

Wilfried Rickels

Ökonomische Aspekte von CDR und Einbindung in die Klimapolitik

Energiesysteme der Zukunft

Workshop: Die letzten Meter auf dem Weg zur Klimaneutralität:

Welche Rollen spielen CCS und Negative Emissionen?

10. März 2021



Von der Kosten-Nutzen-Rechnung nach Paris und zurück...

Statistisches Optimierungsmodell

$$\min_E C(E_{BAU} - E) + D(E)$$

E_{BAU} : Kumulative CO2 Emissionen bis 2100 bei *Business-As-Usual*
=> *Entwicklung der Bevölkerung, Wirtschaft, Technologie*

E : *Emissionen bis 2100 unter Klimapolitik*
=> *CO2-Steuern, Regulierung, Technologieförderung*

$C(\bar{E} - E)$: Kosten der Klimapolitik

$D(E)$: Nutzen der Klimapolitik

Von der Kosten-Nutzen-Rechnung nach Paris und zurück...

$$\min_E C(\bar{E} - E) + D(E)$$

Lösung: $C'(E^*) = D'(E^*)$

$$\min_E C(\bar{E} - E) + \mathbf{C}(\mathbf{CDR}) + D(NE) \quad \text{s.t. } NE = E - \mathbf{CDR}$$

Wenn $C'(\mathbf{CDR})|_{\mathbf{CDR}=0} < C'(E^*)$, dann

Lösung (FOCs nicht gezeigt):

$$\mathbf{E}^{**} > \mathbf{E}^* \quad (\text{partielle Substitution})$$

$$\mathbf{NE}^* < \mathbf{E}^* \quad (\text{niedrigerer Schaden})$$

Von der Kosten-Nutzen-Rechnung nach Paris und zurück...

Paris: $\Delta T \leq \overline{\Delta T}$

(mittlerer globaler) Temperaturanstieg: $\overline{\Delta T} \approx \alpha * \bar{E}$

Ohne CDR

$C(\bar{E})$; („keine“ Optimierung)

Mit CDR

$C'(E^*) = C'(CDR^*)$

s.t. $NE = E - CDR = \bar{E}$

Von der Kosten-Nutzen-Rechnung nach Paris und zurück...

Paris: $\Delta T \leq \overline{\Delta T}$

(mittlerer globaler) Temperaturanstieg: $\overline{\Delta T} \approx \alpha * \bar{E}$

Ohne CDR

$C(\bar{E})$; („keine“ Optimierung)

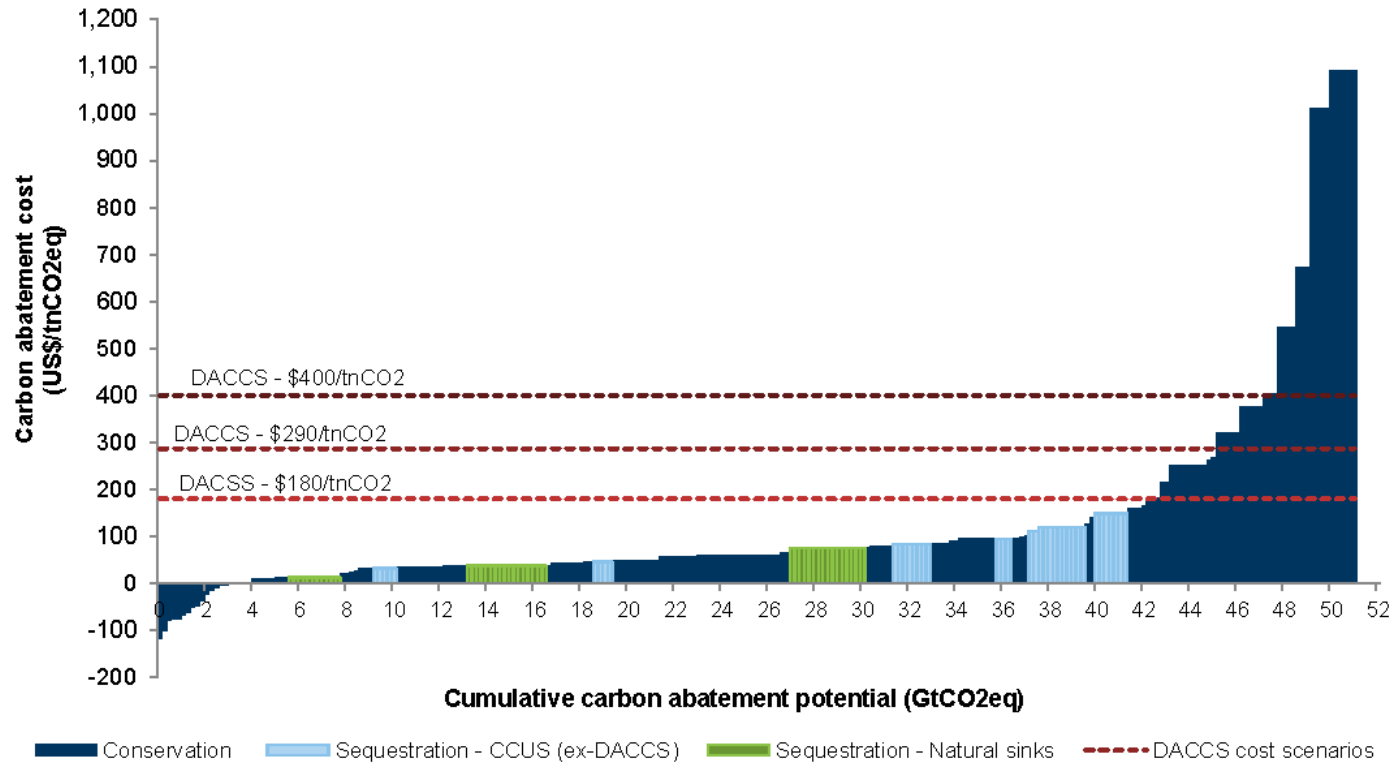
Mit CDR

$C'(E^*) = C'(CDR^*)$ s.t. $NE = E - CDR = \bar{E}$

1. Vermeidung wird sehr teuer; $C'(E)_{E \rightarrow 0} \rightarrow \infty$

Von der Kosten-Nutzen-Rechnung nach Paris und zurück...

Paris
(mit
Ohn
 $C(\bar{E}$
Mit
 $C'(I$
1. Ve



Source: Goldman Sachs Global Investment Research

Von der Kosten-Nutzen-Rechnung nach Paris und zurück...

Paris: $\Delta T \leq \overline{\Delta T}$

(mittlerer globaler) Temperaturanstieg: $\overline{\Delta T} \approx \alpha * \bar{E}$

Ohne CDR

$C(\bar{E})$; („keine“ Optimierung)

Mit CDR

$C'(E^*) = C'(CDR^*)$ s.t. $NE = E - CDR = \bar{E}$

1. Vermeidung wird sehr teuer; $C'(E)_{E \rightarrow 0} \rightarrow \infty$
2. Restriktionen auf den Emissionen, z.B. $E_{BAU} = E_{BAU}^{Land A} + E_{BAU}^{Land B}$

mit $E_{BAU}^{Land A} > \bar{E}$

Von der Kosten-Nutzen-Rechnung nach Paris und zurück...

Paris: $\Delta T \leq \overline{\Delta T}$

(mittlerer globaler) Temperaturanstieg: $\overline{\Delta T} \approx \alpha * \bar{E}$

Ohne CDR

$C(\bar{E})$; („keine“ Optimierung)

Mit CDR

$C'(E^*) = C'(CDR^*)$ s.t. $NE = E - CDR = \bar{E}$

1. Vermeidung wird sehr teuer; $C'(E)_{E \rightarrow 0} \rightarrow \infty$
2. Restriktionen auf den Emissionen
3. Budget ist bereits verbraucht, $\bar{E} < 0$.

Von der Kosten-Nutzen-Rechnung nach Paris und zurück...

Paris: $\Delta T \leq \overline{\Delta T}$

(mittlerer globaler) Temperaturanstieg: $\overline{\Delta T} \approx \alpha * \bar{E}$

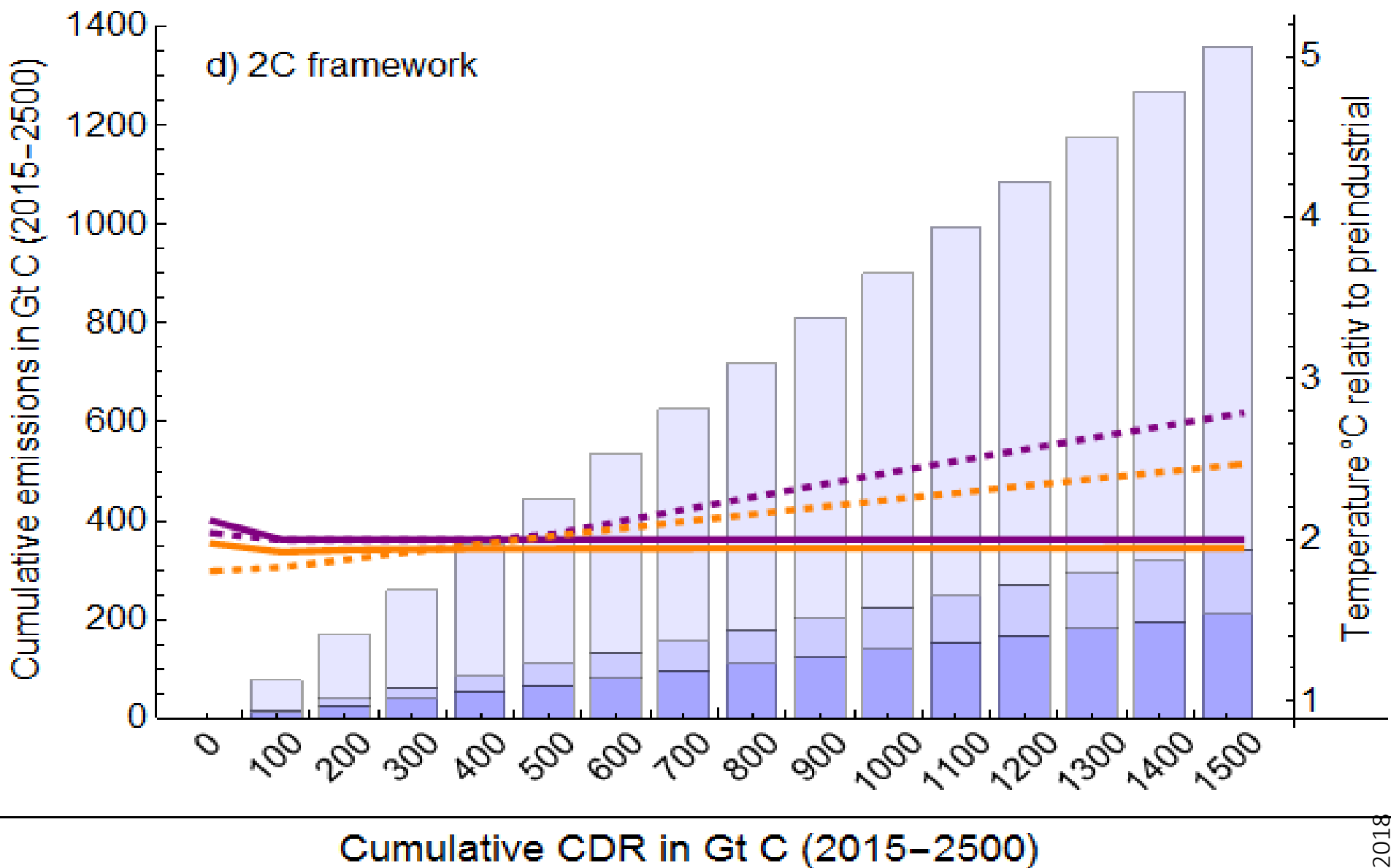
Ohne CDR

$C(\bar{E})$; („keine“ Optimierung)

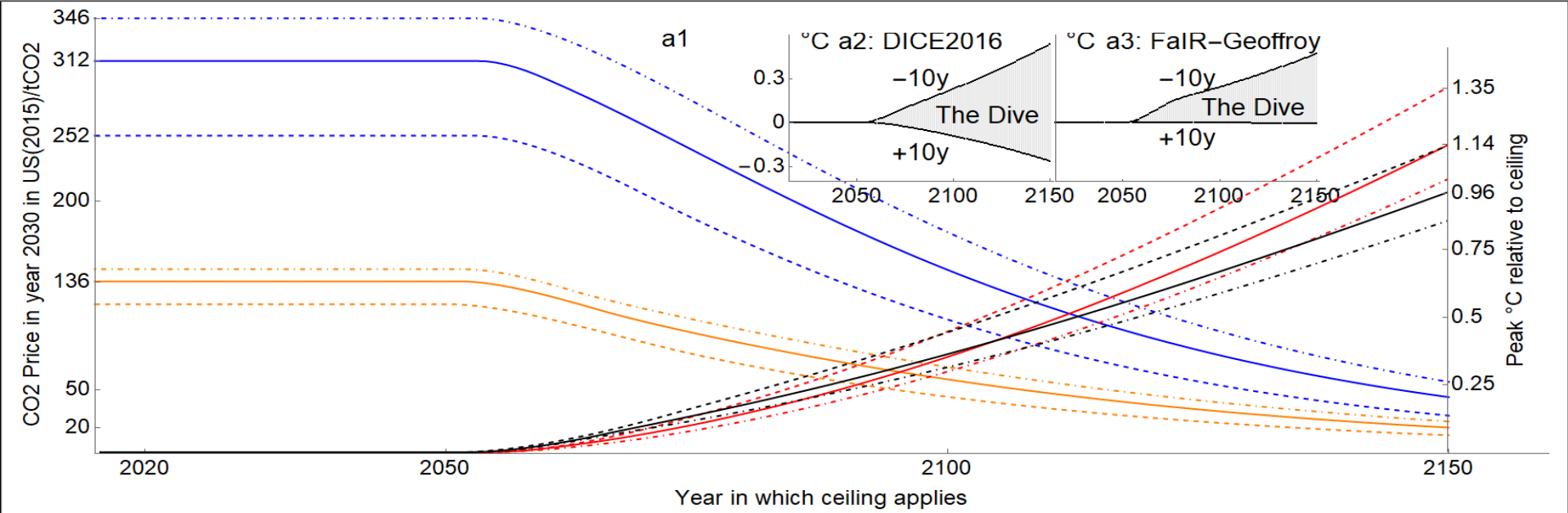
Mit CDR

$C'(E^*) = C'(CDR^*)$ s.t. $NE = E - CDR = \bar{E}$

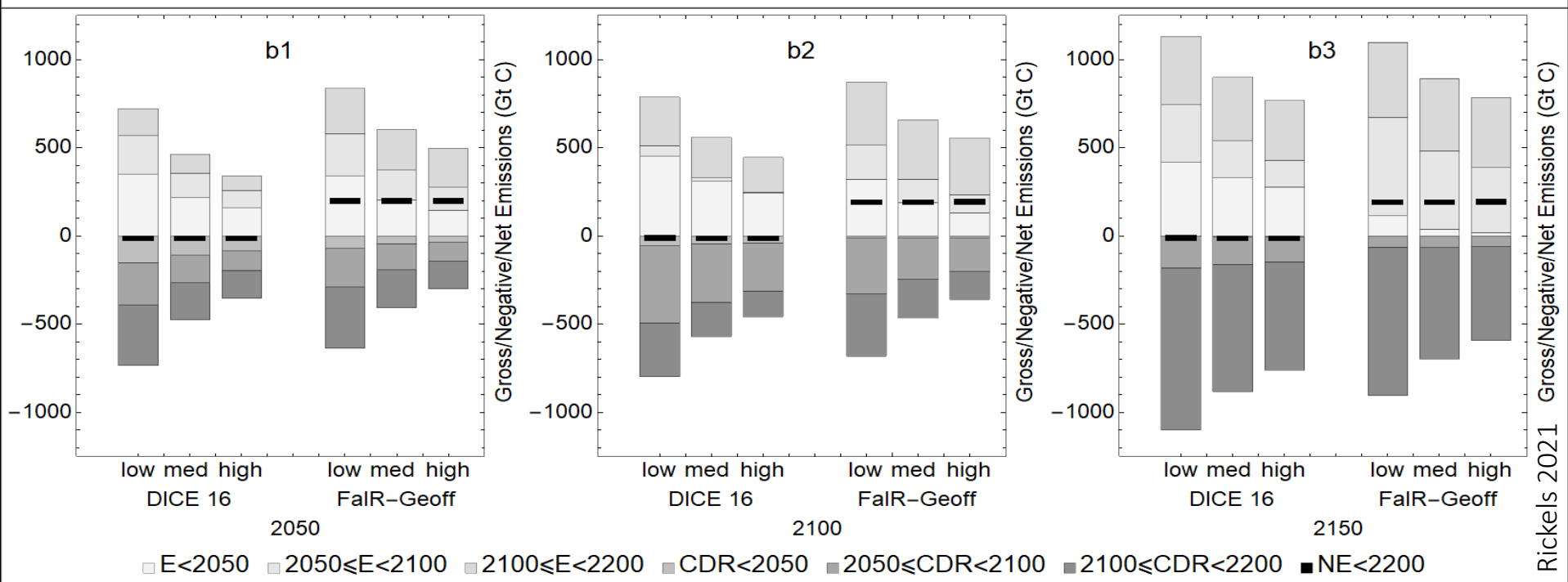
1. Vermeidung wird sehr teuer; $C'(E)_{E \rightarrow 0} \rightarrow \infty$
2. Restriktionen auf den Emissionen
3. Budget ist bereits verbraucht, $\bar{E} < 0$.
4. Budget kann über Definition von $\overline{\Delta T}$ gesteuert werden..., d.h. formal bin ich wieder im Kosten-Nutzen Rahmen, $D(\overline{\Delta T})$, und eine Integration von CDR erlaubt ambitioniertere Ziele zu erreichen (niedrigere Temperatur oder höhere Erreichungswahrscheinlichkeit)



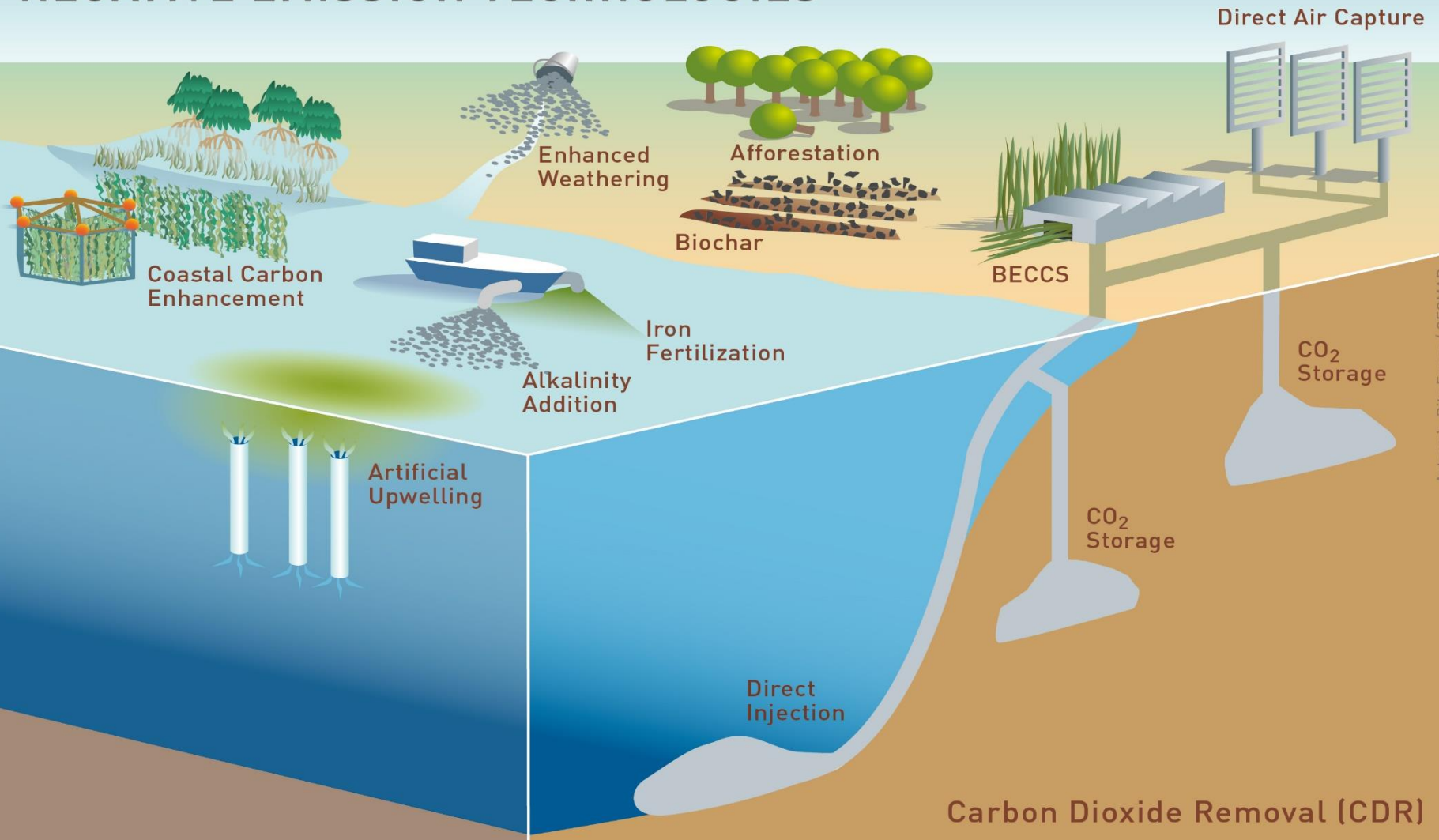
Carbon distribution in year 4000: ■ Atmosphere ■ Upper Ocean ■ Lower Ocean
 Peak temperature increase: — year 2015–2500 - - - year 2501–4000
 Ave. temperature increase: — year 2015–2500 - - - year 2501–4000



— CO2P D16(med) - - - CO2P D16(low) ···· CO2P D16(high) — CO2P FG(med) - - - CO2P FG(low) ···· CO2P FG(high)
 — °C D16(med) - - - °C D16(low) ···· °C D16(high) — °C FG(med) - - - °C FG(low) ···· °C FG(high)



NEGATIVE EMISSION TECHNOLOGIES

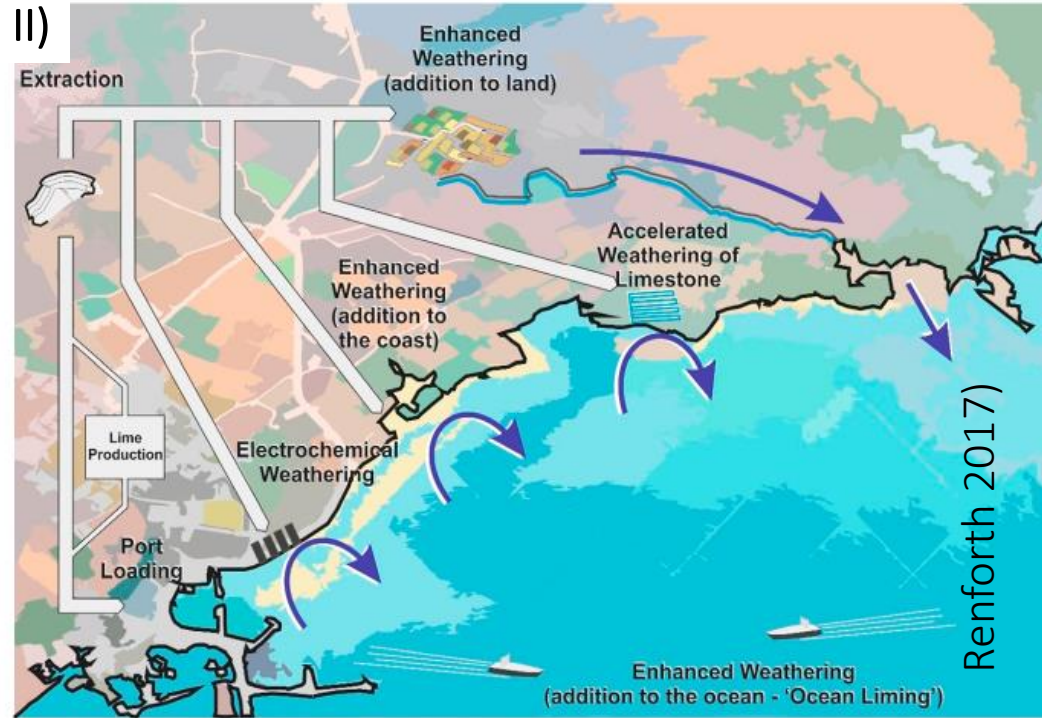


Artwork: Rita Erven / GEOMAR

I) Carbon Sequestration Reactions for a Range of Naturally Occurring and Anthropogenically Produced Minerals

Mineral	ΔG_f (kJ/mole) ^a	Reaction	ΔG_r (kJ/mole) ^a	ΔG_r (kJ/mole C) ^a	gCO ₂ /g(mineral)
<i>Naturally Occurring Minerals</i>					
Magnesite	-1029.5	$MgCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$			
Calcite	-1128.5	$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$			
Dolomite	-2161.7	$CaMg(CO_3)_2 + 2CO_2 + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + Mg(OH)_2$			
Forsterite	-2053.6	$Mg_2SiO_4 + 4CO_2 + 4H_2O \rightarrow 2Mg(OH)_2 + Si(OH)_4$			
Anorthite	-4007.9	$CaAl_2Si_2O_8 + 2CO_2 + 3H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2Al(OH)_3 + Si(OH)_4$			
<i>Anthropogenically Produced Minerals</i>					
Lime	-603.5	$CaO + 2CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$			
Portlandite	-898.4	$Ca(OH)_2 + 2CO_2 + H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O + 2H_2O$			
Periclase	-569.2	$MgO + 2CO_2 + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$			
Brucite	-833.5	$Mg(OH)_2 + 2CO_2 + H_2O \rightarrow MgSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O + 2H_2O$			
<i>Chemical Weathering</i>					
		$NaCl(aq) + H_2O(l) \rightarrow NaOH(aq) + 0.5Cl_2(g) + 0.5H_2(g)$			
		$4HCl(aq) + Mg_2SiO_4(s) \rightarrow 2MgCl_2(aq) + 2Si(OH)_4(aq)$			

thermodynamic information was sourced from Robie and Hemingway [1979].



III) Table 3. Comparison of Electrical and Thermal Energy Requirements and Financial Costs of Ocean Alkalinity Carbon Storage Technologies^a

Technology	GJ tCO ₂ ^{-1b}		US\$ tCO ₂ ^{-1b}
	Electricity	Thermal	
Ocean liming (Oxy-fuel flash calciner: limestone)	1.3	4.8	126
Ocean liming (Endex CFC: limestone)	-0.1	5.5	100
Ocean liming (Oxy-fuel flash calciner dolomite)	0.7	3.2	95
Ocean liming (Endex CFC: dolomite)	-0.1	4.2	72
Ocean liming (Solar calciner: limestone)	0.4	0.6 ^c	159

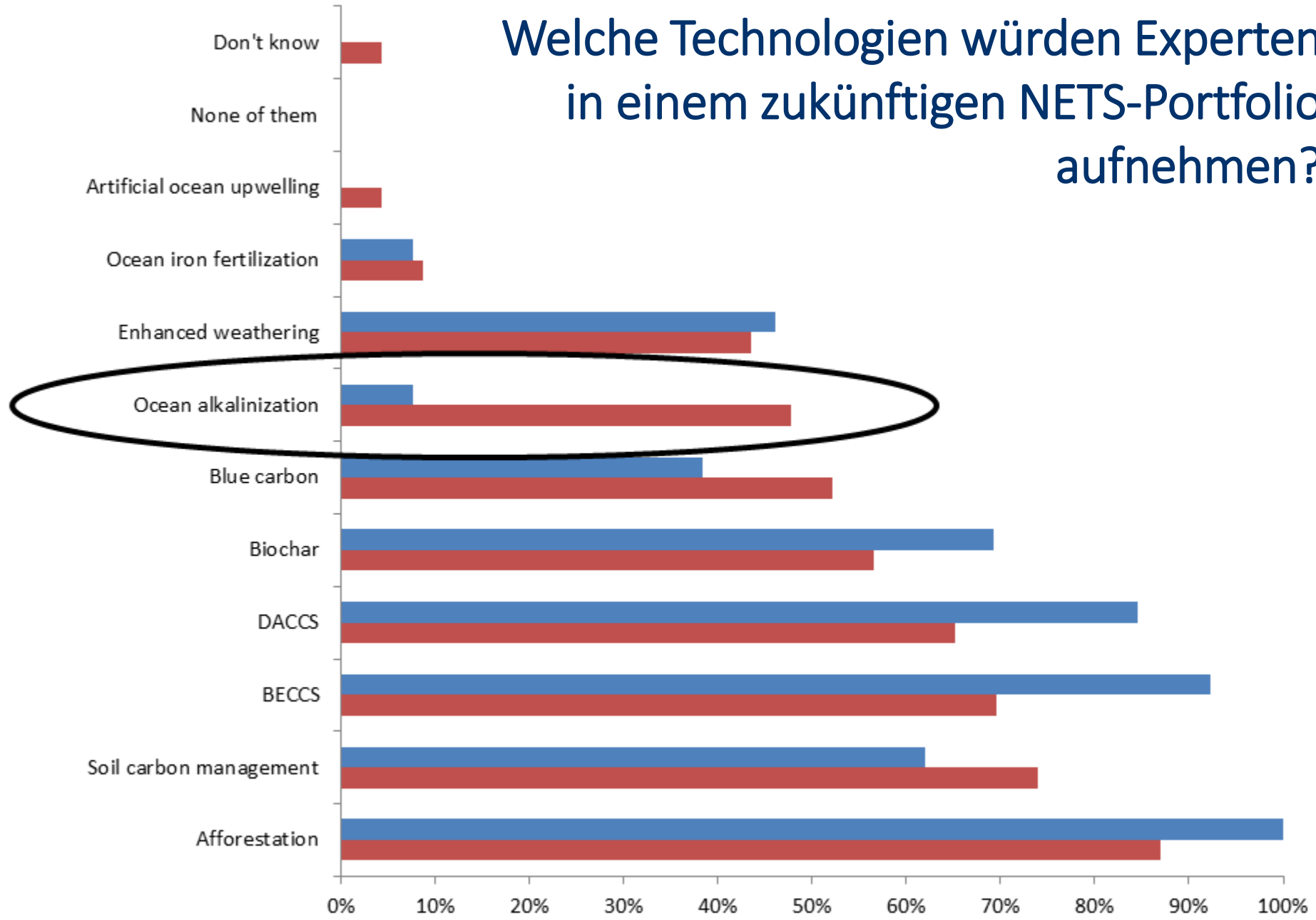
IV) Unterschiedliche Annahmen bei der Lösungskinetik (Labor versus natürliche Bedingungen)

[for the example of Olivine] ...seems likely that these surface area limiting processes are very significant in natural systems, lowering olivine surface reactivity in many environments compared to rates measured on cleaned surfaces in the laboratory.

Oelkers et al. 2018: Olivine dissolution rates: A critical review

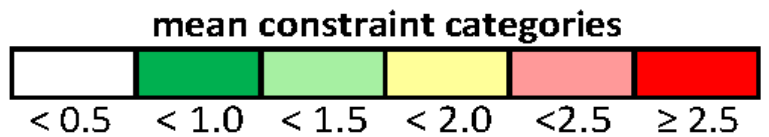
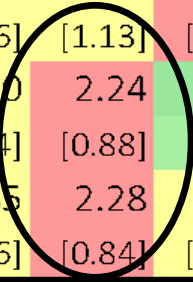
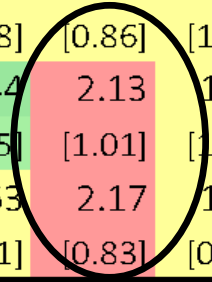
b

Welche Technologien würden Experten in einem zukünftigen NETS-Portfolio aufnehmen?



Welche Faktoren schränken die zukünftige Anwendung ein?

	mean constraint [std]										mean std
	AF	BECCS	BC	EW	SC	DAC	BLC	AOA	OIF	AOU _p	
non-CO ₂ forcing	0.72 [0.65]	1.15 [0.99]	0.83 [0.76]	0.70 [0.8]	1.04 [0.9]	0.44 [0.7]	0.67 [0.59]	0.53 [0.96]	0.67 [0.73]	0.59 [0.87]	0.73 [0.22]
climate feedbacks	1.94 [0.83]	1.06 [0.89]	0.86 [0.97]	1.00 [1.02]	0.83 [1.02]	0.53 [0.97]	0.91 [0.95]	0.86 [1.08]	0.92 [1.06]	1.14 [1.15]	1.01 [0.37]
env. & human health side eff.	0.97 [0.91]	1.58 [0.92]	1.00 [0.9]	1.36 [0.81]	1.00 [0.93]	0.68 [0.98]	0.95 [1.05]	1.79 [0.98]	2.08 [0.98]	2.05 [0.97]	1.35 [0.5]
resource competition	2.47 [0.79]	2.63 [0.83]	1.57 [1]	1.50 [1.03]	1.44 [1.08]	0.83 [0.8]	1.43 [1.16]	0.70 [1.02]	0.88 [1.08]	0.64 [0.85]	1.41 [0.7]
carbon cycle resp./feedb.	1.47 [1.08]	1.40 [0.89]	1.30 [0.99]	1.31 [1.04]	1.42 [0.99]	1.48 [1.06]	1.74 [0.92]	1.92 [0.97]	2.08 [0.95]	2.23 [0.81]	1.63 [0.33]
phys. CO ₂ removal capacity	1.59 [0.98]	1.84 [0.86]	1.80 [1.06]	1.96 [1.13]	2.06 [0.91]	1.81 [1.08]	2.00 [1.24]	1.64 [1.22]	2.00 [1.21]	2.00 [1.3]	1.87 [0.16]
political feas. (incl. accept.)	1.44 [0.95]	2.13 [1.01]	1.50 [1.04]	2.24 [0.88]	1.39 [1.05]	1.41 [1.02]	1.42 [0.88]	2.42 [0.7]	2.62 [0.7]	2.38 [0.92]	1.89 [0.5]
cost effectiveness	1.63 [1]	2.17 [0.83]	1.85 [0.86]	2.28 [0.84]	1.66 [0.94]	2.62 [0.56]	1.80 [1.01]	2.13 [1.06]	2.18 [1.1]	2.35 [0.99]	2.07 [0.32]
mean	1.53	1.74	1.34	1.54	1.35	1.23	1.37	1.50	1.68	1.67	
std	[0.54]	[0.54]	[0.41]	[0.57]	[0.4]	[0.75]	[0.48]	[0.71]	[0.74]	[0.76]	



Marktanalyse CDR

(work in progress)

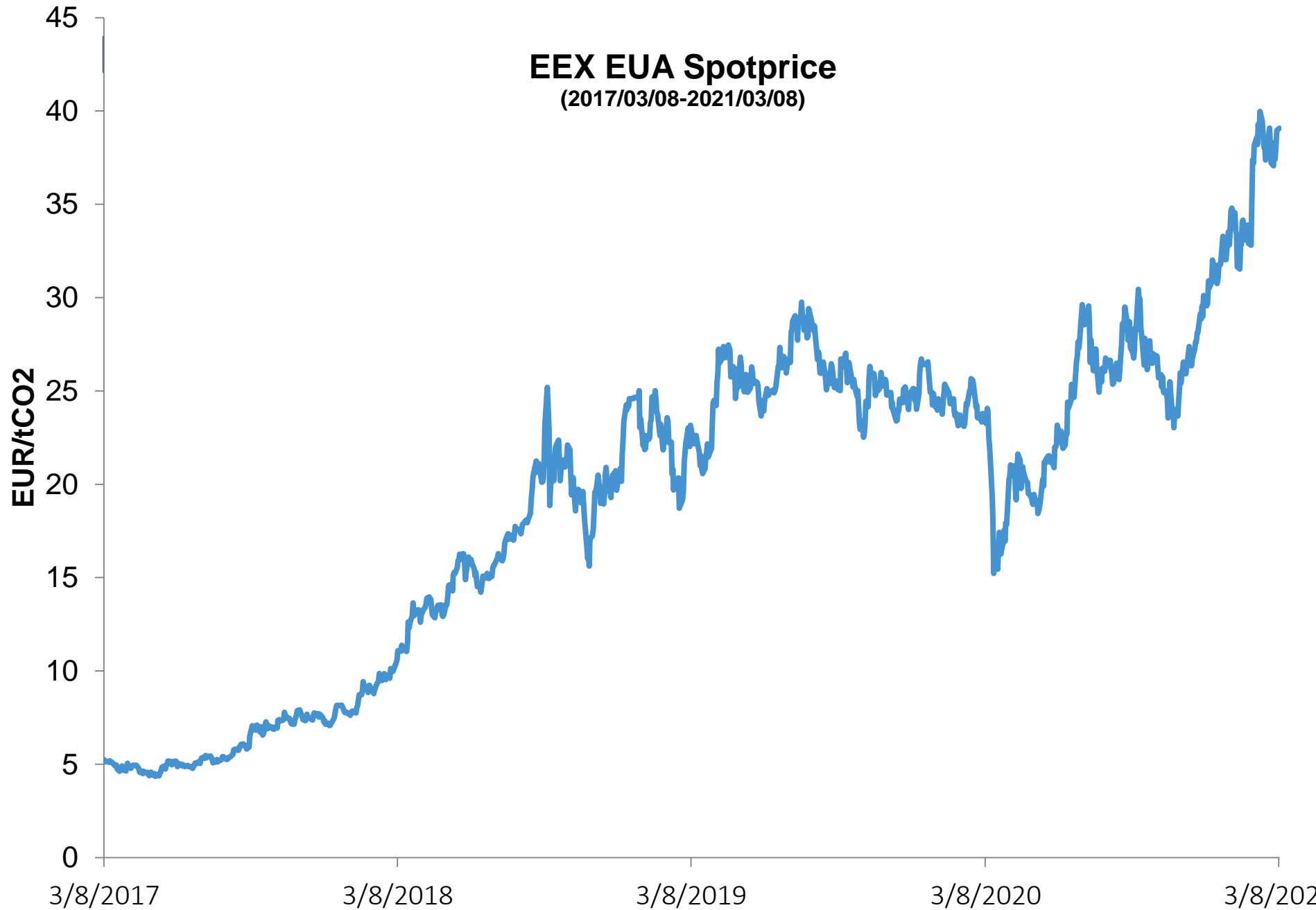
- Auswertung von Firmendatenbanken/Zeitungsartikeln...(Airminers, Circular Carbon Networks, etc).
- Bisläng >500 Firmen/Organisationen identifiziert
- Etwa 164 ausgewertet

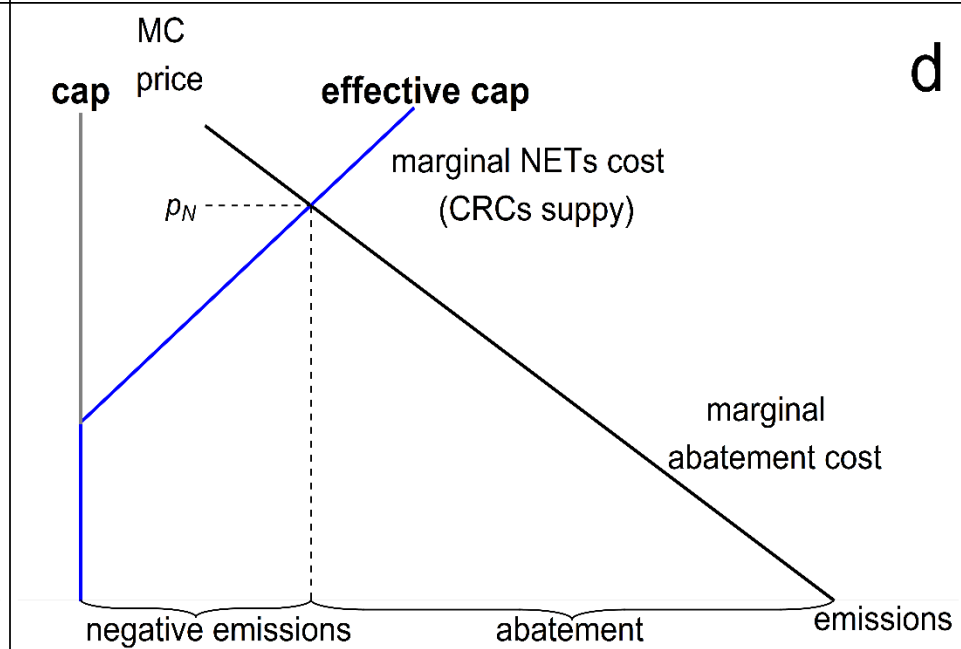
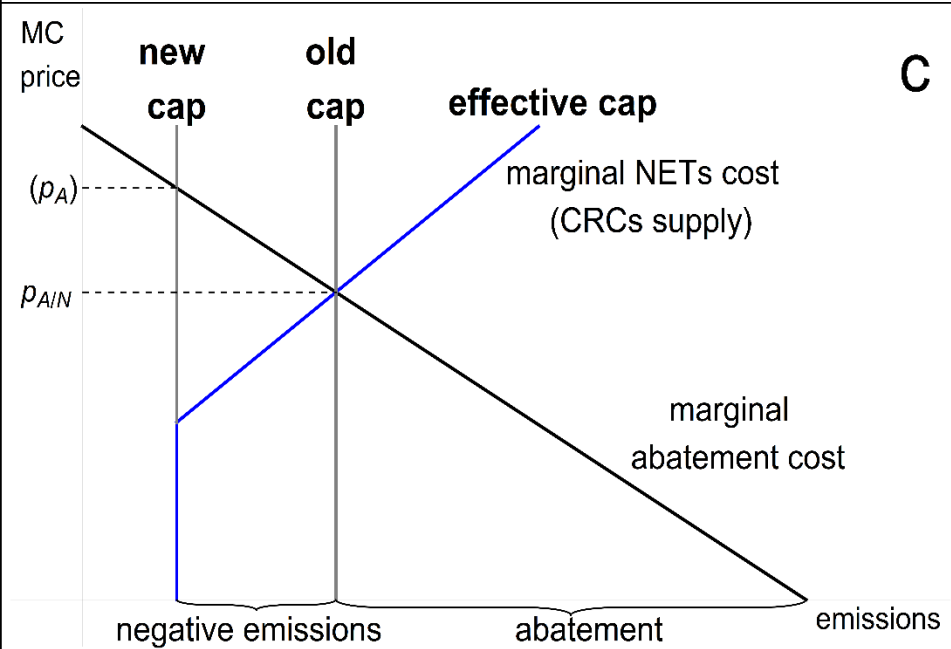
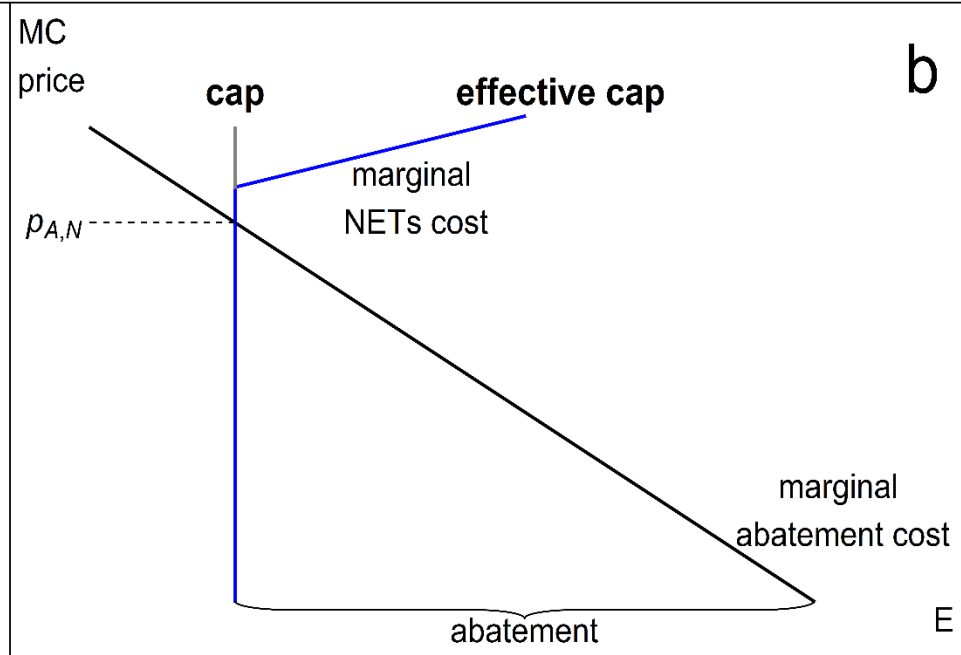
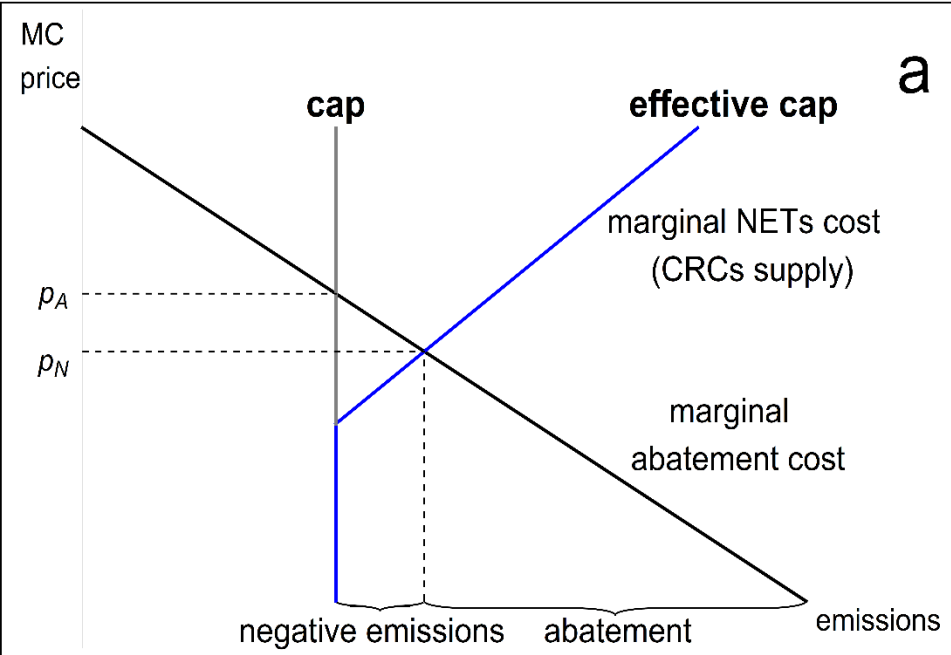
Land	#	Fokus/Einschätzung
USA	84	Breites Portfolio/Prozessketten
Canada	15	Breites Portfolio/Prozessketten
UK	14	Breites Portfolio/Prozessketten
...		
Niederlande	8	Olivine/mineralische Bindung an der Küste
Deutschland	6	DAC/Storage in Produkten
Norwegen	5	CO2 Transport/geologische Storage
...		

Anreize:

- CCU (synfuels, products)
- Offsetting (Konsumentenpräferenz)
- Lifestyleprodukte
- **CO2 Märkte**
- ...

EEX EUA Spotprice (2017/03/08-2021/03/08)





- Erhöhung/Beeinträchtigung von Erholungsfunktion (Wald/Seegräser)
- Positiver/Negativer Einfluss auf (regionales) Klima (Wasserkreislauf/Albedoeffekte)
- Erhaltung/Reduktion der Biodiversität
- Verringerung Eutrophierung (Blue carbon)
- (lokale) Verringerung der Versauerung/Schutz von Korallenriffen
- Nahrungsgrundlage für Fische (künstlicher Auftrieb)
- Küstenschutz
- ...

⇒ Eine auf CO₂-Aufnahme beschränkte Steuerung kann im Hinblick auf die Nebenwirkungen zu einer nicht-optimalen CDR Strategie führen

⇒ Zahlreiche naturnahe oder ökosystembasierte CDR Ansätze sind im Kontext von lokalen Gemeinschaftsgütern zu organisieren (*Engaging the local commons to manage the global commons*)

- Technologie/Methode
 - Funktionsweise, Umsetzung, Effektivität, Nebeneffekte, operative Kosten, Skalierbarkeit einzelner Ansätze
- Umsetzung
 - Portfolios von CDR Maßnahmen, logistische Herausforderungen, CO₂-Transport und –speicherung
- Anrechenbarkeit
 - Verrechnung mit Emissionsvermeidung, Anrechnung von temporärer Lagerung, Verifizierung der Entnahme und Lagerung, Rückkopplung mit Senken
- Anreizsysteme und Steuerung
 - Akteure (politische und privatwirtschaftliche)
 - Einbindung in die (europäischen) Klimapolitik
 - Akzeptanz

STRUKTURWANDEL

Wissen schafft Perspektiven für die Region!

In der sächsischen Lausitz und im mitteldeutschen Revier werden zwei neue Großforschungszentren entstehen. Mit „Wissen schafft Perspektiven für die Region!“ starten das BMBF und der Freistaat Sachsen einen Wettbewerb für den Aufbau der Zentren.



Anhang

Marktentwicklung CCU

Global CO2 Initiative/University of Michigan:

2030 Marktvolumen von über **800 Mrd. USD** und **7 GtCO₂/Jahr** *verbrauchen*

Circular Carbon Network: CCU-Firmenübersicht (primär Start-ups), umfasst derzeit 252 Firmen aus 23 Ländern.

McKinsey & Company

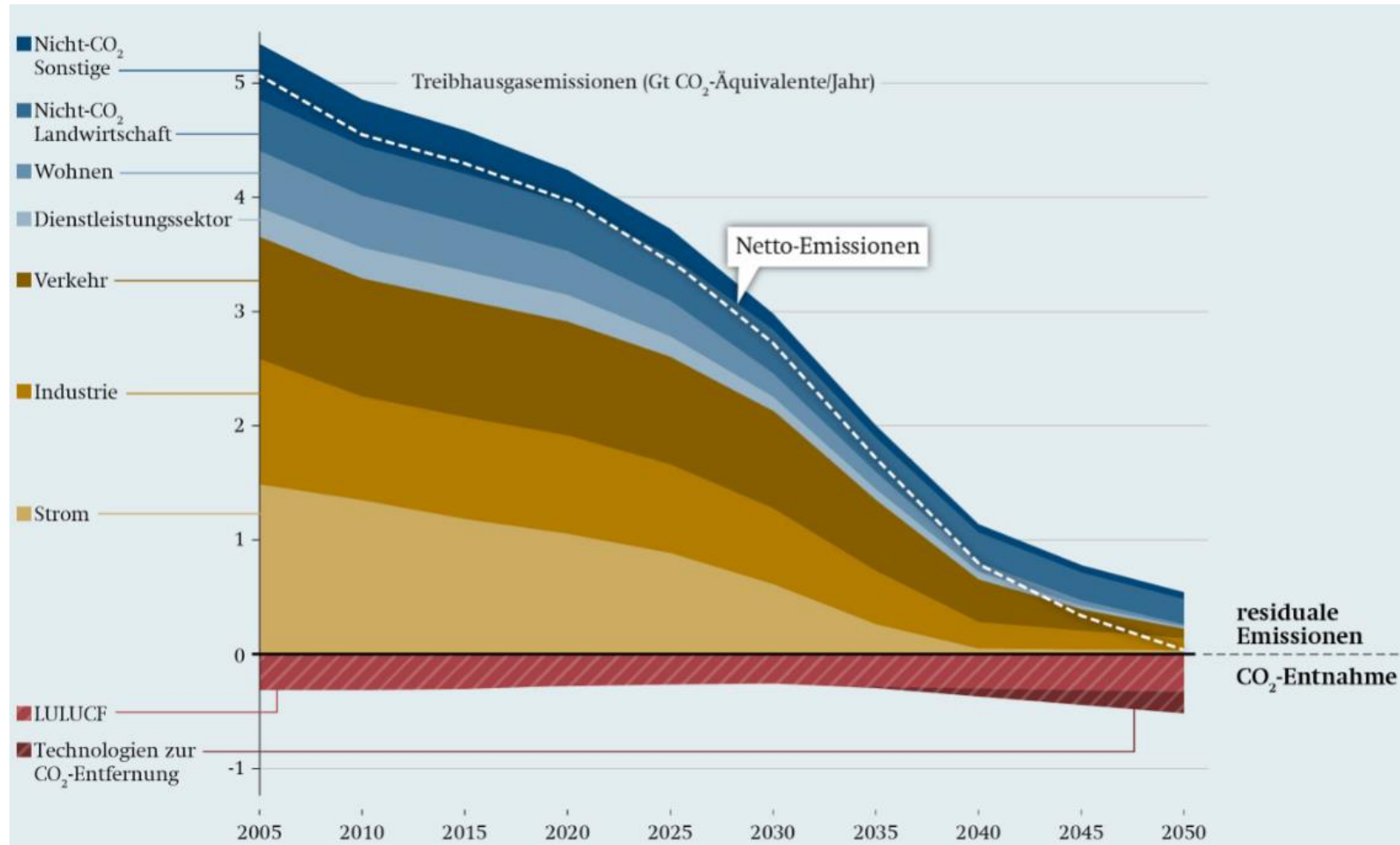
2030 Marktvolumen zwischen **800 Mrd. und 1 Billion USD**

die Verwendung von CO₂ zur Herstellung von Kraftstoff, zur Anreicherung von Beton und zur Stromerzeugung (BECCS) allein könnte die Emission um eine **1Gt CO₂** pro Jahr *reduzieren*.

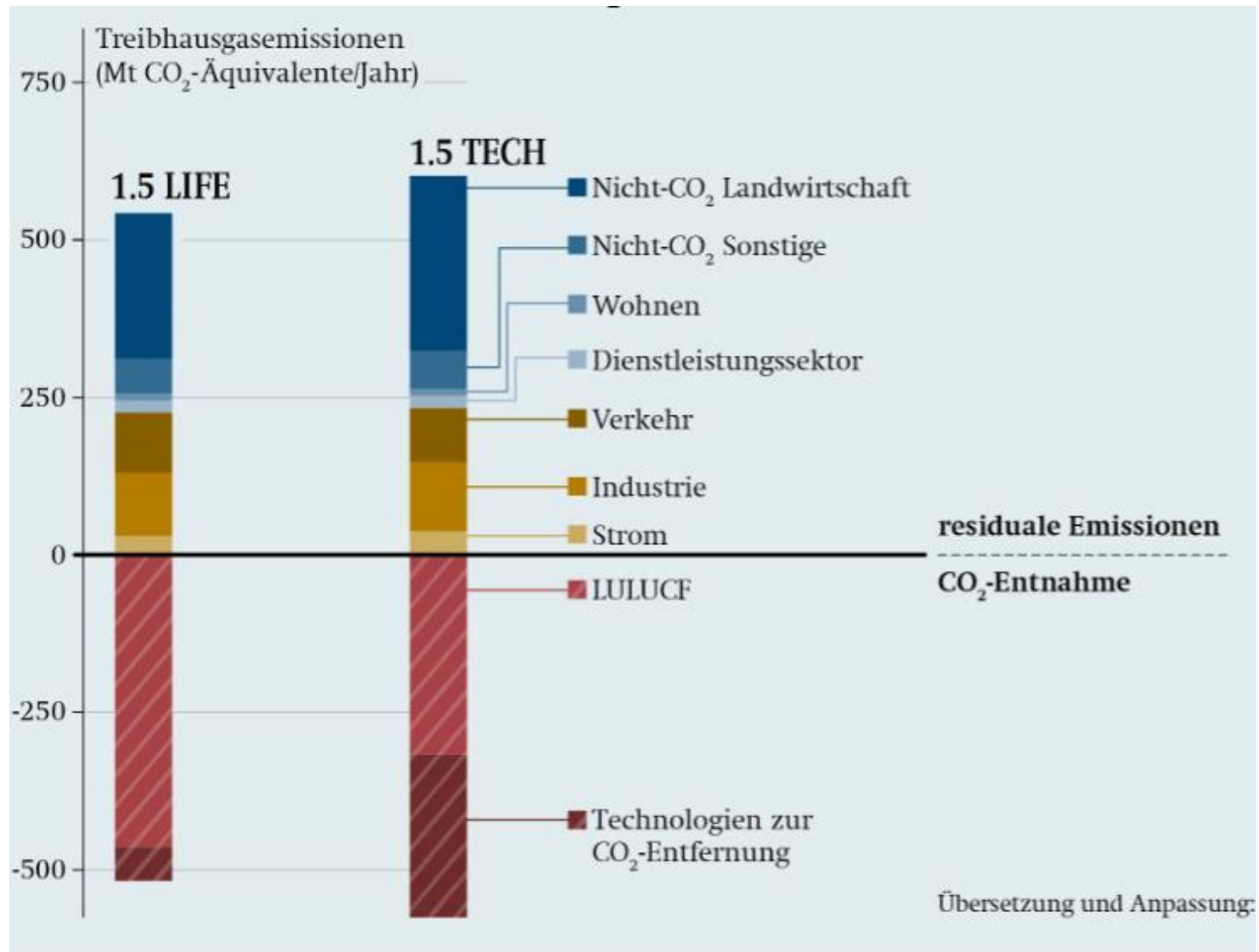
Boston Consulting Group

...schätzen dass bei der Herstellung von Kraftstoffen bzw. der Zementherstellung mehr als **1 Gt CO₂** pro Jahr *verbraucht* werden könnte.

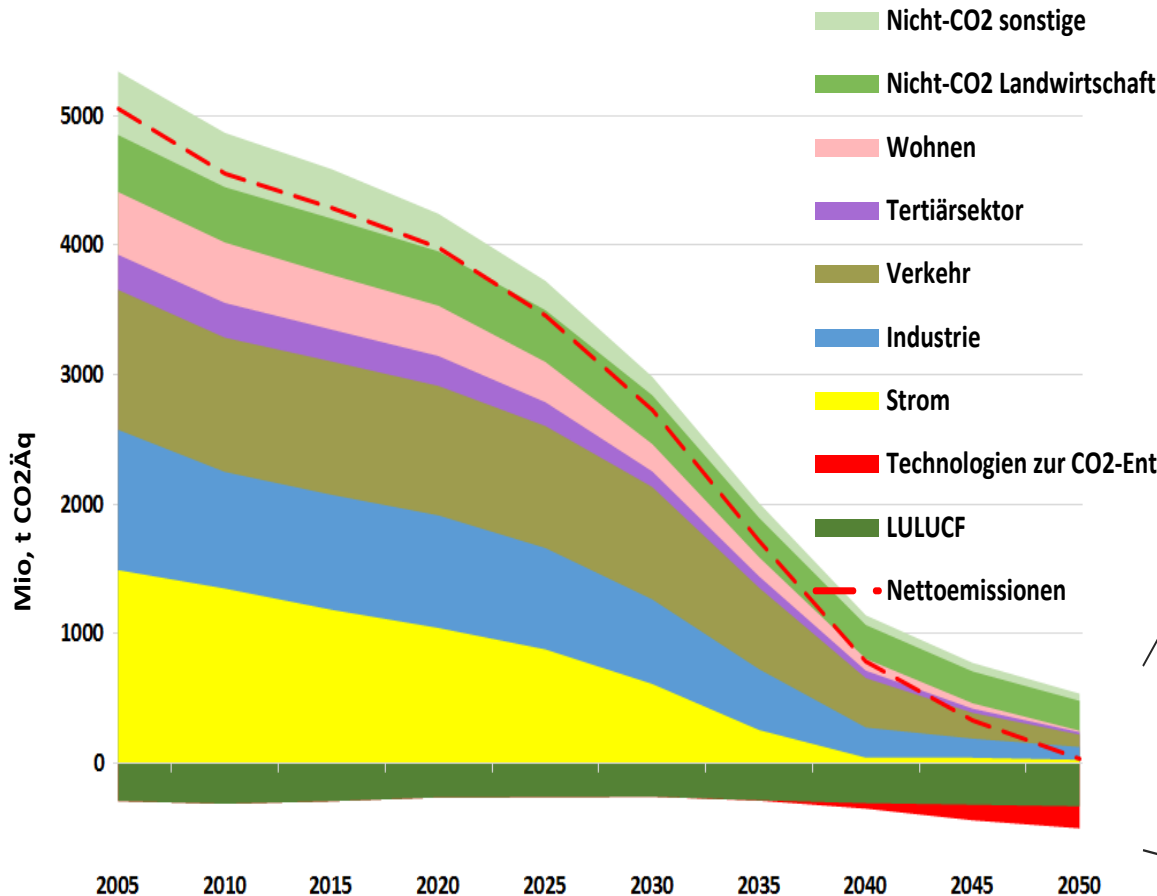
Notwendigkeit CO₂-Entnahme EU für *Netto Null*



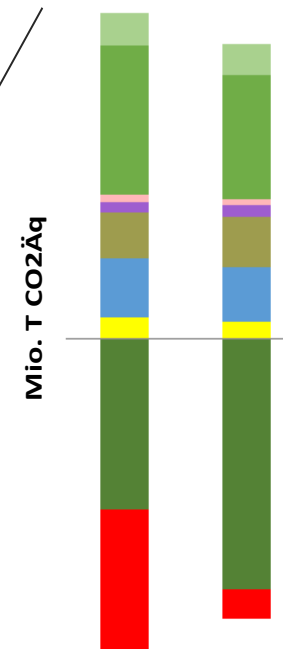
Normalisierung EU: *Rest-Emissionen vs. Entnahmen*



(Europäisches) NETs Volumen

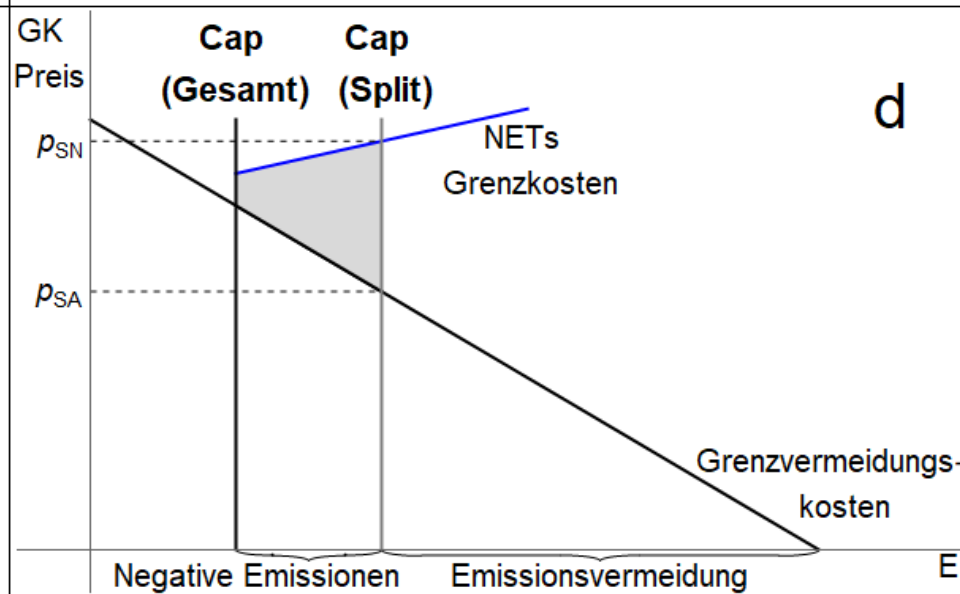
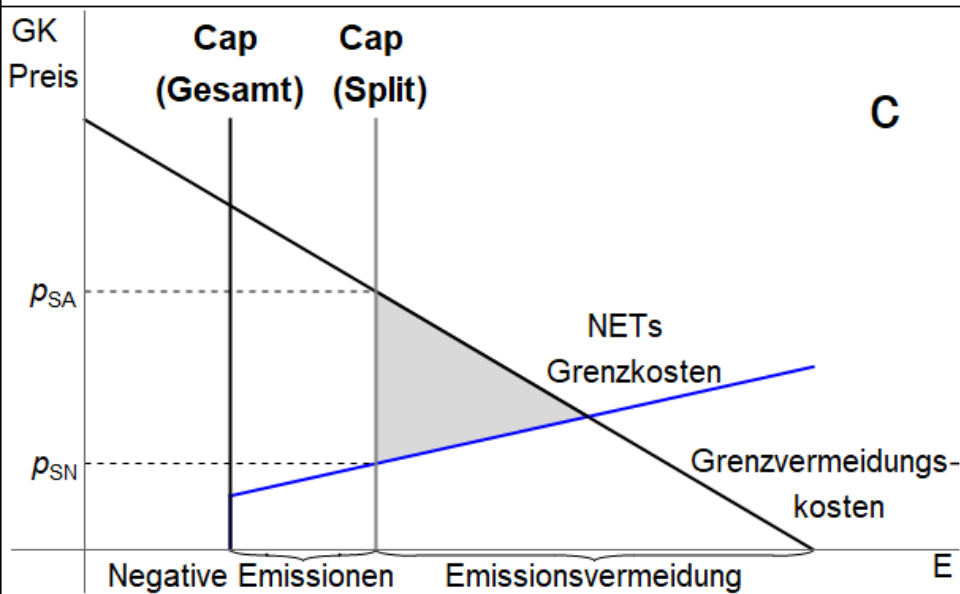
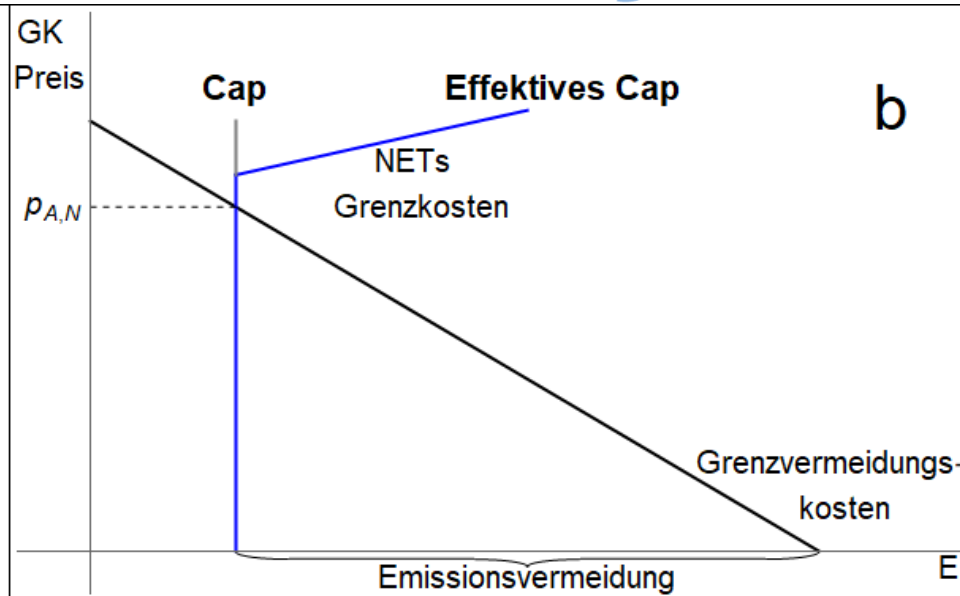
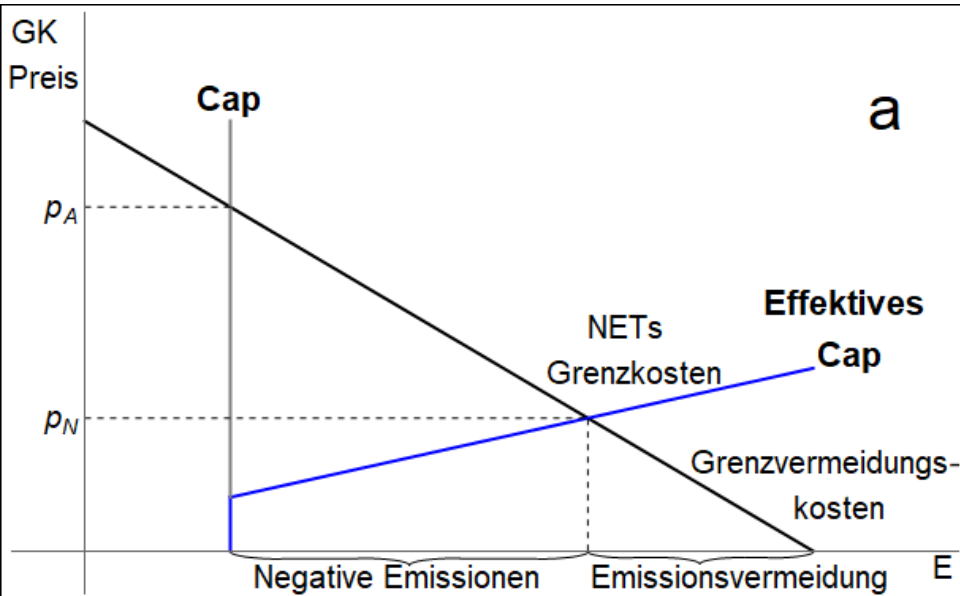


Verschiedene Wege zu null THG-Emissionen bewirken unterschiedliche Werte für Restemissionen und Absorption von THG-Emissionen

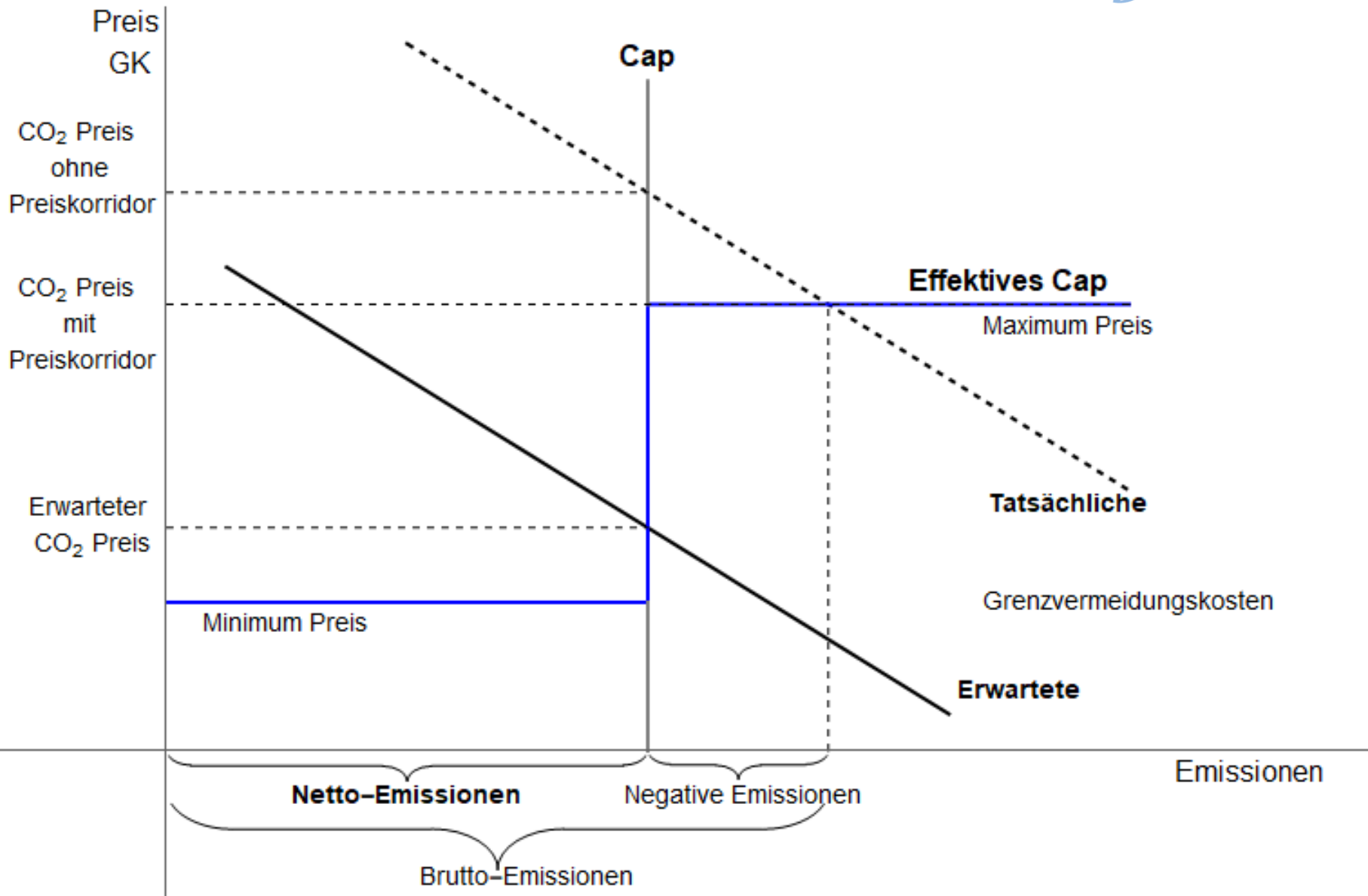


COM (2018) 773 final

Getrennte Ziele (Caps)



Begrenzte Integration



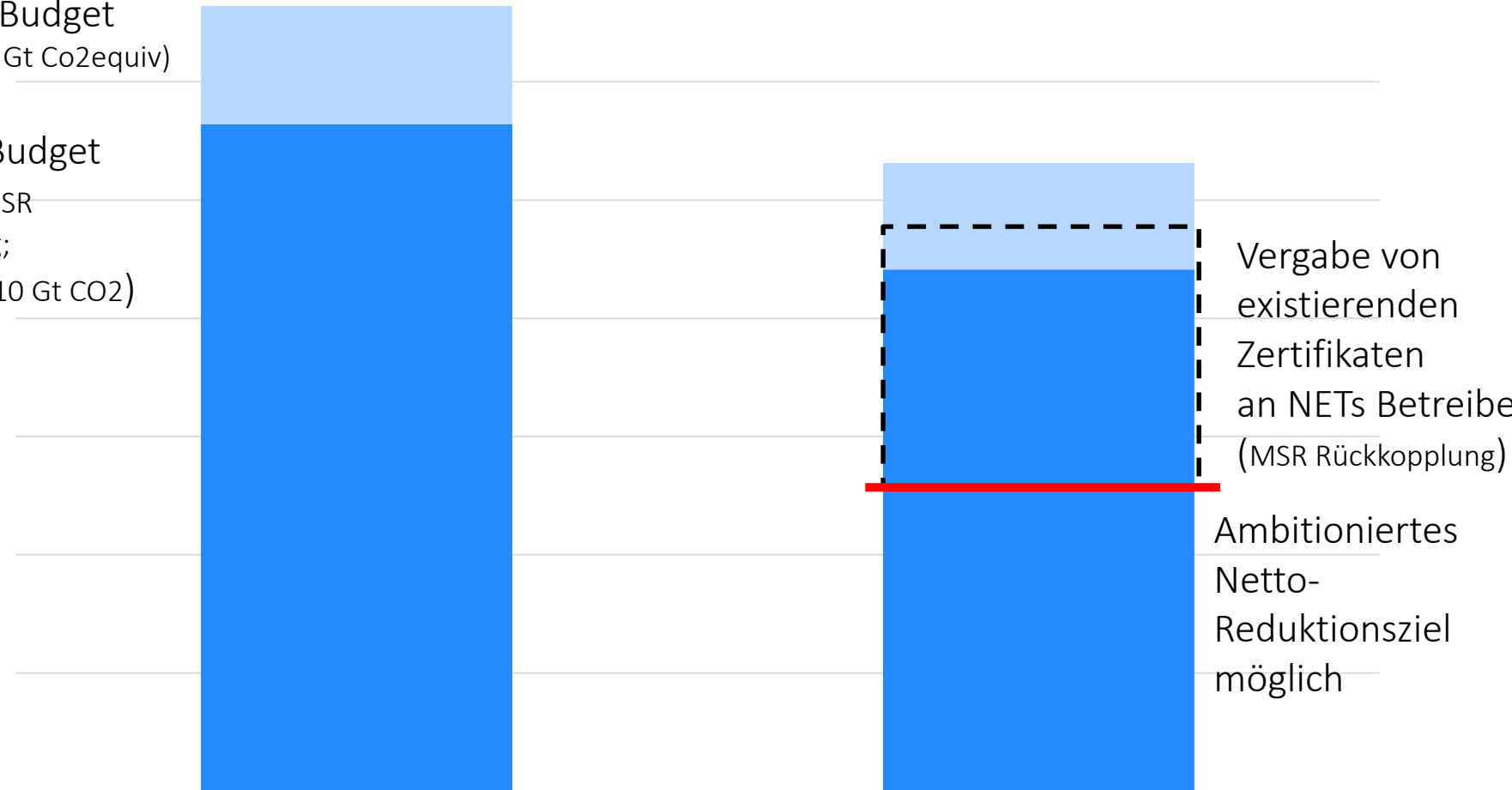
Verwendung von Zertifikaten

Bestehende Regelung
(Zertifikateausgabe endet
voraussichtlich in 2057)

Neue Regelung im Einklang mit neuen
EU Zielen
(Zertifikateausgabe endet voraussichtlich in ???)

Brutto Budget
(etwa 33 Gt Co2equiv)

Netto Budget
(durch MSR
Löschung;
minus 5-10 Gt CO2)



- Unterscheidung zwischen „**ökosystem-basierten**“ (=>LULUCF) und „**technischen**“ (=> EU ETS) Prozessen der CO₂-Entnahme
- Geltendes EU ETS Recht bietet Anreiz, dass CO₂, das nicht in die Atmosphäre gelangt (auch via CCS), weil es dann nicht durch entsprechende Zertifikateabgabe ausgeglichen werden muss; für negative Emissionen ist hingegen derzeit kein zusätzlicher Anreiz vorgesehen. Die Aufnahme von Anlagen die CO₂ aus der Atmosphäre entfernen erfordert entsprechend eine **grundlegende Änderung** der ETS Richtlinie (Art. 24).
- Besonderheit für BECCS:
 - **Emissionsbezug** ist gegeben
 - Würde Bereichsausnahme (Ziff. 1, Anhang 1) aufgehoben, würden **auch Biomasse-Anlagen** in den Anwendungsbereich der ETS Richtlinie fallen; könnten aber durch die Anwendung von CCS (Art 12 Abs 3a) die Abgabe von Zertifikaten vermeiden.
 - Theoretisch bestünde die Möglichkeit, Betreiber von BE(CCS)-Anlagen bei der freien Allokation von Zertifikaten zu berücksichtigen.
 - Bei einer freien Zuteilung von Zertifikaten, können BECCS Anlagen diese Zertifikate verkaufen und erhalten **implizit Zertifikate für die Entnahme von CO₂** aus der Atmosphäre.