



Leopoldina  
Nationale Akademie  
der Wissenschaften



# Ambitioniert und vorausschauend handeln: Transportoptionen für grünen Wasserstoff bis 2030 - Berechnungen

ESYS - 01. August 2022

Kernteam: Frithjof Staiß (AG-Leitung), Maike Schmidt,  
Cyril Stephanos, Philipp Stöcker, Sven Wurbs

[www.energiesysteme-zukunft.de](http://www.energiesysteme-zukunft.de)

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina  
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften  
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

# Optionen für wasserstoffbasierte Importe

## Endprodukt

- Wasserstoff
  - flüssig
  - gasförmig (komprimiert)
  - (chemisch) gebunden an
    - LOHC (Benzyltoluol)
    - Ammoniak
- Folgeprodukte
  - Ammoniak
  - Methan
  - Methanol
  - Fischer-Tropsch-Produkte

## Transport via

- Pipeline
- Schiff



gasförmiger Wasserstoff per Pipeline



flüssiger Wasserstoff per Schiff



Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) per Schiff



Ammoniak per Schiff



Methan per Pipeline

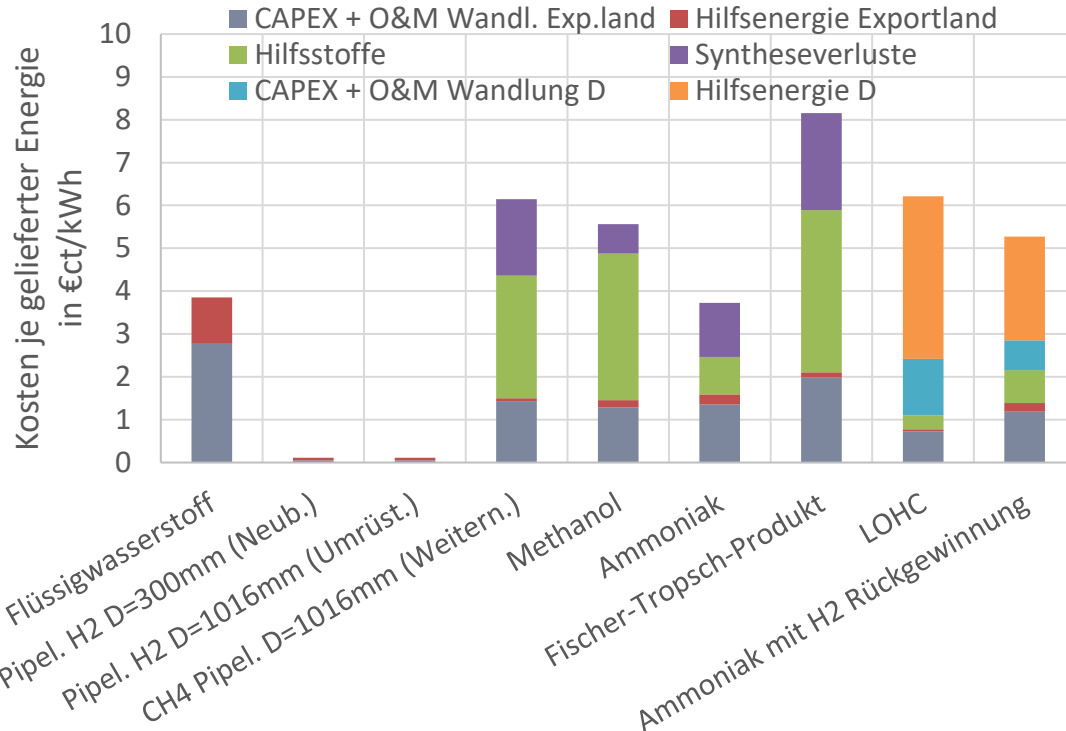


Methanol per Schiff



synthetische Fischer-Tropsch-Produkte per Schiff

# Umwandlungskosten (Erwartung für 2030)



Quelle: Eigene Rechnungen, exkl. Kosten Wasserstoff

## Systemgrenzen

- generische Analyse
- Input: gasförmiger H<sub>2</sub>, Hilfsenergien
- Output: Endprodukt an Landesgrenze (D)

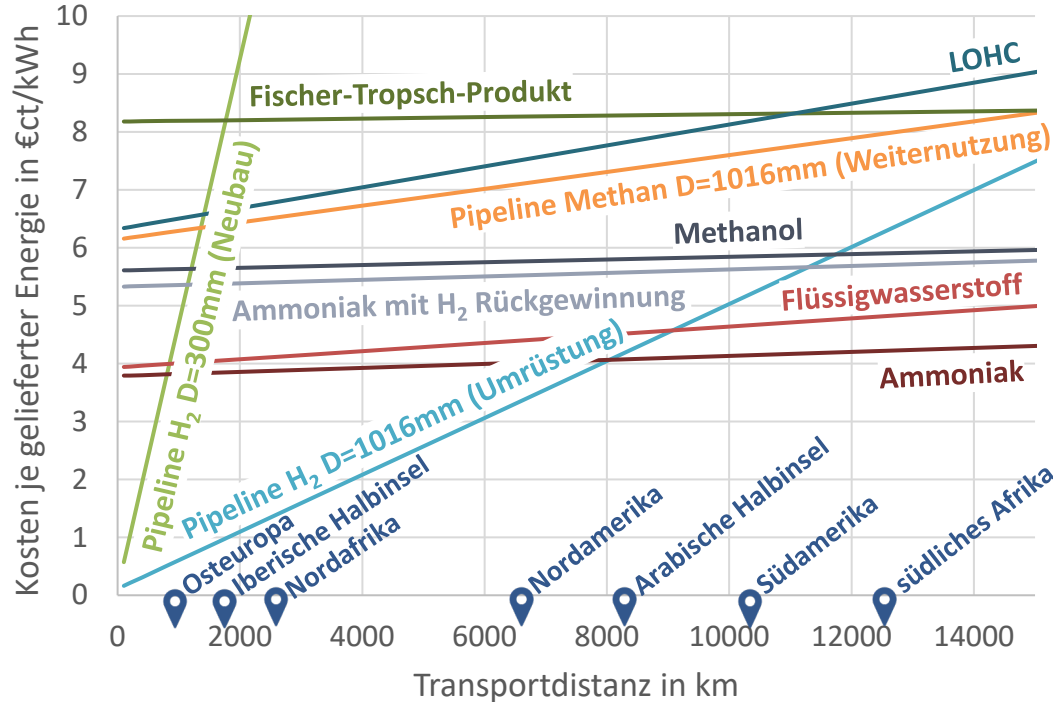
## Modellumfang

- Umwandlung von H<sub>2</sub> im Exportland (inkl. Gewinnung Hilfsstoffe)
- Transport und ggf. Umwandlung am Importterminal (D)
- Fokus: Transport (Pipelines/Schiffe)

## Basisdaten:

- kalkulatorischer Zinssatz: 8%
- Umwandlung/Pipelines: 5.000 äquiv. VLS
- Schiffe: kontinuierlicher Pendelbetrieb
- Kosten Hilfsstoffe:  
CO<sub>2</sub> 145 €/t      N<sub>2</sub> 55 €/t      BT 2 €/kg (LOHC)

# Transport- und Umwandlungskosten nach Entfernung (Erwartung für 2030)



Quelle: Eigene Rechnungen, exkl. Kosten Wasserstoff

## Systemgrenzen

- generische Analyse
- Input: gasförmiger H<sub>2</sub>, Hilfsenergien
- Output: Endprodukt an Landesgrenze (D)

## Modellumfang

- Umwandlung von H<sub>2</sub> im Exportland (inkl. Gewinnung Hilfsstoffe)
- Transport und ggf. Umwandlung am Importterminal (D)
- Fokus: Transport (Pipelines/Schiffe)

## Basisdaten:

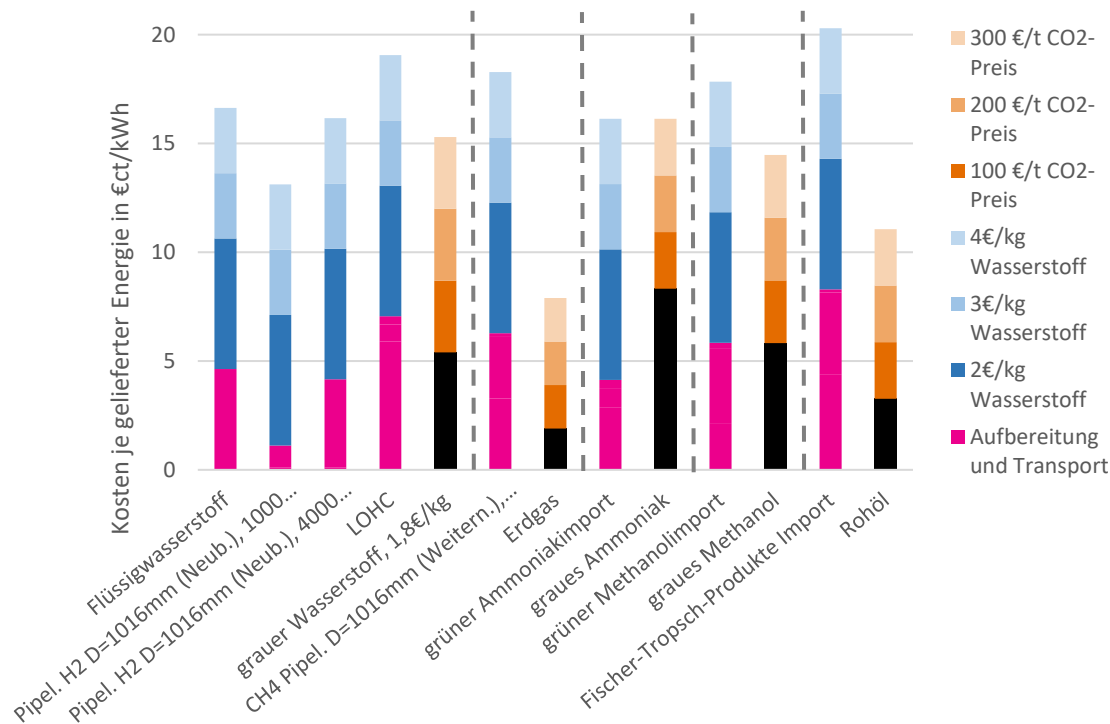
- kalkulatorischer Zinssatz: 8%
- Umwandlung/Pipelines: 5.000 äquiv. VLS
- Schiffe: kontinuierlicher Pendelbetrieb
- Kosten Hilfsstoffe:  
CO<sub>2</sub> 145 €/t      N<sub>2</sub> 55 €/t      BT 2 €/kg (LOHC)

# Effizienz (Erwartung für 2030)

Transportoption	Distanz	Prozesskette	Wirkungsgrad, bezogen auf den eingesetzten	
			Wasserstoff	EE-Strom
gasförmiger Wasserstoff per Pipeline	1.000 km	99 % → 99 %	98%	63%
	4.000 km	99 % → 96 %	94%	61%
flüssiger Wasserstoff per Schiff	10.000 km	81 % → 93 %	75%	49%
LOHC per Schiff	10.000 km	99 % → 94 % → 73 %	68%	44%
Ammoniak per Schiff (stoffliche Nutzung)	10.000 km	83 % → 97 %	80%	52%
Ammoniak per Schiff mit H <sub>2</sub> -Rückgewinnung	10.000 km	83 % → 97 % → 93 %	75%	49%
Methan per Pipeline	1.000 km	100 % → 100 %	63%	41%
	4.000 km	63 % → 99 %	63%	41%
Methanol per Schiff	10.000 km	65 % → 98 %	63%	41%
FT-Produkte per Schiff	10.000 km	57 % → 99 %	56%	37%

Quelle: Eigene Rechnungen

# Vergleich zu heutigen Preisen



## Preis für fossiles H<sub>2</sub> (Dampfreformierung von Erdgas)

- 1,8 €/kg bei 3,5 ct/kWh Erdgaspreis (langjähriges Mittel 2010-2020)
- 3,5 €/kg bei 7 ct/kWh Erdgaspreis (Januar 2022)

## Ammoniak und Methanol aus Erdgas

- gängigste Quelle heute
- durchschnittliche Börsenpreise
- Daten aus den Jahren vor den jüngsten deutlichen Preisanstiegen

Quellen: Eigene Rechnungen, Prognos AG: "Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger", Green Markets (Ammoniak), Methanex (Methanol), Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Erdgas und Erdöl)

# Zusammenfassung



Leopoldina  
Nationale Akademie  
der Wissenschaften



- **Vielfältige Optionen** für den Import von Wasserstoff, je nach
  - Einsatzzweck
  - Zeithorizont der Umsetzung
  - geografisch-politischen Gegebenheiten
- **Kostenstruktur**
  - bei Pipelines durch Transport dominiert, bei Schiffen durch Umwandlung
- **Relevante Kostenposition** neben Kosten für Wasserstoff selbst
  - 4 - 8 ct/kWh (2 €/kg Wasserstoff sind 6 ct/kWh)
  - Ausnahme: große Pipelines aus dem europäischen Ausland / Nordafrika
- **Effizienz** im Blick behalten
  - große Bandbreite
  - beeinflusst direkt den Bedarf an EE-Stromerzeugung im Exportland





Leopoldina  
Nationale Akademie  
der Wissenschaften



# Ambitioniert und vorausschauend handeln: Transportoptionen für grünen Wasserstoff bis 2030 – Qualitative Bewertung, Länderanalysen und Fazit

ESYS - 01. August 2022

Kernteam: Frithjof Staiß (AG-Leitung), Maike Schmidt,  
Cyril Stephanos, Philipp Stöcker, Sven Wurbs

[www.energiesysteme-zukunft.de](http://www.energiesysteme-zukunft.de)

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina  
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften  
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

# Qualitative Bewertungsaspekte



Zeit vom Vertragsabschluss bis zur ersten kommerziellen Lieferung

Was ist für den jeweiligen Transportvektor bereits an Infrastruktur vorhanden?

Aufwand zur Schaffung des notwendigen Rechtsrahmens; Wahrscheinlichkeit der Umsetzung bis 2030?

Gefahr von neuen Pfadabhängigkeiten und Lock-Ins? Einfluss auf bestehende Pfadabhängigkeiten?

Einfluss auf die Flexibilität des deutschen und europäischen Energiesystems

Gefahren im Fall von Leckagen, Unfällen etc.? Toxizität? Chemisches Verhalten in der Umwelt?

Gefahrenpotenzial im direkten Umgang, für Mitarbeiter, unbeteiligte Personen, für Infrastruktur, technische Einrichtungen

Umsetzungshorizont	vorhandene Importinfrastruktur	politisch-gesetzlicher Rahmen	Pfadabhängigkeiten/ Lock-ins	Energiesystemstabilität	Umwelt Risiken	Sicherheit
--------------------	--------------------------------	-------------------------------	------------------------------	-------------------------	----------------	------------

++ 0-2 Jahre  
+ 3-5 Jahre  
0 6-7 Jahre  
- 8-10 Jahre  
-- >10 Jahre

-- nichts vorhanden  
++ vollständig vorhanden

-- geringe Umsetzungswahrscheinlichkeit und hoher Aufwand  
++ hohe Umsetzungswahrscheinlichkeit und geringer Aufwand

-- hohe Gefahr  
++ keine Gefahr

-- stark negative Wirkungen auf Energiesystem und/oder Versorgungssicherheit  
++ stark positive Wirkungen Energiesystems und/oder Versorgungssicherheit

-- hohes Umweltgefährdungspotenzial  
++ keine Umweltgefährdung

-- hohes Gefahrenpotenzial  
++ keine Gefährdung

## Es gibt keine dominante Transportoption!

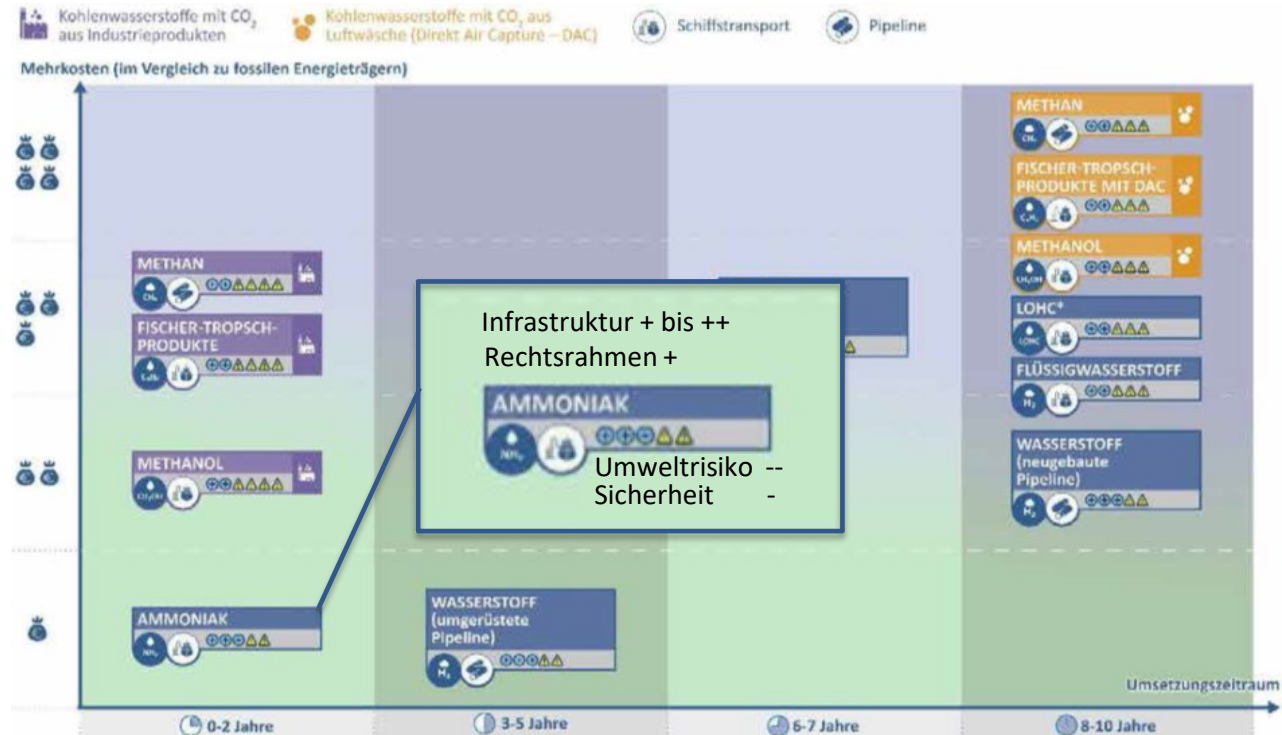
- Jede hat spezifische **Stärken** und **Schwächen**.
- Jede weist unterschiedliche **Umsetzungsanforderungen** und **Realisierungsgeschwindigkeiten** auf.



Quelle: ESYs

## Es gibt keine dominante Transportoption!

- Jede hat spezifische **Stärken** und **Schwächen**.
- Jede weist unterschiedliche **Umsetzungsanforderungen** und **Realisierungsgeschwindigkeiten** auf.

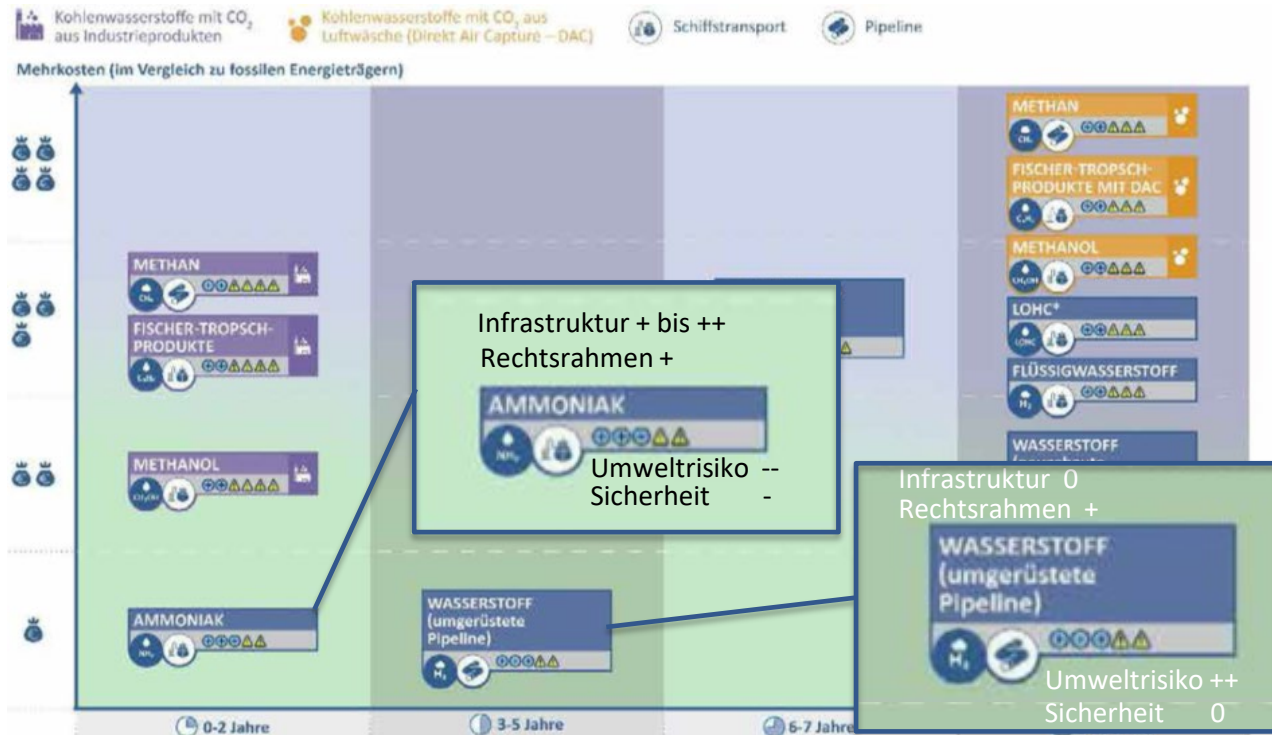


Quelle: ESYS

# Gesamtergebnis

## Es gibt keine dominante Transportoption!

- Jede hat spezifische **Stärken** und **Schwächen**.
- Jede weist unterschiedliche **Umsetzungsanforderungen** und **Realisierungsgeschwindigkeiten** auf.

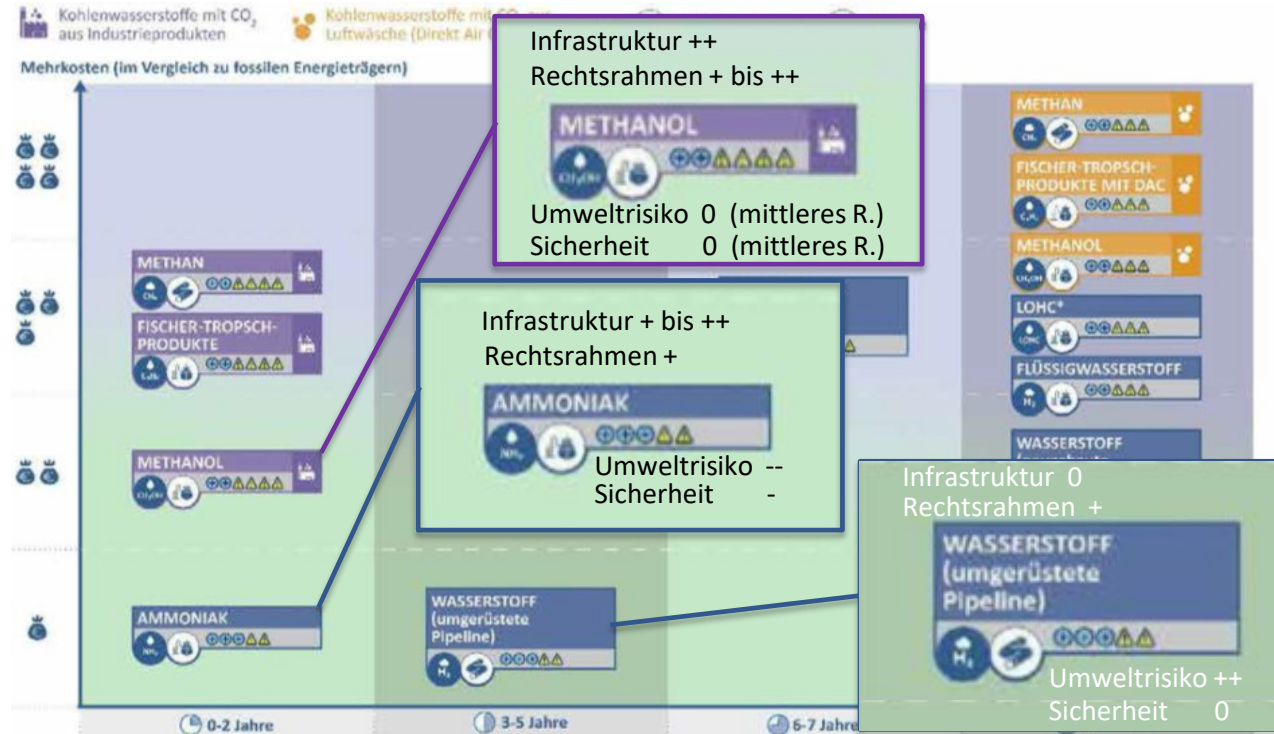


Quelle: ESYS

# Gesamtergebnis

## Es gibt keine dominante Transportoption!

- Jede hat spezifische **Stärken** und **Schwächen**.
- Jede weist unterschiedliche **Umsetzungsanforderungen** und **Realisierungsgeschwindigkeiten** auf.

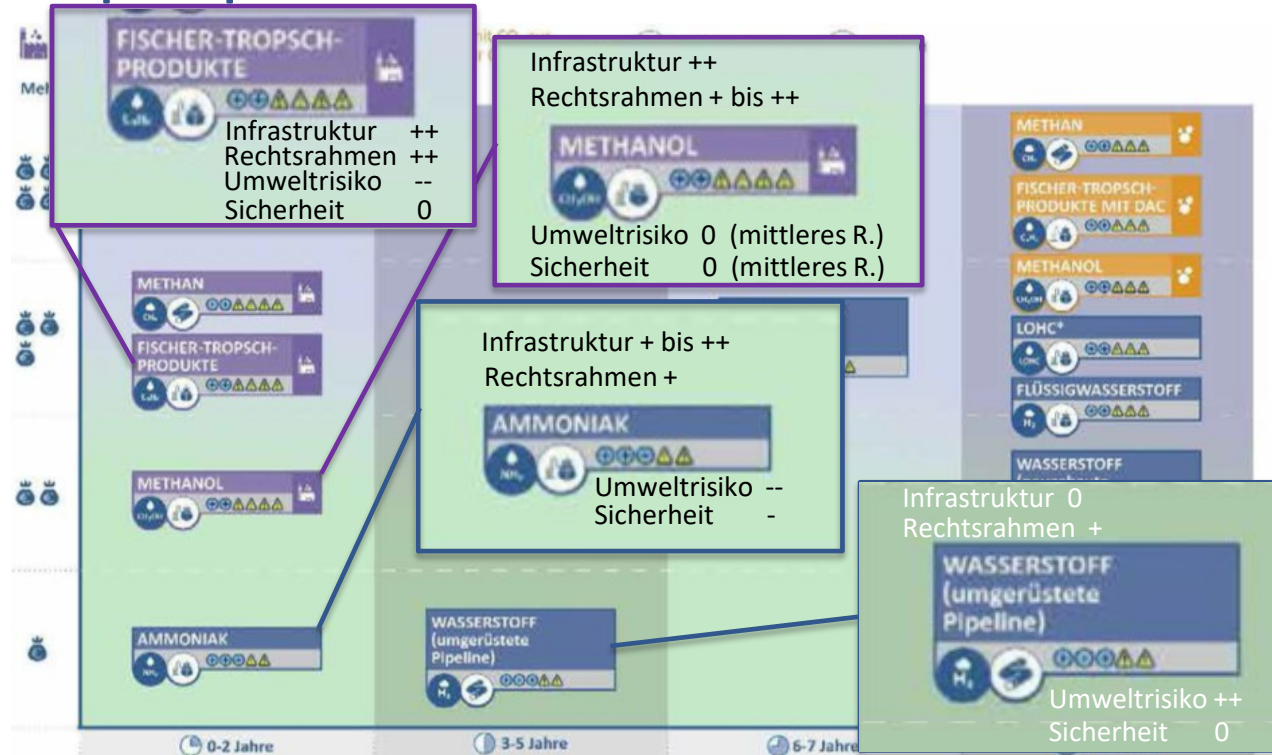


Quelle: ESYS

# Gesamtergebnis

## Es gibt keine dominante Transportoption!

- Jede hat spezifische **Stärken** und **Schwächen**.
- Jede weist unterschiedliche **Umsetzungsanforderungen** und **Realisierungsgeschwindigkeiten** auf.



Quelle: ESYS

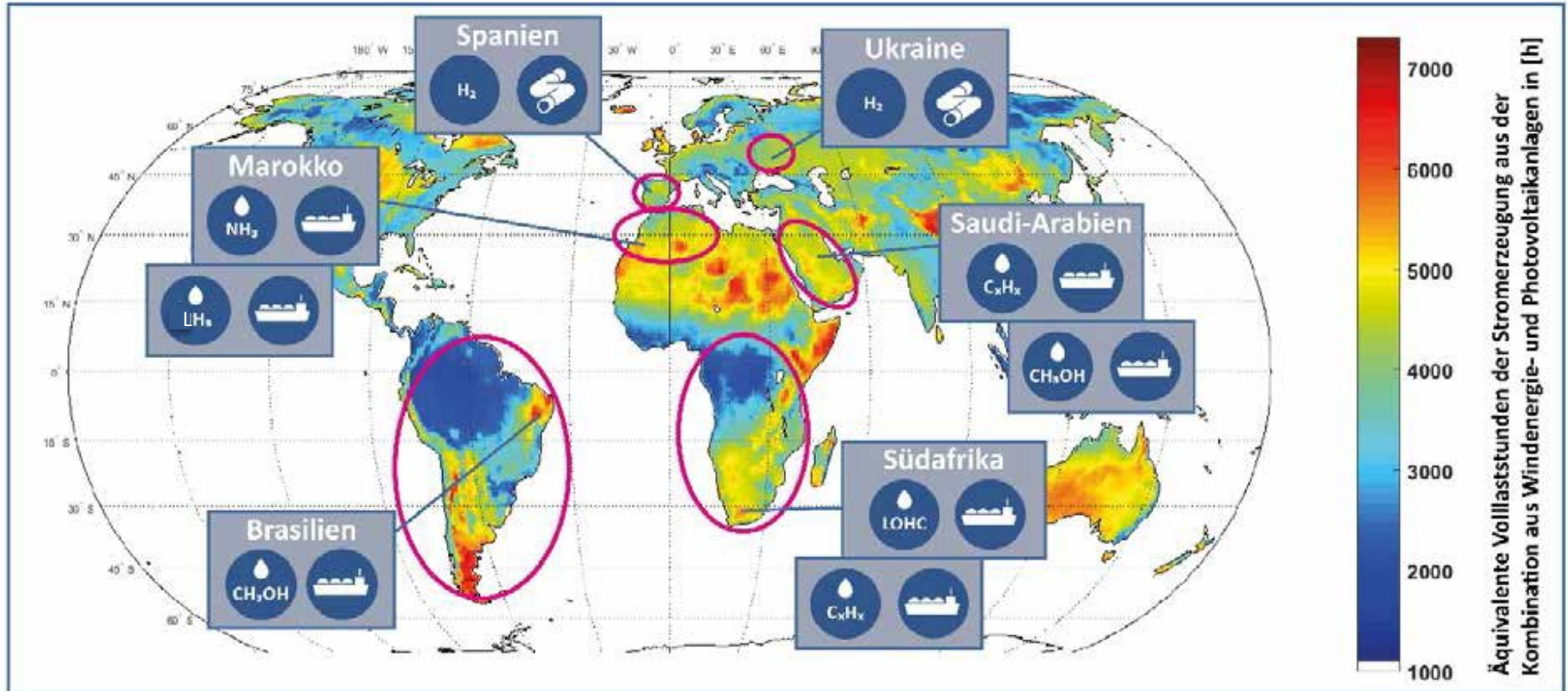
## Es gibt keine dominante Transportoption!

- Jede hat spezifische **Stärken** und **Schwächen**.
- Jede weist unterschiedliche **Umsetzungsanforderungen** und **Realisierungsgeschwindigkeiten** auf.
- Einzelne Transportoptionen sind **bis 2030** realisierbar.
- Die perspektivisch verfügbare Bandbreite an Transportoptionen kann die **Versorgungssicherheit** stärken.

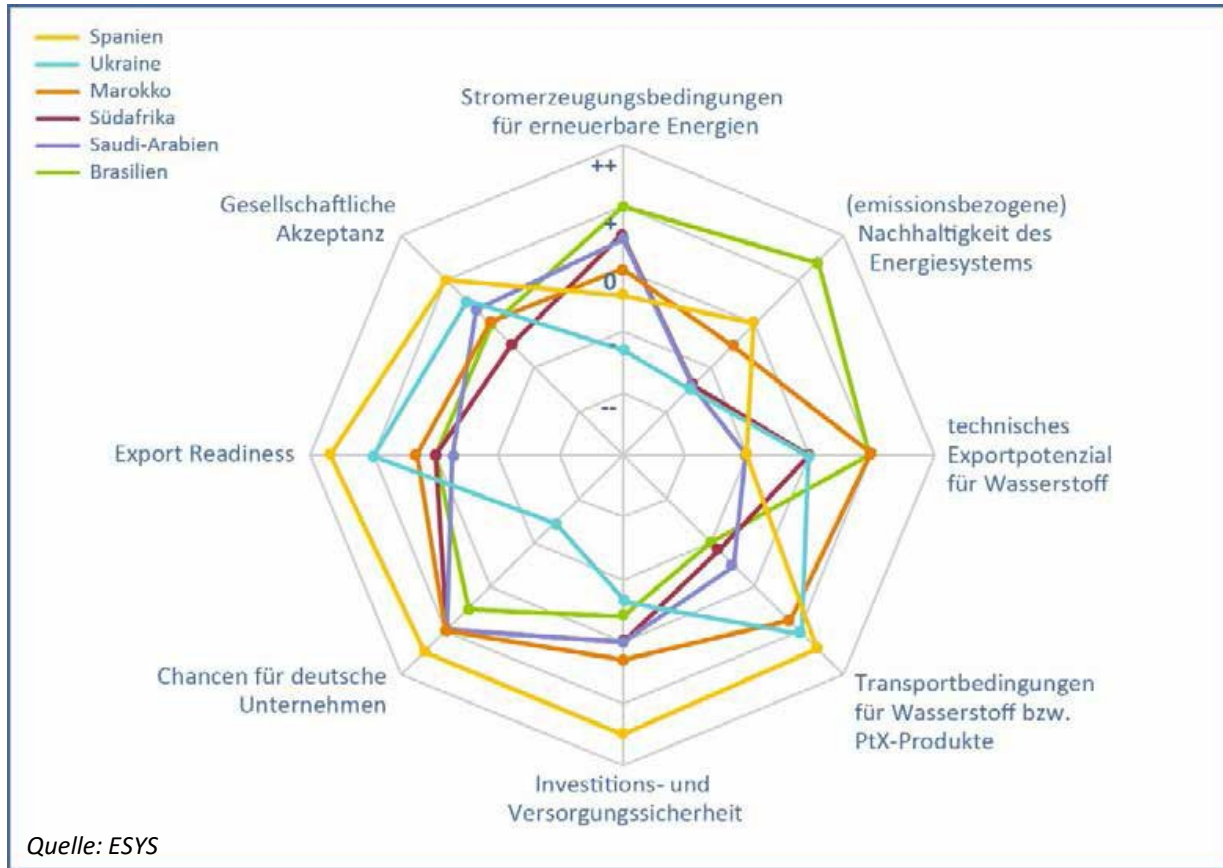


Quelle: ESYS

# Fokusregionen für Wasserstoffimport mit unterschiedlichen Transportoptionen



# Überblicksartige, vergleichende Länderanalyse

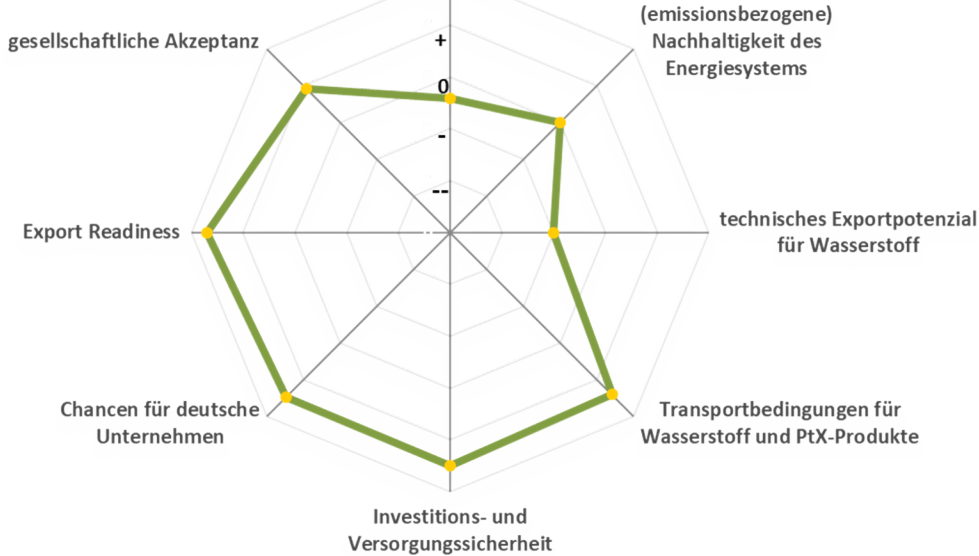


- Herausarbeitung allgemeiner Stärken und Schwächen
- Erste Orientierung für weitergehende detailliertere Analysen.
- Option der Ausweitung auf weitere Ländern durch die Auswertung öffentlich zugänglicher Länderinformationen, wie etwa denen des World Economic Forums, der Weltbank und der IRENA.
- Regelmäßige Aktualisierung der Quellen erlaubt auch zukünftige Nutzung der Methodik. Ältere Bewertungen können angepasst, Zeitreihen erstellt und Entwicklungstrends abgeleitet werden.

# Beispiel: H<sub>2</sub> per Pipeline aus Spanien



Stromerzeugungsbedingungen  
für erneuerbare Energien



Quelle: ESYS

erneuerbare  
Energie



100 %

Elektrolyse



65 %

Transport  
per Pipeline



98 %

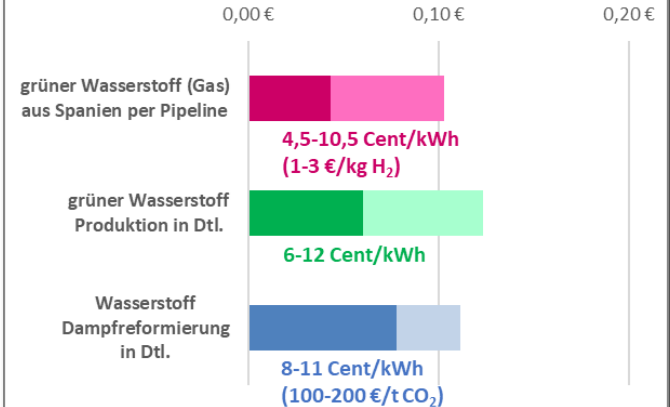
energetische  
Effizienz



gesamt: 64 %

Quelle: ESYS

in Euro/je Kilowattstunde (kWh)



Quelle: ESYS

## Spanien – Druckwasserstoff per Pipeline von der Iberischen Halbinsel

Quelle: ESYS

# Mögliche Wasserstoff-Importoptionen bis 2030



Leopoldina  
Nationale Akademie  
der Wissenschaften

acatech  
DEUTSCHE AKADEMIE DER  
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

UNION  
DER DEUTSCHEN AKADEMIEN  
DER WISSENSCHAFTEN



## Ammoniak per Schiff

- zur stofflichen Nutzung
- etablierte Produktionsstrukturen und Transportketten
- kritisch: Umweltrisiken und Sicherheitsanforderungen
- $\leq 2$  Jahre
- **Beispiel:** Ersatz bisher nach Dtl. importierter Ammoniakmengen (460.000-700.000 t brutto)  $\rightarrow$  1-2 der größten Tanker durchgehend (10 Fahrten/Jahr)
- CO<sub>2</sub>-Reduktion: ca. 830.000 - 1,3 Mio. t/a

z.B. aus Marokko



# Mögliche Wasserstoff-Importoptionen bis 2030



## Ammoniak per Schiff

- zur stofflichen Nutzung
- etablierte Produktionsstrukturen und Transportketten
- kritisch: Umweltrisiken und Sicherheitsanforderungen
- $\leq 2$  Jahre
- **Beispiel:** Ersatz bisher nach Dtl. importierter Ammoniakmengen (460.000-700.000 t brutto)  $\rightarrow$  1-2 der größten Tanker durchgehend (10 Fahrten/Jahr)
- CO<sub>2</sub>-Reduktion: ca. 830.000 - 1,3 Mio. t/a

z.B. aus Marokko



## gasförmiger Wasserstoff per Pipeline

- energetisch und stofflich
- günstigste Option, höchster Wirkungsgrad, breites Anwendungsspektrum
- geographische Festlegung und Distanzbegrenzung (ca. 4.000 km)  
 $\rightarrow$  EU und EU-Nachbarstaaten
- kritisch: Auslastung/EE-Bedarf
- 3-5 Jahre bei Umrüstung
- 8-10 Jahre bei Neubau
- **Beispiel:** H<sub>2</sub>-Bedarf dt. Stahlindustrie bis 2030  $\rightarrow$  1/3 der Primärstahlproduktion = 19 TWh  
H<sub>2</sub> = 1/3 Kapazität großer Pipeline
- CO<sub>2</sub>-Reduktion: 17 Mio. t

z.B. aus Spanien



# Mögliche Wasserstoff-Importoptionen bis 2030



## Ammoniak per Schiff

- zur stofflichen Nutzung
- etablierte Produktionsstrukturen und Transportketten
- kritisch: Umweltrisiken und Sicherheitsanforderungen
- $\leq 2$  Jahre
- **Beispiel:** Ersatz bisher nach Dtl. importierter Ammoniakmengen (460.000-700.000 t brutto)  $\rightarrow$  1-2 der größten Tanker durchgehend (10 Fahrten/Jahr)
- CO<sub>2</sub>-Reduktion: ca. 830.000 - 1,3 Mio. t/a

z.B. aus Marokko



## gasförmiger Wasserstoff per Pipeline

- energetisch und stofflich
- günstigste Option, höchster Wirkungsgrad, breites Anwendungsspektrum
- geographische Festlegung und Distanzbegrenzung (ca. 4.000 km)  $\rightarrow$  EU und EU-Nachbarstaaten
- kritisch: Auslastung/EE-Bedarf
- 3-5 Jahre bei Umrüstung
- 8-10 Jahre bei Neubau
- **Beispiel:** H<sub>2</sub>-Bedarf dt. Stahlindustrie bis 2030  $\rightarrow$  1/3 der Primärstahlproduktion = 19 TWh H<sub>2</sub> = 1/3 Kapazität großer Pipeline
- CO<sub>2</sub>-Reduktion: 17 Mio. t

z.B. aus Spanien



## Methanol per Schiff



## synth. Fischer-Tropsch-Produkte per Schiff

- in kleineren Mengen
- zur stofflichen Nutzung
- existente Infrastrukturen
- kompatibel einsetzbar
- kritisch: industrielle CO<sub>2</sub>-Quellen und Gefahr von Lock-ins
- $\leq 2$  Jahre
- **Beispiel Methanol:** Ersatz aktueller Importe nach Dtl. (1,3-1,5 Mio. t brutto)  $\rightarrow$  2-4 Tanker/a
- **Bsp. FT-Produkt:** 2% Beimischung von E-Kerosin bis 2030  $\rightarrow$  1-1,5 Tankerladungen
- CO<sub>2</sub>-Red.: 1,1 - 1,6/1,1 - 1-5 Mio. t

z.B. aus Saudi-Arabien





Leopoldina  
Nationale Akademie  
der Wissenschaften



# Ambitioniert und vorausschauend handeln: Transportoptionen für grünen Wasserstoff bis 2030 - Berechnungen

ESYS - 01. August 2022

Kernteam: Frithjof Staiß (AG-Leitung), Maike Schmidt,  
Cyril Stephanos, Philipp Stöcker, Sven Wurbs

[www.energiesysteme-zukunft.de](http://www.energiesysteme-zukunft.de)

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina  
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften  
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

# Importe ggü. lokaler Synthese Ammoniak und Methanol (Jahr 2030)



Ammoniak			
€/kWh	Referenz	Neuanlage	Bestand
Option 1	0,126		
Option 2		0,169	0,160
Option 3 max		0,233	0,224
Option 3 min		0,135	0,126

Methanol					
€/kWh	CO2 aus Referenz	Punktquelle		DAC	
		Neuanlage	Bestand	Neuanlage	Bestand
Option 1	0,144				
Option 2		0,164	0,158	0,194	0,187
Option 3 max		0,224	0,218	0,254	0,248
Option 3 min		0,132	0,126	0,161	0,155

- Beispiel anhand der Distanz zu Marokko, Wasserstoffkosten Exportland: 2,9 €/kg
  - Option 1: Import der Syntheseprodukte / Referenz
  - Option 2: Import von Flüssigwasserstoff per Schiff, Gewinnung Reaktionspartner und Synthese in Deutschland
  - Option 3: Import von Wasserstoff per Pipeline, Gewinnung Reaktionspartner und Synthese in Deutschland
- Äquivalente Wasserstoffkosten lokale Produktion:
  - 2,7-3,0 €/kg (Methanol, DAC)
  - 3,0-3,3 €/kg (Ammoniak)
  - 3,6-3,9 €/kg (Methanol, Punktquelle)