Carbon Capture and Usage – CO2 als Rohstoff

RENN.*west*
WinterSchool on Corporate Climate Management
Modul 3 - 01.04.22

Prof. Dr.-Ing. Susanne Hartard
Ecoliance Rheinland-Pfalz e.V. und
Umwelt-Campus Birkenfeld

Umwelt-Campus Birkenfeld | HOCHSCHULE TRIER

Carbon Capture and Usage – CO2 als Rohstoff

1. CO2-Quellen nach dem Kohleausstieg
2. Abscheidetechnik CO2 aus dem Rauchgas
3. Direct Air Capture – CO2 aus der Luft gewinnen
4. Praxis: CO2-Usage – Polymere und e-fuels als Rohstoffersatz

Prozessbedingte Punktemissionen werden weiter zurückgehen, Ergänzung durch Direct Air Capture

Umwelt-Campus Birkenfeld | HOCHSCHULE TRIER

Zementindustrie: 0,6 t CO2 je 1 t Zement
zwei Drittel davon entfallen auf rohstoffbedingte Prozessemissionen, nur ein Drittel auf Brennstoffemissionen (VDZ 2021).

Stahlindustrie: 1,37 t CO2 je t Rohstahl (D)
(Wirtschaftsvereinigung Stahl 2020).

Grundstoffchemie: Die folgenden Grundstoffe verursachen während ihrer Produktion besonders hohe Treibhausgasemissionen:

Ammoniak: 1,8 t CO2 je t Ammoniak
(Haber-Bosch-Synthese-> N-Düngemittel)
Ethylen, Propylen sowie die Aromaten Benzol, Toluol und Xylol
Methanol, Chlor, Industrieruß

Zum Vergleich:

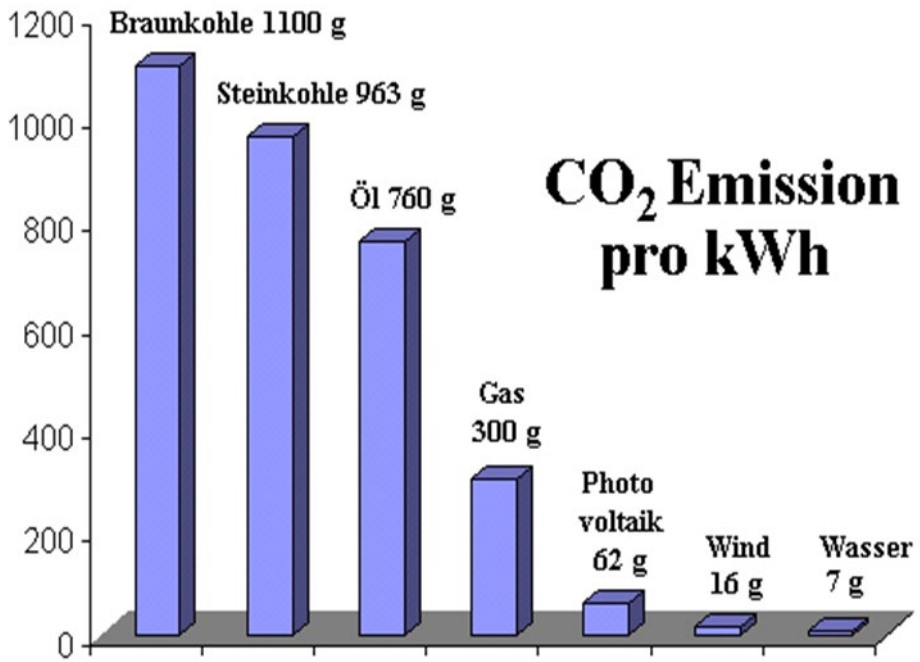


Tabelle 7: Übersicht über mögliche CO_2-Quellen in Deutschland; Daten aus: Assen et al. (2016), DEHSt (2018), Hoppe (2018), UBA (2019a), EPRTR (2019); [1]auf Basis von Primärrohstoffen

CO_2-Quelle	CO_2-Konzentration	Anzahl Anlagen in Deutschland
Atmosphäre	0,04 %	--
Ammoniakherstellung	bis zu 100 %	5
Biogasherstellung	30 - 50 %	9.209
Herstellung von Glas und Keramik	keine Daten	82 (Glas) 143 (Keramik)
Herstellung von Eisenmetallen[1]	17 – 35 %	6
Herstellung Nichteisenmetallen[1]	keine Daten	>7
Herstellung von Kalk und Zement	14 – 33 %	76
Herstellung von Soda	keine Daten	6
Müllverbrennung	10 %	68
Petrochemische Prozesse	4 – 10 %	116

Die verschiedenen Szenarien in RESCUE [UBA 2019] weisen zwischen 8,1 Millionen und 18,7 Millionen Tonnen verbleibende CO2-Emissionen aus Zement-, Kalk- und Glasherstellung aus.

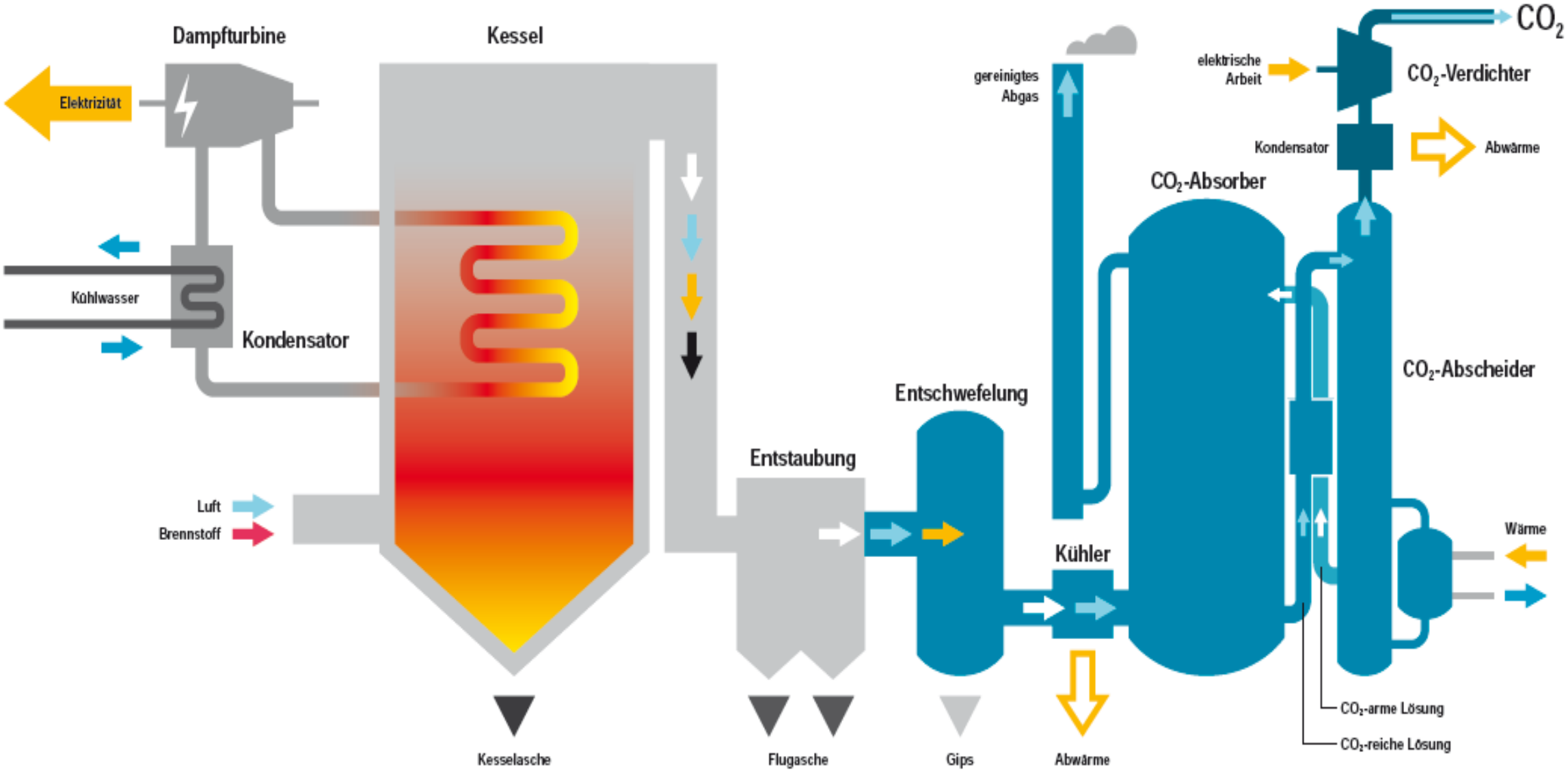
Quelle: Stefan Bringezu, Simon Kaiser, Sebastian Turnau (2020) Center for Environmental Systems Research (CESR) Universität Kassel, BMBF-Projekt CO2Net+

Kohlenstoffabscheidung (aus dem Rauchgas): Drei Techniklinien:

- **Post-Combustion:** CO2-Abtrennung aus dem Rauchgas (z.B. chemische Absorption über die Aminwäsche (geeignet für Nachrüstungen)
  Kraftwerk Niederaußem (2009-zur Abschaltung, ein Kraftwerkblock)
  Post-Combustion 2. Generation: Carbonate-Looping, Membranverfahren

- **Oxyfuel-Verfahren:** CO2-Aufkonzentration im Rauchgas durch eine sauerstoffgeblasene Verbrennung (Kraftwerk Schwarze Pumpe bis 2008-2014)
  Kombimethoden im Test: Zementwerk Italien (Vernasca): Calcium-Looping+Oxyfuel

- ***Pre-Combustion:*** *CO2-Abtrennung aus dem reformierten Synthesegas einer Vergasungsanlage (wenig Chancen auf kommerz. Umsetzung)*

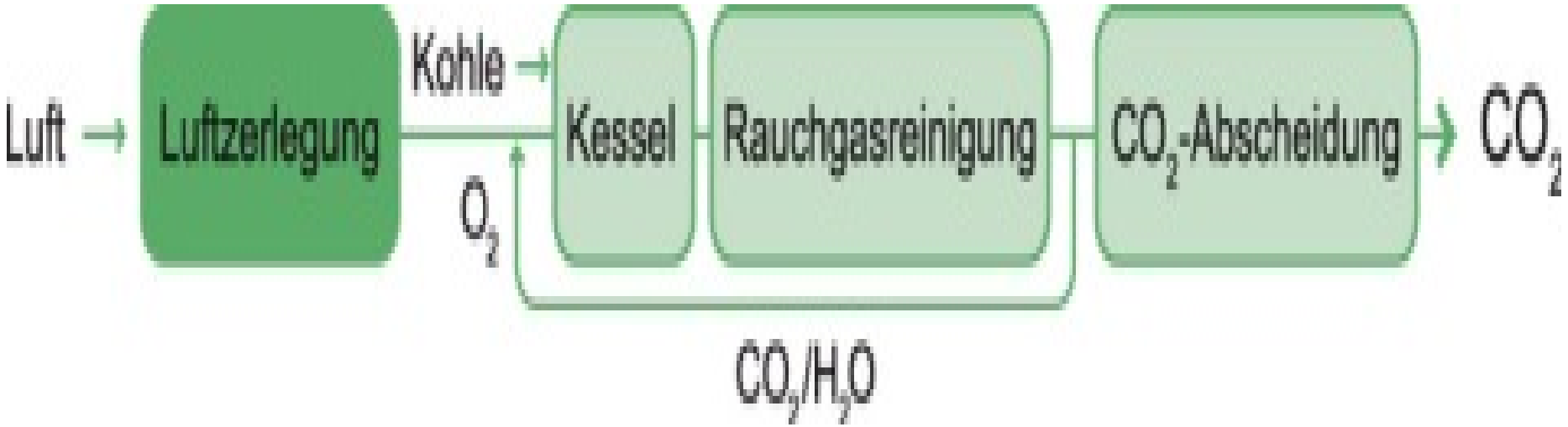


CO_2-Abtrennung nach der Verbrennung (Post-Combustion)

Quelle: Vattenfall

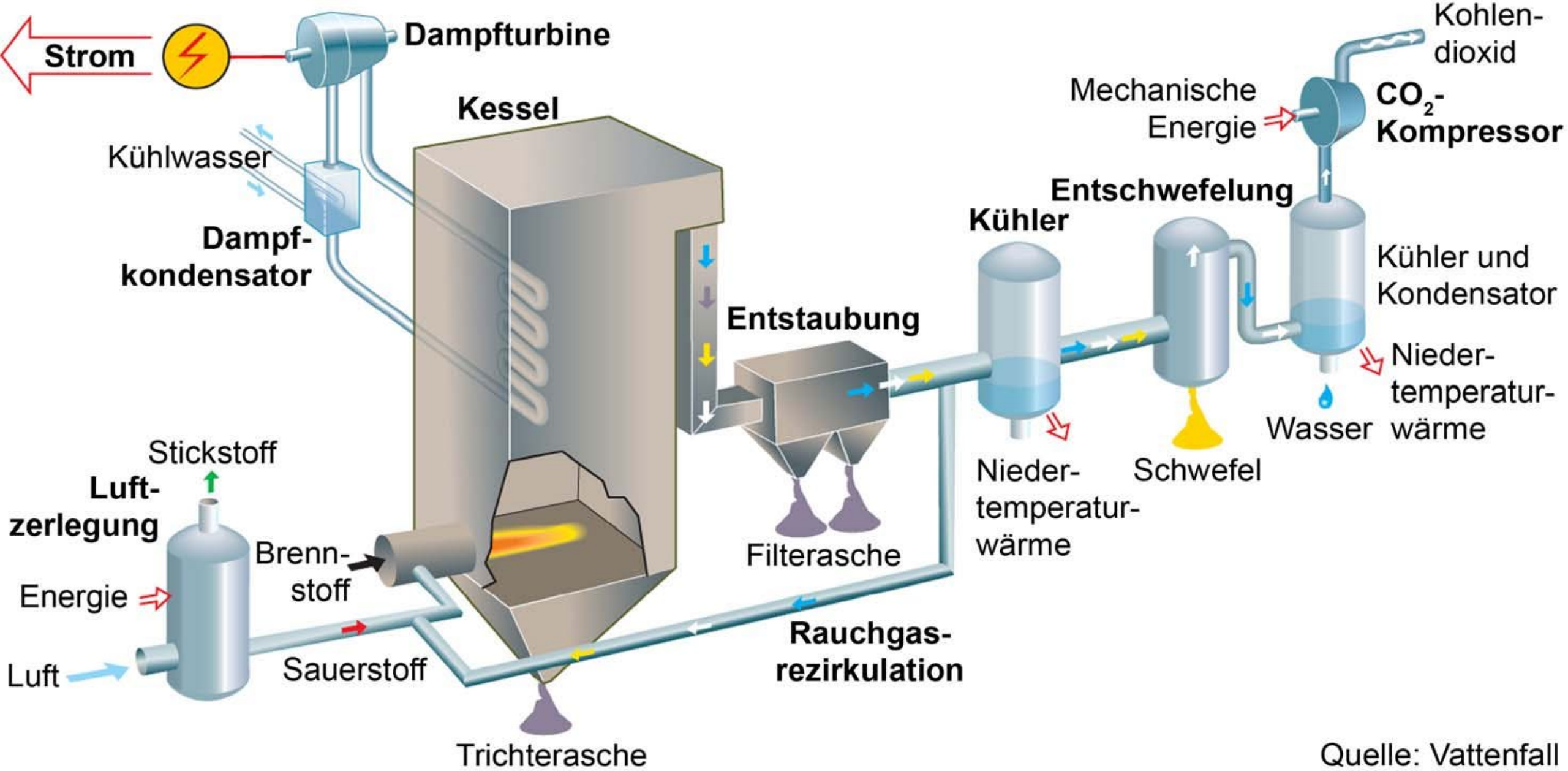
Verbrennung mit reinem Sauerstoff (Oxyfuel-Verfahren)

Kohle, Gas oder Biomasse werden in einer Atmosphäre aus reinem Sauerstoff verbrannt.
Das CO2-Wasserdampf-Gemisch kühlt ab.
Der Dampf kondensiert zu Wasser, das CO2 bleibt übrig.



Das Oxyfuel-Verfahren findet in Glas- und Stahlschmelzöfen Anwendung,
Pilotanlage in Deutschland: Schwarze Pumpe (2008-2014) und in Callide (Australien).
Das Verfahren eignet sich nicht für die Nachrüstung (Veränderung am Brenner und Feuerraum).
Derzeit keine Großanlagen im Bau oder Betrieb, aber Kombinationsanlagen sind im Test (Zementindustrie).

Oxyfuel-Verfahren



Quelle: Vattenfall

Direct Air Capture

-> CO2 aus der Luft entziehen
-> Chance zu Negativemissionen

Verfahren:

Ein Material ad- oder absorbiert das CO2 aus der Luft.
Damit sich das CO2 nutzen oder unterirdisch speichern lässt, muss es wieder vom Filter getrennt werden. Hierfür wird erneuerbare oder klimaneutrale Energie benötigt (Abwärme Müllverbrennungsanlage, Geothermie).

Direct Air Capture- Pilotanlage in der Schweiz

Umwelt-Campus Birkenfeld | HOCHSCHULE TRIER

Climeworks-Anlage
in Hinwil, Kanton Zürich, Schweiz
eröffnet 2017
Dach einer Müllverbrennung:
Abwärme
CO2->Gewächshaus-Gas
zur Wachstumsförderung

Bild: Climeworks, Julia Dunlop

Direct Air Capture (DAC) zwei technische Wege:

Umwelt-Campus Birkenfeld | HOCHSCHULE TRIER

Adsorption und Desorption (Niedrigtemperatur-Prozess: **100 °C**)

Schweizer Firma Climeworks: CO_2 zunächst über eine organisch-chemische Adsorption an ein Sorptionsmittel gebunden, Regeneration durch Niedertemperaturwärme (Vakuum, 100 °C)
Filtermaterial mit porösen Granulaten, auf deren Oberfläche Aminverbindungen abgeschieden werden.
Temperaturwechsel-Adsorption (TSA) in Kombination mit **Druckwechsel-Adsorption** (PSA) ermöglicht die Integration von Abwärme aus Elektrolyseuren sowie von Feuchtigkeit, die nach dem Durchlaufen des Prozesses als Wasser zur Verfügung steht.

Absorption und Kalzinierung (Hochtemperatur-Prozess: >**850 °C**)

Firma Carbon Engineering (Kanada) CO_2 wird mit Kaliumhydroxid (KOH) als wässrige Lösung absorbiert. Das aus der Absorption resultierende wässrige Kaliumkarbonat (K_2CO_3) wird in einem Pelletreaktor zu Calciumcarbonat ($CaCO_3$) ausgefällt und durch Kalzinieren in CO_2 und Calciumoxid (CaO) zerlegt und zu Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) hydratisiert. Erdgasbrenner und Stromerzeugung über Gasturbine.

Ökobilanz –

Direct Air Capture im Vergleich

Madhu, K., Pauliuk, S., Dhathri, S., Creutzig, F., 2021,
Understanding environmental trade-offs and resource demand of direct air capture technologies through comparative life-cycle assessment, Nature Energy

TSA-Verfahren, Fa. Climeworks

300 kg CO2-eq: um 1 Tonne CO2 aus der Luft zu filtern

Hochtemperatur-Verfahren (HAT-Aq) Fa. Carbon Engineering:
580 kg CO2-eq: um 1 Tonne CO2 aus der Luft zu filtern
Diese Werte liegen in einem Szenario mit CO2-armer Wärme- und Stromversorgung deutlich niedriger, nämlich bei 150 und 260 Kilo.

Perspektive: DAC-Kosten

2011: 600 $ pro entfernter Tonne CO2 (Schätzung: American Physical Society)
Ziel: 100 $ pro entfernter Tonne CO2

Tab. 1: Aktuelle und zukünftig erwartete spezifische Kosten von DAC-Verfahren in €/t CO_2 (bei einem Umrechnungskurs von 0,9 €/US$)

€/t CO_2	$DAC_{highTemp}$		$DAC_{lowTemp}$		
	Carbon Engineering	Fasihi et al. [7]	Climeworks	Global Thermostat	Fasihi et al. [7]
Aktuell	540		540	45	
Prognose	85-117 („n'te Anlage")		180 (2020) 90 (2025/30)	14-45	
Prognose, gemittelt		54-71 (2050)			38-54 (2050)

Quelle: Viebahn, Scholt, Zelt (2019)

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE TAGESFRAGEN 69. Jg. (2019) Heft 12

Erdgasaufbereitung (hochkonzentriert): Kosten nach Schätzungen der International Energy Agency (IEA) bei nur rund **15 bis 25 US-Dollar pro Tonne** abgeschiedenem CO2.

Rauchgas der Zement- oder Stahlindustrie: bis auf **120 US-Dollar pro Tonne CO2 (**Abgase „nur" rund 15-30% CO2)

Direct Air Capture-Anlage auf Island (eröffnet 09/2021)

Geothermie als Energiequelle, ORCA

Fa. Climeworks/Fa. Carbfix

Ziel: Capture von 4.000 t/Jahr CO2

CCS-Pilot: Mineralisierung in Basaltgesteinen: 27 t Wasser j t CO2,

Photo: Golem

CO_2 ALS ROHSTOFF

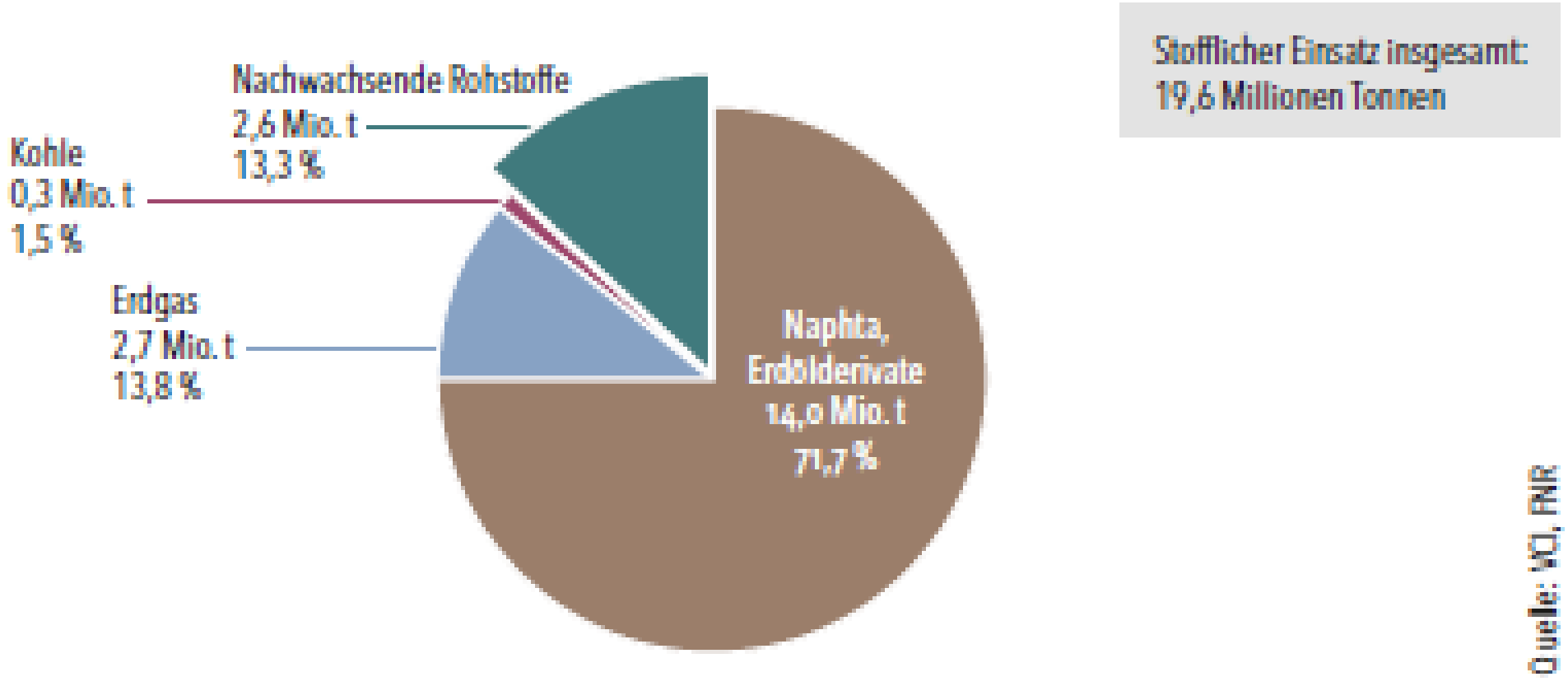
Kohlenstoffdioxid (CO_2) aus Rauchgasen oder als Nebenprodukt chemischer Prozesse kann ganz direkt oder nach einer chemischen Umwandlung als Teil einer Kohlenstoffverbindung in Materialien und Energieträgern nützlich verwendet werden. Solche Technologien fasst die Bezeichnung Carbon Capture and Utilization (CCU) zusammen.

- Kohlenstoffdioxid
- Kohlenstoffverbindungen
- Umwandlung
- CO2-Abgabe an Atmosphäre
- CO2-Aufnahme aus Atmosphäre
- Nahe Zukunft
- Ferne Zukunft

© IASS 2021, Infografik: Mario Mensch

Die große Transformationsaufgabe: Rohstoffbasis chemische Industrie

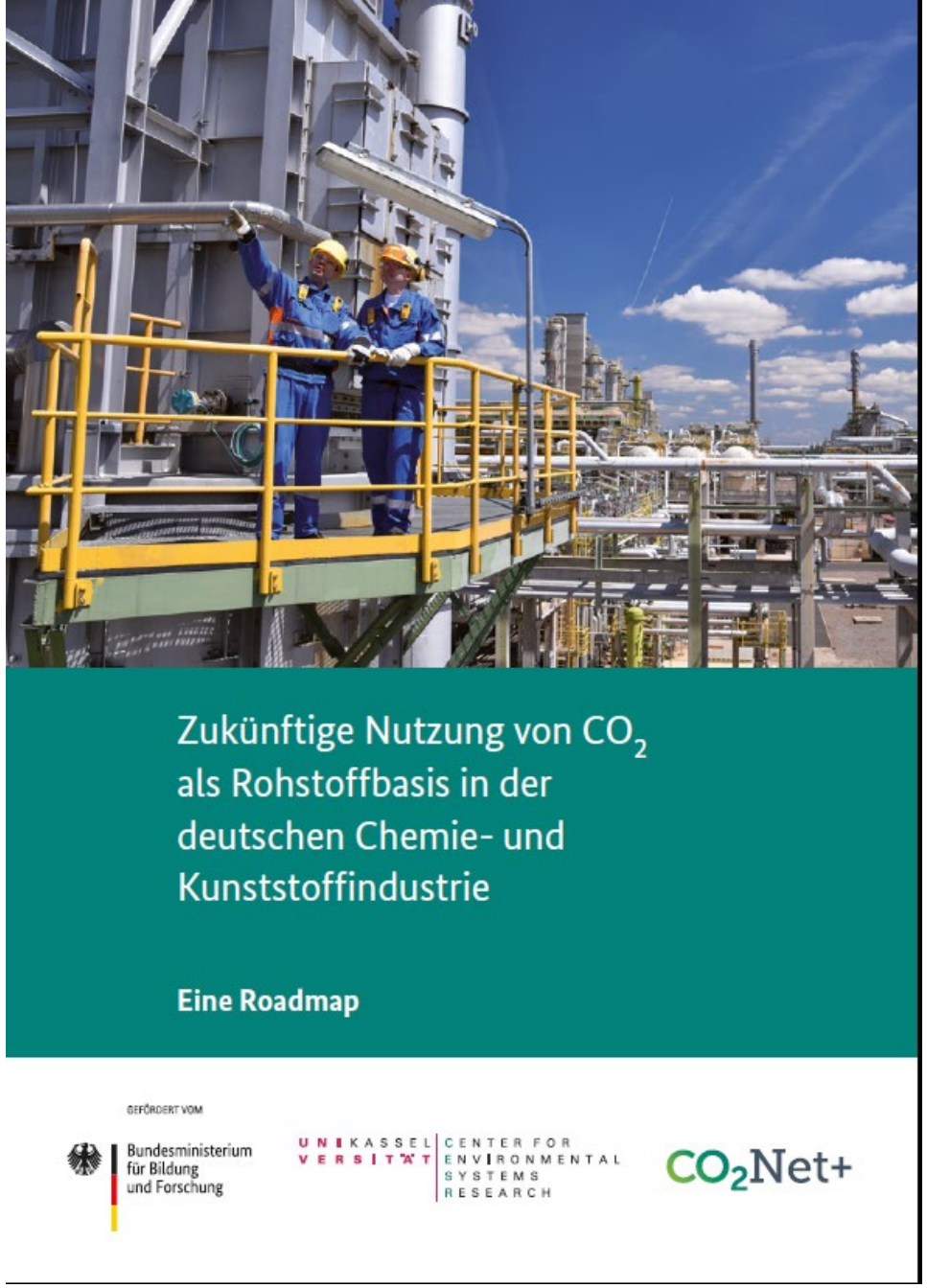
Rohstoffbasis der organischen Chemie in Deutschland 2018



Zukunftsperspektive: Die deutsche Chemieindustrie kann bis 2050 rechnerisch auf eine vollständig regenerative Kohlenstoffversorgung (90 % über Recycling inkl. CO2-Nutzung, 10 % gleichbleibend biotisch) umgestellt werden.

Die in Deutschland emittierten CO2-Mengen aus **industriellen Punktquellen** könnten auch im Jahr 2050 als Kohlenstoffquelle ausreichen, **doch dürfte sich als Ergänzung die CO2-Abscheidung aus der Atmosphäre anbieten.**

Quelle: Stefan Bringezu, Simon Kaiser, Sebastian Turnau (2020)
Center for Environmental Systems Research (CESR)
Universität Kassel, BMBF-Projekt CO2Net+



Etablierte Synthesepfade

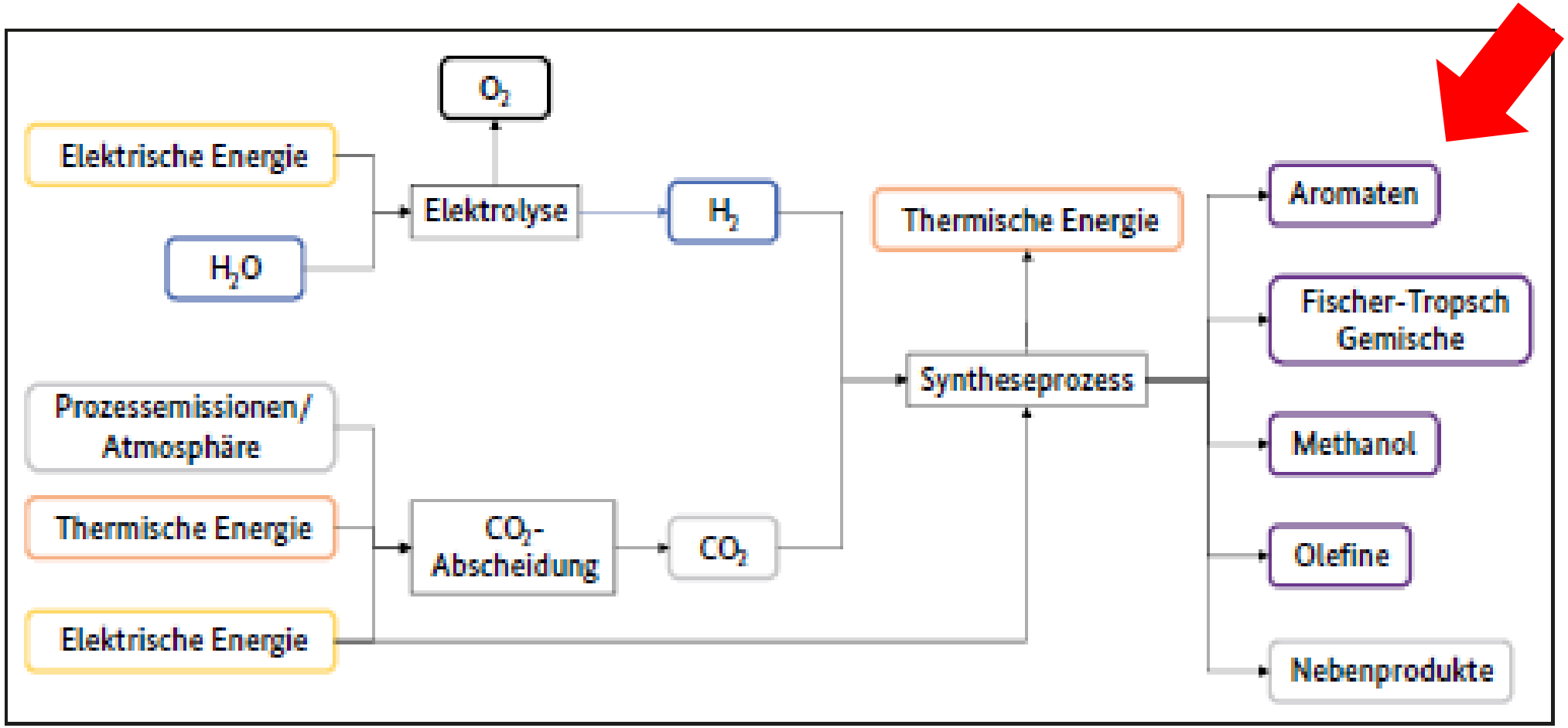


Abbildung 11: Vereinfachtes Prozessschema zur CO_2-basierten Synthese von beispielhaften Basischemikalien unter Berücksichtigung der Stoff- und Energieflüsse

Ökobilanz der Herstellung von Basischemikalien auf CO2-Basis

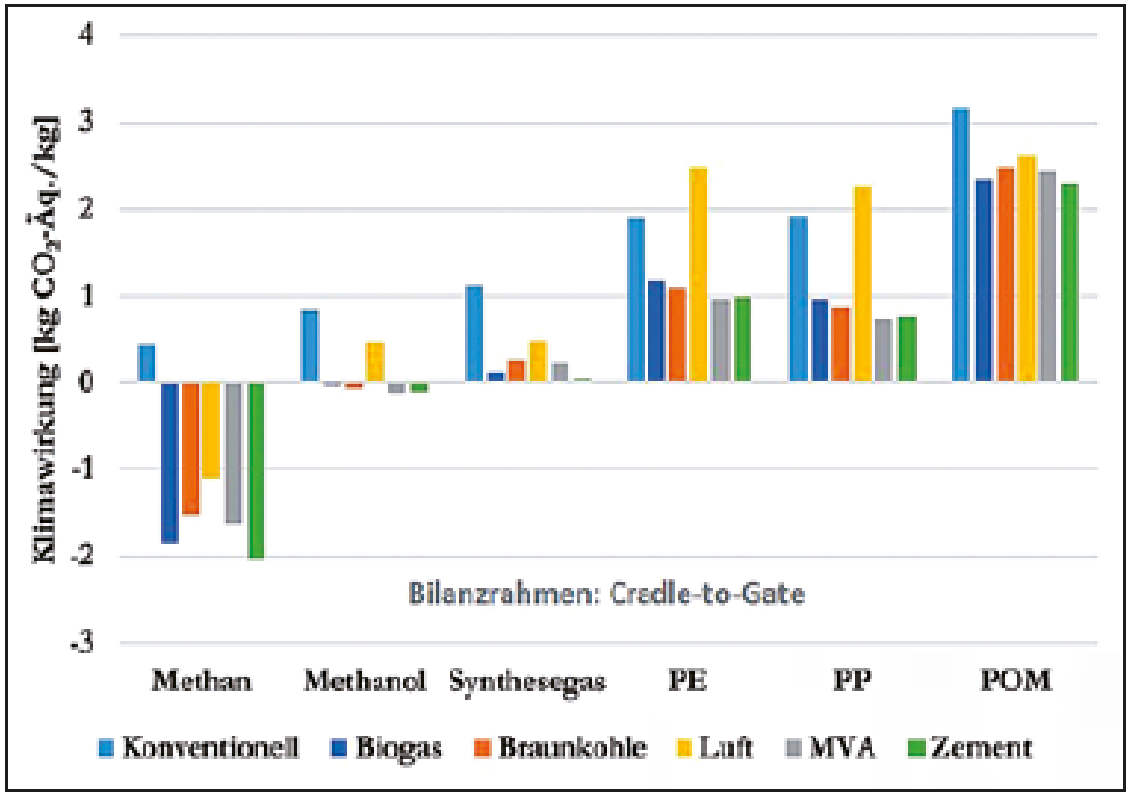


Abbildung 14: Klimawirkung der CO_2-basierten Herstellung von Grundstoffchemikalien, Massenpolymeren und höherwertigen Polymeren für verschiedene CO_2-Quellen und unter Verwendung von Windstrom für die Wasser-Elektrolyse. Der Bilanzrahmen entspricht einer Cradle-to-Gate Analyse (d.h. ohne Nutzungs- und Entsorgungsphase). (Konventionell = Fossilbasierte Herstellung, Biogas = Anlage zur Biogasaufbereitung, Braunkohle = Braunkohlekraftwerk, Luft = Atmosphärische Abscheidung, MVA = Müllverbrennungsanlage, Zement = Zementwerk; PE = Polyethylen, PP = Polypropylen, POM = Polyoxymethylen) (Hoppe et al. 2017)

Hoppe et al. 2017:
Herstellung von Basischemikalien auf CO2-Basis bei Windstromeinsatz klimafreundlicher als konventionell

Ausnahme: Herstellungsrouten von PE und PP mit Umgebungsluft als CO2-Quelle

Quelle: Stefan Bringezu, Simon Kaiser, Sebastian Turnau (2020) Center for Environmental Systems Research (CESR) Universität Kassel, BMBF-Projekt CO2Net+

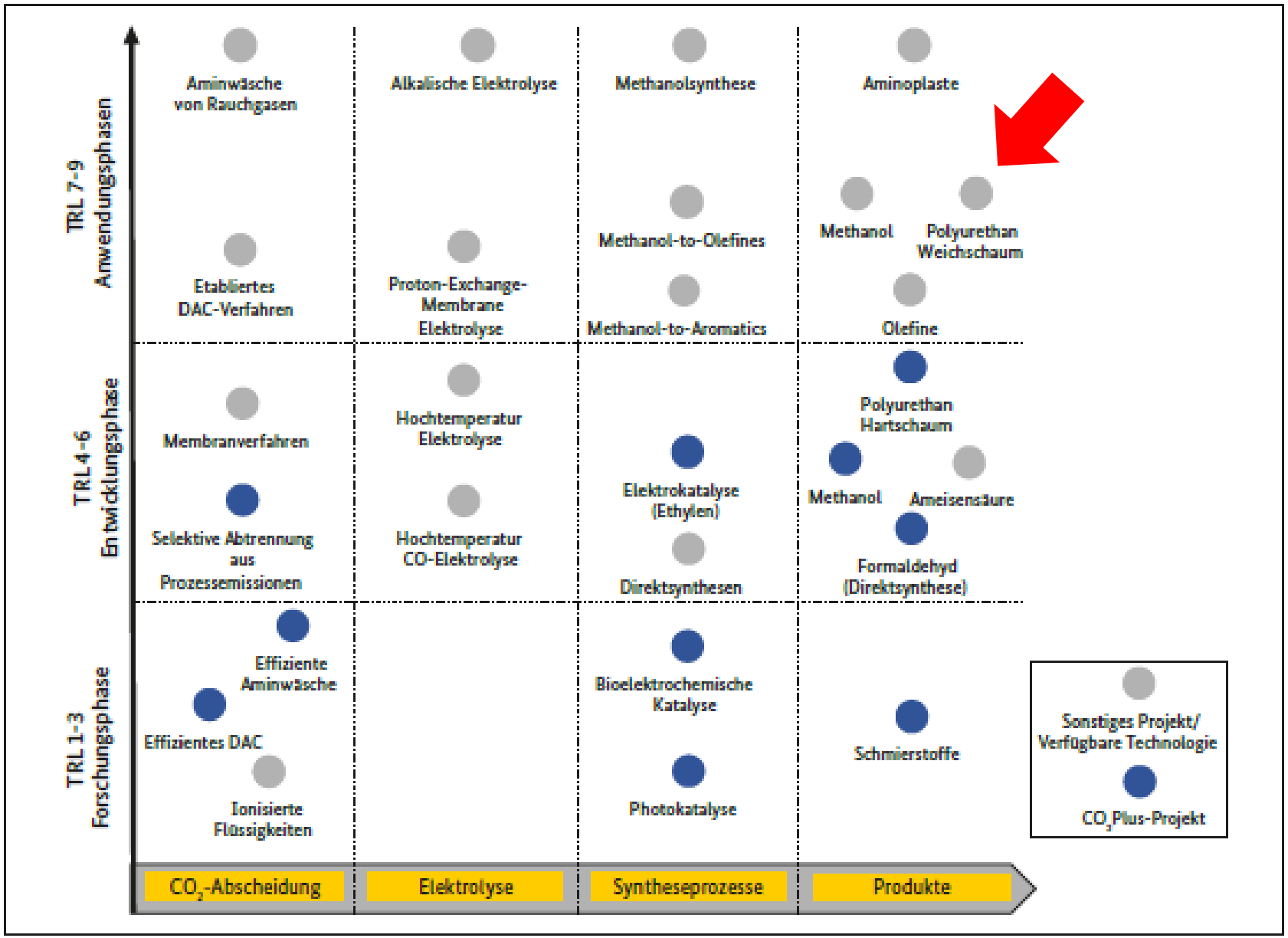


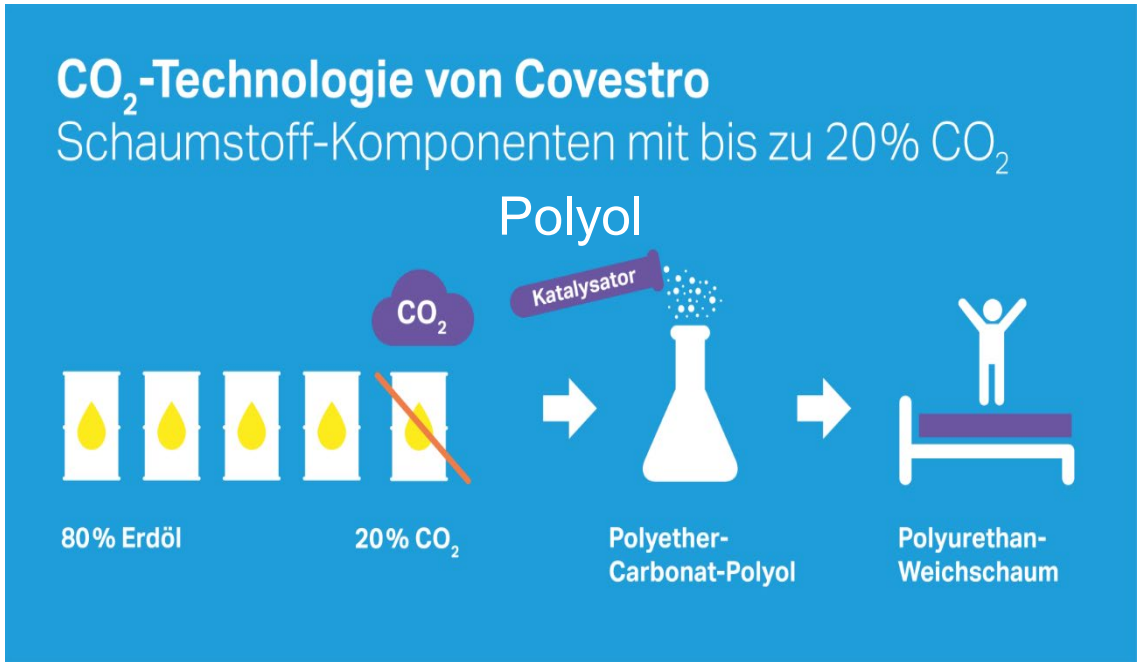
Abbildung 12: TRL für ausgewählte Produkte und ihre Prozessketten zur CO_2 Nutzung sowie der Forschungsprojekte der BMBF-Fördermaßnahme CO_2Plus. Aus Platzgründen werden die Produkte und Prozessketten lediglich der TRL-Phase und nicht einem konkretem TRL zugeordnet.

Technology Readiness Level 7-9: Beispiel Polyurethan Weichschaum

Quelle: Stefan Bringezu, Simon Kaiser, Sebastian Turnau (2020)
Center for Environmental Systems Research (CESR) Universität Kassel, BMBF-Projekt CO2Net+

Praxisbeispiel: Schaumstoff-Herstellung bei Covestro (Dormagen) – der Prozess

- CO2 aus Ammoniakanlage der Firma Ineos
- Katalysator nötig, da CO2 von Natur aus reaktionsträge ist.
- Endprodukt: Polyol, Polymerisation zu Polyurethan
- Produkte: Schaumstoff: Matratzen, Polstermöbel, cardyon® als Bindemittel für elastische Unterbodensysteme von Sportböden, elastische Textilfasern, Produktreihe OBoNature™ (Autoinnenauskleidung, Autositze); Schlauchleitungen (6% CO2)



Zukunft für e-fuels? (PtL-Verfahren)

Elektrolyse->Synthesegaserzeugung->Fischer-Tropsch-Synthese von Kraftstoffen

„Wenn aus Solarstrom über mehrere Schritte Diesel produziert wird (Verbrennung mit 40% Effizienz) liege die Gesamteffizienz bei 15 Prozent. "Das heißt, 85 Prozent der Energie gehen verloren. Schlechter geht es eigentlich nicht„ (Ferdinand Dudenhöffer).
Zum Vergleich: Im Elektroauto kommen 70-80 % der Ausgangs-Energie am Rad an. Damit braucht ein mit synthetischen Kraftstoffen angetriebenes Auto in etwa die siebenfache Menge Energie wie ein Elektroauto.

- Entwicklung im Moment in Richtung Treibstoffe für den Flug- und Schiffsverkehr

Pilotanlagen e-fuels / e-gas

2013: Werlte (Audi, VW): synthetische E-Gas-Einspeisung ins Erdgasnetz, CNG-Tankstellen, Fahrzeugbetankung

2015 eröffnet: Power-to-Liquids (e-fuel) - Anlage der Fa. sunfire Dresden, 2021/22: Konzentration auf das H2-Geschäft in D

2022: Porsche und Siemens Energy: weltweit erste kommerzielle Pilotanlage zur Herstellung von e-fuels in Chile, 2022 sollen erstmals rund 130.000 Liter erzeugt werden, Windstrom

2023: Norsk e-fuel (Mosjøen, Nord-Norwegen) wird in 2024 die industrielle Produktion starten und sukzessive auf 25 Mio. l gesteigert werden (2026); Joint Venture (Sunfire, Climeworks, Paul Wurth SA, Valinor AS)

Fazit

1. Für die Nutzung von CO2 als Rohstoff stehen ausreichend Technologiepfade zur Verfügung, die Kosten sind aber noch hoch.
2. Die Nutzung von CO2 als Rohstoff ist derzeit durch die Verfügbarkeit von Erneuerbarer Energie begrenzt.
3. Pilotanlagen derzeit nur unter günstigen EE-Rahmenbedingungen: Geothermie Island, Wind Chile, H2: Katar; e-fuel: Norwegen
4. Direct Air Capture wird die Nutzung von verbleibenden Prozessbedingten CO2-Punktquellen sinnvoll ergänzen.
5. Die Transformation auf die vollständige regenerative Kohlenstoffversorgung ist technisch machbar und eine Frage der Investition in Erneuerbare Energien.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt: Prof. Dr.-Ing. Susanne Hartard
Professur Industrial Ecology
Umwelt-Campus Birkenfeld/Hochschule Trier
E-Mail: s.hartard@umwelt-campus.de
Tel. 06782-17-1322
https://www.umwelt-campus.de/shartard/startseite

25 JAHRE UMWELT-CAMPUS BIRKENFELD
Nachhaltigkeit. Fortschritt. Zukunft.