

ENTWICKLUNG EINES GLOBALEN MARKTMODELLS FÜR WASSERSTOFF

EnInnov 2024

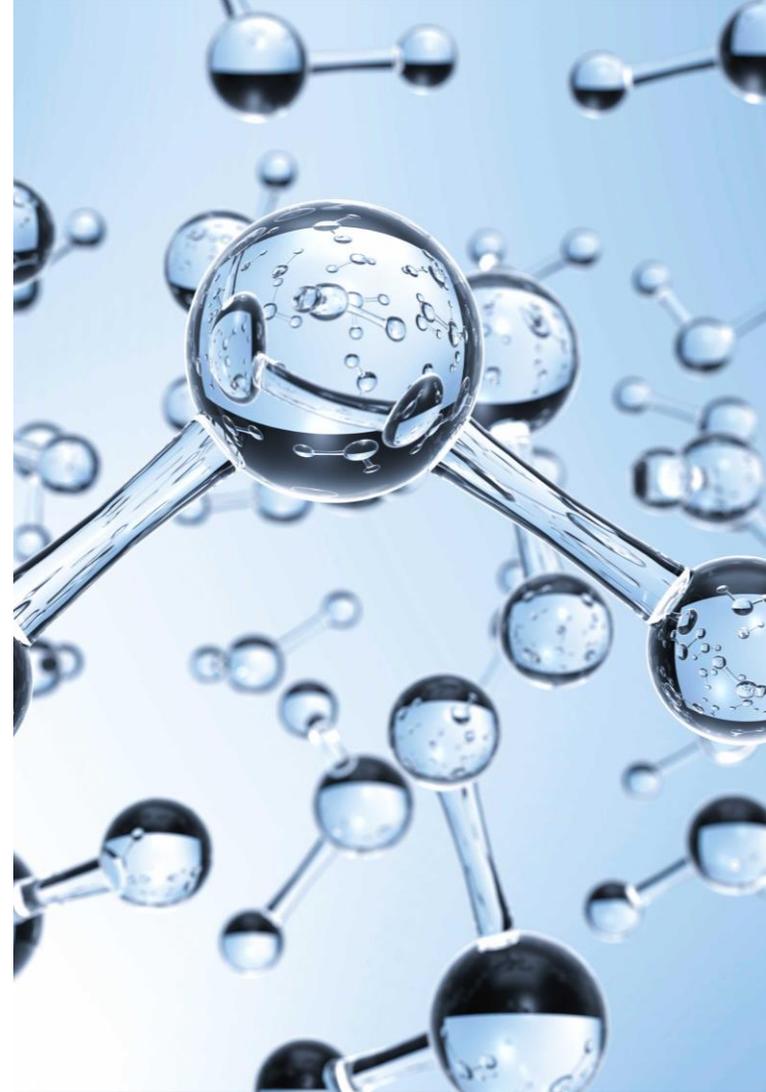
Philipp Ortmann, Stefan Reuter, Stefan Strömer

15. Februar 2024

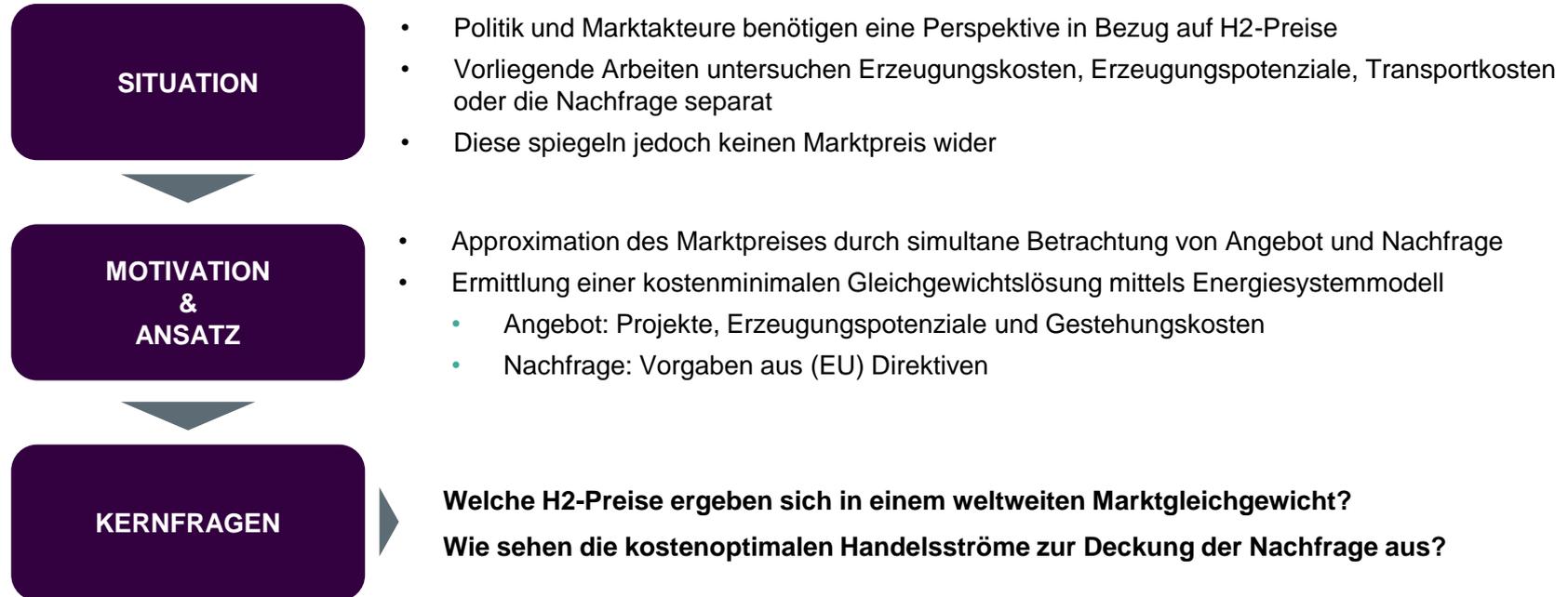


INHALTSVERZEICHNIS

- 1. Einführung & Motivation**
2. Modellinputs
 1. Angebot
 2. Nachfrage
 3. Transport
3. Ergebnisse
4. Fazit und Schlussfolgerungen



MOTIVATION UND KERNFRAGEN



Globales H₂-Marktmodell: Ansatz

Ein idealer globaler Markt für H₂ wird mittels Energiesystemmodell abgebildet. Die Gleichgewichtspreise ergeben aus dem Zuwachs der Gesamtsystemkosten, wenn die Nachfrage in der jeweiligen Region marginal steigt

Globale H₂-Handelsströme



INPUTS

Angebot Preise in LCOH [€/kg] und Mengen in [Mt/a] gegeben

Nachfrage Unelastische H₂-Nachfrage in [Mt/a] gegeben

Transport Pipelines in Europa, Küstenländer per Schiffsroute

OUTPUTS

Gleichgewichtspreise auf Basis fundamentaler Kosten

Handelsbilanzen Import/Exportflüsse

Erzeugung Günstigste Quellen werden eingesetzt

Die Modellergebnisse sind als Preisprojektionen im Sinne eines fundamentalen Marktmodells, nicht als Prognosen zu verstehen. Derzeit existiert kein liquider Markt für grünen H₂ und die hinterlegten Kosten implizieren eine Reihe von technologischen Entwicklungen bis 2030.

ENERGIESYSTEMMODELL: IES_{opt}

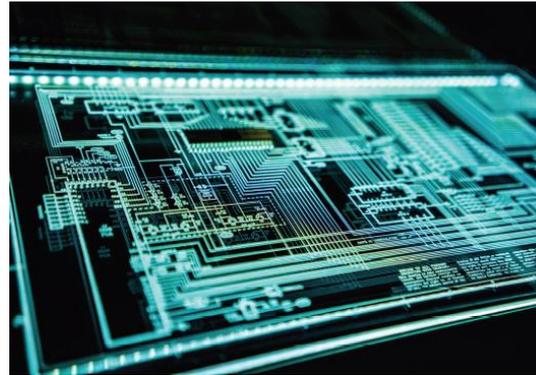
INTEGRATED ENERGY SYSTEM OPTIMIZATION

MODEL SCOPE & CAPABILITIES



- High spatial & temporal resolution
- Energy carrier agnostic
- Scope: From Households to Global
- Integrate existing data from Balmorel, Calliope, PyPSA, ...

HIGH PERFORMANCE CORE



- 100% Julia
- Supports LP, MILP, and QP
- Full “no code” for users
- Supports: CSV, YAML, XLSX, HDF5

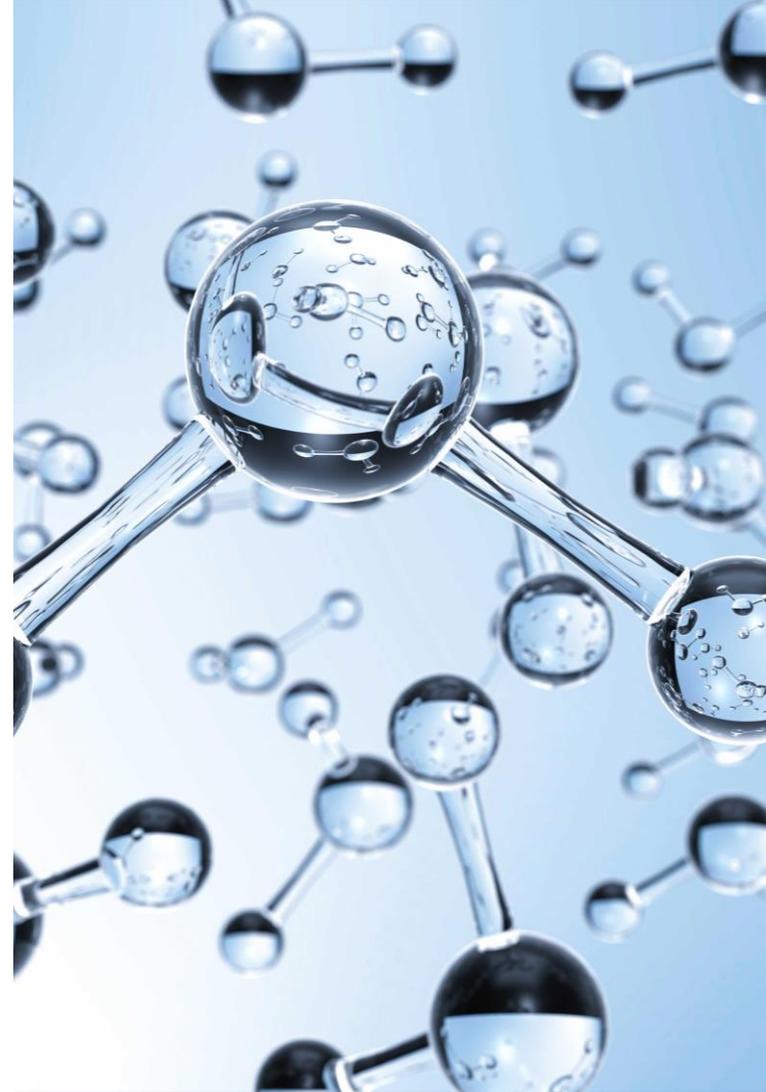
HANDLING UNCERTAINTIES



- Stochastic Optimization
- Multi-objective Optimization
- Modelling to Generate Alternatives
- Monte-Carlo Sampling

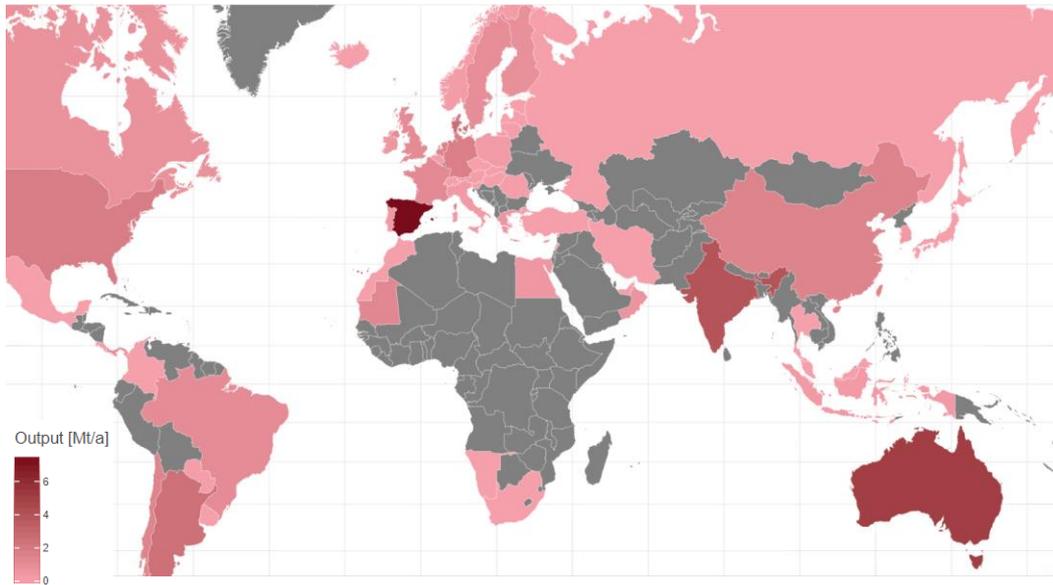
INHALTSVERZEICHNIS

1. Einführung & Motivation
2. Modellinputs
 1. **Angebot**
 2. Nachfrage
 3. Transport
3. Ergebnisse
4. Fazit und Schlussfolgerungen



ANGEBOTSMENGEN: GLOBALE H2 PROJEKTE LAUT IEA

Die **IEA-Projekt Datenbank**¹ bietet eine Annäherung über die weltweiten H2-Angebotsmengen im Jahr 2030



Limitierung des H2-Angebots auf bestehende Projekte laut IEA-Datenbank

Auswahlkriterien

- Produkt: Wasserstoff
- Technologie: Elektrolyse (kein CCS)
- Geplante Inbetriebnahme < 2030

Geplante Erzeugungsmengen

- Weltweit: 40 Mt/a, Europa: 19 Mt/a

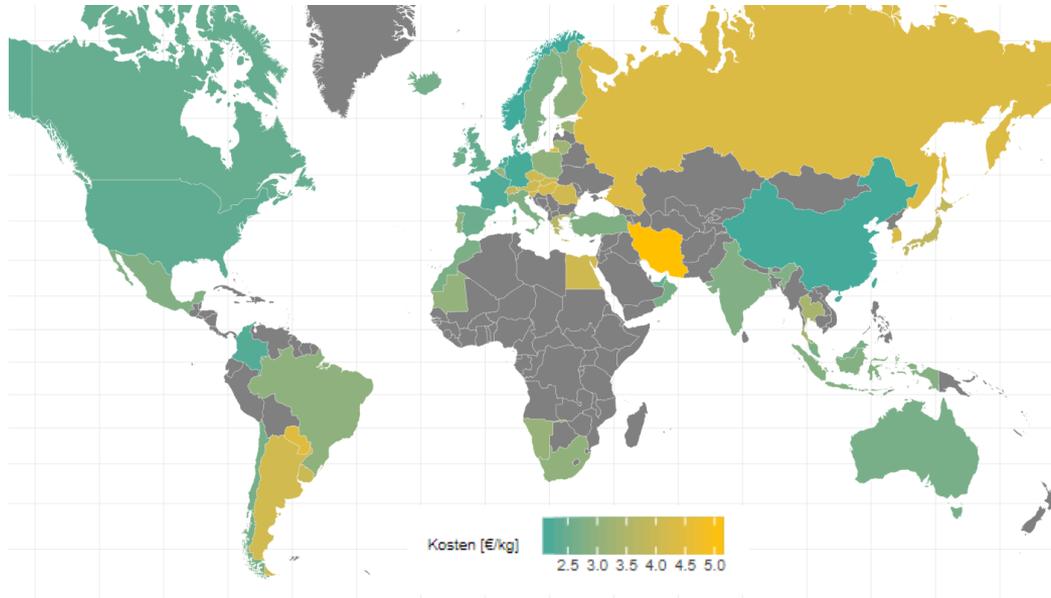
→ Vereinfachung: auch Elektrolyse erfüllt nicht notwendigerweise das RFNBO² Kriterium für erneuerbaren H2!

1) IEA, 'Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database'. Oct. 2023. [\[Online\]](#).

2) RFNBO: Renewable Fuels of non-biological Origin

ERZEUGUNGSPOTENZIALE UND KOSTEN

Die Gestehungskosten je Land wurden aus einer Publikation des EWI-Köln¹ herangezogen. Die Grafik zeigt die LCOH für das jeweils günstigste Erzeugungspotenzial je Land



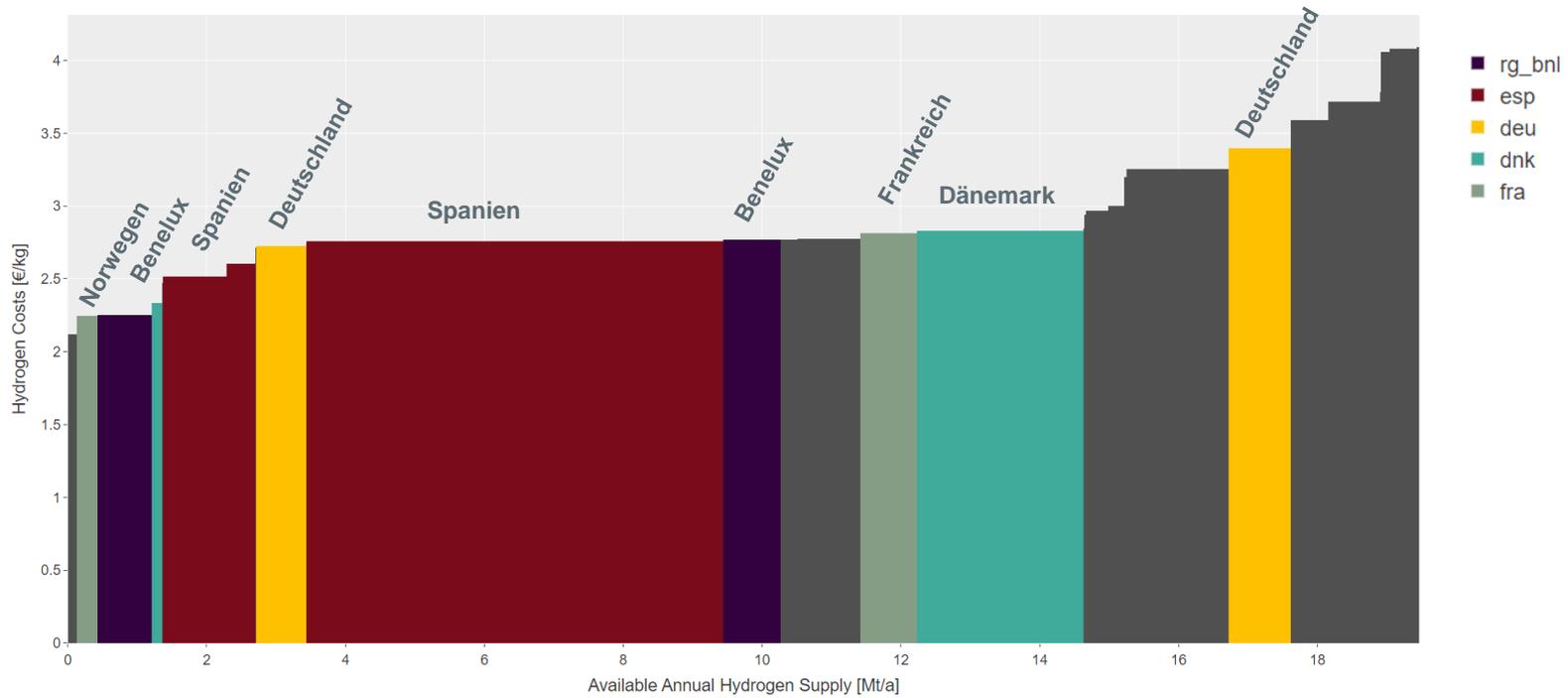
Resultate der Arbeit

Quantifizierung des Flächenpotenzials und LCOH für H₂-Derivate in 115 Ländern

- Gestehungskosten: Bestimmung des optimalen Verhältnisses von Wind/PV/Elektrolyse je Standort sowie Gestehungskostenrechnung
- Flächenpotenziale: anhand verschiedener Qualitäten von Erzeugungsstandorten

¹ Moritz, M., Schönfisch, M. and Schulte, S. (2023) 'Estimating global production and supply costs for green hydrogen and hydrogen-based green energy commodities', *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(25), pp. 9139–9154. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.12.046.

EFFEKTIVES ANGEBOT IN EUROPA



Das „effektive Angebot“ ist ein Ergebnis einer Kombination aus 1) Gesteungskosten je Potenzial und Land basierend auf Moritz, M., Schöfnisch, M. and Schulte, S. (2023) sowie 2) den geplanten Projektstandorten laut IEA-Projekt Datenbank IEA, 'Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database'. Oct. 2023. [\[Online\]](#).

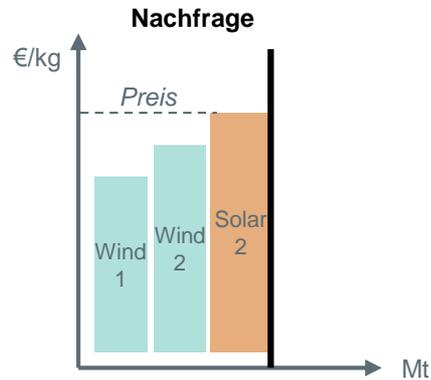
INHALTSVERZEICHNIS

1. Einführung & Motivation
2. Politische Ziele
3. Modellinputs
 1. Angebot
 2. **Nachfrage**
 3. Transport
4. Ergebnisse



MODELLIERUNGSANSATZ: MARKT FÜR ‚GRÜNEN‘ H2

In der Modellierung wird explizit ein Markt für erneuerbaren H2 abgebildet

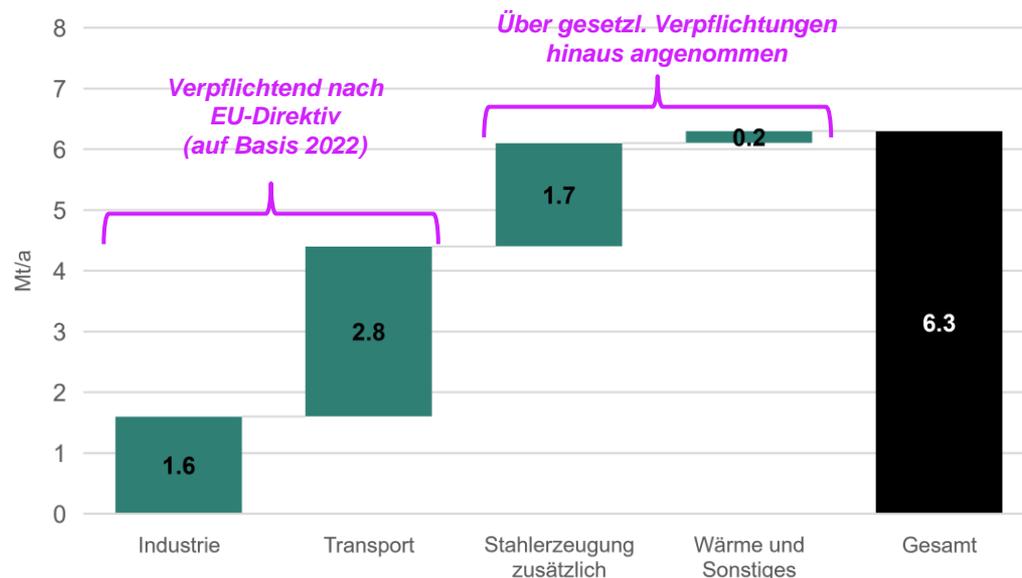


Nachfrage nach erneuerbarem H2 ist limitierender Faktor

- Größe des Marktes ist über die ‚Nachfrage nach grünem H2‘ bestimmt
- Wird über Regulierung (RED III) vorgegeben
- Völlig unelastische Nachfrage
- Der ermittelte Preis gilt nur für erneuerbaren H2

MODELLANNAHMEN: NACHFRAGE ‚GRÜNER‘ H2

Die Nachfrage nach ‚grünem H2‘ wird aus den Vorgaben laut RED III abgeleitet. Bezogen auf das Jahr 2022 ergibt sich aus Schätzungen von Hydrogen Europe¹ eine effektive Nachfrage nach erneuerbarem Wasserstoff von maximal 6.3 Mt/a



RED III Quoten für RFNBO in 2030

Industrie: 42% (exklusive Raffinerie)

Transportsektor: 1%

- Schifffahrt: 1.2%

Erleichterungen:

- Generelle Doppelzählung → 0.5% effektiv
- Zusätzlich Multiplikator 1.5 für Schiff/Flug → 0.33 % wenn im Flug/Schiffsektor

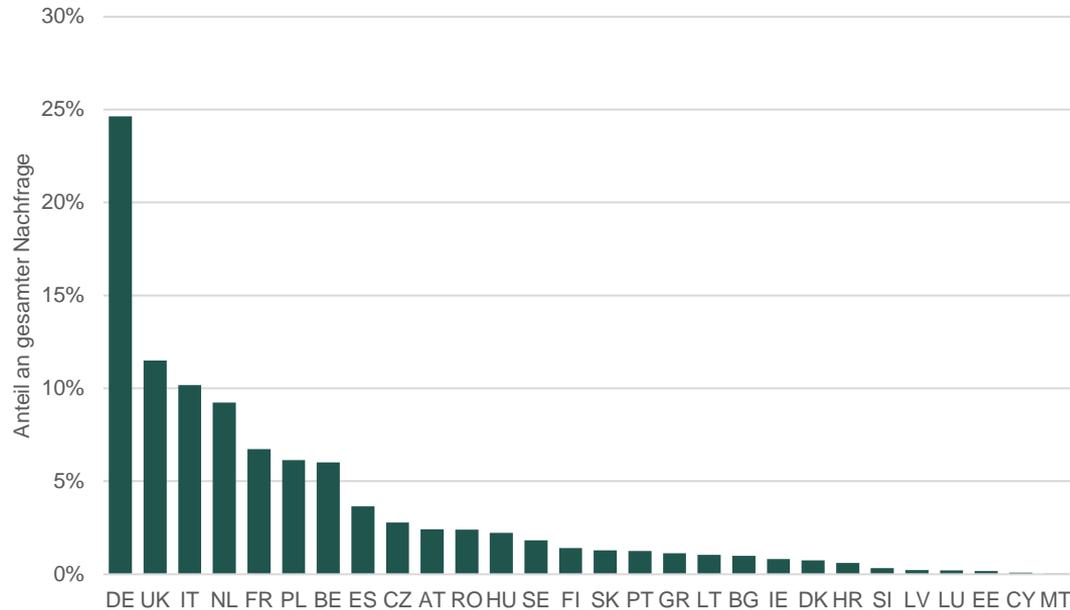
Optimistische Annahmen (ausgelöst durch Dekarbonisierungsmaßnahmen)

- 1.7 Mt/a durch Stahl-Dekarbonisierung
- 0.2 Mt/a in der Wärme und Sonstige

1) Schätzung der Mengen nach Hydrogen Europe: Clean Hydrogen Monitor (2023)

MODELLANNAHMEN: NACHFRAGE JE LAND

VERTEILUNG AUF EUROPÄISCHE LÄNDER LAUT TYNDP (2022)



Verteilung auf europäische Länder anhand TYNDP 2022 (Global Ambition Szenario)

> 60% der Nachfrage sind auf Deutschland, UK, Italien und Benelux verteilt

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einführung & Motivation
2. Modellinputs
 1. Angebot
 2. Nachfrage
- 3. Transport**
3. Ergebnisse
4. Fazit und Schlussfolgerungen



AGGREGATION DER LÄNDER IN REGIONEN



Für die Modellierung wurden 249 Länder in **37 Regionen aggregiert**

Aggregation auf **Basis ähnlicher geographischer Lage**, Erzeugungspotenziale und Kosten, nicht aufgrund politischer oder ethnischer Kriterien

Es gibt verschiedene Erzeuger innerhalb einer Region, Transport innerhalb der Region ist jedoch unbegrenzt

SCHIFFSVERBINDUNGEN AB/NACH DEUTSCHLAND



Distanzen

Es wurden die direkten Verbindungen zwischen den Zentren der Regionen herangezogen

Binnenregionen

wie Osteuropa oder Zentralasien haben keine Schiffsverbindungen

ANNAHMEN TRANSPORTKOSTEN & KAPAZITÄTEN (2030)

European Hydrogen Backbone¹ Pläne für H₂-Pipelines 2030

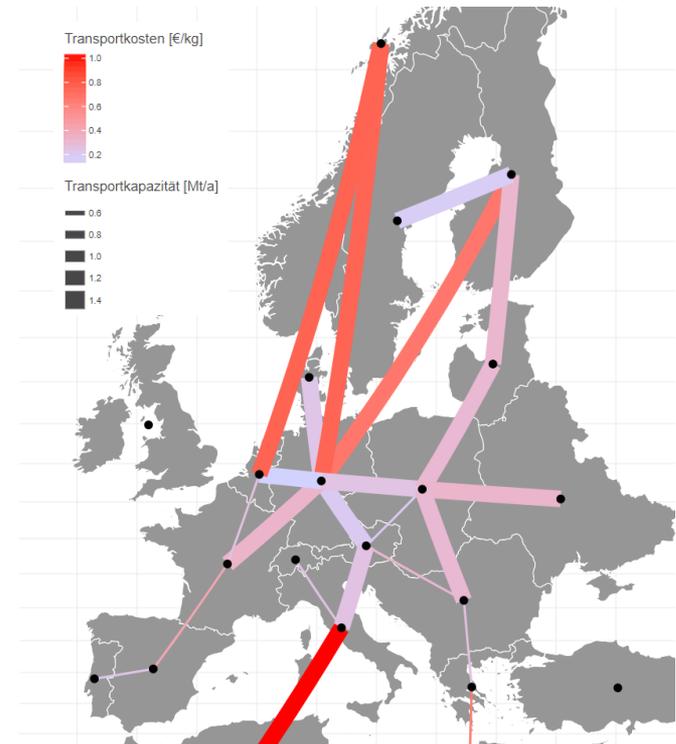
- Kapazitäten: Small/Medium/Large - 0.1 / 0.5 / 1.5 Mt/a

Schiffsverbindungen

- ‚Kleine‘ Kapazität von 0.1 Mt/a

Anwendung linearer Funktionen für Transportkosten²

- Schiff: Um- und Rückumwandlung von ~ € 2/kg
- Pipeline: 0.33 €/kg/1000km



1) Y. Sagdur et al., 'European Hydrogen Backbone. Implementation Roadmap - Cross border projects and costs update', Guidehouse, 2023. Available [online](#)

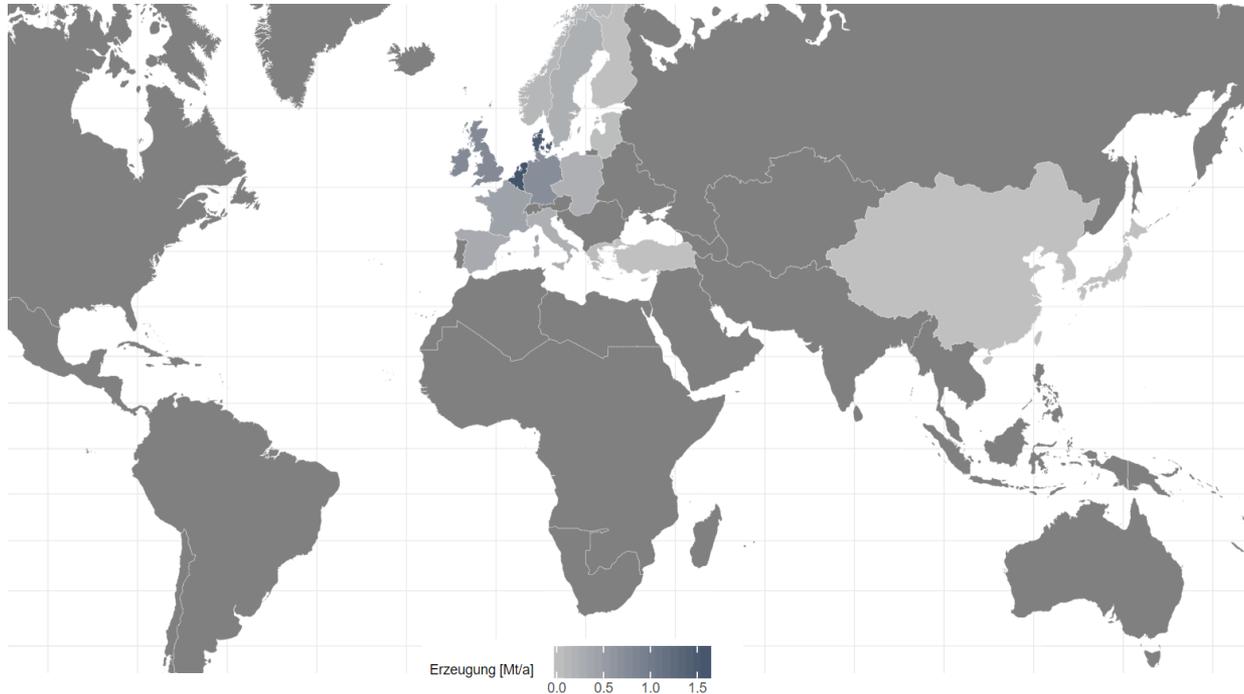
2) Vereinfacht laut IEA (2022, p. 141). Inklusive Umwandlungskosten

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einführung & Motivation
2. Modellinputs
 1. Angebot
 2. Nachfrage
 3. Transport
3. **Ergebnisse**
4. Fazit und Schlussfolgerungen



ERZEUGUNG VON ‚GRÜNEM‘ H2 (2030)



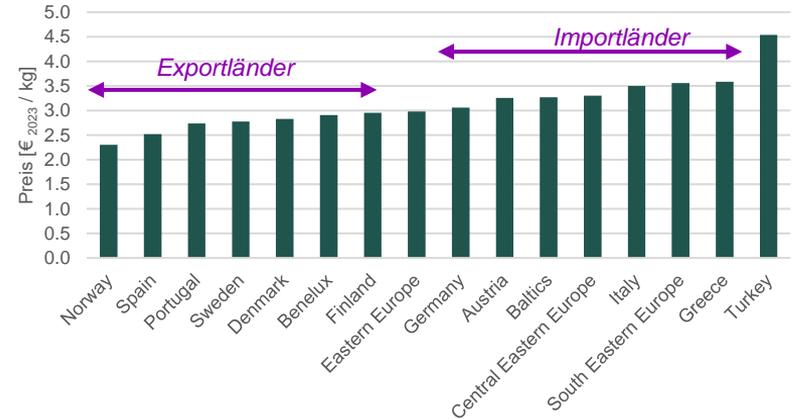
Die optimale Lösung sieht Erzeugung fast ausschließlich in Europa vor

- Große Erzeugung in DK, BNL und DE weil große Nachfrage und relativ günstige LCOH
- Transport ist relativ teuer

Erzeugung außerhalb Europas findet nur in China statt, versorgt Türkei¹

1) Als Resultat fehlender Pipelineverbindungen von/nach Türkei und einer starken Unterschätzung der Distanz durch Luftlinie zwischen China und Türkei

GLEICHGEWICHTSPREISE FÜR GRÜNEN H2 (2030)



„Gleichgewichtspreise“ sind im Sinne eines Fundamentalmarktmodells zu verstehen

- Sind eine direkte Folge der Inputs, vor allem Gesteinskosten laut EWI-Publikation sowie Transportkosten
- Reflektieren keine Knappheitsaufschläge/Marktmacht
- Setzen einen idealen Markt/Infrastruktur voraus

Die Modellergebnisse sind keinesfalls als Prognosen zu verstehen. Derzeit existiert kein liquider Markt für grünen H2 und die hinterlegten Input-Daten implizieren signifikanten Fortschritt in Technologie- und Marktentwicklung. Die Preise basieren auf Gesteinskosten einer externen Analyse, die sich nicht mit anderen Arbeiten des AIT decken

FLÜSSE ZWISCHEN LÄNDERN

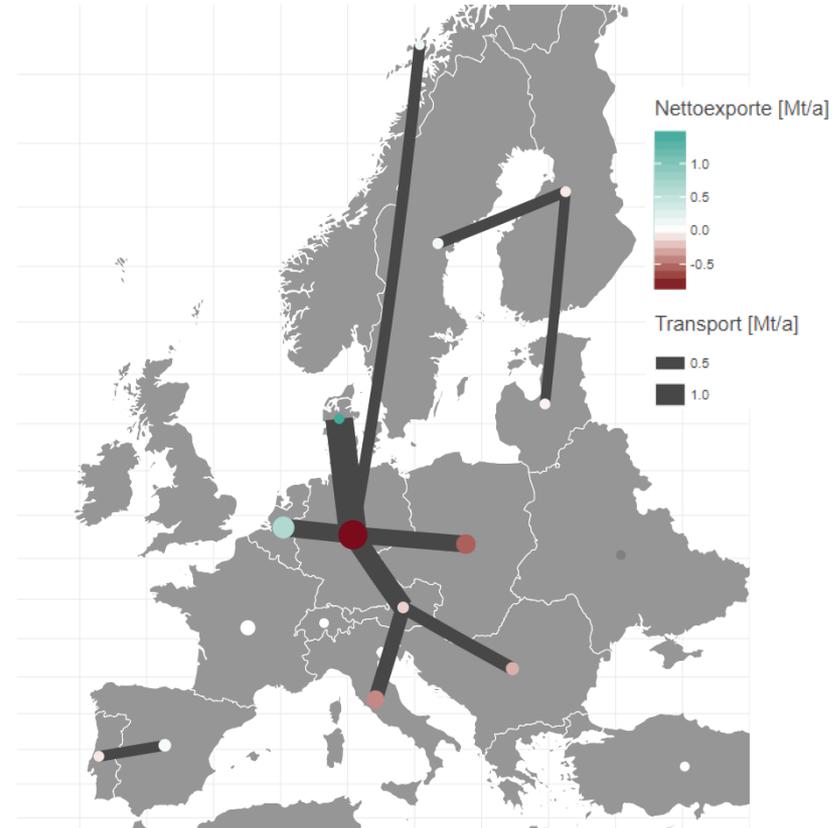
Europa in Summe ist (fast) autark

Viele Länder sind annähernd autark

- Einzelne Pipelines werden gar nicht genutzt
- Pipelines nach Nordafrika werden nicht genutzt
- Exportländer Norwegen, Dänemark, Benelux
- Spanien exportiert nur nach Portugal, da Dänemark strategisch günstiger am Zentrum der Nachfrage liegt als Spanien

Nur ‚kurze‘ Distanzen werden genutzt

- Deutschland ist ‚Nachfragezentrum‘
- Hauptachse: Dänemark → Deutschland → Süden
- Weitere Verbindungen: Versorgung CEE/SEE
- Österreich als Transitland, keine Erzeugung



INHALTSVERZEICHNIS

1. Einführung & Motivation
2. Modellinputs
 1. Angebot
 2. Nachfrage
 3. Transport
3. Ergebnisse
4. **Fazit und Schlussfolgerungen**



LIMITATIONEN UND INTERPRETATION



LIMITATIONEN

- Output-Preise sind nur unter starken Einschränkungen als Marktpreise zu interpretieren. Sie sind direkte Folge der Gestehungskosten und Ergebnis eines Optimierungsmodells, die nur unter Annahme eines vollkommenen Marktes als Approximation an Marktpreise verstanden werden können
- Potenzielle Erzeugungsmengen evtl. zu optimistisch. H₂-Produktion ist flächenintensiv
- Direktverbindungen unterschätzen tendenziell die Transportkosten
- Nachfrage nach ‚grünem‘ H₂ als großer Unsicherheitsfaktor



BEDEUTUNG

- Sobald Erzeugungskosten relativ zu Transportkosten steigen findet mehr Handel statt
- Simultane Betrachtung von Angebot und Nachfrage → Gleichgewichtslösung
- Zeigt die Absatzmöglichkeiten für grünen H₂ aus Sicht der Erzeuger
- Modell findet optimale Importrouten und gibt ein realistisches Bild zu günstigen Standorten

FAZIT UND SCHLUSSFOLGERUNGEN



KERN- ERKENNTNISSE

- Angebot übersteigt Nachfrage signifikant
- Wenig Handel: Preisdifferenzen in den Erzeugungskosten rechtfertigen Transport kaum
- Im Allgemeinen hoher Autarkiegrad zu beobachten



NÄCHSTE SCHRITTE

- Mehrere Szenarien bezüglich Nachfrage
- Saisonalität im H2-Angebot durch RES-Verfügbarkeit & Nutzung von Speichern
- H2-Derivate (Ammoniak, Methanol, SNG) betrachten und Umwandlung explizit abbilden



Philipp Ortmann

philipp.ortmann@ait.ac.at
+43 664 889 043 17

Stefan Reuter

stefan.reuter@ait.ac.at
+43 664 889 649 95

Stefan Strömer

stefan.stroemer@ait.ac.at
+43 664 785 883 07

