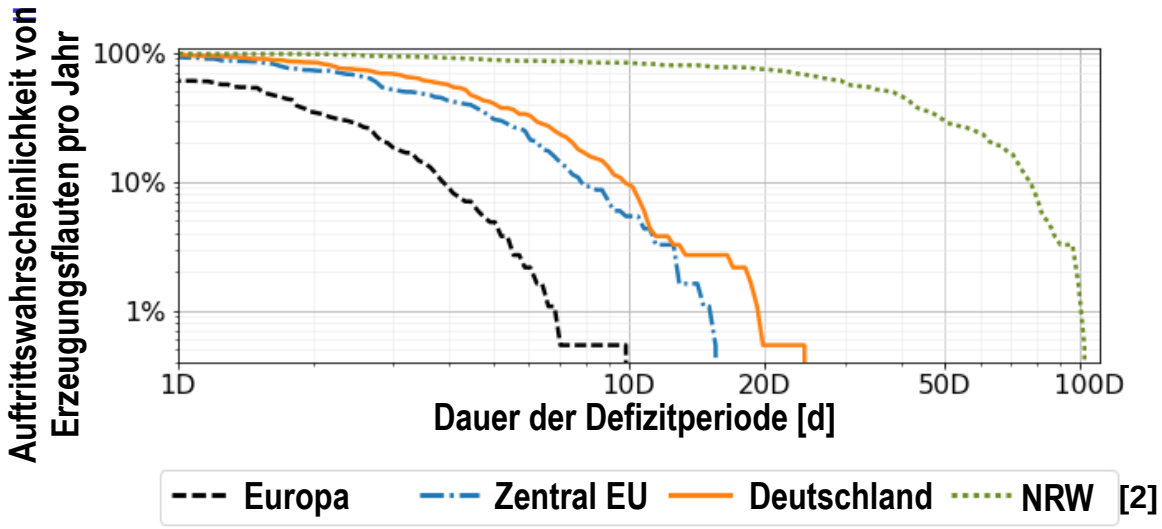
Grüner Wasserstoff und andere regenerative Energierohstoffe im globalen Energiesystem

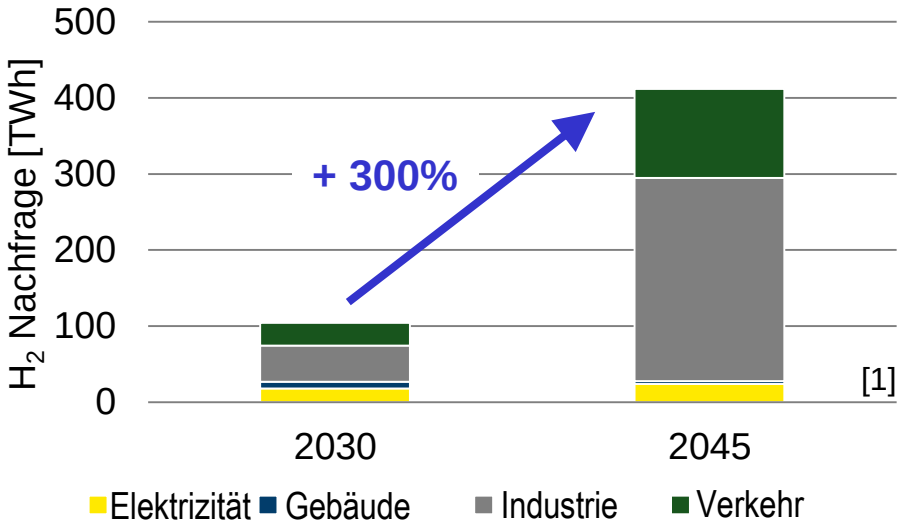
Heidi Heinrichs, Amin Lahnaoui, Fabio Schojan, Jürgen Kern, Niklas Wulff, Franziska Müller-Langer, Marco Klemm, Lukas Jansen, Norman Gerhardt , Eva Hauser, Henrik Mantke, Daniel Banuti, Christine Rösch, Florian Peterssen

Nutzen von Grünem Wasserstoff & Derivaten im Globalen Energiesystem?

Treibhausgasneutrale Energiesysteme Erfordern Grünen Wasserstoff

- Grüner Wasserstoff **Säule für Treibhausgasneutralität** in Deutschland [1]
- H_2 Produktion erfordert **zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energien**
- Deutschland wird **Wasserstoffimporte** benötigen (~50% der H_2 Nachfrage [1])

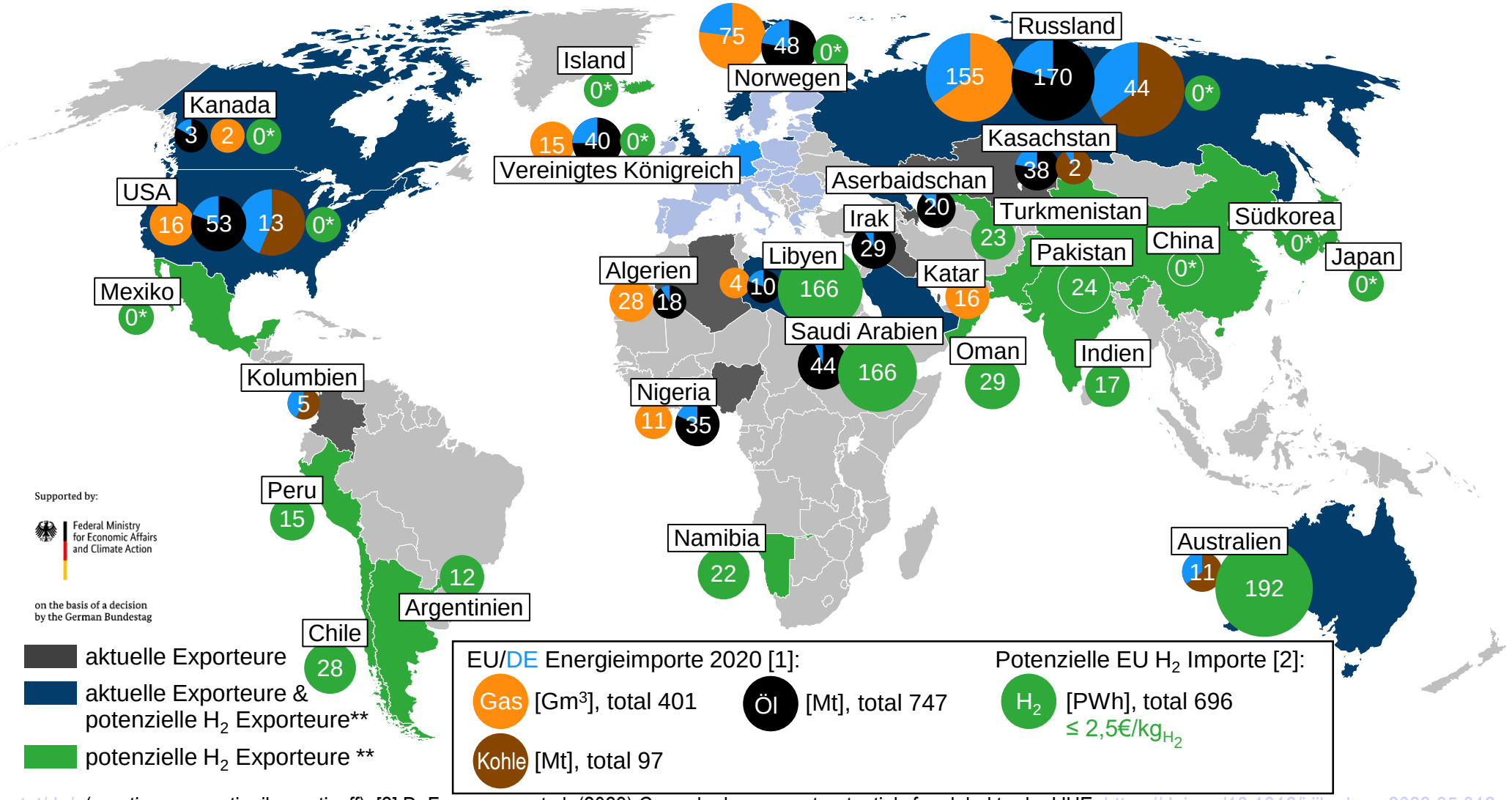




- **100% erneuerbare Energiesysteme benötigen saisonale Speicher** auch für große gut verbundene Regionen wie Europa
- **Grüner Wasserstoff** gespeichert in Salzkavernen kann diese **saisonale Speicherung ermöglichen**

[1] D. Stolten et al. (021): Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045. [2] Ryberg et al. (2019): Occurrence of variable renewable energy system generation lulls in a future European capacity scenario. In proceedings of the International Conference on Applied Energy (ICAE) 2019, Västeras, Sweden.

Alte und Potenziell Neue Energieexportländer für EU und Deutschland?



Supported by:

Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action

on the basis of a decision by the German Bundestag

JÜLICH Forschungszentrum | IEK-3 Techno-Economic Systems Analysis

*aufgrund von Mittelung der besten 5%,
**Länderauswahl anhand von vorteilhaften Bedingungen für Freiflächen-PV und onshore Windturbinen

aktuelle Exporteure

aktuelle Exporteure & potenzielle H_2 Exporteure**

potenzielle H_2 Exporteure **

EU/DE Energieimporte 2020 [1]:

Gas [Gm³], total 401

Öl [Mt], total 747

Kohle [Mt], total 97

Potenzielle EU H_2 Importe [2]:

H_2 [PWh], total 696

≤ 2,5€/kg_{H_2}

[1] https://ec.europa.eu/eurostat/de/: (nrg_ti_gas, nrg_ti_oil, nrg_ti_sff), [2] D. Franzmann et al. (2023) Green hydrogen cost-potentials for global trade, IJHE, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.012

Forschungsergebnisse Entlang von Globalen H_2-Produktionsrouten

Betrachtete Produktions- und Transportrouten:

- H_2
- PtX
- BtX+PtX
- Pyrolyse + CC
- LH_2 Transport

Potenzielle Exportländer:

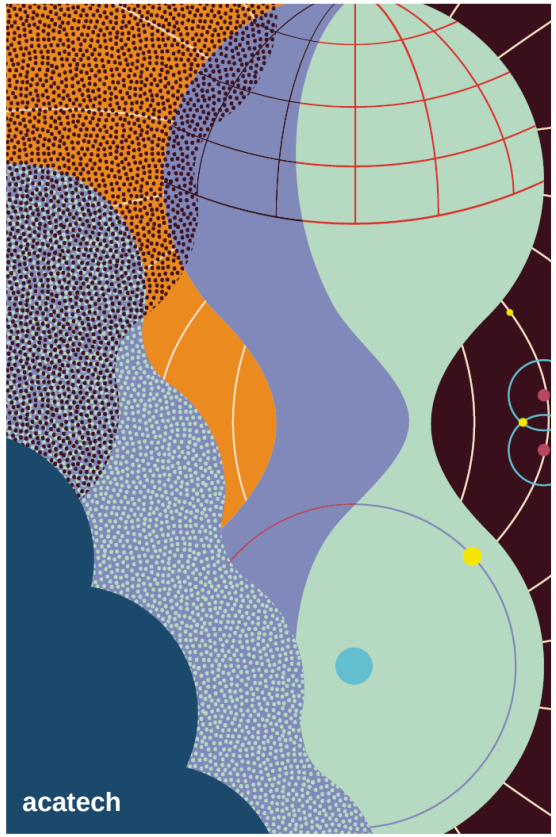
- Chile
- ECOWAS (Westafrika)
- MENA (Mittlerer Osten und Nordafrika)
- weitere Länder global verteilt

Importländer:

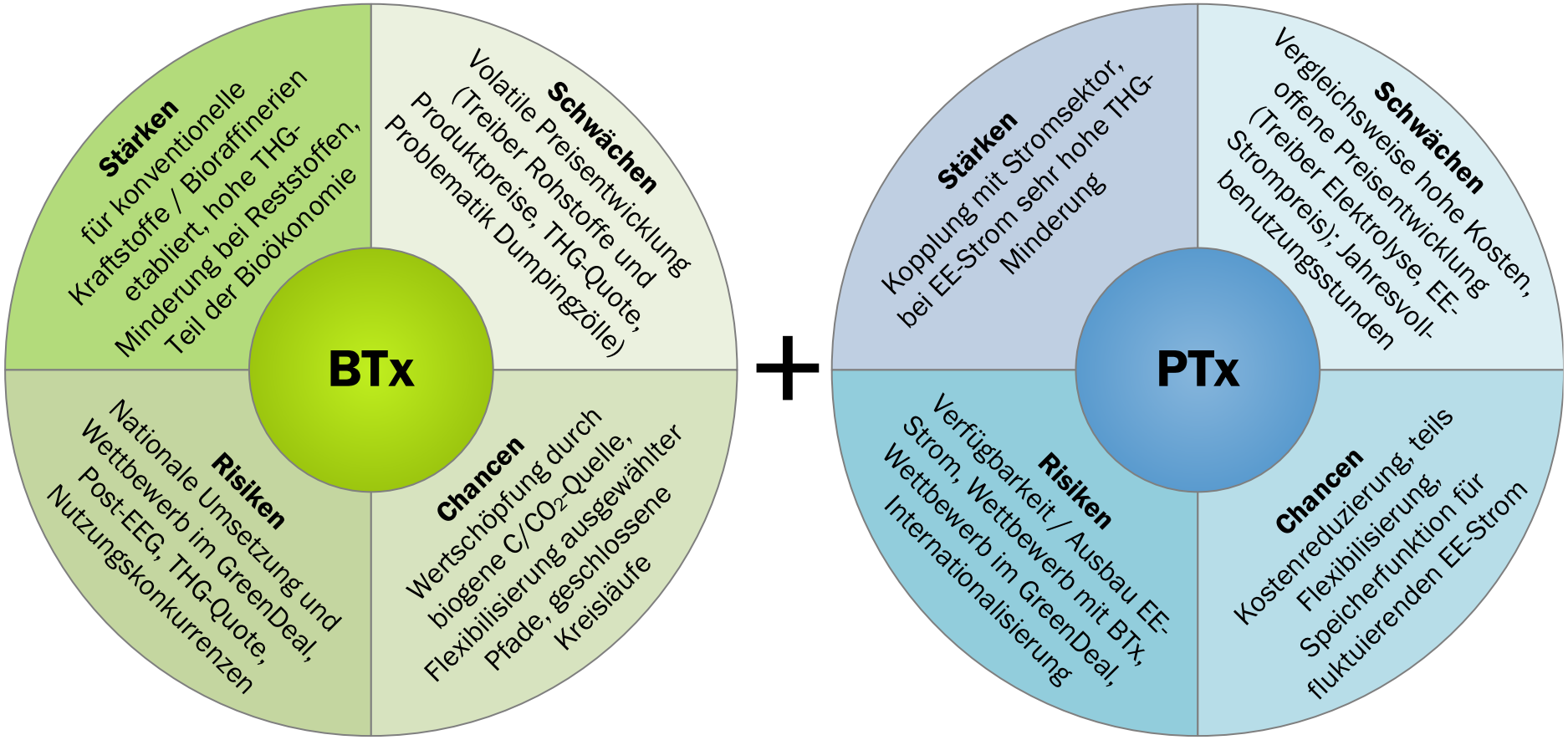
- Deutschland

Nachhaltige u. resiliente Wassser- und Landnutzung für H_2-Produktion

- Regionale Unterschiede: z.T. prekäre Wasserversorgung oder sinkende Grundwasser-/Oberflächenwasservorkommen. Optimale Produktionsstandorte in wasserarmen Gebieten, aber **keine Debatte zu regionale Wasser- u. Flächennutzungs-konflikten**.
- **Wassernachschub durch** Niederschläge aufgrund des **Klimawandels und Wetterextremen volatil**. Wasserbedarf steigt durch die wachsende Bevölkerung und Bedarf der Landwirtschaft.
- **Entsalzung von Meerwasser** verbunden **mit Flächenverbrauch** und **Auswirkungen** auf die lokale Bevölkerung und Natur **durch** die Entsalzung u. **Entsorgung der Salzlake**.
- **Bedarf an systematischer, umfassender Folgenabschätzung** der Technologien zur nachhaltigen, resilienten Wassergewinnung und -nutzung im regionalen Kontext des Ausbaus der Produktionskapazitäten anhand ökologischer und sozialer Kriterien.
- **Verständigung auf global umsetzbare Nachhaltigkeitskriterien** zur Nutzung von grünem Wasserstoff, um knappe lokale Wasser- und Landressourcen zu bewahren und eine langfristig ökologisch und sozial nachhaltige und resiliente Produktion aufzubauen



SynBioPTx – Nutzung der Synergien von biomasse- und strombasierten Technologien

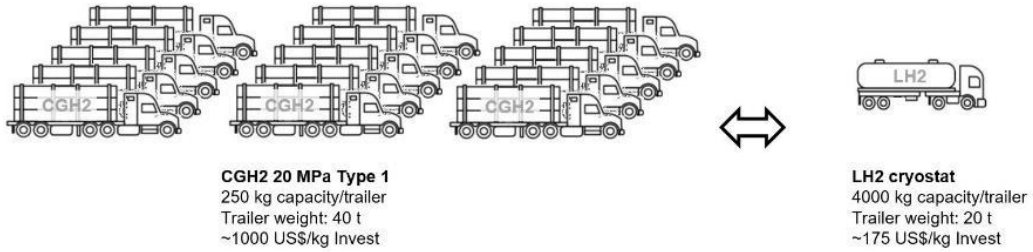


© DBFZ

Grüne Produktion und Resilienter Transport

Schlüssel für eine globale H_2-Wirtschaft

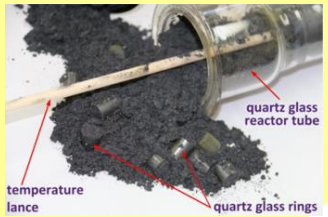
- Net-zero oder C-negative Wasserstofferzeugung
- Flüssiger Wasserstoff eine vielversprechende Option für den resilienten Transport



Grüner als grün – Pyrolyse+CC

NECOC / Solar Hydrogen

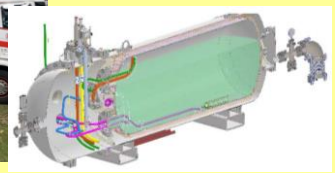
- Pyrolyse von Biomasse in Flüssigmetall unter Nutzung von Solarenergie in Kombination mit CC ermöglicht H_2-Produktion mit negativen Treibhausgas-emissionen



LH_2 Transport und Umfüllen

ELVHYS

- Überkritische Drücke Herausforderung für sichere und verlässliche Umfüll- und Betankungsvorgänge



LH_2 Sicherheit

PRESLHY/ELVHYS

- Erarbeitung adequater Prozeduren und Normen für sichere Handhabung von flüssigem Wasserstoff (LH_2) wesentlich

Globale Exportpotentiale in Wechselwirkung Gesamtsystem – Case Chile

PtX Exportpotentiale von Chile über eine hochaufgelöste Modellierung des Gesamtenergiesystems

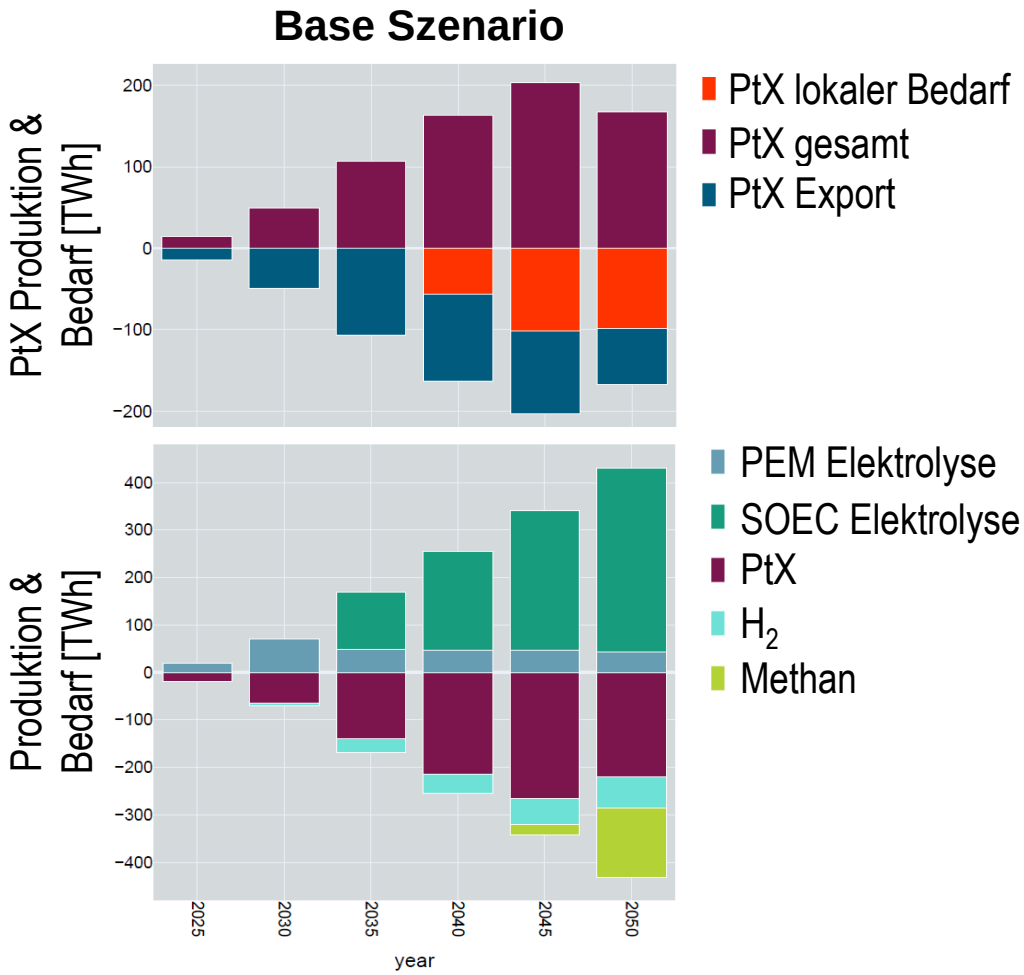
Ausgangspunkt. PtX-Potenzial von Inselsystemen (DeV-KopSys-1)

- **GIS-basierte Flächenidentifizierung** + Standortsystemauslegung = maximal mögliches PtX-Potenzial in Chile **2062 TWh Fischer-Tropsch** (FT) Kraftstoff

Erweiterung: PtX-Produktion + Dekarbonisierung des Exportlandes (Dev-KopSys-2)

- EMPRISE-Chile: multi-regionales Optimiermodell für **sektorübergreifende Ausbau- und Einsatzplanung** inkl. Exportoption
- Ambitioniertes **Szenario für Chile** (PELP) + **Sensitivitäten** (CO_2-Reduktionspfad, PtX-Exportpreis, Markthochlauf EE & Elektrolyse)

Ergebnis: **Reduktion des Exportpotenzial um ~ 74 – 97% durch heimischen Bedarf an EE-Strom und PtX**



Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Fraunhofer IEE

PtX global ATLAS

Pfennig, M (2023), https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121289 & Duque Peréz, E. (2023), Masterthesis & Jansen, L. at al (2023/2024), *in preparation*

Chancen und Risiken einer grünen Wasserstoffwirtschaft in ECOWAS

Chancen	Risiken
Grüne H_2-Produktion	
• Große Erneuerbare Energiepotenziale	• Hoher Wasserstress (insb. Norden) • Unzuverlässige Stromübertragung • Investitionsrisiko
Grüner H_2-Export	
• Niedrige Exportkosten • Vorhandene LNG-Exportinfrastruktur	• Risiko für logistische und grenzüberschreitende Handelsaktivitäten
Rahmenbedingungen Energieversorgung	
• Versorgungssicherheit • Positive Handelsbilanz	• Überalterte Energieinfrastruktur • Wenig nachhaltige Energiequellen
Energiepolitik	
• Förderung erneuerbare Energien • Starke Ausrichtung auf Klimaschutzpolitik • Unterstützung für grünen H_2	• Keine regionale Wasserstoff-Roadmap oder Strategie • Schwer umsetzbare Ziele

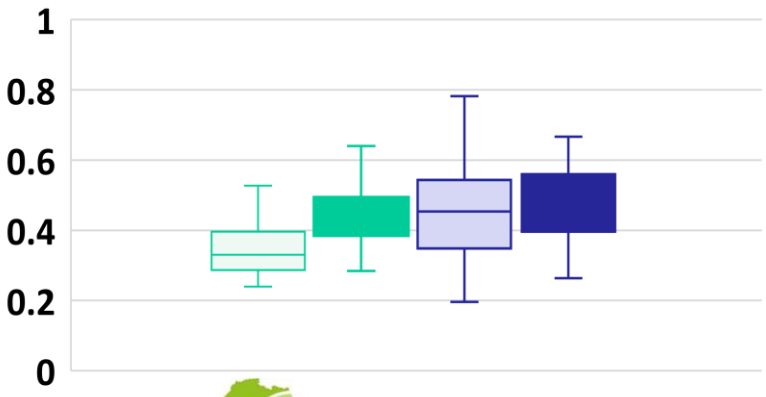
ECOWAS: Economic Community of West African States

Ansatz:

Zusammengesetzter Indikator von niedrig (0) bis hoch (1) zur Bewertung von 4 Unterindikatoren

Ergebnisse:

Indikatorvariationen für 15 ECOWAS Länder



H2ATLAS AFRICA

JUST-GREEN AFRH2ICA

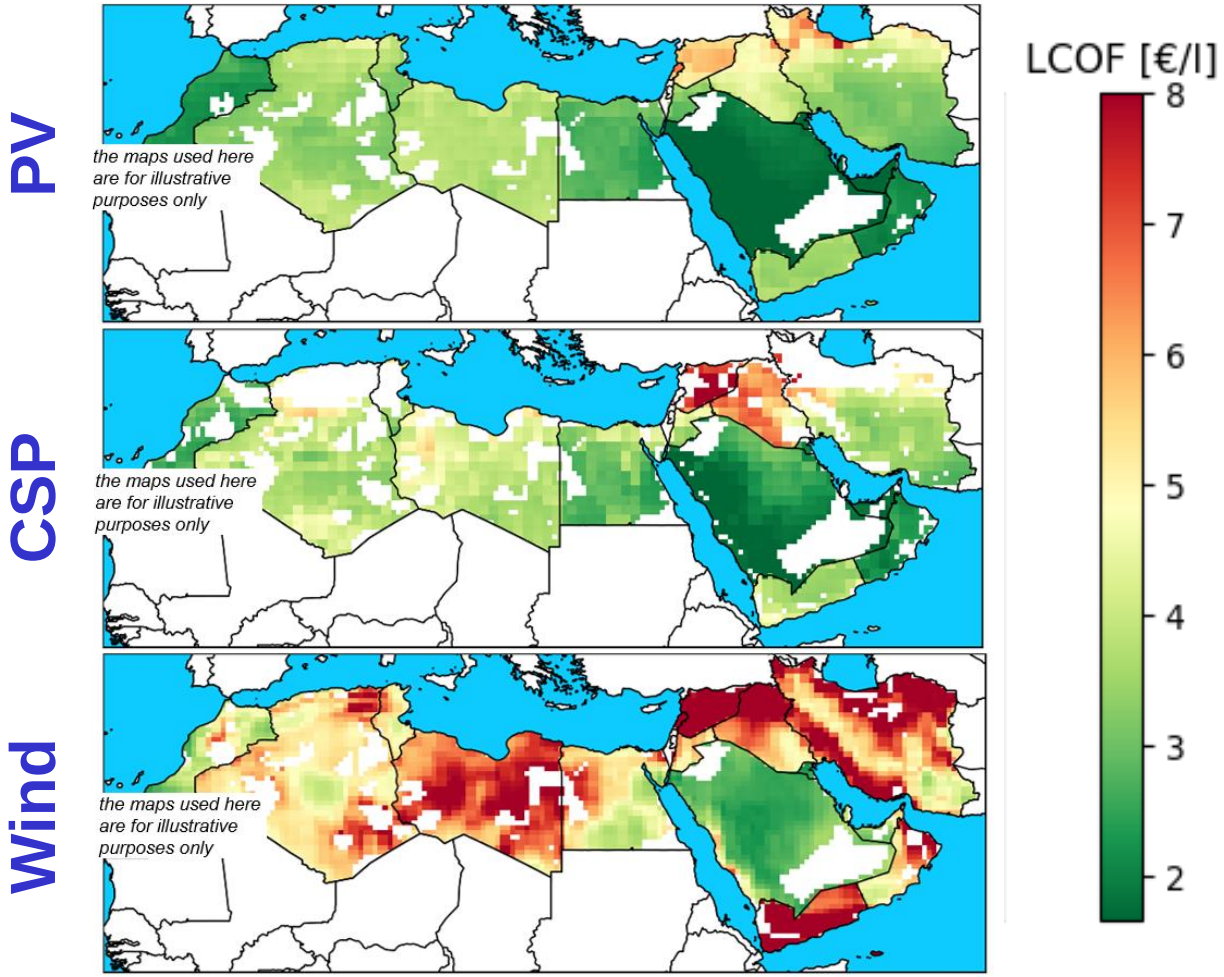
JÜLICH Forschungszentrum

IEK-STE | Systems Analysis and Technology Evaluation

MENA-fuels: Gestehungskosten für synthetische Kraftstoffe in der MENA-Region nach Technologie

Berücksichtigung von Länderrisiken (über WACC) & Abzug des Eigenbedarfs der MENA-Länder

- Signifikanter Einfluss der länderspezifischen Risikobewertung (WACC von 6 – 33%) auf die LCOF (Levelized cost of fuel)
- Regionen mit günstigsten LCOF ≤ 2 €/l: Region Marokko, Saudi Arabien, Oman für das Jahr 2050 (bei positiven Investitionsbedingungen)
- Insgesamt sehr hohes Exportpotenzial von 207 PWh/a, davon der überwiegende Anteil aus PV und CSP und 47 PWh/a LCOF ≤ 2 €/l.
- Vergleich: Kraftstoffbedarf deutscher Verkehrssektor im Szenario "Klassische Antriebe" für 2050: ca. 435 TWh/a.



Wuppertal Institut
MENA FUELS
izes gGmbH Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme
DLR

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Chancen und Risiken von Wasserstoff-Importen aus der MENA-Region

- Wahrscheinlich Handelsströme von Regionen mit großen H_2-Potenzialen (z.B. MENA-Region) hinzu energieintensiven Regionen mit hohem H_2-Bedarf (z.B. Deutschland)
- Diskurs über Chancen und Risiken notwendig
- Für resilientes Energiesystem Berücksichtigung von Risiken essentiell (Beispiel: Ukraine-Krieg)

Wuppertal Institut

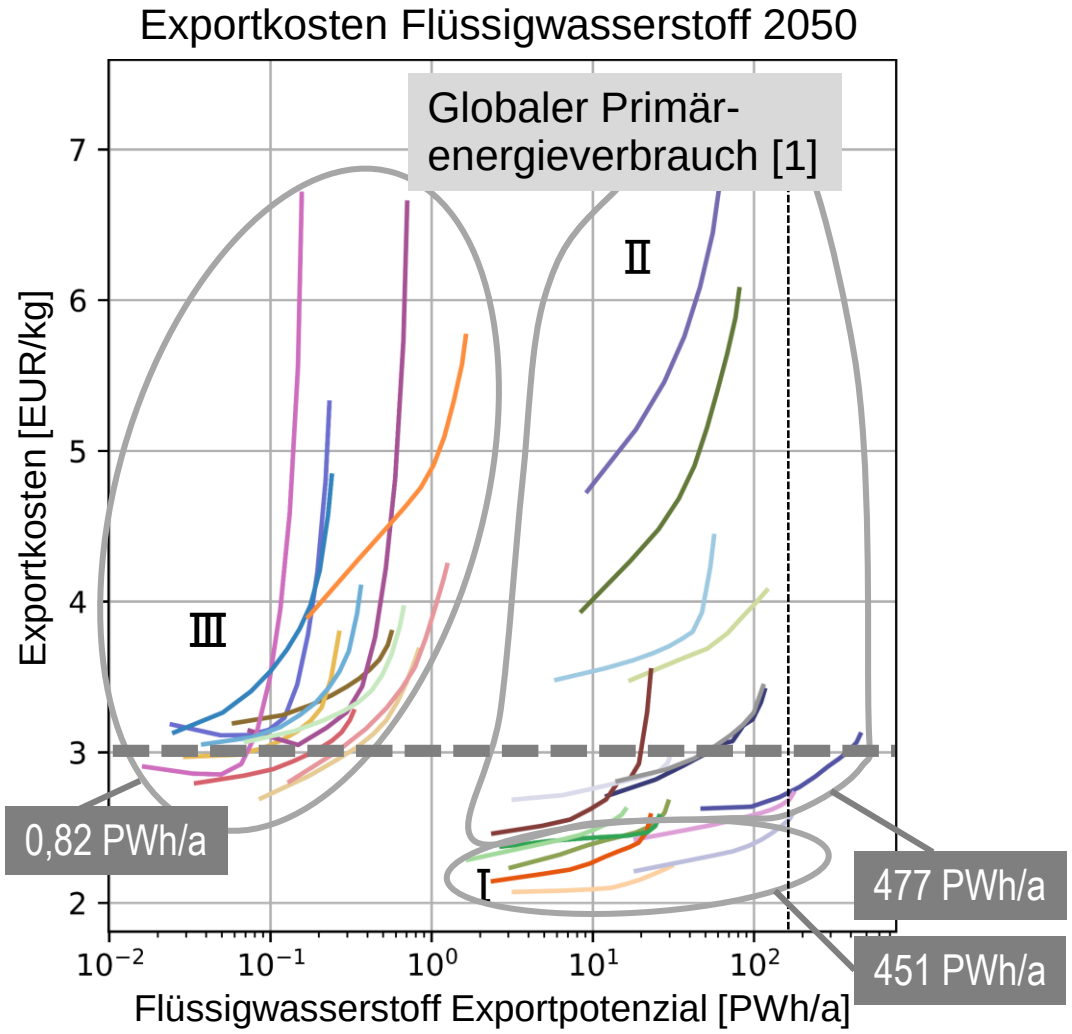
hyBit

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Chancen	Risiken
• Lokales Wirtschaftswachstum durch Export/Importe • Dekarbonisierung in MENA-Region • Erreichen von Entwicklungszielen in MENA-Region • Aufbau einer diversifizierten Wirtschaft in MENA • Diversifizierung der Handelspartner • Investitionen/FDI in Infrastruktur und Wirtschaft • Aufbau fairer und nachhaltiger Lieferketten	• Verteilungskonflikte (Ressourcen, Wasser & Land) • Ungerechte Verteilung der Exporterlöse („Elite Capture“) • Politische und soziale Instabilität, ethnische Konflikte • Renewable Pull • Sicherheit (Handelswege, Klimakatastrophen, Versorgung) • Keine nachhaltige Herstellung • Abhängigkeiten von Autokratien • Institutionelle/Rechtliche Hürden

Kostenpotenziale für den Export von Flüssigwasserstoff in 2050

- Gesamtpotenzial für 28 Länder: ~ 1540 PWh/a
  > 8x Globaler Primärenergieverbrauch in 2022 [1]
- **Gruppe I**: günstige, stabile, sehr große, PV dominierte Potenziale
- **Gruppe II**: mittlere bis teure, große Potenziale mit starken Kostenanstiegen bei höheren Potenzialen
- **Gruppe III**: Potenziale < 1 PWh/a mit Skalierungseffekten und starken Kostenanstiegen



JÜLICH Forschungszentrum | IEK-3 Techno-Economic Systems Analysis

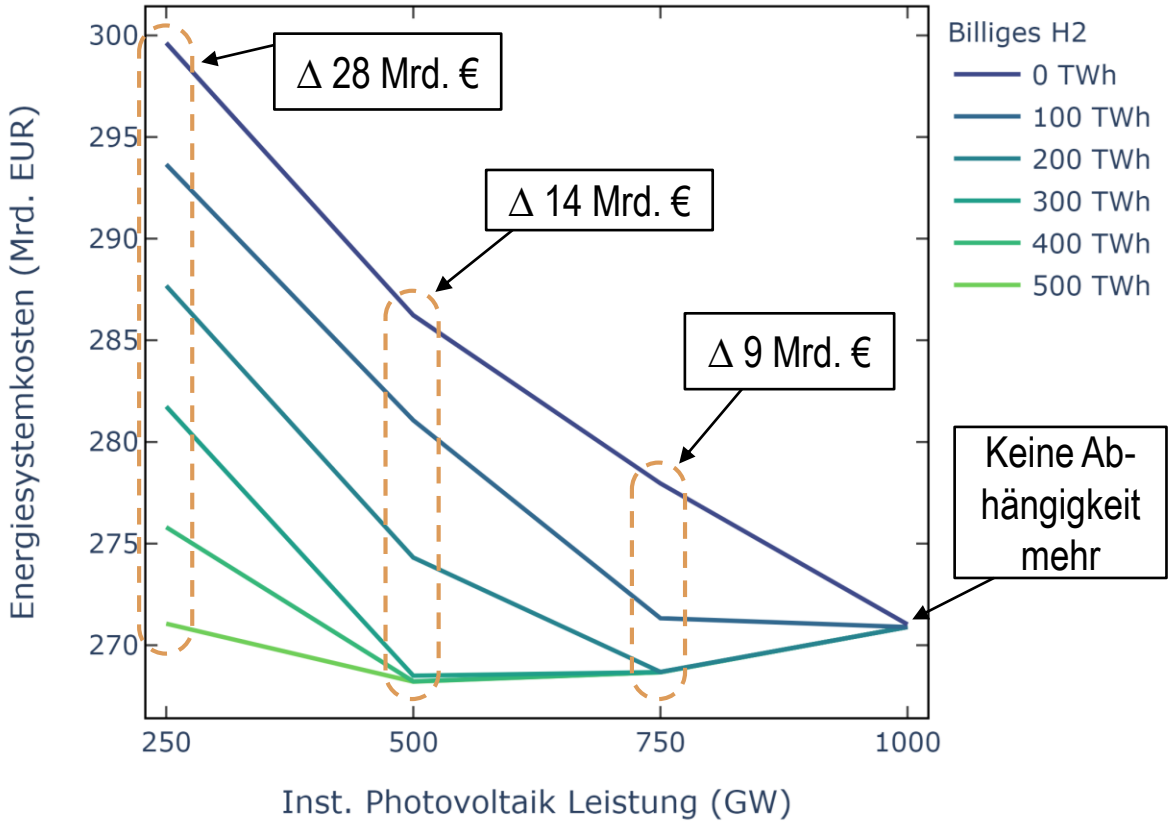
Supported by: Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action

on the basis of a decision by the German Bundestag

Gruppe I:	Gruppe II:	Gruppe III:
Chile	Argentinien	Bulgarien
Libyen	Australien	Deutschland
Namibia	Kanada	Estland
Oman	China	Großbritannien
Pakistan	Indien	Irland
Peru	Mexiko	Island
Saudi Arabien	Russland	Japan
	Turkmenistan	Südkorea
	USA	Litauen
		Lettland
		Norwegen
		Polen

[1] https://ourworldindata.org/energy-production-consumption. [2] D. Franzmann et al. (2023) Green hydrogen cost-potentials for global trade, International Journal of Hydrogen Energy, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.012

Einfluss billiger H_2-Importe auf das deutsche Energiesystem



- Optimierung eines treibhausgasneutralen, deutschen Energiesystems in 2045
- **Fragen:** Wie abhängig ist das deutsche Energiesystem von billigen H_2-Importen? Welchen Einfluss hat der nationale Photovoltaik Ausbau darauf?

- Je nach inländischem EE-Dargebot **Energiesystemkosten stark vom Importangebot abhängig**
- Mehr **Photovoltaik reduziert** diese **Abhängigkeit**
- Falls Angebot an billigem Wasserstoffimport nicht über 500 TWh liegt, sind **500 GW Photovoltaik „no-regret“**

H_2-Wegweiser Niedersachsen

[1] 2,1% der Bundesfläche (Windenergieflächenbedarf sgesetz) * 29,4 MW/km²

[2] Windenergie-auf-See-Gesetz

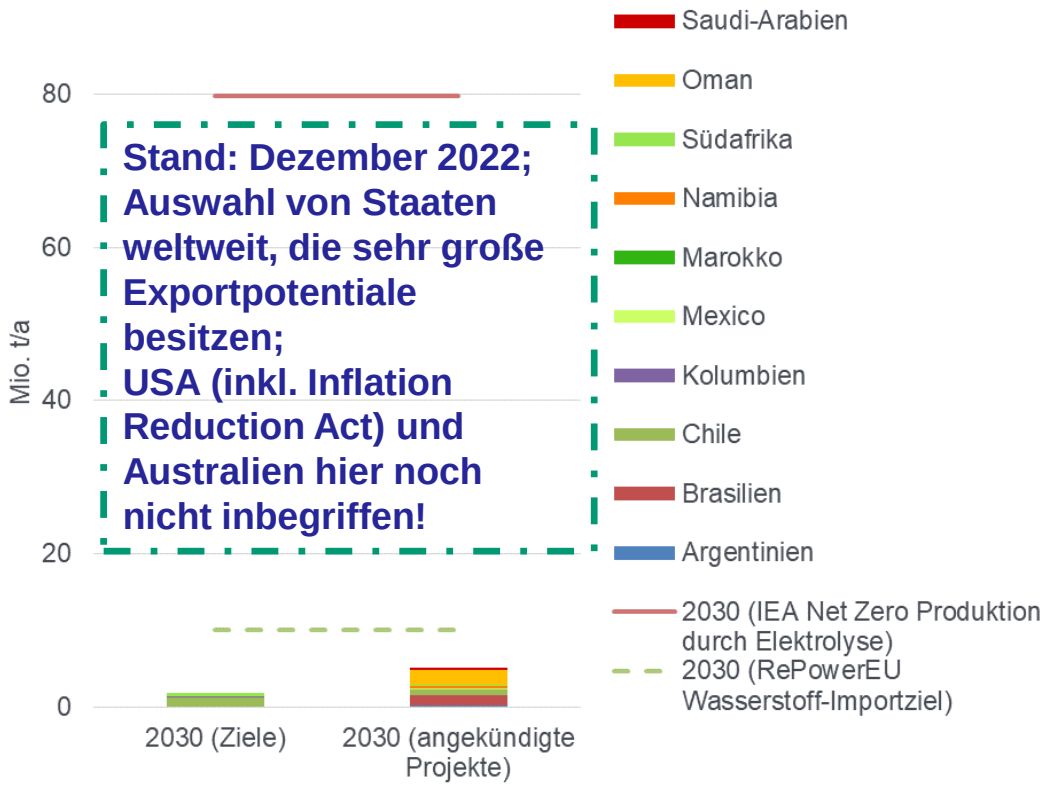
[3] Ruiz Castello et al. (2019): ENSPRESO - an open data, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials

Verfügbarer teurer H_2-Import (5 €/kg)	Verfügbarer billiger H_2-Import (3 €/kg)	Inst. Photovoltaik Leistung	Inst. Wind Onshore Leistung	Inst. Wind Offshore Leistung	Verfügbare Biomasse
unbegrenzt	wird variiert	wird variiert	210 GW [1]	70 GW [2]	362 TWh [3]

Priorisierung des Einsatzes von H_2 & -Derivaten nötig

auf nur schwer dekarbonisierbare Sektoren

- Langsamer Hochlauf erfordert Einsatzpriorisierung



		Notwendigkeit von MEM ökolog.-systemisch
GEN_Benzin_#1	Straße (Pkw)	-3
GEN_Diesel_#1	Straße (Snf)	-2
GEN_Diesel_#2	Straße (Lnf)	-3
GEN_DME_#1	Straße (Lnf)	-2
GEN_Hythan_#1	Straße (Pkw)	-2
GEN_Methan_#1	Straße (Pkw)	-2
GEN_LNG_#2	Straße (Snf)	-1
GEN_Methanol_#1	Straße (Pkw)	-2
GEN_Methanol_#2	Straße (Snf)	-1
GEN_Diesel_#3	Schiff	0
GEN_LNG_#3	Schiff	1
GEN_Methanol_#3	Schiff	1
GEN_Kerosin_#1	Luftfahrt (50%)	0
GEN_Kerosin_#2	Luftfahrt (100 %)	0

BEniVer
Begleitforschung Energiewende im Verkehr

Supported by:
Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action
on the basis of a decision by the German Bundestag

Hauser, Eva (2023): Elektromobilität und Priorisierung des Einsatzes von synthetischen Kraftstoffen, Vortrag im Rahmen des 3. Saarländischen Elektromobilitätstages, online am 27.04.2023. (unter: https://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/Veranstaltungen/3.%20Elektromobilitaetstag%202023_Hauser.pdf auffindbar)

Fazit: Was wissen wir bisher?

- Treibhausgasneutralität erfordert grünen Wasserstoff
- Globale Potenziale von grünem Wasserstoff sind weltweit stark verteilt
- Neben dem Elektrolysepfade gibt es auch noch andere vielversprechende Produktionspfade
- Lokale Energienachfragen von Exportländern müssen gedeckt werden
- Für jedes Exportland oder –region sollte eine Chancen-Risiko-Analyse erfolgen zu Stärkung von Energieversorgungssicherheit
- Globale Potenziale von grünem Wasserstoff sind sehr hoch und die Kosten werden bis 2050 stark sinken
- Einschränkungen im Ausbau der inländischen erneuerbaren Energien kann die deutsche Energiewende abhängig von Menge und Kosten potenzieller Wasserstoffimporte machen
- Im Hochlauf Priorisierung des Einsatzes von Wasserstoff und –derivaten auf schwer dekarbonisierbare Sektoren nötig

Ausblick: Wo bestehen noch Forschungslücken?

- Einfluss von Importen von Wasserstoff und –derivate auf die Entwicklung der deutschen Wertschöpfung (Stichwort: Standortverlagerungen)
- Resiliente Ausgestaltung von Handelsbeziehungen mit ausreichender Diversifizierung
- Klarheit über Einsatzerwartungen und ggf. -priorisierungen
- Engpässe und Wechselwirkungen der Maritimen Infrastruktur