

Vom Abgas zu Wertstoff: Methanol aus CO₂-haltigen Emissionen (AbZuMeOH)

Machbarkeitsstudie zu CO₂-basiertem MeOH am Standort D

Techno-ökonomische und Lebenszyklusanalyse

Bioball Abschlußtreffen

15.9.2025

Prof. Dr.-Ing. Alexander May



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Das Projekt AbZuMeOH

CO₂-Quellen und Prozesskette

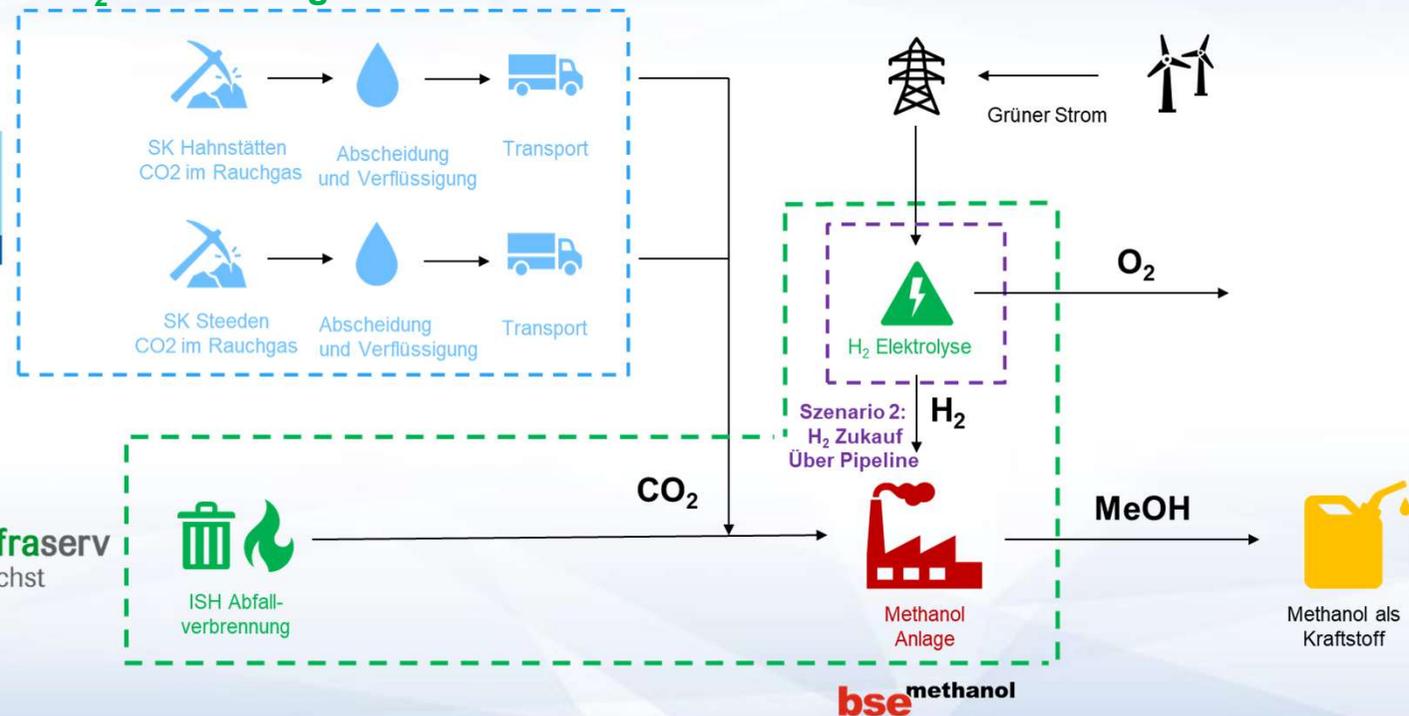
- Projekt innerhalb des Innovationsraums BioBall
→ stoffliche Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen im Rhein-Main-Gebiet
- Laufzeit 01.01.2021-31.12.2023
- Ziel: CO₂ aus Rauchgasen in Methanol umzuwandeln



SCHAEFER
kalk



infraser
höchst



MeOH aus CO₂

Ein beliebig

Journal of CO₂ Utilization 39 (2020) 101166
Contents lists available at ScienceDirect
Journal of CO₂ Utilization
journal homepage: www.elsevier.com/locate/jcou

Applied Energy 161 (2016) 718–732
Contents lists available at ScienceDirect
Applied Energy
journal homepage: www.elsevier.com/locate/apenergy

Techno-economic analysis of methanol synthesis using captured CO₂
Judith Nyári, [...] Research Group of Environmental Engineering
Methanol synthesis using captured CO₂: Techno-economic and environmental impact analysis
Mar Pérez-Fortes^{a,*}, Jan C. Schöneberger^a

Research Article
Stoffliche Nutzung von CO₂-haltigen Abgasströmen aus der Kalkindustrie und Abfallverwertungsanlagen
Johann Kirchner, Qiawen Li, Pawel Syper, Holger Drescher, Christoph Felix Hofmann, Alexander May* und Thomas Bayer

Advances in Applied Energy
Contents lists available at ScienceDirect
Advances in Applied Energy
journal homepage: www.elsevier.com/locate/adapen

Renewable energy carrier: An assessment of production and distribution for Sustainable Energy & Fuels
PAPER
Economics & carbon dioxide avoidance cost of methanol production based on renewable hydrogen and recycled carbon dioxide – power-to-methanol
View Article Online
View Journal | View Issue
Christoph Hank,^a Svenja Gelpke,^a Andrea Schnabl,^{†a} Robin J. White,^{†a} Johannes Full,^a Nikolai Wiebe,^a Tom Smolinka,^a Achim Schaadt,^a

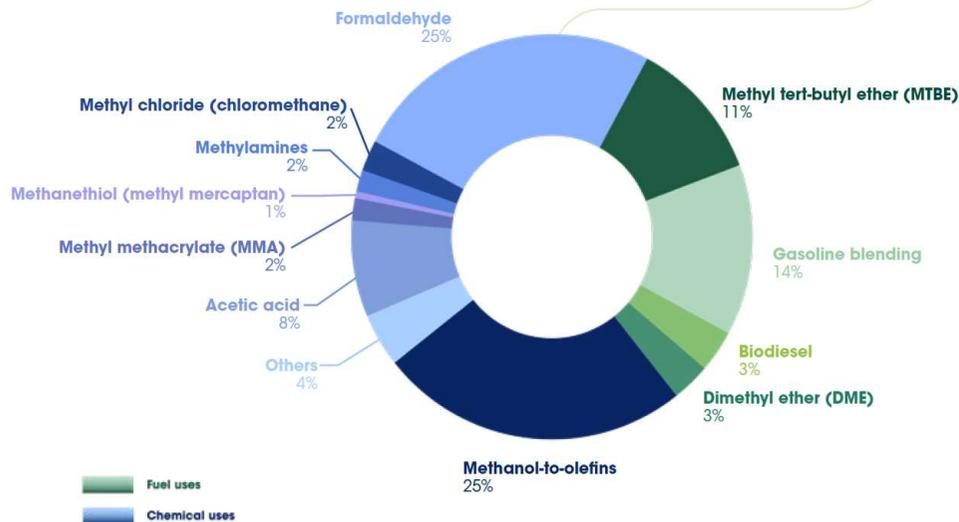
Datenbasis der hier vorgestellten Ergebnisse

- Abgasdaten realer CO₂-Quellen
- Sämtliche Verbrauchszahlen der Process Units von verfahrensgebenden Unternehmen (Realdaten bzw. Daten aus Pilotanlagen) – keine reine Simulationsbasis
- Investkosten ebenso von den Verfahrensgebern

Warum überhaupt MeOH

Fokus e-Methanol

98 million tonnes



Methanolbedarf (2021): **100 Mio. t pro Jahr**
(99% fossil)

Methanolbedarf (Ausblick 2050): **500 Mio. t pro Jahr**
aus IRENA: Innovation Outlook Renewable Methanol (Methanol Institute)

- Marktpreis EU
400 – 600 €/t (2023-2025)
- Preispotential für
e-MeOH
bei über 1.100 €/t
- Hintergrund:
EU-Verpflichtung zur
Beimischung nicht-fossiler
Kraftstoffe für
Kraftstoffhersteller
- Höherer Preis
gerechtfertigt, um
Strafzahlungen zu
vermeiden
- Maritime & Aviation fuels



INNOVATION
OUTLOOK
**RENEWABLE
METHANOL**

MeOH als Treibstoff für Schiffe



Ane Maersk
350 m lang
60.000 PS

120 t MeOH / d

Quelle
Welt, 28.3.2024

Am frühen Donnerstagmorgen macht die „Ane Maersk“ erstmals am Eurogate-Terminal in Hamburg fest

Projektübersicht AbZuMeOH

Zugrundeliegende Massenströme

CO₂-Quellen sowie theoretisch max. mögliche MeOH-Mengen und H₂-Bedarfe

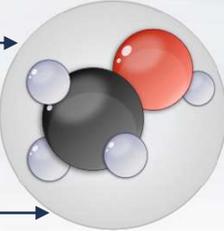
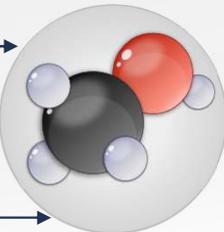
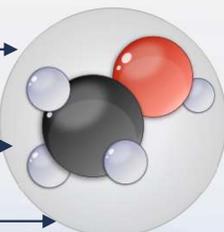
Standort	CO ₂ -Emissionen [kt/a]	CO ₂ -Konz. [Vol.-%]	Max. MeOH-Produktion ³ [kt/a]	H ₂ -Bedarf ⁴ [kt/a]
SK-Hahnstätten ¹	330	21-28%	225	46
SK-Steeden ¹	290	17-24%	198	41
ISH-EVA ²	536	9%	366	75
Gesamt	1.156		789	162

1.) Datenbasis 2021 2.) Datenbasis 2019 3.) 1,467 t CO₂ / t MeOH 4.) 0,205 t H₂ / t MeOH

MeOH-Verbrauch im Industriepark Höchst: ≈ 300.000 t/a

Szenarien für AbZuMeOH

Kapazitäten und Mengen (Gerundete und vereinfachte Darstellung Feed- und Produktströme)

SZENARIO 1	20 MW Elektrolyse und ein FlexMethanol20 Synthesemodul	<p>20 MW_{Elektrolyse}</p> <p>2,9 t(CO₂)/h</p> <p>0,4 t(H₂)/h</p>  <p>2,0 t(MeOH)/h 16.000 t(MeOH)/a</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nächste logische Scale-Up Stufe (Demo-Plant) ▪ Hohe spez. Investkosten ▪ Geringe Rentabilität
SZENARIO 2	Umsetzung gesamtes CO ₂ aus Kalkherstellung Standort Hahnstätten	<p>260 MW_{Elektrolyse}</p> <p>37 t(CO₂)/h</p> <p>5,2 t(H₂)/h</p>  <p>25 t(MeOH)/h 200.000 t(MeOH)/a</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Economy-of-scale ▪ Fokus auf eine CO₂-Quelle ▪ Kommerzielles Szenario
SZENARIO 3	Umsetzung gesamtes CO ₂ aus Kalkherstellung und EVA	<p>920 MW_{Elektrolyse}</p> <p>168 t(CO₂)/h 1,16 Mio. t(CO₂)/a</p> <p>18 t(H₂)/h</p>  <p>89 t(MeOH)/h 710.000 t(MeOH)/a</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Economy-of-scale ▪ Nutzung aller CO₂-Quellen im Projektumfang ▪ Strombedarf in Größenordnung eines AKW

Szenarien für AbZuMeOH

Kapazitäten und Mengen (Gerundete und vereinfachte Darstellung Feed- und Produktströme)



Prozessketten AbZuMeOH

Betrachtete Szenarien: (1) H₂ durch Elektrolyse

Standort Hahnstätten (Schaefer Kalk)



Standort Industriepark Höchst (Infraserv)



Prozessketten AbZuMeOH

Betrachtete Szenarien: (2) H₂ durch Zukauf

Standort Hahnstätten (Schaefer Kalk)

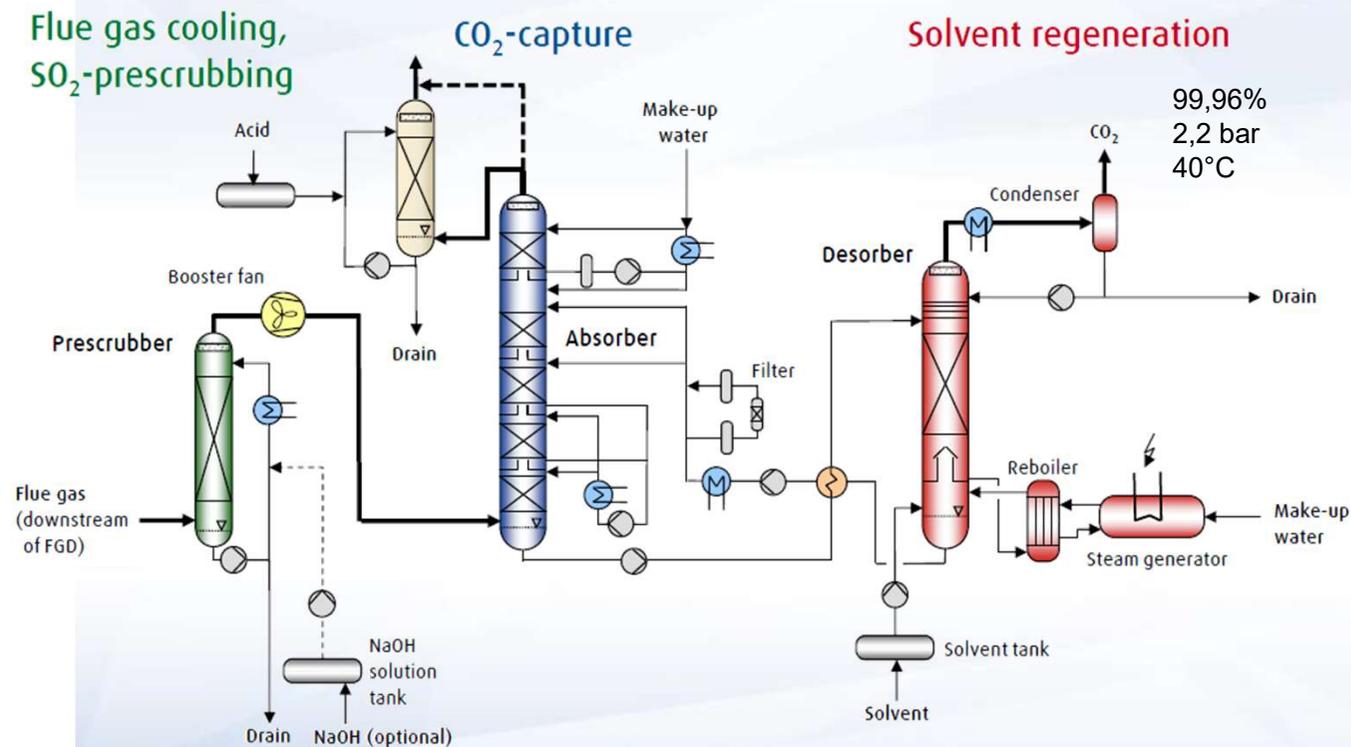


Standort Industriepark Höchst (Infraserv)



CO₂-Abscheidung

Verfahrensschema und spez. Verbräuche

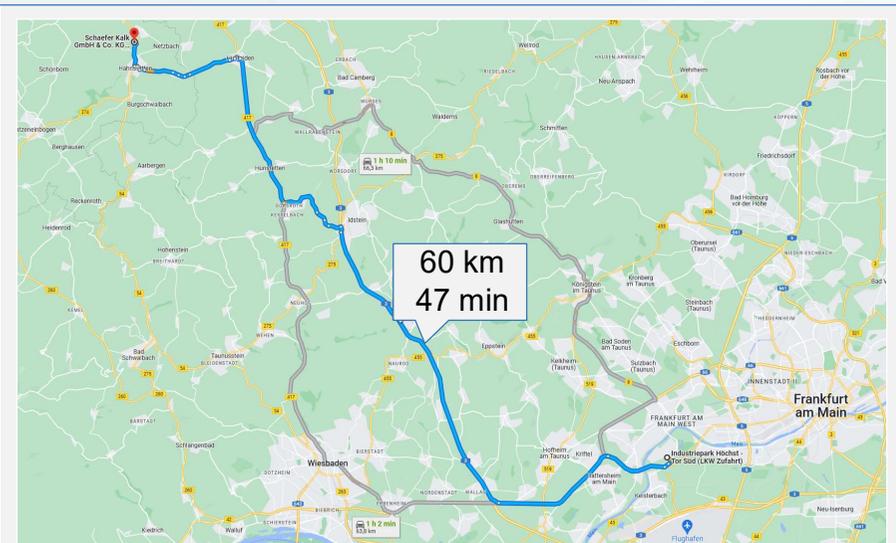
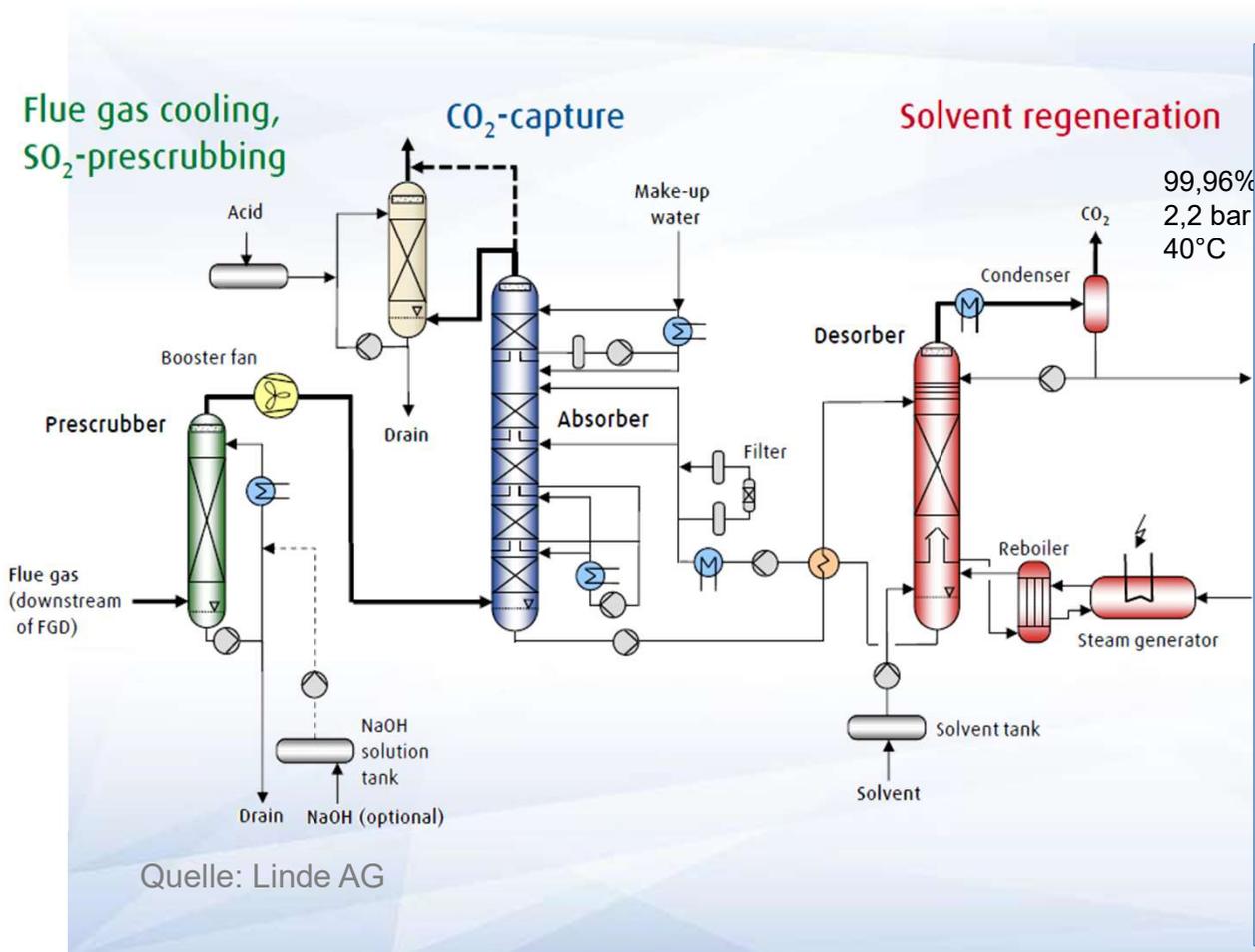


Quelle: Linde AG

- **Aminwäsche** als favorisierte Option nach Prüfung durch Verfahrensgeber
- Abscheidekosten ca. 100 €/t CO₂
- Höhere CO₂-Konzentration im Abgas
→ bessere Absorption
→ geringerer Energieverbrauch
- **Transport**
→ Kompression und Verflüssigung
→ zusätzlich 130 kWh Strom / t CO₂

CO₂-Abscheidung

Verfahrensschema und spez. Verbräuche



LKW-Transport (CO₂, flüssig)

- Entfernung Hahnstätten-Höchst: 60 km
- Transportmenge: 297.000 t CO₂ / a
- Zustand: flüssig (-18°C, 21 bar)
- Beladung: 22 t pro LKW
- Ca. 45 Fahrten pro Werktag

Investitionskostenschätzung

Szenario 200 kt MeOH in Höchst- CO₂ aus Kalkwerk Hahnstätten

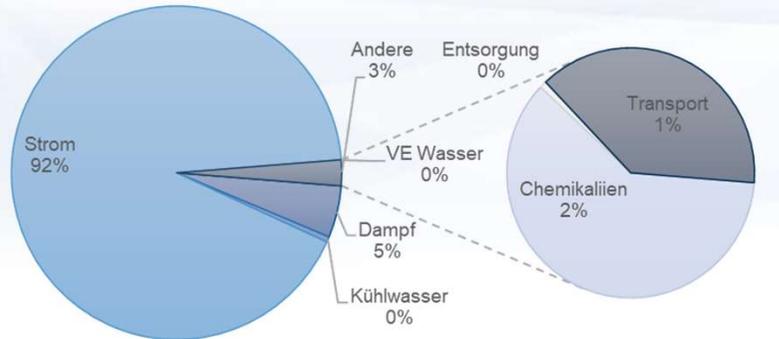
	Szenario H ₂ -Zukauf	Szenario Elektrolyse $\eta = 70\%$
ISBL		
Aminwäsche	27	
CO ₂ -Verflüssigung	17	
MeOH-Anlage	103	
PEM-Elektrolyseur	-	
Summe ISBL	147	
OSBL (30% v. ISBL)	44	
Contingency (10%)	19	
Gesamtinvest	210	
Spez. Invest [€ t_{MeOH}⁻¹ a⁻¹]	1 051	

- Angaben in Mio.€.
- Schätzgenauigkeit $\pm 30\%$
- PEM-Elektrolyse dominiert Investitionskosten
Annahme 1.500 €/kWh ISBL+OSBL
- Invest für Aminwäsche hängt auch von CO₂-Konz. im Rauchgas ab:

CO₂-Konz ↓ Invest ↑

Ergebnisse TEA

Szenario 200 kt MeOH in Höchst- CO₂ aus Kalkwerk Hahnstätten



■ Dampf ■ Kühlwasser ■ Strom ■ VE Wasser ■ Chemikalien ■ Entsorgung ■ Transport

Aufteilung var. Kosten Szenario Elektrolyse

- Anteil der spez. Kosten für H₂ an Herstellkosten typischerweise zwischen 80-90%. (Stromkosten oder Zukaufkosten)
- Hohes Capex für PEM führt zu hohen Abschreibungen
- Szenarien mit H₂-Zukauf führen zu deutlich niedrigeren Herstellkosten

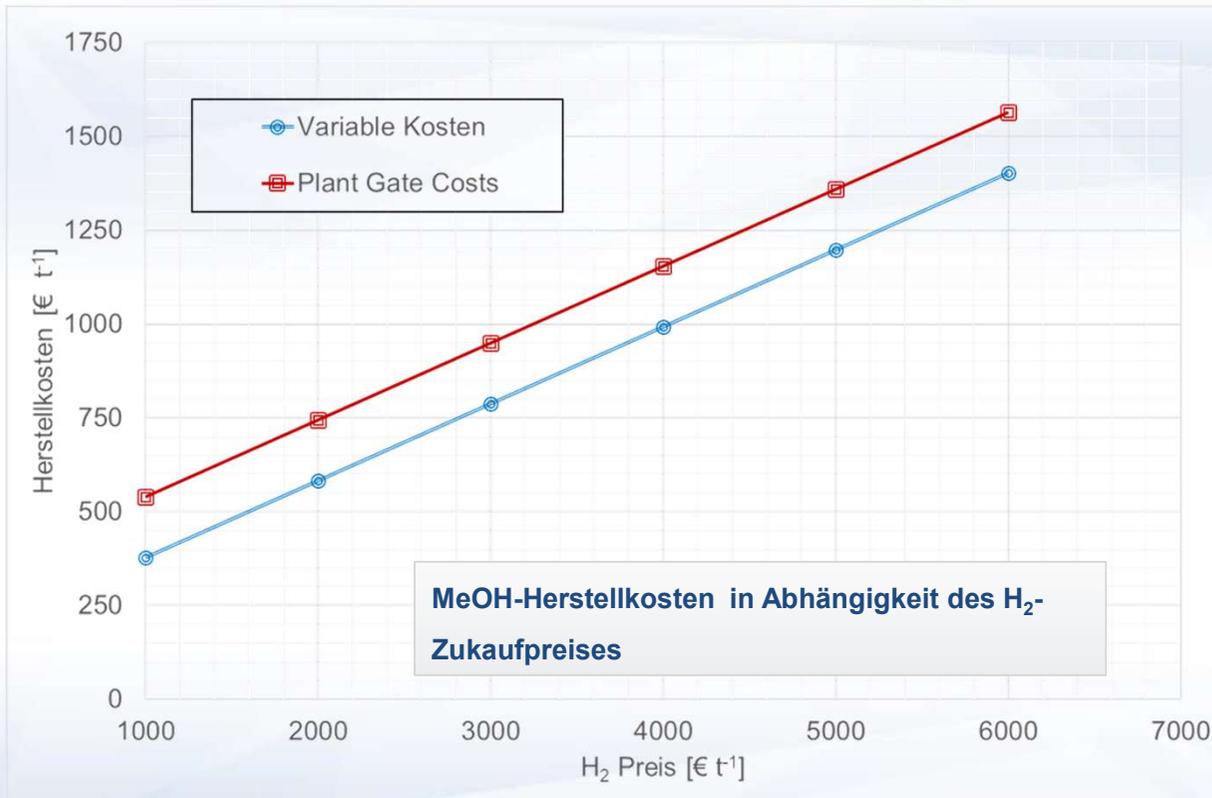
	HK MeOH [€ / t MeOH]		Anmerkung
	Szenario Elektrolyse	Szenario H ₂ -Zukauf	
Variable Kosten	1.357	992	
Instandhaltung	107	32	3% v. ISBL, PEM 1,5% ISBL
Personal	7	6	
Indirekte Fixkosten	57	19	50% der direkten Fixkosten
Plant Cash Cost (PCC)	1.528	1.049	
Abschreibungen - 10a	358	105	
Plant Gate Cost (PGC)	1.886	1154	

Preisannahmen:

30 € / t Dampf, 80 €/MWh Strom, H₂-Zukauf 4.000 €/t

Ergebnisse TEA

Sensitivitätsanalyse – H₂-Zukauf



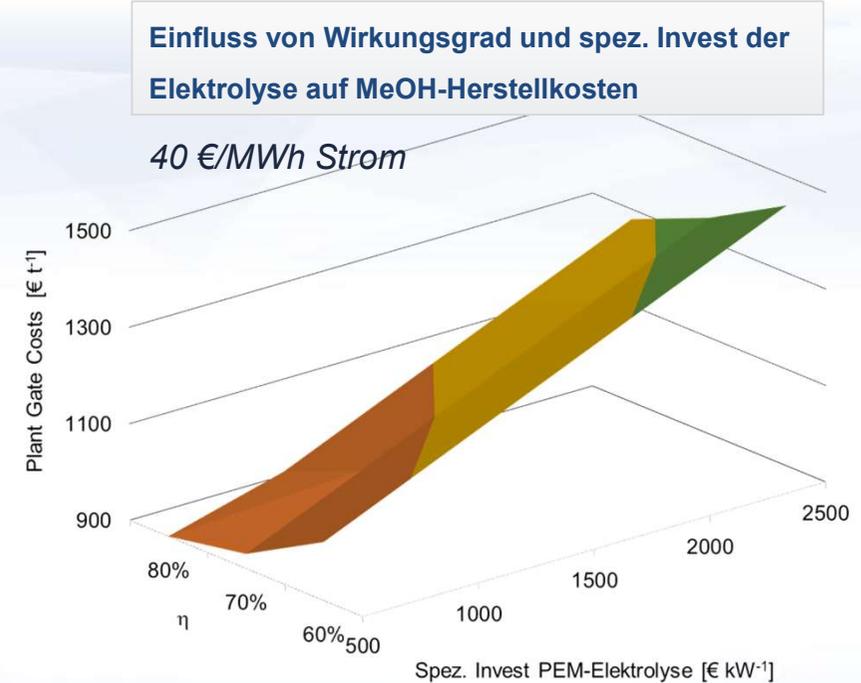
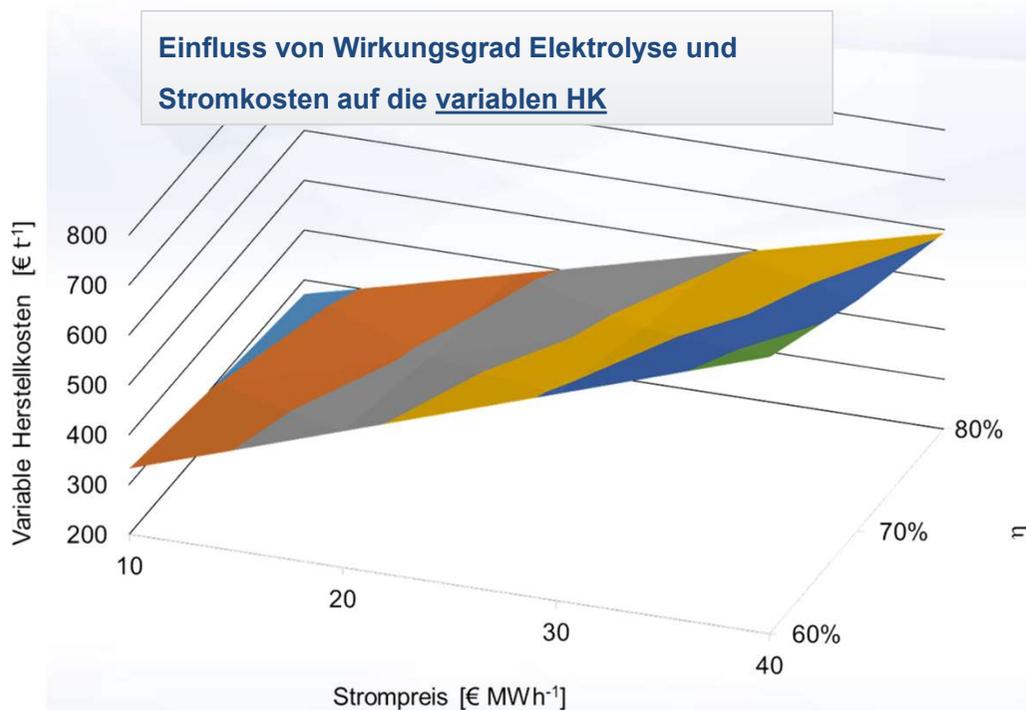
Preisannahmen: 30 € / t Dampf, 80 €/MWh Strom

1. Herstellkosten < Marktpreis für fossiles MeOH auch unter besten Annahmen nicht erreichbar

2. Bei H₂-Preisen ≤ 3.600 €/t H₂
HK < 1100 €/t MeOH
→ Break-even bei entspr. Marktpreisen für e-MeOH

Ergebnisse TEA

Sensitivitätsanalyse – Szenario Elektrolyse

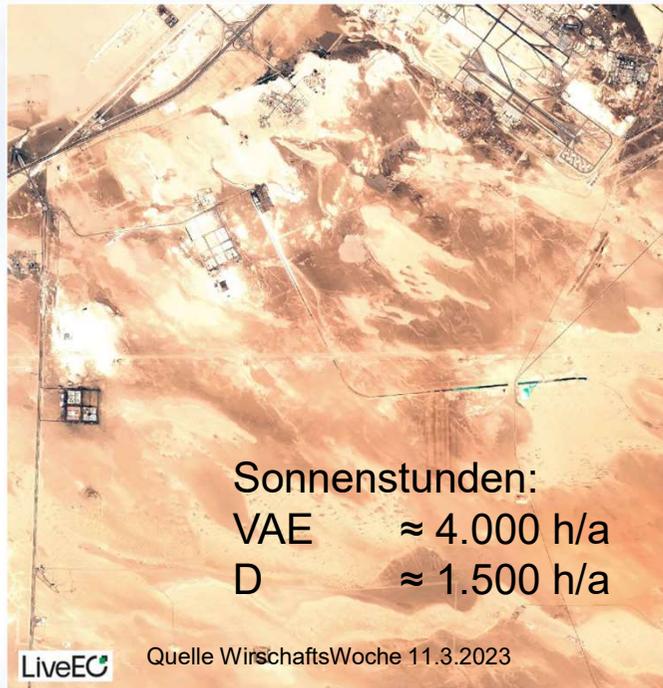


1. Herstellkosten < Marktpreis für fossiles MeOH auch unter besten Annahmen nicht erreichbar

2. Bei Elektrolyse-Wirkungsgraden ab 70% und Stromkosten ≤ 40 €/MWh → HK < 1100 €/t MeOH → Break-even bei entspr. Marktpreisen für e-MeOH

Wasserstoffzukauf vs. Eigene Elektrolyse

Diskussionspunkt: Wie kann H₂-Zukauf günstiger sein?



Solkraftwerk Al Dhafra, Emirat Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate

- 2 GW Kraftwerk Al Dhafra (Abu Dhabi)
- günstigstes Solarkraftwerk der Welt
- 1,35 US-ct / kWh Grünstrom

Zahlreiche ähnliche Projekte im Bau oder in Planung
Saudi Arabien, Chile,

Transport des grünen H₂ in Form von Ammoniak

Der Ölprinz und die weltgrößte Fabrik für grünen Wasserstoff

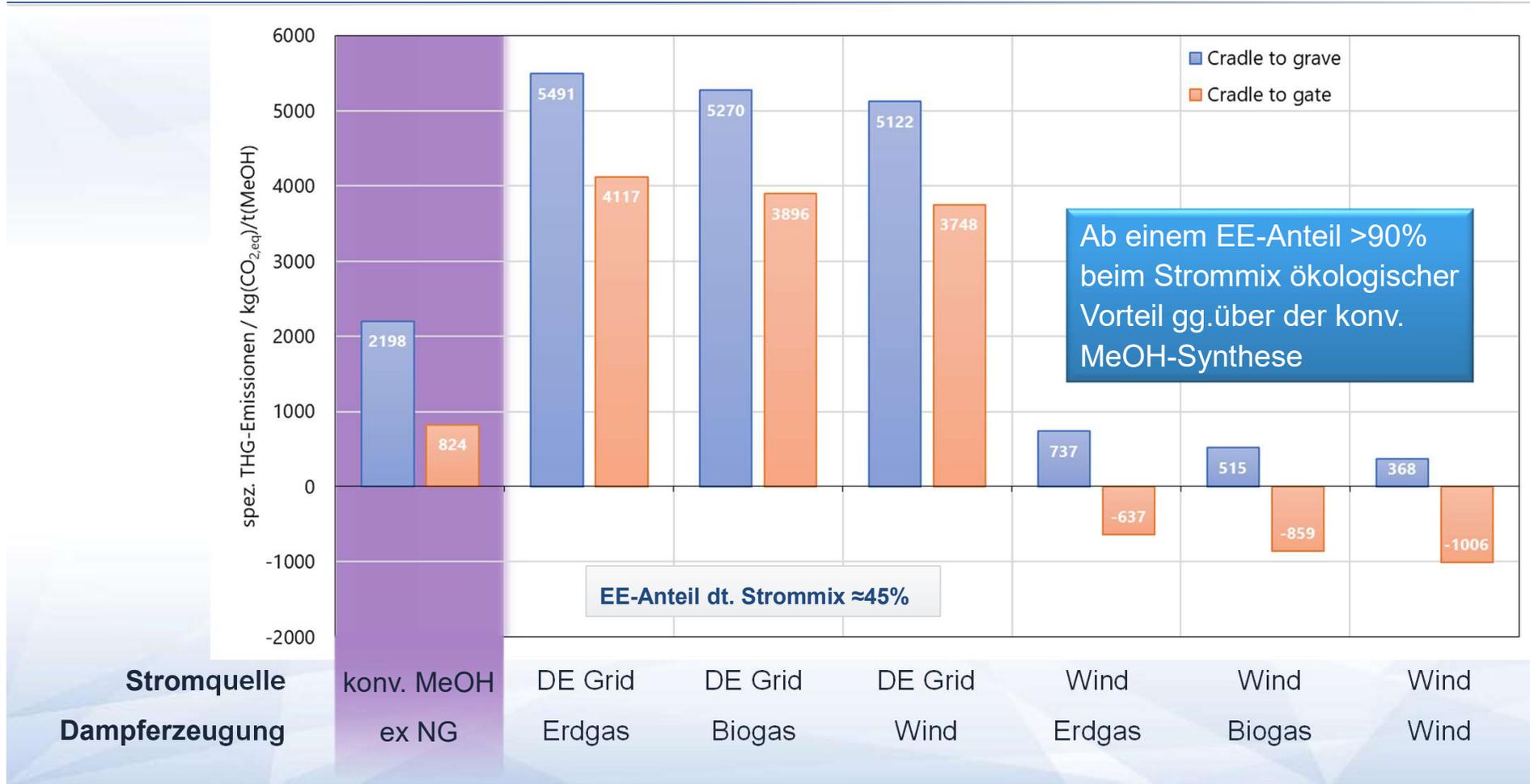
von Thomas Stölzel
02. März 2024



Die zukünftige Wasserstofffabrik von Neom.

Ergebnisse LCA

- Ökologische Betrachtung, spez. THG-Emissionen





Technologie

- Einzelne Prozesseinheiten sind industriell erprobt (bis zu TRL 9) → Verbund muss demonstriert werden
- Brownfield, d.h. entwickelte Chemiestandorte mit Infrastruktur zu bevorzugen



Normativer Rahmen

- Anerkennung von CCU als Methode zur Reduktion von Treibhausgasen
- Entsprechender Gesetzentwurf zur Anpassung des CO₂-Speicherungsgesetzes beschlossen (08/2025)



Wirtschaftlichkeit

- CO₂-Abgaben erhöhen (global)
- Preise für EE-Strom/EE-H₂ senken (Ziel 40 €/MWh) und Verfügbarkeit erhöhen
- Beimischquoten (Kraftstoffe)
- Serienfertigung für PEM-Elektrolyse (standardisierte Module) essentiell zum Erreichen der benötigten Kapazitäten und Reduktion der Investkosten



Umsetzung und Übertragbarkeit

- Nahezu jede CO₂-Punktquelle nutzbar (Zement-, Stahlindustrie, Kraftwerksrauchgase, biogene CO₂-Ströme)