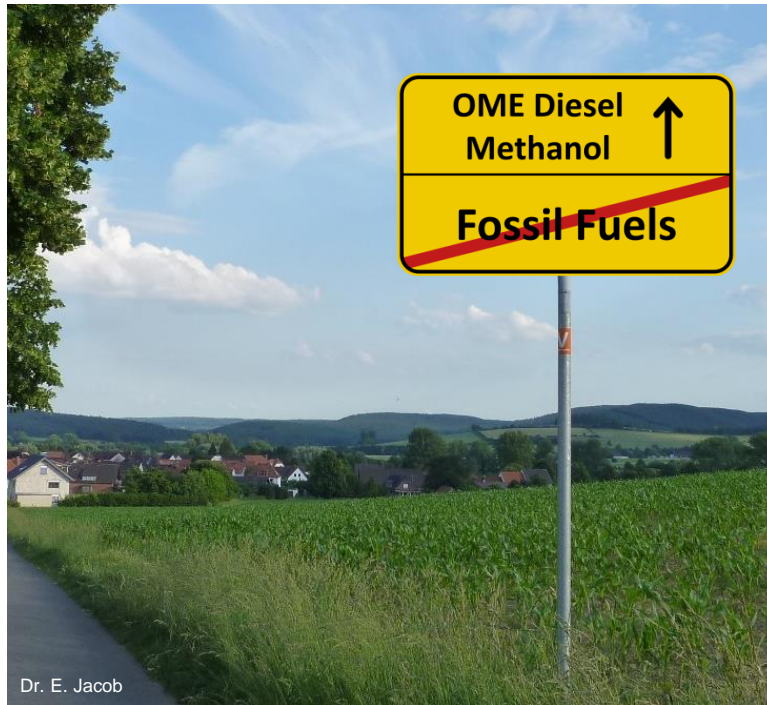


HyCO₂ – CHEMISCHE SPEICHERUNG ERNEUERBARER ENERGIE

Flüssigkraftstoffe aus Kohlendioxid und Wasserstoff



Chantal Ruppert-Winkel, Harald Hillebrecht, Ingo Krossing, Michael Moseler, Achim Schaadt, Robin White

Fraunhofer IWM, Fraunhofer ISE

Institut für Anorganische und Analytische Chemie

Institut für Umweltsozialwissenschaften und Geographie

Freiburg, 2. Dezember 2017

Die Fraunhofer-Gesellschaft

Joseph von Fraunhofer (1787 – 1826)



© Deutsches Museum

Forscher

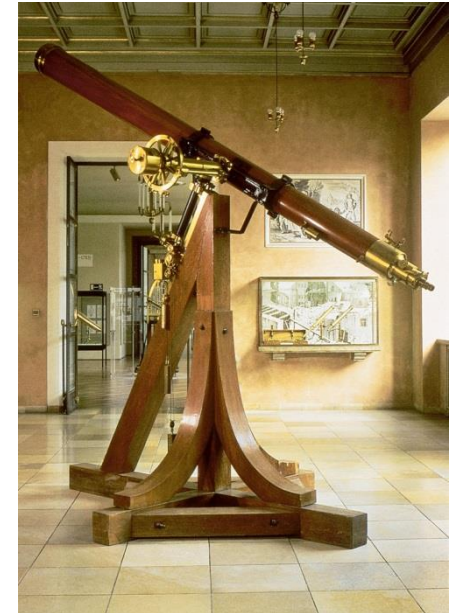
- Entdeckung der »Fraunhofer-Linien« im Sonnenspektrum

Erfinder

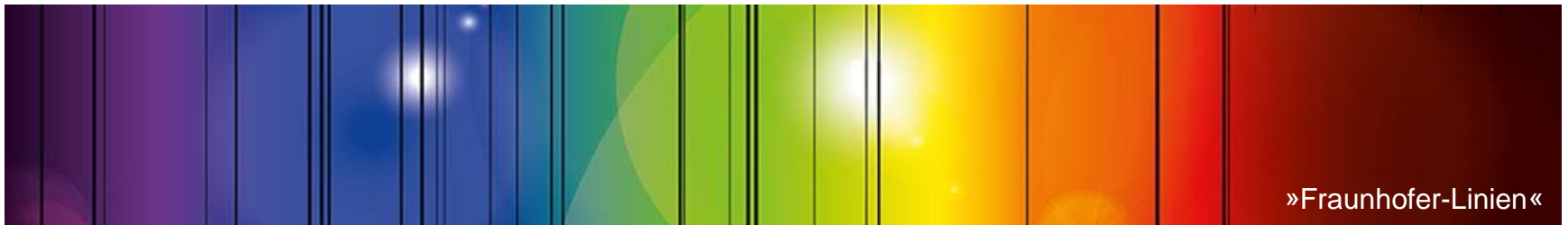
- Neue Bearbeitungsverfahren für Linsen

Unternehmer

- Leiter und Teilhaber einer Glashütte



© Fraunhofer-Gesellschaft



Fraunhofer ISE

Auf einem Blick



Institutsleiter:

Prof. Dr. Hans-Martin Henning
Dr. Andreas Bett

Mitarbeiter: ca. 1150

Budget 2016: € 81.2 million

Gegründet: 1981



Photovoltaik



Solarthermie



Gebäudeenergietechnik



Wasserstofftechnologien



Energiesystemtechnik

Fotos © Fraunhofer ISE / Fraunhofer CSP

Zusammenarbeit Fraunhofer ISE und Uni Freiburg

MethaKats-Projekt: So fing alles an...

■ Universität Freiburg

- Grundlagenorientiert, Fokus auf Chemie
- Synthese und Charakterisierung neuartiger, aktiverer Cu-Katalysatoren für die Methanolsynthese aus Kohlendioxid (CO₂) und Wasserstoff (H₂)
- Patentanmeldung

■ Fraunhofer ISE

- Angewandte Forschung, Fokus auf Verfahrenstechnik
- Prozess-Simulation/Aufbau/Betrieb Miniplant zur Methanolsynthese bis zu 1 l Methanol/h
- hohe Methanolreinheit & hohe Raum-Zeit-Ausbeute



ISE-Methanolsynthese, 2013

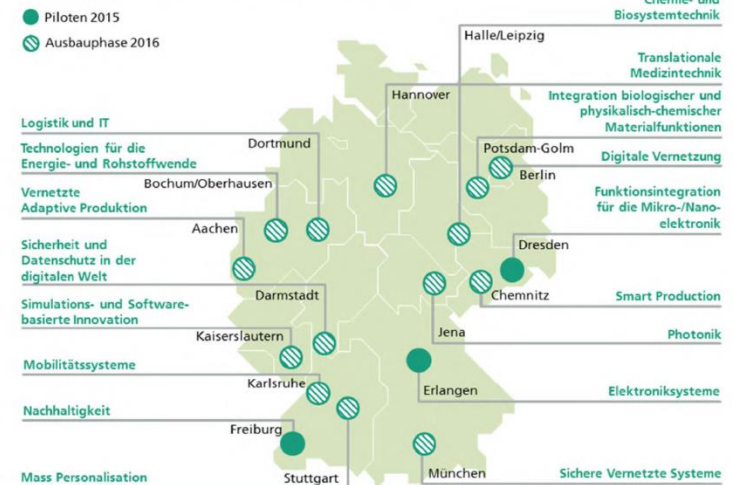
Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg

Pilotprojekt HyCO₂

- Erstes von inzwischen 16 Leistungszentren
- Schulterschluss zwischen Universität Freiburg und den 5 Freiburger Fraunhofer-Instituten
- Entwicklung von Technologien und Lösungen für mehr Nachhaltigkeit
- Kick-off am 6. März 2015 im Historischen Kaufhaus



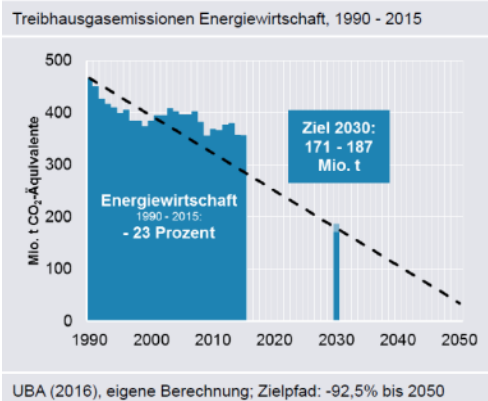
Standorte der Leistungszentren



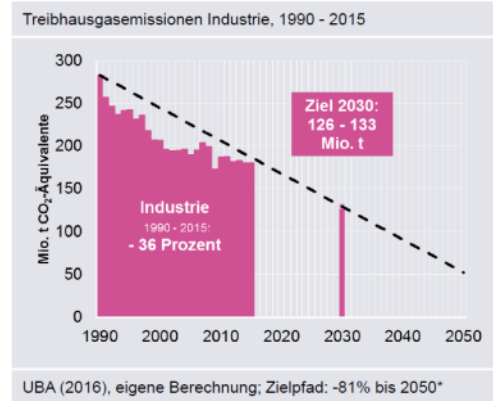
Motivation: Es gibt da ein paar Herausforderungen...

Deutschlands CO₂-„Reduktionen“ nach Sektoren

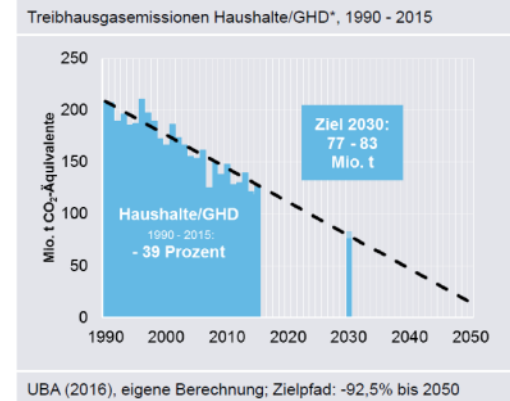
Energie (Ziel: -92,5%)



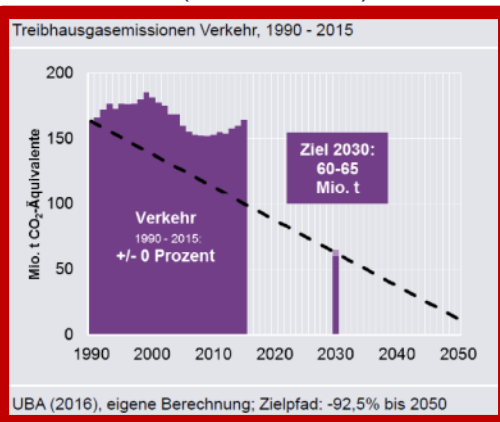
Industrie (Ziel: -81%)



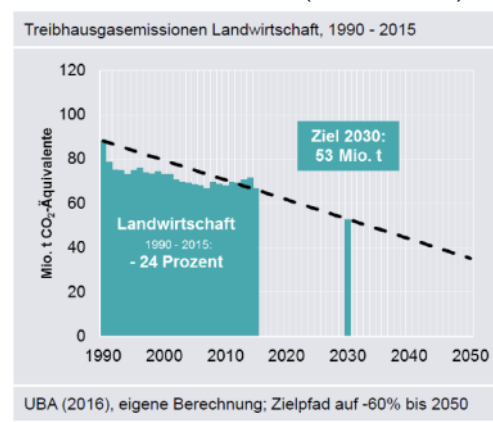
Gebäude (Ziel: -92,5%)



Mobilität (Ziel: -92,5%)



Landwirtschaft (Ziel: -60%)

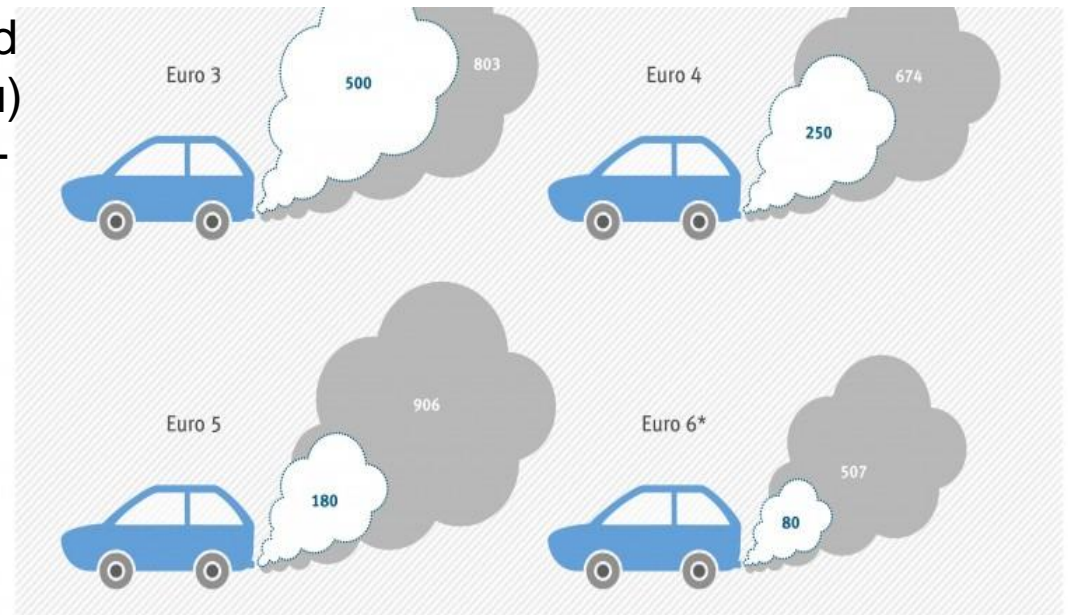


Graphs:
G. Rosenkranz,
Agora Energiewende (2017) & Umweltbundesamt (2016)

Motivation: Es gibt da ein paar Herausforderungen...

„Reduktion“ von Abgasemissionen

- Abgasgrenzwerte (weiß) und durchschnittliche reale (grau) NO_x -Emissionen von Diesel-Pkw verschiedener Schadstoffklassen



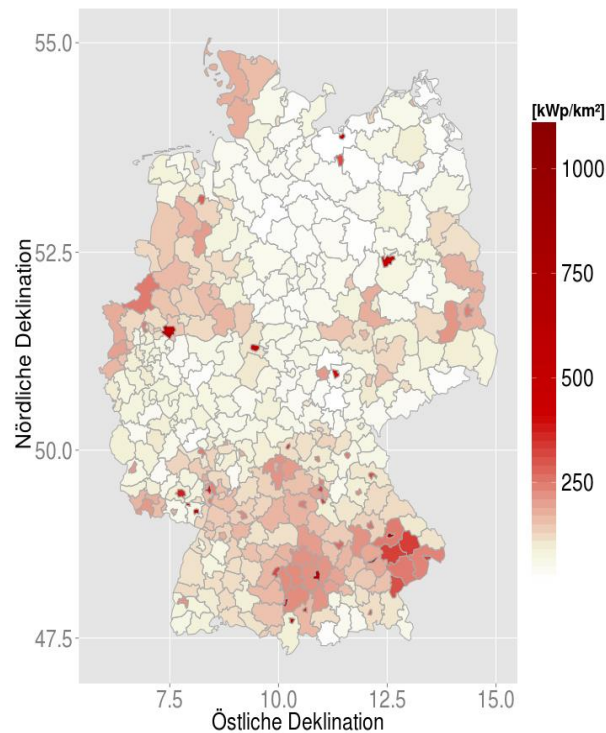
Darstellung © Umweltbundesamt nach Daten von Handbook Emission Factors for Road Transport 3.3, Angaben in mg NO_x / km

Motivation: Es gibt da ein paar Herausforderungen...

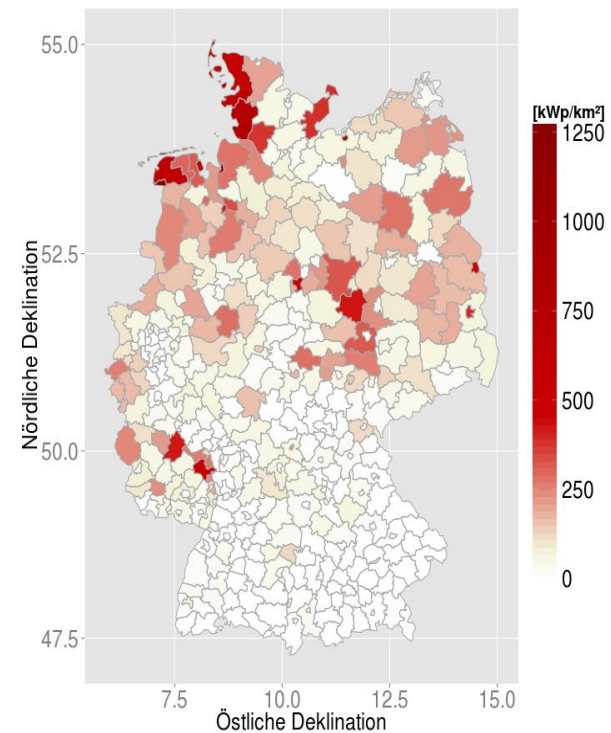
Regional stark unterschiedlicher EE-Ausbau

- Stromnetzausbau kommt nur langsam voran
- Offshore-Windenergie verstärkt Ungleichgewicht

Solarstrom fast nur im Süden



Windenergie vor allem im Norden

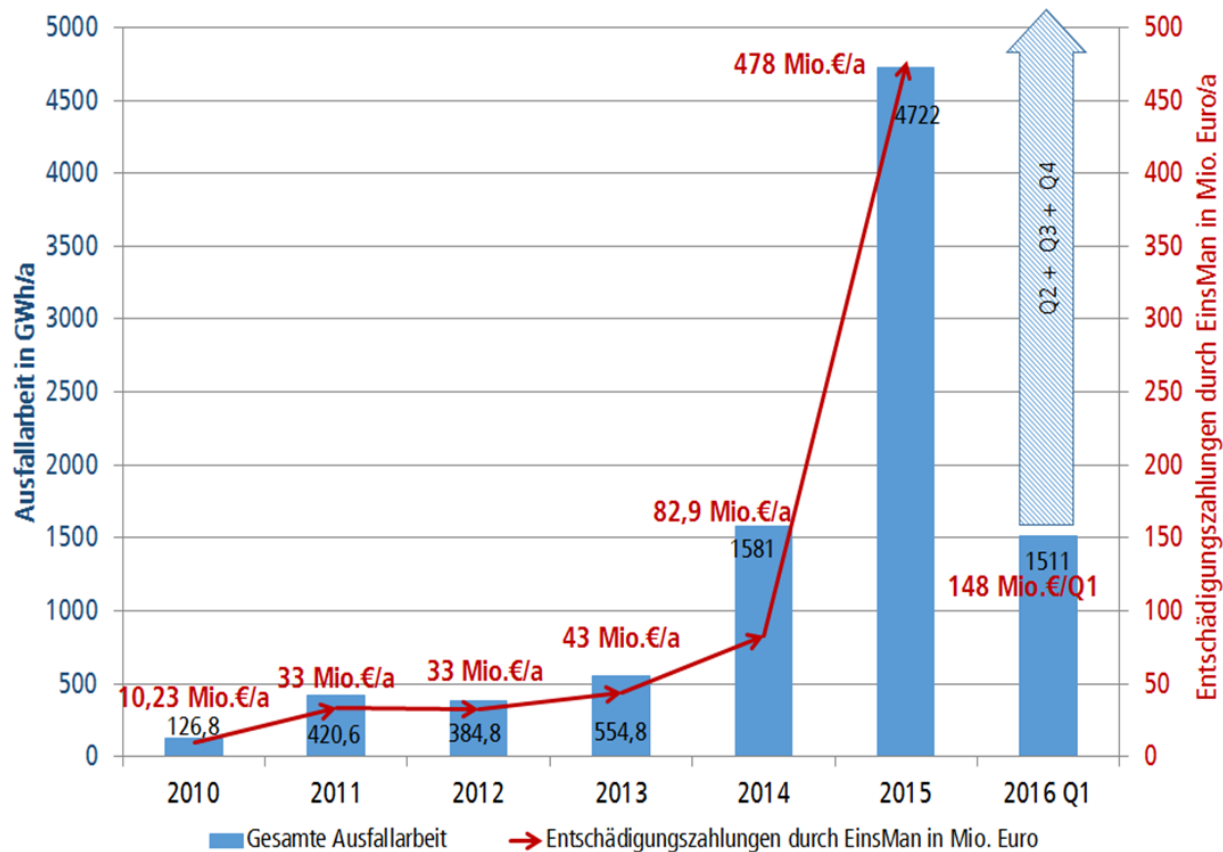


Darstellung Fraunhofer ISE
Daten: Energiemap 2014

Motivation: Es gibt da ein paar Herausforderungen...

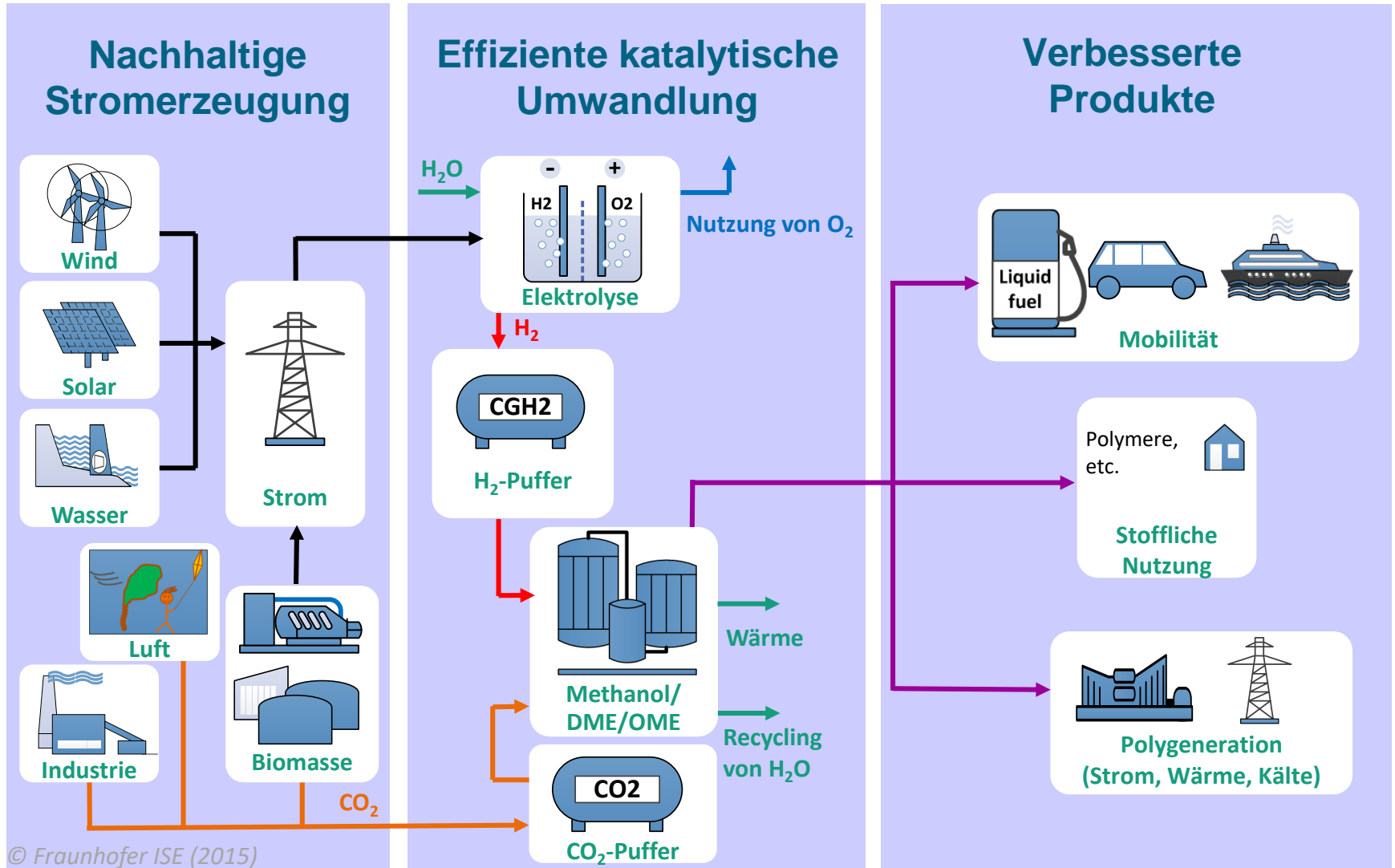
„Ausfallarbeit“ mit steigender Tendenz

- Ausfallarbeit 2015:
2,6 % der gesamten Erzeugungsmenge von EE-Anlagen



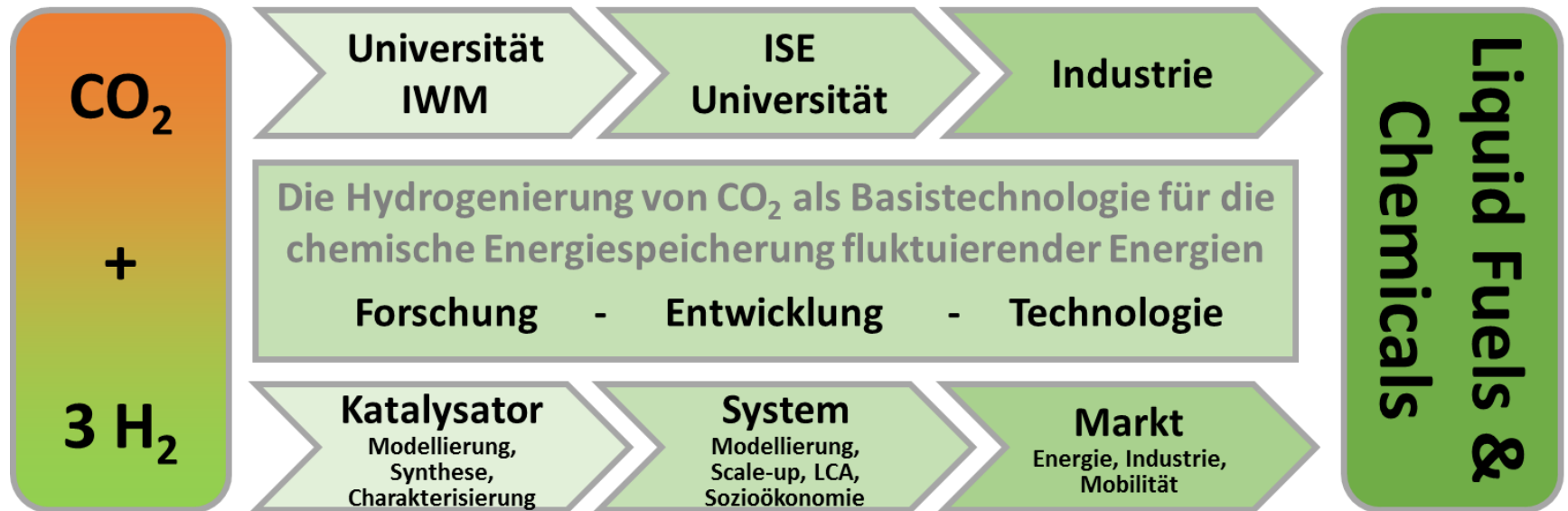
LBST, 2017

Lösungsansatz: Power-to-Liquid-(PtL)-Prozesskette

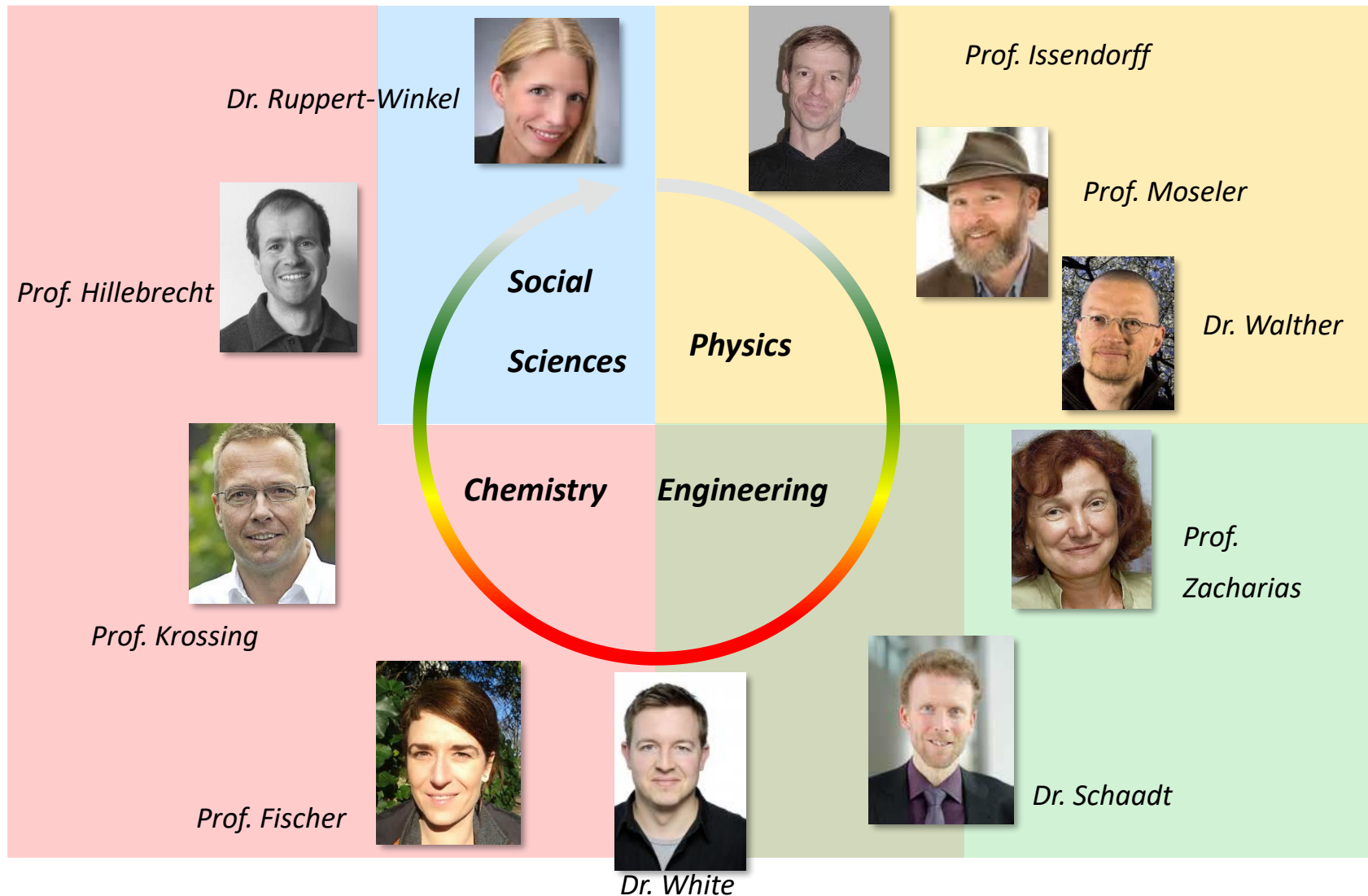


Ziele und Projektstruktur von HyCO₂

- Ziele:
 - Entwicklung und Evaluation von energieeffizienten Prozessen und verbesserten Katalysatoren für „grüne“ Kraftstoffe/Chemikalien
 - Vernetzung/Publicationen/Patente
 - Initiierung von Projekten mit der Industrie



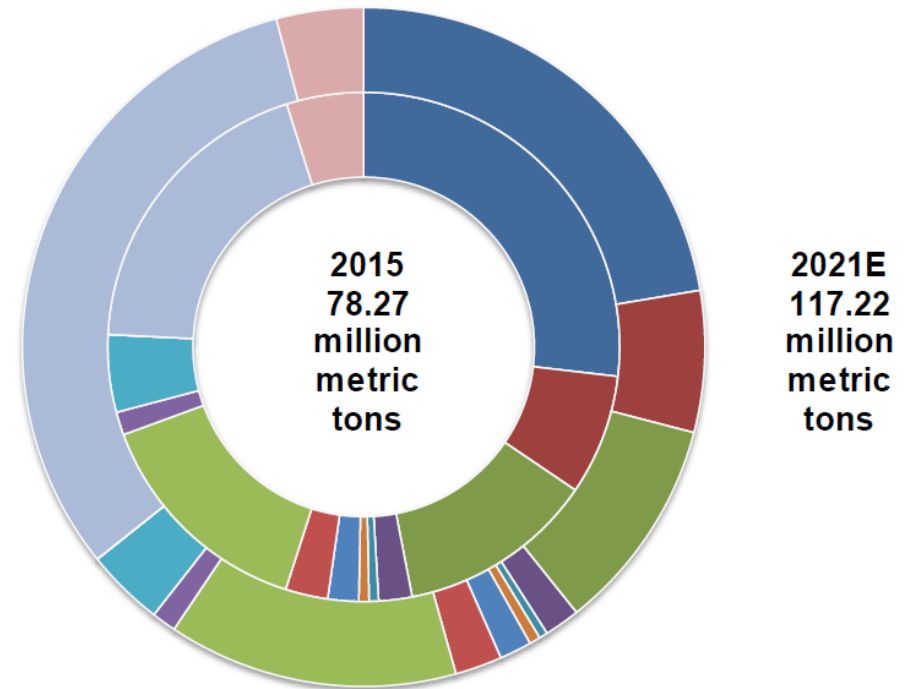
Das Power-to-Liquid Team in Freiburg



Methanol bietet faszinierende Perspektiven

- Wichtige Grundchemikalie bzw. Kraftstoff(additiv)
- Wachsender Markt
- Flüssig: einfache Handhabung/ hohe Speicherdichte
- Umwandlung Methanol (CH_3OH) in Dimethylether ($\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$, DME), Oxymethylenether (OME1 = $\text{CH}_3\text{-O-CH}_2\text{-O-CH}_3$), etc.

Methanol Use - World
By Derivative



Mark Berggren, Managing Director, MMSA
3rd Methanol Technology and Policy Commercial Congress,
29.11.-1.12.2016, Frankfurt

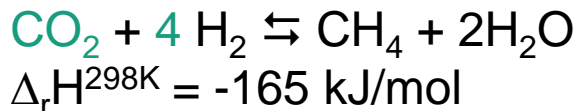
Motivation: Methanol bietet faszinierende Perspektiven

■ Methanolsynthese

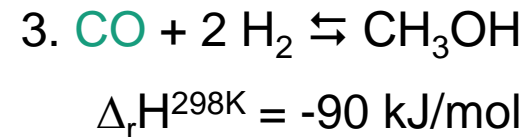
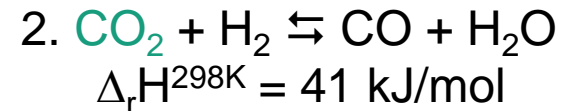
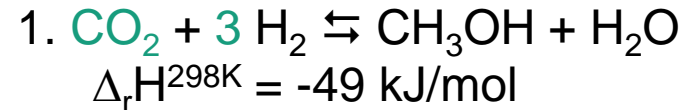
- Synthese aus CO₂ und H₂ **sehr selektiv** im Gegensatz zu Fischer-Tropsch

- **dezentrale** Anlagen einfach realisierbar

- **geringere Wärmetönung** als bei konventioneller Methanol-Synthese und Methanisierung:

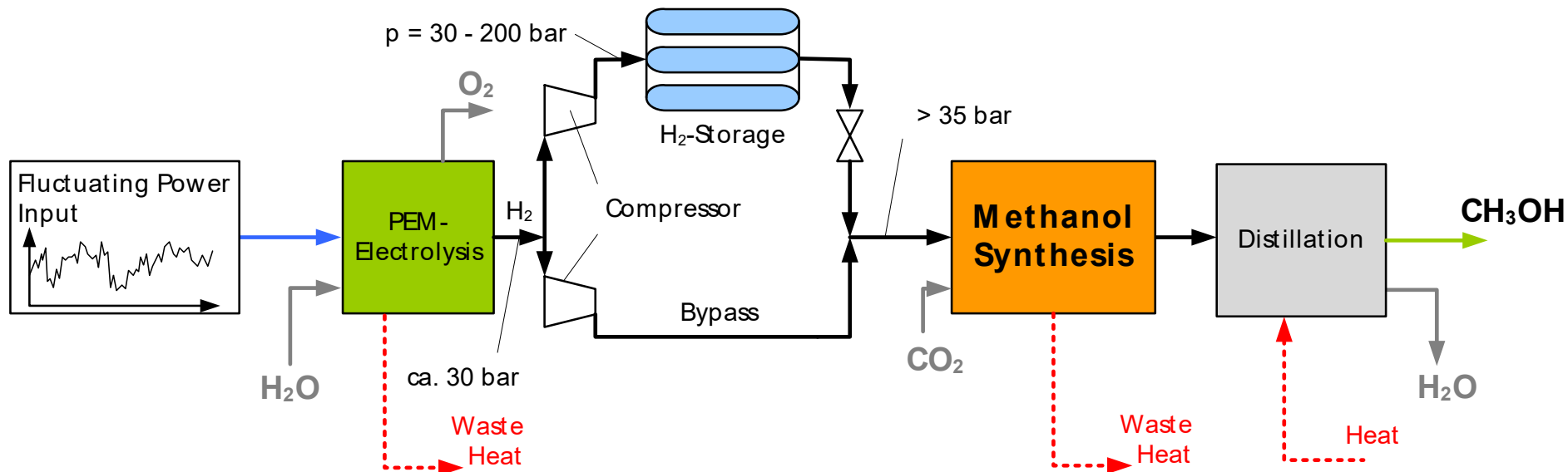


- **keine Rußbildung**



Wir untersuchen die Dynamik der PtL-Prozesskette

- Elektrolyse kann der intermittierenden Stromerzeugung ohne Verzögerung folgen
- Wie dynamisch ist das Verhalten der Methanolsynthese?
- Matlab/Simulink-Modell
 - Minimierung der H₂-Speichergröße

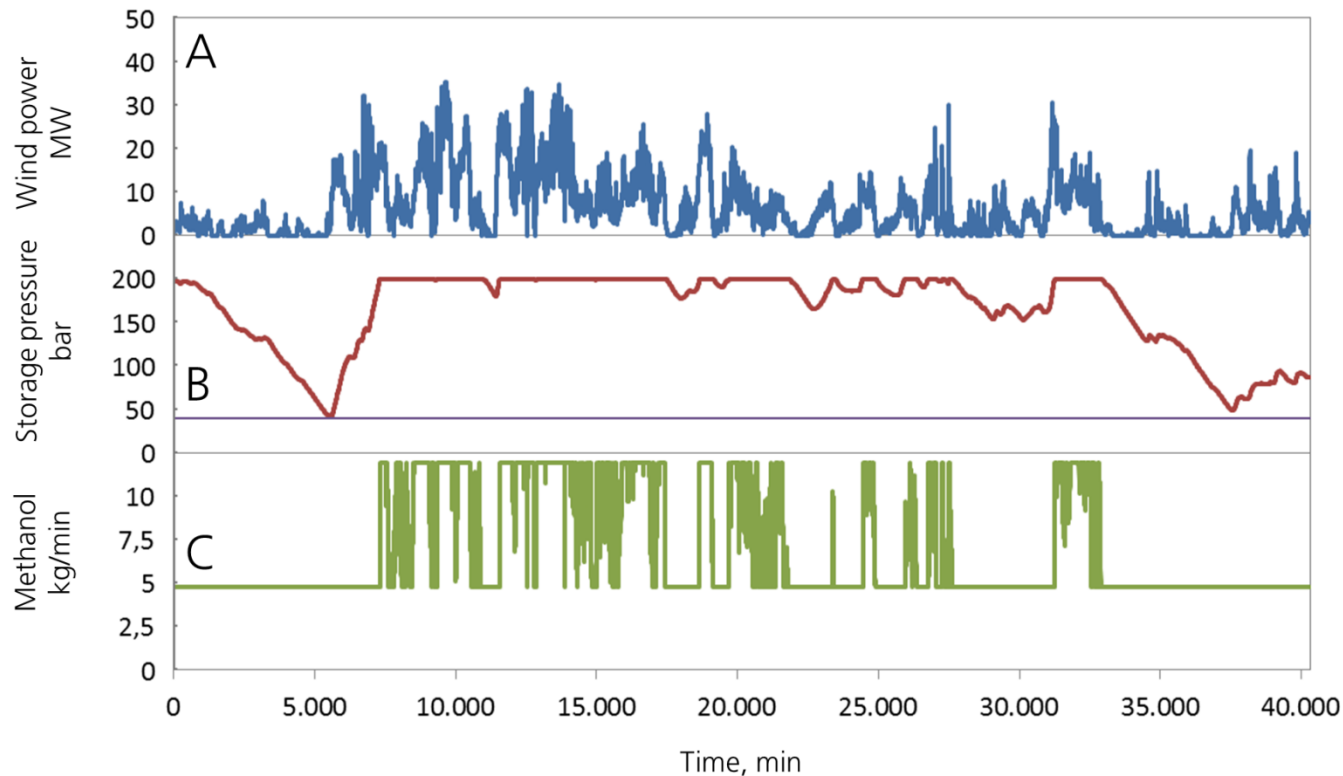


Wir untersuchen die Dynamik der PtL-Prozesskette

■ Matlab/Simulink-Modell

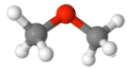
- Systemeffizienz > 50 % (ohne Wärmeintegration)

$$\eta_{chem} = \frac{m_{CH_3OH} \cdot H_{i, CH_3OH}}{E_{Ely} + E_{comp, bypass} + E_{comp, storage} + E_{comp, CO_2}}$$

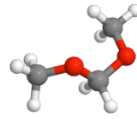


Wir arbeiten an der effizienten Herstellung von Oxymethylenethern (OMEs) ausgehend von Methanol

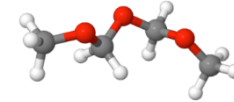
- Ether der allgemeinen Formel $\text{H}_3\text{C}\text{O}-(\text{CH}_2\text{O})_n-\text{CH}_3$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$



DME
 $n = 0$



OME1
 $n = 1$



OME2 . . .
 $n = 2$

- OMEs enthalten keine C-C-Bindungen und sind ungiftig

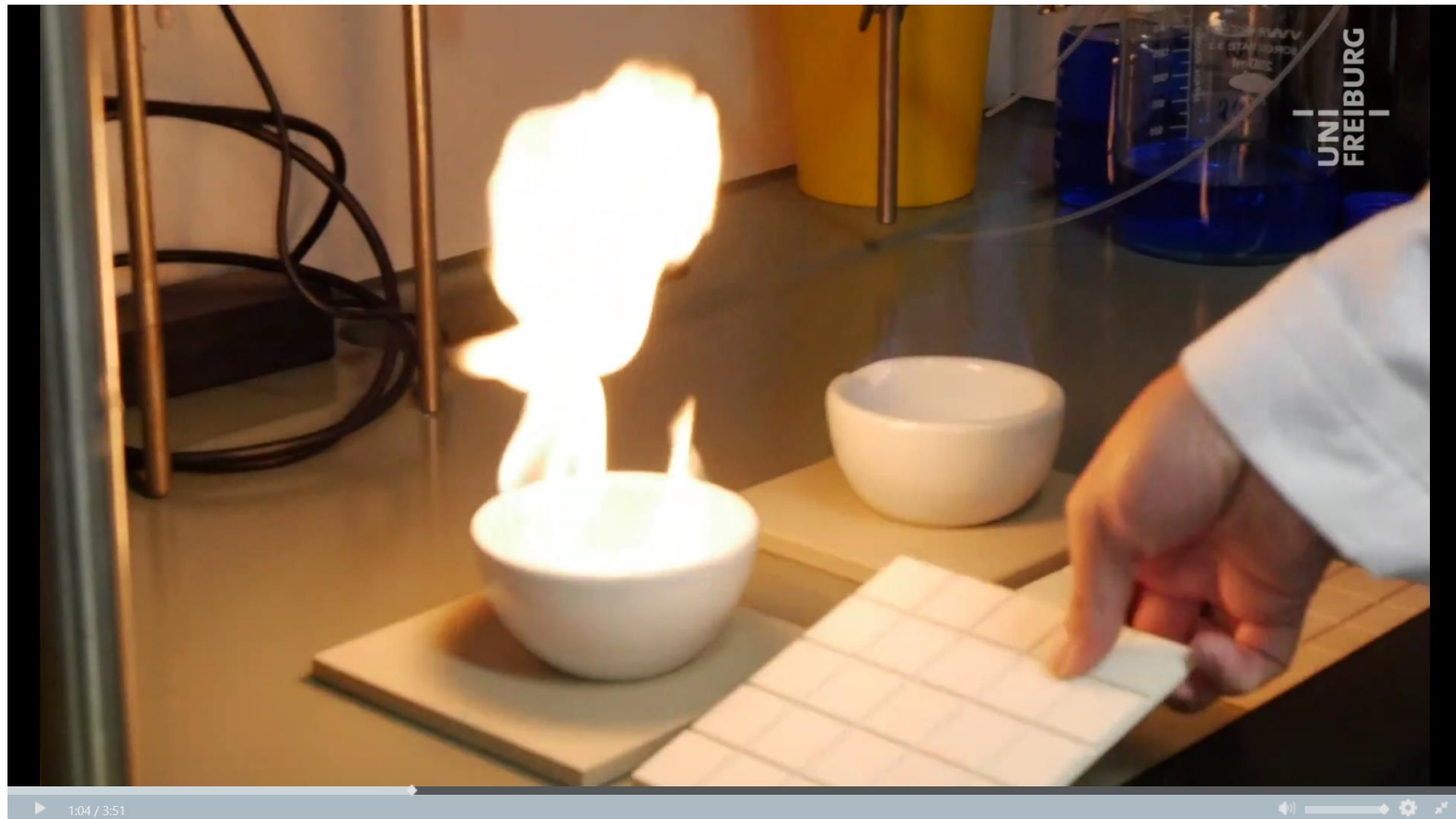


- Derzeitige Synthesewege für OMEs sind sehr energieaufwändig

- Unsere Prozessrouten basieren auf Methanol/DME:

M. Ouda, G. Yarce, R. J. White, M. Hadrich, D. Himmel, A. Schaadt, H. Klein, E. Jacob and I. Krossing, *Reac. Chem. Eng.*, **2017**, 2, 50-59.

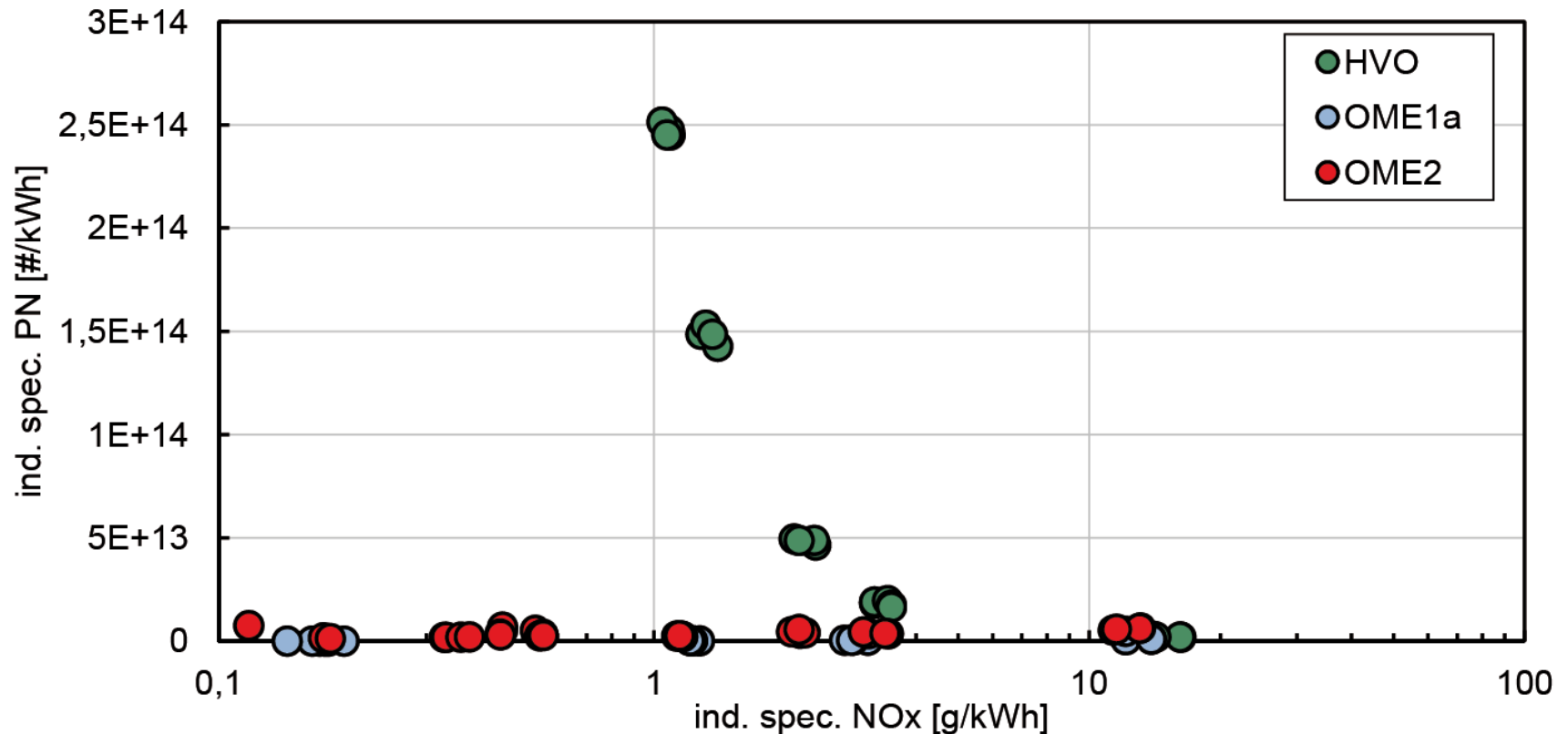
Video in der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit der ALU: Forschen und Entdecken



<http://www.pr.uni-freiburg.de/pm/online-magazin/forschen-und-entdecken/sauber-tanken>

OMEs verfügen über bessere Verbrennungseigenschaften

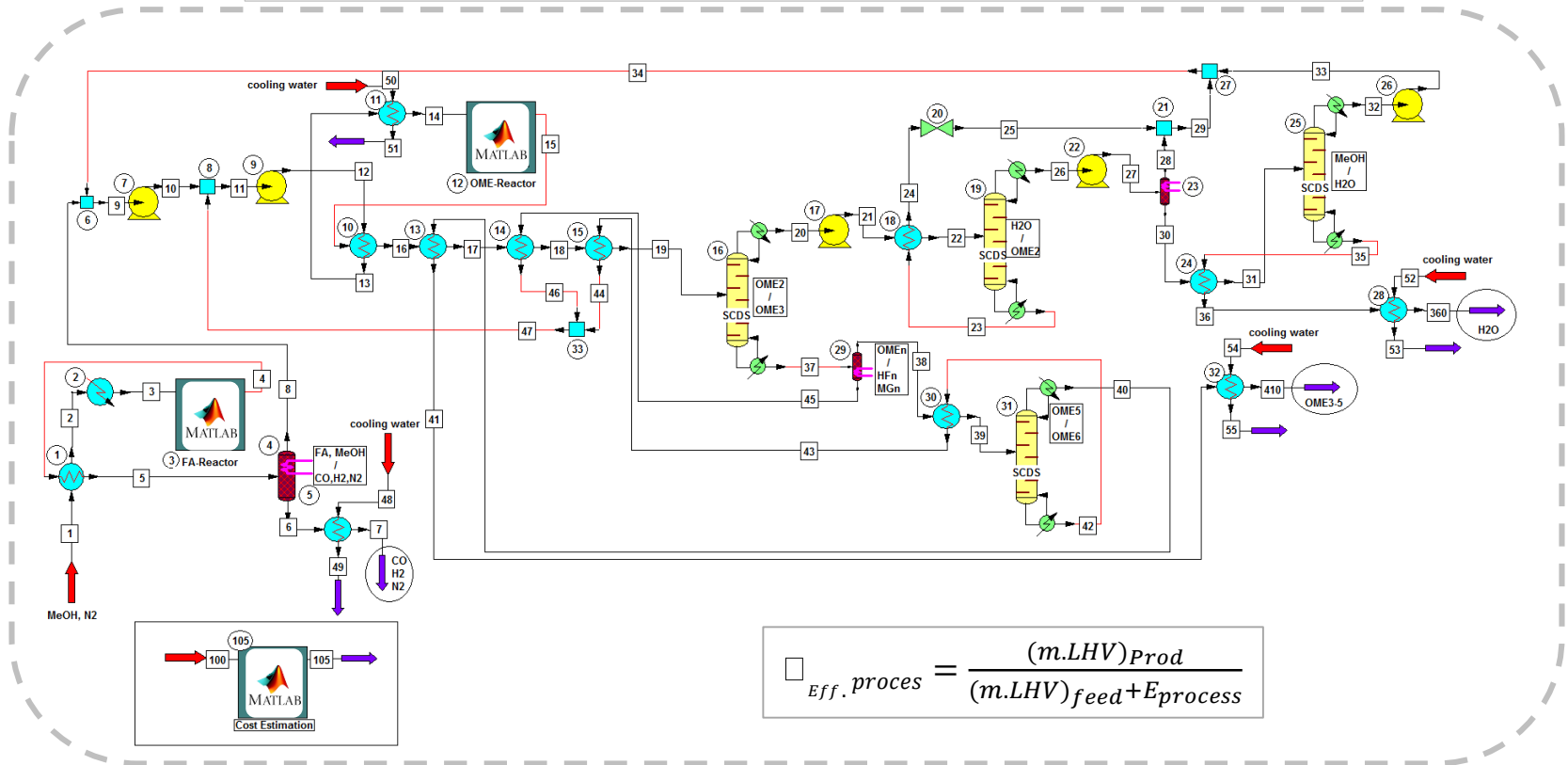
- Bessere Verbrennung in Dieselmotoren: Reduktion NO_x + Ruß
- Kraftstoff auch für die urbane Mobilität



Jacob, et al. (2016) 37. Internat. Wiener Motorensymposium

Prozess-Simulationen

Simulationsplattform – Experimentell validiert



$$\eta_{\text{eff. process}} = \frac{(m.LHV)_{\text{Prod}}}{(m.LHV)_{\text{feed}} + E_{\text{process}}}$$

Wärme- und Stoffbilanz

Key Performance Indicators

$\eta_{\text{eff. process}}$

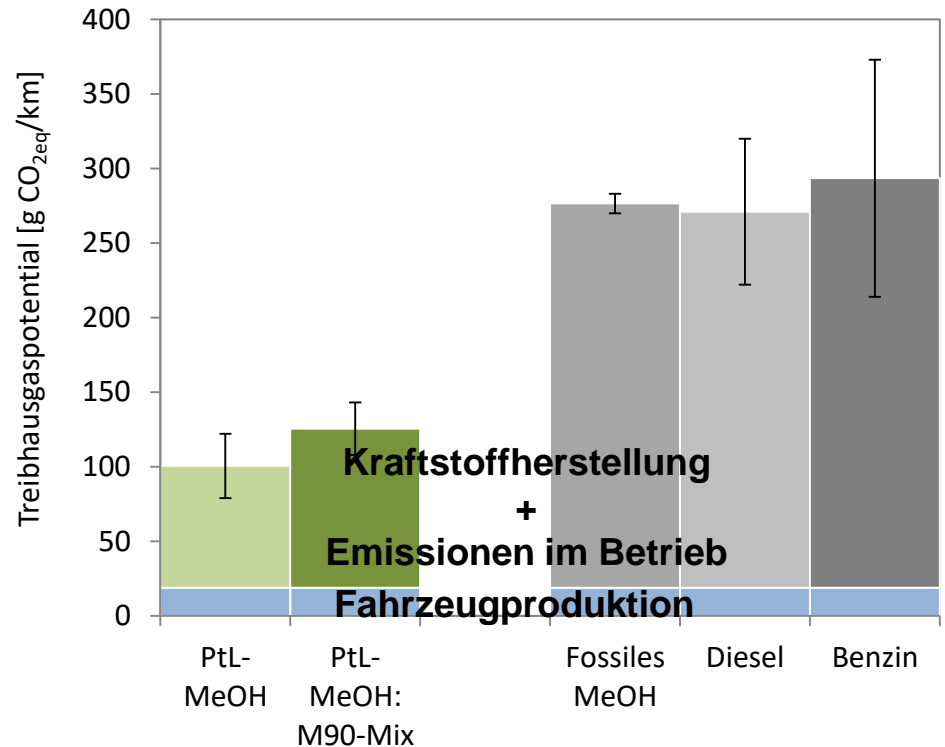
€/ton_{OME}

CO₂-Footprint

Wie nachhaltig ist Power-to-Liquid?

Life-Cycle-Assessment (LCA)

- Signifikante CO₂-Einsparungen über den Lebenszyklus
- Art der Stromquelle hat eine große Bedeutung
- Weitere Kategorien wie Land-, Wasser- und Materialverbrauch, etc. sind ebenfalls wichtig
- Well-to-Wheel- statt Tank-to-Wheel-Betrachtungen

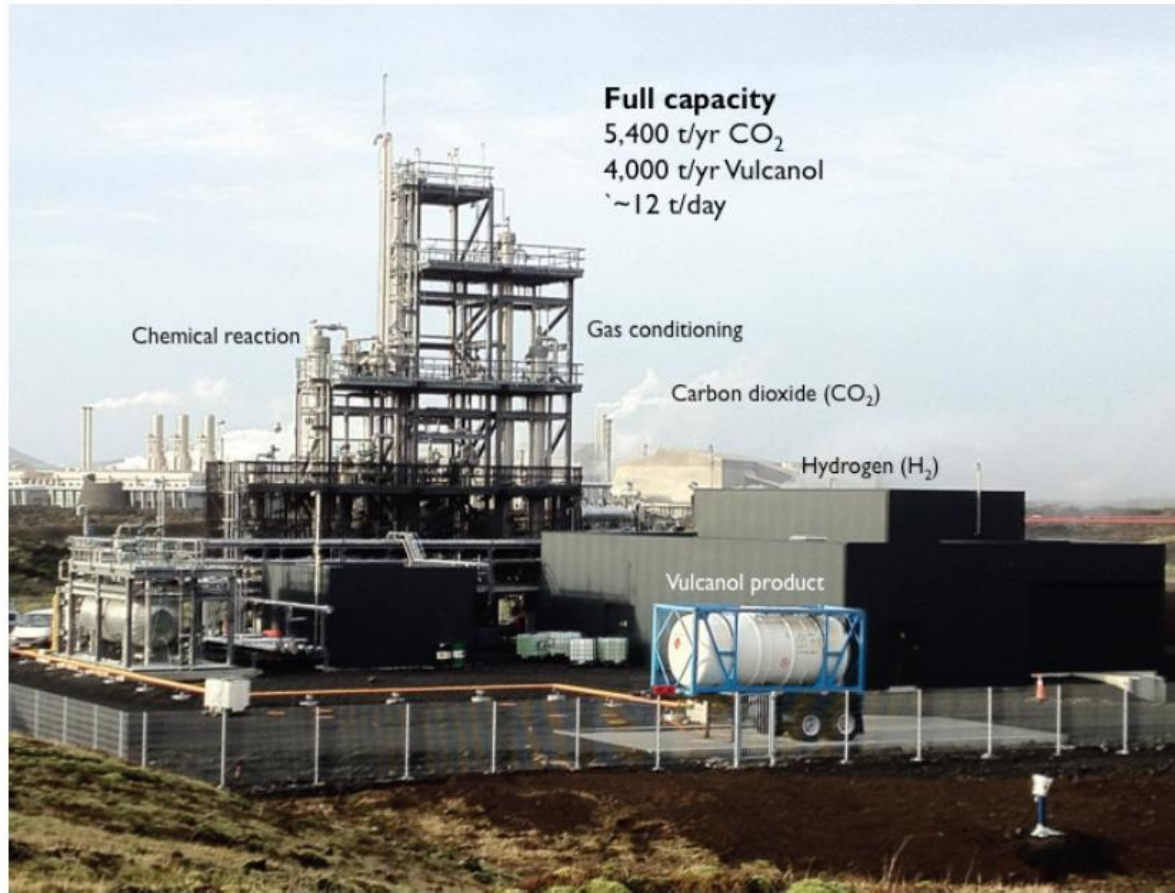


Well-to-Wheel-Analyse der CO₂-Emissionen bezogen auf gefahrenen Kilometer

Welche Anlagen gibt es schon?

Pilotanlage zur Methanolsynthese in Island

Example: Carbon Recycling International in Iceland uses ISCC PLUS for its product Vulcanol



- Ausschließlich stationärer Betrieb

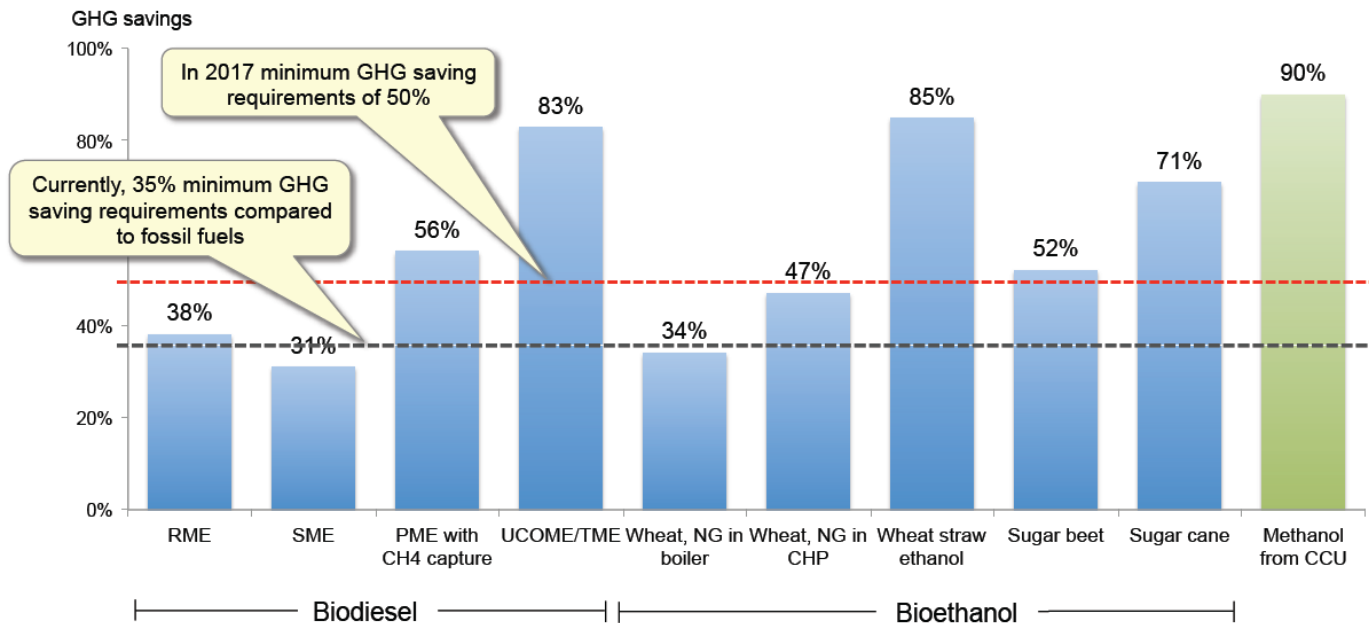
Source: Carbon Recycling International 2013

11

THG-Einsparungen: Zertifizierung Methanol Pilot Plant in Island durch ISCC

- PtL hat Vorteile bzgl. Flächenverbrauch und CO₂-Emissionen gegenüber Biokraftstoffen

Conventional biofuels will have problems reaching rising GHG emission thresholds



GHG emission savings from Directive 2009/28/EC. Individual value for Methanol derived by electrolysis using geothermal energy

21

Norbert Schmitz (2013) 2nd Conference on CO₂ as Feedstock for Chemistry and Polymers

Carbon2Chem®: Hüttengas als große CO₂-Quelle

Hüttengas als Rohstoff für Methanol, etc.

- 2 Mio m³/h Hüttengas nur im Stahlwerk Duisburg
- Carbon2Chem®-Verbundprojekt mit vielen Partnern aus Industrie (z. B. thyssenkrupp) und Wissenschaft (Max-Planck-Gesellschaft, etc.)
- Energieeffiziente Methanolsynthese: Miniplant-Entwicklung, Prozess-Simulation (instationär!), Verfahrensentwicklung, LCA



Kick-off Carbon2Chem® am 27. Juni 2016



Miniplant-Anlage zur Methanolsynthese © ISE 2017

Wo kann PtL könnte eine Rolle spielen?

- Verbrennungsprozesse werden noch lange eine wichtige Rolle spielen
 - Lkws, Autos (Altbestand beachten: 2,76 Mio Fahrzeuge in D sind älter als 20 Jahre)
 - Flugzeuge
 - Schiffsverkehr
 - Stationäre Motoren/ Gasturbinen/Brenner
- Chemie: OME z. B. exzellente Lösungsmittel für CO₂
- Hausenergieversorgung als flüssiger Energiespeicher für die sog. „Dunkelflaute“ (Rückverstromung)



Wir evaluieren die Wirtschaftlichkeit des PtL-Prozesses

■ Derzeit sind Rahmenbedingungen in Deutschland ungünstig

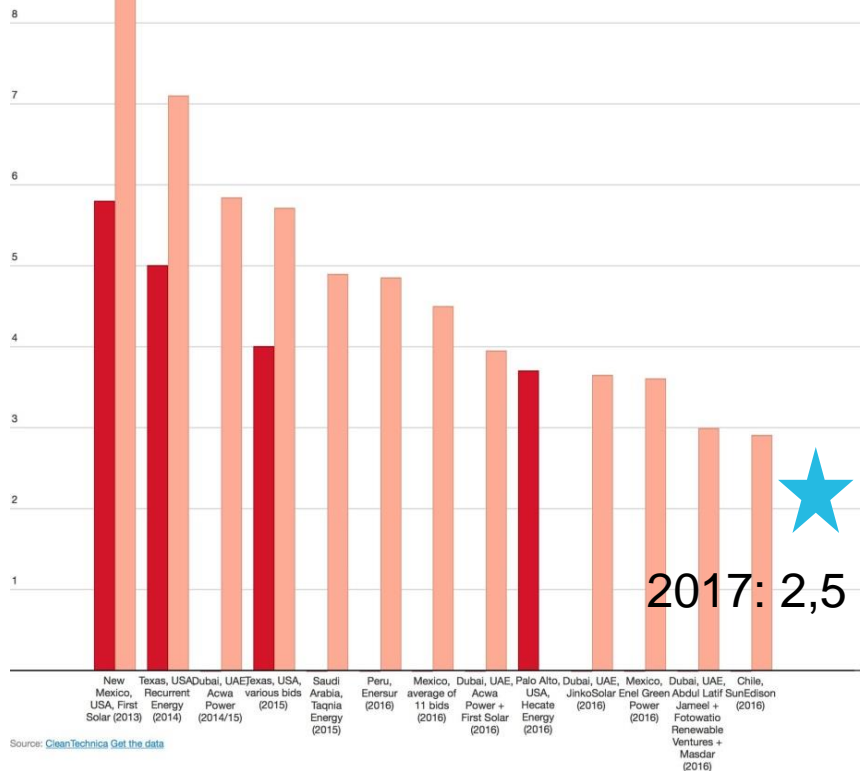
■ Aber:

- Sinkende Kosten von PV- und Windstrom
- Einfachere Methanolreinigung
- Nutzung von O₂
- Wärmeintegration
- CO₂-Zertifikatehandel/Steuer
- Erhöhung Versorgungssicherheit
- Erhöhung Netzstabilität
- Verminderung Netzausbau

Low Solar Bids (2013–2016)

Prices agreed to under 20- and 25-year power purchase agreements. Note that the low bids in Texas are actually lower than the amounts represented in the chart... but exact figures have not been revealed.

■ Subsidized Price (¢ per kWh) ■ Unsubsidized Price (¢ per kWh)

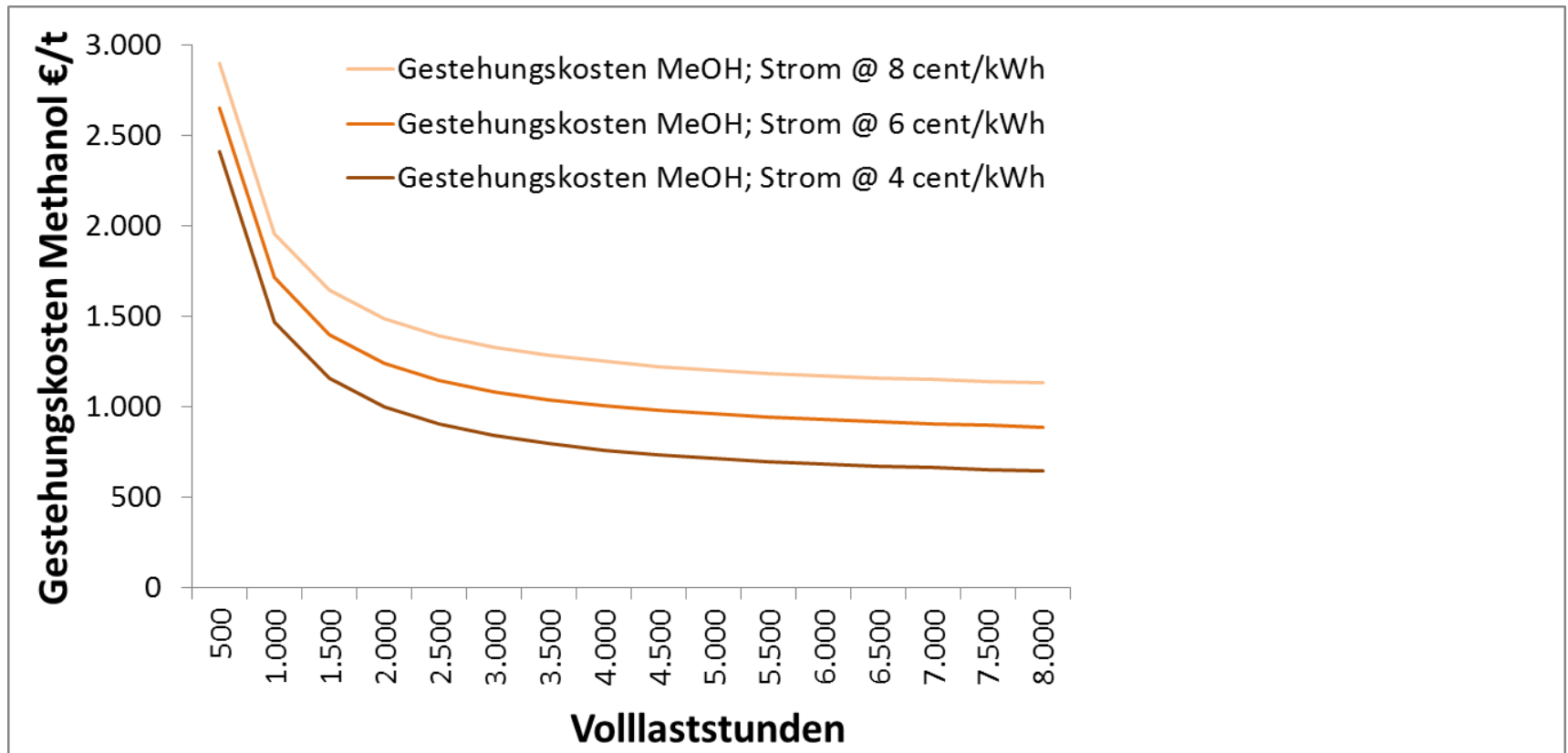


Source: CleanTechnica Get the data

Wir evaluieren die Wirtschaftlichkeit des PtL-Prozesses

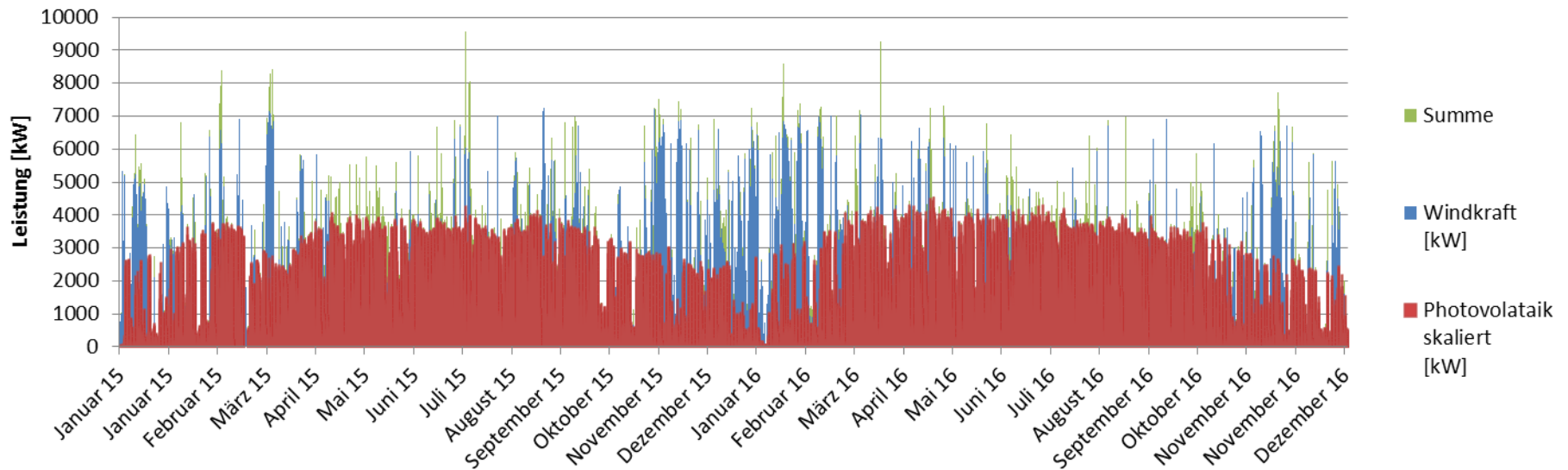
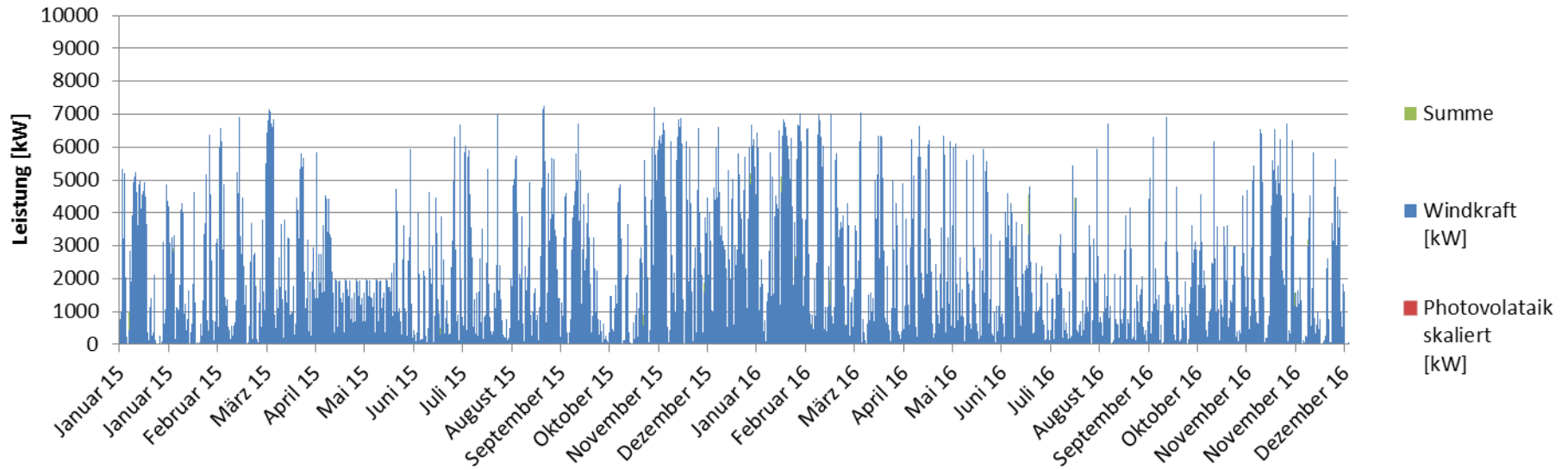
Anzahl der Volllaststunden ist wichtig

- Gewisse Volllaststundenzahl notwendig (min. 3.000 pro Jahr)
- Sog. „Überschuss-Strom“ ist nicht ausreichend



Wir evaluieren die Wirtschaftlichkeit des PtL-Prozesses

Kombination aus PV und Wind erhöht VOLLlaststundenzahl

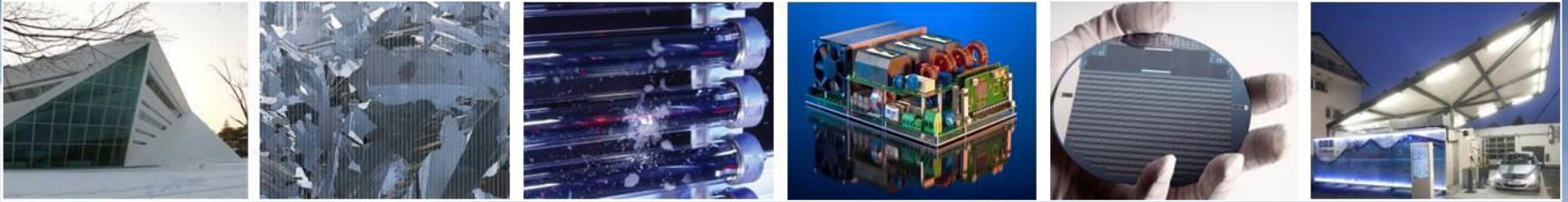


Wir evaluieren die Wirtschaftlichkeit des PtL-Prozesses

PV- und Windenergie ergänzen sich gut

- Kombination aus PV und Wind erhöht VOLLASTSTUNDENZahl
- Herstellkosten von PtL an vielen Orten weltweit günstiger als in D
- PtL-Prozess wäre oftmals grüner als in D (Netzstrom in D hat hohen CO₂-Footprint); Import von flüssigem Energieträger günstig/CO₂-arm
- Großer Vorteil von PtL, dass es geographisch flexibel ist
- PtL benötigt keine neue Infrastruktur (Ladestationen, Tankstellen, etc.)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesystem ISE

achim.schaadt@ise.fraunhofer.de

www.ise.fraunhofer.de

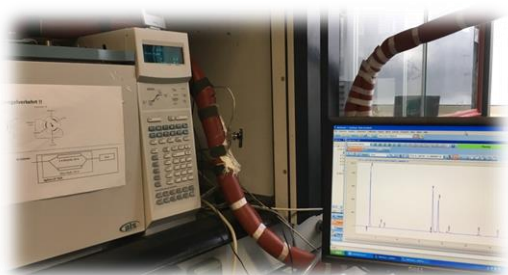


Vielen Dank an all meine Kollegen aus der Abteilung
Thermochemische Prozesse für Ihre tolle
Unterstützung.



Foto Joscha Feuerstein

Lehrstuhl für Molekül- und Koordinationschemie
und Freiburger Materialforschungszentrum FMF

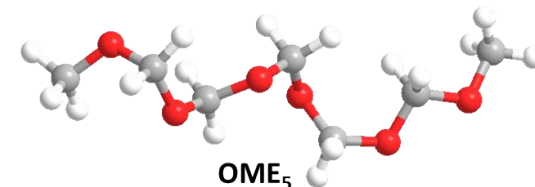
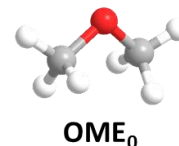
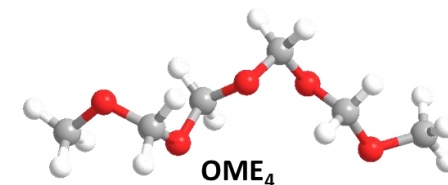
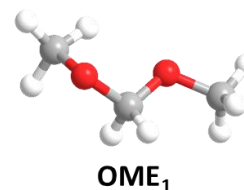
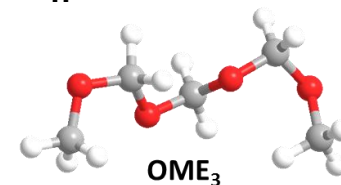
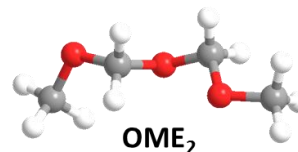


Federal Ministry
of Education
and Research



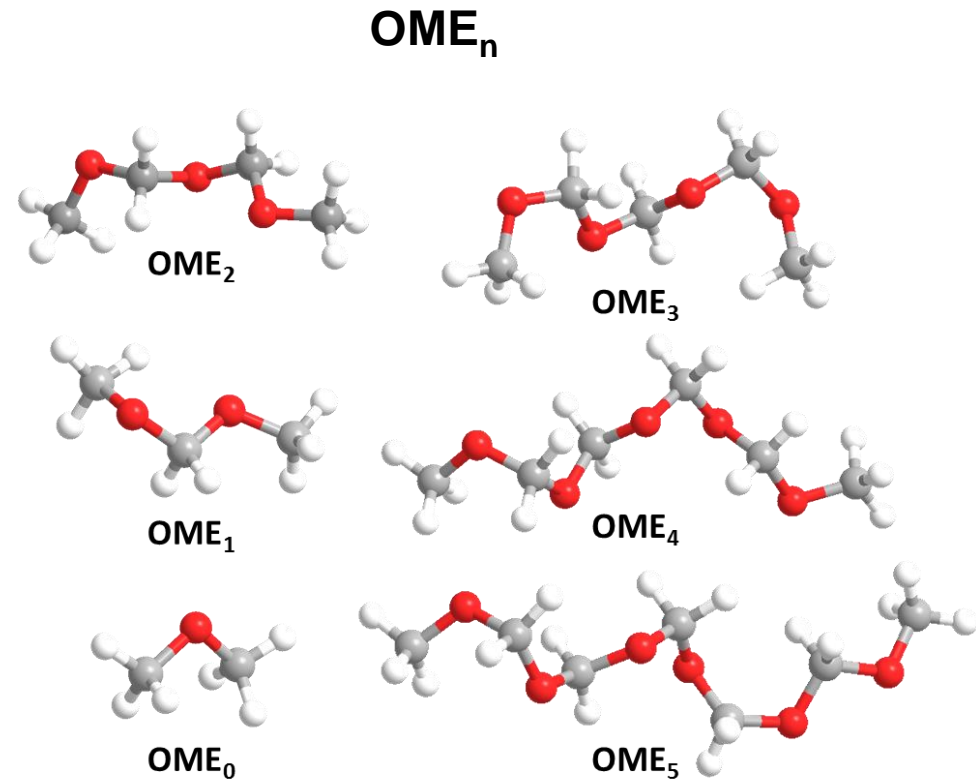
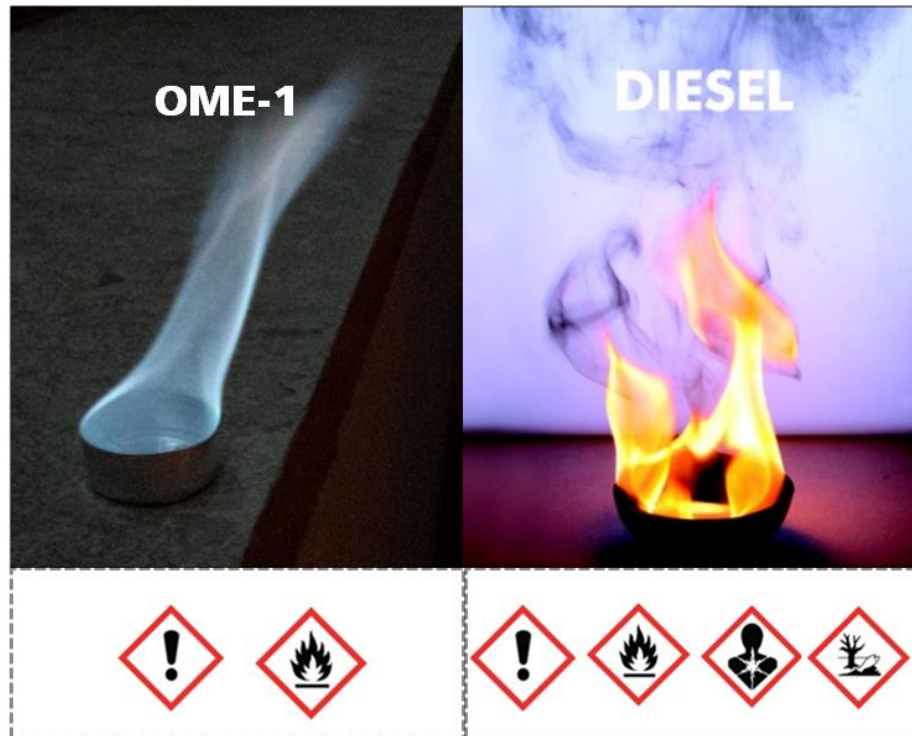
Freiburg, 02.12.2017

OME_n



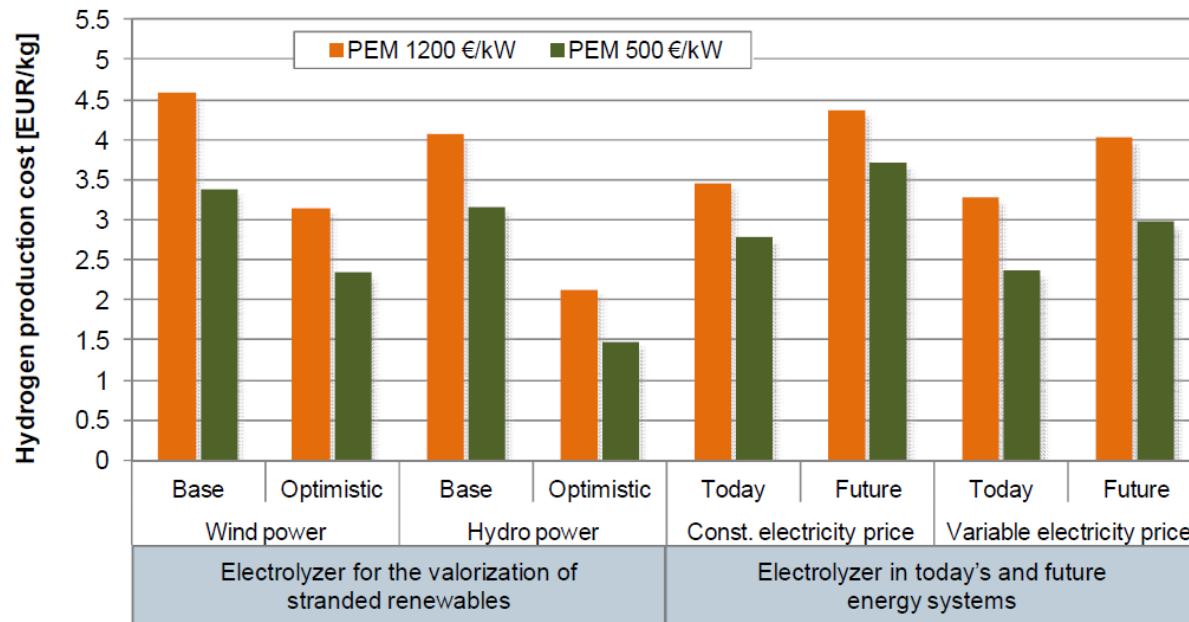
Von Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff auf energieeffizienter Route zu den Oxymethylendimethylethern...!

Wie kommt man effizient von CO₂/H₂ zu den OME_n...?



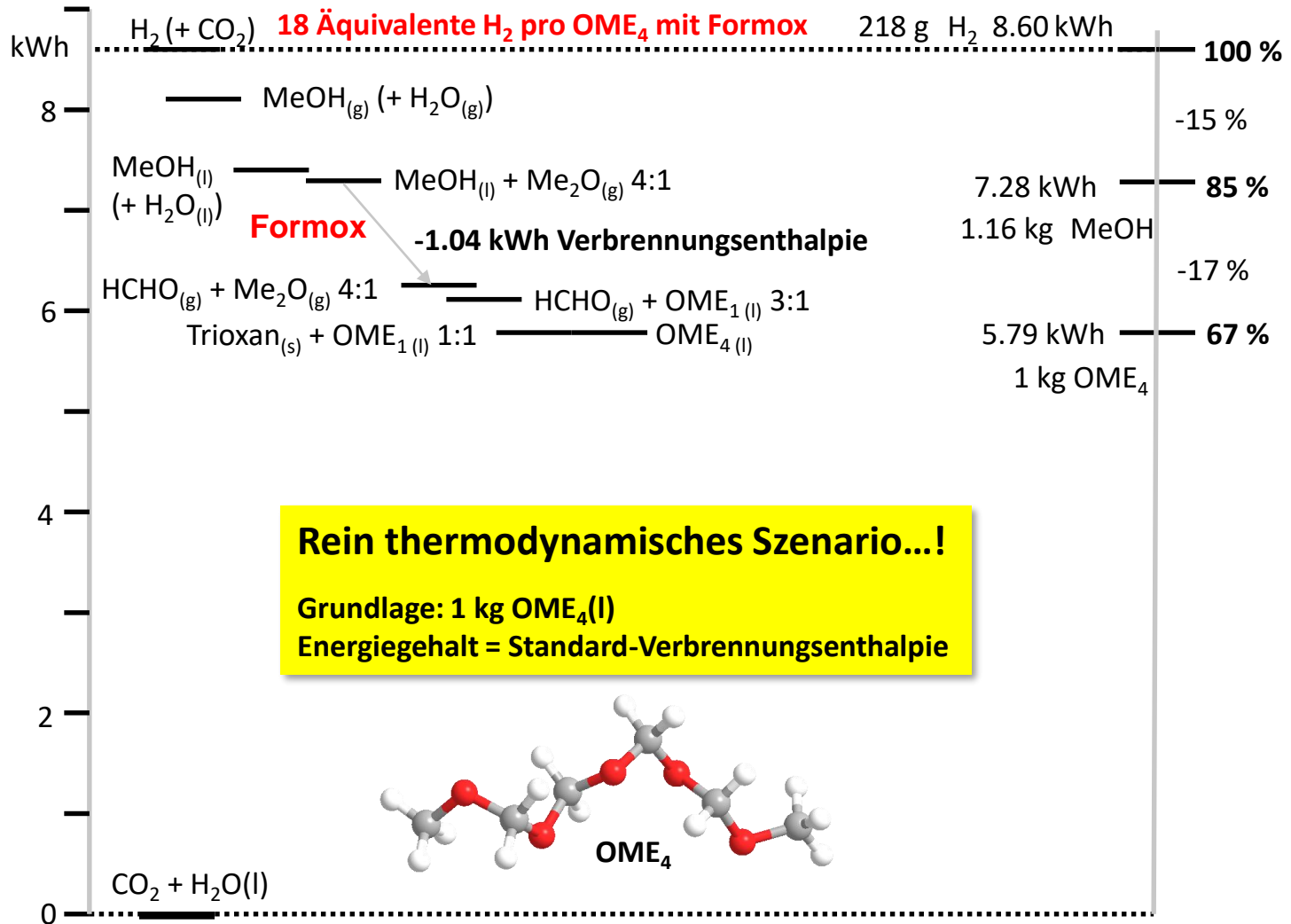
Wirtschaftlichkeit auf einem Bierdeckel...

- Elektrolyse (noch recht teuer...)
- mittelfristige H₂-Kosten: ca. 3 €/kg
- Bedarf H₂ für Methanol: ca. 0,19 kg H₂/kg Methanol
- ca. 0,57 €/kg Methanol nur für H₂-Herstellung
- Weltmarktpreis Methanol ca. 0,35 €/kg ...



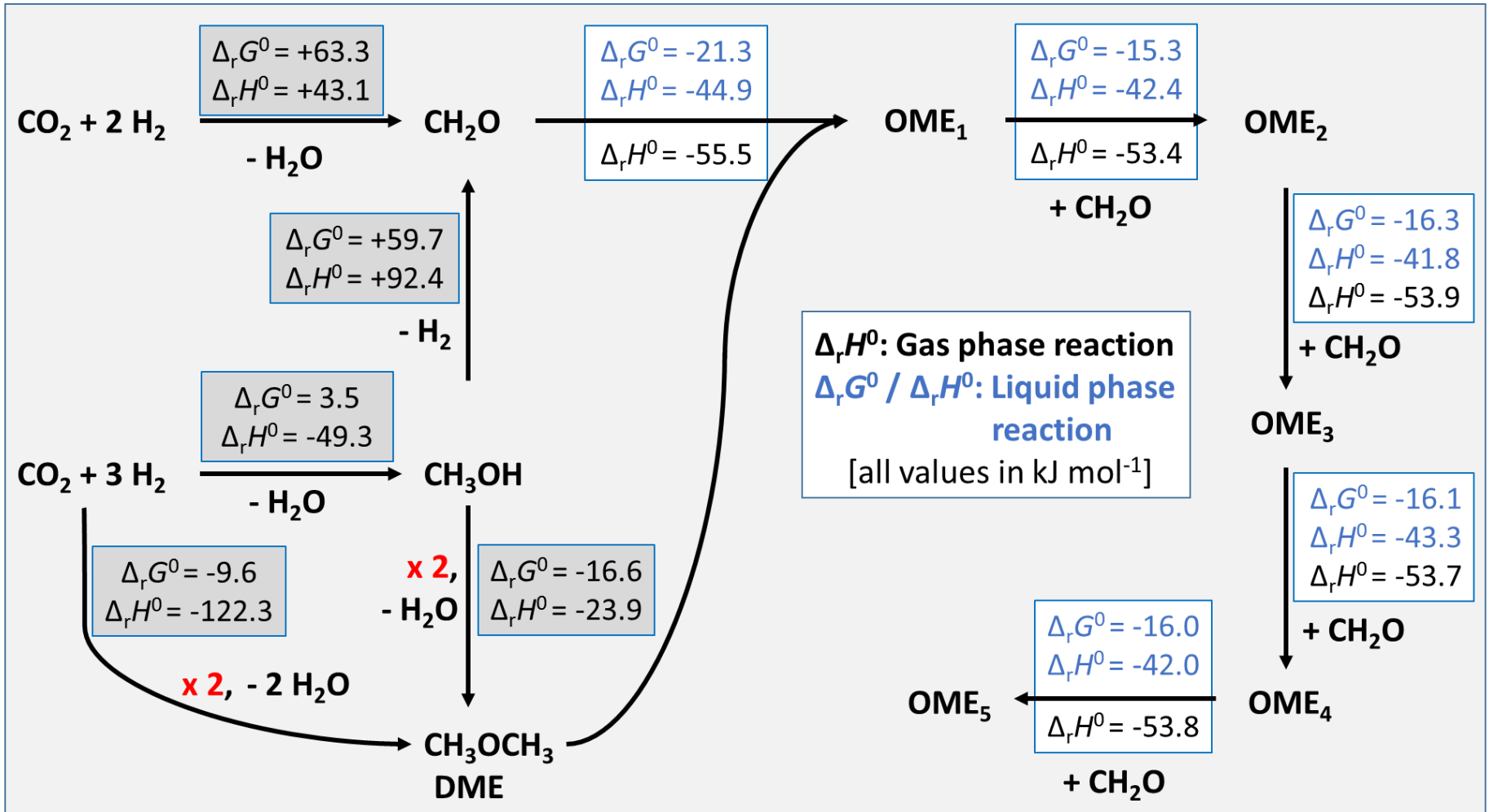
Quelle: Siemens AG Tremel et al. (2014)
GeCatSs Info-Tag, Frankfurt

Thermodynamische Evaluation...



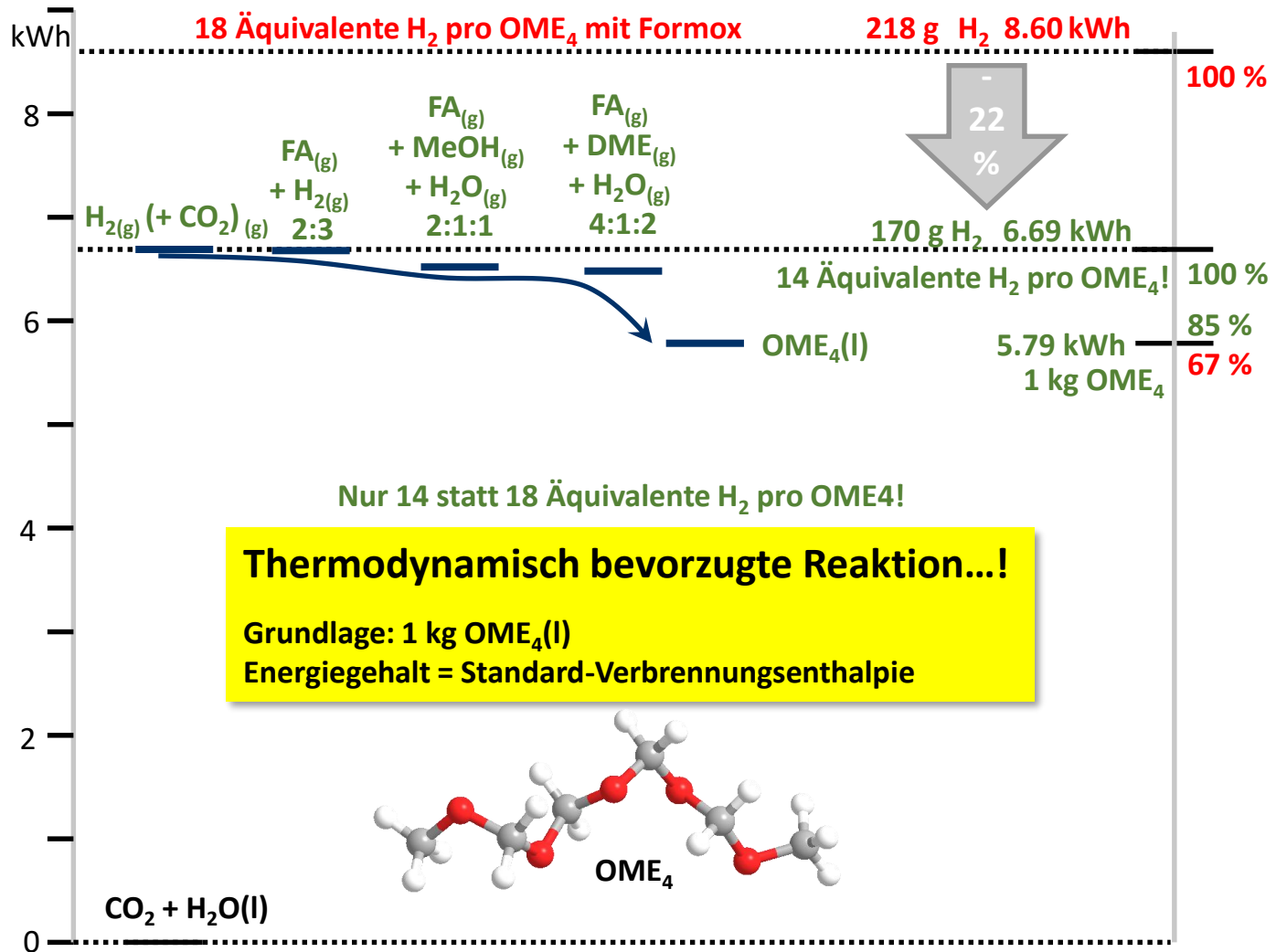
React. Chem. Eng. 2017, 2, 50–59.

Reaktionsnetzwerk...



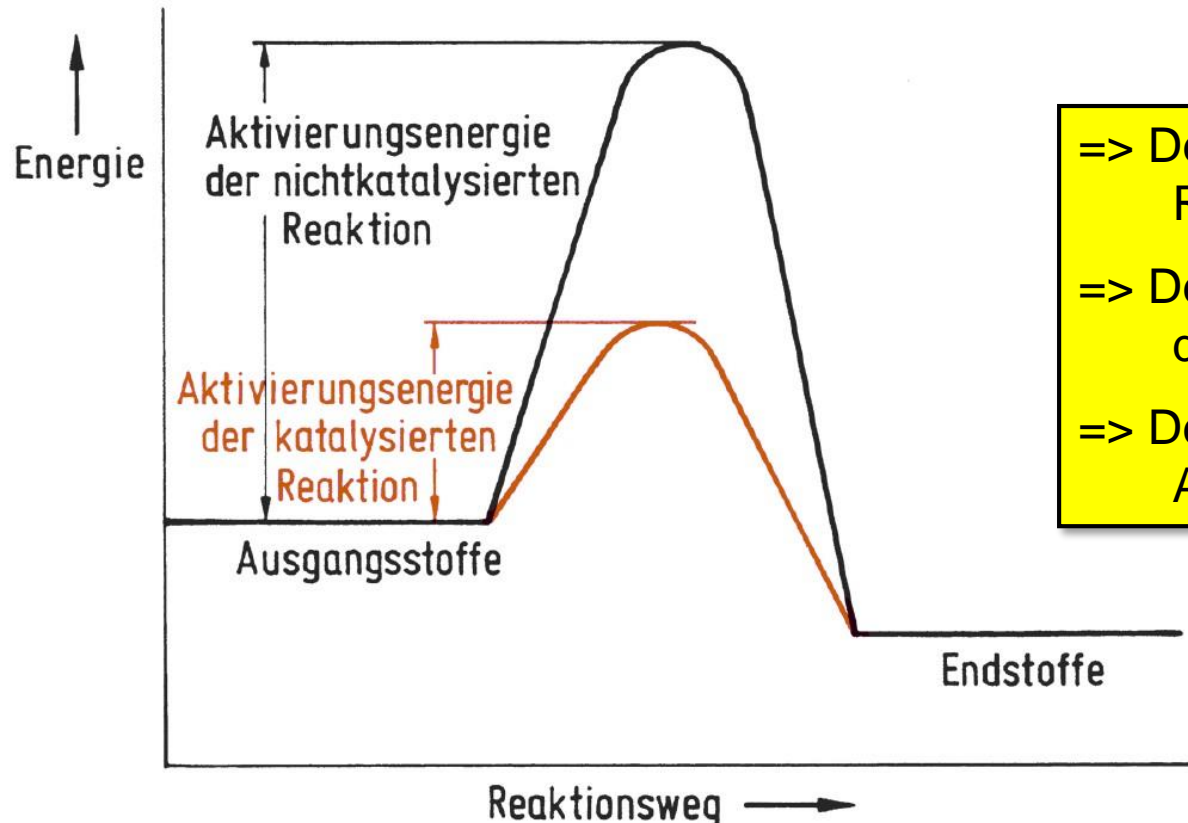
[1] D. Himmel, R. J. White, E. Jacob, I. Crossing, *Sustainable Energy & Fuels* **2017**, 1, 1177-1183.

Unser alternativer Prozess...



React. Chem. Eng. 2017, 2, 50–59.

Katalysatorentwicklung: Was macht der eigentlich...?



- => Der Katalysator wird bei der Reaktion nicht verbraucht.
- => Der Katalysator beeinflusst die GGW-Lage nicht.
- => Der Katalysator senkt die Aktivierungsenergie.

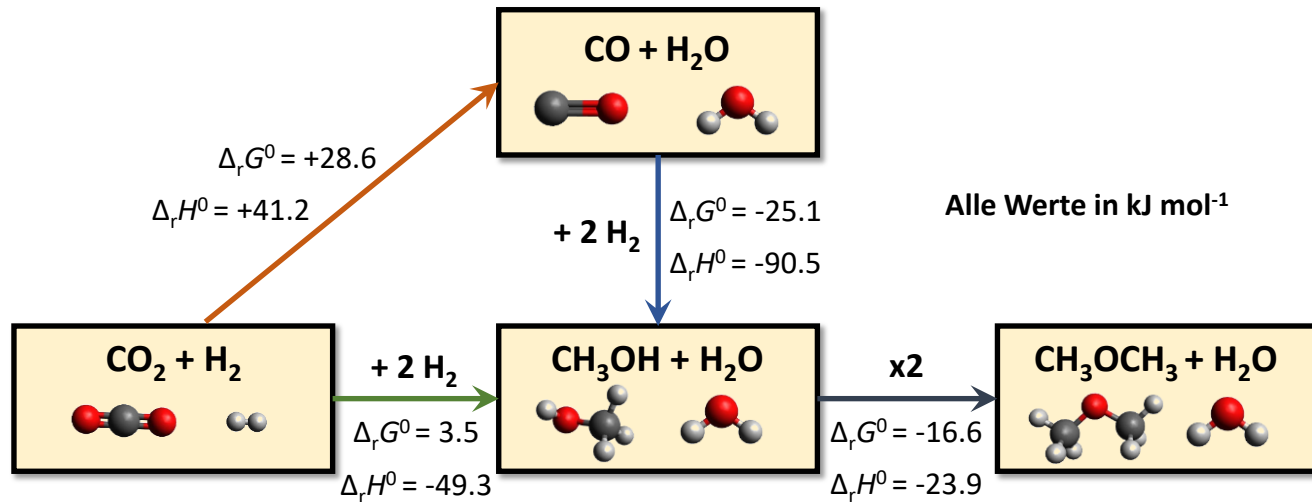
z.B.: Fossile Methanol Synthese: $2 \text{H}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$

Reaktion möglich, aber **kinetisch** gehemmt!

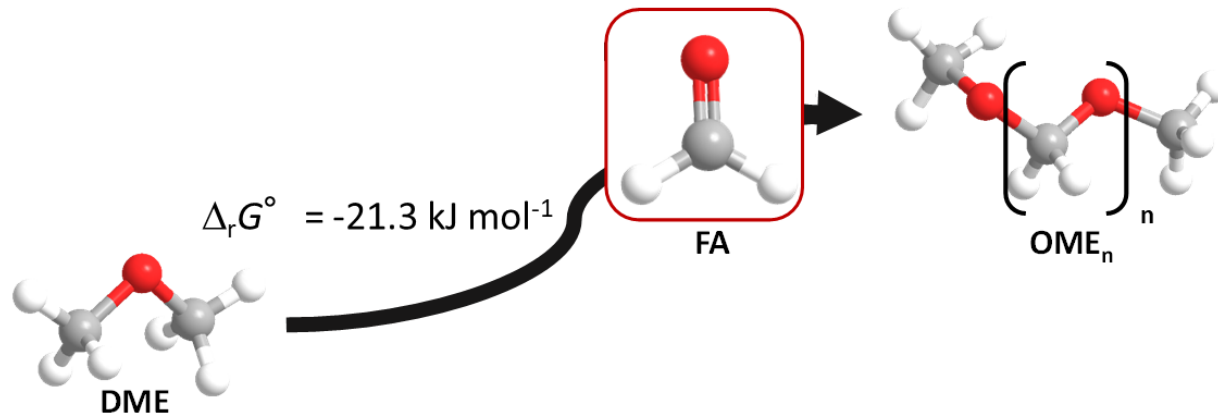
Katalysator senkt E_A ab, so dass Reaktion überhaupt abläuft.

Reaktionsnetzwerk...

Part I

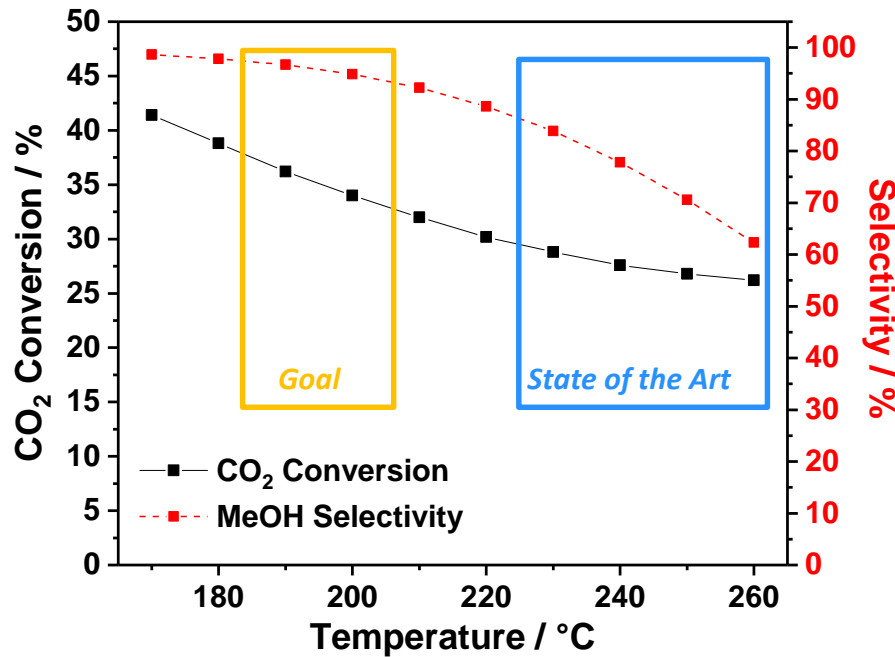
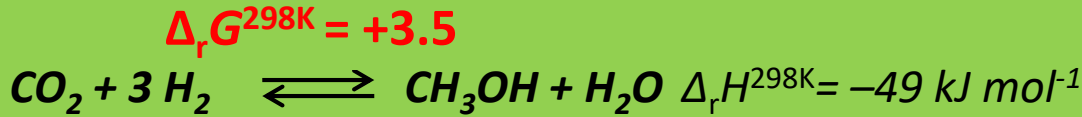


Part II



[1] D. Himmel, R. J. White, E. Jacob, I. Crossing, *Sustainable Energy & Fuels* **2017**, *1*, 1177-1183.

Methanol aus CO₂/H₂: Thermodynamik vs. Kinetik



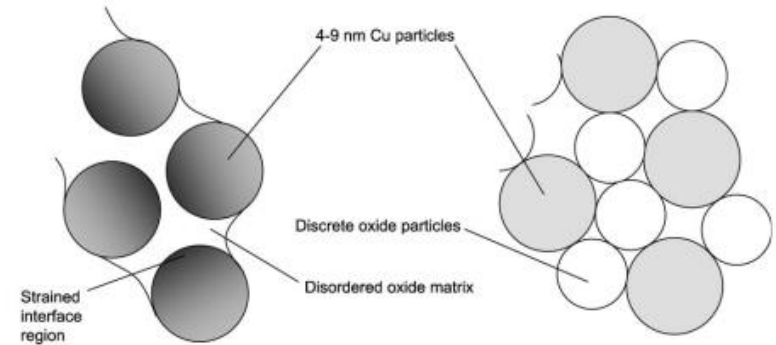
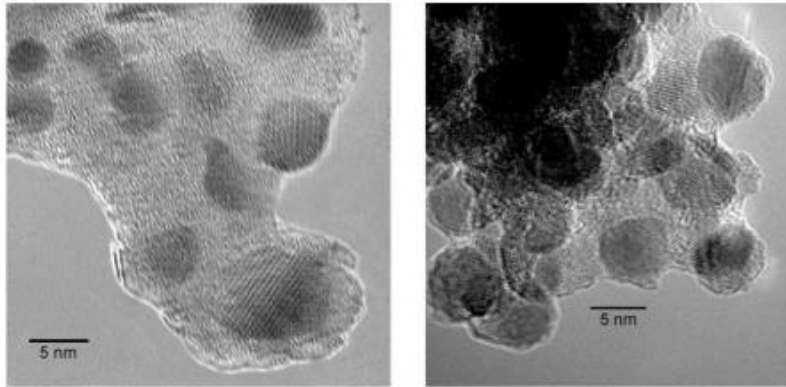
MeOH Synthesis from CO₂ / 3 H₂:

=> One needs an **active catalyst** that operates already at low temperatures with **good rates**.

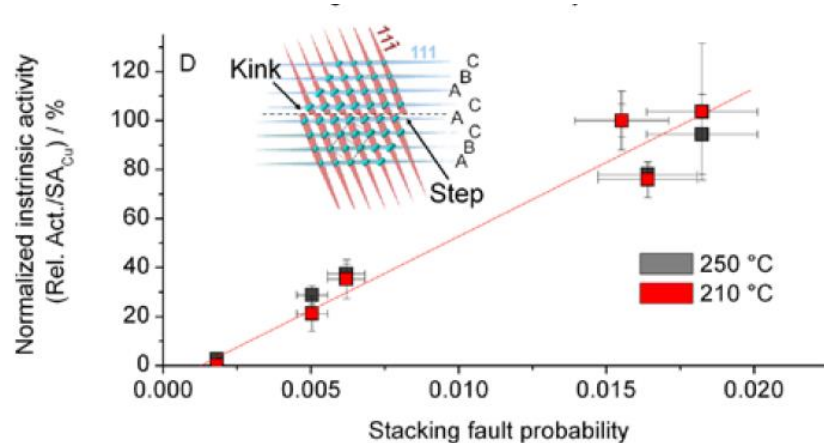
Isothermal thermodynamics at 40 bar.

Mixture of H₂:CO₂ 3:1

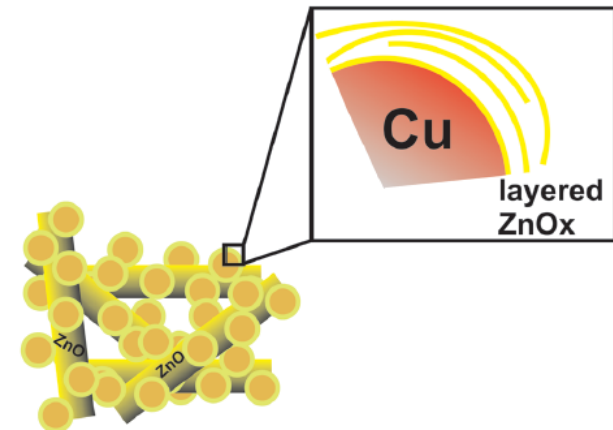
Der Standard: Cu/ZnO/Al₂O₃ für Syngas CO/CO₂/H₂



M. Behrens et al., *ChemCatChem*, 2010.

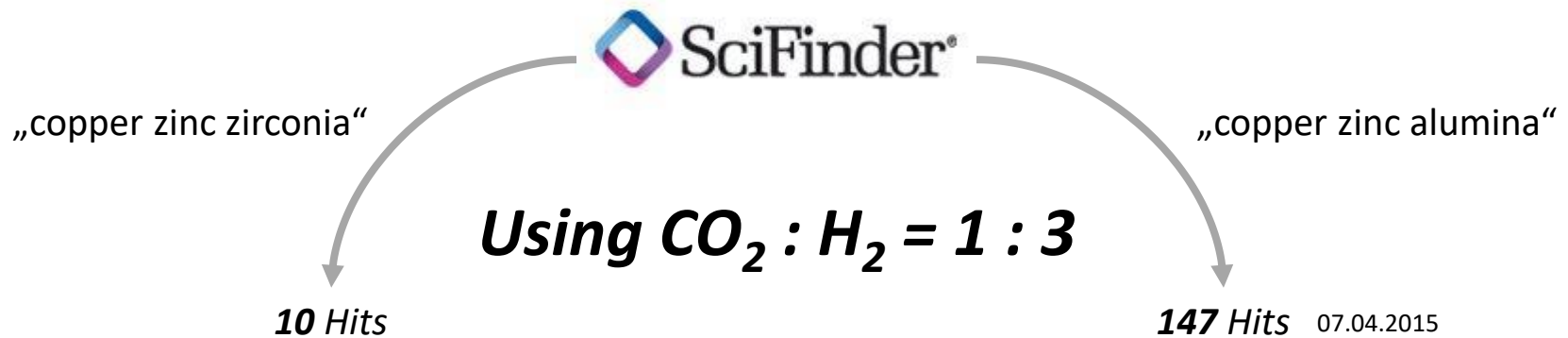


M. Behrens et al., *Science*, 2012.



T. Lunkenbein et al., *Ang. Chem. Int. Ed.* 2015.

Alternativen...?



More resistant to water*

More selective*

Gap: Cu/Zn/Zr !
A lot to learn through comparison...

*Arena et. al., *J. Cat.* **2007**, 249, 185-194.

Unser Benchmark-System: Cu/ZnO/ZrO₂



Ratio: 4.2 : 2 : 1

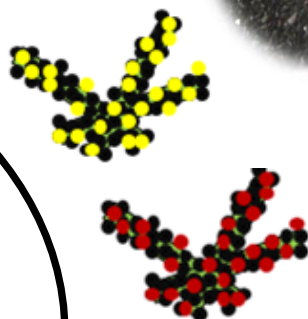


N₂, 300 °C



5% H₂ in N₂,

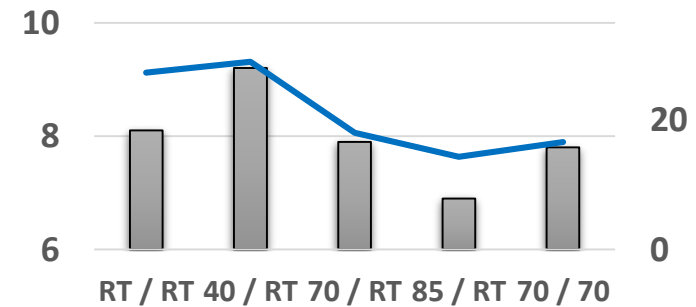
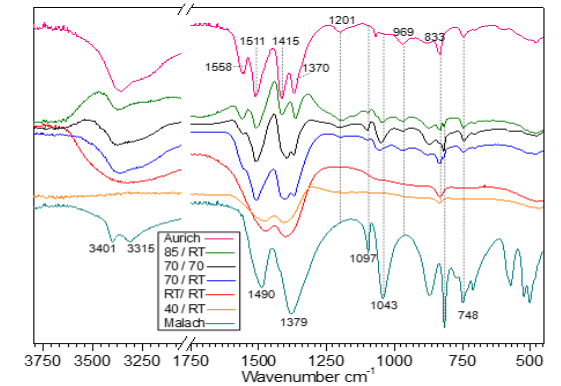
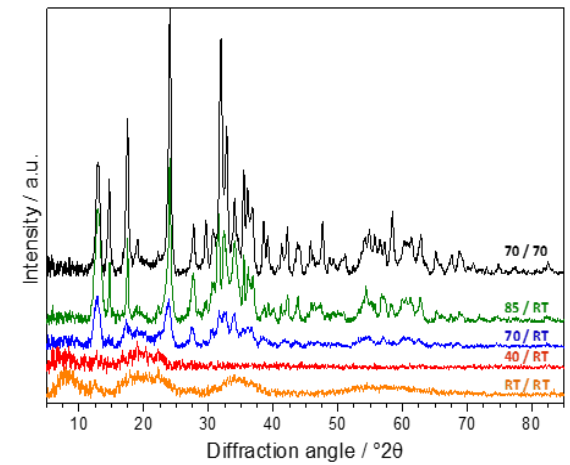
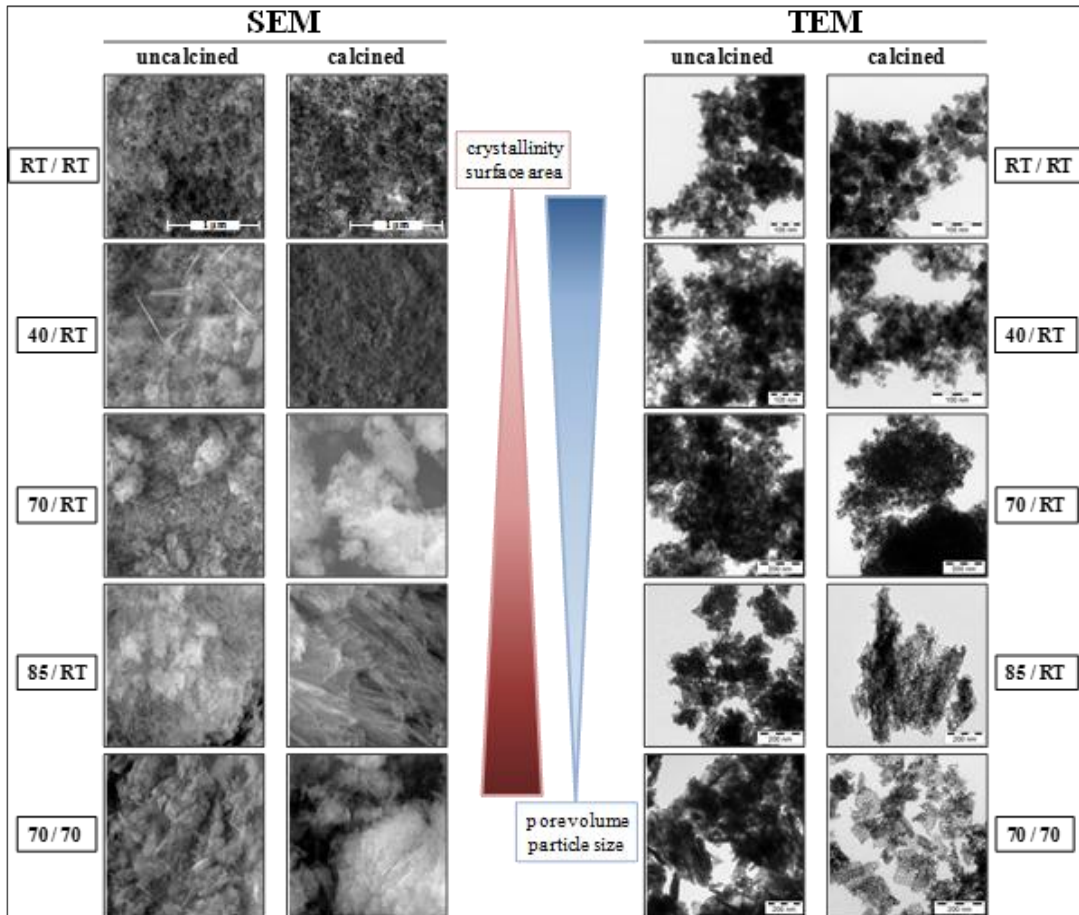
1 °C min⁻¹, 220 – 240 °C



Structure
Development

E. Frei, A. Schaadt, Th. Ludwig, H. Hillebrecht, I. Krossing, *ChemCatChem* 2014, 6, 1721-1730.

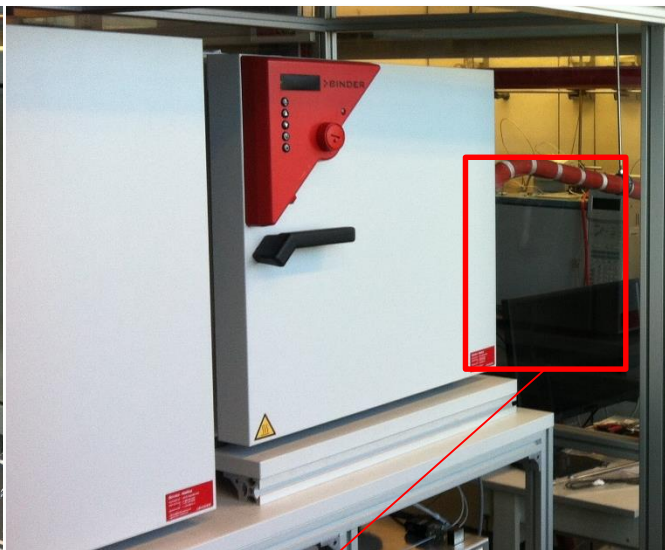
Charakterisierung...



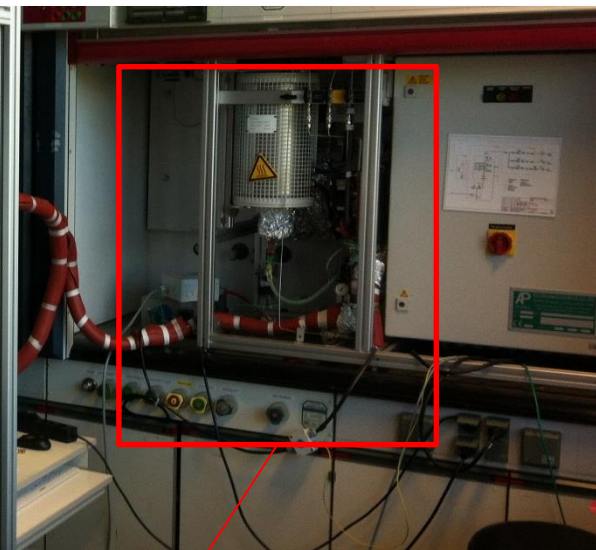
Katalyseteststände @ FMF



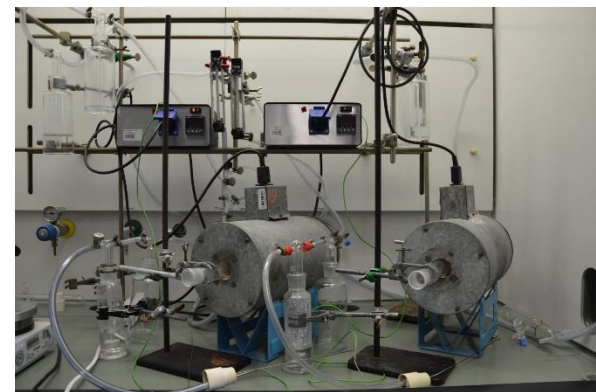
*Quadruple fixed bed reactor
Size: 0.1 - 0.25 mL Catalyst Volume*



Online gas chromatography



*Single fixed bed reactor
Size: 0.5 - 4 mL Catalyst Volume*



Scale Up (Really - no fake)



Stepwise from 500 mL to 50 L !



0.5 L reactor

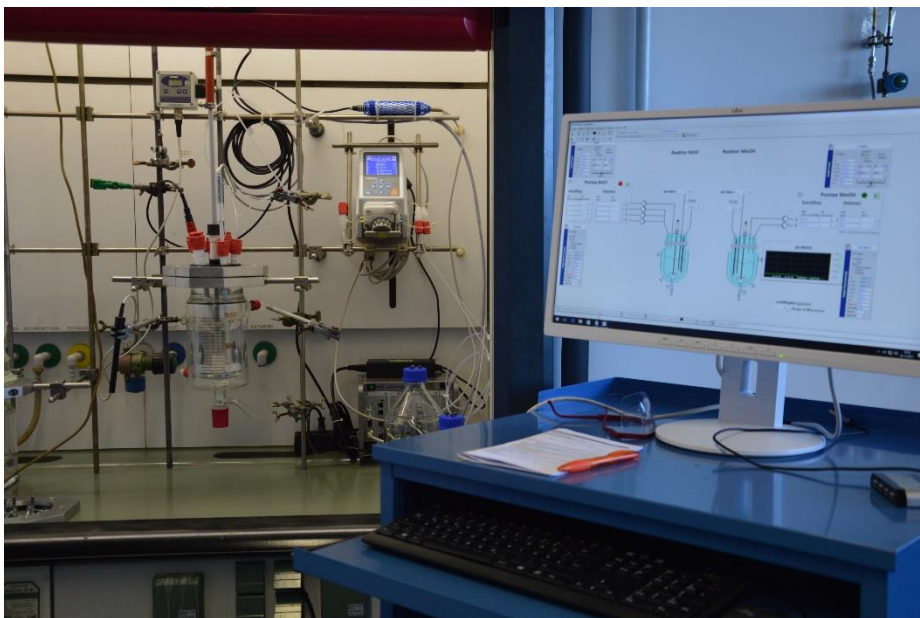


10 L reactor



50 L reactor

Computergesteuerte Synthesestation...



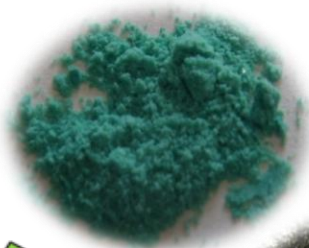
Synthesestation



Methanol aus CO_2 / 3H_2 : Das (F-)Cu/ZnO/ZrO₂ – System



Ratio: 4.2 : 2 : 1



N_2 , 300 °C

$\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{ZrO}_2$



5% H_2 in N_2 ,

1 °C min⁻¹, 220 – 240 °C

$\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{ZrO}_2$



Structure

Development

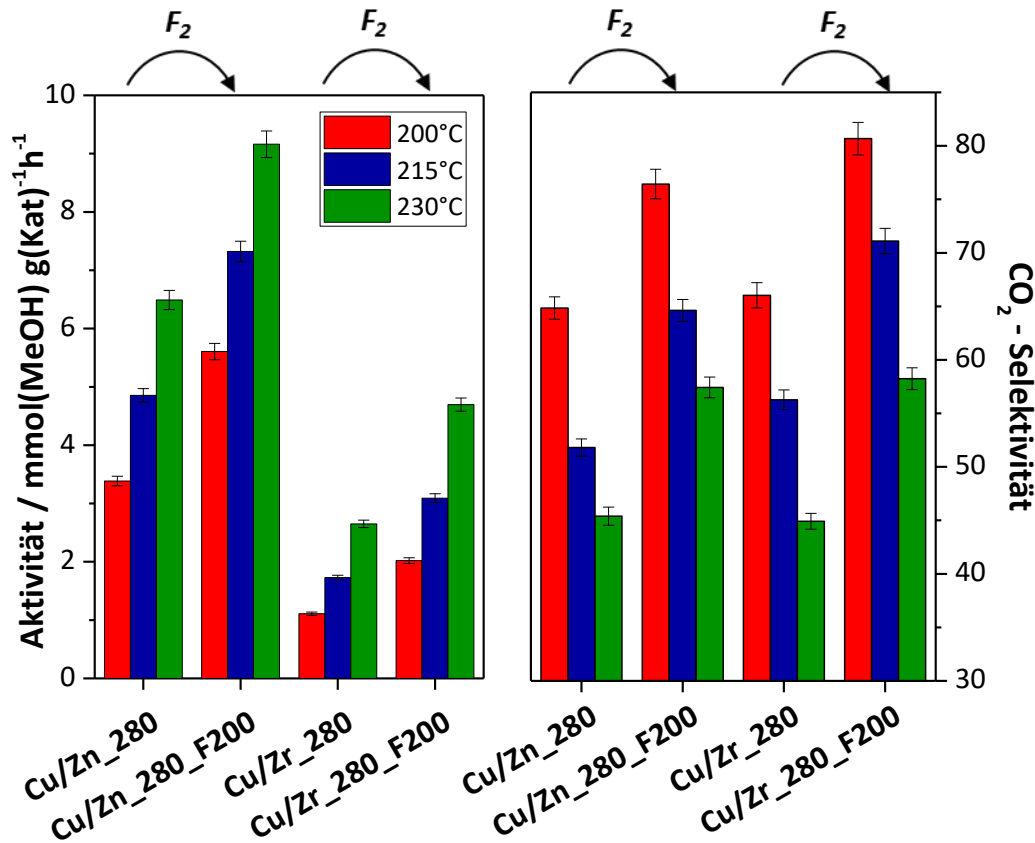
Not investigated so far: exchange of anion network

E. Frei, A. Schaadt, Th. Ludwig, H. Hillebrecht, I. Krossing, *ChemCatChem* **2014**, 6, 1721-1730.

E. Frei, V. Dybbert, M. Hill, A. Schaadt, T. Ludwig, H. Hillebrecht, I. Krossing, J. Eicher: *Enhancing the Catalyst Performance for Methanol Synthesis from H_2 and CO_2 by Incorporation of Fluorine*. EP 14191287.4-1352, **2014**. WO 2016066823 A1, **2016**.

Studies on Binary Systems...

Catalysts fluoridated with $\sim 0.5 \text{ mmol g}^{-1}$

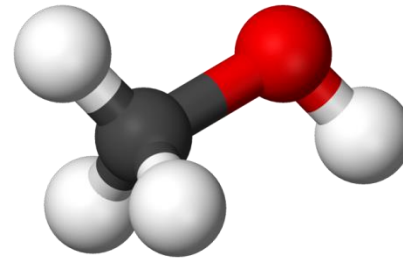


=> increase of activity/
selectivity by fluoridation

- possible reasons:**
- more defects
 - better water desorbtion
 - better reactants binding

GHSV: 11 000 Nml g⁻¹ h⁻¹ CO₂:H₂ = 1:3 40 bar

Mechanismus der Methanol-Bildung

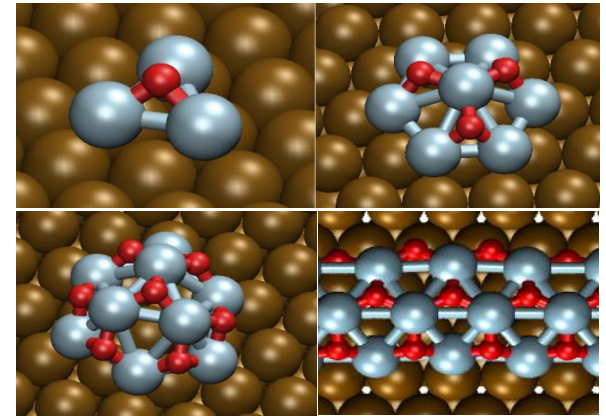


Experimental and Quantum chemical Investigations...

Modeling of the catalyst

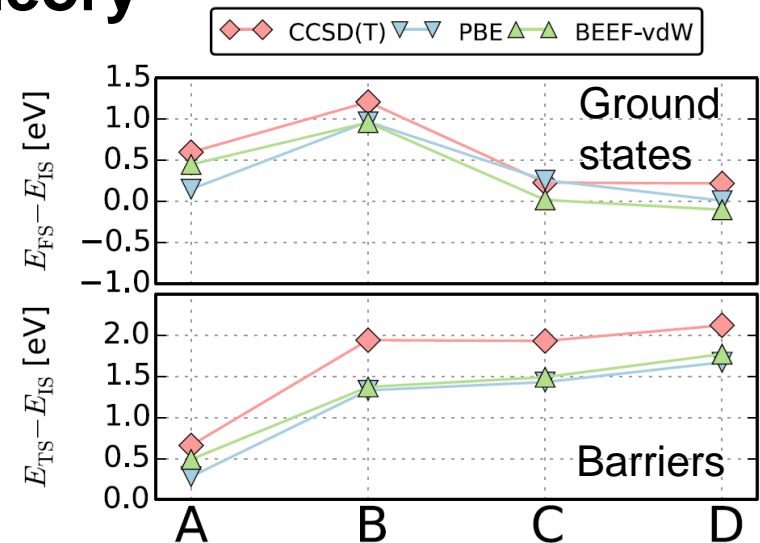
- Active sites: Oxide on metal, Zn-Cu interface
- Global optimisation of ZnO-clusters on Cu
 - $\text{Zn}_3\text{O}/\text{Cu}(111)$ is minimal thermodynamically stable model under typical reaction conditions

Different ZnO/Cu models

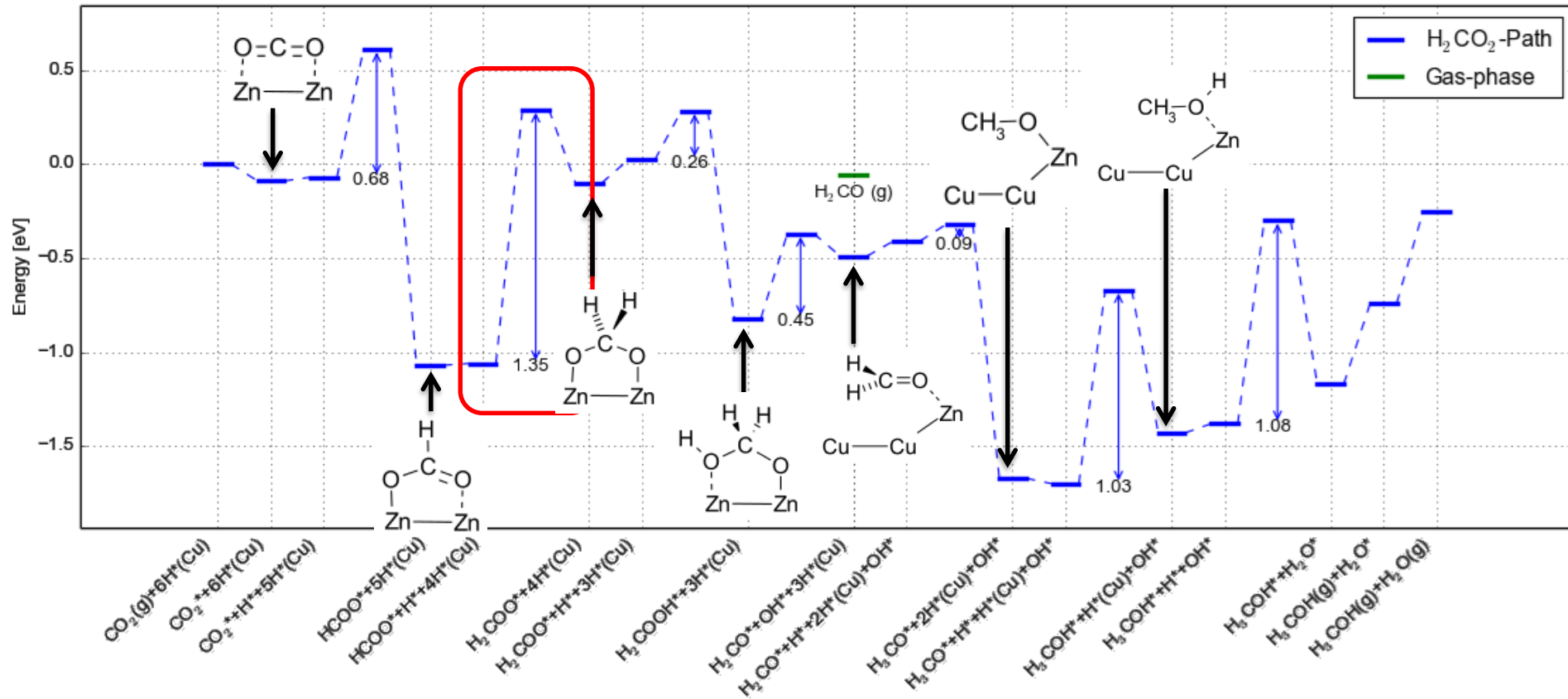


Accuracy of density functional theory

- Check of quality of DFT by comparison with high level quantum chemistry results on $\text{Cu}_4\text{Zn}_3\text{O}$ -cluster model
 - DFT describes energetics qualitatively correct

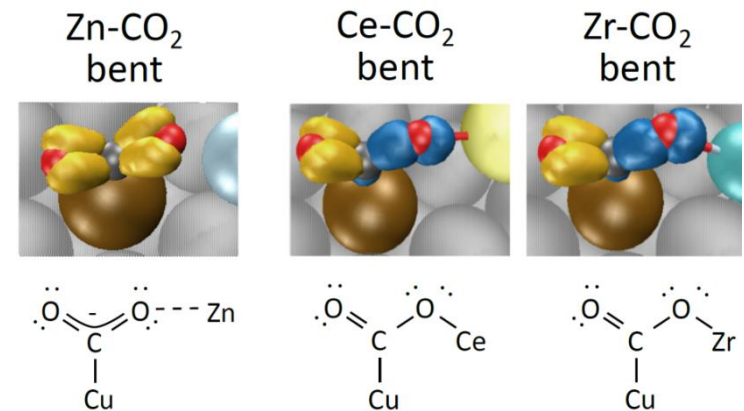
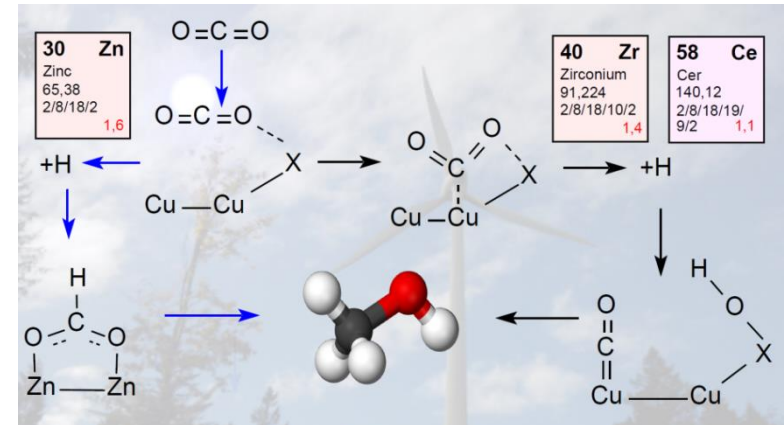


Favorisierter Reaktionspfad mit Periodischen DFT-Rechnungen



Reaction network

- Path via Formate is most favorable on Zn₃O/Cu(111)
- Results insensitive towards:
 - Temperature & pressure changes
 - Enlargement & variation of model system
- general mechanism for Cu-Zn catalysts
- Initial activation of CO₂ depends on oxide
 - Variation of the oxide changes reaction mechanism



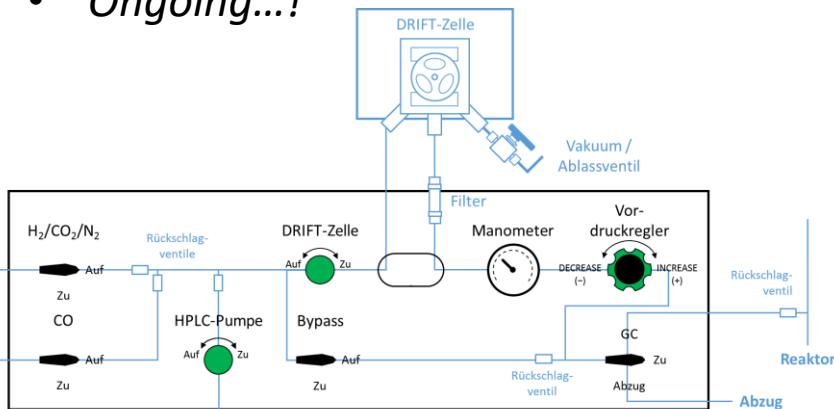
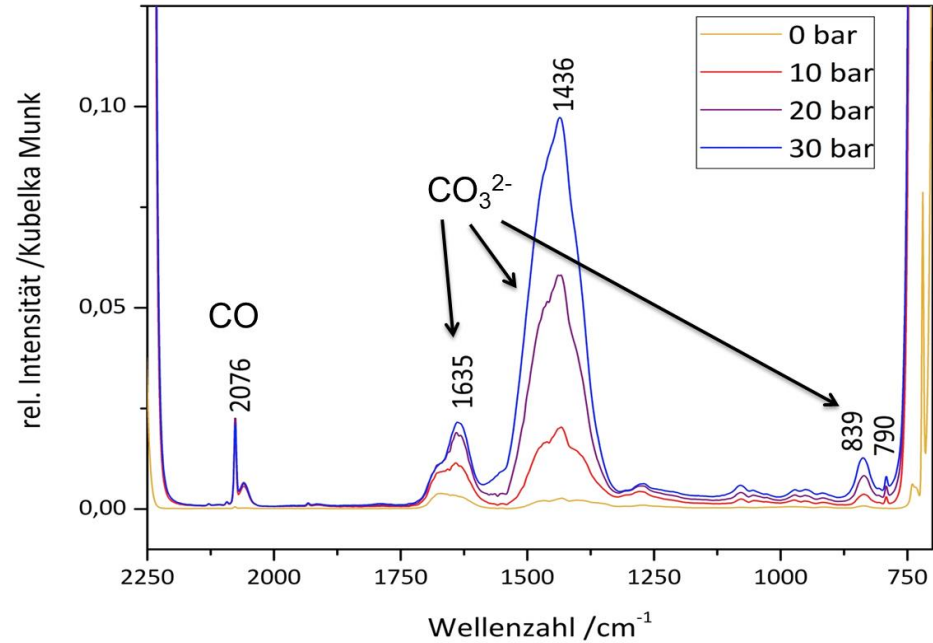
Verbindung Experiment und Rechnung...

DRIFTS – Measurements: IR Spectra of Intermediates...

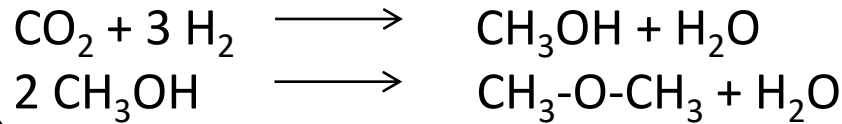
Harricks, Praying Mantis

- Different gases
- Pressures up to 32 bar
- Temperatures: RT to 800 °C

- *PhD Project Samuel Fehr.*
- *Ongoing...!*

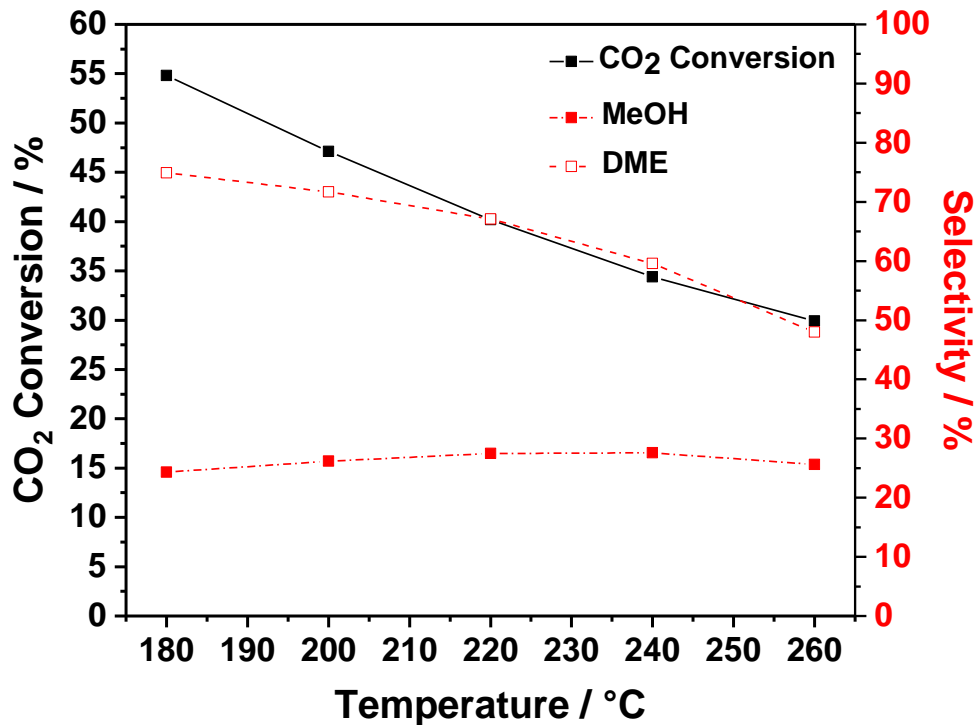


Einstufige DME Synthese...?



$$\Delta H_{298\text{K}} = -49.5 \text{ kJ mol}^{-1}$$

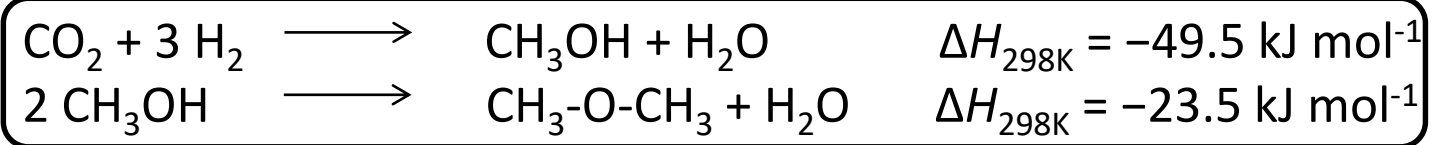
$$\Delta H_{298\text{K}} = -23.5 \text{ kJ mol}^{-1}$$



- Advantage DME:**
- Coupled to Law of Mass-Action.
 - Removes MeOH from Equilibrium.
- => Increased Conversion...!

*Isothermal thermodynamics at 40 bar
with a mixture of H₂:CO₂ 3:1*

Einstufige DME Synthese...?



Ratio: 4.2 : 2 : 1

$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2:\text{Zn}(\text{NO}_3)_2:\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2$



Benchmark $\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{ZrO}_2$

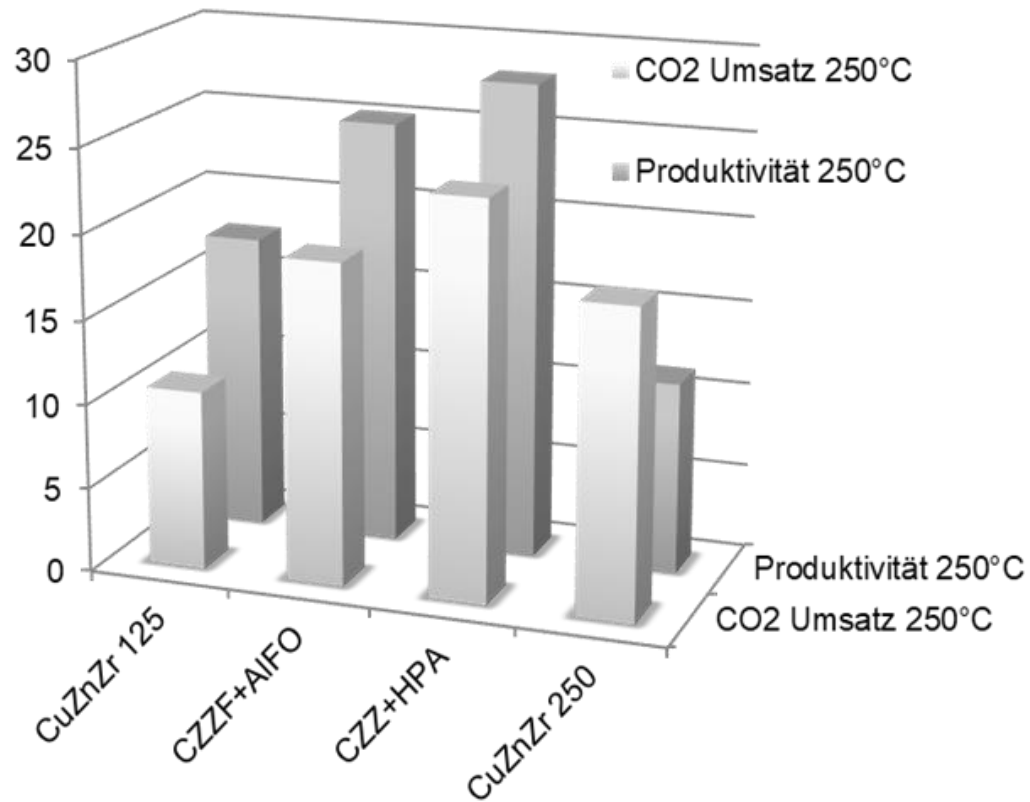


$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$



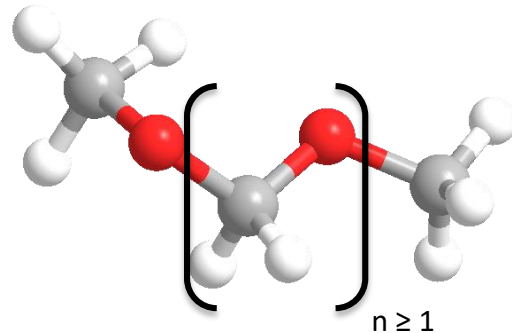
hybrid catalyst

Einstufige DME Synthese...!



Starker Anstieg CO₂ Umsatz
und Produktivität...!

Nachhaltige Synthese der OME_n...



Diesel Additive / Alternative

- ✓ Reduction of soot emission
- ✓ Compatible with diesel fuel
- ✓ High cetane number (29-90; Diesel: 80)

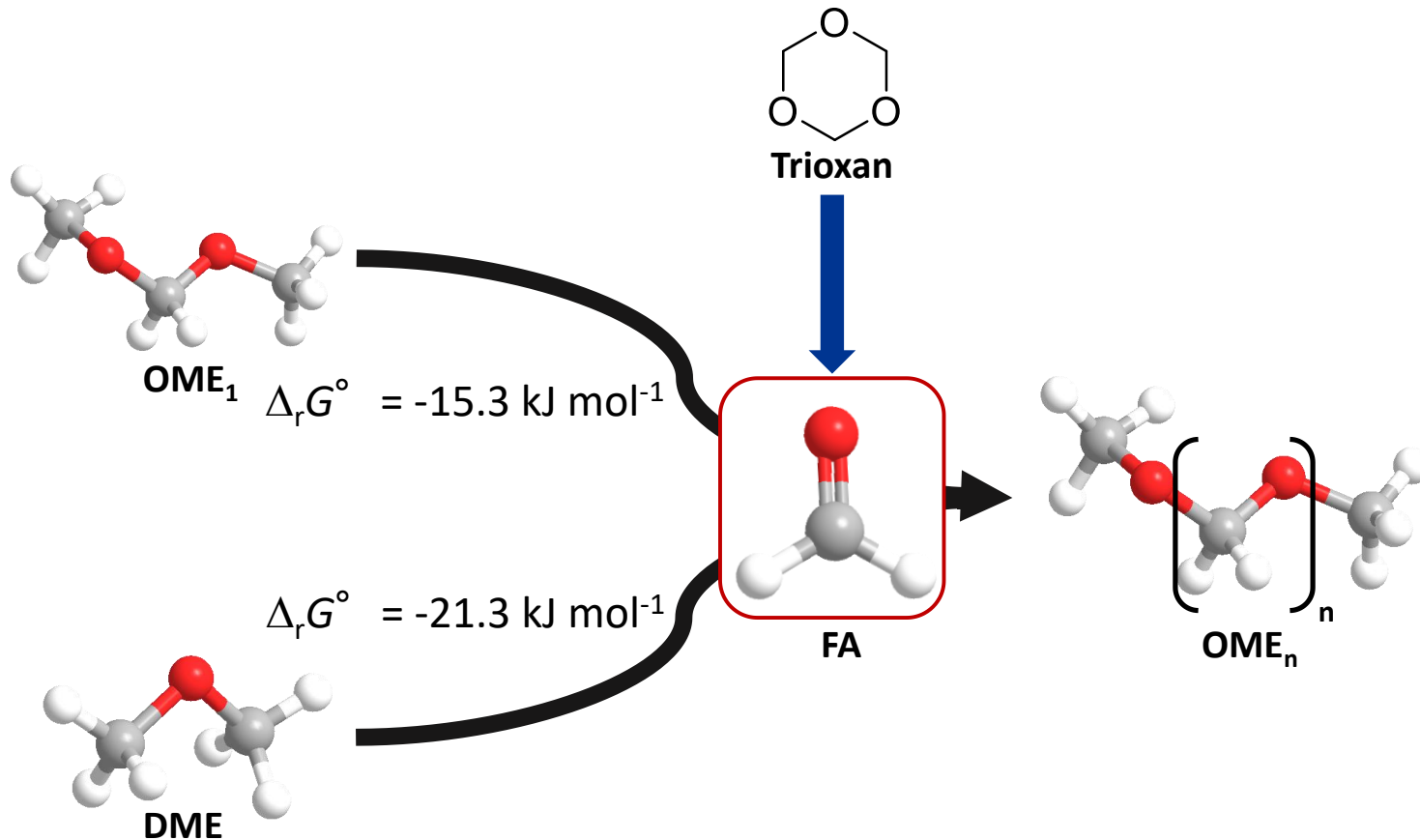
Liquid Energy storage

- ✓ heating value: $\sim 18\text{-}22 \text{ MJ mol}^{-1}$ [1]
(Diesel: 43 MJ mol^{-1}) [2]

Sustainable Synthesis (CO₂+H₂)...?

[1] M. Härtl, K. Gaukel, D. Pélerin, G. Wachtmeister, *MTZ worldwide eMagazine* **2017**, 78, 52–58. [2] E. Köhler, R. Flierl, *Verbrennungsmotoren. Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors*, 6. Aufl., Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, **2012**.

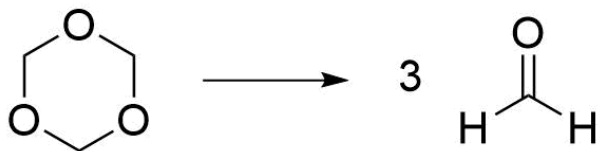
Nachhaltige Synthese der OME_n...



[1] D. Himmel, R. J. White, E. Jacob, I. Krossing, *Sustainable Energy & Fuels* **2017**, *1*, 1177-1183.

FA-Generator...

Source of FA for OME_n-
Catalysis: Trioxane-Splitting



Tuneable FA Production:

→ 5 - 26 Vol.-%

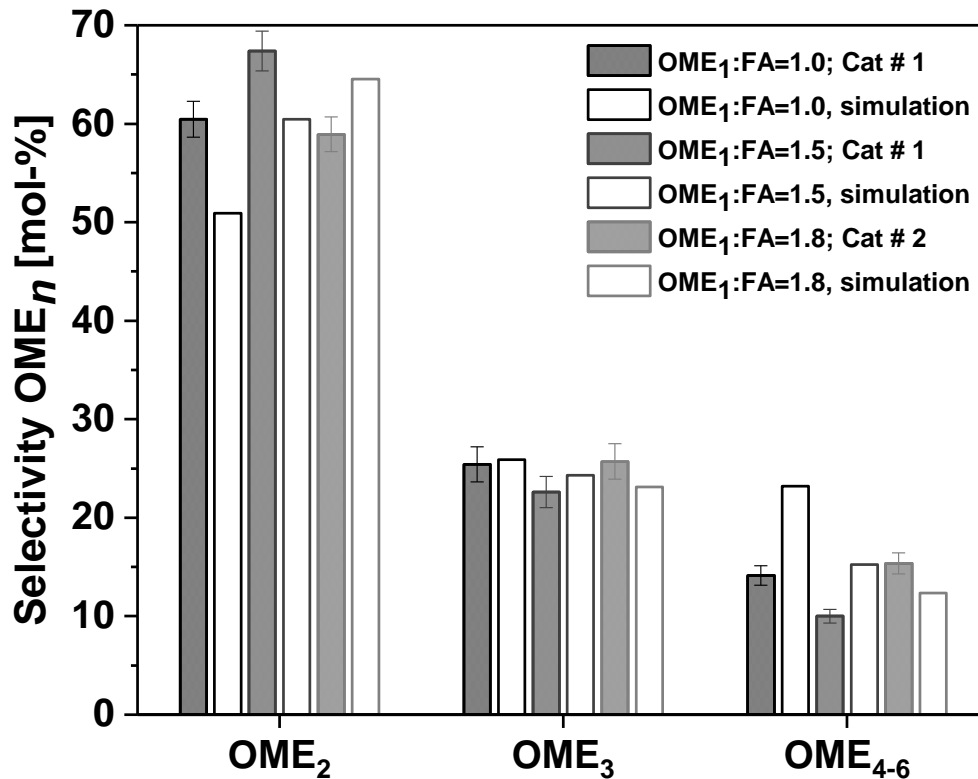
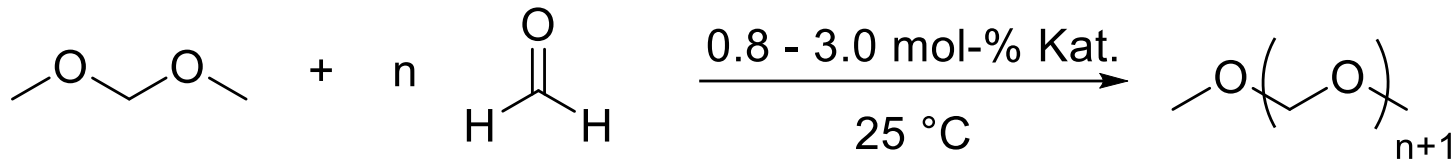
→ 6 - 36 mmol h⁻¹

→ 2 - 12 mmol L⁻¹

M.Sc. Thesis and starting PhD-Thesis: A. Peter



Nachhaltige Synthese der OME_n...



3.0 mol-% Cat # 1

0.8 mol-% Cat # 2

- complete FA uptake
- mainly OME_n (n=2-6) formation
- impurities (< 1%): methyl formate, trioxane

Simulation: M. Ouda and F. Mantei, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, using our data from *React. Chem. Eng.* **2017**, 2, 50–59.

Fitting according to: S.-E. K. Fateen, *Comp. Appl. Eng. Educ.* **2016**, 24, 899–904.

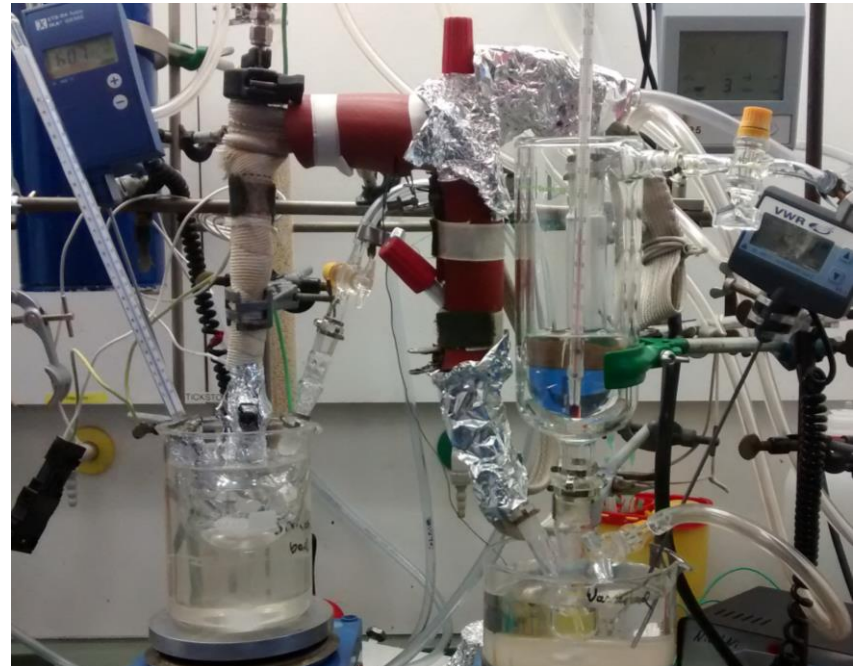
Nachhaltige Synthese der OME_n...

Now we have:

Small scale batch process.

What do we need...?

Large scale continous process.



Summary - From Carbon Dioxide and Hydrogen to Liquid Fuels and Base Chemicals

- ❑ Establishing a benchmark catalytic system based on Cu/Zn/Zr
 - Scale up to 100 mL of precatalyst @ Uni FR
 - Testing in large scale @ Fh ISE
- ❑ Exciting new catalytic systems containing fluoride
 - Fluoridation with F_2 , HF
- ❑ Connecting QM with Experiments @ Fh IWM and Uni FR
 - Understanding, Mechanism and Model Systems
- ❑ Novel anhydrous route to **OMEs**...
 - Energy efficient, no expensive separation from aqueous products.
 - Early state, Transfer Batch => Continuous Process necessary.

