



Dr. Florian Ausfelder (florian.ausfelder@dechema.de)

H₂ und PtX - Technologieoptionen für die Energiewende

22. Oktober 2021, Bad Honnef, AK Energie Herbsttagung

„Wissenschaft und Industrie im Dialog“



DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.



Mehr Infos unter:
www.dechema.de/energieundklima

DECHEMA FOKUSTHEMA

ENERGIE UND KLIMA

- Integration der Chemischen Industrie im Energiesystem
- Transformation der Chemischen Industrie
 - Rohstoff- und Energieversorgung
 - Treibhausgasneutrale Prozesse
 - Standorte und Infrastrukturen
- Industrielle Symbiose in den Grundstoffindustrien
- Chemische Technik für die Energieversorgung der Zukunft
 - Sektorenkopplung
 - Speichertechnologien und Anwendungen
 - Synthetische Kraftstoffe für die Mobilität



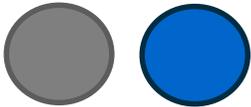
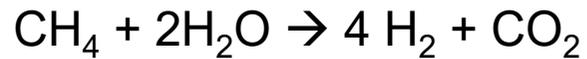
DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.

Wasserstoffherzeugung (Farben)



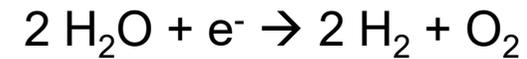
- Dampfreformierung von Erdgas (SMR)



- Vergasung höherer Kohlenwasserstoffe



- Wasserelektrolyse (alkalisch, PEM, SOEC)



- Pyrolyse von Methan



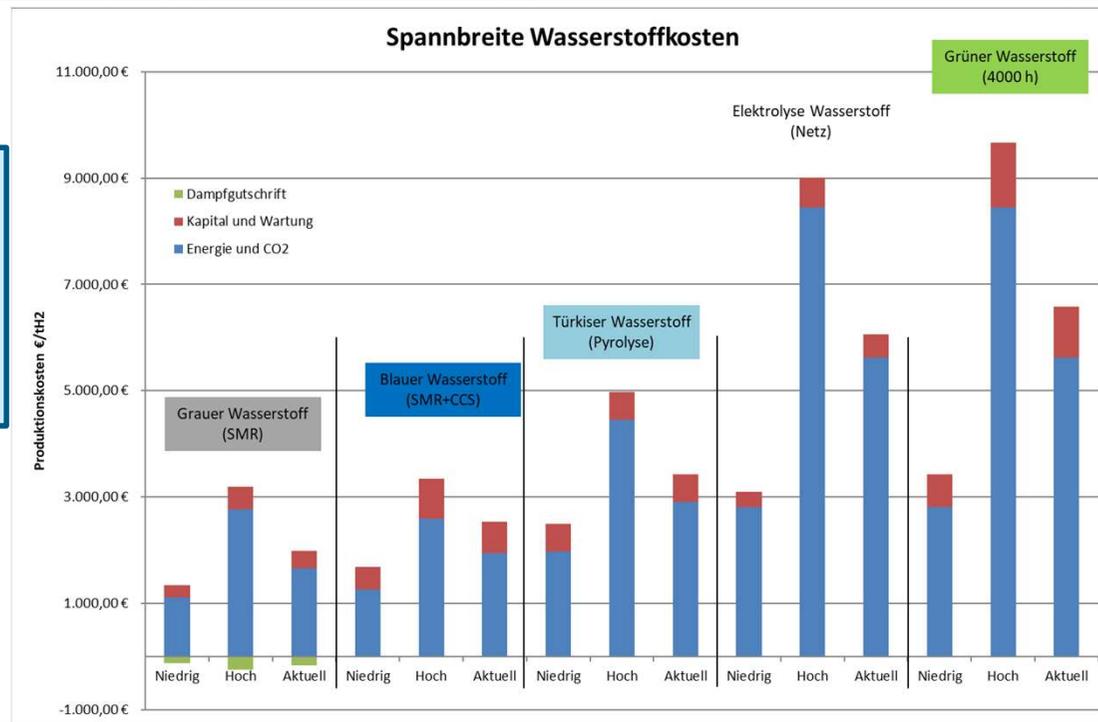
- (Bio-)Photokatalyse
- Microbiologische Pfade
- Thermische Wasserspaltung

...

Gestehungskosten von Wasserstoff

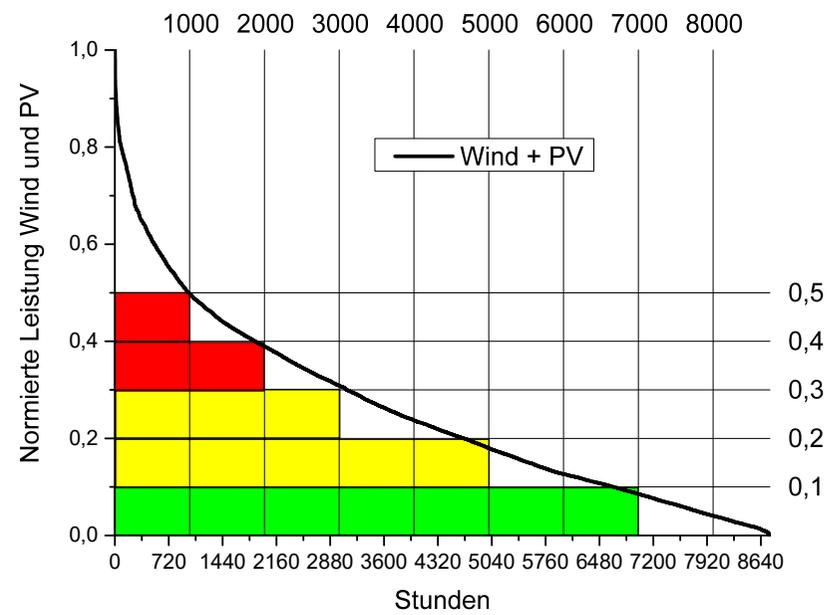
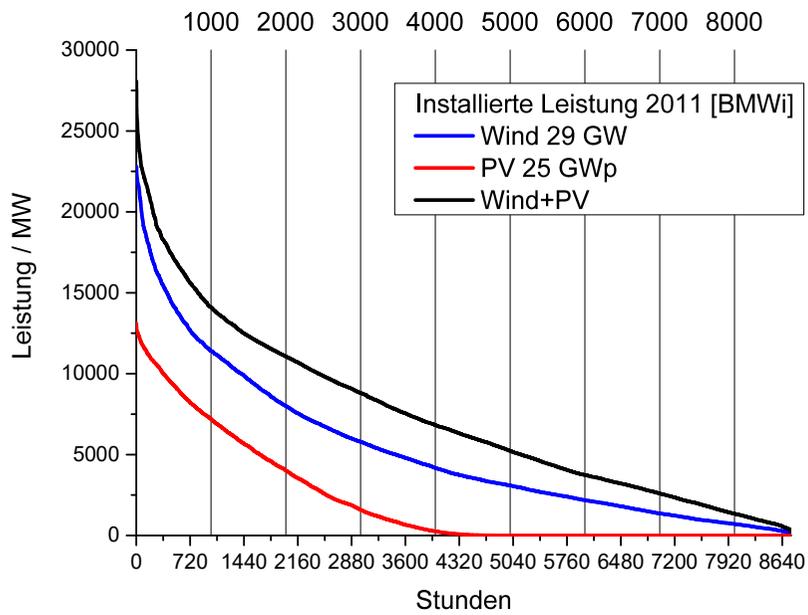


Annahmen:
 Zinssatz 8%
 Abschreibungsdauer 20 a
 Elektrolyseurlebensdauer 10 a
 €/\\$= 1,2
 Erdgaspreis: 2-4 €/kWh
 CO₂-Preis (EUA): 20-100 €/tCO₂
 Strompreis: 5-15 €/kWh

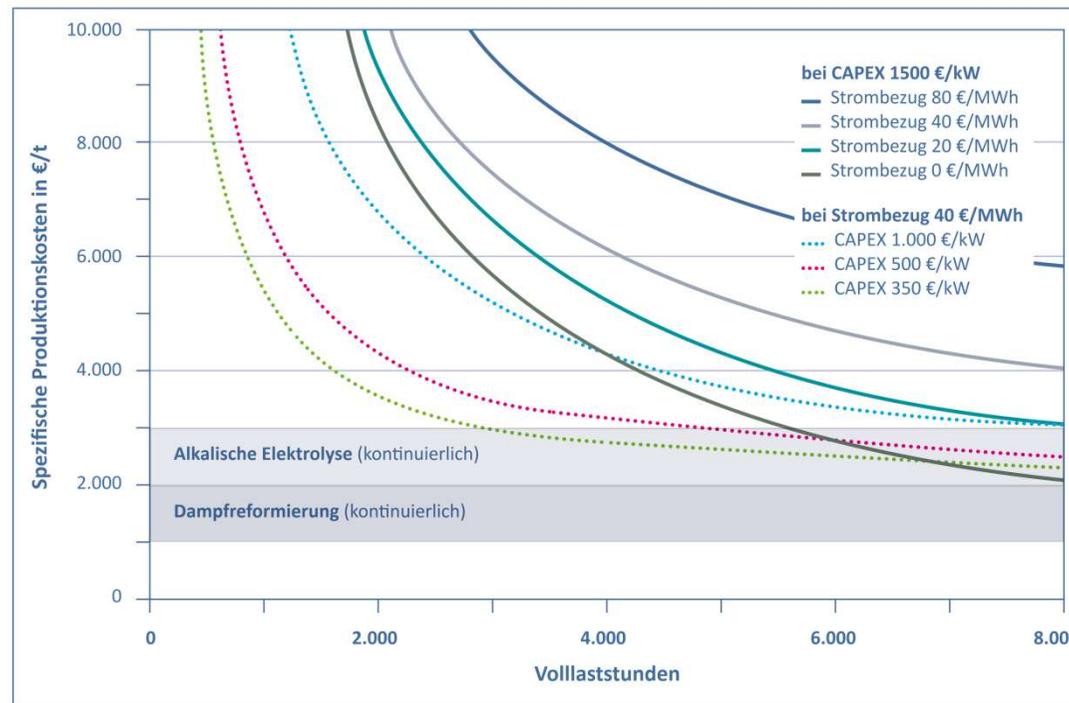


Quelle: BMWI Energiedaten, IEA, Future of Hydrogen, Roadmap Chemie 2050, VCI, DECHEMA, FutureCamp

Volllaststunden erneuerbarer Energien

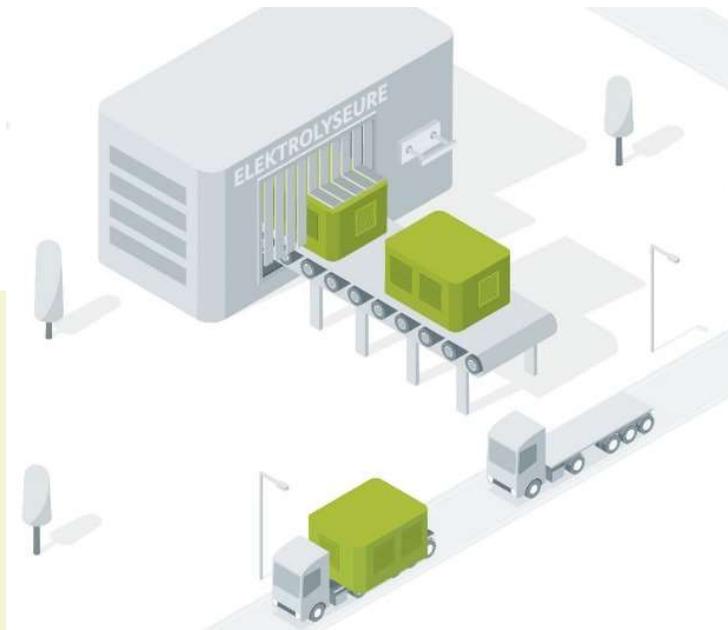


Gestehungskosten von Wasserstoff



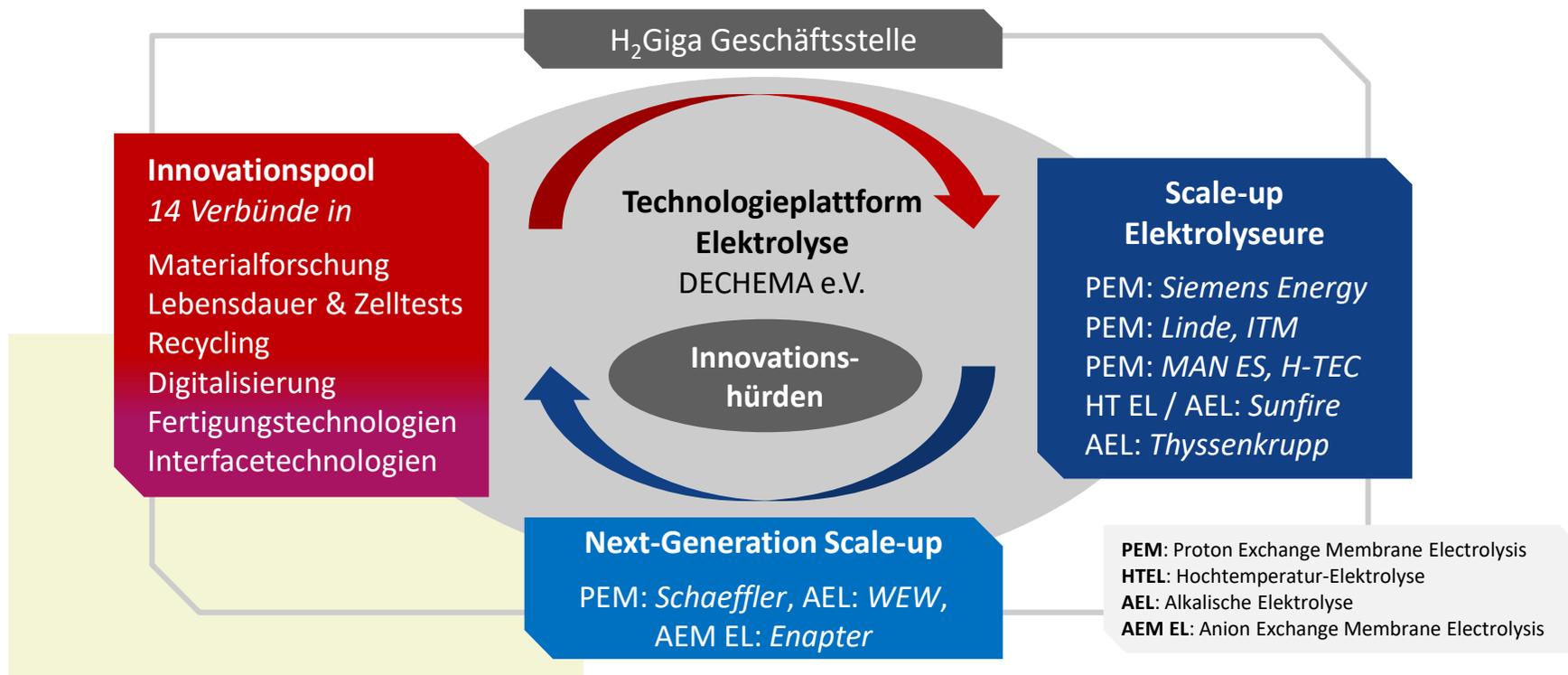
Quelle: »Sektorkopplung« –
 Untersuchungen
 und Überlegungen zur Entwicklung
 eines integrierten Energiesystems, 2017,
 Leopoldina, acatech, Union der deutschen
 Akademien der Wissenschaften.

Teilnehmer & Kennzahlen des Leitprojekts



- **Teilnehmer:**
 - Etwa 30 eigenständige Verbundprojekte
 - Etwa 130 Partner insgesamt
 - Vertreter aus Industrie, KMUs, Start-Ups, Universitäten & Forschungseinrichtungen
 - Vernetzungsprojekt Technologieplattform Elektrolyse
 - Leitprojekte sind prinzipiell offen für neue Partner
- **Laufzeit:** 4 Jahre; Zeitraum 4/2021 bis 3/2025
- **Förderung:** bis zu 500 Mio. €

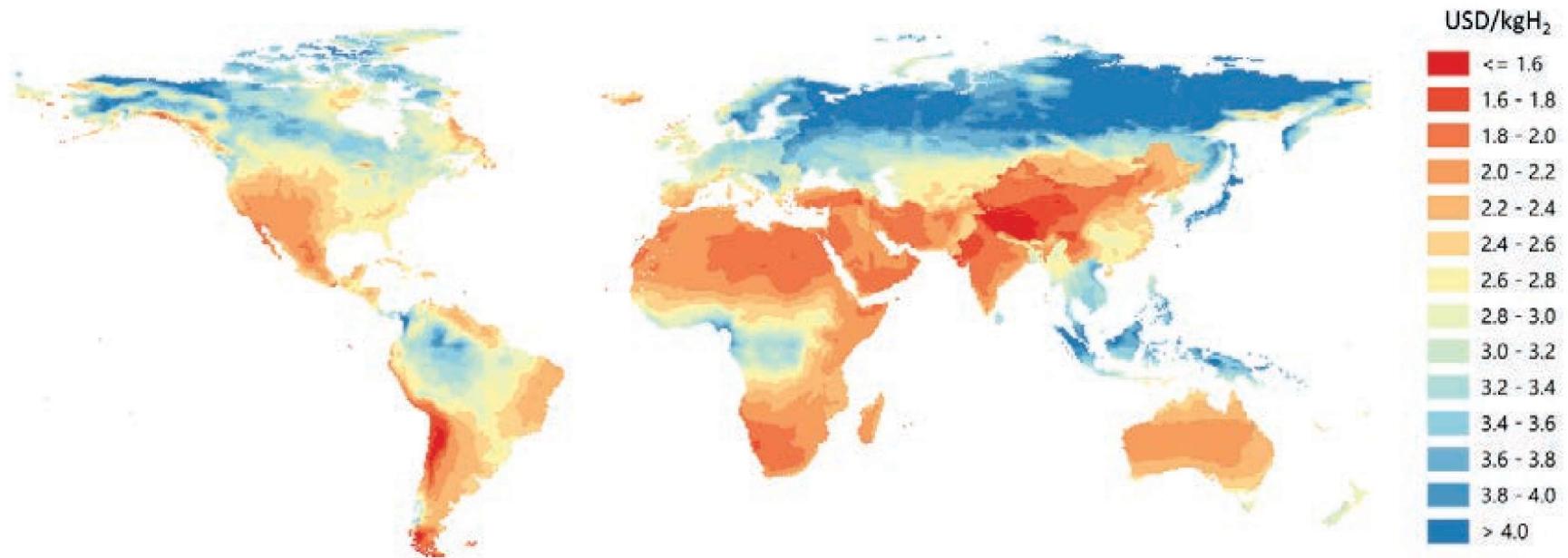
Struktur des Leitprojekts H₂Giga



Gestehungskosten von Wasserstoff



Langfristige Kosten von Wasserstoff aus hybriden Solar-PV- und Onshore-Windsystemen.



Quelle: IEA, The Future of Hydrogen

H2Mare - Offshore Produktion von grünem Wasserstoff und PtX-Syntheseprodukten



Aufgaben und Ziele der DECHEMA

- Projektkoordination TransferWind
- Unterstützung Öffentlichkeitsarbeit
- Techno-Ökonomische & ökologische Analyse
- Integriertes Wassermanagement
- Modelle und Simulationen



Verbund 0+1 OffgridWind und H₂Wind

- Integration H₂-Elektrolyseur in autarke offshore Windkraftanlage

Verbund 2 PtX-Wind

- Untersuchungen zu und Testung von offshore PtX-Prozessen (LNG, Methanol, FT, Ammoniak)
- Engineering einer offshore Forschungsplattform

Verbund 3 TransferWind

- Übergeordnete Fragestellungen: u.a. Wassermanagement, Nutzungsmöglichkeiten, Standardisierung, Regulatorischer Rahmen
- Bürgerbeteiligung

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

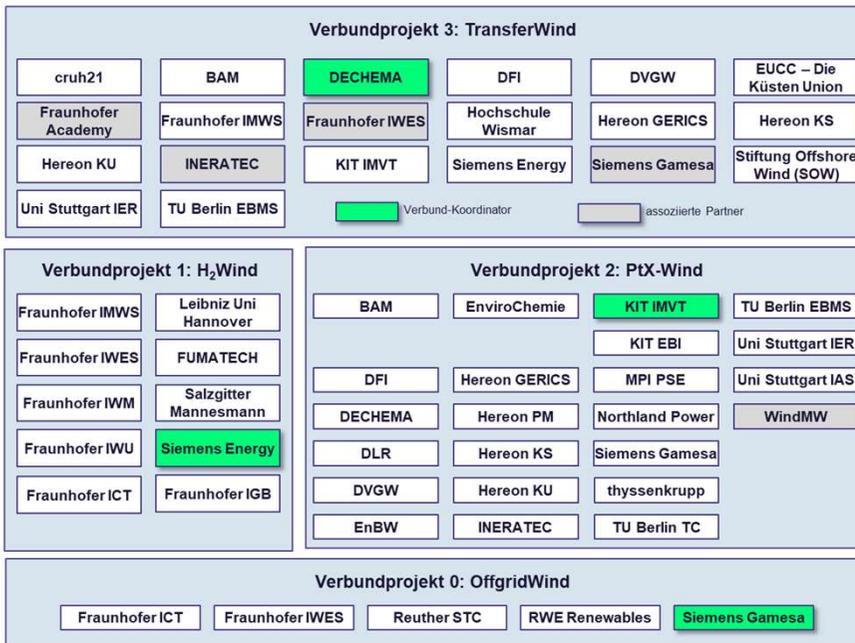
H₂Mare

Offshore Produktion von grünem Wasserstoff und PtX-Syntheseprodukten



Technologieplattform H₂Mare

Siemens Energy mit Unterstützung des Fraunhofer IMWS



Kennzahlen

- Gefördert durch BMBF
- Projektzeitraum: 01.04.2021-31.03.2025
- Förderumfang: H₂Mare ca. 150 Mio. € (Förderung ca. 100 Mio. €)

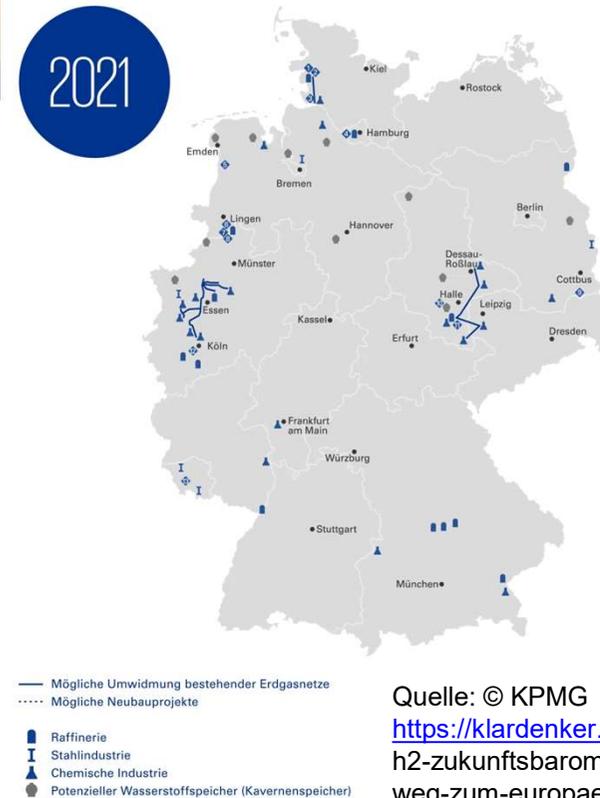
 **Wasserstoff**
Leitprojekte
Grün. Groß. Global.

Transportoptionen für Wasserstoff



- Pipeline, unter Druck
- Pipeline, flüssig
- Wasserstoffträgersubstanzen (LOHC)
- Synthetische Energieträger und Chemikalien (FT-Produkten, NH_3 , MeOH , ...)
- ...

Entwicklung der Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland



Quelle: © KPMG
<https://klardenker.kpmg.de/h2-zukunftsbarometer-auf-dem-weg-zum-europaeischen-wasserstoffnetz/>



TransHyDE – Transportlösungen für Grünen Wasserstoff

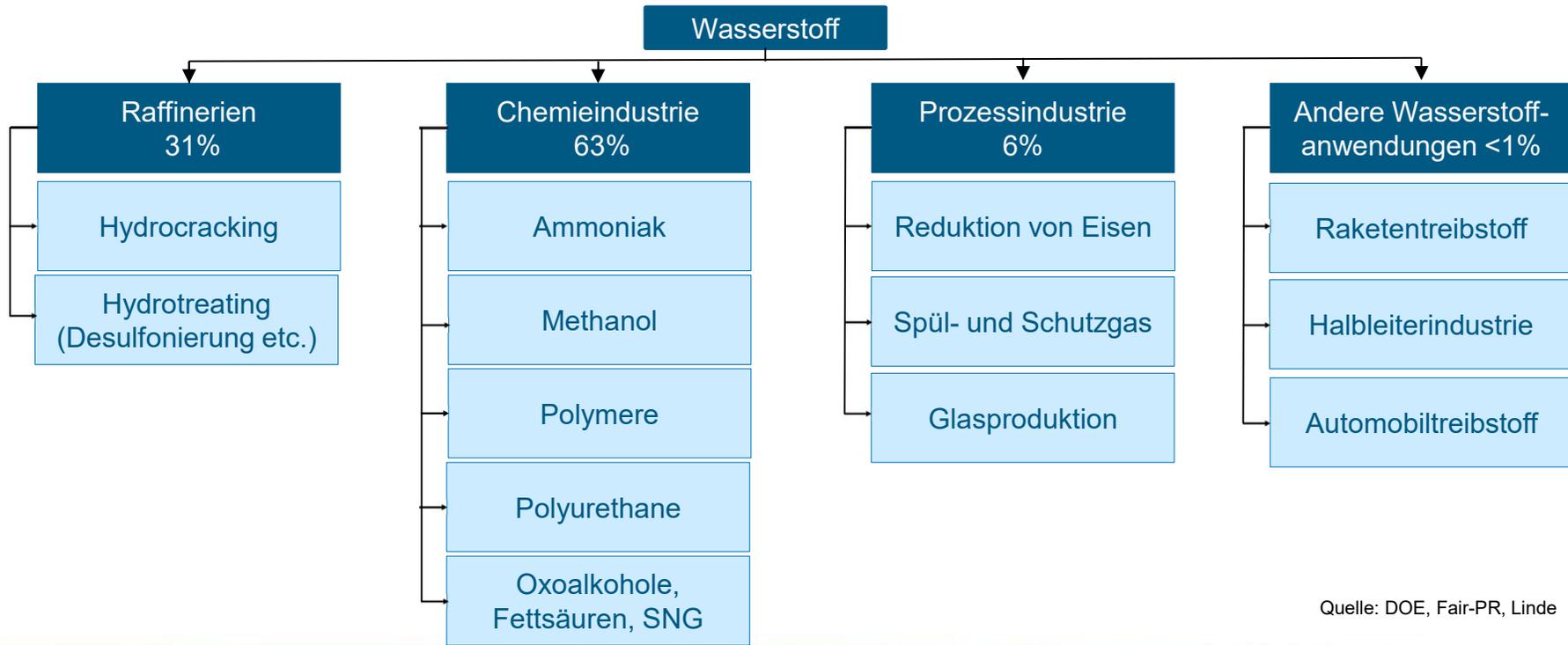


- Grüner Wasserstoff ist ein universell einsetzbarer Energieträger.
- Grüner Wasserstoff ist eine essenzielle Komponenten in der Energiewende hin zur Treibhausgasneutralität.
- Grüner Wasserstoff kann in verschiedenen Sektoren in stark unterschiedlichen Volumen und Spezifikationen eingesetzt werden.
- Das „Leitprojekt“ TransHyDE entwickelt und evaluiert Technologieoptionen für den Wasserstofftransport.
- 140 Mio. € Förderung, 85 Partner, Laufzeit: 01.04.2021 - 31.03.2025

Projektstruktur: Forschungs- und Demonstrationsprojekte

- **QUERSCHNITTSPROJEKT (1)
SYSTEMANALYSE**
- Forschungsprojekt (2) Sichere Infrastruktur: Materialerprobung, Sensorik, Sicherheit
- Forschungsprojekt (3) H₂-Transport über Derivate: Chemie der Wandlung
- Forschungsprojekt (4) Transport von flüssigem Wasserstoff
- Forschungsprojekt (5) Standardisierung, Normierung und Zertifizierung
- Demonstrationsprojekt (A) MUKRAN – H₂-Speicherung in Behältern
- (B) GET-H₂ NUKLEUS– Experimentelle H₂-Pipeline
- (C) CAMPFIRE – Ammoniak als H₂ Transportoption
- (D) HELGOLAND – Logistik für LOHC (liquid organic hydrogen carrier)

Aktueller Bedarf an Wasserstoff



Quelle: DOE, Fair-PR, Linde

Potenzieller zukünftiger Bedarf an Wasserstoff



Industrie:

- Reduktionsmittel (z.B. Raffinerie, Eisenerzeugung, Chemie, ...)
- Synthetisches Chemikalien und Brennstoffe (Chemie, ...)
- Chemisches Kunststoffrecycling
- Prozesswärme (z.B. Glas, ...)
- ...

Stromsystem:

- Speicherung erneuerbarer Energie
- ...

Verkehr:

- Brennstoffzellenbetriebene Antriebe (Zug, LKW, PKW)
- Synthetische Kraft- und Treibstoffe (Schiff-, Flugverkehr, Kraft- und Baumaschinen ...)
- ...

Haushalt und Gewerbe:

- Wärmeversorgung
- Lokale Stromversorgung
- ...

Potenzieller zukünftiger Bedarf an Wasserstoff (Verkehr)



Bahnverkehr:

240 kt/a (Kraftstoffe)

BZ: 0,02 Mio. t H₂

Syn. Fuel: 0,1 Mio. t H₂

LKW:

20,2 Mio. t/a (Kraftstoffe)

BZ: 3,5 Mio. t H₂

Syn. Fuel: 8,7 Mio. t H₂

PKW:

36,9 Mio t/a (Kraftstoffe)

BZ: 6,3 Mio. t H₂

Syn. Fuel: 15,8 Mio. t H₂

Flugzeug:

10,2 Mio. t/a (Treibstoff)

Syn. Fuel: 4,4 Mio. t H₂

(Internationale) Schifffahrt:

1,37 Mio. t/a (Kraftstoffe)

Syn. Fuel: 0,6 Mio. t H₂

NH₃: 0,5 Mio. t H₂

Quellen:

AGEB Energiebilanzen

MWV Mineralöldata 2019

BMVI NOW

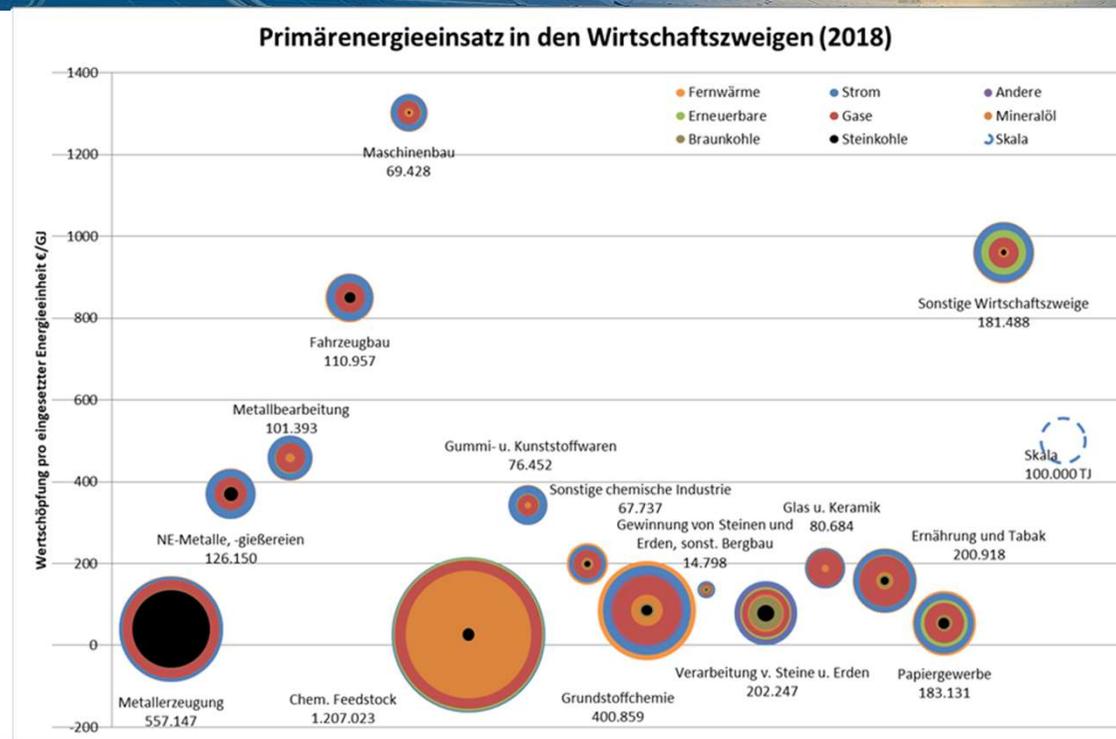
Annahme: Syn. Fuel als FT: $3 \text{ H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$

Potentieller Bedarf an Wasserstoff

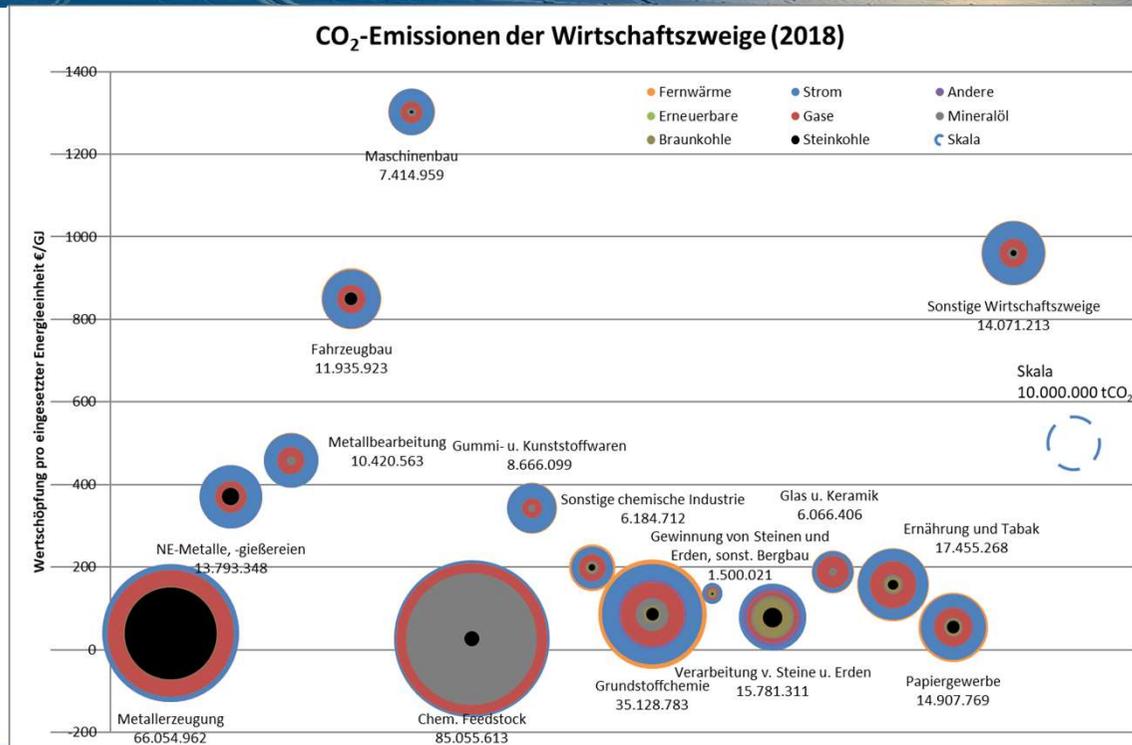
Maßnahme	Wasserstoff- bedarf	Strombedarf Elektrolyse	Aktuelle CO ₂ -Emissionen der Anwendung	CO ₂ -Emissionen Elektrolyse (EU ETS) für 2019 Strommix 400 gCO ₂ /kWh	CO ₂ -Emissionen Dampfreformierung (EU ETS)
Einheit	Mio. t	TWh	Mio. t	Mio. t	Mio. t
Bereitstellung einer Reserve für die Stromversorgung					
2 Wochen Überbrückung einer Dunkelflaute (20 TWh)	1,2	56	22	9,7	
Bereitstellung von Niedertemperaturwärme mit Wasserstoff					
10 % vol im Erdgasnetz	0,44	23	3	9,2	3,2
Vollständige Substitution: Haushalt und Gewerbe	9,7	462	65,3	173,2	70,2
Bereitstellung von industrieller Prozesswärme mit Wasserstoff					
Vollständige Substitution: energetische Nutzung, Erdgas, Industrie	6,5	310	43,6	124,0	47,1
Mobilität (Brennstoffzellenantriebe)					
Gewerbliche Pkw	0,66	31	7,9c 6,3d	12,4	4,8
Gesamte Pkw-Flotte	6,3	302	76,1c 60,3d	120,8	45,6

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

Primärenergieeinsatz in der Industrie



CO₂-Emissionen der Industrie



Industrie: Eisen & Stahl

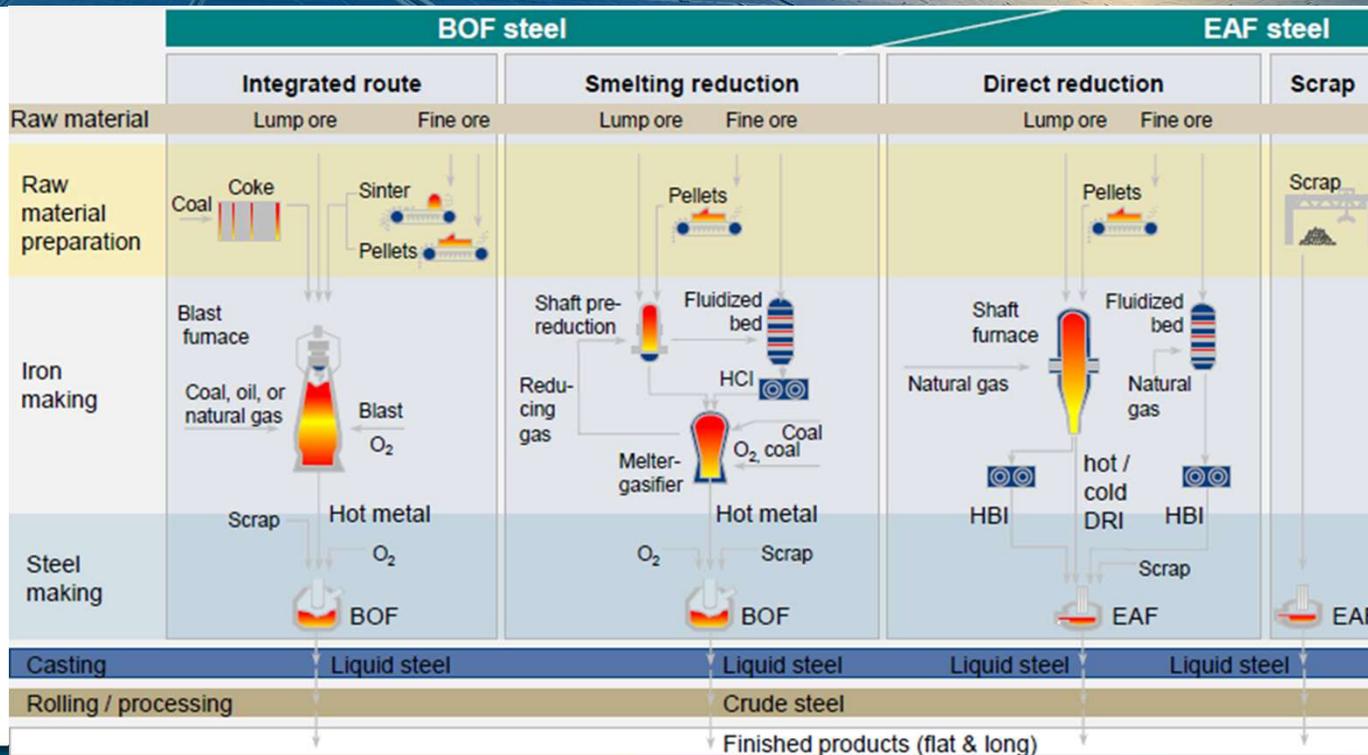


adobe stock



EAF Georgsmarienhütte, www.stahl-online.de

Eisen & Stahl



Quelle:
Marten Sprecher
BFI Stahlakademie

Eisen & Stahl



Integrierte Route

- 1,744 t CO₂/ tCS
- 16,0 t Kohle / tCS (476 kgC)
- Strombilanz: -243 kWh/ tCS

- Energiekosten: $1,744 \text{ tCO}_2/\text{tCS} \times 25 \text{ €(EUA)} + 0,476 \text{ C/tCS} \times 80 \text{ €/tC} - 243 \text{ kWh/tCS} \times 0,04 \text{ €/kWh} = \mathbf{71,96 \text{ €/tCS}}$

DRI (H₂)

- 54 kg H₂ (3.000 kWh/tCS, $\eta=70\%$)
- Strombedarf: 531 kWh/tCS (EAF)

- 30 Mio. tCS → **1,62 Mio. t H₂**
- Bis zu 52 Mio. t CO₂ Reduzierung möglich (z.B. mit aktuellem Stromemissionsfaktor 400 gCO₂/kWh → 42 Mio. t CO₂)
- Energiekosten: $3.531 \text{ kWh/tCS} \times 0,04 \text{ €/kWh} = \mathbf{141,24 \text{ €/tCS}}$

Chemische Industrie und Raffinerien



Source: BASF Pressefoto

Chemische Industrie



Wasserstoff als Feedstock

Direkte Nutzung von Wasserstoff (z.B. Ammoniakproduktion)
Chemisches Recycling

E-Chemicals / E-Fuels:

Methanol:



Weitere Schritte MTO, MTP, MTA, MTG

Fischer-Tropsch Synthese:



Weitere Schritte Raffinerieprozesse

Wasserstoff als Energieträger:

Erzeugung von Prozesswärme:

- GuD-KWK Anlagen
- H₂-Kessel zur Dampferzeugung
- Direkte Nutzung als Brennstoff in Prozessen

Kopernikus-Projekt P2X - Beitrag von PtX für die Energiewende

Kopernikus P2X

- Erforschung, Validierung und Implementierung von „Power-to-X“ Konzepten

Technologiepfad 1 - Wasserstoff als Energievektor

- H₂ aus Elektrolyse für Anwendungsfälle in den Sektoren Energie, Mobilität und Chemie

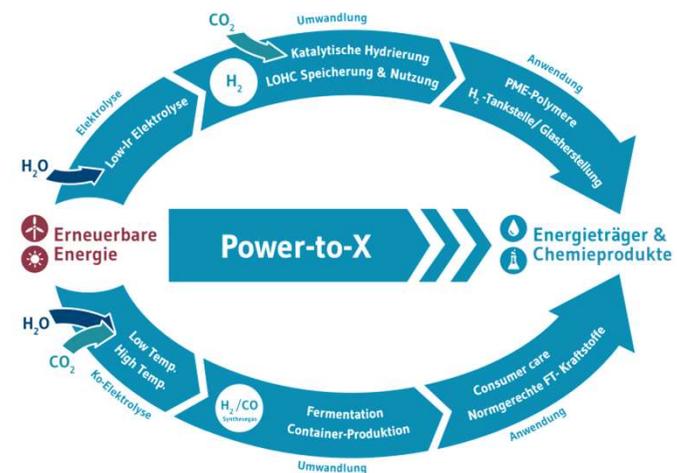
Technologiepfad 2 - Synthesegas als Energievektor

- Umwandlung von Synthesegas aus der Ko-Elektrolyse zu Produkten für die Sektoren Mobilität & Chemie

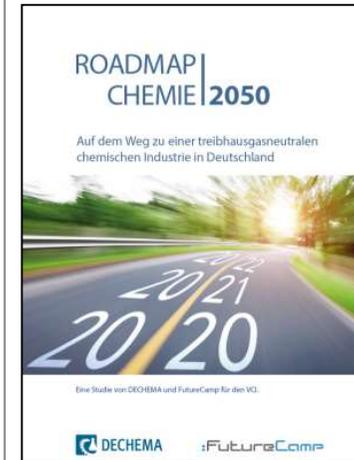
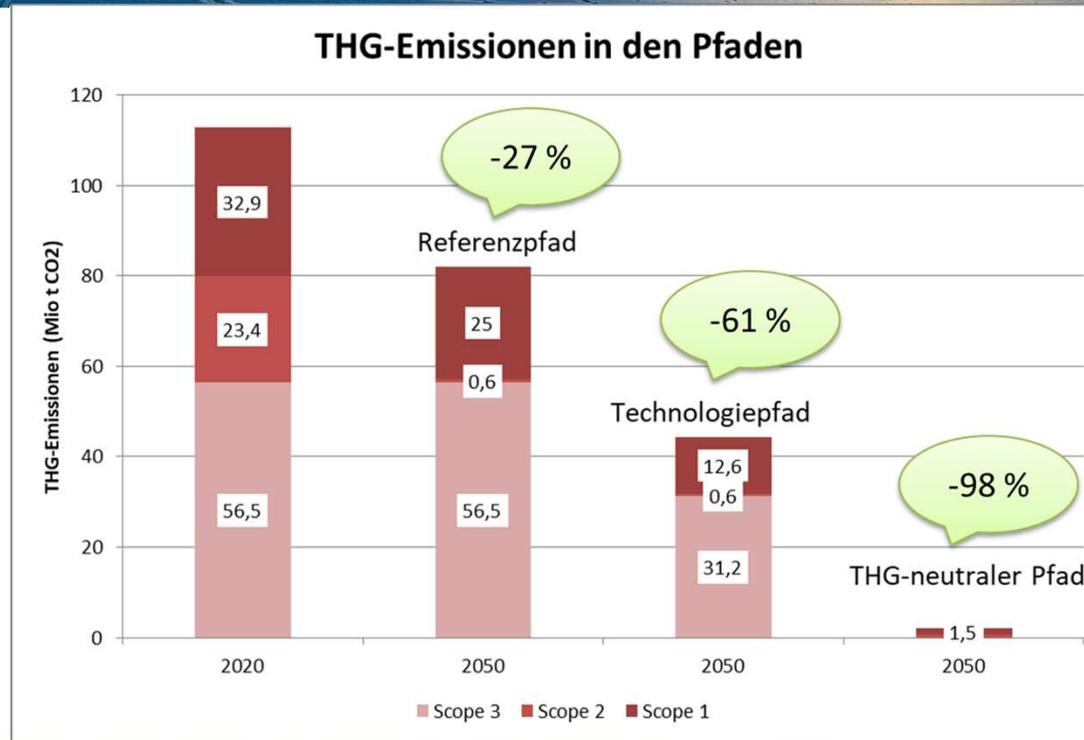


Aufgaben und Ziele der DECHEMA

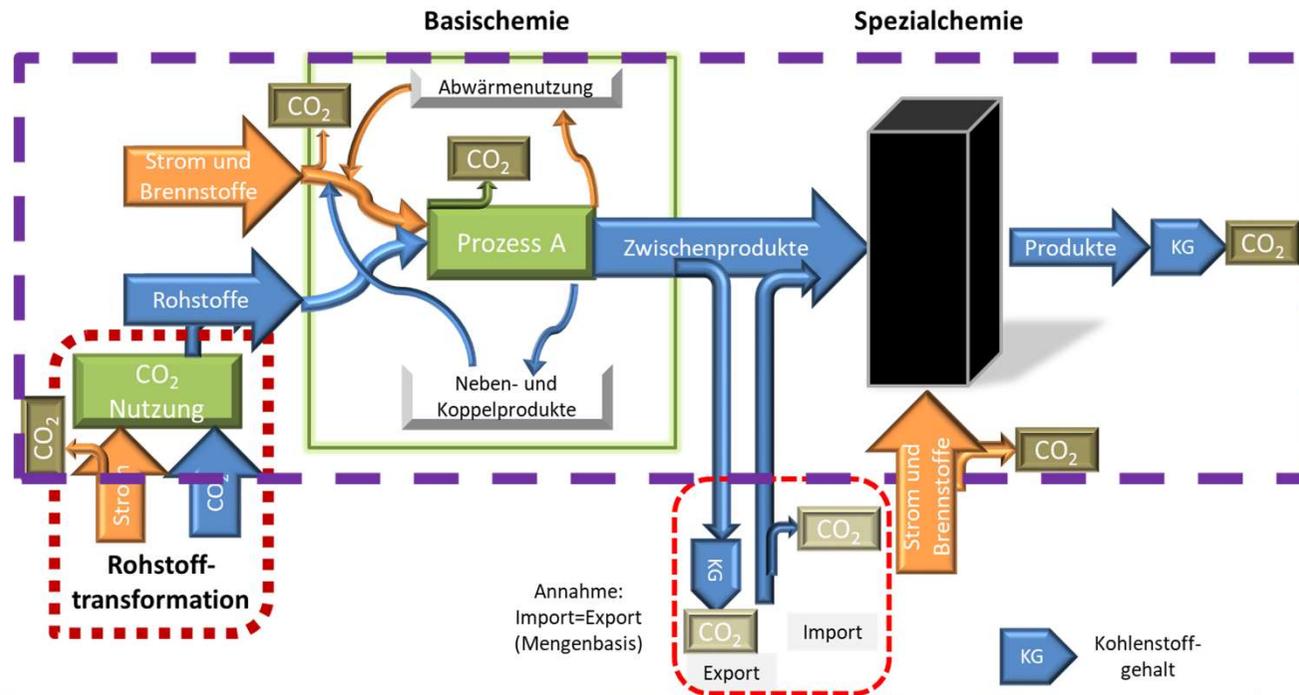
- Teil der Koordinationsgruppe
- Leitung der Geschäftsstelle
- Leitung des Projektmanagements
- Leitung des APs Kommunikation
- Leitung des Roadmappings



Treibhausneutralität für die deutsche Chemische Industrie



Kohlenstoffbilanz



Chemische Industrie: Ammoniak



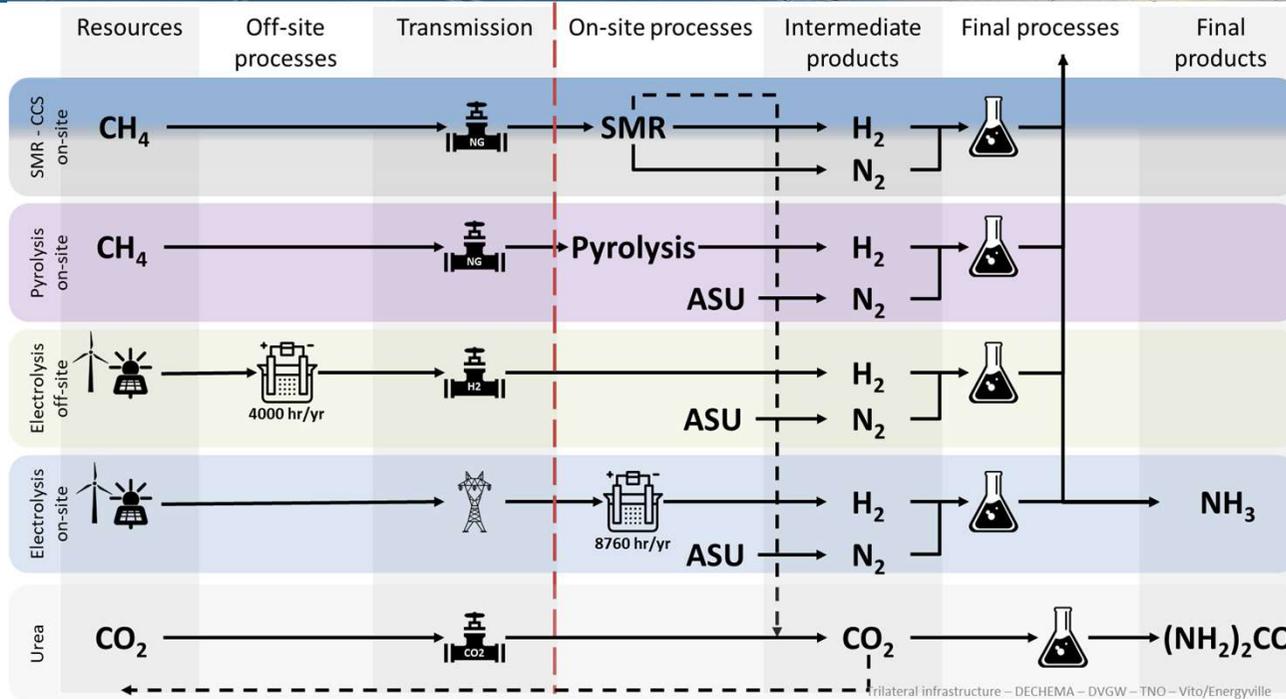
Konventionelle Ammoniak Produktion

- Wasserstofferzeugung (SMR):
$$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$$
- Ammoniak (Haber-Bosch)
Synthese:
$$3\text{H}_2 + \text{N}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$$
- Aktuelles Produktionsvolumen:
3 Mio. t NH_3 /a = 520 kt H_2 /a

Alternative Pfade

- Blauer Wasserstoff (CCS) → CO_2 -Infrastruktur
- Elektrolyse (on-site, Netz) → Verstärkung Stromanbindung
- Grüner Wasserstoff: Elektrolyse (off-site, erneuerbar) → H_2 -Infrastruktur
- Türkiser Wasserstoff: Pyrolyse von Methan → Verstärkung Erdgasinfrastruktur

Infrastruktur Bedarf: Ammoniak



- 

+2.7 Mton/a
SMR + CCS
- 

≈2.7 Mton/a
SMR (BAU)
- 

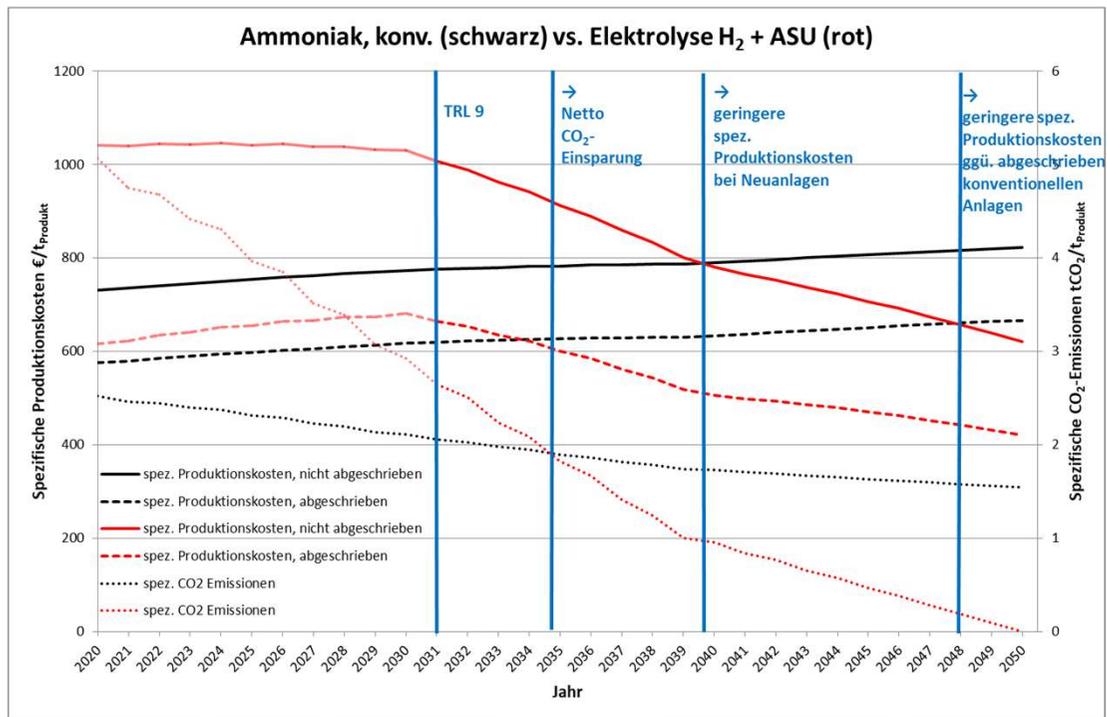
+104 PJ/a NG
Pyrolysis of NG
- 

+16.5 TWh/a
Electrolysis
- 

+350 kt H₂/a
Hydrogen (offsite)

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.202000199>

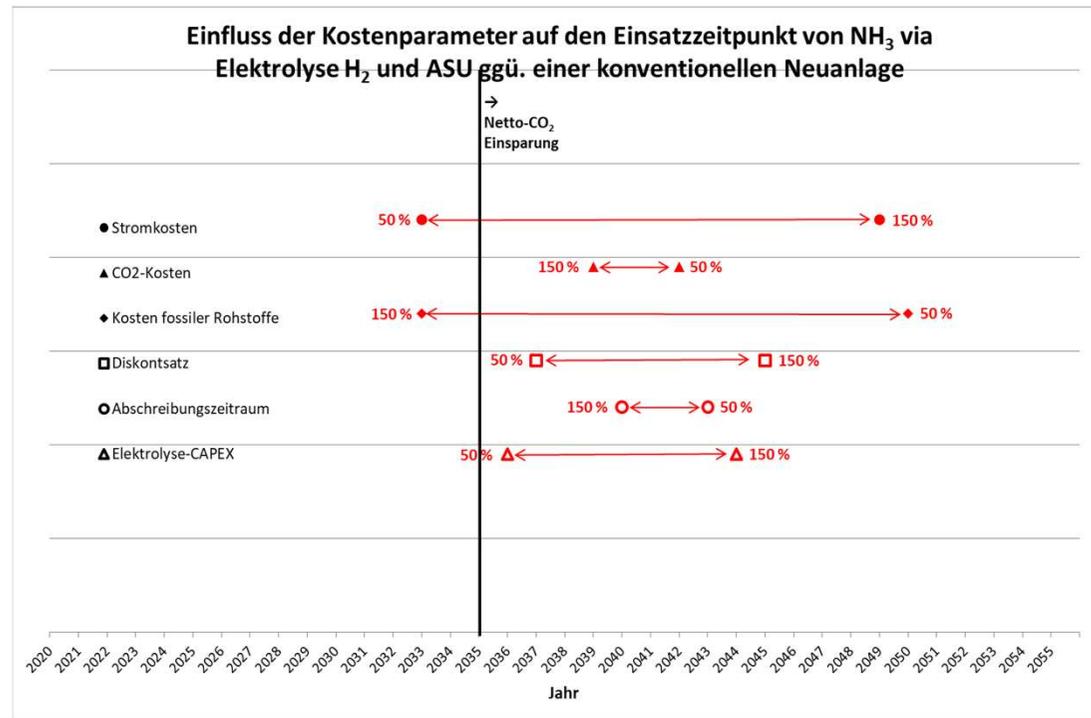
Bewertung von Technologieoptionen?



Annahmen:
 Strompreis: 4-5 €/ct/kWh
 CO₂ (EUA): 25-100 €/tCO₂
 Emissionsfaktor (Netz)
 Fossile Energieträger: 14,34 €/GJ
 Elektrolyseur: 8000 – 2000 €/tH₂
 Diskontsatz: 8%
 Abschreibung: 20 a

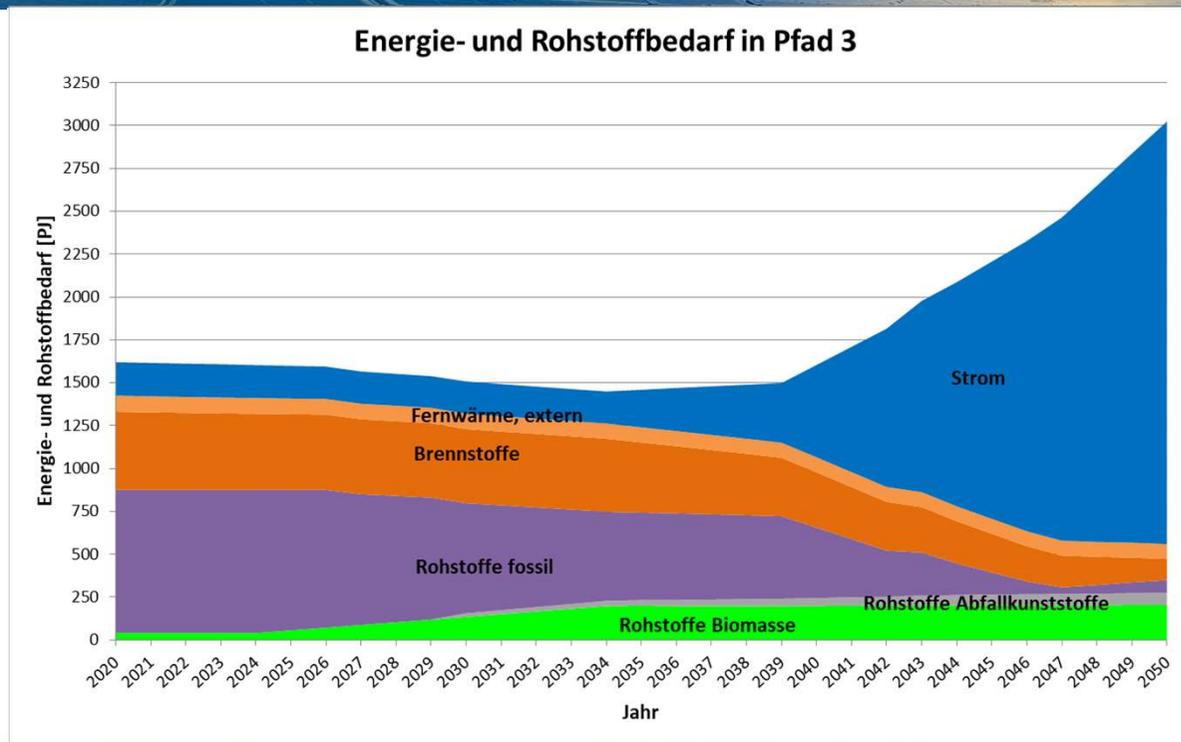
Source: Roadmap Chemie 2050,
 VCI, DECHEMA, FutureCamp

Sensitivitätsanalyse

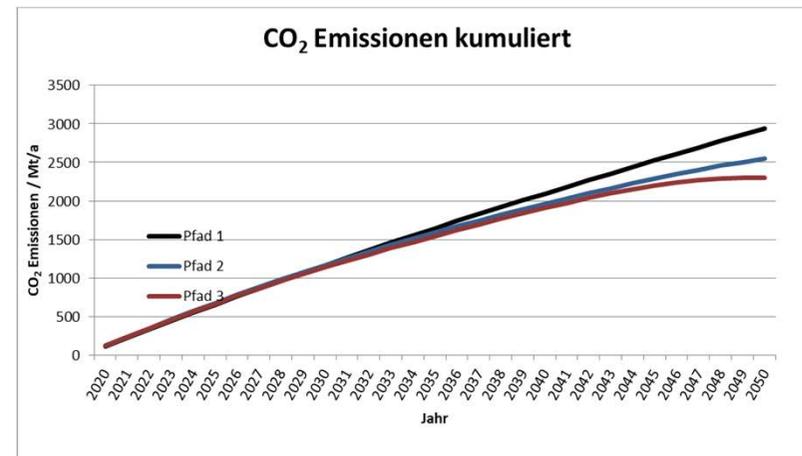
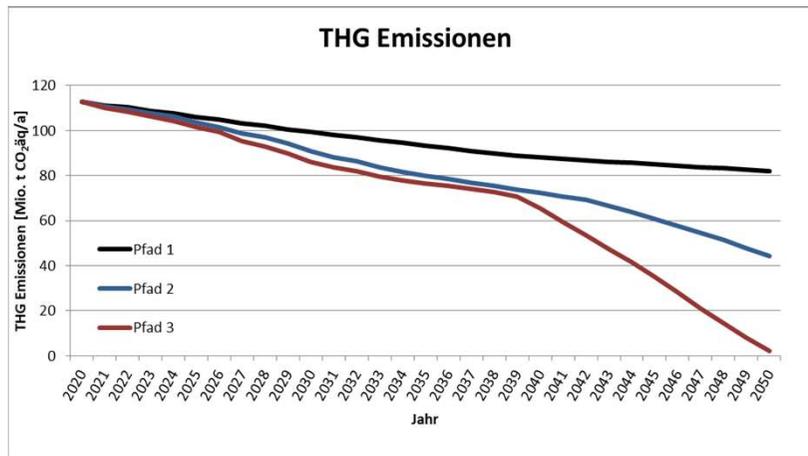


Source: Roadmap Chemie 2050, VCI, DECHEMA, FutureCamp

Treibhausgasneutralität der chemischen Industrie



Entwicklung der Treibhausgasemissionen



Potenzieller zukünftiger Bedarf an Wasserstoff (Industrie)



Eisen & Stahl:

1 t Stahl (DRI): 54 kg H₂ (stöchiometrisch)

30 Mio. t Primärstahl → 1,6 Mio. t H₂

Chemie (aktuell 1,1 Mio. t H₂):

1 t syn. Naphtha (FT): 429 kg H₂
(stöchiometrisch mit CO₂)

16 Mio. t Naphtha → 6,9 Mio. t H₂

2,9 Mio. t Ammoniak → 0,5 kt H₂

Glasindustrie (energetisch):

Behälterglas: 7,2 GJ/t → 60 kg H₂

Ca. 1,7 Mio. t /a → 0,1 Mio. t H₂

Flachglas: 9,0 GJ/t → 75 kg H₂

Ca. 3,6 Mio. t/a → 0,3 Mio. t H₂

Quelle, jeweils für 2019:
Stahl-online.de
Chemiewirtschaft in Zahlen online, VCI
BVGlas Statistik

Trans4Real - Wissenschaftliche Transferforschung für Reallabore zu Sektorkopplung und Wasserstofftechnologien

Reallabore



- Wasserstofftechnologien im industriellen Maßstab unter realen Bedingungen
- 11 Labore für Herstellung, Verteilung und Anwendung von Wasserstoff



Aufgaben und Ziele der DECHEMA



- Wissenschaftliche Begleitung und Vernetzung der Reallabore



- Ökologische und techno-ökonomische Analysen
- Hochskalierung



- Übertragbarkeit auf andere Bereiche und Standorte
- Einordnung in das Energiesystem



- Einbindung der Erkenntnisse der Reallabore in einen (globalen) Wasserstoffmarkt



- Ableiten von Handlungsoptionen aus Reallaborbegleitung und systemischen Analysen

Power-to-X Pathways - Power-to-X Technologien für die Welt



Ziel: Unterstützung der **Entwicklung nachhaltiger PtX Märkte:**

- Entwicklung von **Allokationsszenarien** für Wasserstoff/PtX Produkte
- Analysen der **Wertschöpfungskette**
- Empfehlungen zur Entwicklung von **rechtlichen Rahmenbedingungen**
- Machbarkeitsstudie zum Bau einer **PtX-Pilotanlage** in Marokko, Evaluation der Fördermöglichkeiten
- Information der politische Debatte in Deutschland, der EU und den regionalen Märkten

Aufgaben DECHEMA

- Lead für den Vergleich der verschiedenen Szenariostudien in der globalen Komponente
- Unterstützung in vielen Studien, Kontakte zur Industrie

▪ Länderkomponenten:

-  Argentinien
-  Marokko
-  Südafrika
-  Globale Komponente

▪ Verbundkoordinator: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

▪ Partner:

▪ Finanzierung:

-  Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
-  INTERNATIONALE KLIMASCHUTZINITIATIVE (IKI)
- 20 M€, 4 Jahre

H₂-Kompass

Werkzeug zur Erstellung einer Roadmap für eine deutsche Wasserstoffwirtschaft

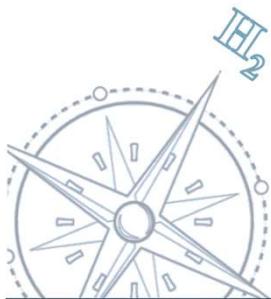
Ziel:

Entwicklung eines H₂-Kompass mit **Handlungsoptionen und Anwendungsszenarien** auf Basis

Vorgehen:

- einer **Meta-Analyse** bestehender Roadmaps & Studien
- und eines **Stakeholder-Dialogs**
- Darstellung der Vor- und Nachteile der Optionen im Sinne einer **Wenn-Dann-Logik**
- Aufzeigen unterschiedlicher Aspekte (z.B. notwendige Technologien, Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsbedarf, Beitrag zum Klimaschutz, rechtliche, ökonomische und soziale Fragen)
- Bewertung der Optionen und Szenarien durch relevante **Kriterien**
- Aufzeigen der notwendigen **Umsetzungsschritte** und der **Rollenverteilung** aller beteiligten Akteure

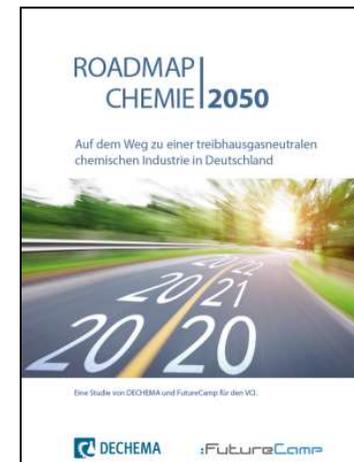
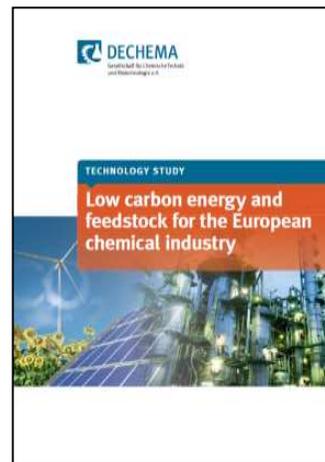
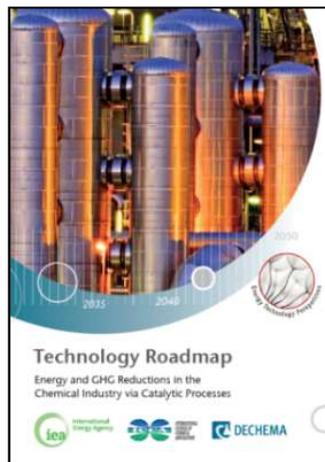
Adressaten: BMBF und BMWi unter Abstimmung mit dem **Nationalen Wasserstoffrat**



- Projektzeitraum: 01.06.2021 - 31.05.2023
- Förderumfang 4,25 Mio. €

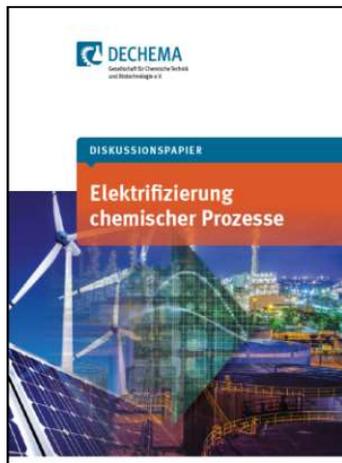
Bild: Blauer-Kompass / cleanpng.com

Roadmaps der Chemischen Industrie (national, europäisch, global)



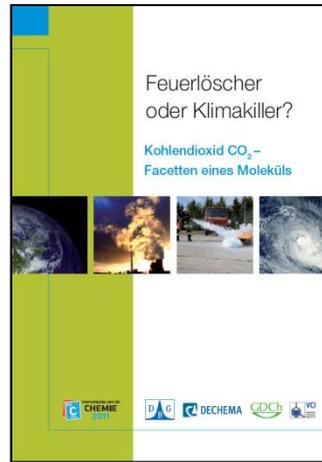
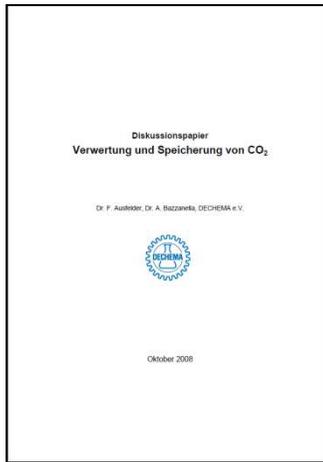
<https://dechema.de/studien.html>

Elektrifizierung und Flexibilität von Prozessen der Chemischen Industrie



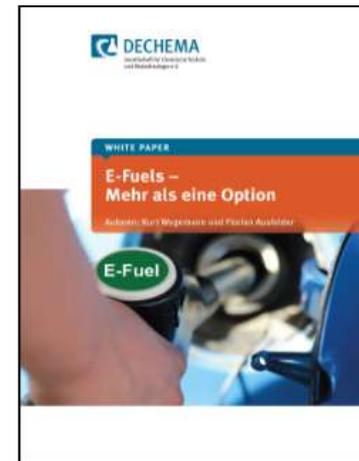
<https://dechema.de/studien.html>

Nutzung von CO₂ als Rohstoff für Chemikalien und Kraftstoffe (CCU)



<https://dechema.de/studien.html>

PtX für Chemikalien und Kraftstoffe



<https://dechema.de/studien.html>

Systembetrachtungen



<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/cben.201700004>

<https://www.acatech.de/publikation/sektorkopplung-untersuchungen-und-ueberlegungen-zur-entwicklung-eines-integrierten-energiesystems/>

https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/Energieforschungskonzept.pdf

<https://www.acatech.de/publikation/wechselwirkungen-im-energiesystem/>

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Anusha Alagu



Chokri Boumrifak



Angee Fehling



Thomas Hild



Dennis Krämer



Alexander Möller



Philip Ruff



Florian Ausfelder



Jens Artz



Stéphanie Dolique



My Yen Förster



Maximilian Kotzur



Luisa López



Sabrina Müller



Dinh Du Tran



Andrei Barascu



Hanna Dura



Eghe Herrmann



Isabel Kundler



Anastasia Molchanova



Simone Rogg



Kurt Wagemann