

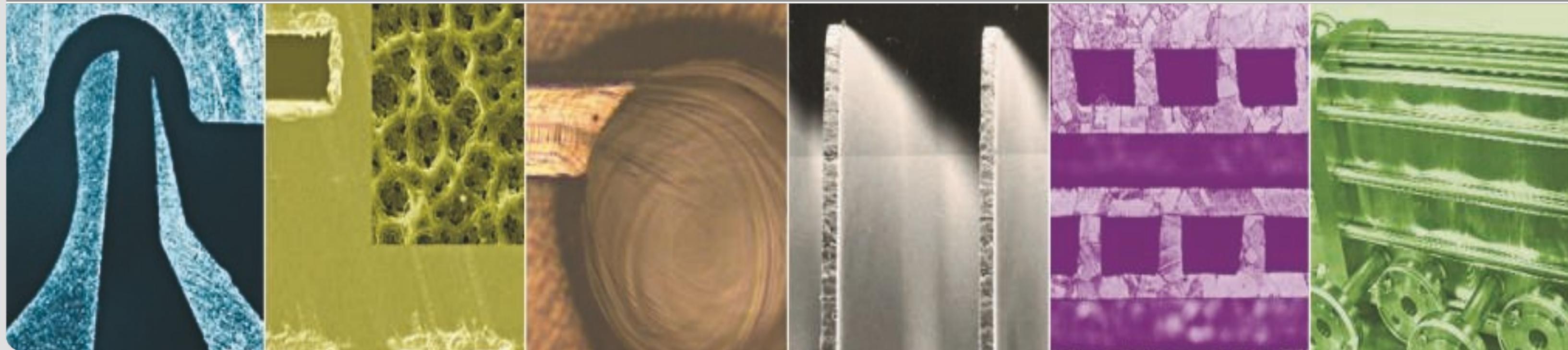
# Neue Wege für die Erzeugung synthetischer Treibstoffe: Nutzung von atmosphärischem CO<sub>2</sub>

R. Dittmeyer

Energie und Klima: Wege in die Zukunft

Tagung des Arbeitskreises Energie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Physikzentrum, Bad Honnef, 2. Oktober 2020

Institut für Mikroverfahrenstechnik



# Übersicht

- Die Klimakrise - Faktenlage und Kommunikation
- Kohlendioxidgewinnung direkt aus der Atmosphäre
- Warum Kraft-/Treibstoffe aus Kohlendioxid und erneuerbarem Strom und wie viel davon?
- Modulare PtL-Anlagen auf Basis Mikroverfahrenstechnik
- Ausblick

**Quelle:** Trump baselessly questions climate science during California wildfire briefing, by Meagan Vazquez, CNN, Sept. 14, 2020

# Die Klimakrise - Faktenlage und Kommunikation

## Die Kern-Infos zum #Klimawandel in nur 20 Worten -

1. ER IST REAL.
2. WIR SIND DIE URSACHE.
3. ER IST GEFÄHRLICH.
4. DIE FACHLEUTE SIND SICH EINIG.
5. WIR KÖNNEN NOCH ETWAS TUN.

und eine ausführliche Übersicht was die Forschung heute sicher übers #Klima weiß.

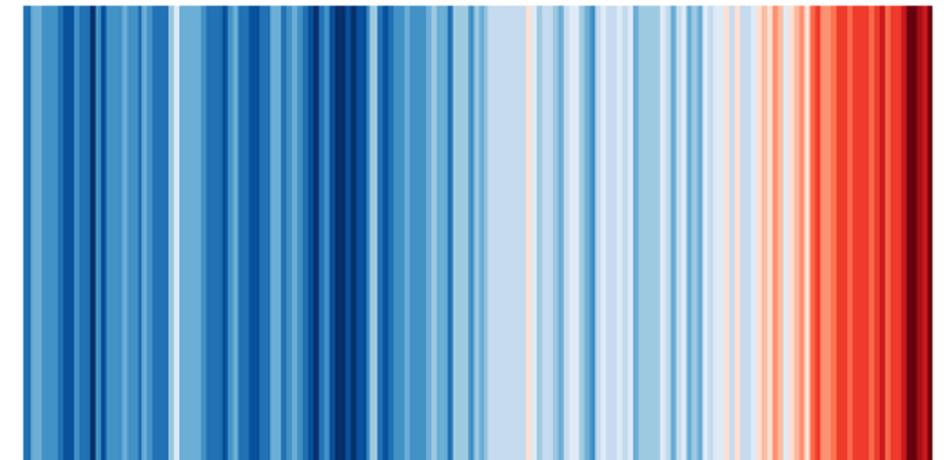
Neues Faktenblatt von [#DKK](#), [#DMG](#), [@DWD\\_klima](#), [@WetterKongress](#), [#Helmholtz](#) [@klimainitiative](#) und [@klimafakten](#)

[klimafakten.de](http://klimafakten.de), 10.09.2020

## WAS WIR HEUTE ÜBERS KLIMA WISSEN

BASISFAKTEN ZUM KLIMAWANDEL, DIE IN DER  
WISSENSCHAFT UNUMSTRITTEN SIND

Stand: September 2020



herausgegeben von:

Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst,  
Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de



Deutsches  
Klima  
Konsortium



DMG  
Deutsche Meteorologische Gesellschaft



Deutscher Wetterdienst  
Wetter und Klima aus einer Hand



ExtremWetterKongress  
www.ewk2020.de

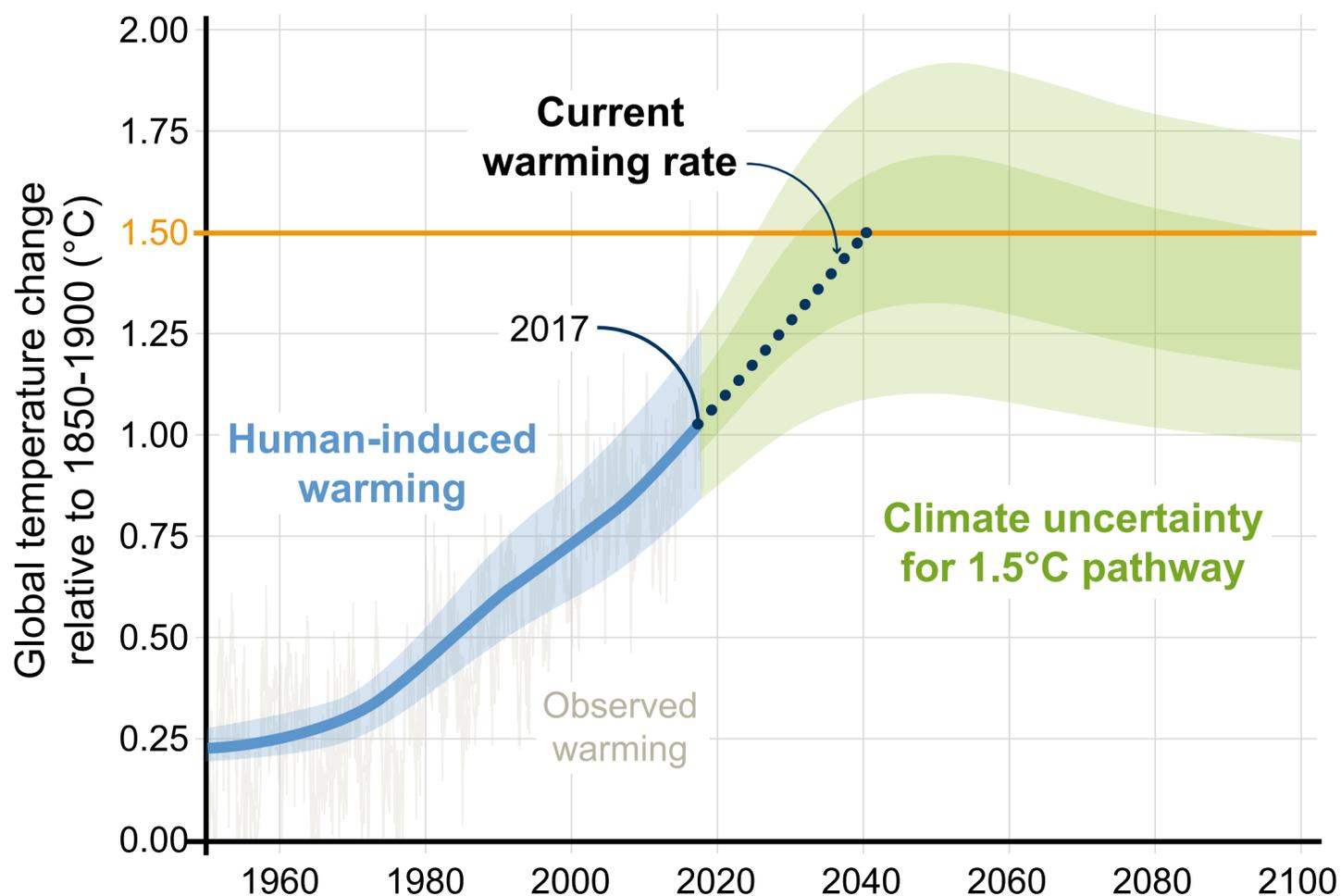


HELMHOLTZ  
KLIMA INITIATIVE



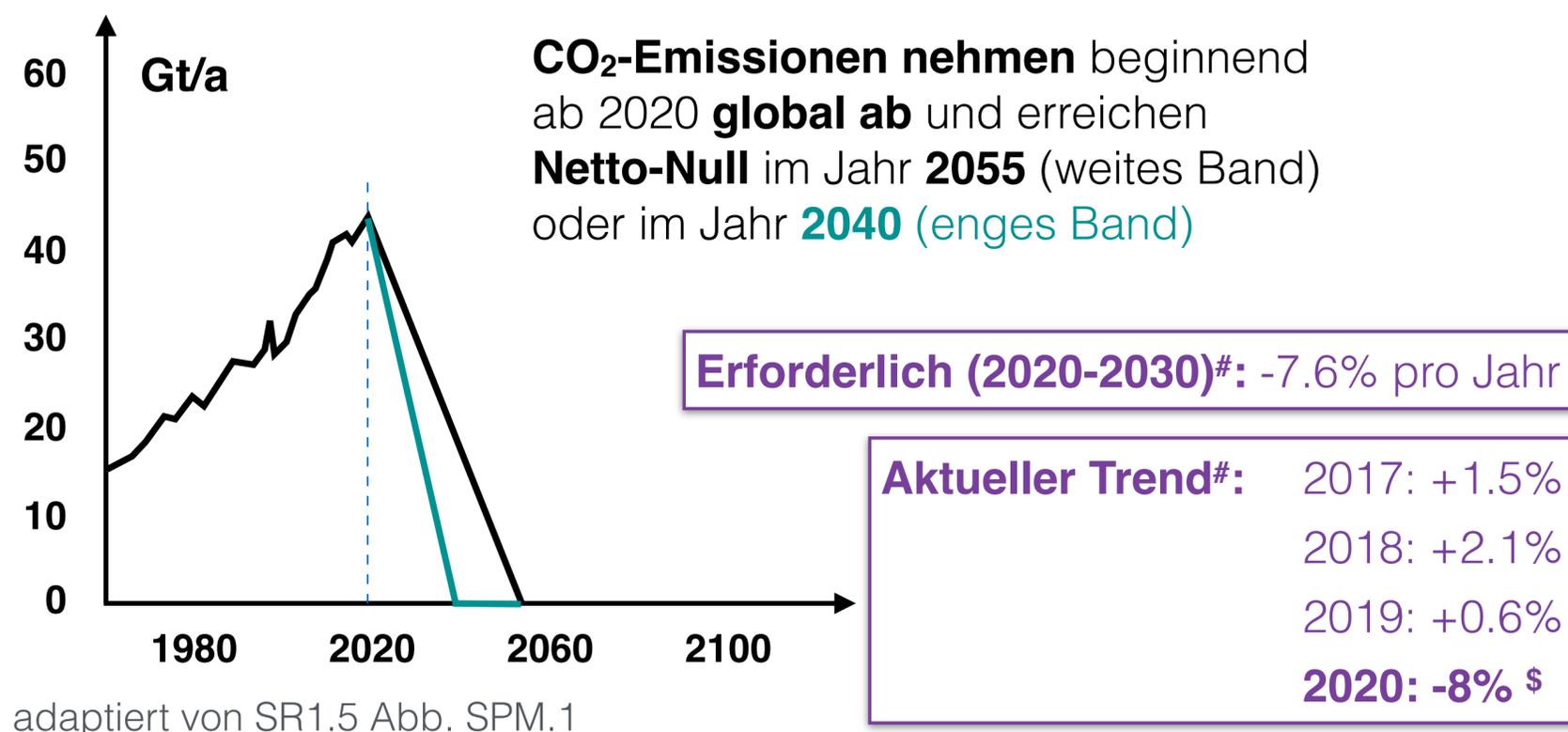
klimafakten.de

# Wie viel Zeit haben wir noch?



IPCC Special Report Global Warming of 1.5°C, Chapter 1 - Framing and Context, M.R. Allen, O.P. Dube, W. Solecki et al., FAQ 1.2, Figure 1

- Globale Erwärmung i.Vgl. zur vorindustriellen Zeit etwa 1 °C in 2017
- Bei aktuellem Anstieg würde Niveau von 1.5°C etwa 2040 erreicht
- Angedeuteter 1.5°C Pfad unterstellt, dass sofort Maßnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen ergriffen werden und diese bis 2055 auf Netto-Null gebracht werden



adaptiert von SR1.5 Abb. SPM.1

**Länderbezogene THG-Budgets: <https://www.showyourbudgets.org/>**

# Friedlingstein et al., *Earth Syst. Sci. Data* **2019**, 11, 1783-1838, doi: 10.5194/essd-11-1783-2019

\$ Global Energy Review 2020 - The impact of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO<sub>2</sub> emissions, IEA, April 2020

# Once upon a time in the west...



Szene aus dem Film „C’era una volta il West“, 1968.

Drehbuch: Dario Argento, Bernardo Bertolucci & Sergio Leone;  
Regie: Sergio Leone; Uraufführung: 21.12.1968 in Rom.

## One giant industry emerges as another declines. An imagined scenario from 2050

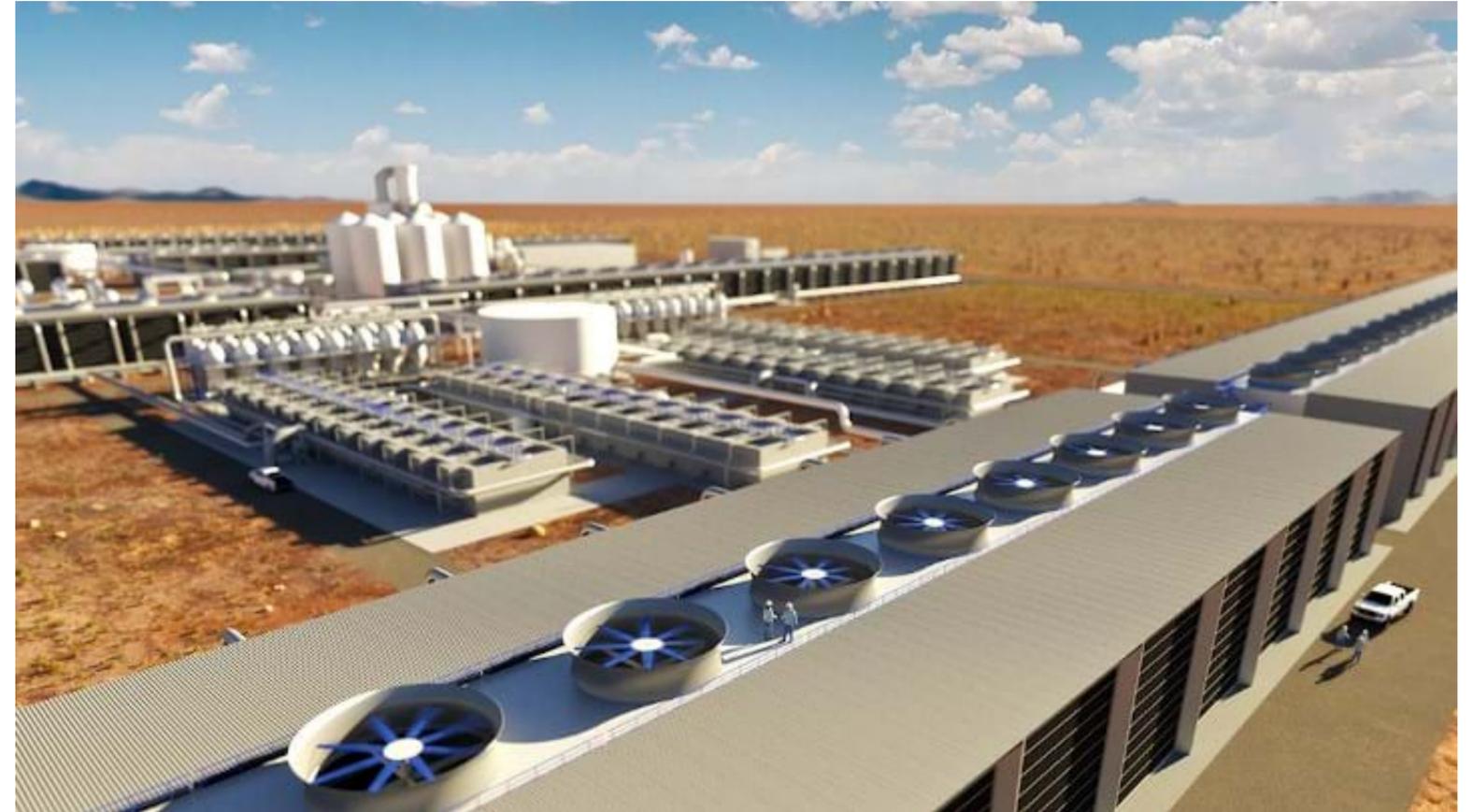
„It is hard to envisage now, but the Permian basin in Texas and New Mexico used to be America’s biggest source of crude oil. At its peak it accounted for more than half of national production. Today the steel pumpjacks have been replaced by direct-air capture (DAC) units. Powered by the sun, the machines suck carbon dioxide from the atmosphere and pump it into the sedimentary rock formations below. There is an elegant symmetry in the way the carbon is being pumped back into the ground. **Big Oil has given way to Big Suck.**“

**„Money from thin air“**

*The Economist, July 4, 2020*

## Hintergrund: erste MEGA-DAC-Anlage in Planung in Nordamerika

- Oxy Low Carbon Ventures und Rusheen Capital Management haben das Unternehmen **1PointFive** gegründet, um die Kommerzialisierung der DAC-Technologie von Carbon Engineering zu beschleunigen und eine erste industrielle DAC-Großanlage zu bauen
- **Kapazität:** 1 Mt/a CO<sub>2</sub>
- **Entwicklungsphase:** Tests in 1 t/d Pilotanlage von Carbon Engineering in Squamish, Kanada, seit 2015; Kraftstoffsynthese aus CO<sub>2</sub> seit 2017
- **Zeitplan:** Abschluss Engineering Q1/2021, Baubeginn 2022
- **Standort:** Permbecken, Südwesten der USA
- **CCS / CCU:** Einlagerung im Untergrund, EOR (Occidental) oder Edukt für PtL



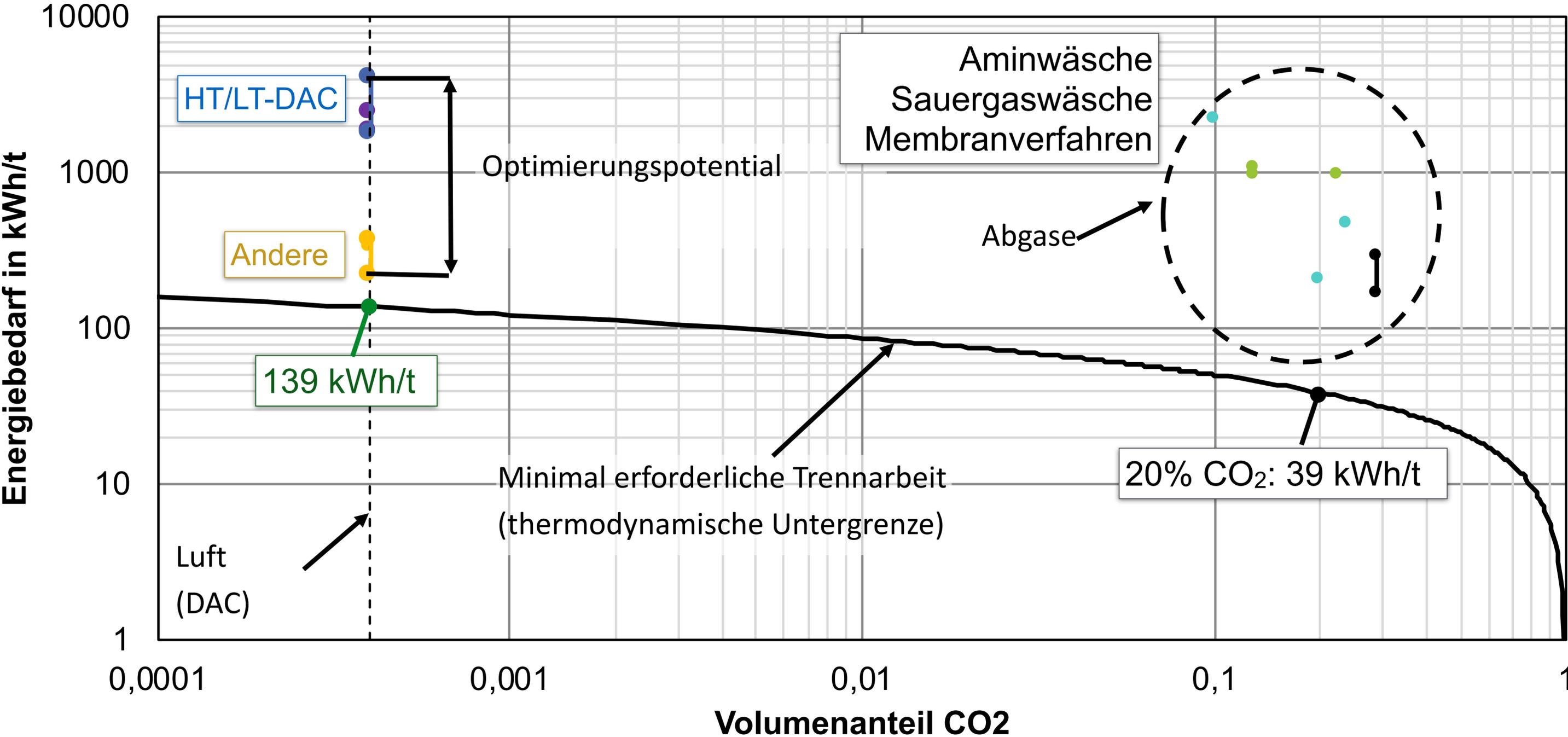
Rendering der industriellen Anlage

**Quelle:** A. Doyle, The Chemical Engineer, 07.09.2020, <https://bit.ly/2HkSH5s>

		<b>Carbon Engineering</b>	<b>Climeworks</b>	<b>Global Thermostat</b>
		<b>HT- DAC</b>	<b>LT-DAC: TVSA</b>	<b>LT-DAC: TSA</b>
<b>Verfahren</b>		Capture mit starker Base (KOH). Regeneration bei hohen Temperaturen (900°C)	Capture mit festen aminbasierten Adsorbentien. Regeneration durch Evakuieren und Erhitzen des Sorbens mit Wasserdampf bei ca. 100°C	Capture mit festen aminbasierten Adsorbentien. Regeneration durch Erhitzen des Sorbens mit Wasserdampf bei ca. 85-95°C
<b>Energiebedarf</b> (kWh / tCO <sub>2</sub> )	<b>elektrisch</b>	<b>366</b>	<b>200 - 300</b>	<b>150 - 260</b>
	<b>thermisch</b>	<b>1458</b>	<b>1500 - 2000</b>	<b>1170 - 1410</b>
<b>Perspektivische Kosten</b> (\$ / tCO <sub>2</sub> )		<b>64 - 232</b>	<b>100 (aktuell 600-800)</b>	<b>50</b>
<b>Entwicklungsstand</b>		Pilotanlage in Betrieb; erste kommerzielle Großanlage (Kapazität 1 Mio. t/a) in Planung in Kooperation mit Occidental	Mehrere Pilotanlagen und eine kommerzielle Anlage (900 t/a) in Betrieb (2017). Zweite kommerzielle Anlage im Bau (DACCS, 4000 t/a)	Pilotanlage in Betrieb, dezentrale Module für z.B. die Getränkeindustrie geplant. Vertiefte Kooperation mit ExxonMobil für EOR

**Quelle:** D. Hess, IMVT, 2020

# Energiebedarf DAC



Quelle: D. Hess, IMVT, 2020

## Direct Air Capture Summit 2020

Speaker **Dr. Jan Wurzbacher & Dr. Christoph Gebald, Climeworks**

### “Orca” plant, Iceland, 2020



- New, optimized CO<sub>2</sub> collector design
- Nominal capacity 4'000 tons of CO<sub>2</sub>/y
- Investment > USD 10m
- Location: Geothermal park at Hellisheiði power plant, Iceland



- Heat and electricity supply through geothermal power plant
- CO<sub>2</sub> storage & mineralization in collaboration with Carbfix (suitability of basaltic reservoir for permanent carbon mineralization demonstrated since 2012)



- CDR services sold to private and corporate customers
- Start of regular operation: Q1 2021
- Expected commercial lifetime: 10 years

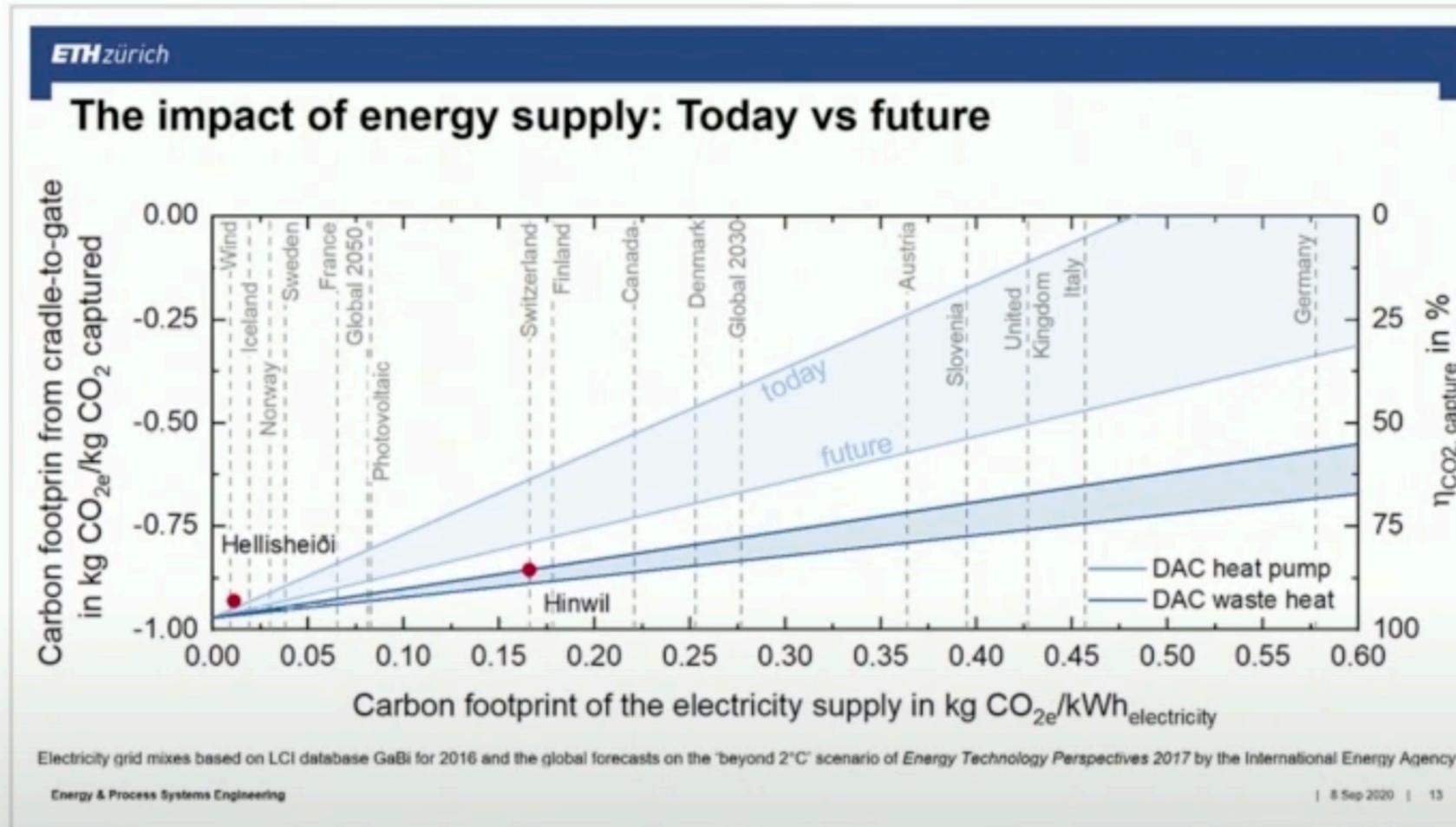


**Quelle:** <https://www.climeworks.com/news/direct-air-capture-summit-2020>

# CO<sub>2</sub> Fußabdruck für Climeworks LT-DAC (Life Cycle Analysis)

Speaker **Prof. Dr. André Bardow,**  
**ETH Zurich**

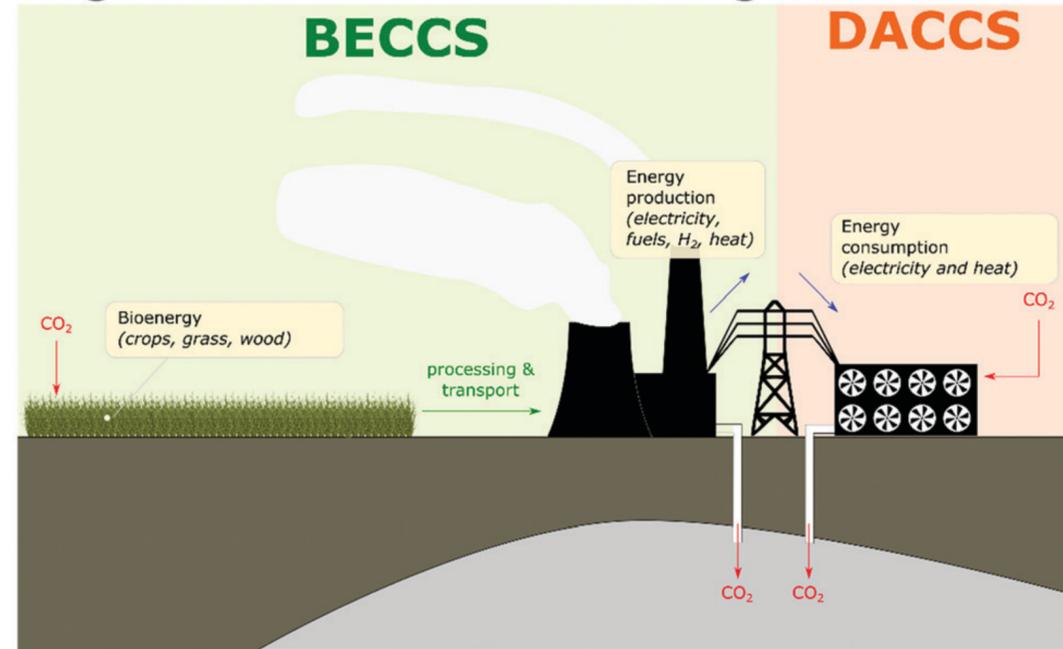
## Direct Air Capture Summit 2020



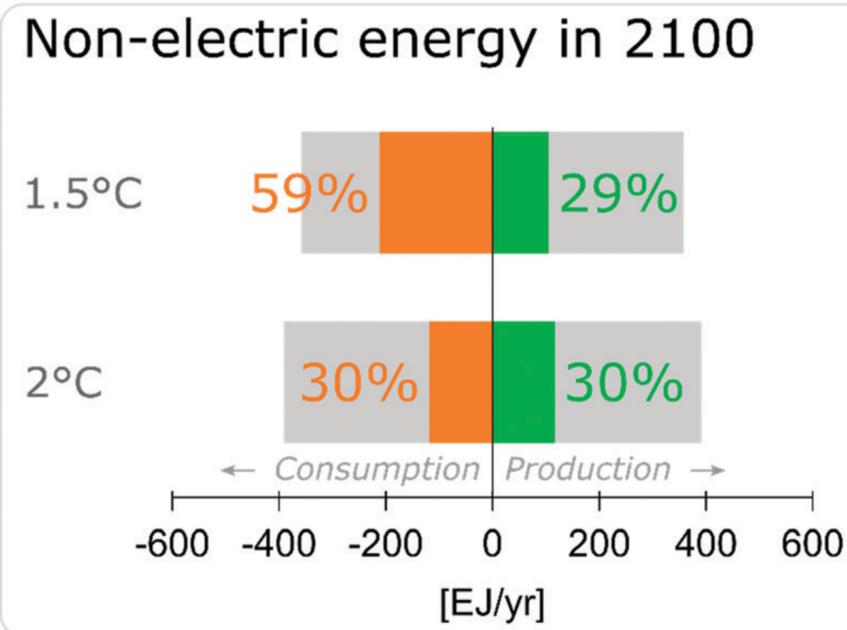
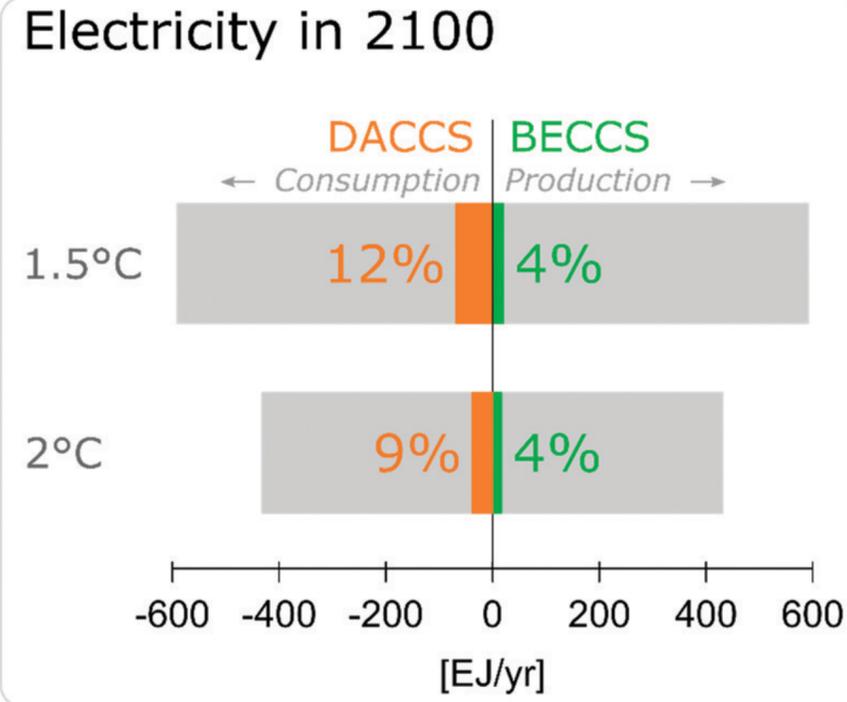
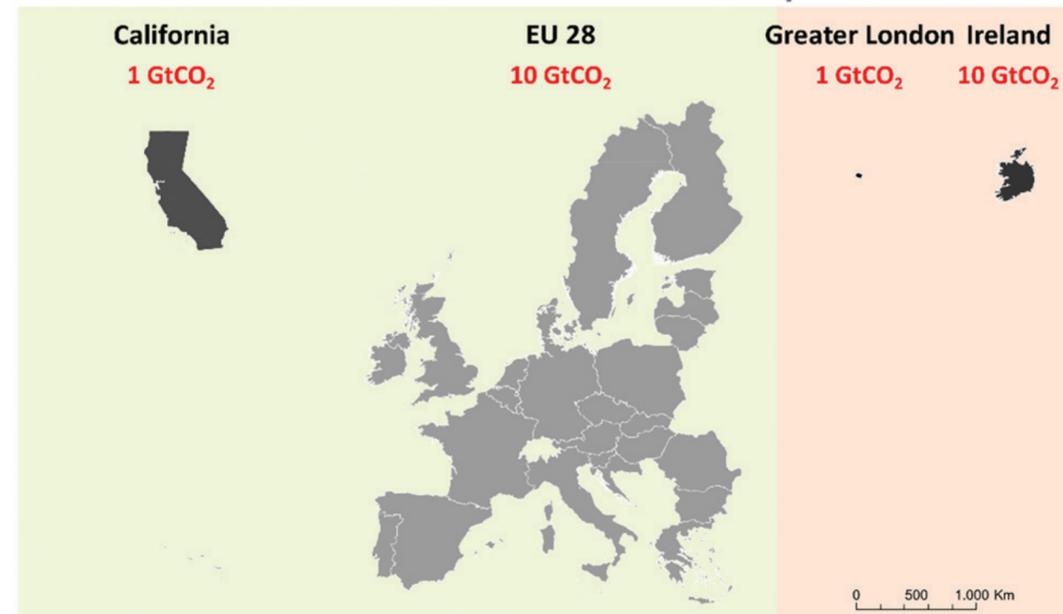
**Quelle:** <https://www.climeworks.com/news/direct-air-capture-summit-2020>

# Schon..., aber wären Pflanzen nicht besser?

Negative emission technologies...



... have different land-use requirements



## i. Vgl. zu BECCS braucht DACCS ...

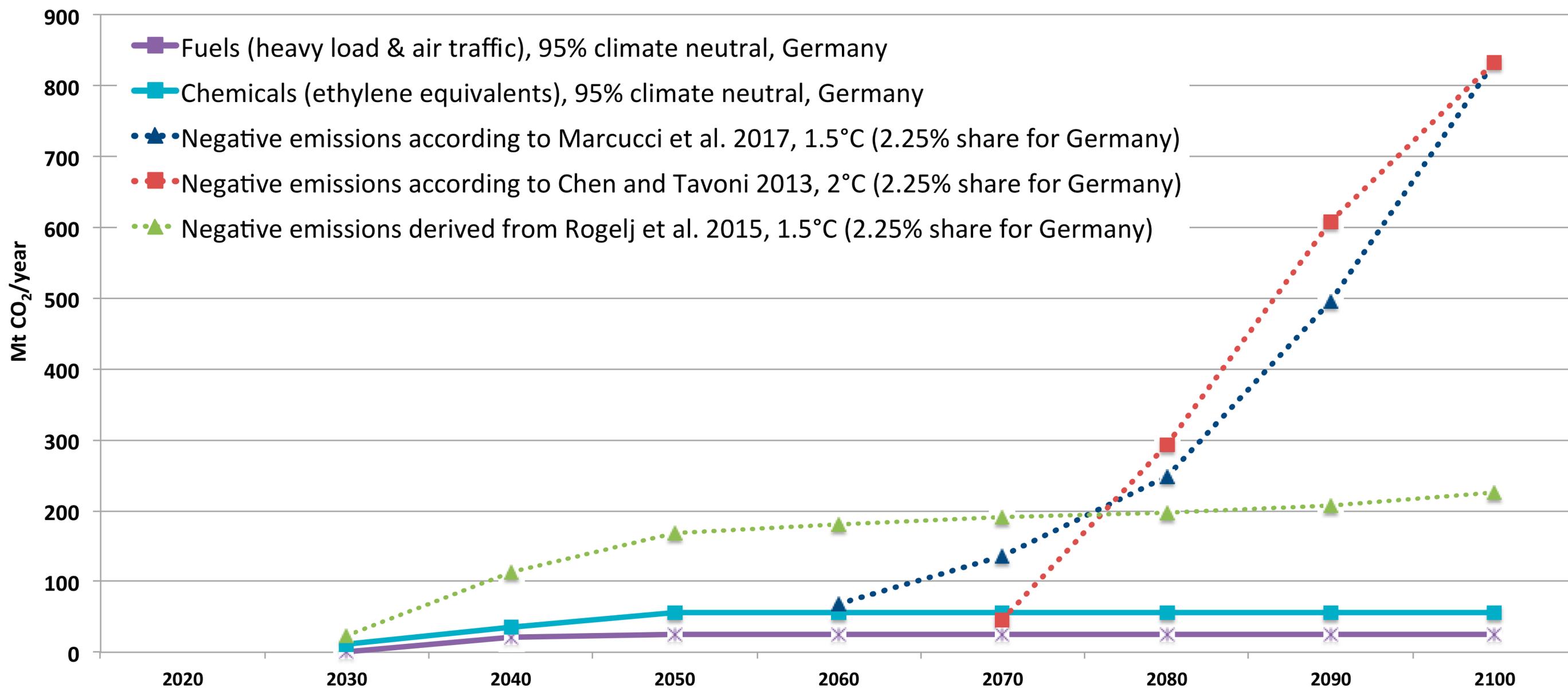
- viel weniger Fläche (ca. Faktor 50)
- keine landwirtschaftlich nutzbaren Böden
- viel Energie (v.a. Wärme)

	BECCS	DACCS
<b>\$</b> Current costs	⊕	⊖
 Technological learning	⊖	⊕
 Scalability	⊖	⊕
 Reliability	⊖	⊕
 Costs of energy input	⊖	⊕

Quelle: Creutzig et al., Energy Environ. Sci. 2019, 12, 1805, doi: 10.1039/c8ee03682a

# DAC-Bedarf für Deutschland

Erwarteter Bedarf für CO<sub>2</sub>-DAC (gemäß dem deutschen Anteil an den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen) um ab 2060 negative CO<sub>2</sub> Emissionen zu erreichen im Vergleich zu den in Deutschland benötigten Mengen an CO<sub>2</sub> für treibhausgasneutrale Kraftstoffe (PtL) und Chemikalien (PtC)



Quelle: Viebahn et al., Energies 2019, 12, 3443, doi: 10.103390/en12183443

# DAC in Lüftungs-/Klimaanlagen?

## PERSPECTIVE

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-09685-x>

OPEN

# Crowd oil not crude oil

Roland Dittmeyer <sup>1</sup>, Michael Klumpp<sup>1</sup>, Paul Kant <sup>1,2</sup> & Geoffrey Ozin <sup>2</sup>

## Grundüberlegungen

- In HVAC-Systemen werden riesige Mengen an Luft kontaktiert: 10 % des weltweiten Stromverbrauchs für HVAC, Tendenz steigend
- Aufwand und Energiebedarf für DAC kann geringer ausfallen, wenn integriert mit HVAC-Systemen im Vergleich zu getrennten Anlagen
- Integration von PtL in Gebäude eröffnet Möglichkeiten neue Akteure für die Energiewende zu mobilisieren
- Integration von PtL in Gebäude reduziert zusätzlichen Landverbrauch

**Quelle:** R. Dittmeyer, Nat. Commun. 2019, 10, 1818, doi: [10.1038/s41467-019-09685-x](https://doi.org/10.1038/s41467-019-09685-x)

SCIENTIFIC  
AMERICAN.

Subscribe

CLIMATE

## Could Air Conditioning Fix Climate Change?

Researchers propose a carbon-neutral “synthetic oil well” on every rooftop

By Richard Conniff on April 30, 2019



WIRED

SUBSCRIBE

MATT SIMON SCIENCE 04.30.19 11:00 AM

## WHAT IF AIR CONDITIONERS COULD HELP SAVE THE PLANET INSTEAD OF DESTROYING IT?



# Helmholtz-Initiative „Climate Adaptation and Mitigation“

## Cluster „Netto-Null“, Projekt „Circular Carbon Approaches“

- Konkretisierung des Mengenpotenzials und Identifikation der attraktivsten Umwandlungsverfahren
- Untersuchung der rechtlichen Rahmenbedingungen
- Aufbau eines praktischen Demonstrators am IMVT

<https://www.helmholtz-klima.de>

<https://netto-null.org>

HELMHOLTZ KLIMA INITIATIVE

## FACTSHEET

Nº 04

### THEMA: DIRECT AIR CAPTURE

#### EMISSIONEN IN DER ATMOSPHÄRE

**ANTEILE TREIBHAUSGASE AN GLOBALE ERWÄRMUNG**

Gas	Anteil
CO <sub>2</sub>	66,1%
Methan (CH <sub>4</sub> )	16,4%
F-Gase	11%
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	6,4%

**CO<sub>2</sub> MUSS REDUZIERT WERDEN**

1 Gigatonne (Gt) sind 1 Milliarde Tonnen

Emissionen sind eine der treibenden Kräfte der globalen Erwärmung. Um diese unter 1,5°C zu halten, reicht es nicht aus, wenn wir den Ausstoß unserer Treibhausgase reduzieren.

Laut Weltklimarat IPCC müssen wir der Atmosphäre bis Ende des 21. Jahrhunderts zusätzlich bis zu 1.000 Gigatonnen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) dauerhaft entziehen.

CO<sub>2</sub> bleibt über 1.000 Jahre in der Atmosphäre. Damit ist es eines der bedeutendsten Klimagase und muss reduziert werden. 2018 hat die Welt etwa 36 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre ausgestoßen.

#### DIE ATMOSPHÄRE REINIGEN

Direct Air Capture (DAC) ist ein Verfahren, das der Umgebungsluft CO<sub>2</sub> entzieht.

#### WIE FUNKTIONIERT DAC?

Das Verfahren besteht aus zwei Schritten: „Capture“ und „Regeneration“. Im Schritt „Capture“ ziehen große Ventilatoren die Umgebungsluft durch einen Filter. Das in der Luft enthaltene CO<sub>2</sub> wird herausgefiltert und durch chemische Reaktionen an einen Träger gebunden.

Der Träger ist in der Regel ein fester Stoff, der aus gebundenen Aminogruppen wie z.B. keramischen Trägern besteht.

Im zweiten Schritt „Regeneration“ gibt der Träger das gebundene Kohlendioxid unter Wärmezufuhr wieder ab.

Übrig bleibt reines CO<sub>2</sub>. Neben dem Verfahren mit einem Träger kann das CO<sub>2</sub> auch in einer Lauge gelöst werden.

**DAC-GRUNDVERFAHREN**

**CAPTURE:** Luft → Energie (Strom) → TRÄGER → reines CO<sub>2</sub>

**REGENERATION:** TRÄGER → Energie (Wärme) → reines CO<sub>2</sub>

[www.helmholtz-klima.de](http://www.helmholtz-klima.de)

HELMHOLTZ KLIMA INITIATIVE

## FACTSHEET

Nº 04

### THEMA: DIRECT AIR CAPTURE

#### NUTZUNGSMÖGLICHKEITEN DES REINEN CO<sub>2</sub>

Nutzung als **ROHSTOFF**

z.B. als Carbon Black – ein pulverförmiger, hochreiner Kohlenstoff für Hightech-Anwendungen in der Elektronik-, Druck-, oder Bauindustrie

Herstellung **SYNTHETISCHER KRAFTSTOFFE** wie Benzin oder Öl für Kraftfahrzeuge

Unterirdische **SPEICHERUNG** um Emissionen aus der Atmosphäre zu ziehen

! aktuell ca. 600 US-Dollar pro Tonne CO<sub>2</sub>

#### WIRTSCHAFTLICHKEIT

DAC-Technologien sind industriell noch wenig verbreitet. Daher sind die Kosten derzeit noch hoch: **ca. 600 US-Dollar pro Tonne CO<sub>2</sub>** für aktuell kommerziell verfügbare Lösungen. Geplante größere Anlagen können Preise unter 100 US-Dollar pro Tonne CO<sub>2</sub> erreichen.

Für das Ansaugen der Luft, das Erhitzen des Trägers oder die Instandhaltung der Technik werden zudem große Mengen Energie benötigt. Um der Atmosphäre damit Emissionen entziehen zu können, muss diese Energie CO<sub>2</sub>-frei produziert worden sein.

#### HIER FORSCHT HELMHOLTZ: „CROWD OIL“

#### „CROWD OIL“: KRAFTSTOFFE AUS DER KLIMAANLAGE

Helmholtz-Wissenschaftler\*innen erforschen derzeit, wie sich DAC-Verfahren technisch umsetzen lassen. Ein Ansatz heißt Crowd Oil. In diesem Projekt werden DAC-Technologien in Klima- und Lüftungsanlagen eingebaut, um die Luftumwälzung der Anlagen zu nutzen. Das aus der Luft gefilterte CO<sub>2</sub> lässt sich vor Ort direkt in synthetisches Öl umwandeln und somit im Kreislauf nutzen, zum Beispiel als Kraftstoff. So entsteht Kerosin oder Benzin für Autos oder Flugzeuge. Ein Großteil der fossilen Energieträger ließe sich dadurch ersetzen.

- erneuerbare Elektrizität und Solarthermie
- CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O Gewinnung aus Lüftungsanlagen
- Herstellung von Synthesegas
- Umwandlung in synthetisches Öl
- Speicherung oder Nutzung des Öls im Kreislauf

**VORTEILE:**

- Die einzelnen Anlagen müssen nicht aufwendig an vorhandene Kühlanlagen angepasst werden
- Der benötigte Strom lässt sich direkt vor Ort produzieren
- Großes Einsparpotential: 700 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> könnten mit Crowd Oil- Anlagen aus den Lüftungsanlagen der EU gewonnen werden. Das entspricht 17 Prozent der jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der EU.

**INFO**

Das Projekt Crowd Oil wird am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) umgesetzt.

Roland Dittmeyer forscht am Karlsruher Institut für Technologie innerhalb der Helmholtz-Klima-Initiative an Kreislaufansätzen, mit denen Kohlenstoff umgewandelt und weiterverwendet werden kann. Ein Schwerpunkt ist die technologische Machbarkeit von DAC-Verfahren. Betrachtet werden dabei auch systemische, soziale und gesetzgeberische Fragen.

Möchten Sie mehr zum Thema erfahren?

Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Dittmeyer  
Karlsruher Institut für Technologie  
Institutsleiter am Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT)  
eMail: roland.dittmeyer@kit.edu

STAND: SEPTEMBER 2020

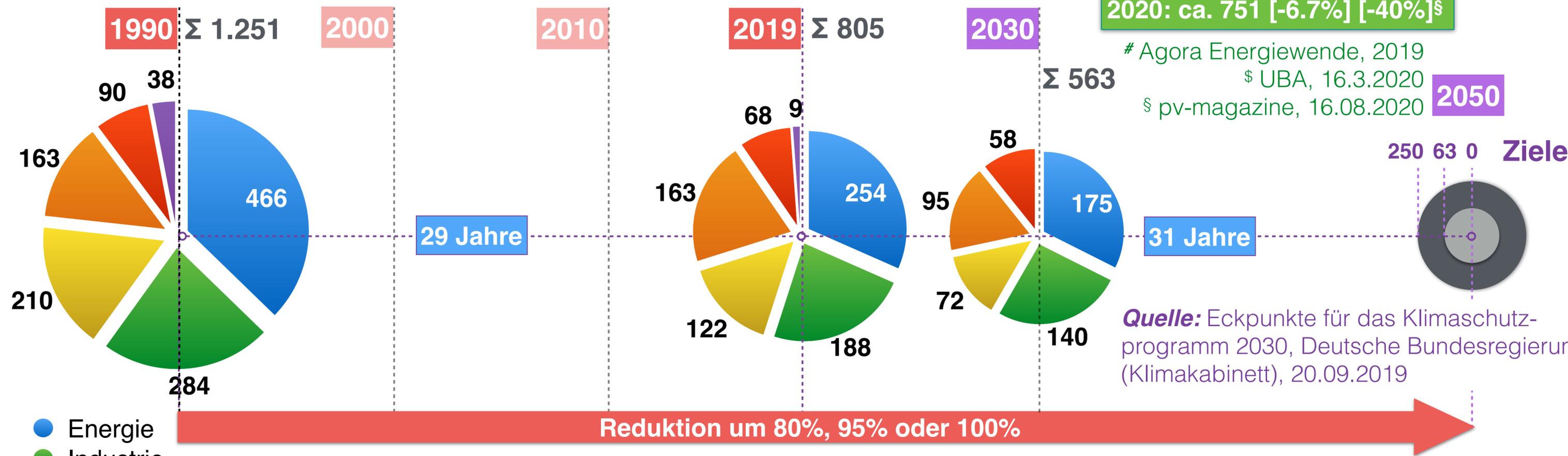
HELMHOLTZ-KLIMA-INITIATIVE  
Markgrafenstraße 22, 10117 Berlin  
Eine Initiative der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren e.V.

[www.helmholtz-klima.de](http://www.helmholtz-klima.de)

# Treibhausgasemissionen D nach Sektor (Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv.)

D verursacht 1.9 % der globalen Emissionen bei 1.1 % der globalen Bevölkerung

2016: 909,4 [+0.3%]  
 2017: 904,7 [-0.5%]  
 2018: 865,6 [-4.3%]  
 2019: 805 [-6.3%] [-35.7%]<sup>§</sup>  
 2020: ca. 751 [-6.7%] [-40%]<sup>§</sup>



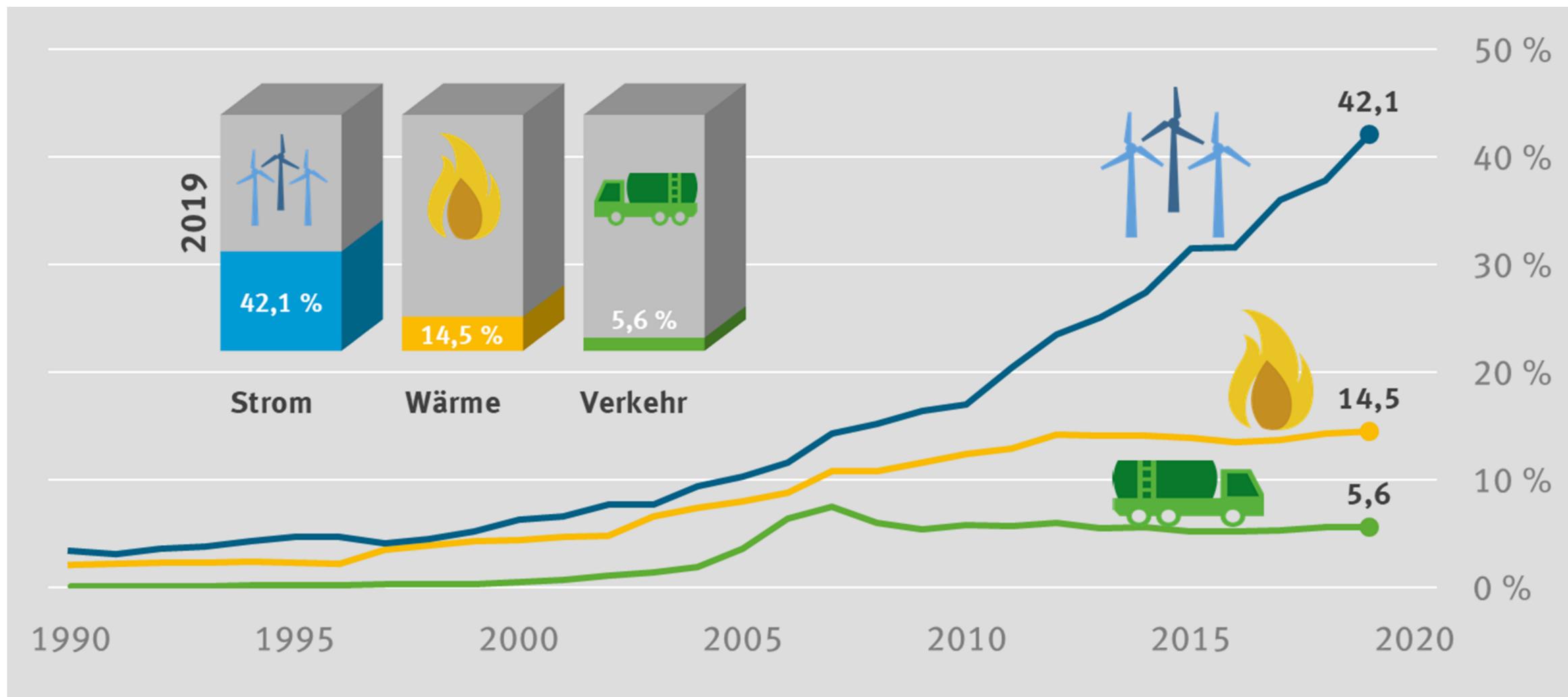
# Agora Energiewende, 2019  
 § UBA, 16.3.2020  
 § pv-magazine, 16.08.2020

Quelle: Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030, Deutsche Bundesregierung (Klimakabinett), 20.09.2019

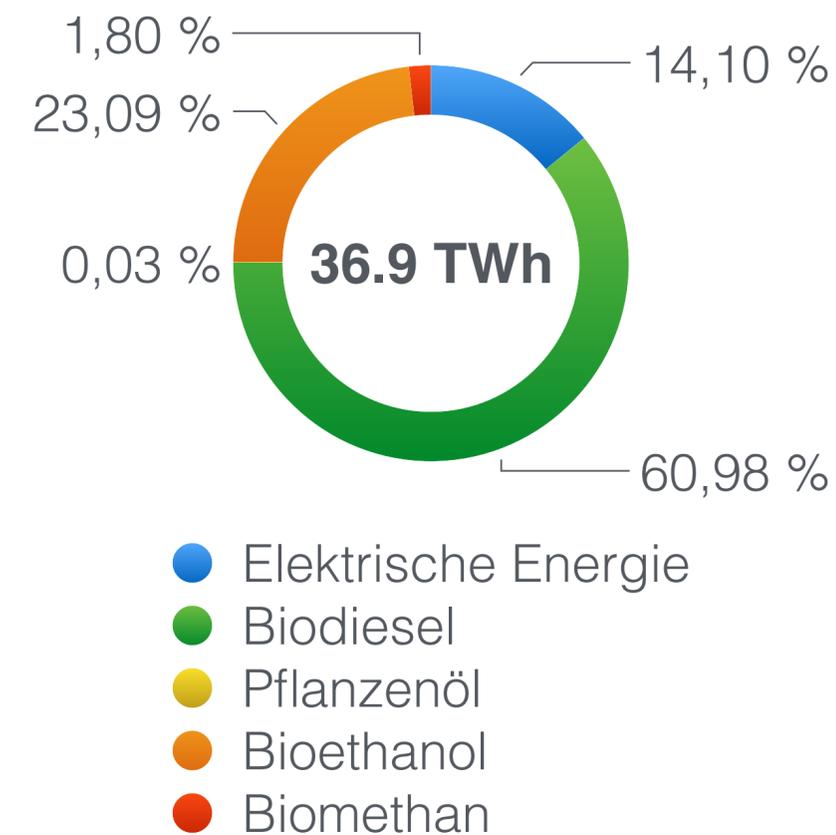
- Ausbau der Stromerzeugung aus Erneuerbaren, Netzausbau und Speicherung
- Umstellung aller Sektoren auf „CO<sub>2</sub>-freie“ Energie nötig (Sektorkopplung)
- Aktive Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre und Einlagerung im großen Stil wird nötig werden, falls Emissionen nicht schnell genug zurückgehen

Quelle: Umweltbundesamt, Berlin, 2019

# Wenig Dynamik bei den EE-Anteilen in den Sektoren Wärme und Verkehr



5.6 % EE im Verkehr in 2019; davon...



Quelle: Erneuerbare Energien in Zahlen, AGEE-Stat / UBA, März 2020, <https://bit.ly/33MkEKS>

z. Vgl. Kraftstoffe D, 2019:

	Diesel	Kerosin	Ottokraftstoff
Mio. t	38	10.3	18
TWh	452	123	204

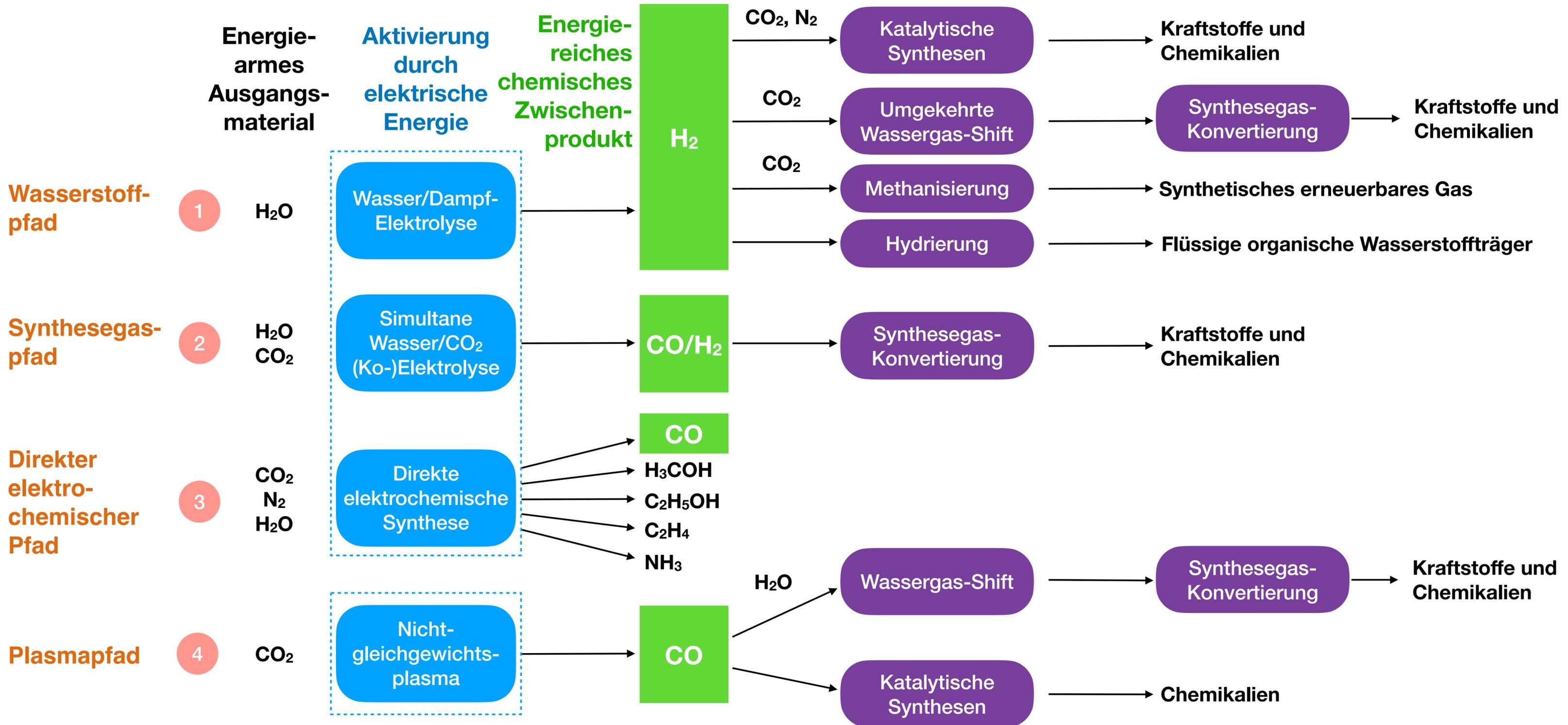
Quelle: Statista, Jan. 2020, <https://bit.ly/32NZqgg>

## Warum also chemische Energieträger über Power-to-X?

1. Zur raschen und vollständigen Defossilisierung des Transportsektors und des industriellen Sektors (als Alternative zur fortgesetzten Nutzung fossiler Energieträger kombiniert mit DACCS\*)
2. Zur Speicherung großer Energiemengen für die Stromerzeugung bei Bedarf (Flexibilisierung, Maximierung des Energieertrags aus fluktuierenden Erneuerbaren, Vorhaltung einer Reserve)
3. Zum Transport großer Energiemengen über weite Strecken (z.B. Import) und zur Optimierung des Gesamtenergiesystems (Wirtschaftlichkeit, CO<sub>2</sub>-Fußabdruck)

\* Direct Air Capture and Carbon Storage (CO<sub>2</sub>-Filterung aus der Atmosphäre und permanente Einlagerung)

# Power-to-Molecules (PtM) - Optionen



# Generelle Herausforderungen

- **Hohe Kosten**
  - Betrieb (Strom, CO<sub>2</sub>, Umwandlungsverluste)
  - Investition (aufwendige Verfahren, begrenzte Zahl von Vollaststunden)
- **Große Mengen nötig**
  - hoher Stromverbrauch (erneuerbar!)
  - internationale Dimension (komplexe Projektstrukturen)
  - hoher Kapitalbedarf und hohes finanzielles Risiko (bestimmte Länder)
- **Markteinführung braucht geeignete rechtliche Rahmenbedingungen und Anreize, damit wirtschaftliche Geschäftsmodelle möglich sind**
  - Bepreisung der CO<sub>2</sub>-Emissionen
  - Zumischquoten für die PtM-Produkte, steuerliche Besserstellung, zeitlich gestaffelte Preisgarantie für bestimmte Abnahmemenge, etc.



# PtM Kostenstruktur und -niveau

## Kostenfaktoren

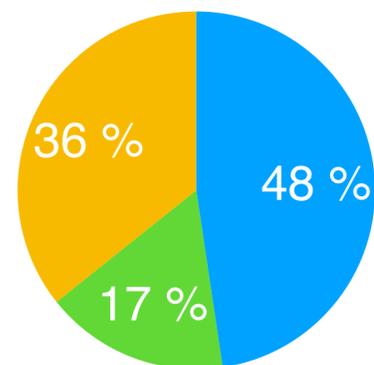
- Strompreis
- CO<sub>2</sub>-Preis
- Energie- und Kohlenstoffeffizienz
- Spezifische Anlagenkosten
- ggf. Transport

## Beispielhafte Werte (PtL)

- 4-5 ct/kWh für onshore Wind und PV in D, 1-2 ct/kWh an optimalen Standorten
- 15 € bis 100 € pro Tonne CO<sub>2</sub>
- 90 % Kohlenstoffausnutzung
- 45-60 % Gesamtenergieeffizienz
- 30-60 ct/L spezifische Anlagenkosten

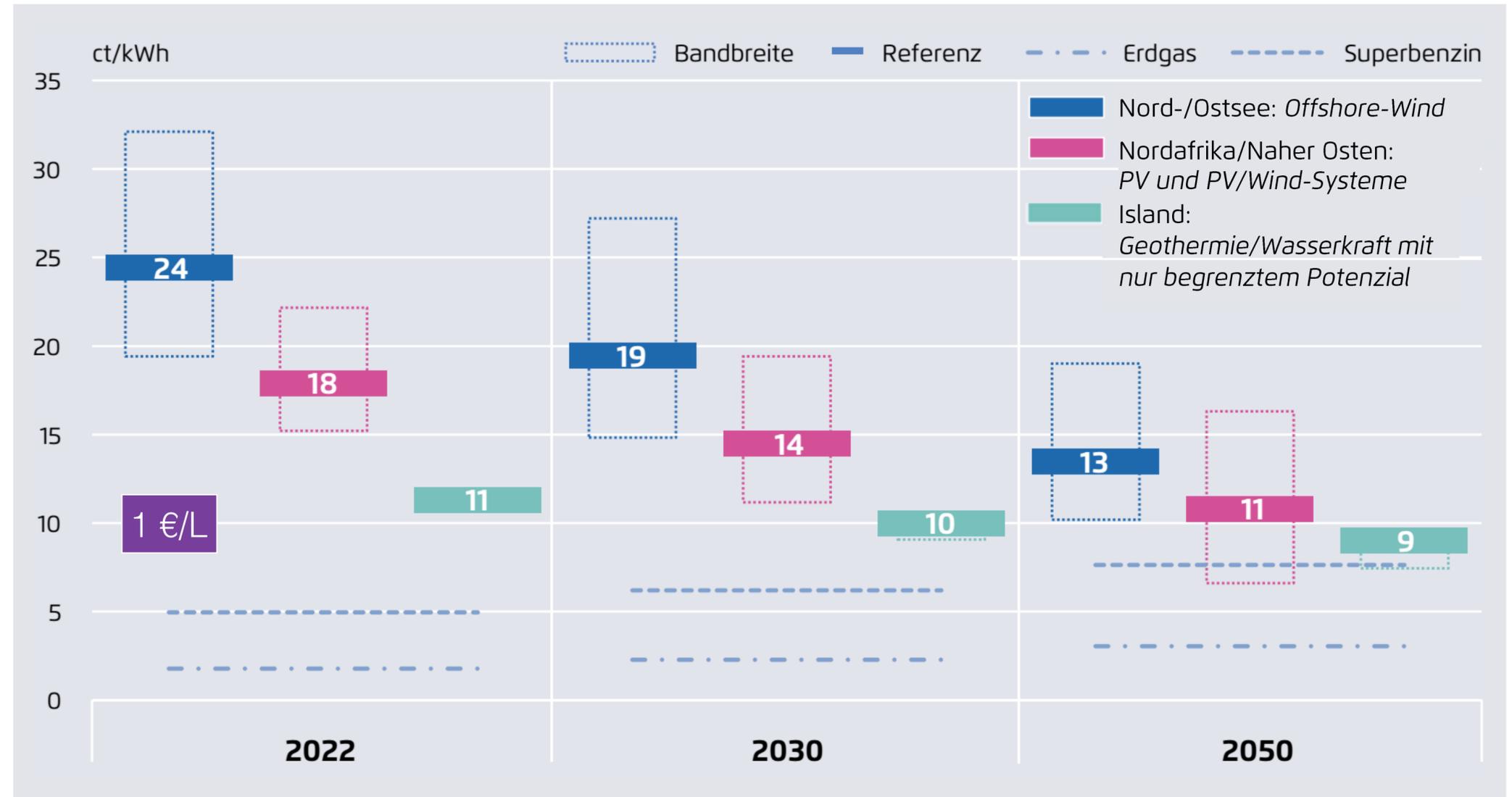


**1,55 €/L  
ohne  
Steuer!**



- Strom, ct/L
- CO<sub>2</sub>, ct/L
- Anlage, ct/l

## Kosten von PtG-Methan und Flüssigkraftstoffen in ct<sub>2017</sub>/kWh \*

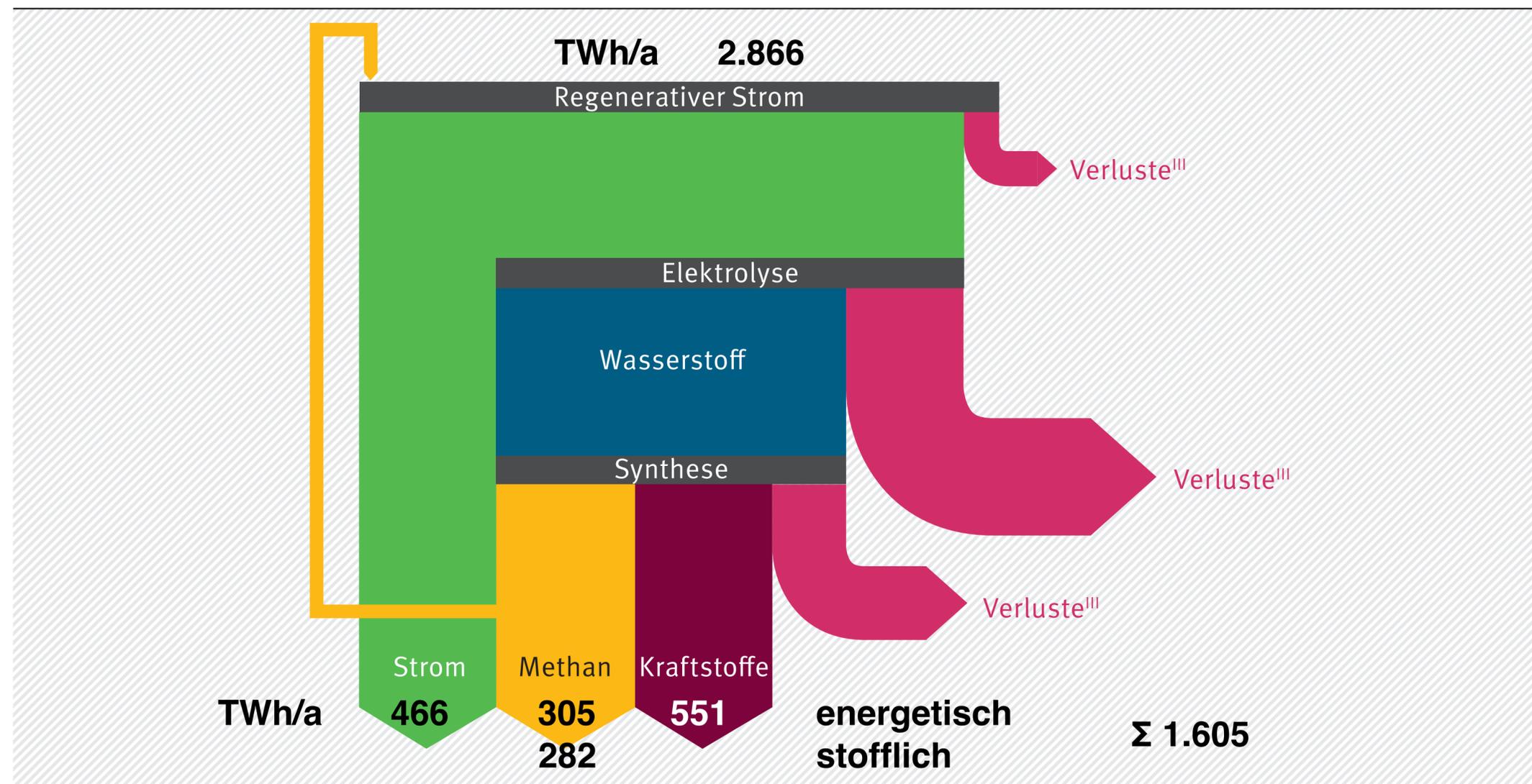


\* ohne Netzentgelte und Vertriebskosten; eigene Berechnungen auf Basis von Frontier Economics (2018) mit Kapitalkosten von 6 % und CO<sub>2</sub> aus Direct Air Capture

**Quelle:** Die zukünftigen Kosten strombasierter Brennstoffe: Schlussfolgerungen aus Sicht von Agora Verkehrswende und Agora Energiewende, Urs Maier, Matthias Deutsch, 13.02.2018

# Erwarteter PtM-Bedarf Deutschland - UBA, 2013

## Qualitative Darstellung des Energieflusses im UBA THGN D 2050 Szenario<sup>I,II</sup>



I Inklusive des Bedarfs an regenerativen Einsatzstoffen für die chemische Industrie.

II Die Darstellungen der Energieströme sind proportional zu den notwendigen Energieströmen.

III einschließlich Leitungsverluste, der Verluste aus der Methan-Rückverstromung und der Verluste der Biomassennutzung und Strombereitstellung)

Quelle: Umweltbundesamt, 2013

### Geht das?

- Technische Potenziale für 3.000 TWh EE-Strom im Inland vorhanden, aber aus ökologischen und ökonomischen Gründen nur zum Teil sinnvoll nutzbar, d.h. Importe nötig!
- z. Vgl.: Primärenergieverbrauch 2010 3.930 TWh; Bruttostromverbrauch 527 TWh

### Benötigte CO<sub>2</sub>-Mengen:

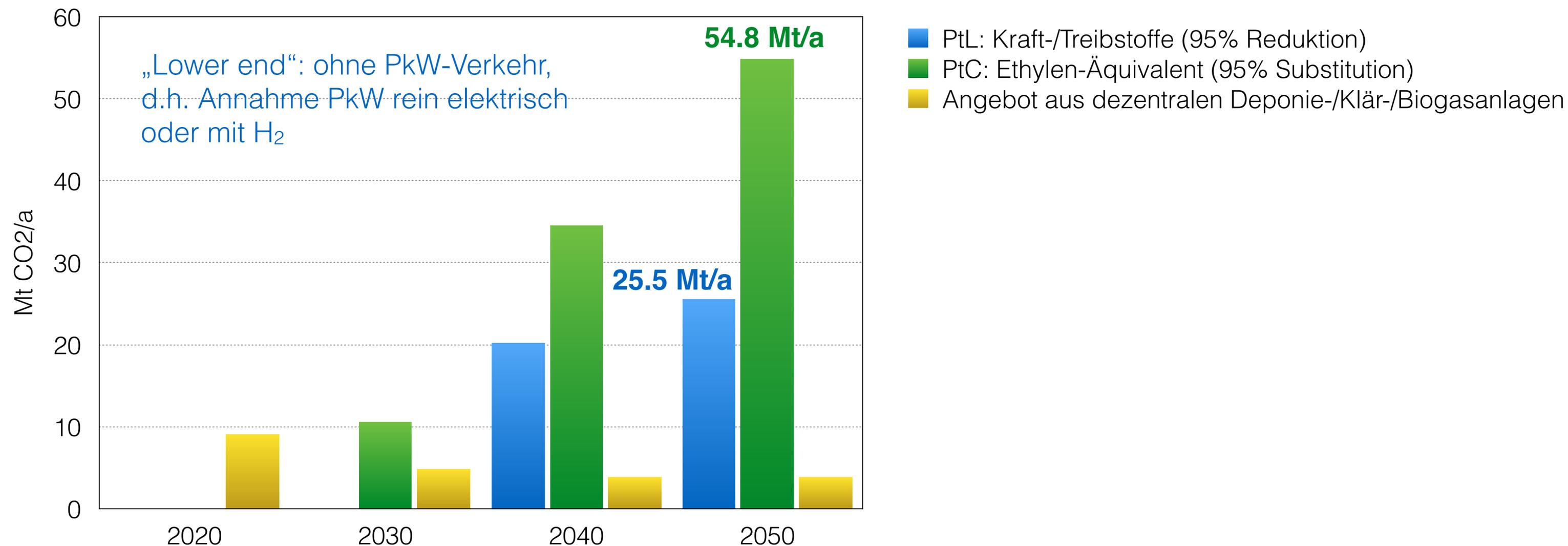
- 305 TWh/a CH<sub>4</sub> = 60.4 Mt/a CO<sub>2</sub>
- 552 TWh/a Diesel = 145.8 Mt/a CO<sub>2</sub>
- 282 TWh/a CH<sub>4</sub> = 55.8 Mt/a CO<sub>2</sub>

**gesamt = 262 Mt/a CO<sub>2</sub>**

**Quelle:** Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, UBA, Oktober 2013

# Erwarteter PtM-Bedarf Deutschland - WI / IZES, 2018

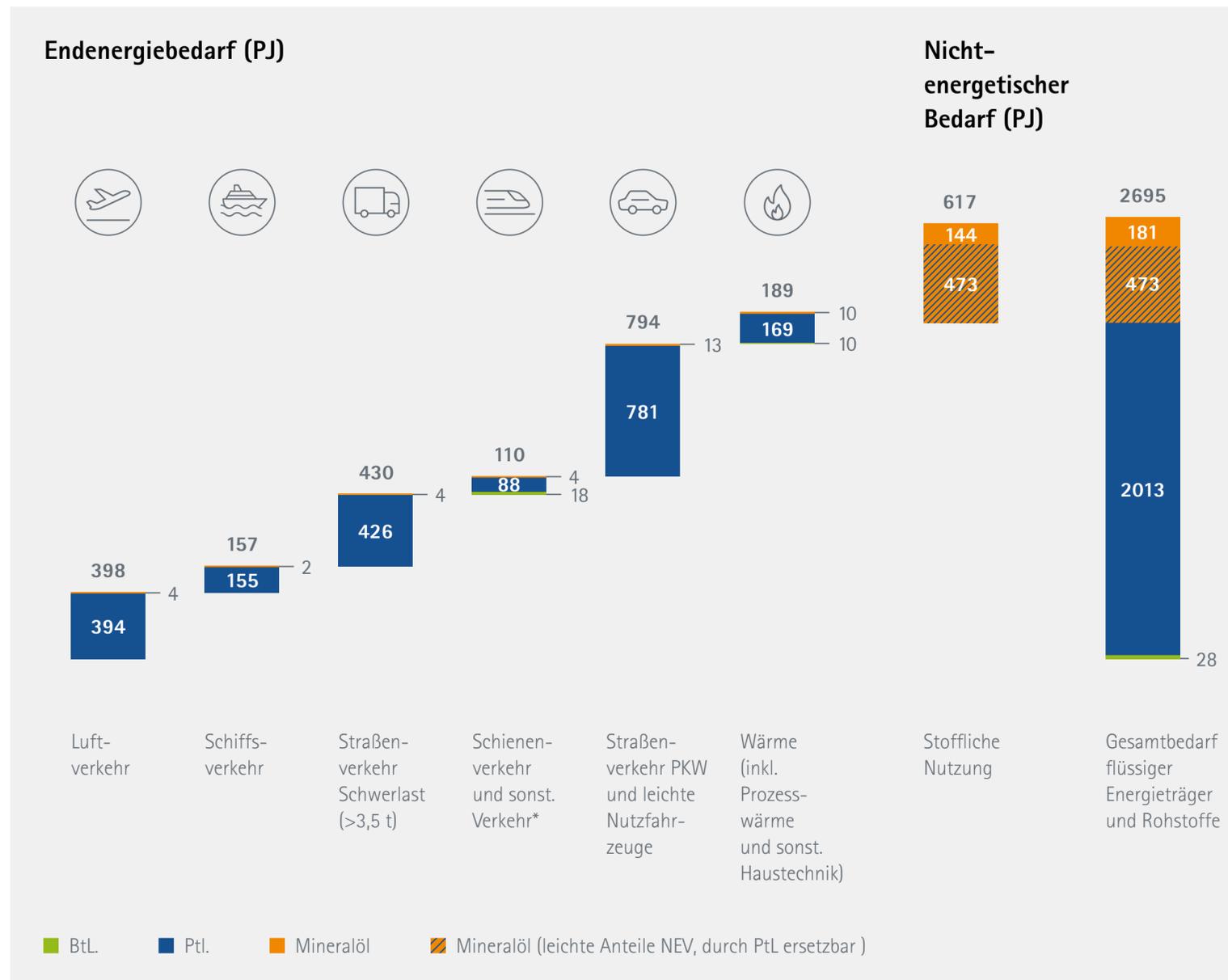
Bedarf an klimaneutralem CO<sub>2</sub> zur Herstellung strombasierter Kraft- und Treibstoffe sowie Chemikalien in Deutschland bis 2050



**Quelle:** Zahlen aus Viebahn et al., Technologiebericht 4.4 Verfahren der CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus Faulgasen und Umgebungsluft innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende, Wuppertal Institut und IZES gGmbH, 29. März 2018, <https://bit.ly/3hHTEkl>

# Erwarteter PtM-Bedarf Deutschland - Prognos AG / FHI UMSICHT / DBFZ, 2018

Abbildung 2: Einsatz flüssiger Energieträger in Deutschland im Jahr 2050 im Szenario PtX 95 in PJ



Quelle: eigene Darstellung, \*Landwirtschaft, Baugewerbe, öffentliche Verwaltung, Militär, NEV: Nichtenergetischer Bedarf

**Quelle:** Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende, Studie von Prognos AG, Fraunhofer UMSICHT und DBFZ im Auftrag von MVV, IWO, MEW, UNITI, Mai 2018, <https://bit.ly/2FLGHJJ>

TWh	Kraftstoff
131	10.9 Mt/a
559	46.5 Mt/a



„... the world's largest GTL plant and one of the world's largest, most complex and challenging energy projects ever commissioned.“

Quelle: Shell

- Hierfür würden 10 Großanlagen vom Typ Pearl GTL (Shell, Qatar) benötigt (140.000 bpd x 365 d ergibt 6.5 Mt/a)
- je nach Pfad zusätzlich 1.000 PJ CH<sub>4</sub> (278 TWh, 26 Mrd. m<sup>3</sup>, benötigt 55 Mt CO<sub>2</sub>) oder 1.600 PJ H<sub>2</sub> (445 TWh, 41 Mrd. m<sup>3</sup>)

# Welche Kraft-/Treibstoffe und auf welchem Weg?

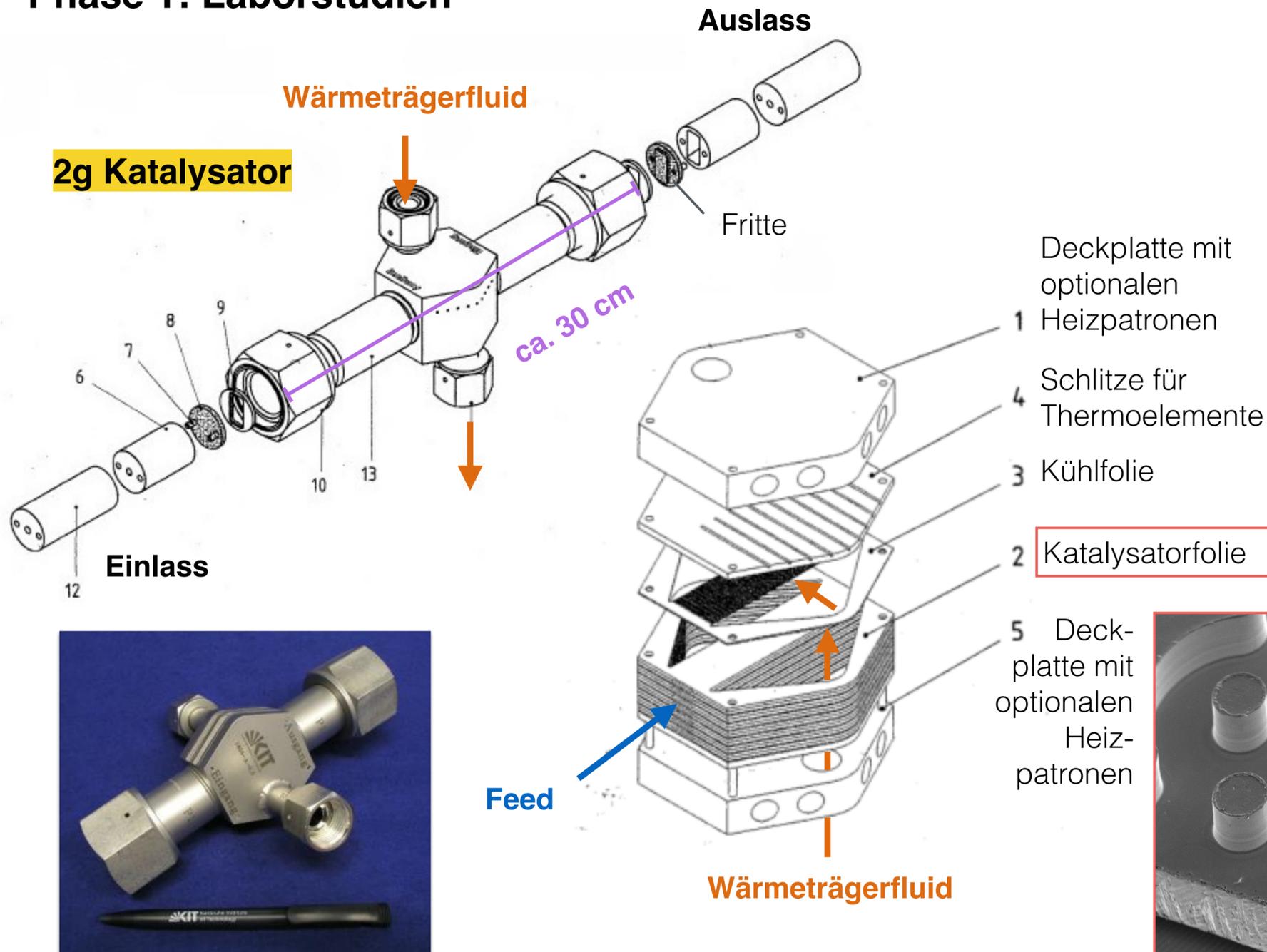
- **Primär drop-in Qualitäten** von Kerosin, Diesel, Benzin, um vorhandene Infrastrukturen (Verteilung, Lagerung, Nutzung) weiterhin nutzen und eine rasche Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes durch Beimischung erreichen zu können („Bestandsflotte“)

## Hauptrouuten:

- Fischer-Tropsch-(FT)-Synthese gefolgt von Raffinerieprozessen wie Cracken, Hydrieren, Isomerisieren
- Methanolsynthese gefolgt von Methanol-zu-Benzin, -Kerosin oder -Diesel
- **Perspektivisch Methan, Methanol oder Dimethylether (evtl. auch Oxymethylenether), Ammoniak (Verbrennung), aber auch Wasserstoff (primär Brennstoffzelle)** als Alternativen zu Diesel im Bereich Schiffs- und Schwerlastverkehr Straße/Schiene (benötigt neue Infrastruktur bzw. Antriebstechnik)
- **Internationale Zusammenarbeit**
  - Was wird importiert: Strom, Wasserstoff, Methanol / FT-Crude, die fertigen e-Fuels?
  - Fragen: Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom, Wasser und CO<sub>2</sub>, Infrastrukturen (Industrieanlagen, Energienetze, Pipelines, Häfen), wirtschaftliches und gesellschaftliches Umfeld, Wertschöpfung, etc.

# Mikroreaktoren - Schlüsseltechnologie für kompakte Syntheseanlagen

## Phase 1: Laborstudien

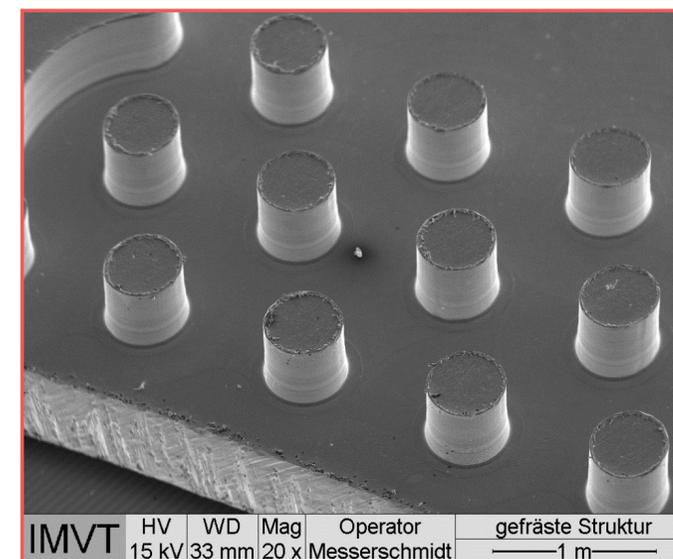


**2g Katalysator**



## Produktivität und Raum-Zeit-Ausbeute

	Produktivität (C <sub>5+</sub> pro Katalysatormasse)	Produktivität (C <sub>5+</sub> pro Reaktormasse)	Raum-Zeit- Ausbeute (C <sub>5+</sub> pro Reaktorvolumen)
KIT (IMVT)	2.1 g/gh	16.7 bpd/t	1785 kg/m <sup>3</sup> h
velocys	-	13 bpd/t <sup>1</sup>	1600 kg/m <sup>3</sup> h <sup>1</sup>
Oryx GTL - Sasol	-	8 bpd/t <sup>2</sup>	20.6 kg/m <sup>3</sup> h <sup>1</sup>
Literatur	1.4 - 2 g/gh <sup>3</sup>	-	-



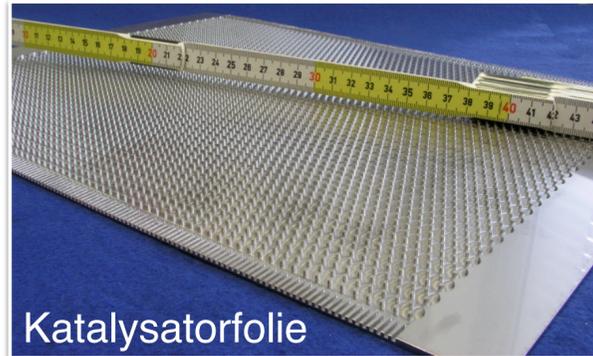
- 1) S. LeViness, FT Product Manager, Presentation "Velocys Fischer-Tropsch Synthesis Technology – Comparison to Conventional FT Technologies", AIChE Spring Meeting, San Antonio, Texas/USA (30-Apr-2013)
- 2) "2012 Interim Results", Presentation to analysts of the Oxford Catalysts Group 2012, [www.velocys.com](http://www.velocys.com)
- 3) C.H. Bartholomew, B. Young, History of Cobalt Catalyst Design for Fischer-Tropsch Synthesis, NGCS, Doha 2013

siehe auch: Myrstad et al., *Catal. Today* **2009**, 147, 301-304.

# Mikroreaktoren - Schlüsseltechnologie für kompakte Syntheseanlagen

## Phase 2: Validierung und Scale-up

### IMVT / INERATEC

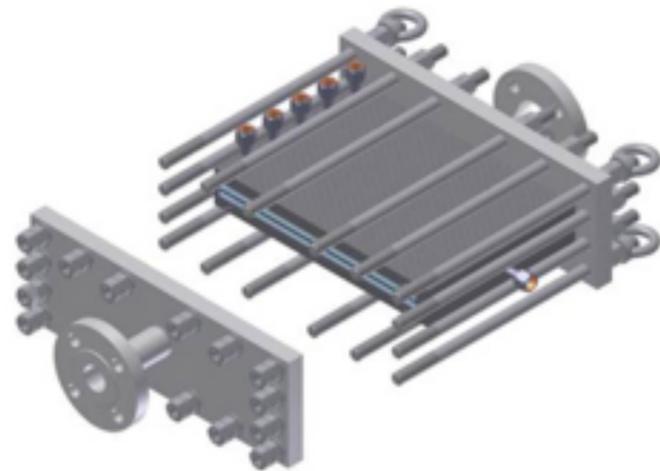


Katalysator wird als Pulver eingesetzt (50 - 200  $\mu\text{m}$ ) und wird nicht verdünnt mit Inertstoffen

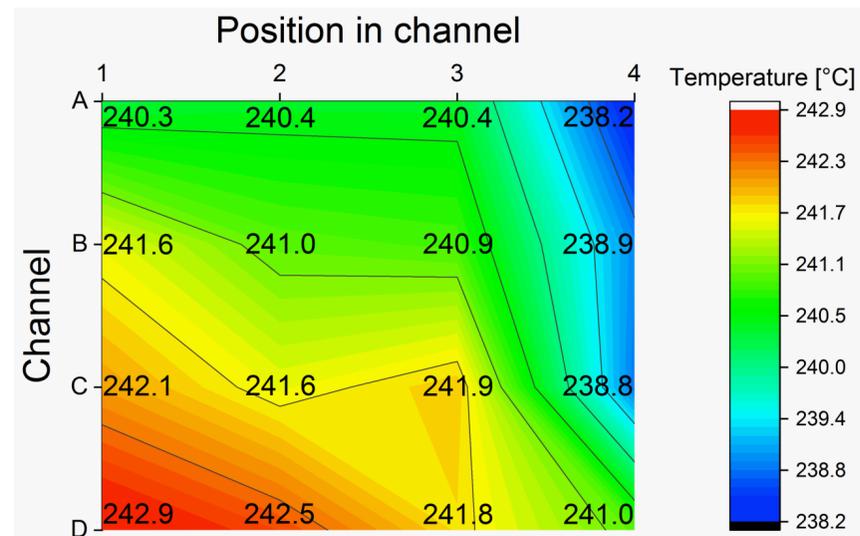
- Kühlung durch geschlossenen Wasser/Dampf-Kreislauf (20-40 bar)
- 30-40 l/min Synthesegas
- 5 kg/d FT Produkte



**120 g Katalysator**



**siehe auch:** [www.ineratec.com](http://www.ineratec.com)



## Prozessentwicklung mit Hilfe von Technikumsanlagen



**Produktaufarbeitung**



**FT-Synthese**



**Vollständige Prozesskette von CO<sub>2</sub> zu synthetischem Kraftstoff (5 kg pro Tag)**

Verbrennungstests beim DLR Stuttgart



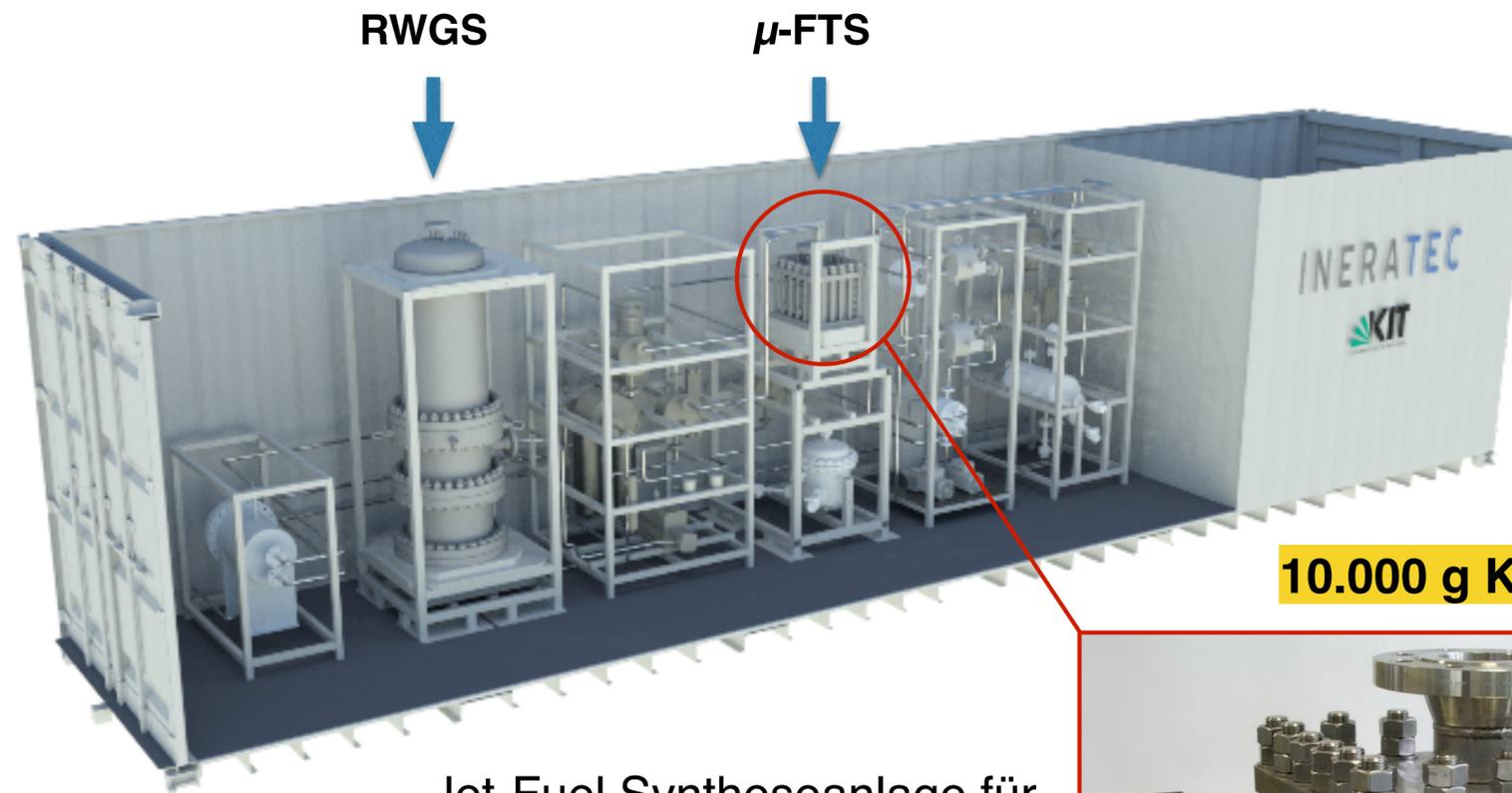
**RWGS (Syngas aus CO<sub>2</sub>)**



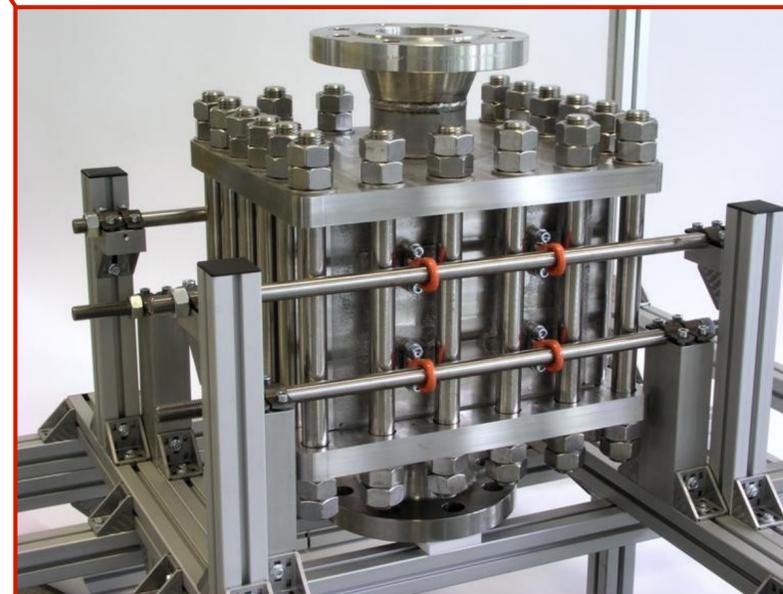
R. Dittmeyer et al., *Curr. Opin. Chem. Eng.* **2017**, 17, 108-125. doi:10.1016/j.coche.2017.08.001

# Mikroreaktoren - Schlüsseltechnologie für kompakte Syntheseanlagen

## Phase 3: Kommerzielle Reaktormodule und Demonstration unter technischen Bedingungen



10.000 g Katalysator



Jet-Fuel Syntheseanlage für  
Energy Lab 2.0 (200 L/d)



600 g Katalysator

- Stapeln
- Strömungsverteilung

- Bis zu 8 FTS Module pro Container möglich (1.600 L/d, entspricht etwa 1 MW H<sub>2</sub> Zufuhr)
- Neben CO<sub>2</sub> (und H<sub>2</sub>) hat die Anlage zwei weitere vor-konfigurierte Einlässe, einen für Synthesegas (z.B. von einer HT-Ko-Elektrolyse) und für reines CO (z.B. aus der CO<sub>2</sub> Plasmaspaltung)

INERATEC

Auszeichnungen



LOTHAR SPÄTH  
AWARD | 2018  
Für herausragende Innovationen  
in Wissenschaft & Wirtschaft



INNOVATIONSPREIS  
DER DEUTSCHEN  
GASWIRTSCHAFT  
2018



P. Pfeifer et al., WO 2017013003 A1, 2017

P. Piermartini et al., *Chem. Eng. J.* 2017, 313, 328–335, doi: 10.1016/j.cej.2016.12.076

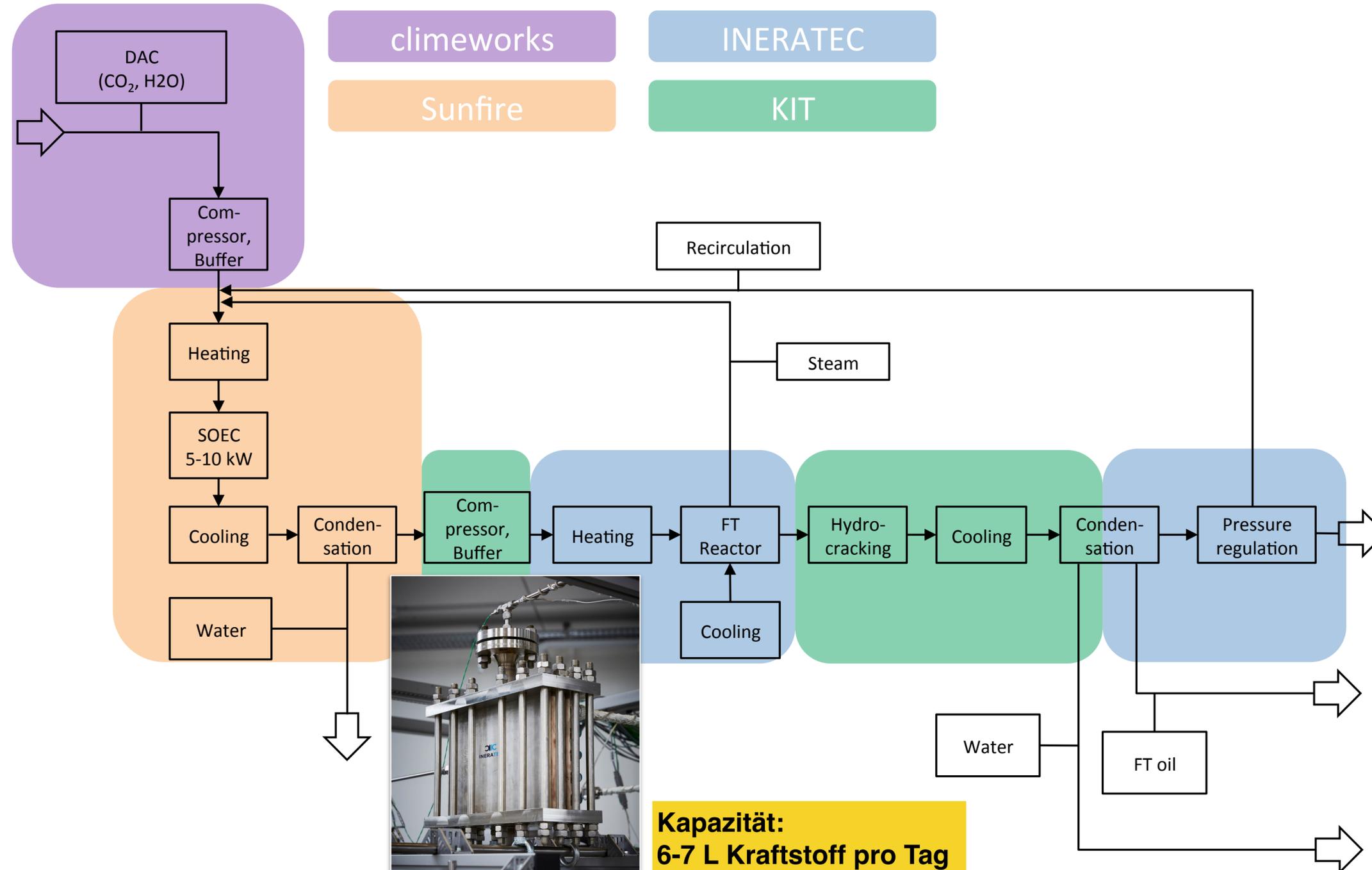
R. Dittmeyer et al., *Curr. Opin. Chem. Eng.* 2017, 17, 108-125, doi: 10.1016/j.coche.2017.08.001

# PtL-Containeranlage - Demonstration im Energy Lab 2.0 am KIT



# Prozessintegration für höhere Effizienz und reduzierte Kosten

## Kopernikus-Projekt P2X (Phase 1: 2016-2019) - Integrierte Anlage zur Kraftstoffsynthese aus dem CO<sub>2</sub> der Luft



### Konzept

- Nutzung des in der FTS-Stufe erzeugten Dampfes für die Hochtemperatur-Ko-Elektrolyse (Ko-SOEC) und/oder in der DAC-Stufe
- Rückführung nicht umgesetzten Synthesegases und gasförmiger Nebenprodukte (FTS, hydrierende Spaltung/Isomerisierung) in die Ko-SOEC-Stufe

### Ergebnisse der Prozessanalyse

- Kohlenstoffausnutzung 90-100%
- Gesamtenergieeffizienz 50-60% (PtL, inkl. Energiebedarf für CO<sub>2</sub> Gewinnung aus Luft) für Anlagengrößen von 100 kW und darüber

# Kopernikus Projekt P2X - Gesamtergebnis Phase I (2016-2019)

- Weltweit erste Komplettanlage zur Kraftstoffsynthese aus dem CO<sub>2</sub> der Umgebungsluft und elektrischer Energie
- Stoffliche und thermische Integration der CO<sub>2</sub>-Gewinnung aus Luft, Hochtemperatur-Ko-Elektrolyse von CO<sub>2</sub> und Wasserdampf, ultrakompakter Fischer-Tropsch Synthese und Hydrierender Spaltung/Isomerisierung



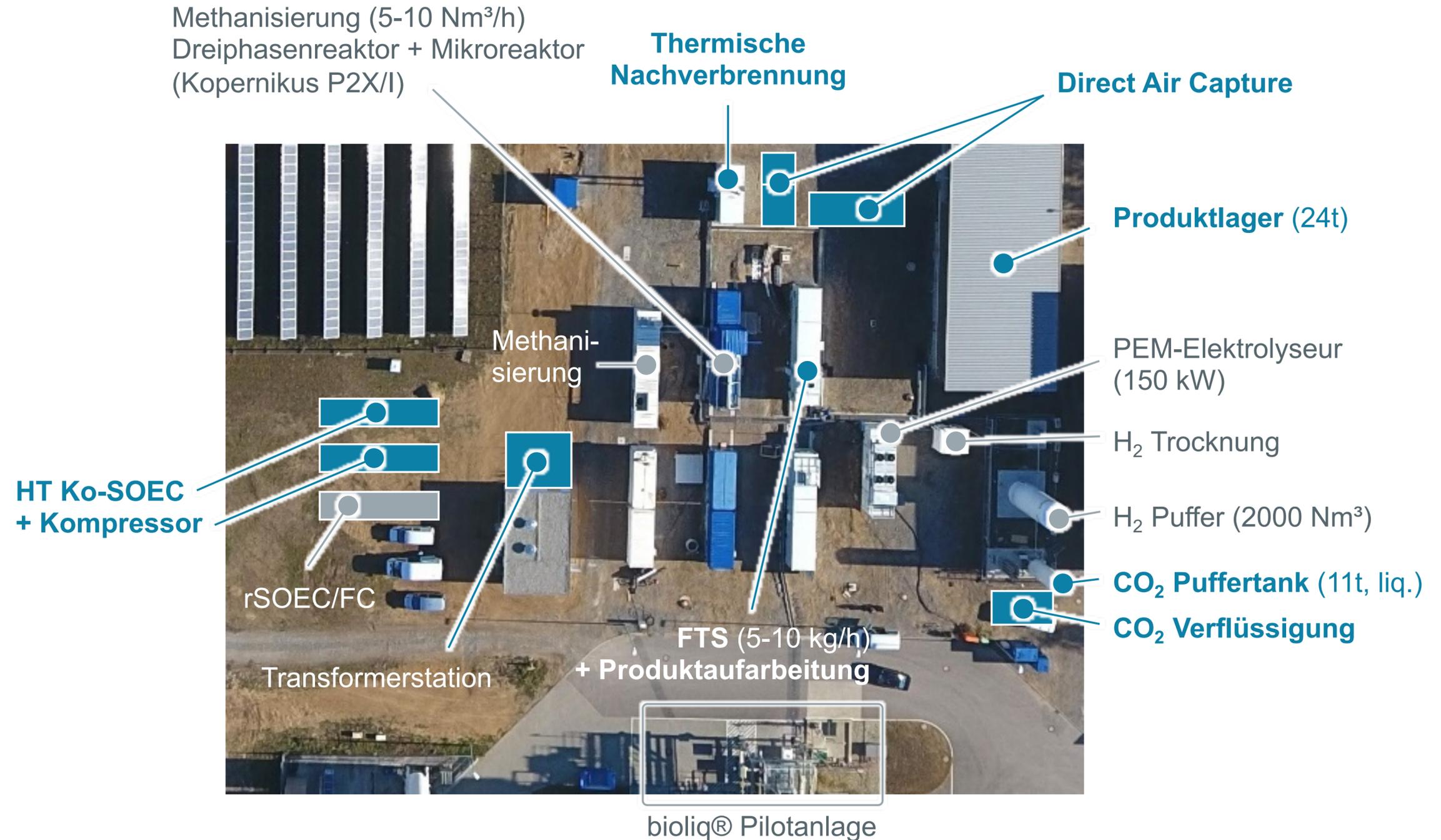
Mai/Juni 2019

- Alle Komponenten erfolgreich getestet und installiert
- Ziele für integrierte Anlage erreicht: Validierung des Zusammenspiels der Komponenten und 100 Liter Kraftstoff
- Weitere Betriebskampagne im Frühjahr 2020
- LCA / LCC: Roadmap V 2.0 verfügbar; Zeigt Bereiche, Unsicherheiten und Potenzial der technischen, ökonomischen und ökologischen Leistungskennzahlen

# Kopernikus Projekt P2X - Programm für Phase II (2019-2022)

## Ziele:

- Scale-up auf 200-300 L/d
- Validierung der Betriebsstrategien (Wärmeintegration, Wassermanagement, Dynamik, Betrieb mit und ohne Gasrückführung)
- Weiterentwicklung der Produktaufarbeitung, um flexible Herstellung von entweder Diesel, Kerosin oder Ottokraftstoff zu ermöglichen
- Hierzu Integration der neuen Komponenten: 250 kW<sub>el.</sub> Ko-SOEC System und 1.400 t/d DAC Kollektorsystem in den Energy Lab 2.0 Anlagenverbund



# Erste kommerzielle Anlage für wasserstoffbasierten Flugkraftstoff



- **Standort:** Industriepark Herøya, 150 km südwestlich von Oslo
- **Partner:** Sunfire GmbH, Dresden Climeworks AG, Zürich, Paul Würth SA, Luxemburg, Valinor AS, Stabanker
- **Verfahren:** DAC, Co-SOEC und FT-Synthese; Aufbereitung in der Raffinerie; FT-Abwärmenutzung für Co-SOEC erhöht Menge an FT-Crude pro kWh elektrischer Energie um 30%
- **Kapazität:** zunächst 10 Mio. L/a (8.000 t/a); hier 20-30% des CO<sub>2</sub> aus DAC; später Erweiterung auf 80.000 t/a; dann 100% des CO<sub>2</sub> aus DAC
- **Strombezug:** Ökostrom aus Wasserkraft
- **Investitionssumme:** oberer 2-stelliger Millionenbereich
- **Kerosinpreis:** deutlich unter 2 €/L, später 1.00 - 1.20 €/L
- **Baubeginn, Inbetriebnahme, Erweiterung:** 2021, 2023, 2026



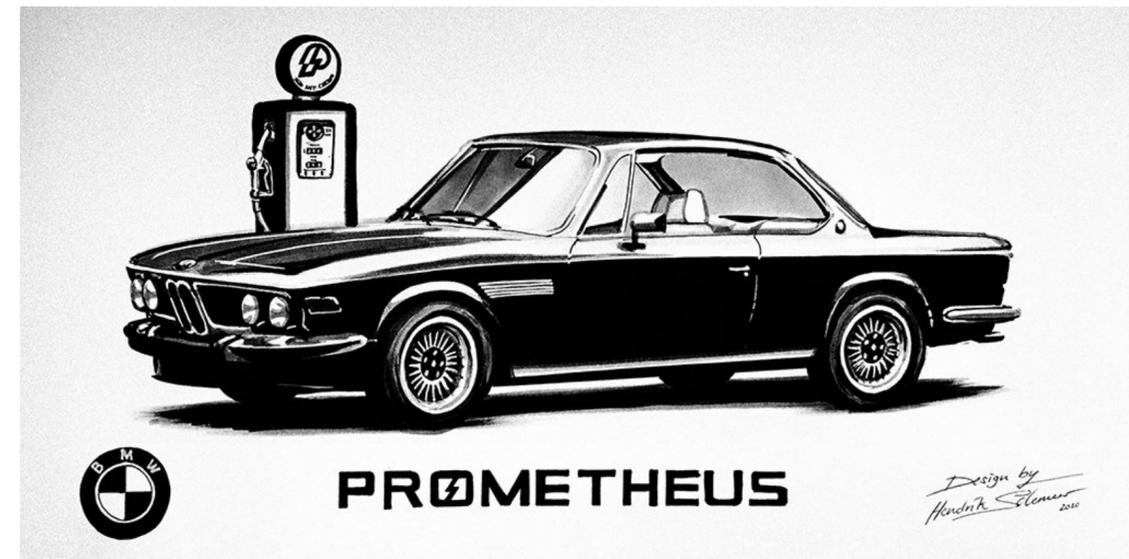
**Quelle:** Business Portal Norwegen, 09.06.2020, <https://bit.ly/2ZTI3tJ>; future:fuels, 14.09.2020, <https://bit.ly/3mI89IP>

# Prometheus Fuels - Is this the real life? Is this just fantasy?



## Rob McGinnis, founder of Prometheus Fuels:

- „We make gasoline from air water and electricity.
- Today, gasoline sells for \$3.50 a gallon in California. Next year, we will be selling it for \$3 per gallon“.



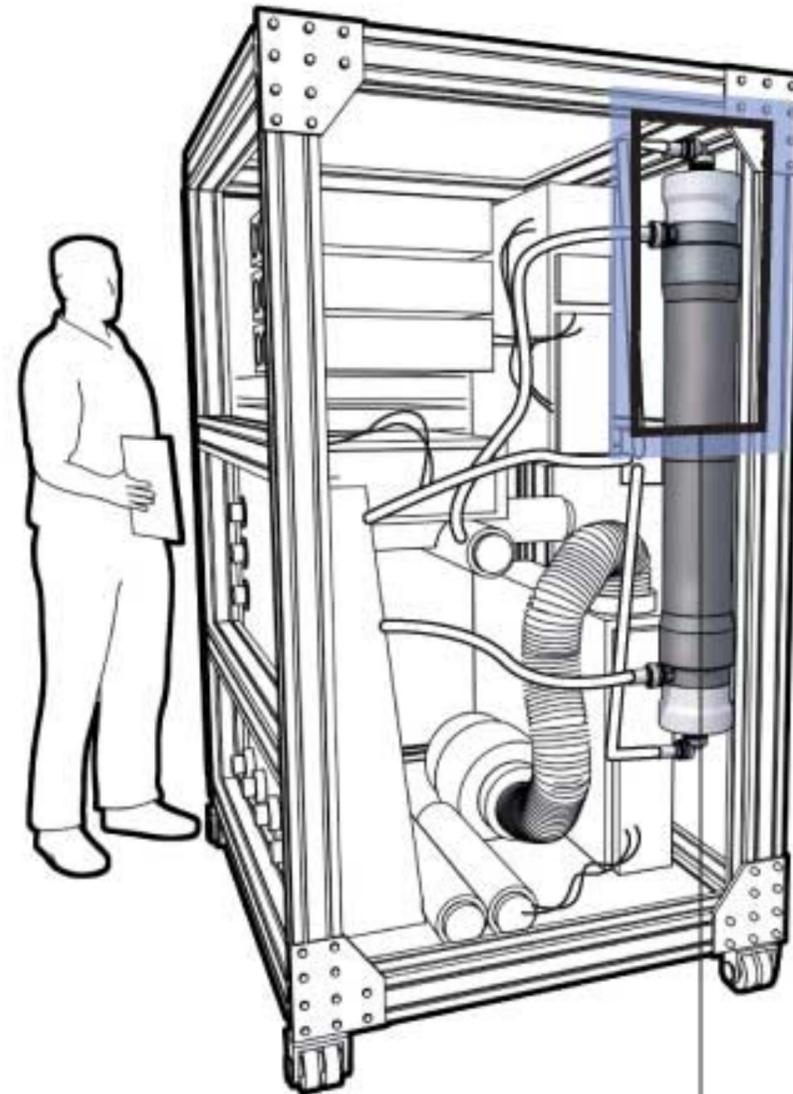
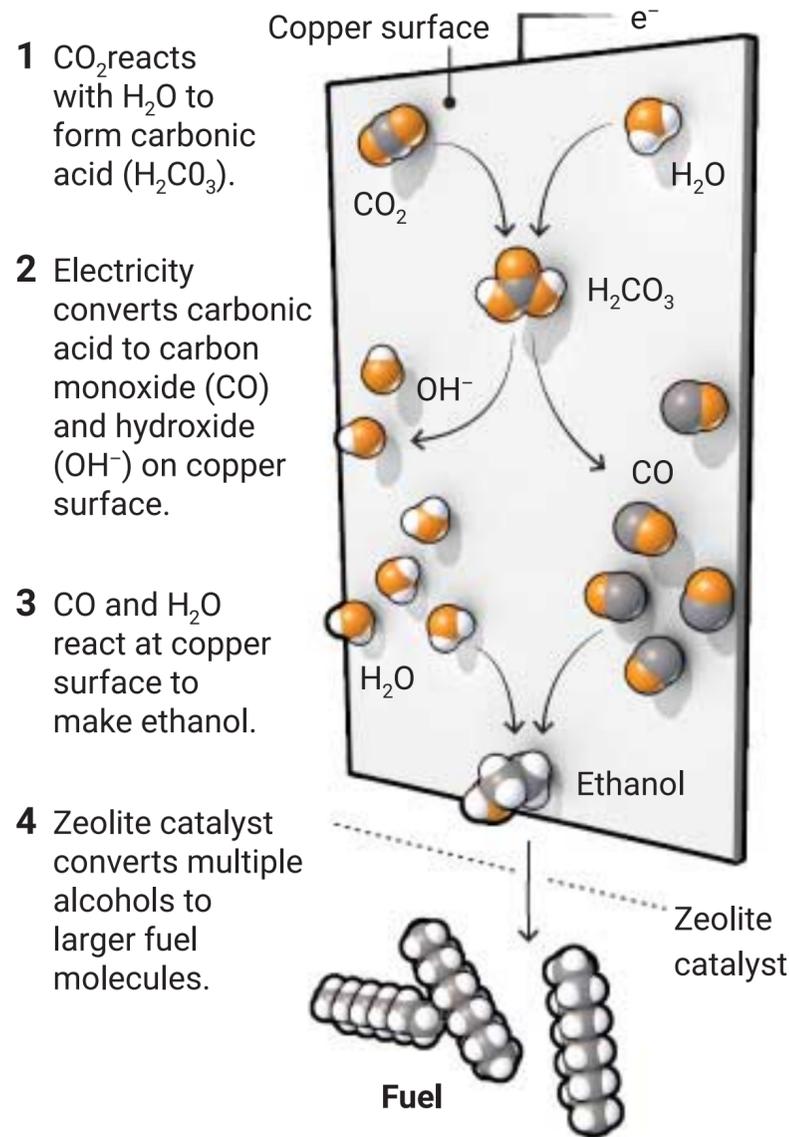
**Quelle:** R.F. Service, Science 2019, 365, 6448, 18, <https://bit.ly/33OLwtD>

[www.prometheusfuels.com](http://www.prometheusfuels.com)

# Integriertes System basiert auf elektrochemischer Reduktion von CO<sub>2</sub> zu Ethanol

## Combustion in reverse

Electricity and a copper surface convert CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O into ethanol, an alcohol that can link into longer fuel molecules.



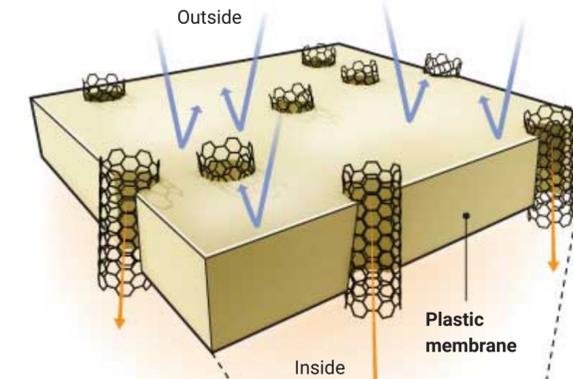
## A prototype fuelmaker

Prometheus's machine houses the entire process, from CO<sub>2</sub> capture to ethanol synthesis. If the device is powered with renewable electricity, using the fuel releases zero net greenhouse gases.

## Filter

## The ultimate filter

Cheap plastic sheets house trillions of carbon nanotubes per square meter, which zip alcohols through (orange) while blocking H<sub>2</sub>O (blue).

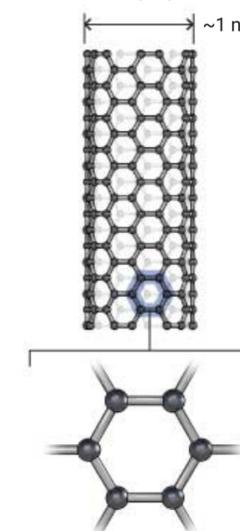


## Separating fuel from water

A mix of H<sub>2</sub>O and fuel enters the filter. Fuel travels through the nanotubes into the core of the fibers, where a vacuum draws it out.

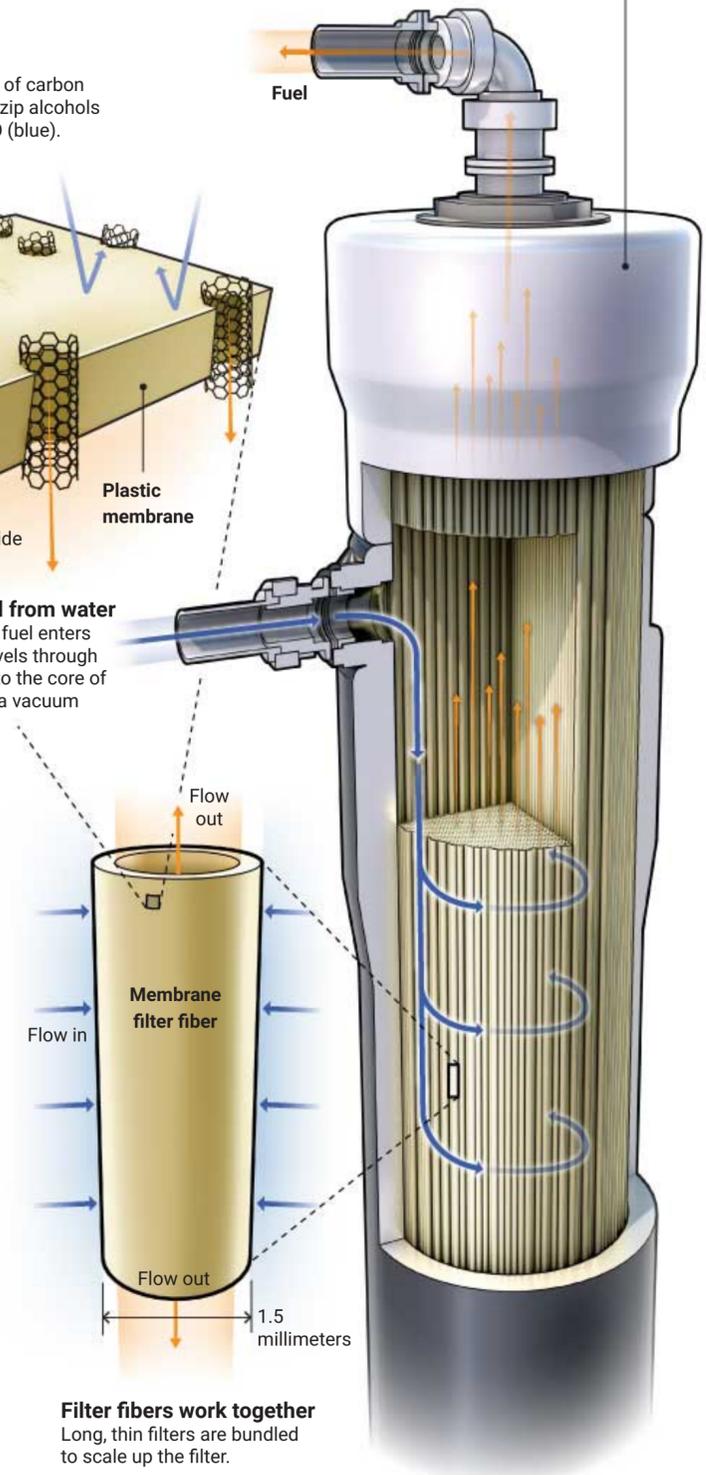
## Carbon nanotubes

For filtering fuel, the best hollow carbon tubes are about 1 nanometer (nm) in diameter.



## Atomic pattern

Connected rings of carbon atoms roll up into hollow tubes.



## Filter fibers work together

Long, thin filters are bundled to scale up the filter.

Quelle: R.F. Service, Science News, 03.07.2019, <https://bit.ly/3iMCPX8>

## Ausblick - PtM Wunschliste

- **PtM Masterplan** mit internationalen Partnerschaften
- **Markteinführungsprogramm für PtM**, um **Markthochlauf der Elektrolyse** zu ermöglichen
- Perspektivisch **unvermeidbare Punktquellen nutzen**, **parallel** auch **Markthochlauf DAC** forcieren
- **Maximaler nachhaltiger Ausbau der EE-Stromerzeugung** im Inland
- **Flexible dezentrale PtL Anlagen** für Anwendungen im Inland und Standorte mit wenig Infrastruktur
- **Internationale PtL Großprojekte** an bevorzugten Standorten für EE auf Basis verfügbarer Technologien **über die gesamte Wertschöpfungskette** von der Bereitstellung von Strom, Wasser und CO<sub>2</sub> bis hin zur Markteinführung der e-Fuels / e-Chemicals; entscheidend ist eine **für beide Seiten attraktive Projektgestaltung**
- **Neuregulierung der Energiemärkte** inkl. faire steuerliche Besserstellung für nachhaltige Energieträger (auf Basis des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks), um Hemmnisse beim nachhaltigen Umbau des Energiesystems zu beseitigen
- Besser **nicht weiter auf die „silver bullet“ hoffen**, **sondern jetzt** mit den besten verfügbaren Optionen **starten**, denn die Zeit drängt
- ...

# Vielen Dank...

- an die Kollegen am IMVT für ihre Anstrengungen in den verschiedenen Projekten
- dem KIC InnoEnergy für die Förderung des Europäischen Projekts SYNCON
- dem China Scholarship Council (CSC) für ein Stipendium (Chenghao Sun)
- der Peter und Luise Hager Stiftung für die Förderung von zwei Doktorarbeiten (Tobias Jäger, Hannah Kirsch)
- der Vector-Stiftung für die Förderung der Projekte DYN SYN, CO2mPactDME und CO2ELSA (Marcel Loewert, Giulia Baracchini, Soudeh Banivaheb, Seyedehfateme Hosseini)
- der Helmholtz Gemeinschaft und den Bundesministerien für Bildung und Forschung (BMBF) und für Wirtschaft und Energie (BMWi) sowie dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und die Künste Baden Württemberg für die Förderung der Energy Lab 2.0 Forschungsinfrastruktur
- dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung unserer Ausgründung INERATEC durch das nationale eXist Programm und für die Förderung des Projekts PowerFuel
- dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Kopernikus Projekts P2X
- dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und die Künste Baden Württemberg für die Förderung des Projekts reFuels
- **und Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit!**



# Zum Nachhören und -sehen



© Dr. WhatsOn (YouTube)



© KIT (YouTube)



pdf download, 18 MB

**DLF Radio-Feature „Power-to-X für die Energiewende“,  
<https://bit.ly/2xd0eOV>**



**3sat Mediathek „Wasserstoff Grüner Boom“,  
<https://bit.ly/35UDHFF>**

