

Philipp Wolf-Zöllner, Markus Lehner

Carbon Capture

Energie- und Kostenbedarf, TRL sowie künftige Entwicklungspotentiale am Beispiel Österreich

Jahrestreffen 2024 der DECHEMA-Fachgruppen AuW und Gasreinigung
Dresden, 25. März 2024

Arbeitsgruppe Energieverfahrenstechnik

Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes
Montanuniversität Leoben, Österreich

- Projektvorstellung CaCTUS – Österreichs Weg zur Klimaneutralität 2040
- CO₂-(Punkt-)Quellen Österreichs
- CO₂-Abscheidetechnologien
 - Technologischer Reifegrad
 - Energiebedarf & Kosten
- Szenarien/Pfade für Carbon Capture, Utilization & Storage in Österreich

CaCTUS – Projekthintergrund

Österreichs Weg zur Klimaneutralität 2040

“In the scenarios for meeting the 1.5°C target, Carbon Capture and Storage (CCS) or Carbon Capture and Utilization (CCU) is de facto unavoidable”.

IPCC Special Report on 1.5°C

CCS ... bezeichnet die Reduktion von CO₂ Emissionen durch die Abscheidung von CO₂ aus industriellen Prozessen und der anschließenden permanenten Speicherung im geologischen Untergrund.

CCU ... bezeichnet die Nutzung von CO₂ in konzentrierter Form für die Herstellung von kohlenstoffhaltigen Produkten in chemischen und technischen biologischen Prozessen.

CCU und CCS werden in Österreich immer stärker diskutiert, aber bislang gibt es kaum verlässliche Daten und Informationen über das Potenzial dieser Technologien in und für Österreich.

CaCTUS – Eckdaten zum Projekt

Carbon Capture, Transformation, Utilization & Storage

- Fördergeber: Klima- und Energiefonds
- Laufzeit: August 2022 – Jänner 2025 (30 Monate)
- Österreichisches Konsortium



- Evaluierung des möglichen Beitrags von Kohlenstoff-nutzung (CCU) und -speicherung (CCS) zur Erreichung der langfristigen Klimaziele Österreichs
- Empfehlungen für politische und wirtschaftliche Entscheidungsträger*innen

CO₂-(Punkt-)Quellen
in Österreich

**Potential & Status von
Carbon Capture, CCU & CCS**

Geologisches Speicher-
potential in Österreich

Techno-ökonomische
Bewertung von CCU/CCS

Einbindung von
Interessengruppen &
Richtlinienempfehlungen

2040

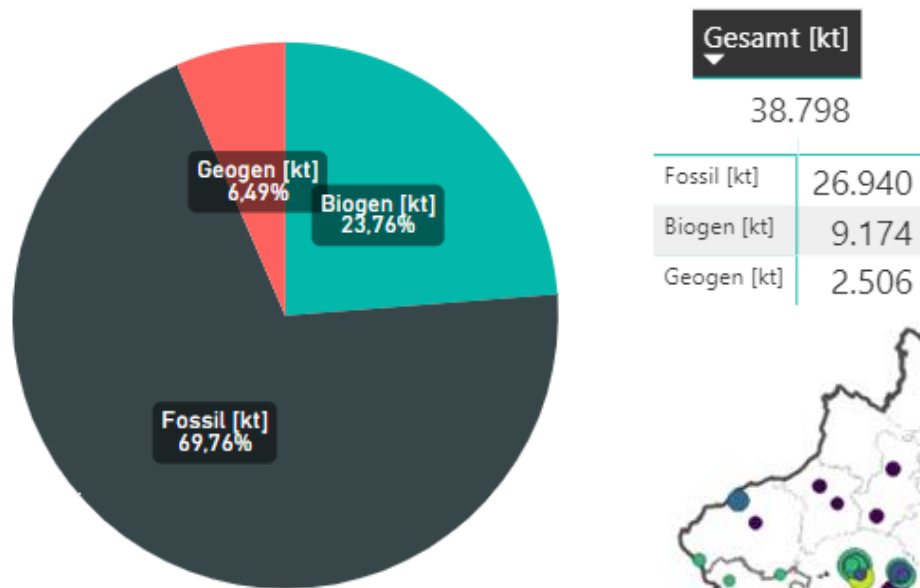
CaCTUS – Österreichs Weg zur Klimaneutralität

Projektziele

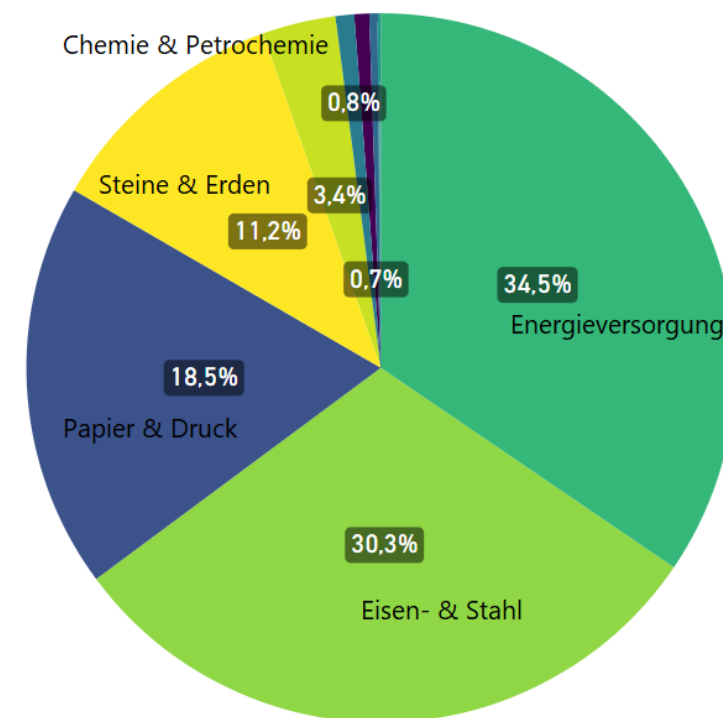
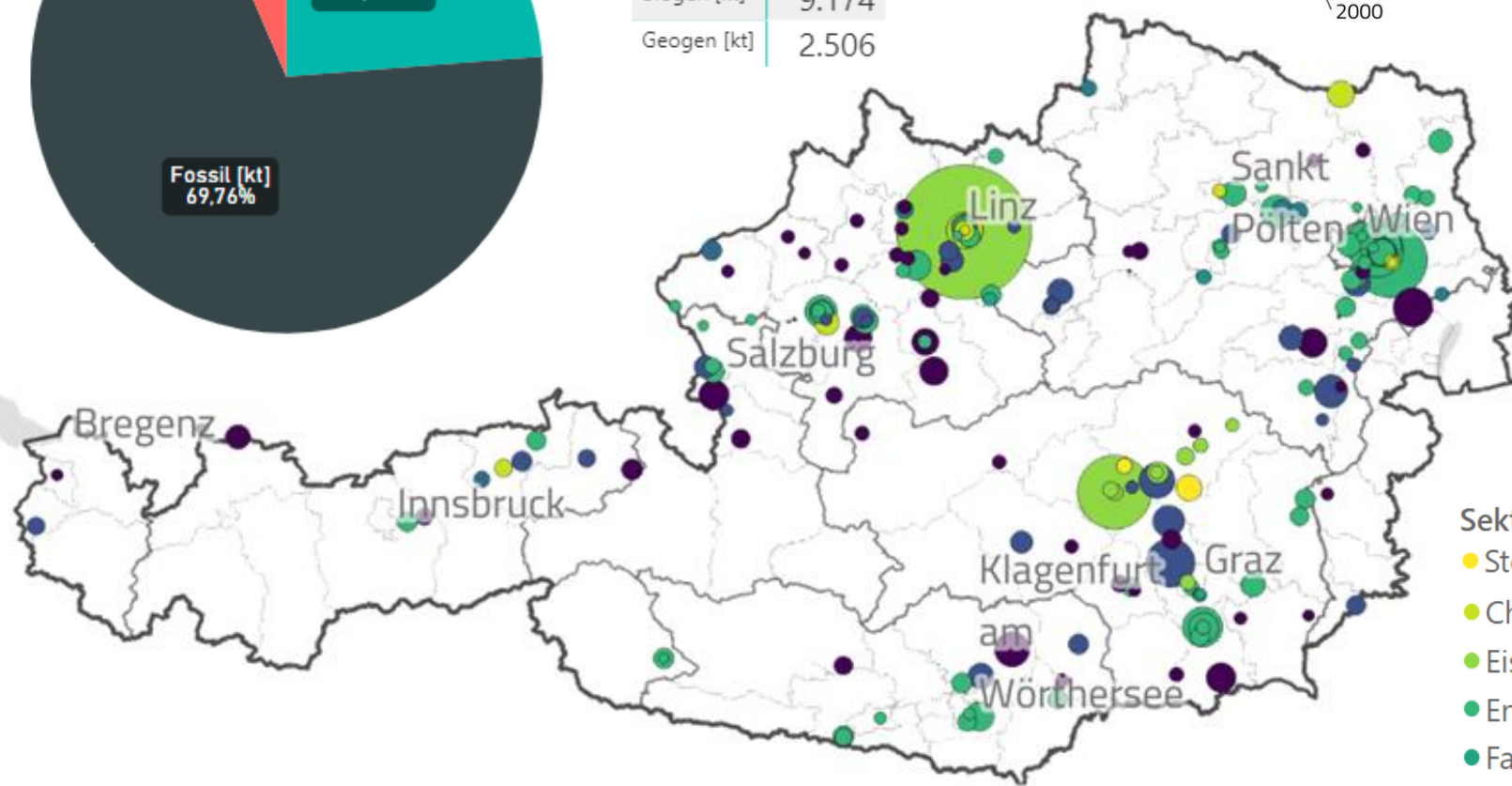
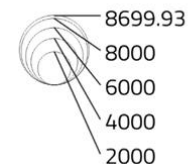
- Identifizierung und Quantifizierung von **technischen Potenzialen für CCU/CCS in Österreich** gemäß dem Nationalen Energie- und Klimaplan (NEKP)
- Identifizierung von **quellenspezifischen Klimawirkungen** und **senken-bezogenen Nettominderungspotenzialen** von CCU/CCS
- **Techno-ökonomische Bewertung** der identifizierten Kohlenstoffrouten und deren Beitrag zur Klimaneutralität
- Bewertung der **derzeitigen Hindernisse und regulatorischen Unzulänglichkeiten**, die eine frühzeitige Umsetzung und größtmögliche Wirkung behindern

CO₂-Quellen Österreichs (Industrie & Energie)

ETS-Register erweitert um biogene Emittenten & MVAs – Stand 2019



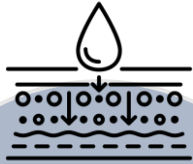
CO₂ Emissionen [kt]



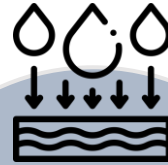
Sektor

- Steine & Erden, Glas
- Chemie- und Petrochemie
- Eisen- & Stahlerzeugung
- Energieversorgung
- Fahrzeugbau
- Maschinenbau
- Nahrungs- und Genussmittel, Tabak
- Nichteisen-Metallurgie
- Papier & Druck
- Bergbau

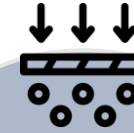
Carbon Capture Technologien



Absorption



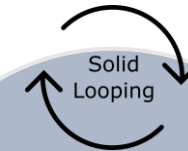
Adsorption



Membran-
technologie



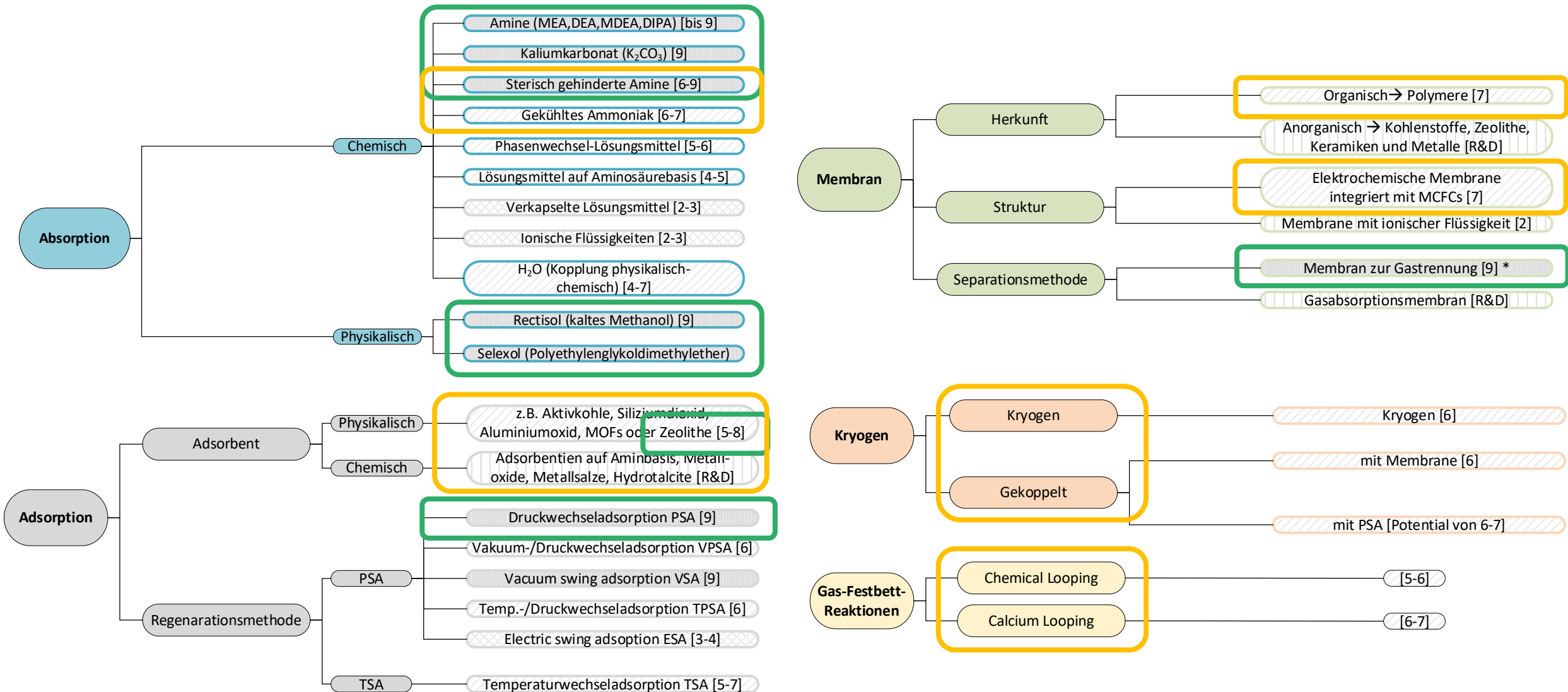
Kryogen-
verfahren



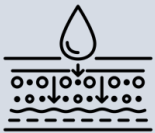
Gas-Feststoff-
Reaktionen

Natürliche
Einbindung

Carbon Capture Technologien



* In Erdgasaufbereitung TRL in [] [R&D,2] TRL 3-4 TRL 5-8 TRL bis 9



Absorption

Chemisch

Aminwäsche (TRL 9)

Ammoniakwäsche (TRL 6-7)

Ionenflüssigkeit (TRL 2-3)

Sterisch geh. Amine (TRL 6-9)

Salze d. Aminosäure (TRL 4-5)

Alkalikarbonate (TRL 9)

Physikalisch

Rectisol (TRL 9)

Selexol (TRL 9)

Purisol

Druckwasserwäsche

Fluorlösungsmittel

Technologie mit höchstem TRL

Bei niedrigen Drücken (1 - 2,5 bar) und CO₂-Konzentrationen < 30 vol.-% einsetzbar

Sehr reiner CO₂-Gasstrom (mehr als 99% CO₂-Anteil)

CO₂-Rückgewinnung: 90-98%

Stand-der-Technik:

- **Aminwäsche** (MEA, DEA, MDEA, etc.)

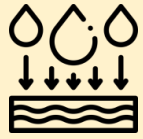
- **Alkaliwäschen**

Hoher Energiebedarf zur Regeneration des Waschmittels

Bei z.B. 28% von dt. Biogasaufbereitungsanlagen im Einsatz

Vor- bzw. Feinreinigung notwendig (SO₂, O₂, HC, Staub)

Toxizität der Waschmittel



Adsorption

Physikalisch
(TRL 5-8)

Kohlenstoff-basiert

Zeolithe

Metall-organische Gerüste

Chemisch
(TRL 3-6)

Alkali-Metall-basiert

Amin-funktionalisiert

Andere

- Nanoröhren
- Nanopartikel
- Aktivkohle
- Fullerene

Verwendung von festen Sorbentien – „Festbettadsorber“

Regeneration durch Druck- (PSA), Temp.- (TSA) oder Vakuumwechsel (VSA) sowie Kombinationen (z.B. TVSA)

Reversibel, Druck- und Temp.-abhängig

Verwendung bei Biogasaufbereitung (CH_4/CO_2)

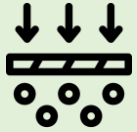
5-15 vol.-% CO_2 im Abgas

Vorteile:

- Niedrigere Wärmekapazität d. Adsorbens
- Absenz von Wasser (hoher Energiebedarf)
- Niedrigerer Energiebedarf bei Regeneration ($\sim \frac{1}{3}$ vergl. zu MEA)

Nachteile:

- Relativ hoher Stromverbrauch



Membrane

Selektiv

Organisch
(Polymere (TRL 7))

Anorganisch (Kohlenstoff,
Keramik, Zeolithe)

Metalle

Hybride Lösungen (TRL 4-6)

Nicht- selektiv

Membrangasabsorption

Vorteile:

- Als pre- und post-combustion in Prozess einsetzbar
- Kein Energiebedarf für Regeneration
- Keine Chemikalien im Umlauf
- Höhere Energieeffizienz für Separation im Vergleich zu Ad- und Absorption
- Einfache Technologie, rein physikalischer Abtrennungsprozess

Nachteile:

- CO₂-Konzentration mind. > 20 vol.-%
- Kosten bei großen Anlagen
- Probleme bei hohen Drücken
- Sensibel auf Verunreinigungen, Verstopfungen, H₂O
- Notwendigkeit einer Gasverdichtung
- Langzeitstabilität, Scale-up



Kryogenverfahren

Kühlung und Verdichtung von Abgas ist sehr energieaufwendig

Höchste CO₂ Ausbeuten und Reinheit (99,99%)

Nur bei CO₂ Konzentrationen >50% effizient

Kombination mit Polymermembran (TRL 6)

Kombination mit PSA (potential TRL 5-7)

TRL 3 mit anderen Verfahren (z.B. Adsorption, Ammoniakwäsche)

Meist in Zementindustrie (zukünftige Projekte um TRL auf 5-7 zu heben)

Bereits flüssig für Transport, keine chemischen Waschmittel

Hohe CAPEX

Gas-/Feststoff-Reaktionen

Carbonate Looping (TRL 6-7)

Karbonator und Kalzinator (Wirbelschicht)

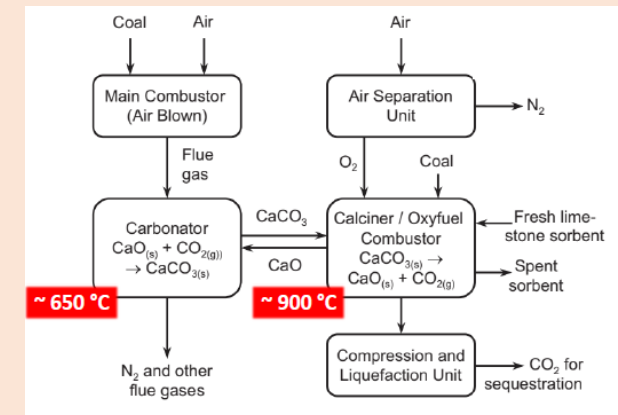
Energiebedarf: ~ 6 - 10 GJ / t CO₂

(vgl. Absorptionsverfahren ~ 1,6 - 4,5 GJ / t CO₂)

Luftzerlegungsanlage notwendig

hoher anlagentechnischer Aufwand

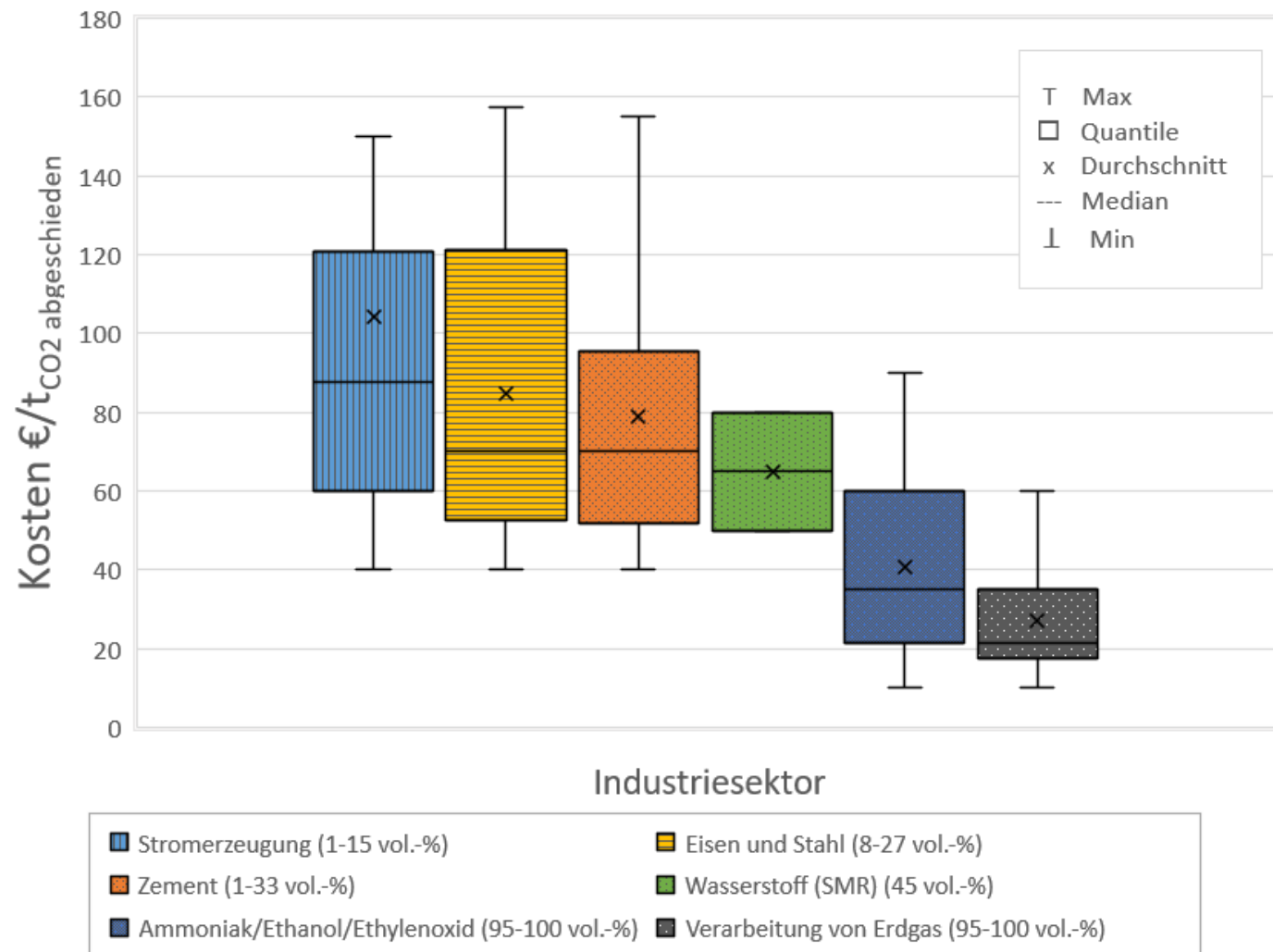
Hohes Potential, derzeit vorwiegend Pilotanlagen



Carbon Capture Technologien

Energie- & Kostenbedarf

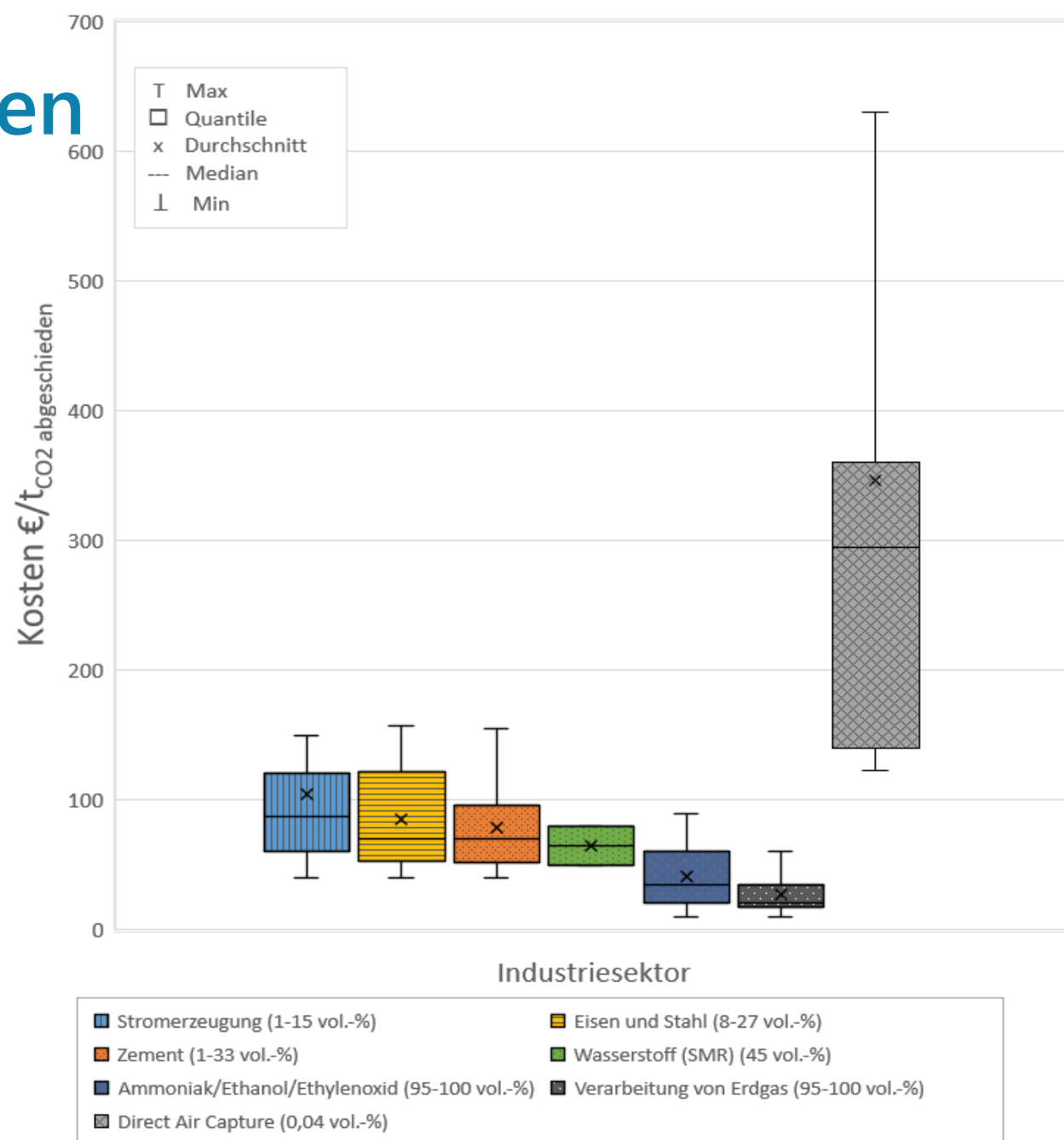
Technologie		Energiebedarf _(th) GJ/t _{CO2}
Absorption		
Auswahl	MEA, DEA, MDEA, etc.	3,0 - 4,5
	Neue/optimierte Waschmittel	2,1 - 2,9
	Alkalikarbonate	2,0 - 2,6
	Ammoniakwäsche	2,0 - 2,9
	Amin-funktionalisierte Siloxane	~ 3,0
	Salze d. Aminosäure	2,4 - 3,4
Adsorption		
R&D	Amin-funktionalisierte Adsorbentien	1,3 - 2,0
	Metall-organische Gerüste	0,4 - 0,8
Membrantechnik		0,5 - 6,0
Kryogenvverfahren		2,4 - 5,2
Gas-/Festbettreaktionen (Solid Looping)		2,0 - 10,0



Carbon Capture Technologien

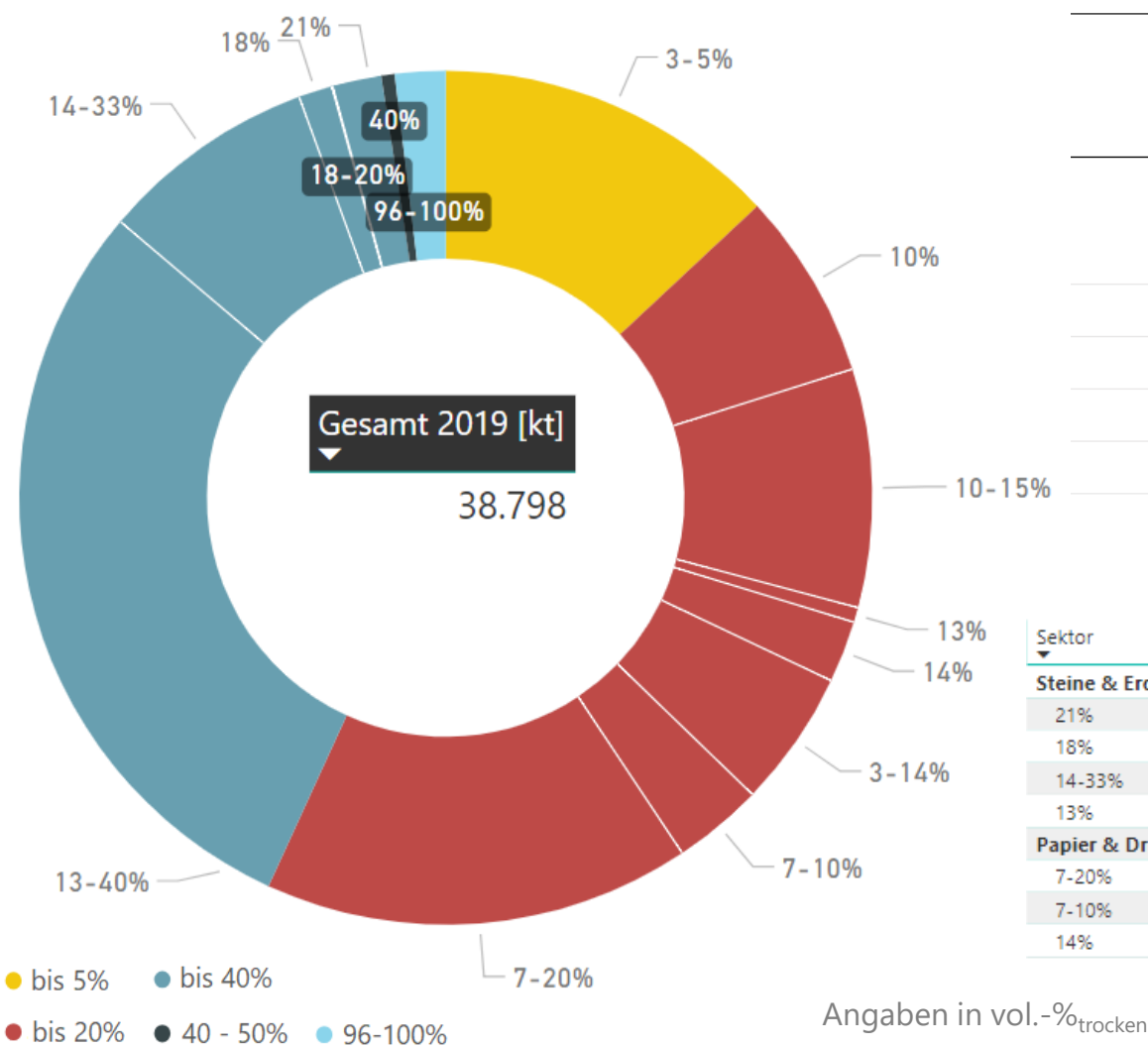
Energie- & Kostenbedarf

Technologie		Energiebedarf _(th) GJ/t _{CO2}
Absorption		2,0 - 4,5 (9,2)
Auswahl	MEA, DEA, MDEA, etc.	3,0 - 4,5
	Neue/optimierte Waschmittel	2,1 - 2,9
	Alkalikarbonate	2,0 - 2,6
	Ammoniakwäsche	2,0 - 2,9
	Amin-funktionalisierte Siloxane	~ 3,0
	Salze d. Aminosäure	2,4 - 3,4
Adsorption		2,4 - 9,0
R&D	Amin-funktionalisierte Adsorbentien	1,3 - 2,0
	Metall-organische Gerüste	0,4 - 0,8
Membrantechnik		0,5 - 6,0
Kryogenverfahren		2,4 - 5,2
Gas-/Festbettreaktionen (Solid Looping)		2,0 - 10,0



CO₂-Quellen Österreichs (Industrie & Energie)

CC-Technologieauswahl für CCU/CCS in 2030/2040



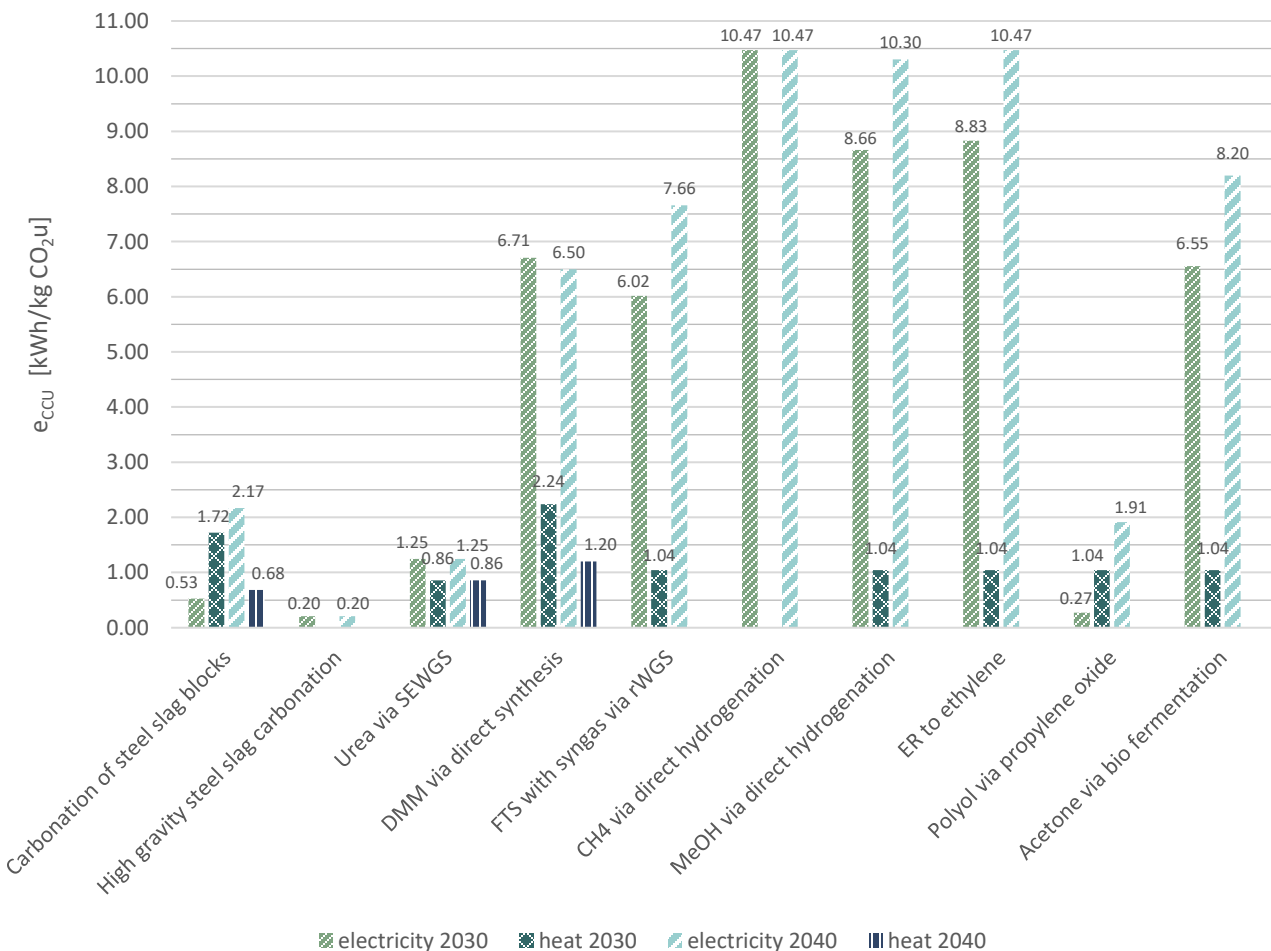
Carbon Capture Technologie	CO ₂ Konzentration [%]	Anwendungsszenarien Sektoren
Chemische Absorption	< 30	Energieerzeugung, Zement, Kalk, Eisen & Stahl (Hochofen), Raffinerie, Biomasse-KWK, Papier & Zellstoff
Physikalische Adsorption mit VPSA	> 40	Syngas, Eisen & Stahl, Energieerzeugung, Deponiegas, Erdgasaufbereitung
4-stufige Ausführung	> 10	
Polymermembran	> 20	Erdgasaufbereitung, Biogasaufbereitung
Kryogenverfahren	> 50	Energieerzeugung, Zement, Kalk, Eisen & Stahl (Hochofen), Raffinerie, Müllverbrennung, Biomasse-KWK, Papier & Zellstoff
Physikalische Adsorption mit PSA inkl. Kryogenverfahren	> 15	

Sektor			
Steine & Erden, Glas	Nichteisen-Metallurgie	Energieversorgung	Chemie- und Petrochemie
21%	7-10%	96-100%	96-100%
18%	3-14%	7-10%	7-12%
14-33%	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	3-5%	7-10%
13%	7-10%	3-14%	18-20%
Papier & Druck	Maschinenbau	10-15%	Bergbau
7-20%	7-10%	10%	14-33%
7-10%	Fahrzeugbau	Eisen- & Stahlerzeugung	
14%	7-10%	7-10%	
		40%	
		13-40%	

Carbon Capture Utilization (CCU)

Mögliche Pfade für Österreichs Klimaziele in 2040 und darüber hinaus

Energiebedarf ausgewählter CCU-Technologien



1. Berücksichtigung der CO₂ „Herkunft“:

- Biogenes CO₂ im natürlichen Kohlenstoffkreislauf
- „Neues“ fossiles/geogenes CO₂ nicht in Atmosphäre akkumulieren
- Möglichkeit des CDR durch lang- oder mittelfristige Bindung von biogenem CO₂

2. Ausnutzen von:

- Gleiche oder ähnliche Märkte
- Abfälle aus Primärprozess
- CCU-Produkt für Primärprozess

Carbon Capture Utilization (CCU)

Mögliche Pfade für Österreichs Klimaziele in 2040 und darüber hinaus

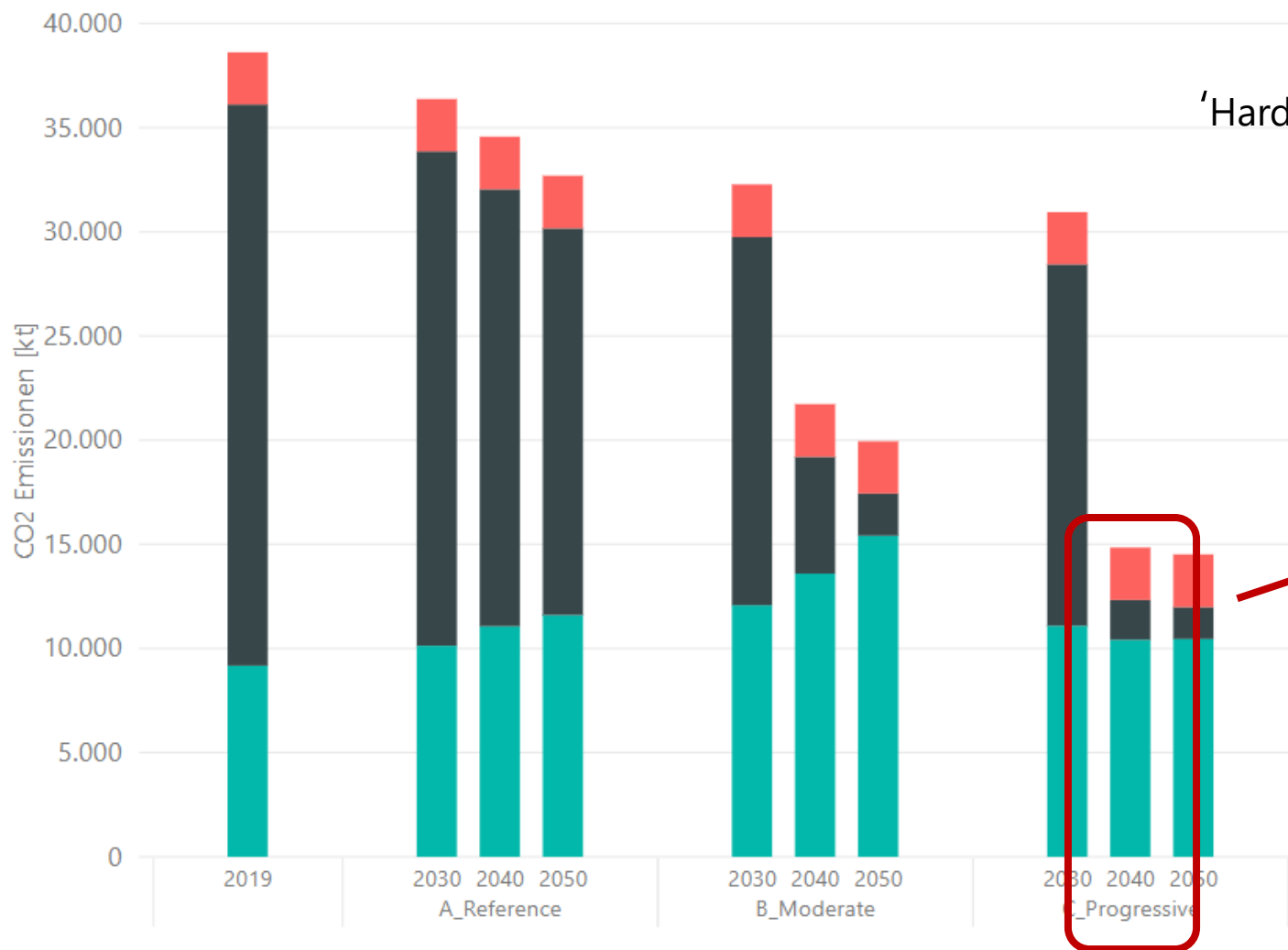
Sectors 2040	Capture technology	Utilization technology	Q _{CCU}	Q _{Savings}
			[ktCO ₂ e]	[ktCO ₂ e]
Pulp and paper	Chemical abs.	FTS & rWGS	1501	3168
Cement	No capture	High gravity carb.	-2619	8158
MSWI	Chemical abs.	Block carbonation	-1252	3310
Biomass CHP	Chemical abs.	Hydrogenation CH ₄	592	1417
Wood and wood products	PSA & cryogenic	Hydrogenation MeOH	151	1167
Primary steel production	PSA & cryogenic	Block carbonation	-438	1017
Chemical industry	Chemical abs.	Bio-fermentation	-75.4	427
Lime production	No capture	High gravity carb.	-334	1039
Biomass heating	Chemical abs.	Hydrogenation CH ₄	88.0	187
Bricks	PSA & cryogenic	Block carbonation	-186	433
Secondary steel making	Cryogenic	FTS & rWGS	25.2	158
Magnesia	No capture	High gravity carb.	-180	559
Food and beverage	Poly. membrane	Hydrogenation CH ₄	58.9	141
Natural gas CHP	Chemical abs.	Hydrogenation CH ₄	49.8	106
Bio-ethanol	No capture	DMM synthesis	39.7	105
Glass production	Chemical abs.	Block carbonation	-32.4	85.6
Alumina	Chemical abs.	Block carbonation	-29.8	78.8
Machinery	Chemical abs.	FTS & rWGS	8.66	18.3
Iron and steel processing	No capture	High gravity carb.	-23.7	73.8
Gas processing plants	No capture	Hydrogenation CH ₄	3.27	17.8
Copper	Chemical abs.	ER to ethylene	7.07	17.1
Compressor	Poly. membrane	Hydrogenation CH ₄	4.47	10.7
Ammonia	No capture	CO ₂ -based polyols	82.5	13.0
Natural gas storage	Poly. membrane	Hydrogenation CH ₄	0.434	1.04
Nitric acid, urea, fertilizer	No capture	Bio-fermentation	-0.053	0.18
Natural gas heating	Chemical abs.	Hydrogenation CH ₄	0.00070	0.0015
Total			-2557	21708

Limitierende Aspekte:

- Technologiespezifisch
 - Verfügbarkeit notwendiger Rohstoffe
 - Fossilfreier Wasserstoff
 - Hoher Energiebedarf (erneuerbar)
 - Kapazitätsgrenzen
- Sektorenspezifisch
 - Marktlage/Bedarf an CCU-Produkten
 - Erforderliche Produktqualitäten
 - Schwankungen in Primärprozessen

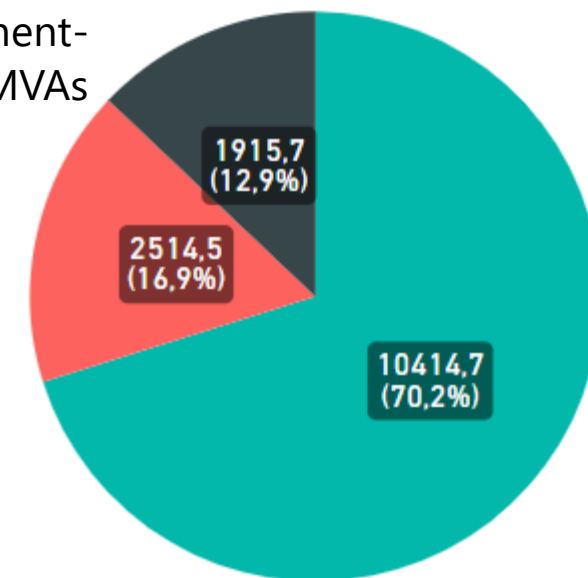
Potential von Carbon Capture

Szenarien für 2030, 2040 und darüber hinaus



~4,4 Mt_{CO2}

'Hard-to-abate' aus z.B. Zement- & Feuerfestindustrie, MVAs



Aufteilung der Restemissionen (**~14,8 Mt_{CO2}**) in 2040 für progressives Szenario

Kernaussagen

- Carbon Capture (CC) ist im Bereich der chemischen Absorptionstechnologien bereits großtechnisch verfügbar und die derzeit am häufigsten zum Einsatz kommende Technologie.
- Alle CC-Verfahren weisen einen signifikanten Energiebedarf auf (chemische Absorption mit MEA: 3,0 - 4,5 GJ/t_{CO₂}, neuere Technologien bis zu 2,0 GJ/t_{CO₂}).
- Aufwand und Kosten steigen mit sinkendem CO₂-Gehalt im Gas sowie mit steigenden Anforderungen an die CO₂-Reinheit.
- Um CC effektiv im großen Maßstab für CCU/CCS betreiben zu können, müssen der Energiebedarf und die Kosten noch deutlich sinken.
- Für Österreich ergibt sich ein Potential von **~14,8 Mt_{CO₂}** im progressivsten Szenario für das Jahr 2040, abhängig von den umgesetzten Technologien.

Carbon Capture

Energie- und Kostenbedarf, TRL sowie künftige
Entwicklungspotentiale am Beispiel Österreich

Dipl.-Ing. Philipp Wolf-Zöllner

Tel.: +43 3842 402-5090

philipp.wolf-zoellner@unileoben.ac.at

Montanuniversität Leoben
Franz-Josef-Straße 18
8700 Leoben, Österreich



Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds im Rahmen des Programmes ACRP gefördert.

