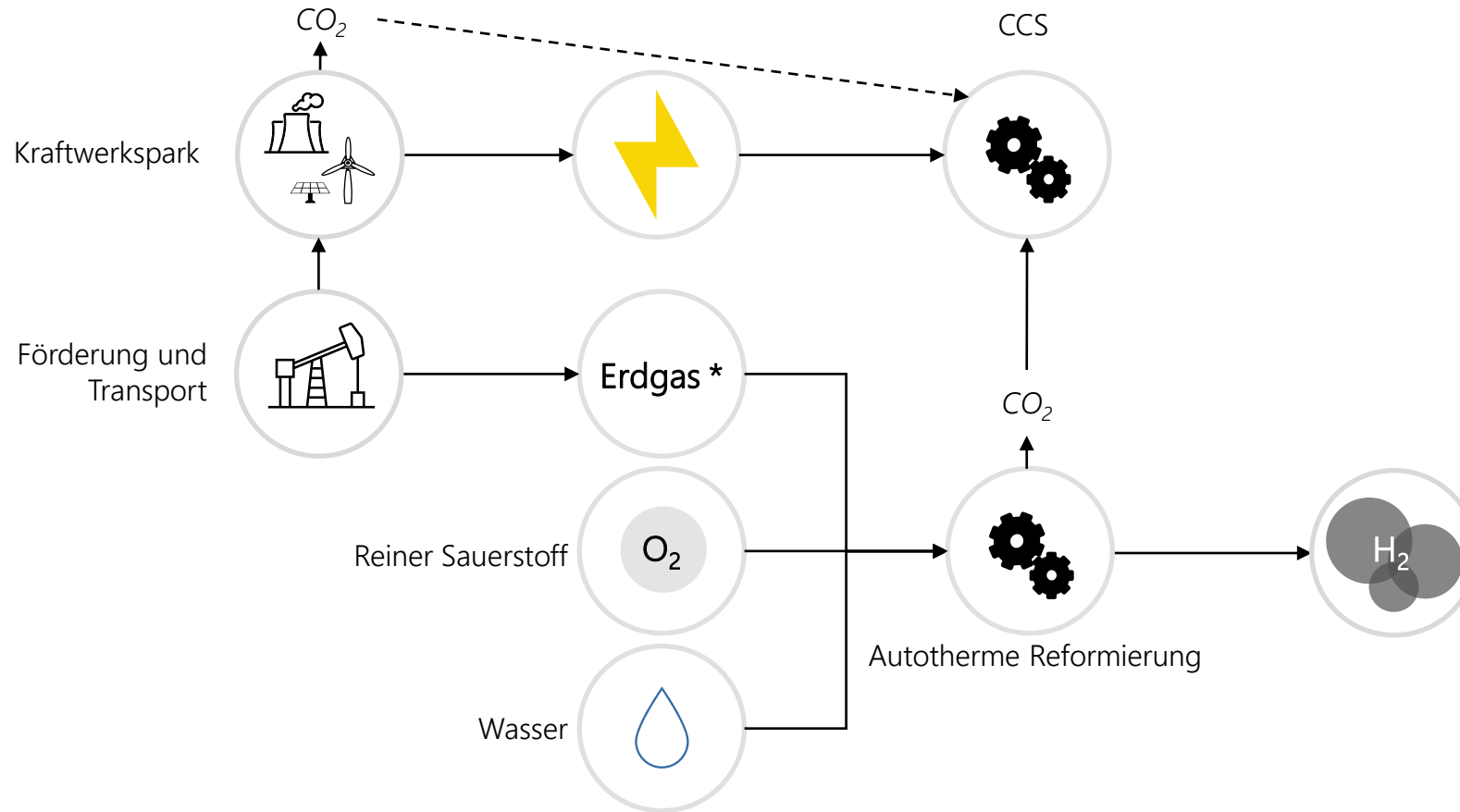


* Nutzung von Biomethan (regenerativ) möglich

Schematische Prozesskette für H₂ aus Dampfreformierung (SMR) mit CCS

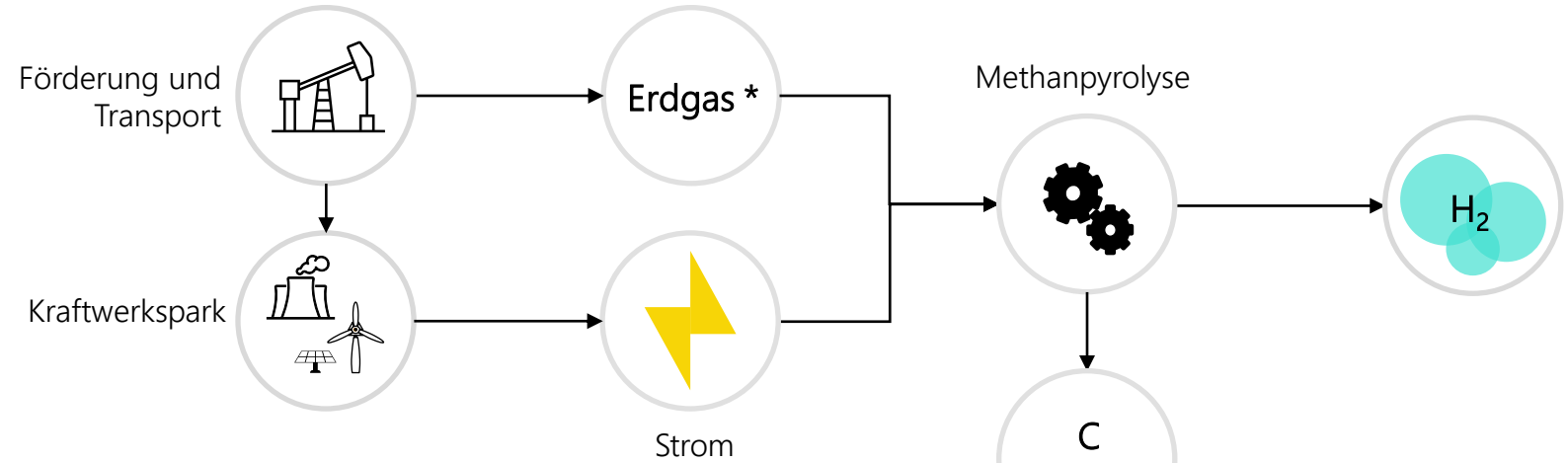


Schematische Prozesskette für H₂ aus autothermer Reformierung (ATR) mit CCS

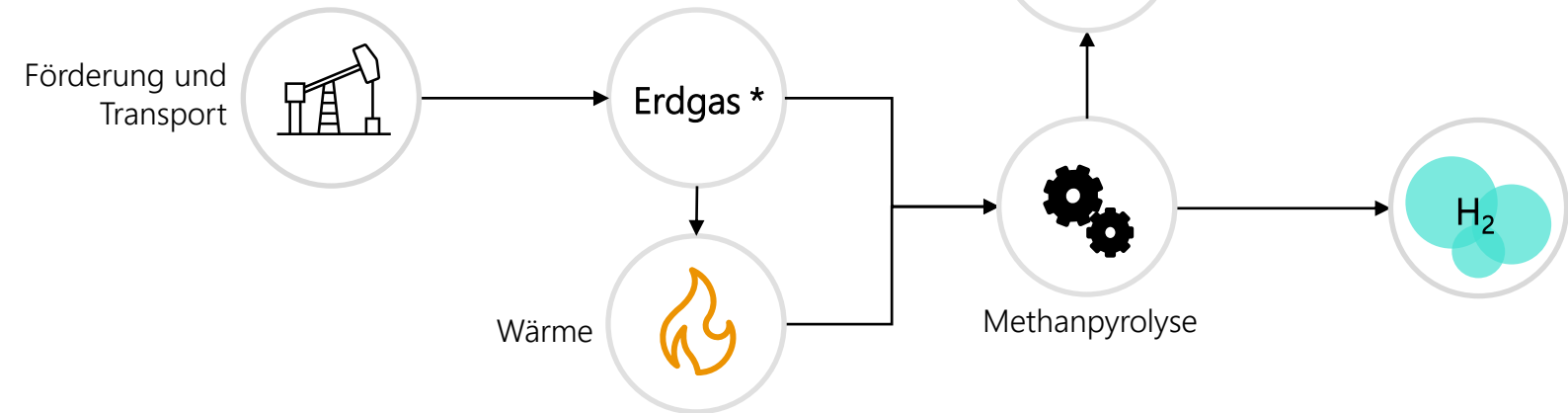


Schematische Prozesskette für H₂ aus Pyrolyse

Variante „Plasmapyrolyse“:



Variante „katalytische oder thermische Pyrolyse“:



* Nutzung von Biomethan (regenerativ) möglich

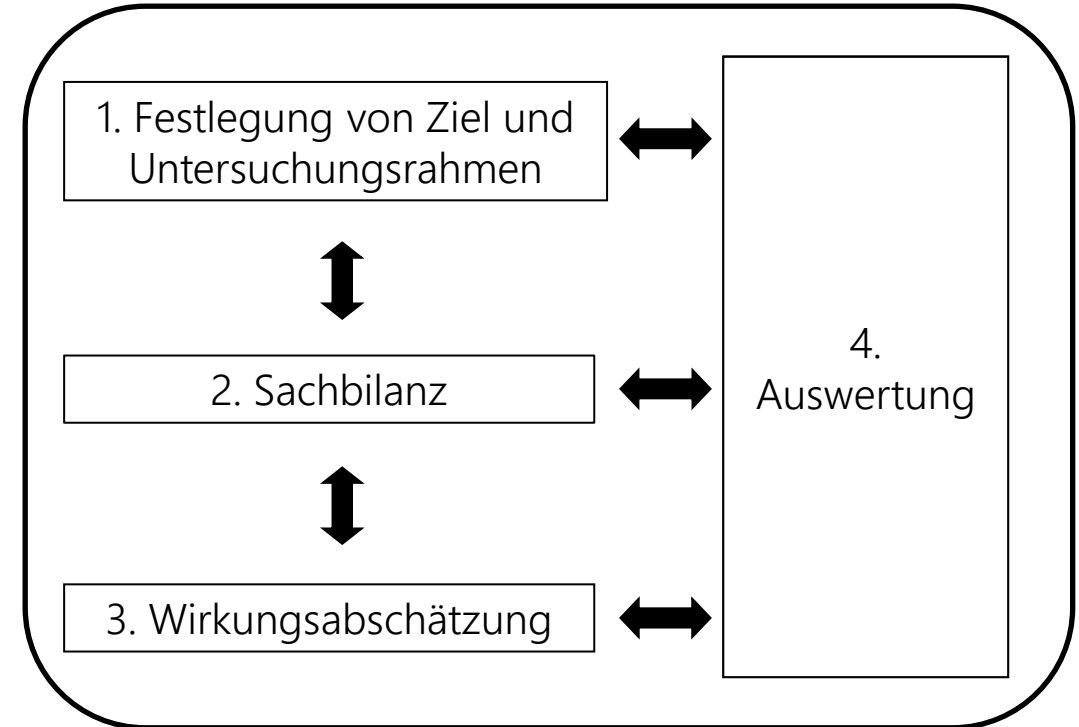
Literatur

- [1] Plankenbühler, Thomas et al. (2021): Handbook - Screening Wasserstoff Technik
- [2] Parkinson et al. (2018): Levelized cost of CO₂ mitigation from hydrogen production routes
- [3] NASA (08.02.2022): [Technology Readiness Level | NASA](#)

2. LCA der Wasserstoffproduktion

Kurzinfo: Grundsätze der Ökobilanzierung

- Engl. „Life Cycle Assessment (LCA)“
- Methode des Umweltmanagements
- Systematische Analyse und Bewertung der Umweltwirkungen von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen
- Bewertung des gesamten Lebenszyklus von der Wiege bis zur Bahre (engl. „cradle to grave“)
- Genormtes Vorgehen in ISO 14040 und 14044



LCA von Wasserstoff aus Elektrolyse: Datenbasis

Bau der Elektrolyseure

- Alkalische Elektrolyse (AEL) /KFA-01 18/ [1]
- Proton-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEMEL) [2]
- Hochtemperatur-Elektrolyse (HT-EL) [3]

Wasseraufbereitung

- Aufbereitung von Grund-/ Oberflächenwasser mittels Membrantechnologie (Umkehrosmose) [3]
Aufbereitung von Grund- oder Oberflächenwasser mittels Ionentauscher [3]
- Meerwasserentsalzung mittels Umkehrosmose [4]

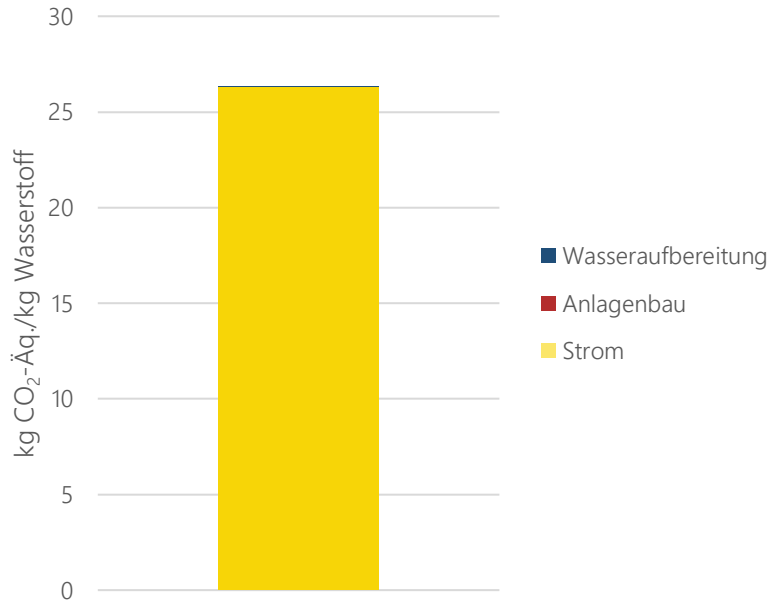
Energie- und Stoffströme des Betriebs der Elektrolyse

- Basierend auf verfahrenstechnischen Modellierungen im Projekt BEniVer
- AEL und PEM produzieren Abwärme auf relativ niedrigem Niveau (50–80°C)
- HTEL: Wärme als Input, Temperaturniveau 600-900°C

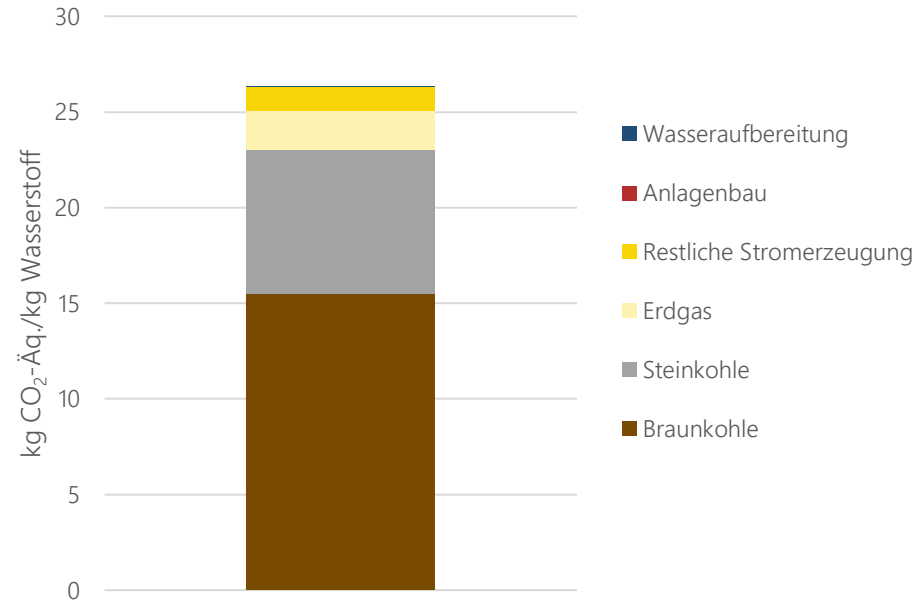
Weitere Datenquellen

- Hintergrunddaten Ökobilanzdatenbank ecoinvent
- Strommix 2018: SMARD-Strommarktdaten [5]
- Zukünftiger Strommix: THG95 Szenario des BMWi Projektes Multi-Sektorenkopplung (MuSeKo) [6]

Die Klimabilanz von Wasserstoff aus Elektrolyseuren hängt maßgeblich von der Stromquelle ab



Beitragsanalyse Elektrolyse

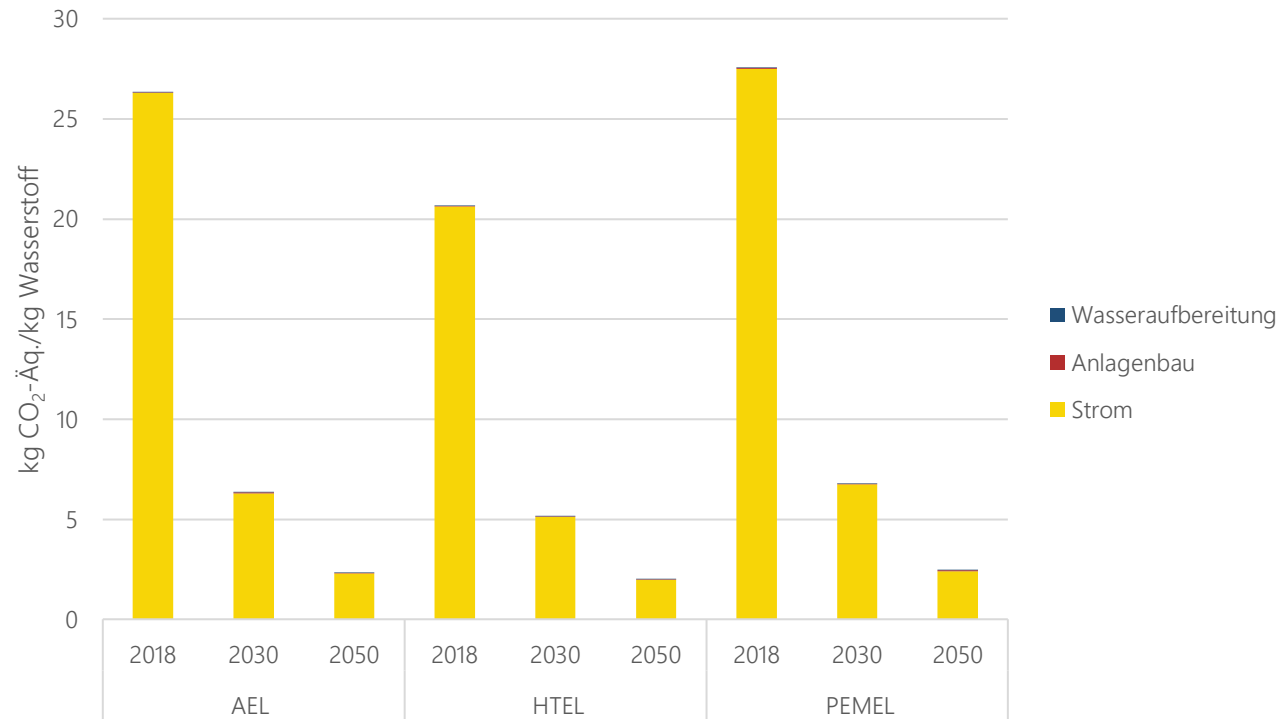


Beitragsanalyse Elektrolyse inkl. Aufschlüsselung des Strommixes

Gültig für

- Deutschland
- Alkalische Elektrolyse im Jahr 2018
- Strommix

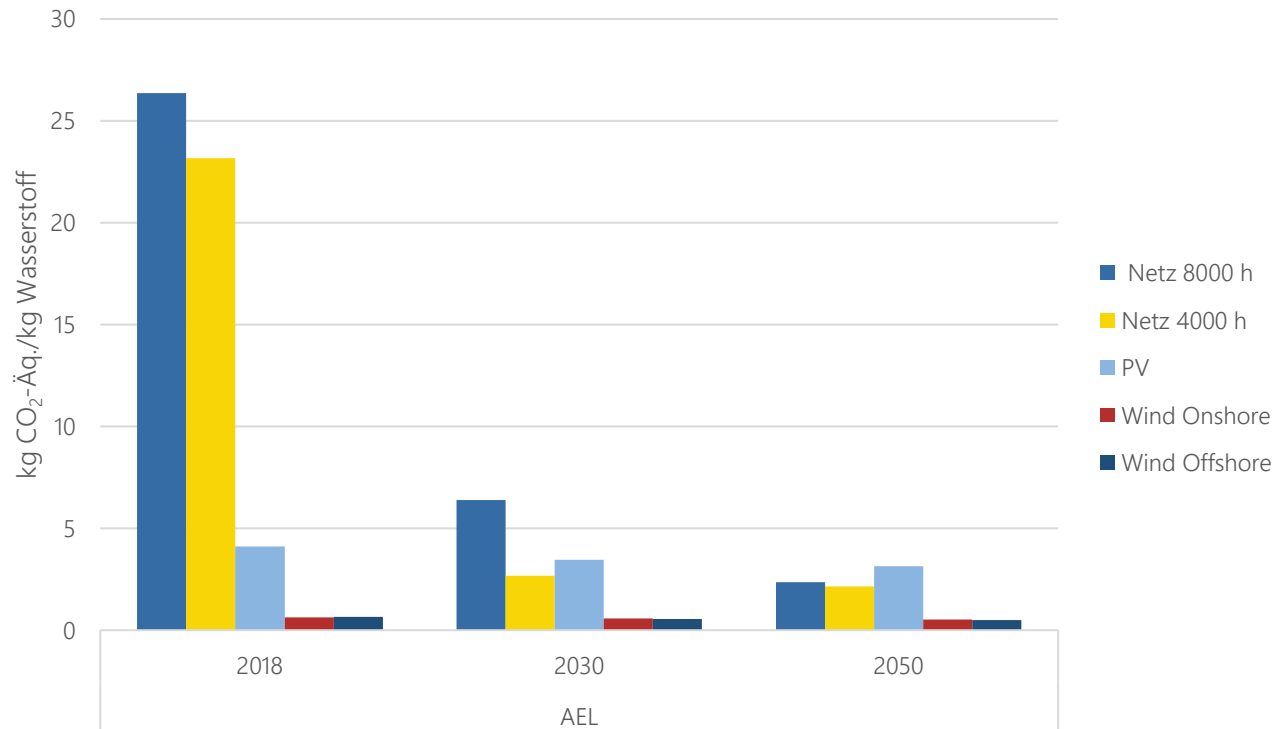
Die Elektrolysetechnologie hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Klimabilanz



Gültig für

- Deutschland
- Wärmebedarf wird über Abwärme gedeckt
- Ohne Anpassung der Hintergrunddatenbank an zukünftige Jahre
- Verbesserung der Effizienz und dekarbonisierter Strommix

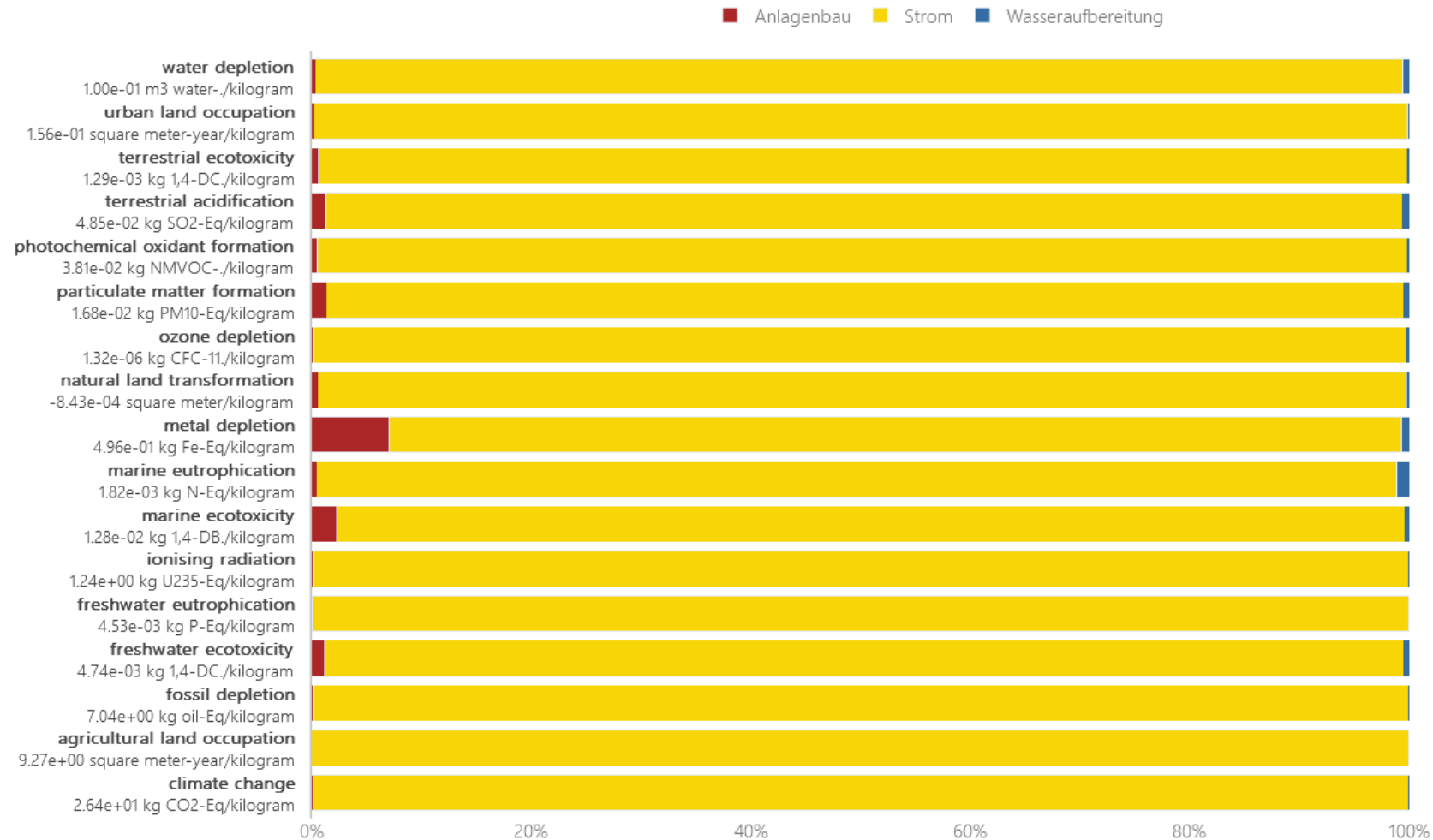
Die Variation der Stromquelle führt zu einer maßgeblichen Reduktion der Emissionen für die Elektrolyse



Gültig für

- Deutschland
- Wärmebedarf wird über Abwärme gedeckt
- Ohne Anpassung der Hintergrunddatenbank an zukünftige Jahre
- Verbesserung der Effizienz und dekarbonisierter Strommix

Auch bei andere Umweltwirkungen spielt der Strom die wichtigste Rolle



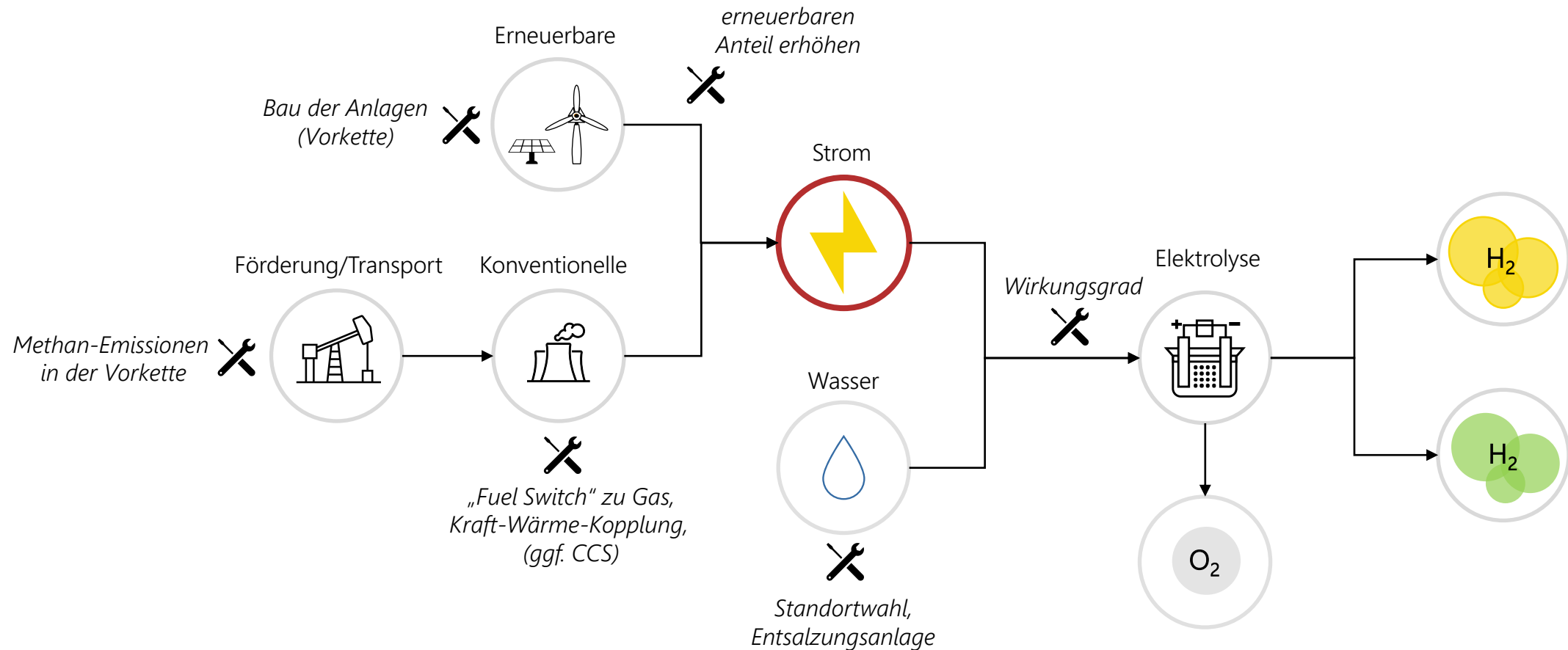
Gültig für

- Deutschland
- Alkalische Elektrolyse
- Jahr 2018

Übersicht über die Umweltwirkungskategorien

Wirkungskategorie			
Englischer Name	Deutscher Name	Einheit	Charakterisation Factor (englisch)
climate change	Klimawandel	kgCO ₂ -Äq	global warming potential
ozone depletion	Ozonabbau	kgCFC-11	ozone depletion potential
terrestrial acidification	Terrestrische Versauerung	kgSO ₂ -Äq	terrestrial acidification potential
freshwater eutrophication	Frischwasser Eutrophierung	kgP-Äq	freshwater eutrophication potential
marine eutrophication	Meereseutrophierung	kgN	marine eutrophication potential
human toxicity	Humantoxizität	kg1,4DCB	human toxicity potential
photochemical oxidant formation	Photochemische Oxidantenbildung	kgNMVOC to air	photochemical oxidant formation potential
particulate matter formation	Feinstaubbildung	kgPM ₁₀ -Äq	particulate matter formation potential
terrestrial ecotoxicity	Terrestrische Ökotoxizität	kg1,4DCB	terrestrial ecotoxicity potential
freshwater ecotoxicity	Frischwasserökotoxizität	kg1,4DCB	freshwater ecotoxicity potential
marine ecotoxicity	Meeresökotoxizität	kg1,4DCB	marine ecotoxicity potential
ionizing radiation	ionisierende Strahlung	kg U	ionising radiation potential
Agricultural land occupation	Landwirtschaftliche Bodennutzung	yr*m ²	agricultural land occupation potential
urban land occupation	Urbane Landnutzung	yr*m ²	urban land occupation potential
natural land transformation	natürliche Landumwandlung	m ²	natural land transformation potential
water depletion	Wasserverbrauch	m ³	water depletion potential
mineral resource depletion	Verbrauch mineralischer Rohstoffe	Kg F-Äq.	mineral depletion potential
fossil resource depletion	Verbrauch fossiler Rohstoffe	kgoil-Äq	fossil depletion potential

Hauptemissionstreiber und mögliche Stellhebel zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Wasserstoff aus Elektrolyse



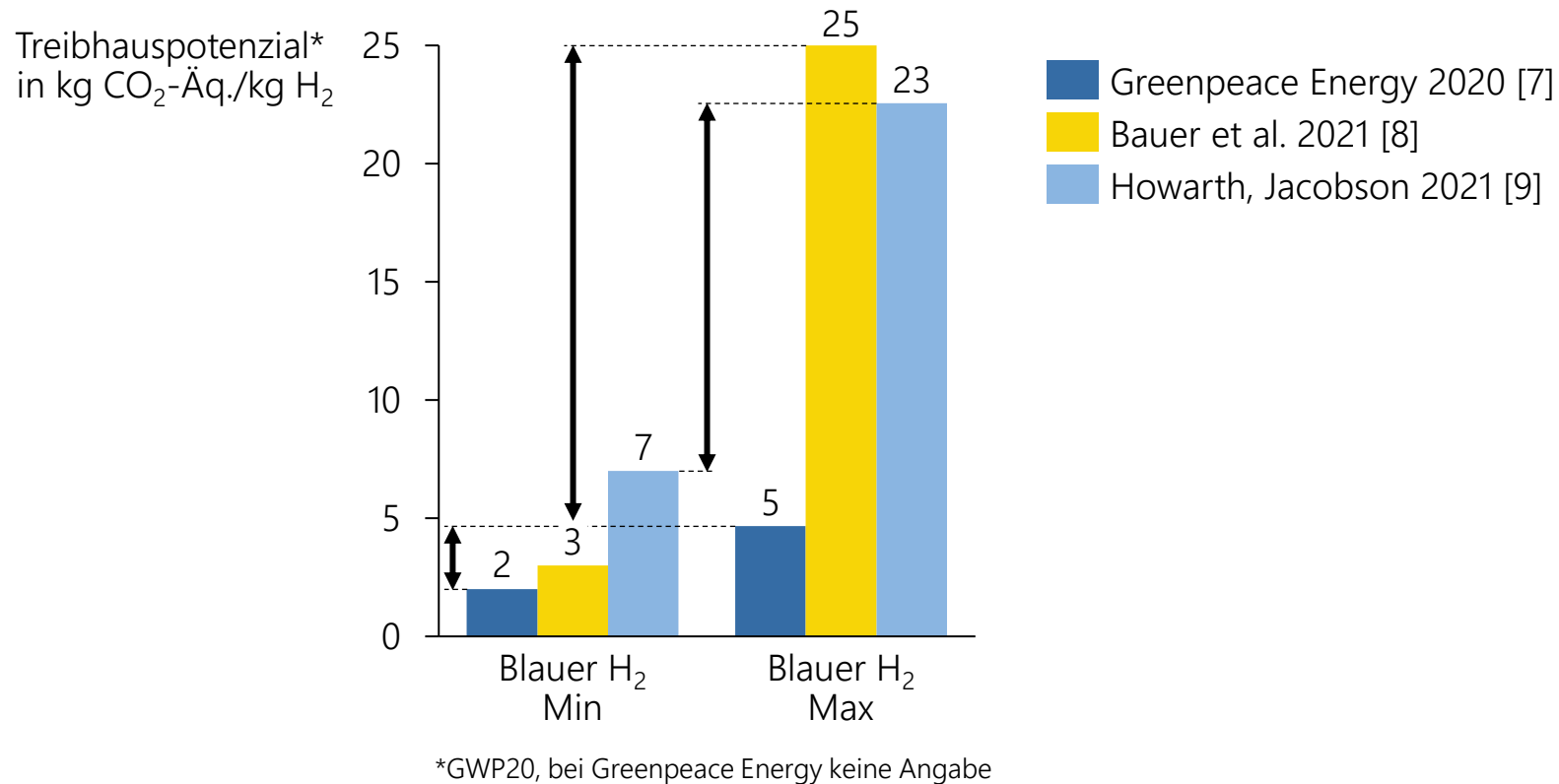
Hauptemissionstreiber



Mögliche Stellhebel zur Verbesserung der Nachhaltigkeit

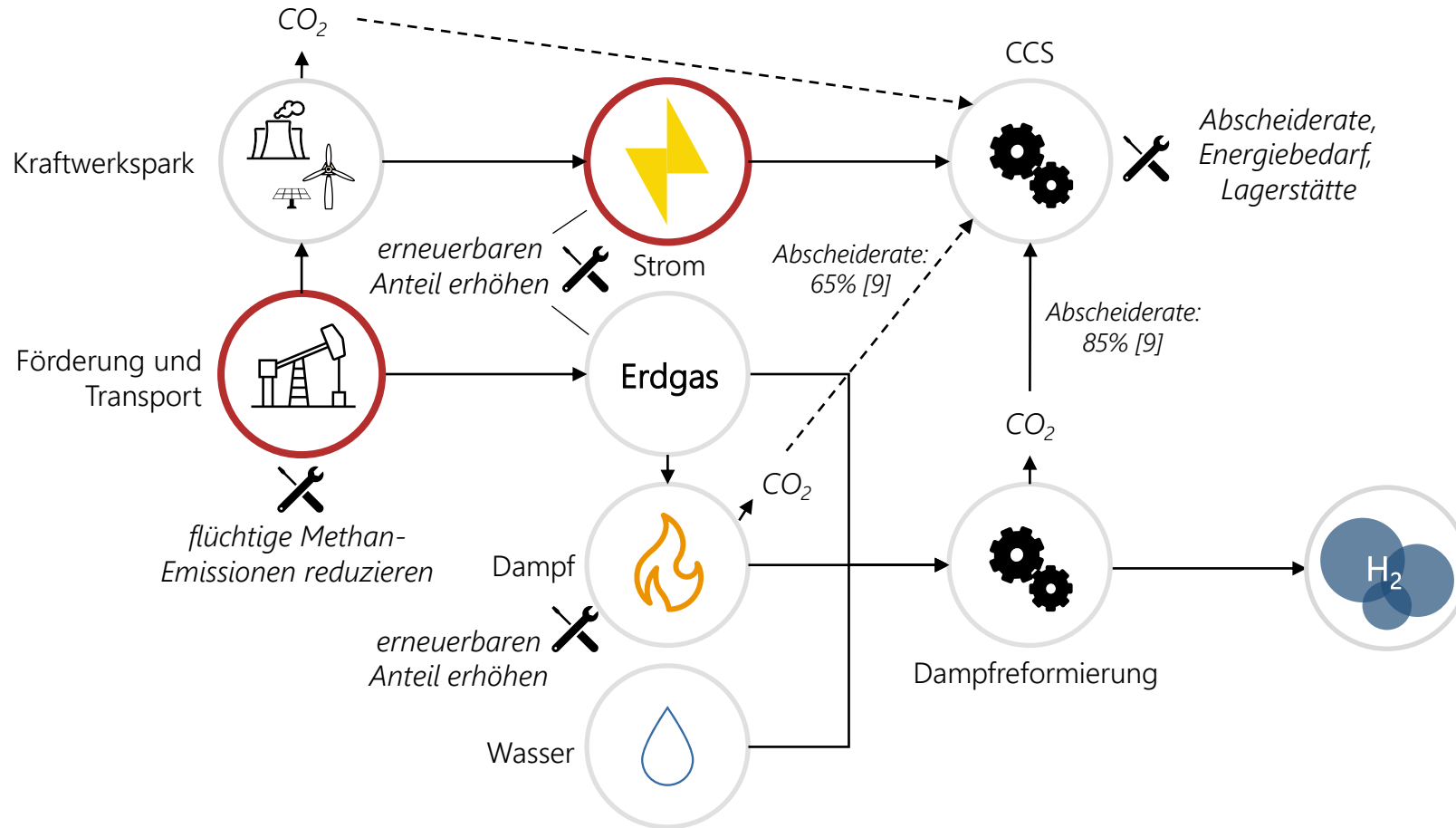


LCA von blauem Wasserstoff: Große Sensitivität der Klimawirksamkeit



→ Nicht abscheidbare, flüchtige Methan-Emissionen sind ein wesentlicher Treiber für die Klimawirkung von blauem (und grauem) Wasserstoff (~70% für SMR mit CCS [8])

Hauptemissionstreiber und mögliche Stellhebel zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von blauem Wasserstoff (SMR)

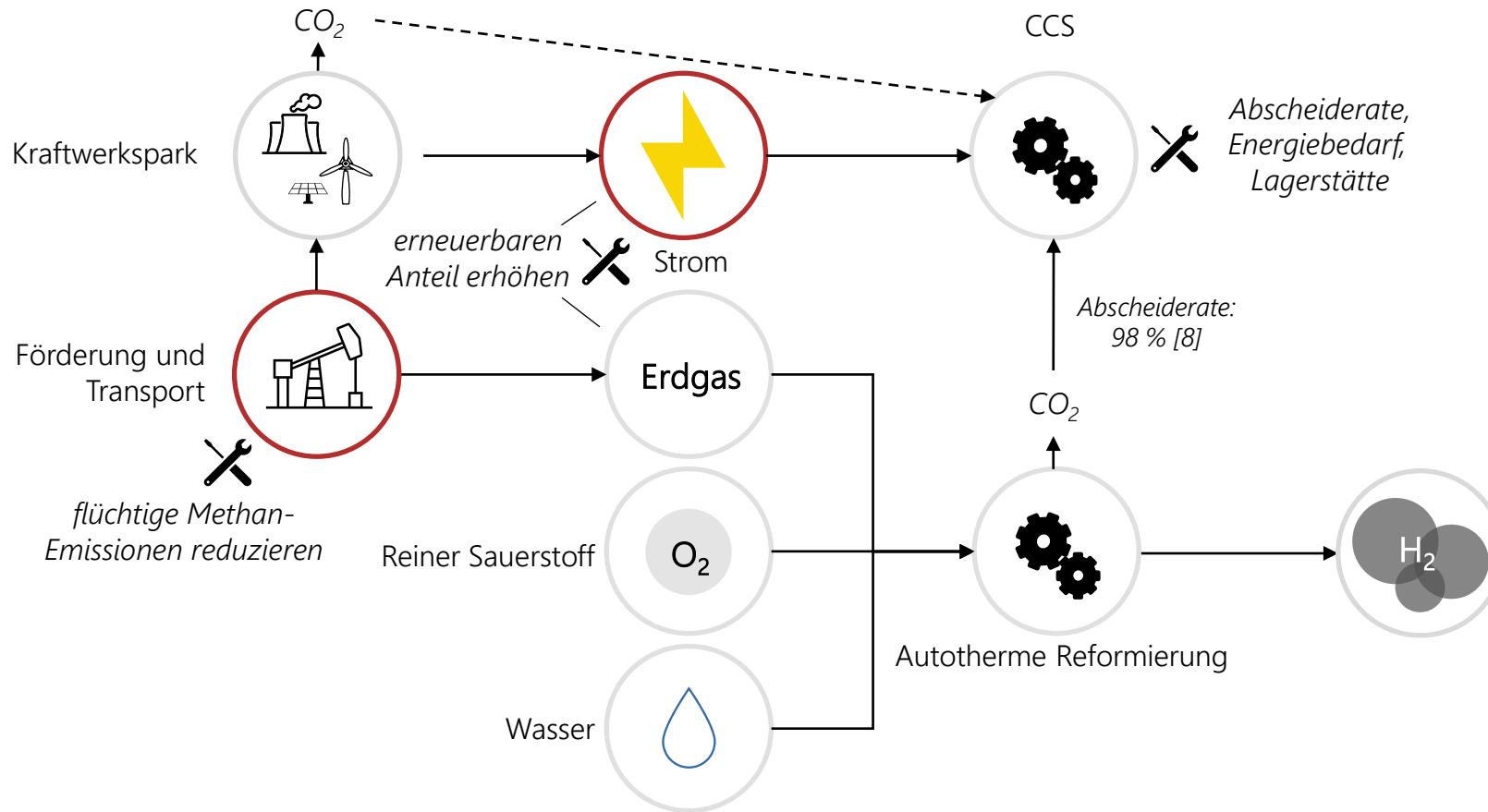


Hauptemissionstreiber

Mögliche Stellhebel zur Verbesserung der Nachhaltigkeit

CCS=Carbon Capture and Storage, SMR=steam methane reforming

Prozesskette für H₂ aus autothermer Reformierung (ATR) mit CCS

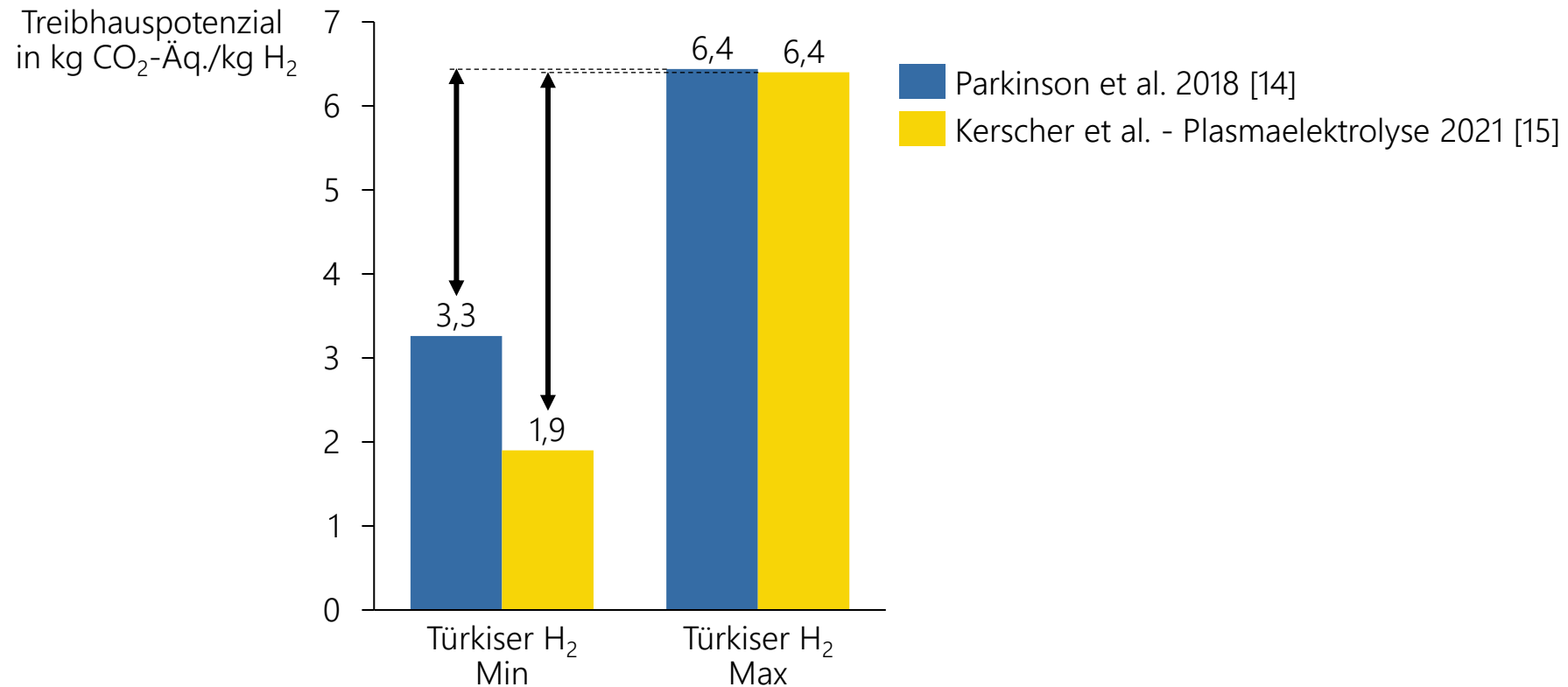


Hauptemissionstreiber

 Mögliche Stellhebel zur Verbesserung der Nachhaltigkeit

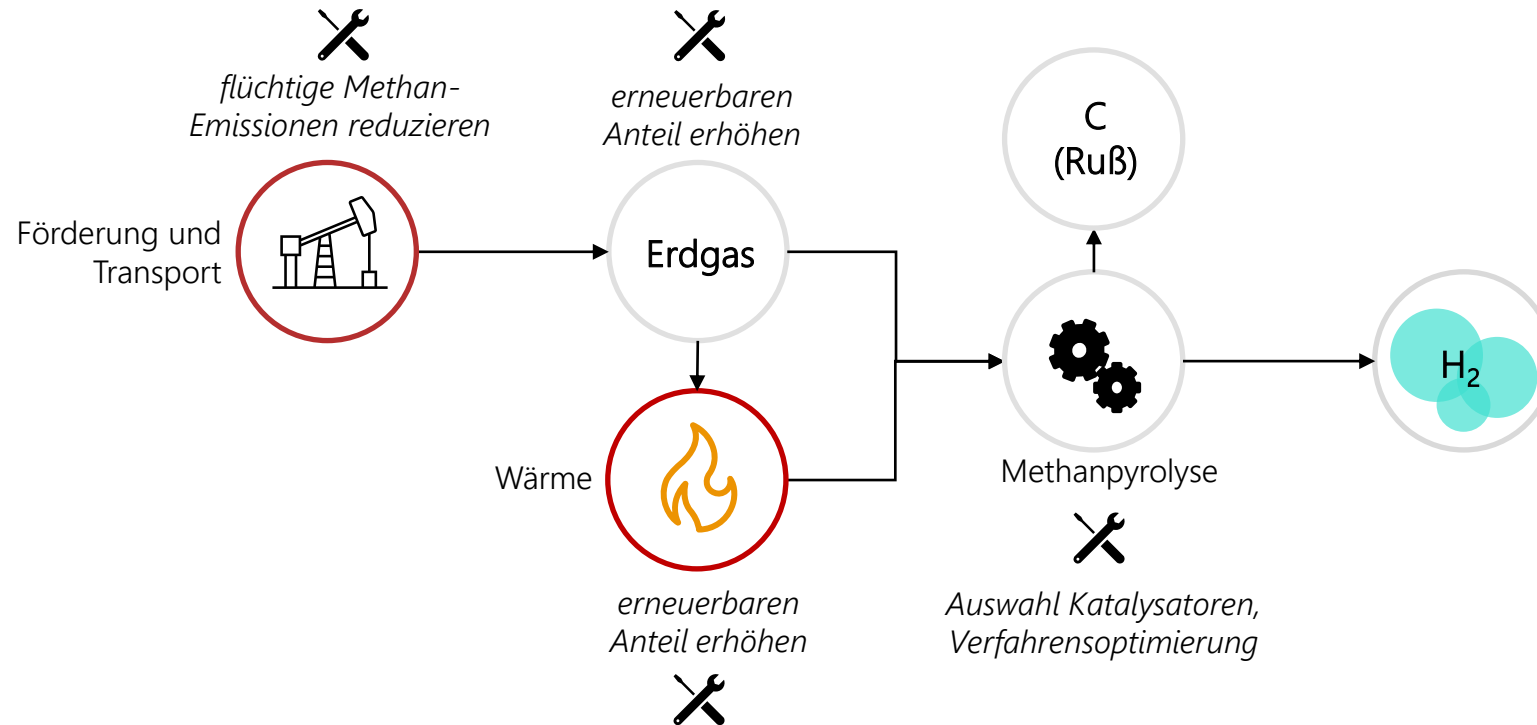
CCS=Carbon Capture and Storage, ATR=autothermal reforming

2. LCA von türkischem Wasserstoff



- Auch für türkisen Wasserstoff sind neben dem Energiebedarf die flüchtigen Methan-Emissionen in der Vorkette von Erdgas ein wesentlicher Treiber für die Klimabilanz.
- Wesentlicher Vorteil: Kohlenstoff liegt in fester Form vorliegt und daher kein CCS notwendig

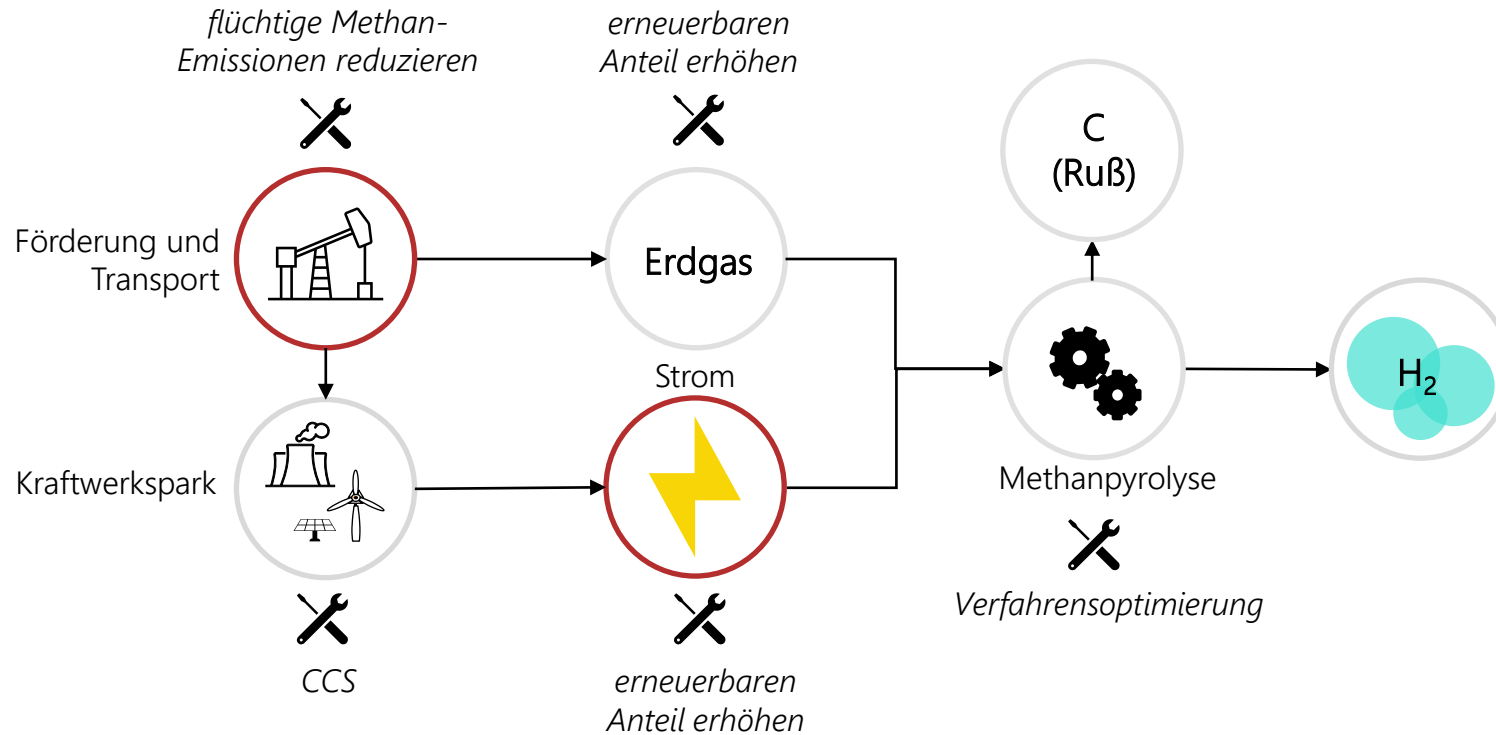
Hauptemissionstreiber und mögliche Stellhebel zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von türkischem Wasserstoff (katalytische Pyrolyse)



Hauptemissionstreiber

Mögliche Stellhebel zur Verbesserung der Nachhaltigkeit

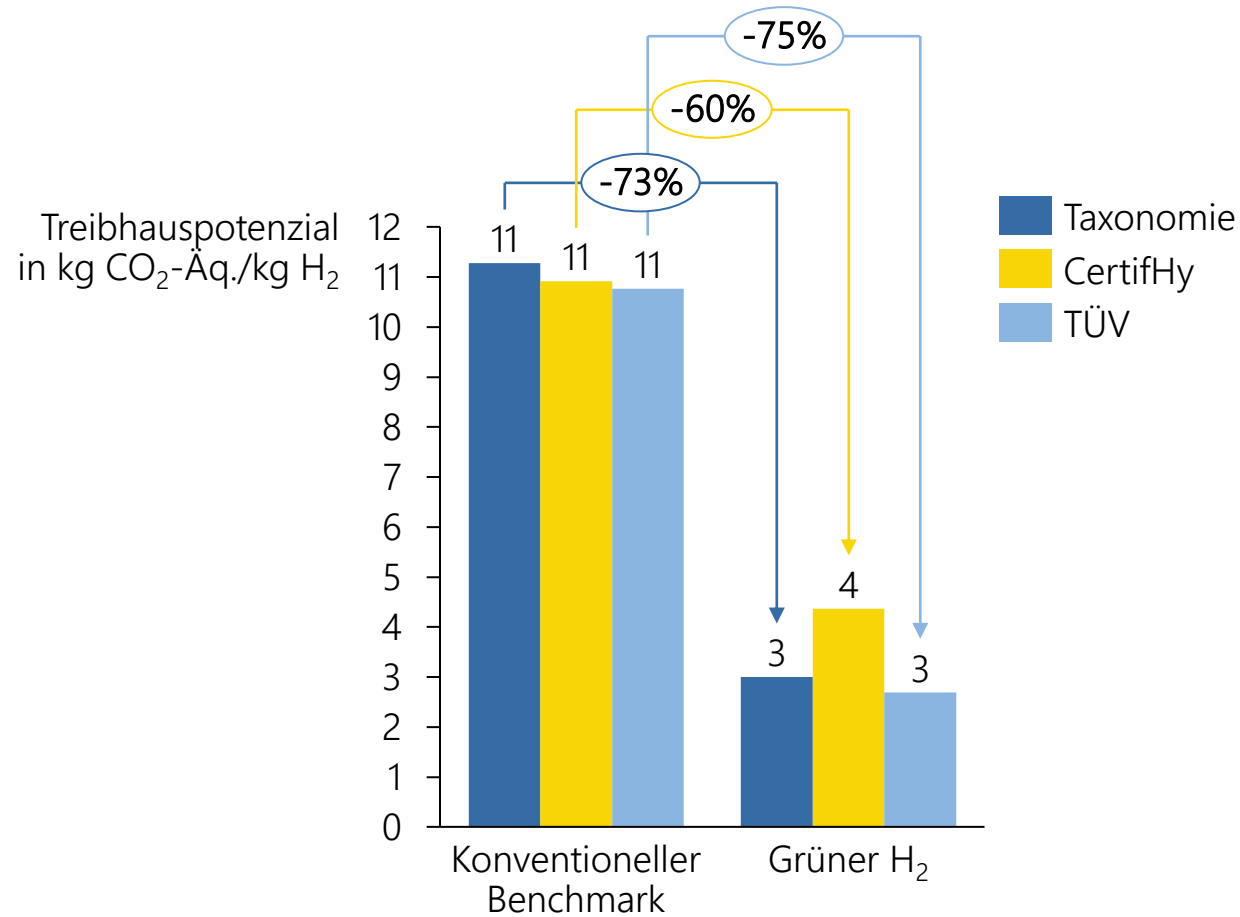
Hauptemissionstreiber und mögliche Stellhebel zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von türkischem Wasserstoff (Plasmapyrolyse)



Hauptemissionstreiber

Mögliche Stellhebel zur Verbesserung der Nachhaltigkeit

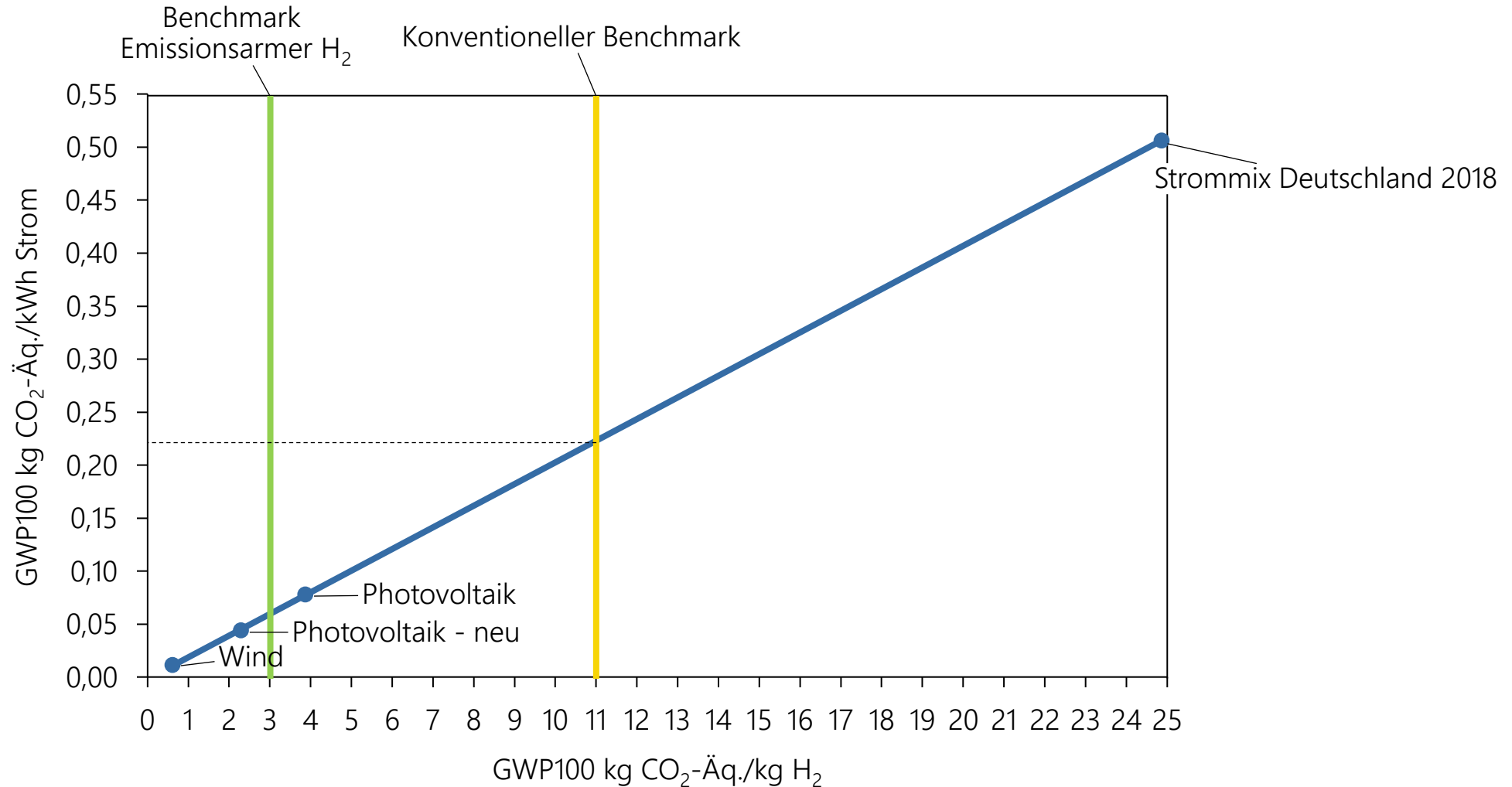
Ausgewählte Benchmarks und Grenzwerte für emissionsarmen Wasserstoff



Quellen: eigene Darstellung basierend auf [11-13]

→ Ähnliche konventionelle Referenz (Erdgasreformierung) und Reduktionsziele (60-75 %)

Einordnung: Emissionsintensität des Stroms zur Erreichung der Benchmarks durch Wasserstoff aus Elektrolyse



→ Strom aus Erneuerbaren Energien ist eine wichtige Grundvoraussetzung für die Erzeugung von emissionsarmen Wasserstoff aus Elektrolyse

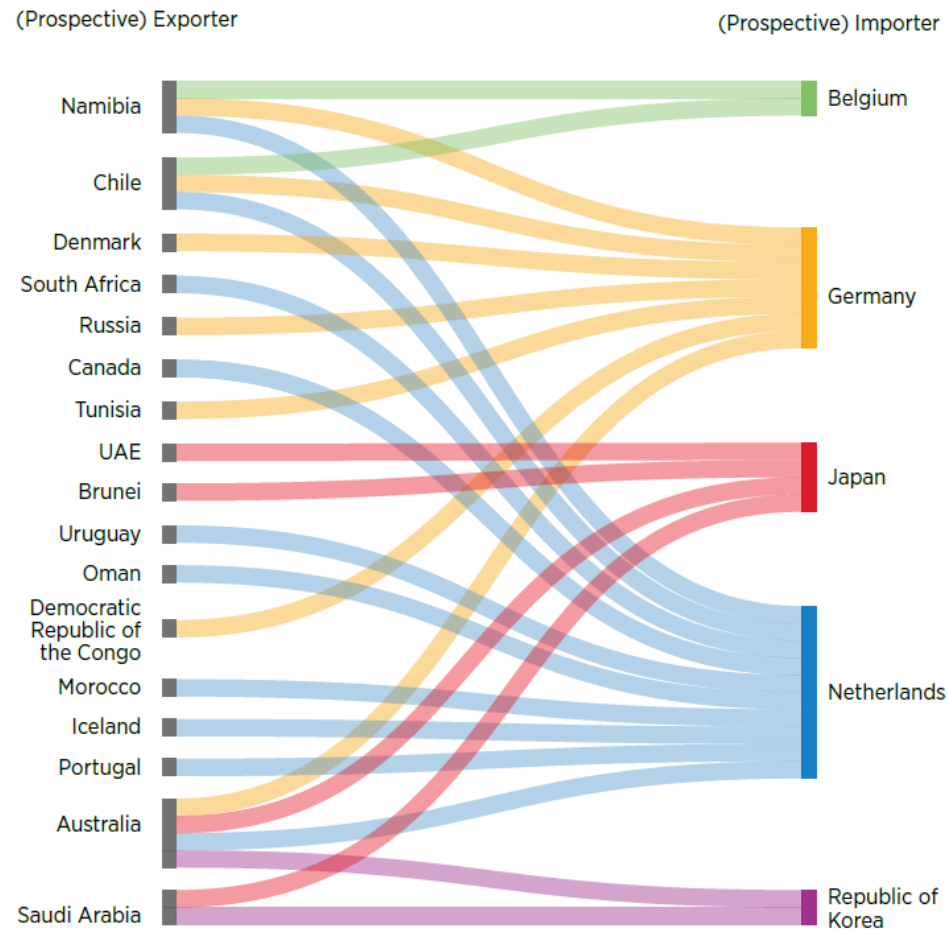
Literatur

- [1] Wulf et al. (2018): Hydrogen Supply Chains for Mobility – Environmental and Economic Assessment. In: Sustainability, 10(6), 1699
- [2] Bareiß et al. (2019): Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems. In: Applied Energy, Volume 237, 862-872
- [3] Liebich et al. (2020): Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. Umweltbundesamt
- [4] Rivera, Raluy (2009): Evaluación ambiental de la integración de procesos de producción de agua con sistemas de producción de energía
- [5] SMARD – Strommarktdaten (2021): <https://www.smard.de>; Bonn: Bundesnetzagentur BNetzA.
- [6] Fette, Max et al.: Multi-Sektor-Kopplung - Modellbasierte Analyse der Integration erneuerbarere Stromerzeugung durch die Kopplung der Stromversorgung mit der Wärme, Gas- und Verkehrssektor. Bremen: Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, 2020.
- [7] Greenpeace Energy (2020): Grün oder blau? Wege in die Wasserstoff-Wirtschaft 2020 bis 2030
- [8] Bauer et al. (2021): On the climate impacts of blue hydrogen production. In: Sustainable Energy & Fuels.
- [9] Howart, Jacobson (2021): How green is blue hydrogen?. In: Energy Science & Engineering, 9(10), 1676-1687
- [10] Greenpeace Energy eG (2020): blauer Wasserstoff – Lösung oder Problem der Energiewende?
- [11] Taxonomie-Verordnung (EU) 2020/852, Annex I
- [12] CertifHy Scheme (2019): Subsidiary Document – CertifHy-SD Hydrogen Criteria
- [13] TÜV SÜD Standard CMS 70 (2020): Erzeugung von Grünem Wasserstoff (Green Hydrogen)
- [14] Parkinson et al. (2018): Levelized cost of CO₂ mitigation from hydrogen production routes
- [15] Kerscher et al. (2021): Low-carbon hydrogen production via electron beam plasma methane pyrolysis: Techno-economic analysis and carbon footprint assessment

3. Weitere Nachhaltigkeitskriterien

Neue geopolitische Abhängigkeiten durch Wasserstoff

Ausgewählte bilaterale Handelsabkommen und Absichtserklärungen, angekündigt ab November 2021:



→ Potenzielle Chance, Lieferanten nach gewissen Nachhaltigkeitskriterien auszuwählen

Bedeutung von Nachhaltigkeitskriterien für Wasserstoffimporte

- Koalitionsvertrag [2]:
 - „[...] europäische und internationale Klima- und Energiepartnerschaften für [klimaneutralen](#) Wasserstoff [...]“
 - „Beim Import von Wasserstoff werden wir die [klimapolitischen Auswirkungen beachten](#) [...]“
 - „Wir setzen uns auf europäischer Ebene für eine [einheitliche Zertifizierung](#) von Wasserstoff [...]“
- EU [3]:
 - [...] certification system for low-carbon gases, to complete the work started in the Renewable Energy Directive with the certification of renewable gases. This will ensure a [level playing field in assessing the full greenhouse gas emissions footprint of different gases](#) [...]“
- Nationaler Wasserstoffrat [4]
 - „Der Export von Wasserstoffprodukten darf nicht den [Erfolg von sozialen, ökologischen und ökonomischen Transformationspfaden vor Ort](#) gefährden.“
 - „Nachhaltigkeitsfragen in der gesamten Wertschöpfungskette [...] sind von enormer Bedeutung, um Integrität und [Akzeptanz von Wasserstoff\(importen\)](#) und Wasserstofftechnologien zu gewährleisten.“

Nachhaltigkeitskriterien aus Zertifizierungsprogrammen, Förderprogrammen und Regularien

Nachhaltigkeitskriterien für Wasserstoff/RFNBOs	Zertifizierungsprogramm							Förderprogramm	Regularien		
	ISCC PLUS	CertifHy	Dena Biogasregister	TÜV Süd CMS 70	China Hydrogen Alliance's Standard	Certification Scheme (Japan)	Zero Carbon Certification Scheme		H2Global	LCFS	RED II
Richtlinie/Standard											
Markt											
Zweck					?						
Erneuerbarer Strom	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
THG-Emissionen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kohlenstoffquellen	✓	?	✓	?	?	?	✓	?	✓	Aussteh. delegierter Rechtsakt	✓
Landnutzung	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗
Wasserverbrauch	?	✗	✗	✗	✗	✗	?	?	?	?	✗
Soziale Auswirkungen	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗
Legende	✓ Kriterium ist enthalten		✗ Kriterium ist nicht enthalten		? Keine eindeutigen/aktuellen Informationen vorhanden		Freiwillig	Basiert auf den nationalen Rahmenbedingungen, um staatliche Leistungen zu erhalten			

Nachhaltigkeitskriterien aus Zertifizierungsprogrammen, Förderprogrammen und Regularien – Langfassung

Nachhaltigkeitskriterien für Wasserstoff/RFNBOs	Zertifizierungsprogramm							Förderprogramm	Regularien		
	Richtlinie/Standard	ISCC PLUS	CertifHy	Dena Biogasregister	TÜV Süd CMS 70	China Hydrogen Alliance's Standard	Certification Scheme (Japan)		Zero Carbon Certification Scheme	H2Global	LCFS
Markt	EU	EU	DE	DE	CN	JP	AU	EU	US/CA	EU	UK
Zweck	v	v	r	v	n/a	v	v	r	r	r	r
Erneuerbarer Strom	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Tracking-Modelle	MB	B&C	MB	MB; B&C	n/a	B&C	MB	MB	B&C	MB	MB
THG-Emissionen	Well-to-Wheel	Well-to-Gate	Je nach Bedarf	Well-to-Wheel	Well-to-Wheel	Well-to-Gate	Well-to-Gate	Well-to-Wheel	Well-to-Wheel	Well-to-Wheel	Well-to-Wheel
Zulässige Kohlenstoffquellen	+	Zu aktualisieren	+	Out of Scope	Out of Scope	n/a	+	Zu aktualisieren	+	Ausstehender delegierter Rechtsakt	+
Landnutzung	+	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-
Wasserverbrauch	+/-	-	-	-	-	-	+/-	+/-	+/-	+/-	-
Soziale Auswirkungen	+	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-
Legende	+/- : Thema ist erwähnt, aber kein wirkliches Kriterium implementiert				n/a : Keine Informationen		B&C : Book & Claim MB: Mass Balancing		r : Basiert auf den nationalen Rahmenbedingungen, um staatliche Leistungen zu erhalten v : Freiwillig		

Relevante Gesetze und Verordnungen für die Anforderungen an grünen Wasserstoff in Deutschland



[6] Art. 27 Abs 3 RED II, Delegierter Rechtsakt (Entwurf)

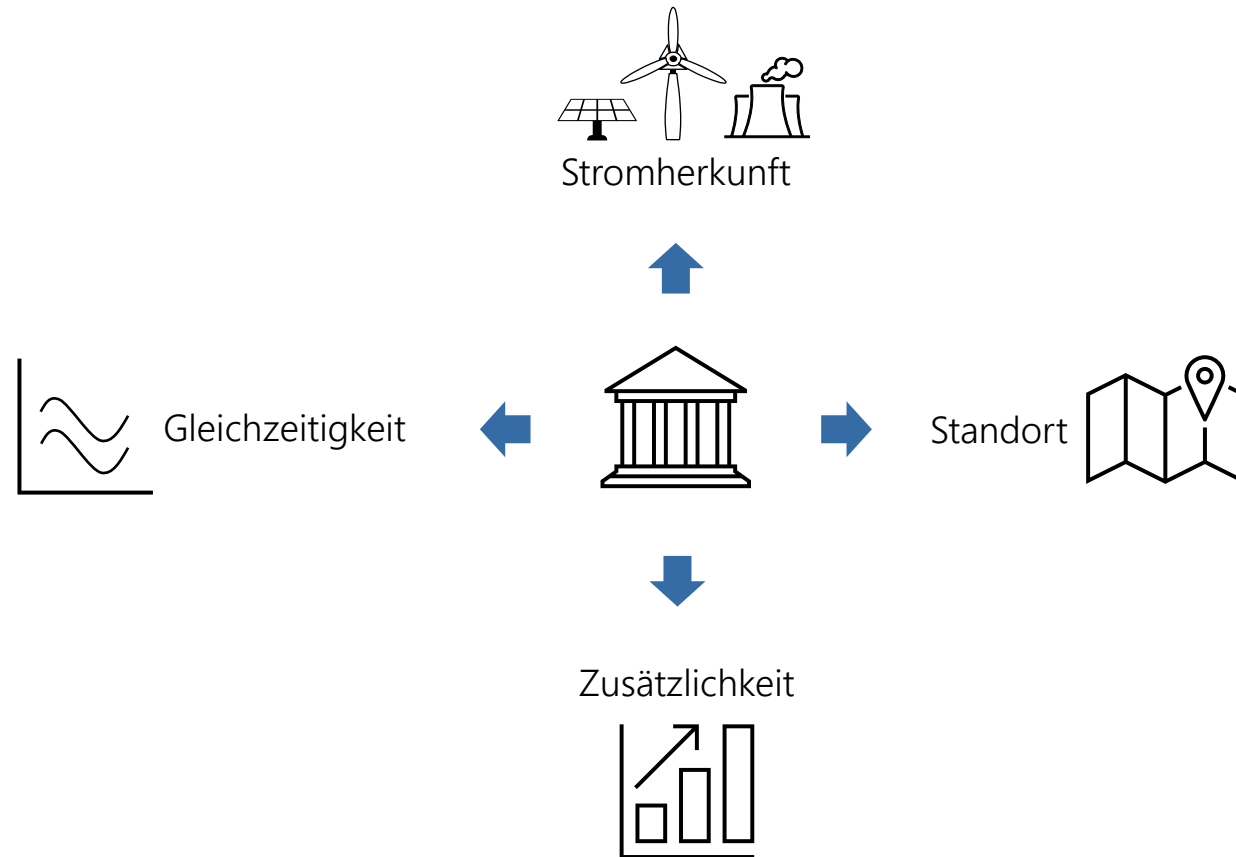
[7] Taxonomie-Verordnung (EU), Delegierter Rechtsakt

[8] §6b EEG 2021 321h ff. EEV (Wasserstoffproduktion, Befreiung EEG-Umlage)

[9] §3 Nr. 10c EnWG, 33,34 GasNZV (Wasserstoffeinspeisung, Gasnetzzugang)

[10] §3 Abs. 2 37. BImSchV (Wasserstoffnutzung im Verkehr, Treibhausgasminderungsquote)

Aus der Gesetzgebung ergeben sich vier wesentliche Kriterien für grünen Wasserstoff



→ Der Fokus der Kriterien an grünen Wasserstoff in der Gesetzgebung liegt auf der Integrierbarkeit in das zukünftige Energiesystem.

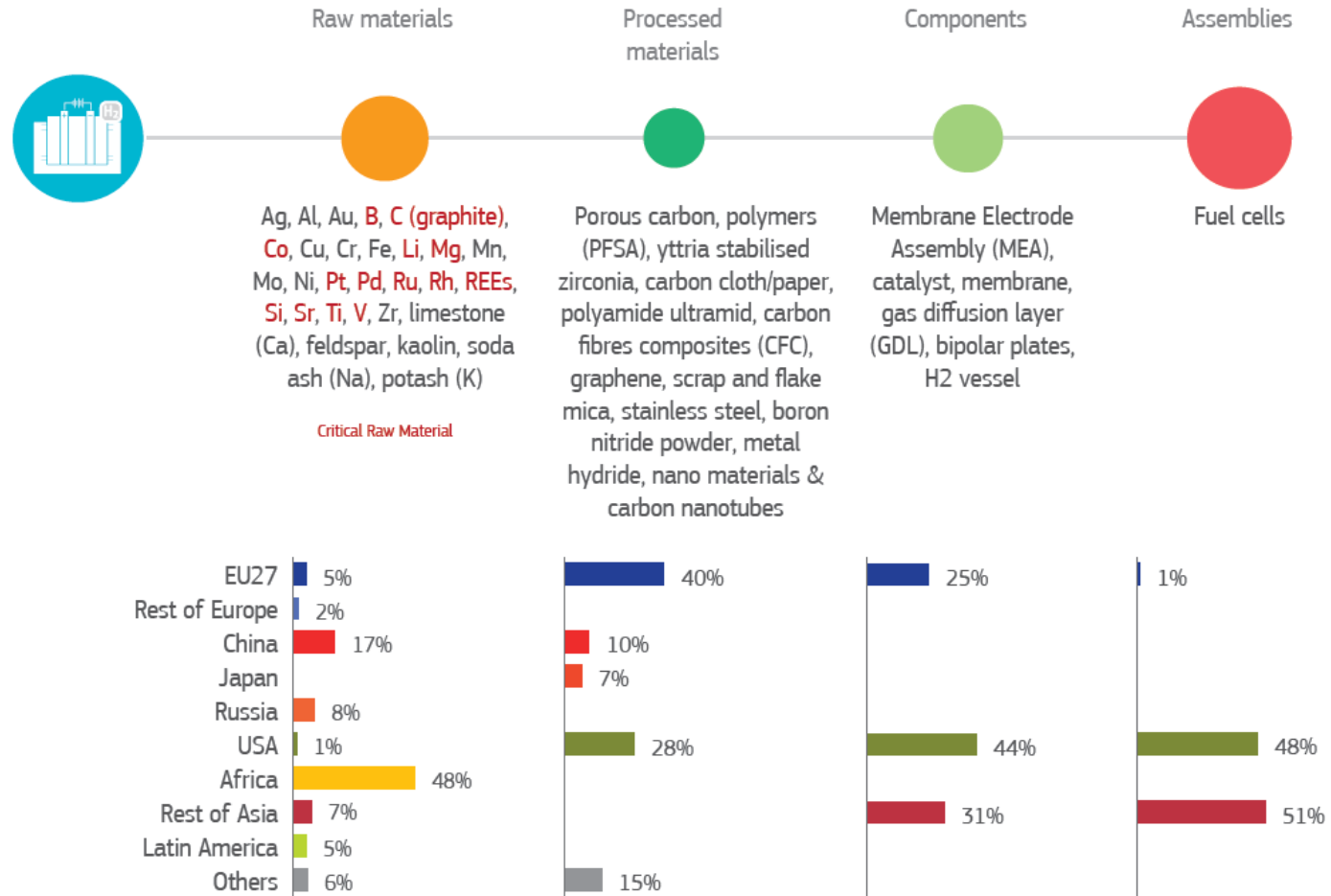
Gegenüberstellung der Anforderungen an grünen Wasserstoff aus Elektrolyse auf EU-Ebene und in Deutschland

	EU: Delegierter Rechtsakt (Entwurf!)	Deutschland: Erneuerbare-Energien-Verordnung (EEV)
Nur Elektrolyseur?	Ja	Ja
100% EE-Strom?	Ja	Ja
Biogener EE-Strom?	Nein	Ja
Geförderter Strom?	Nein	Nein
Einschränkung Betriebsdauer?	Nein	Erste 5000 Volllaststunden des Jahres
Zusätzlichkeit?	Ja (Betriebsaufnahme der EE-Anlage im selben Jahr wie Elektrolyseur oder später)	Nein
Direktleitung?	Ja	Ja (mit Anforderungen an Gleichzeitigkeit)
Netzbezug?	Ja (u.a. mit Power Purchase Agreements - PPA mit zusätzlichen Anforderungen bzgl. Inbetriebnahmezeitpunkt, Gleichzeitigkeit und Standort)	Ja (mit an Bilanzkreis gekoppelten Herkunftsnachweisen – HKN)
Standort?	Anlagen in selber Gebotszone oder Nachbarzone ohne Engpass	Mindestanteil von 85 % des Stroms aus Gebotszone Deutschland

Quelle: eigene Tabelle basierend auf [11,12,13]; EE=Erneuerbare Energien

→ Mit delegiertem Rechtsakt auf EU-Ebene ggf. strengere Anforderungen an Zusätzlichkeit des Stroms aus Erneuerbaren Energien (EE)

Weiterer Nachhaltigkeitsaspekt: Kritische Rohstoffe in Wasserstoff-Technologien – am Beispiel der Brennstoffzelle



→ Platin-Gruppen-Metalle (PGMs) gehören aufgrund der Länderkonzentration und des hohen Preises zu den wichtigsten kritischen Rohstoffen für Katalysatoren in Brennstoffzellen und Elektrolyseuren

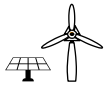
Literatur

- [1] IRENA (2022): Geopolitics of the Energy Transformation - The Hydrogen Factor
- [2] Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen – Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit
- [3] Europäische Kommission (2021): Commission proposes new EU framework to decarbonise gas markets, promote hydrogen and reduce methane emissions; https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6682
- [4] Nationaler Wasserstoffrat (2021): Nachhaltigkeitskriterien für Importprojekte von erneuerbarem Wasserstoff und PtX-Produkten
- [5] German Energy Agency/World Energy Council (2022): Global Harmonisation of Hydrogen Certification
- [6] Art. 27 Abs 3 RED II, Delegierter Rechtsakt (Entwurf)
- [7] Taxonomie-Verordnung (EU) 2020/852, Delegierter Rechtsakt
- [8] §6b EEG 2021 321h ff. EEV (Wasserstoffproduktion, Befreiung EEG-Umlage)
- [9] §3 Nr. 10c EnWG, 33,34 GasNZV (Wasserstoffeinspeisung, Gasnetzzugang)
- [10] §3 Abs. 2 37. BImSchV (Wasserstoffnutzung im Verkehr, Treibhausgasminderungsquote)
- [11] Stiftung Umweltenergierecht (2021a): Was ist grüner Wasserstoff?, Vortrag
- [12] Stiftung Umweltenergierecht (2021b): Auf dem Weg zum Wasserstoffwirtschaftsrecht?, Studie
- [13] Europäische Kommission (2022): Leak des Delegated Acts zur ~~Direktive~~ (EU) ~~2018/2001~~
- [14] Europäische Kommission (2020): Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study

Fazit zu Teil 1 „Überblick über die Nachhaltigkeit von Wasserstofftechnologien“



- Mit dem aktuellen Strommix ist die Klimawirkung von Wasserstoff aus Elektrolyse höher als die der konventionellen Referenz (Erdgasreformierung).



- Folglich ist ein Ausbau von erneuerbaren Energien die wichtigste Grundvoraussetzung für die Einsparung von Treibhausgas-Emissionen mithilfe von strombasiertem Wasserstoff.



- Das wirkliche Emissionseinsparpotenzial durch blauen (Erdgasreformierung + CCS) und türkisen (Pyrolyse) Wasserstoff ist stark von den flüchtigen Methan-Emissionen in der Vorkette abhängig.



- Der Herkunft und der Zertifizierung von Wasserstoff kommt somit eine besondere Bedeutung zu.



- In Summe steht nachhaltiger H₂ weder im Inland noch im Ausland unbegrenzt zur Verfügung.

→ Daher ist eine Bewertung des Einsatzes von Wasserstoff in den verschiedenen Anwendungen notwendig (Teil 2).

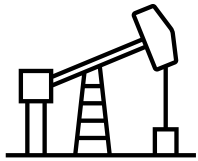
Teil 2:
Einordnung der Rolle von
Wasserstoff im
Energiesystem

Wasserstoff kann direkt oder in Form von weiterverarbeiteten Derivaten verwendet werden - Terminologie

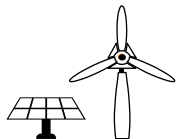
Schlüsselressource

Wasserstoff-Farbe

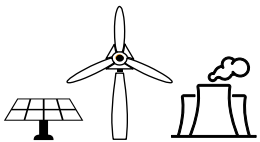
Aufbereitung



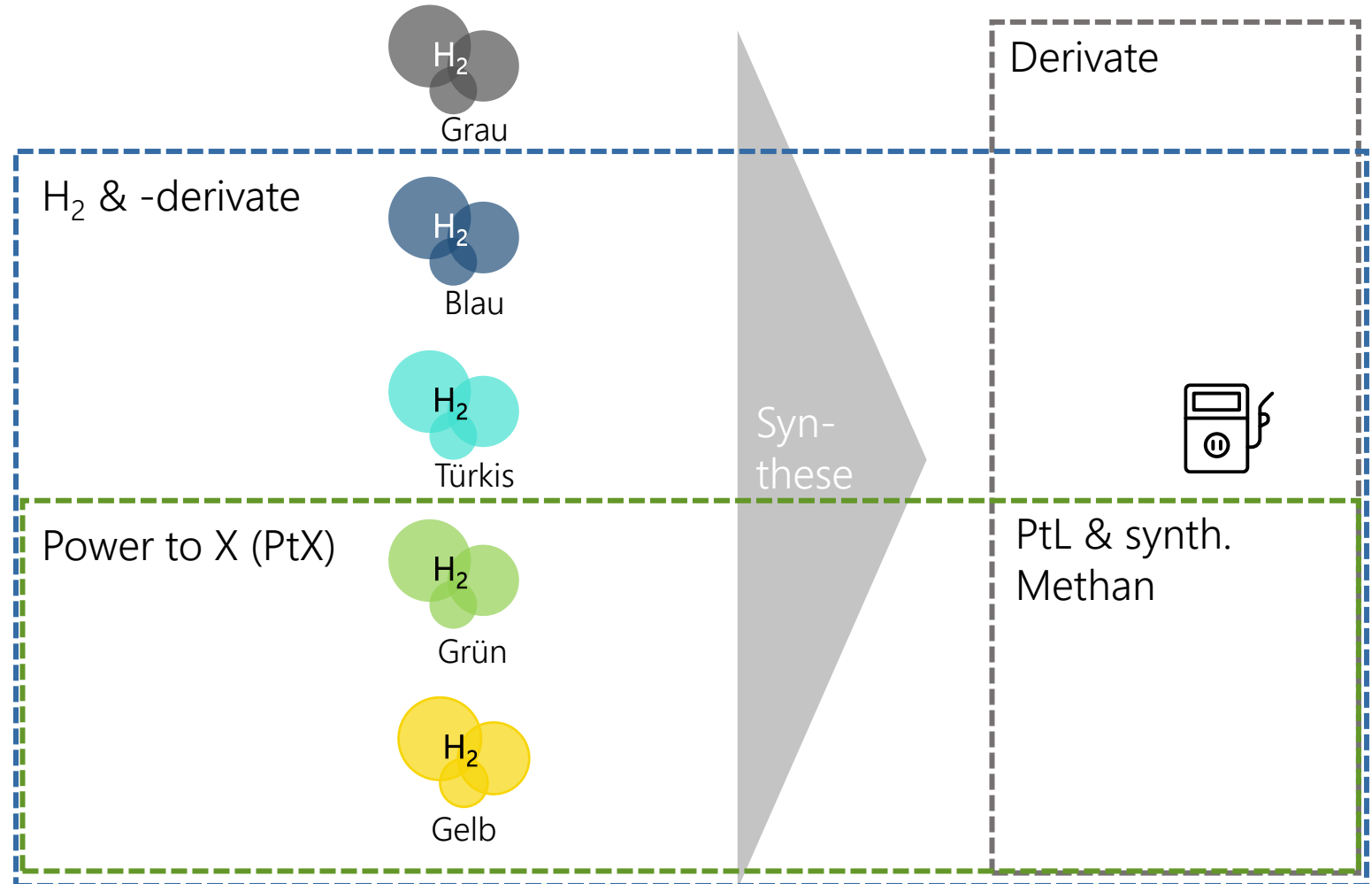
Fossiler Brennstoff



Erneuerbare Energie



Strommix



H₂ und –derivate im Energiesystem– was sagen die Studien?

1. Aktuelle Szenarien

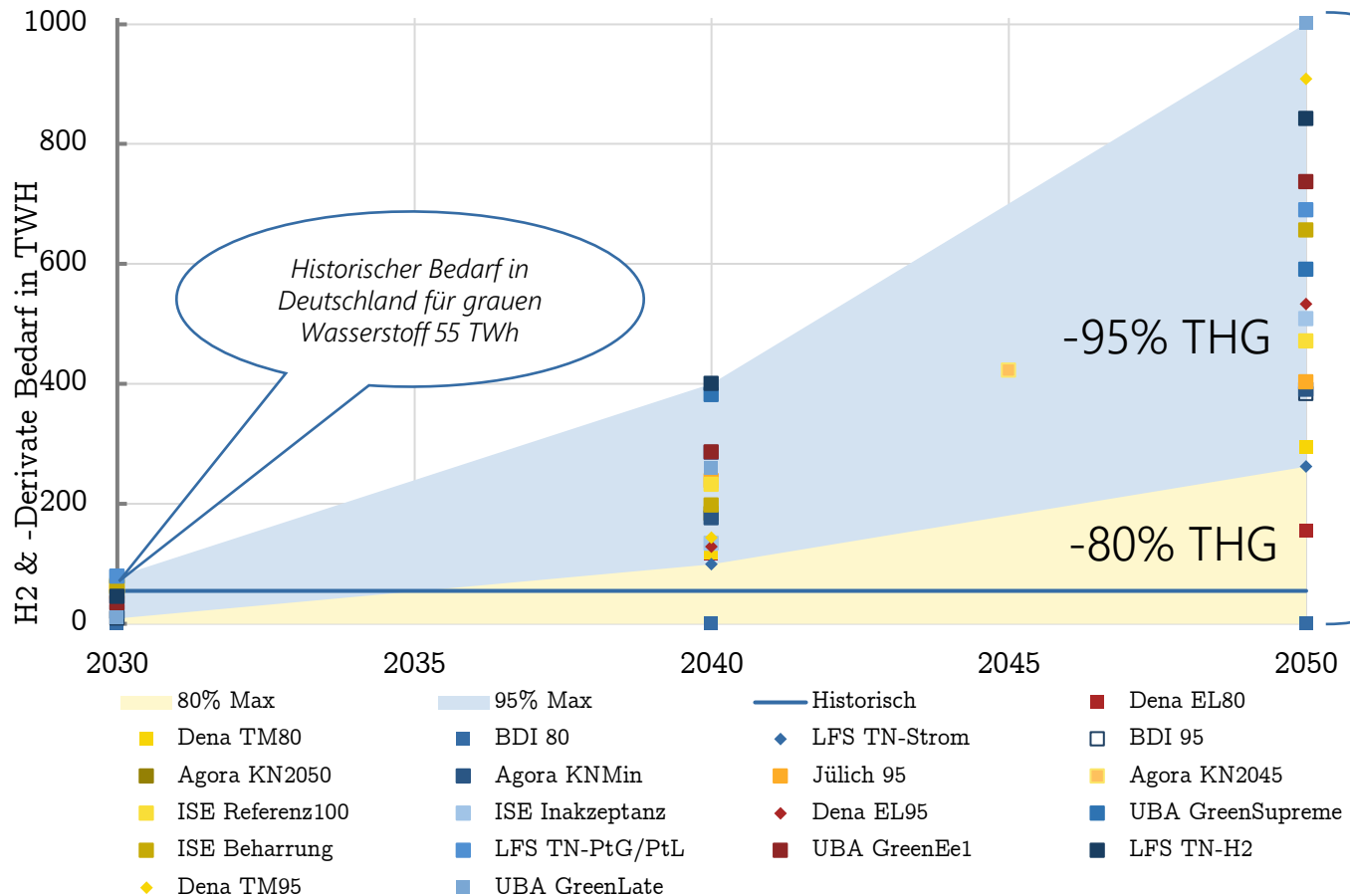
Klimaneutral bis 2045*

Studien	Kürzel f. Szenarien	Hrsg.	Jahr
Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität	UBA GreenEe1 UBA GreenLate UBA GreenSupreme	UBA	2019
Klimaneutrales Deutschland (2050 & 2045)	Agora KN2050 Agora KN2045 Agora KNMin	Agora	2020
eXtremOS	solidEU	FfE	2021
Leitstudie – Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der Erneuerbaren (3)	LFS TN-Strom LFS TN-H2 LFS TN-PtG/PtL	BMWi	2021
dena- Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität	KN100	dena	2021
Ariadne	Elek. Imp H2 Imp E-Fuel	BMBF	2021
BDI Klimapfade 2.0	BDI 2.0	BDI	2021

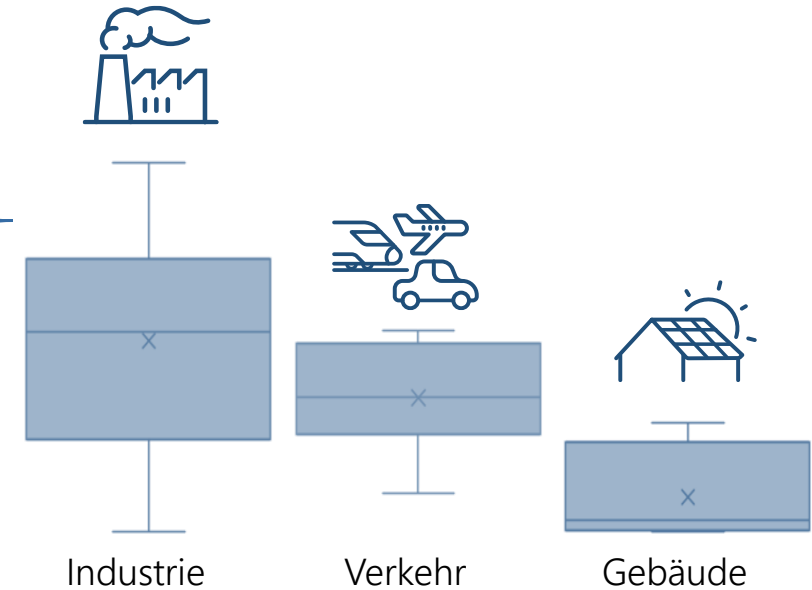
*für LFS nur für TN-Strom gültig (eingeschränkt)

Treibhausgasreduktions-Ziele treiben Bedarf für H₂ & -derivate

Entwicklung des H₂ & -derivate Bedarfs 2030 bis 2050



Sektorale Verteilung 2050



Eigene Berechnungen basierend auf [4]

Klimaneutral 2045 - Auswahlkriterien für Studienvergleich



>95%
Emissions-
reduktion



Fokus
Deutschland



Veröffentlicht
ab 2021



Sektoren-
modellierung



2030 2045

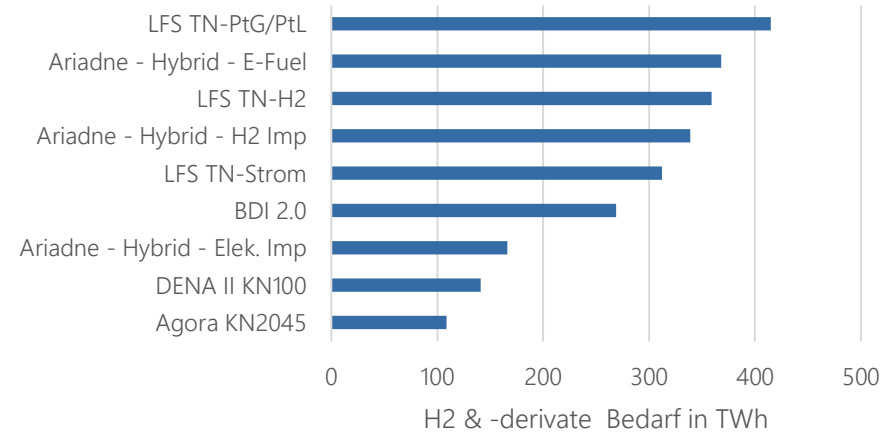
Klimaneutral
2045*

*für LFS nur für TN-Strom gültig (eingeschränkt)

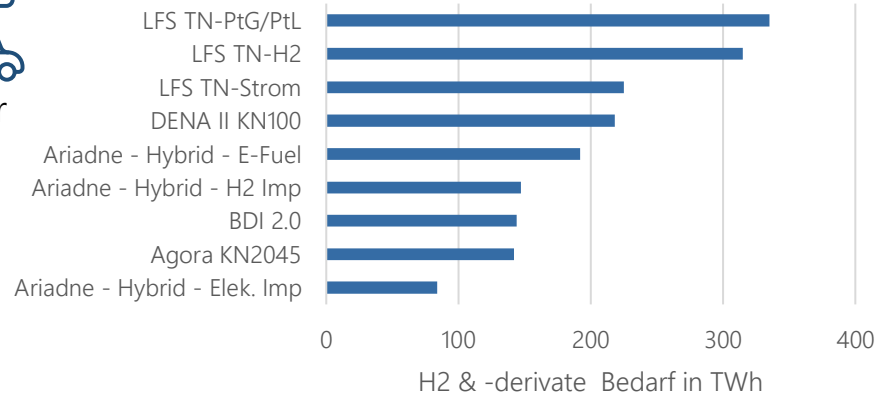
H₂ & -derivate werden insb. in Industrie und Verkehr benötigt - Endenergiebedarfe im Zieljahr (2045/2050)



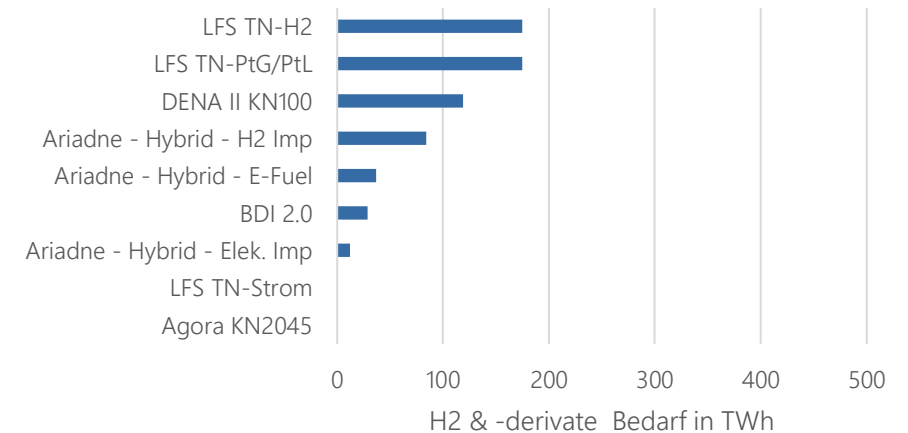
Industrie



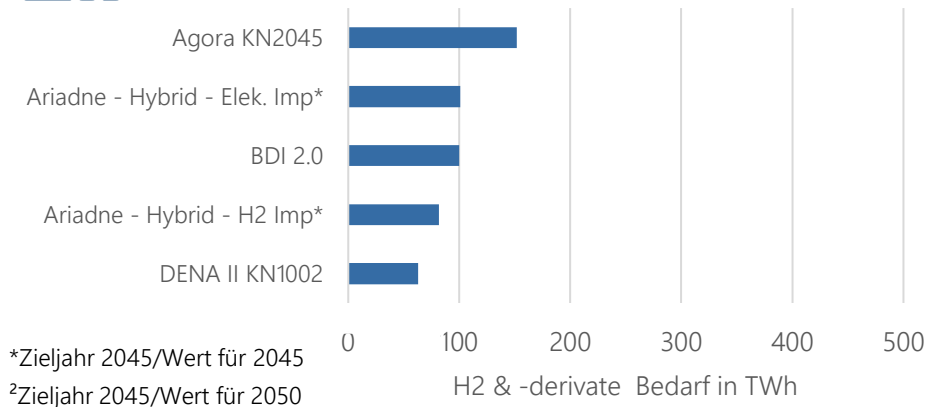
Verkehr



Gebäude



Signifikante Bedarfe für H₂ & -derivate in neuesten Studien auch im Umwandlungssektor



- Signifikante Mengen für Rückverstromung, insb. für Spitzenlast
- Deutliche Verringerung der Bedarfe in Raffinerien (bis zu 0 TWh)
- Interpretation schwierig, da Sektor in Studien unterschiedlich bilanziert

Welche Anwendungen
sind sinnvoll?

2. Mögliche Anwendungen
und deren Bewertung

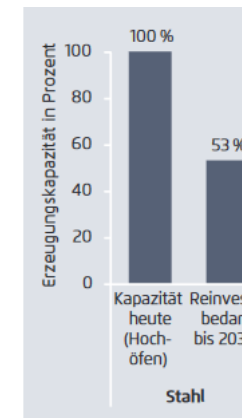
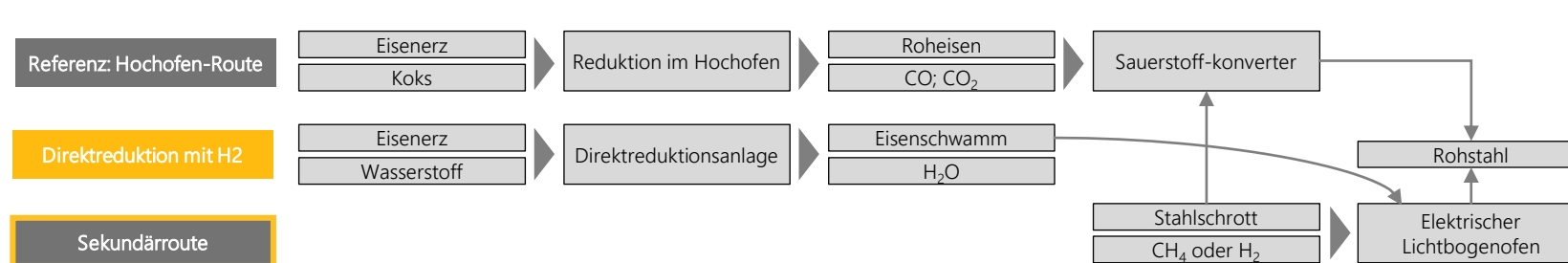
Zwei kommerzielle Alternativen zur Emissionsreduktion marktreif

Primärroute: Direktreduktion (DRI)

- Direkter Ersatz für fossile primäre Hochofenroute
- Reduktion von Eisenerz mittels Wasserstoff/Erdgas zu Eisenschwamm
- Verarbeitung von Eisenschwamm/Stahlschrott zu Rohstahl
- Bedarf von ~35-70 TWh Wasserstoff in aktuellen Studien

Sekundärroute: Lichtbogenofen

- Recycling von Stahlschrott, deutlich energieeffizienter
- Verarbeitung zu Stahl im Lichtbogenofen mit Strom
- Stand der Technik, Erhöhung der Kapazität durch höhere Verfügbarkeit von Stahlschrott



Konsens bei Bewertung von Anwendungen in aktuellen Studien – Anwendungsampel

Industrie



- Nieder-temperatur-prozesse

- Hochtemperatur-prozesse
- Aluminium

- Stahl
- Chemie
- Raffinerien

Verkehr



- PkW
- Leichte Nutzfahrzeuge
- Nahverkehr

- LkW
- Fernbusse

- Internat. Schiff- und Luftfahrt

Gebäude



- Dezentrale Gebäudeheizung

Bereitstellung



- Grundlast-kraftwerke
- Kurzfristspeicher

- Kraftwärme-kopplung (Fernwärme)

- Spitzenlast-kraftwerke
- Saisonale Speicher
- Raffinerien

Anwendungen in intern. Verkehr, Stahl und Chemie alternativlos

Primärstahl

Alternativlosigkeit, u.a. wg. Ressourcenverfügbarkeit bei Alternativen

Fehlende Wirtschaftlichkeit

Chemie

Stoffliche Nutzung unverzichtbar

Biomasse-basierte Alternativen

Raffinerien

Dekarbonisierung schon vorhandener H₂-Nutzung

Künftige Nachfrage nach H₂ in Raffinerien fraglich

Luft- & Schiffsver.

Benötigte Energiedichten

Teilw., niedriger TRL

Rückverstromung (Spitzenlast)

Speicherung großer Mengen über saisonale Zeiträume möglich

Alternative Speicher- und Flexibilitätsoptionen

Legende:

Technologie

Pro

Contra

LKW

Benötigte Energiedichten

Unsicherheit über volkswirtschaftlich optimale Technologie

Wärmenetze

Residuallastdeckung; CCS in dicht besiedelten Gebieten unswl.

Effizientere Alternative durch Wärmepumpen

Hochtemperatur

Benötigtes Temperaturniveau

Sowohl Elektrifizierung als auch Wasserstoff möglich

Aluminium

→ H₂ Einsatz

Keine vollständige Verminderung der Emissionen

Stark unsichere künftige Nachfragemengen

Weitere Proz.

Bei Einsatz von synth. Methan kein Prozesswechsel

Niedrige Effizienz

PKW

Reichweitenvorteil

Kosten- und Effizienzvorteil von BEV

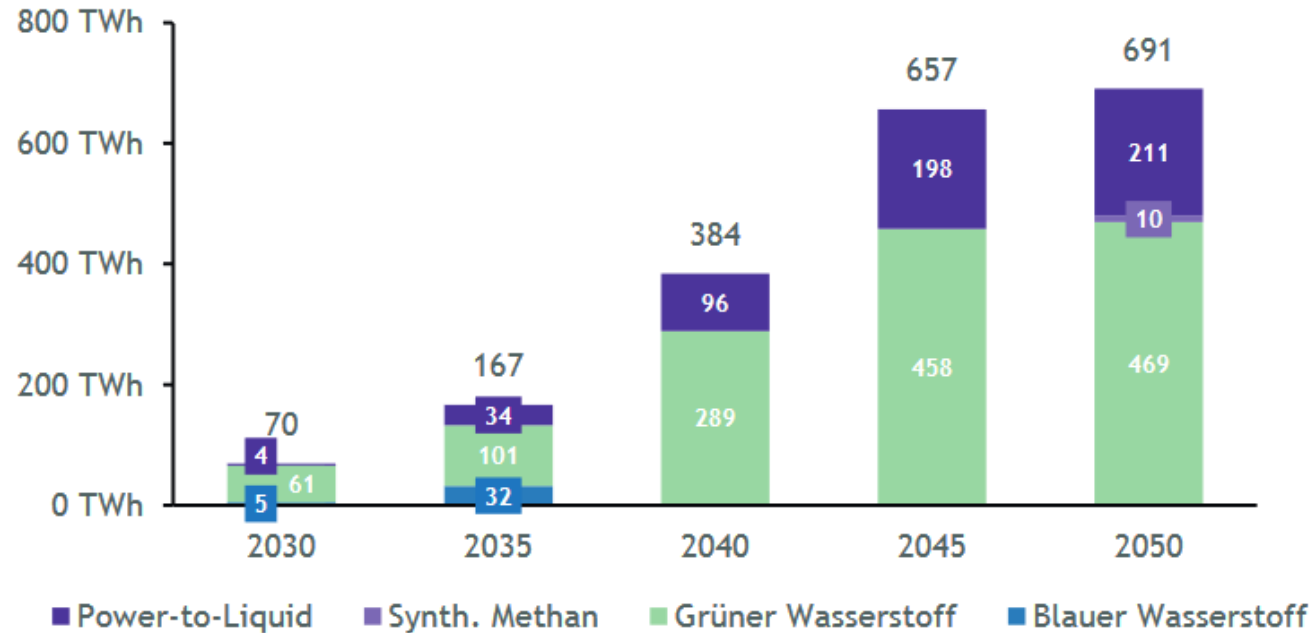
Dezen. Heizen

Geringe Sanierungsrate nötig

Deutlich effizientere Alternative durch Wärmepumpen

Häufig diskutierte Anwendungen im PkW und Gebäudeheizungen nicht sinnvoll

Blauer Wasserstoff wird in manchen Energiesystemszenarien vorübergehend zwischen 2030 und 2040 eingesetzt

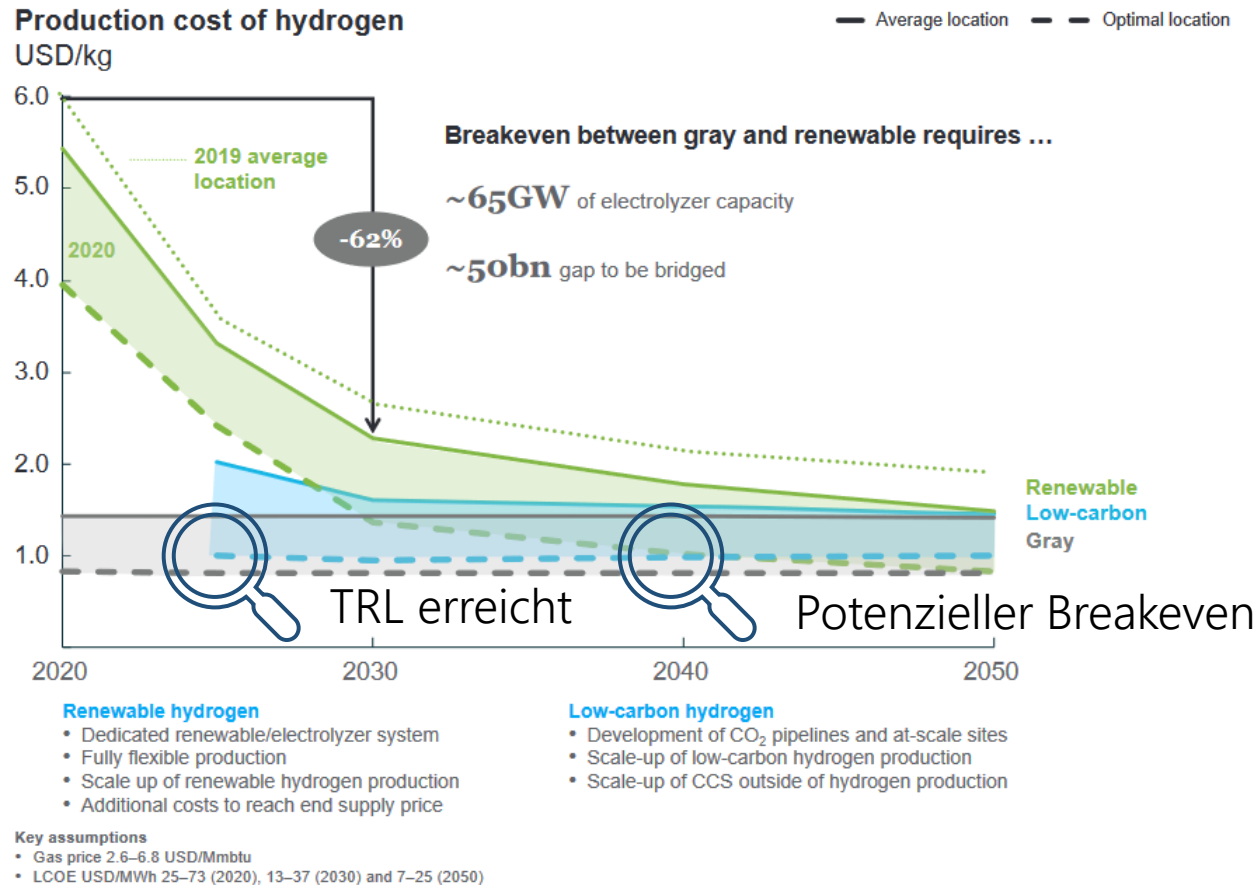


Bildquelle: [5]

Studie	Dena [5]	BDI [8]	Agora [7]	Ariadne [9]
Blauer H ₂	✓	?	✗	✗

- Import im Szenario dena KN100 aus EU-Ländern, auch BDI 2.0 erwähnt Import vor 2040 als Option
- Begrenzte Verfügbarkeit von Elektrolysewasserstoff bedingt Import blauen Wasserstoffs
- Import aus bspw. Norwegen wird von BMWK akzeptiert
- Sowohl mengentechnisch als auch ökonomisch wird grüner Wasserstoff ab 2040 attraktiver

Aus wirtschaftlicher Sicht kann es möglicherweise zu einem Rentabilitätsfenster von einigen Jahrzehnten geben



- Stark abhängig von Faktoren wie Gaspreis, Kosten Elektrolyseur, Strompreis, CO₂-Preis
- Aktuelle Gaspreise machen grünen Wasserstoff bereits heute (temporär) kompetitiv
- Länge des Fensters nur sehr schwer zu bestimmen

Großteile H₂ & -derivate werden importiert, zusätzlicher Strombedarf aus Elektrolyse dennoch signifikant



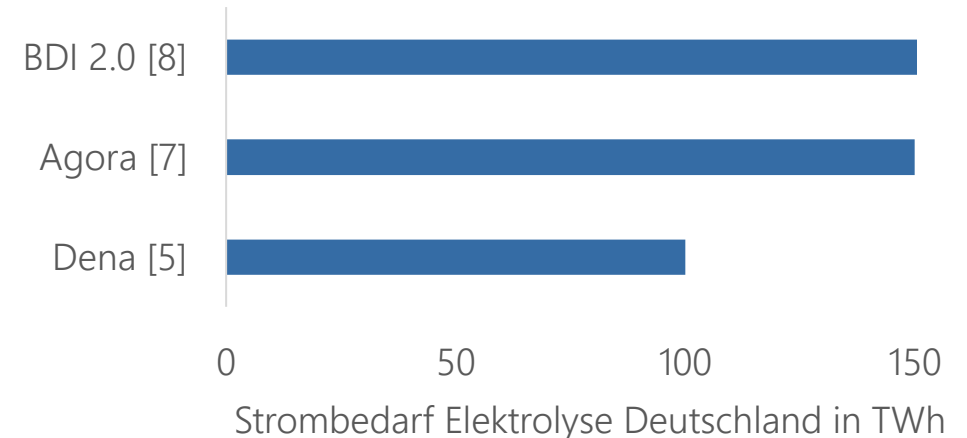
90% bis 100% des synthetischen Gas- und Kraftstoffbedarfs importiert



>50% bis >90% des Wasserstoffbedarfs importiert



Ca. 100-150 TWh (Netz)-Strombedarf für Elektrolyse in Deutschland im Jahr 2045 (vgl. Strombedarf DE 2020: 560 TWh)



Fazit zu Teil 2 „Einordnung der Rolle von Wasserstoff im Energiesystem“



Klimaschutz benötigt Wasserstoff und –derivate



Gewisse H₂ Anwendungen sind (quasi) alternativlos zur Dekarbonisierung



Genaue Nachfragemengen und -Zeitpunkte sind noch offen



Elektrolyse wird insb. im Markthochlauf auch mit Netzstrom betrieben werden, blauer Wasserstoff könnte zwischen 2030 und 2040 eingesetzt werden

Literatur

- [1] Agora Energiewende, Wuppertal Institut: Klimaneutrale Industrie, 2021
- [2] Liebreich Associates: The Clean Hydrogen Ladder, 2021
- [3] Agora Energiewende, AFRY Consulting: No-regret hydrogen, 2021
- [4] Wietschel et al._ Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Karlsruhe, Freiburg, Cottbus: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEG. 2021
- [5] Gierkink, Max et al.: dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität - Klimaneutralität 2045 - Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems. Köln: Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), 2021
- [6] Hydrogen Council, McKinsey & Company: Hydrogen Insights 2021: A Perspective on Hydrogen Investment, Deployment and Cost Competitiveness, 2021
- [7] Klimaneutrales Deutschland 2045 - Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Berlin: Prognos AG, 2021.
- [8] Klimapfade 2.0 Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. München: BDI, 2021
- [9] Ariadne-Report - Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Potsdam: Kopernikus-Projekt Ariadne, 2021

Gesamtfazit zu der Rolle und Nachhaltigkeit von Wasserstoff



Wasserstoff ist zur Erreichung der Klimaziele und tiefen Dekarbonisierung notwendig.



Es gibt sinnvolle, alternativlose Anwendungen, dies sind aber nicht die häufig diskutierten Anwendungen in Pkws und Gebäudeheizungen.



Wasserstoff ist nicht per se emissionsarm, da die Nachhaltigkeit stark von der Herkunft und der Produktionsroute abhängig ist.



Die Nachhaltigkeit von Wasserstoff muss erfasst und geprüft werden, um zu den gewünschten Emissionseinsparungen zu führen.



Zudem sollten weitere Transformationskriterien wie die Systemdienlichkeit berücksichtigt werden.



Für den Markthochlauf wird auch gelber (und blauer) Wasserstoff zum Einsatz kommen.



Dr.-Ing. Anika Neitz-Regett

Leiterin Ressourcen und Klimaschutz

Tel.: +49(0)89 15 81 21- 45

Email: aregett@ffe.de



Tapio Schmidt-Achert, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Tel.: +49(0)89 15 81 21- 25

Email: tschmidtachert@ffe.de



Sofia Haas, M. Sc.

Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.

Tel.: +49(0)89 15 81 21- 69

Email: shaas@ffe.de



Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.

Am Blütenanger 71 – 80995 München

Tel.: +49(0)89 15 81 21 – 0

Email: info@ffe.de

Internet: www.ffe.de

Twitter: [@FfE_Muenchen](https://twitter.com/FfE_Muenchen)