VDI Wissensforum

ITAD Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

Stand und Aussicht | ete.a Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umweltengineering & Beratung mbH

Rudi H. Karpf

35. VDI-/ITAD-Fachkonferenz Thermische Abfallbehandlung 2023 |
18.-19. Oktober 2023, Würzburg

Hintergrund Motivation

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

Betreibern von Abfallverbrennungsanlagen bleiben aktuell nur zwei Möglichkeiten:

Sich dem modernen Ablasshandel **BEHG/TEHG** beugen

oder

Bau und Betrieb einer Carbon Capture (CC) Anlage

Déjà-vu der 80iger Jahre

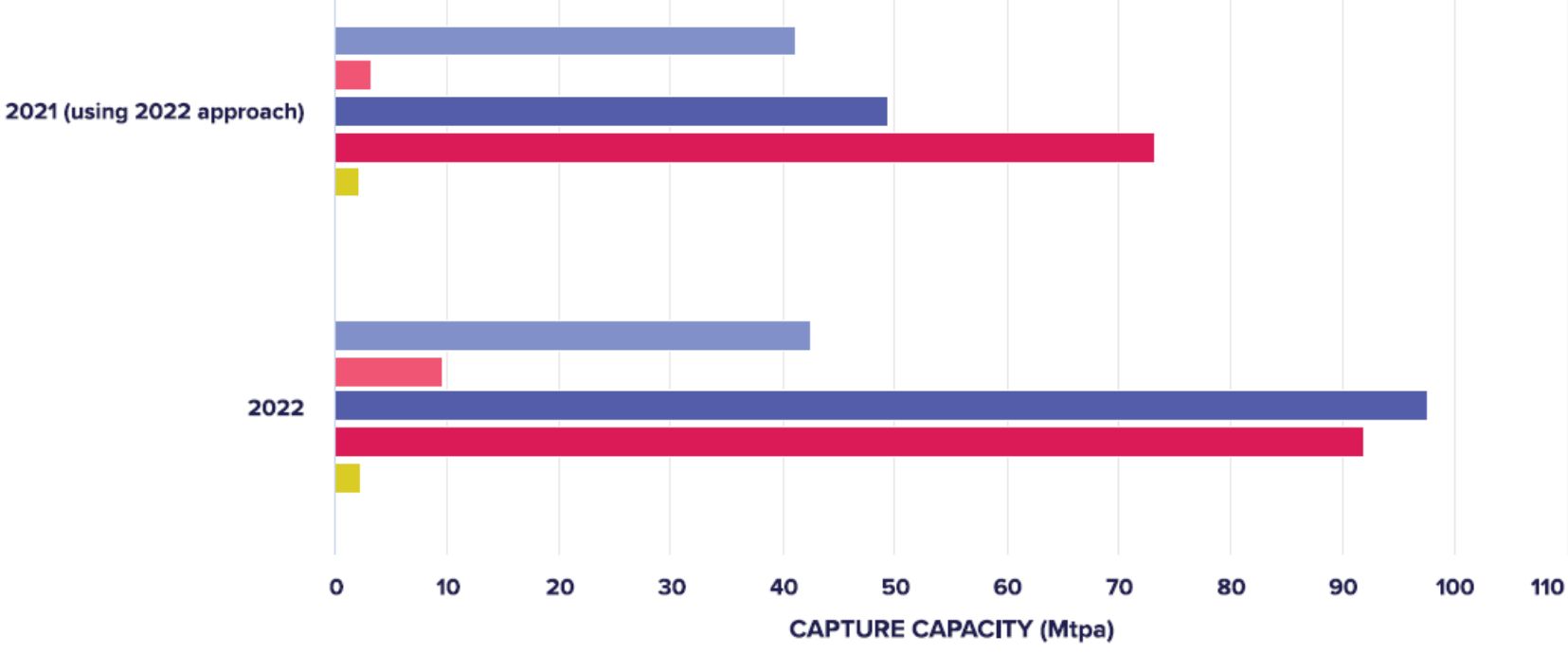
Als Folge des Waldsterbens wurde die 13. BImSchV (Großfeuerungsanlagen Verordnung) erlassen und trat am 1. Juli 1983 in Kraft.
Das führte dann zum Bau von Entschwefelungs- und Entstickungsanlagen.

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

…. und heute

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

Gesamte maximale CO_2-Abscheidungskapazität kommerzieller CCS/CCUS-Projekte weltweit



Quelle: GLOBAL STATUS OF CCS 2022, Global CCS Institute

ete.a

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

CCUS-Projekte Europa

Overview of existing and pl

LOCATION	NO. ON MAP	PROJECT NAME	P C S	CO_2 CAPACITY AFTER FULL EXPANSION (MTPA)
Germany	1	H2morrow	C St	9
	2	Leilac 2	C	1
	3	BlueHyNow	C St	data
	4	OXYFUEL100 (subproject of WESTKUSTE100)	C	data
	5	H2GE Rostock	C St	

FRANCE
1. DMX Demonstration in Dunkirk*
2. Pycasso*
3. K6[E]
4. CalCC[E]
5. **Cryocap**
6. D'Artagnan

NORWAY
1. **Sleipner CO_2 Storage***
2. Longship (including North
3. Barents Blue*
4. Norsk e-fuel
5. Borg CO_2*
6. **Snøhvit CO_2 Storage***
7. Smeaheia*

[E] EU Innovation Fund (11 selected, **4 awarded**)
Projects listed in **bold** are in operation

Quelle: IOGP International Association of Oil & Gas Producers

Denmark	CCS projects as part of the C4 – Carbon Capture Cluster Copenhagen (Amager Resource Center - ARC, Copenhagen), (Vestforbrænding, Glostrup-Copenhagen), (ARGO, Roskilde - west of Copenhagen); Various CCUS projects and investigations (Fortum, Nyborg), (Nordværk – ex RenoNord, Aalborg), (Kredsløb, Aarhus), (Energnist, Esbjerg), (Norfors, Hørsholm), (AffaldPlus, Næstved) [26]
Finland	All WtE plants in Finland have a CCU project planned or they have announced that are looking into Power-to-Gas projects: CCU Waste-to-Material Carbon2x pilot (Fortum, Riihimäki); CCU EnergySampo project for the production of synthetic methane (Westenergy, Mustasaari); CCU Nordic Ren-Gas projects for the production of synthetic methane or other products (Kotkan Energia, Korkeakoski- Kotka), (Tammervoim, Tampere), (Lahti Energia, Lahti); Other Power-to-Gas CCU projects (Vantaan Energia, Vantaa), (Riikinvoima, Leppävirta), (Oulun Energia, Oulu), (Lounavoima, Salo)
France	CCU pilot project for CO_2 use in algae production (SUEZ, Créteil - Paris), (Syctom, Saint-Ouen - Paris)
Germany	CCU project in preparation phase for methanol synthesis (EEW, Stavenhagen); CCU project for the production of synthetic methanol (ZASt, Zella-Mehlis)
Italy	CCS Ravenna Hub project (Herambiente, Ravenna); Hot Potassium Carbonate Test Installation (A2A, Corteolona)
Netherlands	CCU first large-scale facility with CO_2 delivery to the greenhouse horticulture sector via Air Liquide (AVR, Duiven); CCU pilot plant for CO_2 transformation into $NaHCO_3$ and further captured CO_2 applications (Twence, Hengelo); CCU pilot plant for CO_2 liquefaction and delivery to the greenhouse horticulture sector via OCAP (HVC, Alkmaar); CCUS planned projects and investigations at different stages (AVR, Rozenburg), (AEB, Amsterdam), (Attero, Moerdijk), (REC, Harlingen), (ARN BV, Weurt); OSIRIS CCU project for CO_2 capture and supply to two greenhouse clusters (PreZero, Roosendaal); HyNetherlands CCU project for methanol production (EEW, Delfzijl)
Norway	CCS first large-scale project as part of the wider Longship project (Hafslund Oslo Celsio, Klemetsrud); CCS Borg CO_2 cluster (Frevar, Fredrikstad), (Kvitebjørn Bio-El, Fredrikstad), (Sarpsborg Avfallsenergi, Sarpsborg); Other CCUS projects (Statkraft Varme, Trondheim), (Returkraft, Kristiansand), (BIR Ressurs, Bergen), (Forus

Quelle: Portetti, Stengler; The Climate Roadmap of the European Waste-to-Energy Sector The path to Carbon Negative; 23rd -27th October 2022, Lyon, France

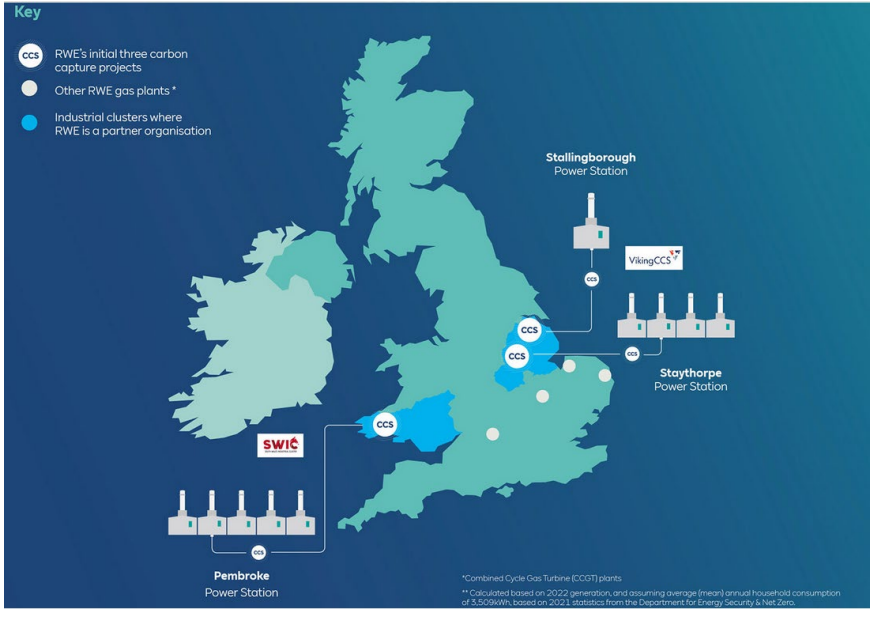
ete.a

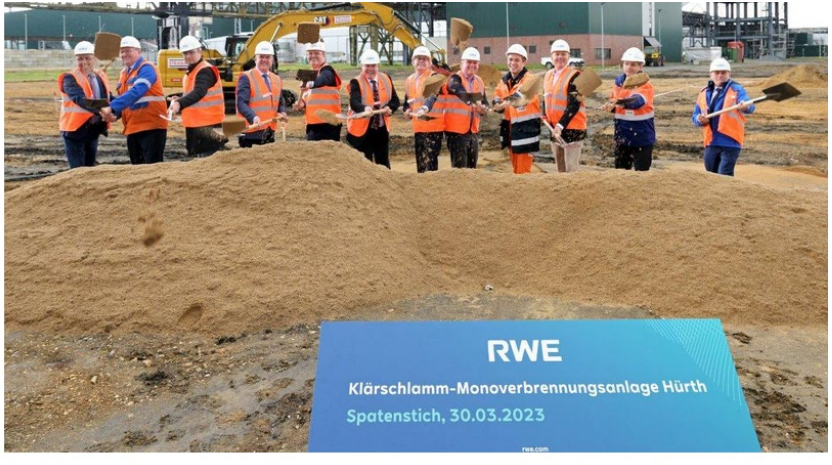
Bau von Amin Wäschen

RWE present their ambitious UK plans today

RWE announces development proposals for 3 new carbon capture projects in the UK.

With up to 4.7GW of decarbonised generation capacity - enough to power up to 8.1 million average UK homes, while capturing 11 million tonnes of CO2 per year.





Die neue Anlage wird auf dem Gelände des Kraftwerks Knapsacker Hügel, Betriebsteil Kraftwerk Goldenberg, errichtet.

- **RWE Power investiert 80 Millionen Euro in die thermische Verwertung**
- **Entsorgung gesichert, Zukunftsfähigkeit für Phosphor-Recycling gewährleistet**

Die Umsetzung weiterer Projekte am Knapsacker Hügel, wie zum Beispiel eine CO_2-Abscheidung und -Verflüssigung, wird zurzeit geprüft.

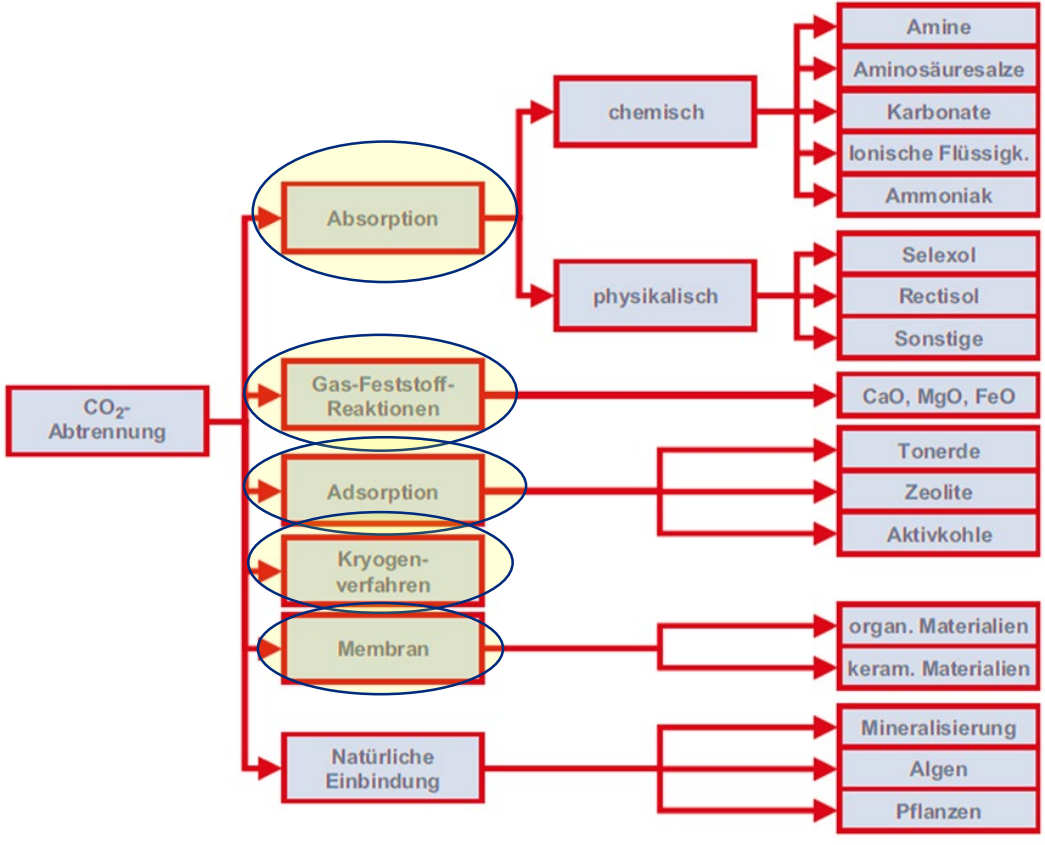
Quelle: RWE AG

Verfahrensübersicht Stand und Nutzung hinter Abfallverbrennungsanlagen

Quelle: Baker Hughes Company,2020

Verfahrensüberblick

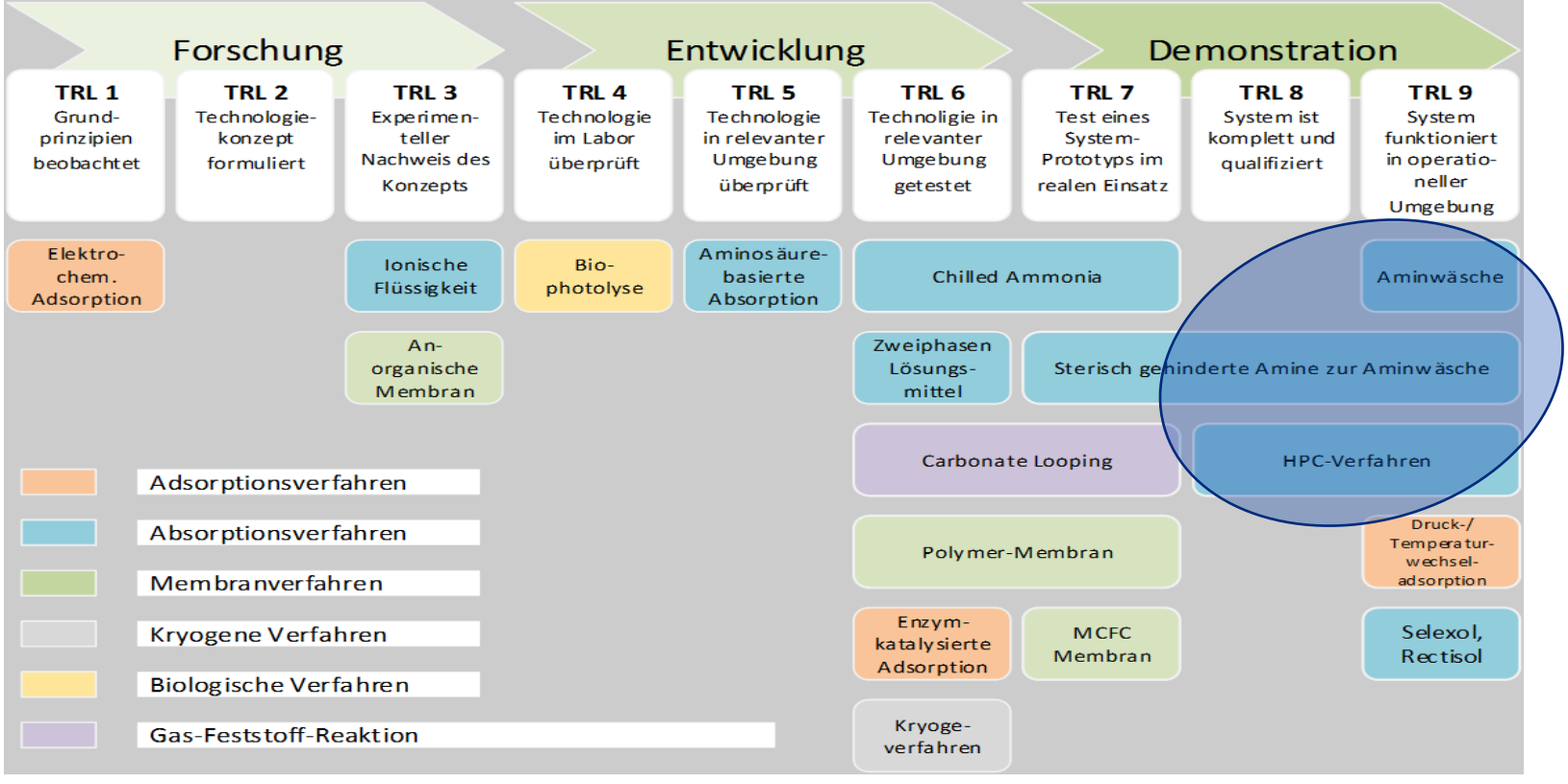
post combustion



Quelle: Thomeczek, M.; Fischedick, M.; Görner, K. (Hg.): CO2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie. Berlin: Springer-Verlag; 2015

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

Entwicklungsgrad derzeitiger post combustion CO_2-Abscheideverfahren



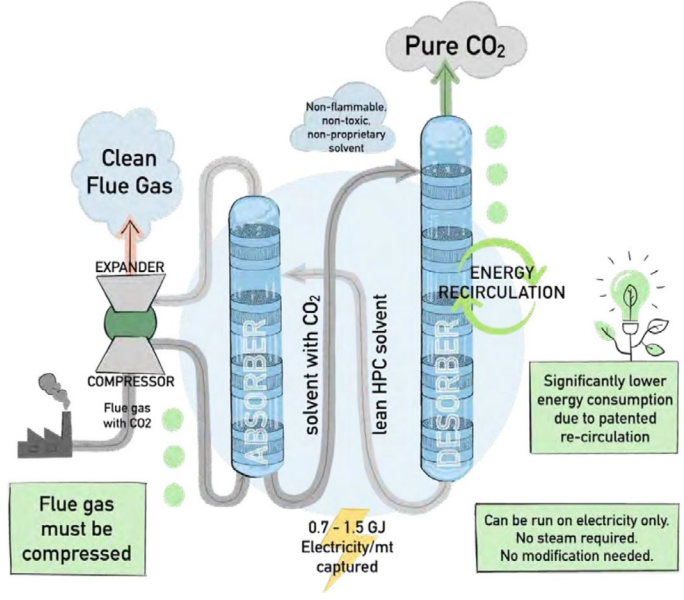
CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

Hot-Potassium-Carbonate-Verfahren (HPC / Benfield)

CO_2 Capsol / Capsol Technologies

- Klassisches HPC-Verfahren
  - Kompression des Rauchgases auf 5-8 bar
- Aktuelles EU-Projekt:
  - Stockholm Exergi BECCS
    Pilotinstallation mit CO_2-Abscheidung von 450 Mg/a
    (Ziel: Fullscale in 2025 mit 800.000 Mg/a)
- CapsolGo Pilotanlagen:
  - Aktiv: an WtE Öresundskraft (Helsingborg, Sweden)
  - In Vorbereitung Pilotanlage WtE von EEW in Hannover

$$CO_2 + K_2CO_3 + H_2O \text{ <-- --> } 2\ HCO_3^- + 2\ K^+$$



Quelle:Mirza, N.; Kearns, D.: State of the Art: CCS Technologies 2022. URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/05/State-of-the-Art-CCS-Technologies-2022.pdf [Stand: 20.03.2023]

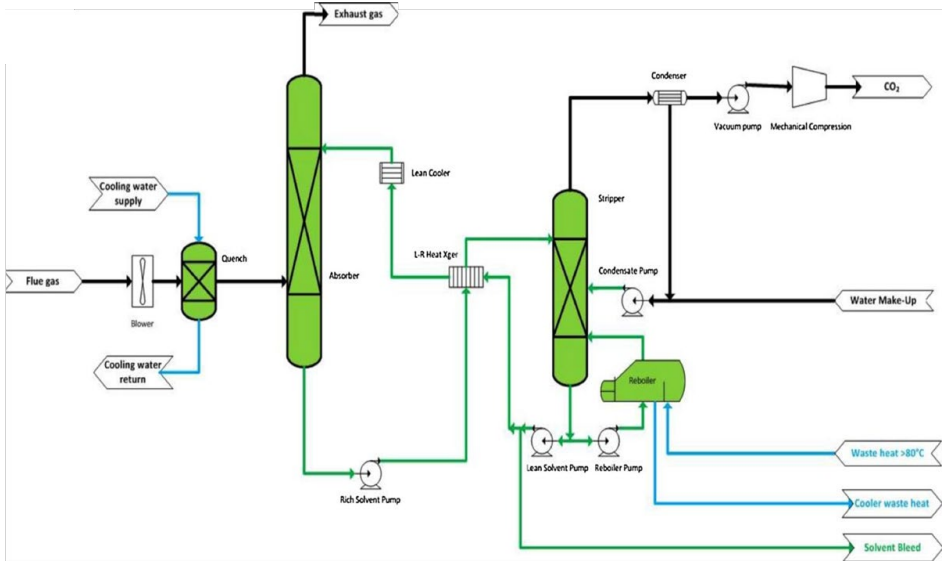
CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

Hot-Potassium-Carbonate-Verfahren (HPC / Benfield)

CO_2 Solutions by SAIPEM

- Absorptionsmittel: K_2CO_3-Lösung mit CA (Enzym)
- Absorber: 30-40 °C, nahe Atmosphärendruck
- Desorber: 80-85 °C
- nicht sensitiv gegenüber O_2, SOx, NOx

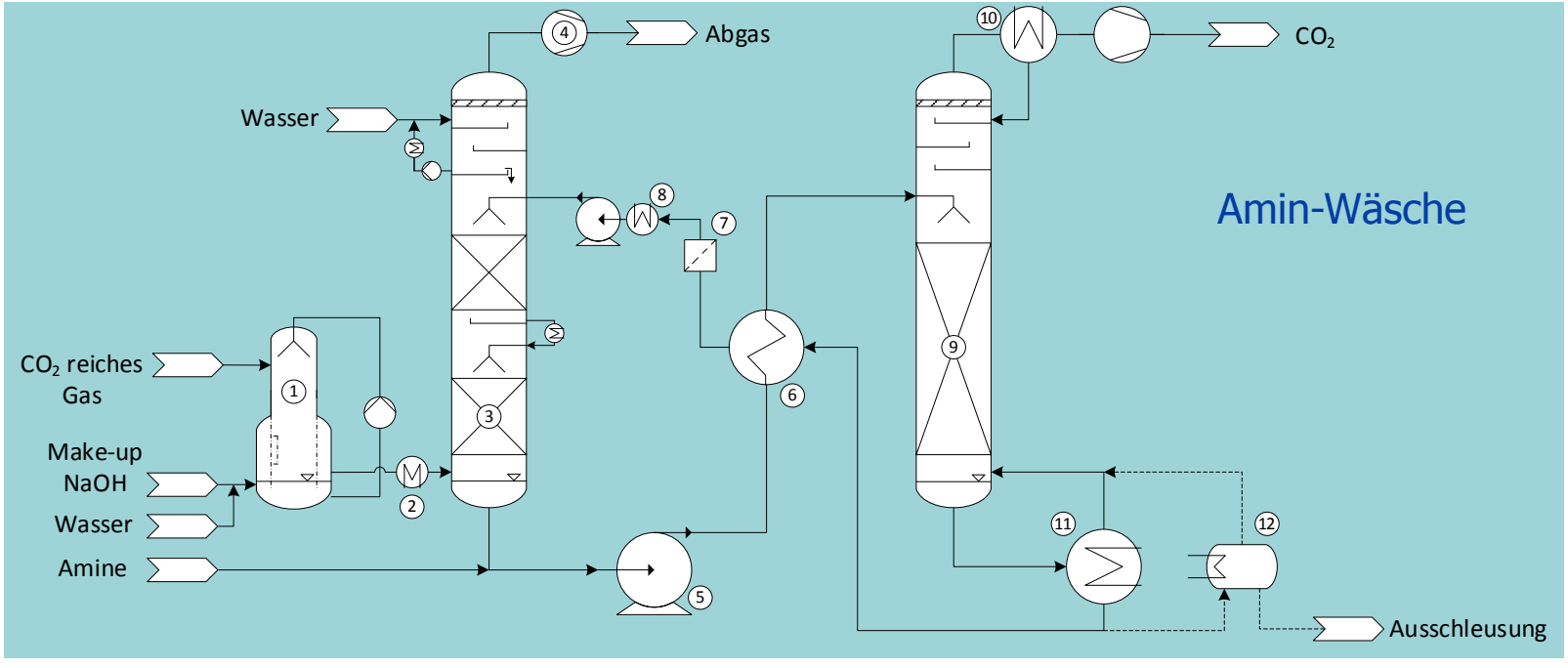
$$CO_2 + K_2CO_3 + H_2O \text{ <-- --> } 2\ HCO_3^- + 2\ K^+$$



Quelle: Mirza, N.; Kearns, D.: State of the Art: CCS Technologies 2022. URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/05/State-of-the-Art-CCS-Technologies-2022.pdf [Stand: 20.03.2023]

CA = carbonic anhydrase, Enzym was in der Lunge den CO_2-Transport koordiniert

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

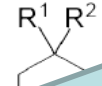


$$R\text{-}NH_{2\,(aq)} + CO_{2\,(aq)} + H_2O \leftrightarrow R\text{-}NH_3^{+}{}_{(aq)} + HCO_3^{-}{}_{(aq)}$$ Primäre Amine

$$R_1R_2\text{-}NH_{(aq)} + CO_{2\,(aq)} + H_2O \leftrightarrow R_1R_2\text{-}NH_2^{+}{}_{(aq)} + HCO_3^{-}{}_{(aq)}$$ Sekundäre Amine

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

unterschiedliche Amine in der Amin-Wäsche

Amintyp	Primär	Sekundär	Tertiär	Sterisch gehindert
Beispiel für Amin	MEA Monoethanolamin	DEA Diethanolamin	TEA Triethanolamin	HALS hindered amine light stabilizers
Chemische Formel	$H_2N—R_1$	$R_1—N—R_2$ I H	$R_1—N—R_2$ I R_3	
Eigenschaften				
CO_2-Beladung/ Kapazität	gering	hoch/mäßig	hoch	hoch
Reaktionsenthalpie	hoch	mäßig	gering	mäßig/ gering
Reaktionsgeschwindigkeit	sehr hoch	mäßig	gering	mäßig
Verdampfungsenthalpie	hoch	mäßig	gering	gering
Degradation	hoch	mäßig	gering	mäßig/ gering
Korrosivität	hoch	mäßig	gering	mäßig/ gering

klassisches Amin

energetisch optimierte Amine

ete.a

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

Charakteristische Kenndaten technischer Alkanolamin-Wäschern

Verfahren	MEA	DEA	Sulfinol D/M/X	MDEA	aMDEA
Zusammensetzung der Waschflüssigkeit	MEA (< 30 Ma.-%) in H_2O	DEA (< 30 Ma.-%) in H_2O	Sulfolan (40 Ma.-%) + (MDEA/)DIPA (40 Ma.-%) + Wasser	$MDEA_{aq}$ (< 55 Ma.-%)	MDEA (< 55 Ma.-%); Piperazin (< 10 Ma.-%) in H_2O
Hersteller	DOW (frei)	SNEA	Shell	z. B. BASF (OASE)	z. B. BASF (OASE)
Betriebsdrücke $p_{Absorber}$; $p_{Desorber}$ in bara	> 1; ca. 5	> 1; ca. 4	> 20 bar; ca. 4	> 1; ca. 2	> 1; ca. 2
Betriebstemperaturen $T_{Absorber}$; $T_{Desorber}$ in °C	ca. 30; 160	> 30; 140	35 … 140	40…60; 120	> 35; 120
Primärenergiebedarf $e_{primär}$ in kWh/m^3_{CO2} (NTP)	1,6 – 3,0	1,4 – 1,9	1,1 – 1,9	1,1 – 1,8	

Degradation von MEA [Jenkins 2002, Amine Best Practise Group 2007]

Auslöser	Degradationsprodukt	Eigenschaften
O_2	Carbonsäuren (Essigsäure, Ameisensäure)	Zwischenprodukt
SO_x, NO_2, Na, Cl, …	HSS: Formiate, Acetate, Sulfate	korrosiv, irreversibel
Essigsäure	Ethylendiamintetraessigsäure ($C_{10}H_{16}N_2O_8$)	Komplexbildner, „Eisenpumpe“
CO_2	Hydroxyethylethylendiamin (HEED)	korrosiv, irreversibel
HEED	Ethylendiamin ($C_2H_8N_2$)	Polymer, irreversibel

Die Waschmittelverluste bei der MEA-Wäsche liegen etwa zwischen 1,4 und 2,4 $kg/t_{CO2\ abgeschieden}$

Vergleich OASE blue: 300 $g/Mg_{CO2\ abgeschieden}$

ete.a

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

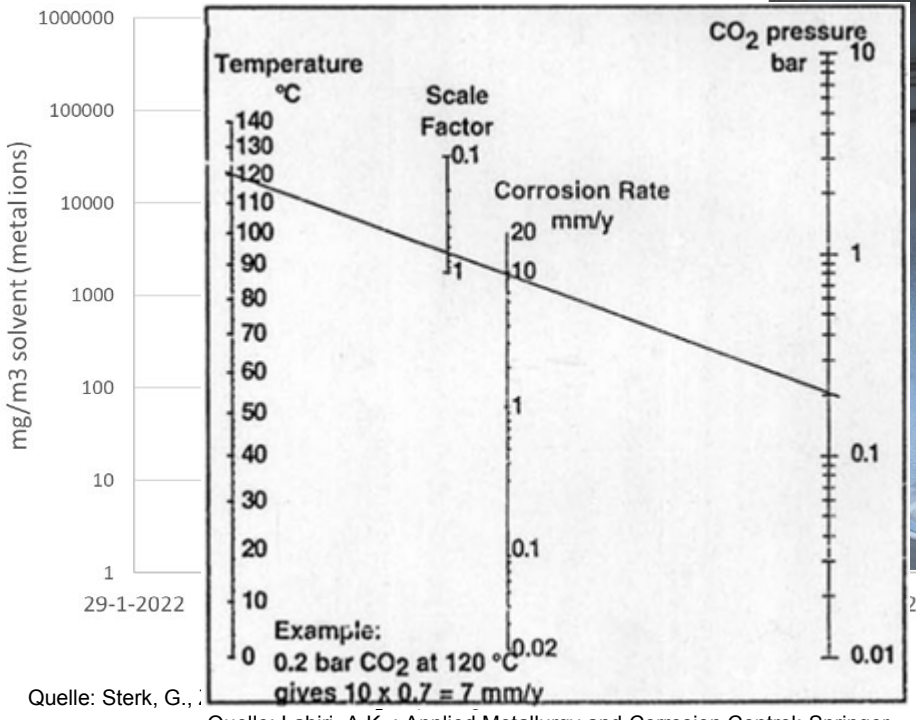
Erfahrungen mit Amin-Lösung (MEA) bei der AVR Duiven

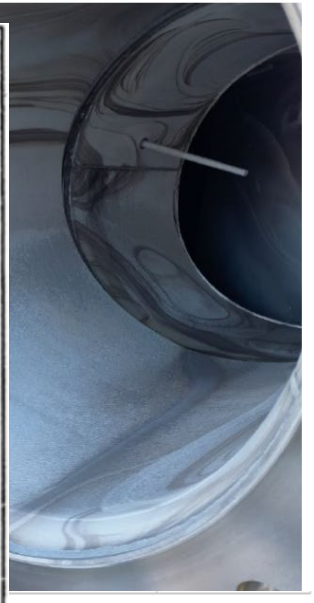
Degradation von MEA

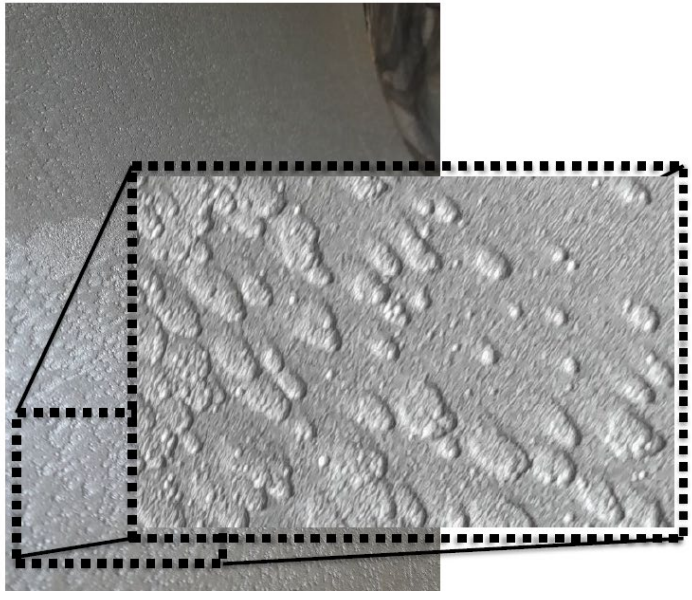
ete.a

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

Erfahrungen mit Amin-Lösung (MEA) bei der AVR Duiven







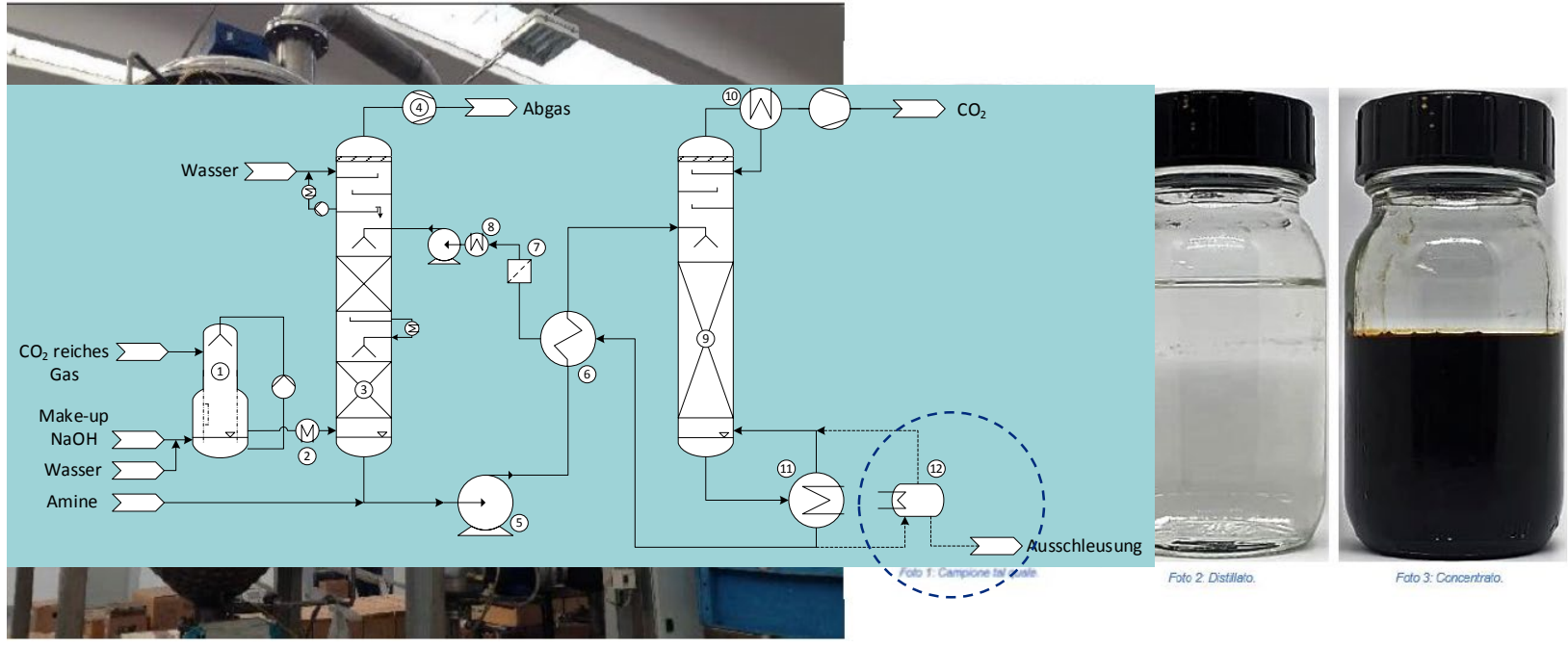
2022 28-7-2022 27-8-2022

Quelle: Sterk, G., ;

Quelle: Lahiri, A.K..; Applied Metallurgy and Corrosion Control; Springer Singapore 2017, ISBN 978-981-10-4683-4

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

Nachrüstung eines thermischen Reclaimers



Quelle: Sterk, G., Zonneveld, E.; CO_2 Capturing at AVR Duiven; HdT Essen, 11. Mai 2023

Bilanzierung / Verfahrenskonzepte

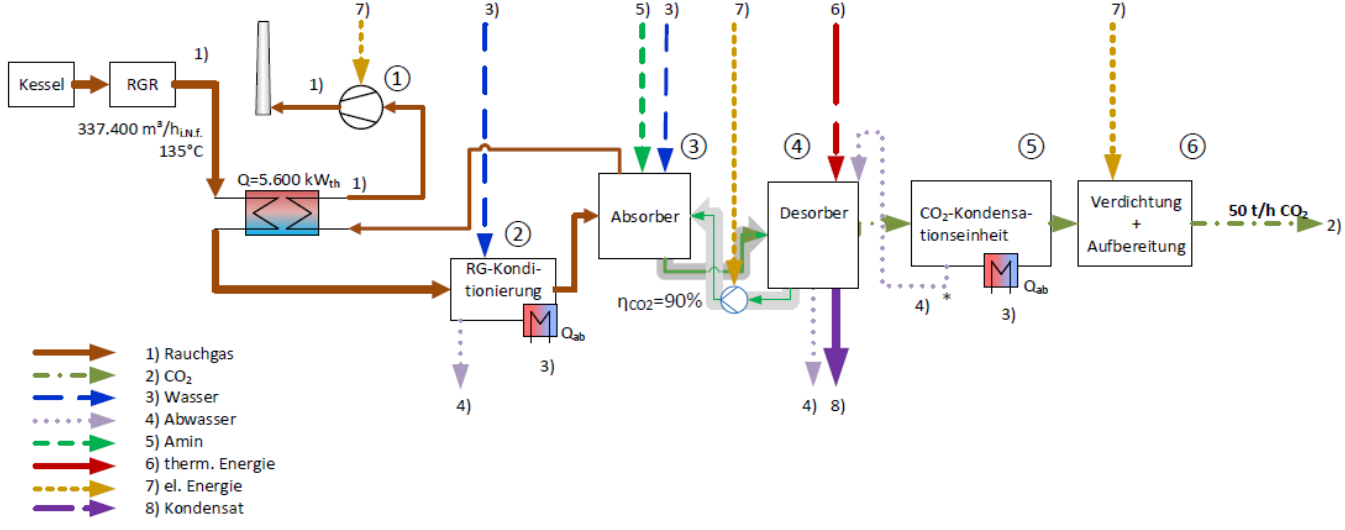
ete.a

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

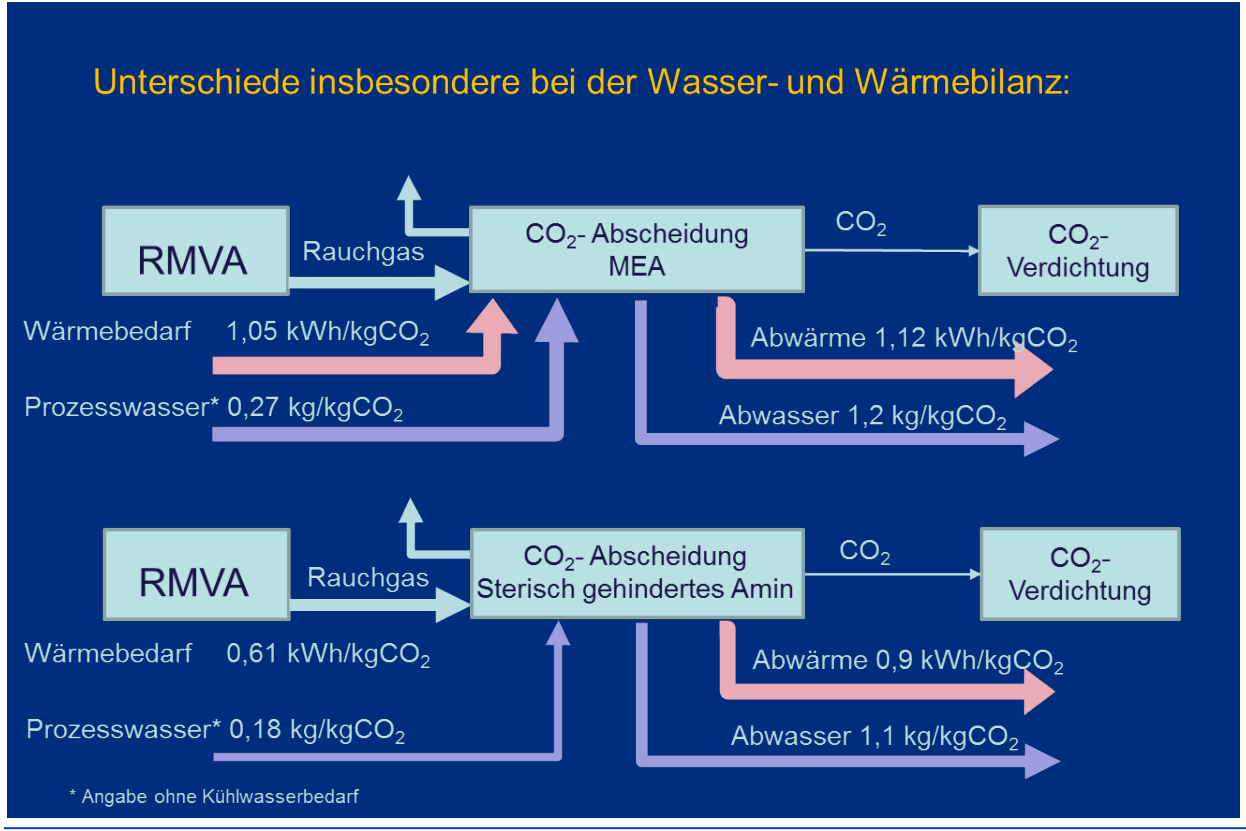
Bilanzierungsbeispiel für eine Amin-Wäsche
(energetisch optimierte Amine)

Verfahrensübersicht Optimiertes Amin

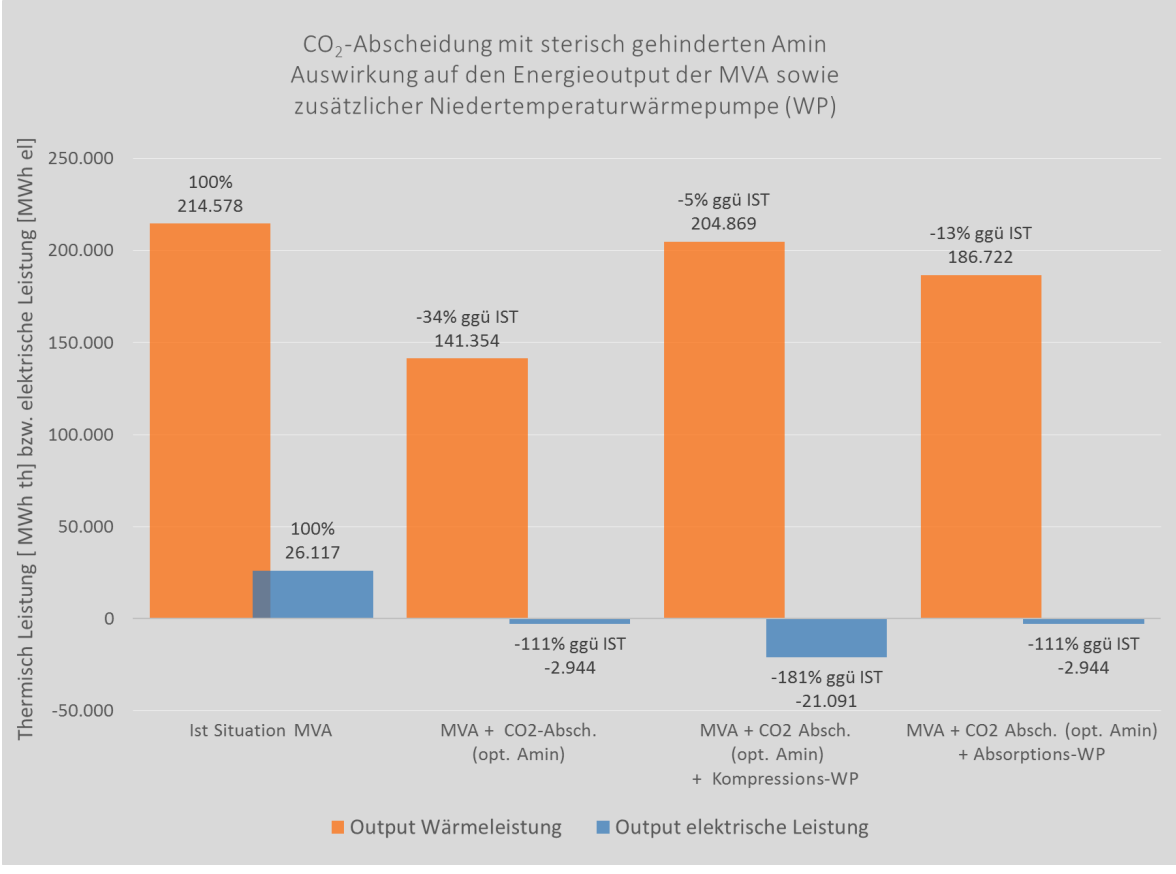
	Einheit	① Saugzug	② RG-Konditionierung	③ Absorber	④ Desorber	⑤ Kondenstaion	⑥ CO_2 Aufbereitung Verdichtung	Gesamt
1) Rauchgas	$m^3/h_{i.N.f.}$	237.366	293.888	237.366				
2) CO_2	kg/h			50.000	50.000	50.000	50.000	50.000
3) Prozesswasser	kg/h		5.280	8.160				13.440
4) Abwasser	kg/h		38.400		8,5	10.900*		38.408,5
5) Amin	kg/h			19				19
6) Therm. Leistung	kW_{th}				30.650			30.650
7) El. Leistung	kW_{el}	840		1.675			8.500	11.015
8) Kondensat	kg/h				48.809			48.809
9) Kühlleistung	kW_{th}		29.240			8.440		37.680



Gegenüberstellung MEA und sterisch gehinderten Amin



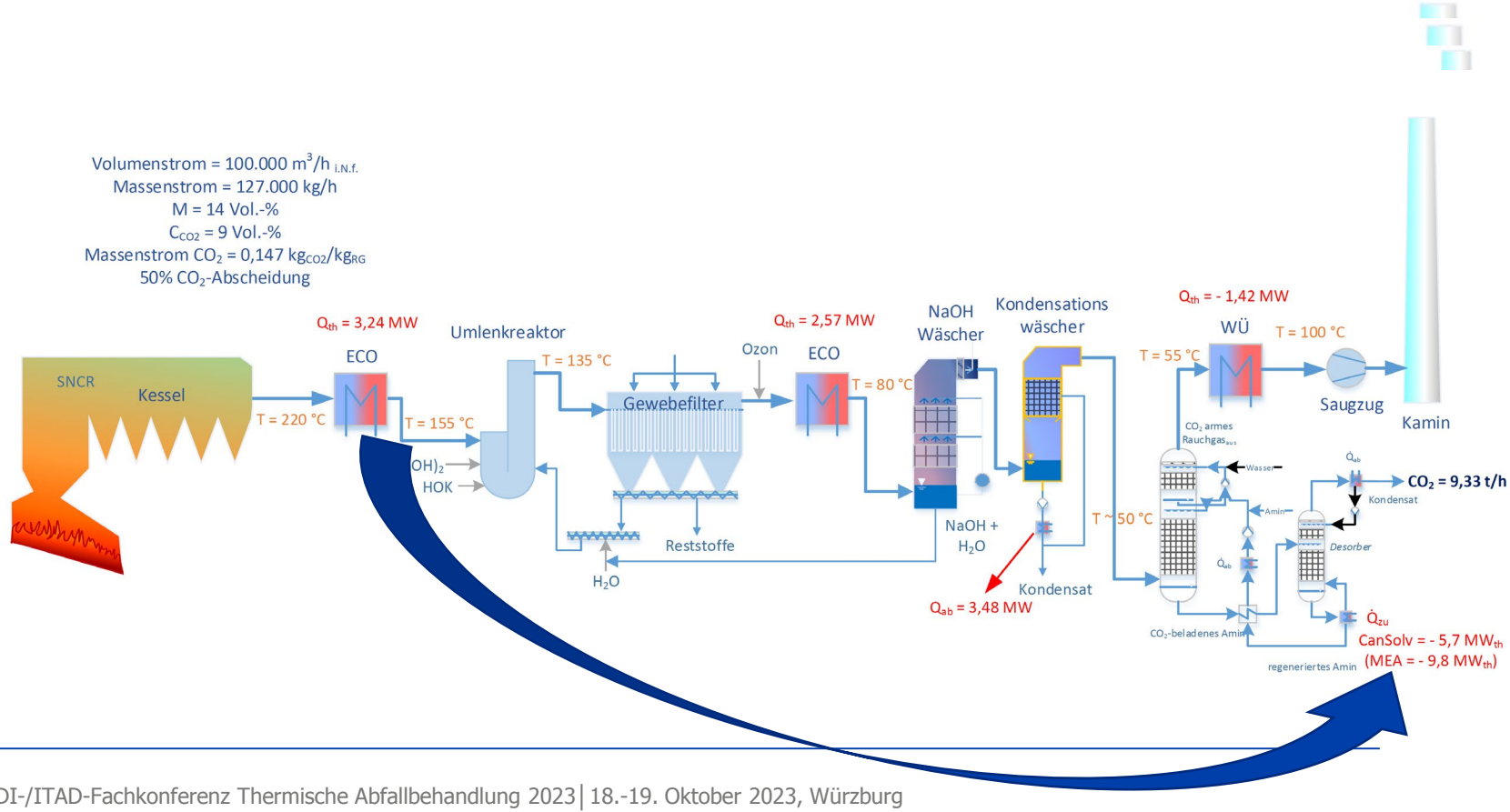
CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen



Beispiel – Auswirkung der Amin-Wäsche auf die Energieauskopplung

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

Nachrüstungen und Energiebedarf



ete.a

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

Was mache ich mit dem CO_2 und wie transportiere ich es?

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen

20 FOKUS: CARBON CAPTURE & STORAGE 28. Juli 2023 · Nr. 15 vn+

VON STEPHAN W. EDER

Im Wartestand

INDUSTRIEPOLITIK: Klimaschutz muss schnell gehen. Schneller als erlaubt in Deutschland, denn ein Mittel ist noch verboten: CCS, das Abtrennen und Speichern von CO_2. Das soll sich ändern.

Schlagzeilen wie „Concerns raised over carbon storage project – Saketchewan farmers abandon land, blaming nearby CO_2 facility for blowouts, dead animals and algae" – über das Schicksal des kanadischen Ehepaars Jane und Cameron Kerr – aus der kanadischen „The Globe and Mail", machten Anfang der 2010er-Jahre die Runde, wenn es um das Thema CCS ging.

CCS steht für Carbon Capture & Storage, das Auffangen, besser die Abtrennung oder Abscheidung von CO_2 aus einem Gasgemisch und seine anschließende Speicherung. Eine langfristige Speicherung, nicht vorübergehend, denn das Prinzip ist, das aufgefangene Treibhausgas wegzuschließen, quasi als Ewigkeitslast.

Die negativen Schlagzeilen aus Kanada und anderswo schafften es bis nach Deutschland, zum Beispiel in die Frankfurter Rundschau. Es tobte seinerzeit eine Debatte um das Kohlendioxidspeichergesetz (KSpG), ein Gesetz über die mögliche Anwendung von CCS in Deutschland. Mit Wirkung: Das KSpG erlaubt bis heute CCS nur für die Forschung, also im Maßstab von Pilotprojekten.

Daumenregel für die CO_2-Reduktion durch grünen Wasserstoff

50 TWH Energie

24 FOKUS: CARBON CAPTURE & STORAGE 28. Juli 2023 · Nr. 15 vn+

VON HOLGER KROKER

Wohin mit dem CO_2?

KLIMAFORSCHUNG: Der Kohlendioxidgehalt in der Erdatmosphäre muss sinken. Techniken wie CCS wirken da nur bedingt. Geo- und biobasierte Prozesse sollen helfen, vor allem die Ozeane. Ein Fallbeispiel.

Das Ziel des Klimaabkommens von Paris ist ehrgeizig: Um maximal 2 °C – besser nur 1,5 °C – soll die globale Mitteltemperatur der Erdatmosphäre bis 2100 im Vergleich zur vorindustriellen Zeit steigen. Dann, so die Prognose, bleibt das Erdsystem innerhalb sicherer Grenzen. Allein mit Emissionseinsparungen ist dieses Ziel nicht mehr zu erreichen. Zusätzlich müssen die Menschen aktiv Kohlendioxid und andere Treibhausgase aus der Atmosphäre entfernen – und dieses dann entweder speichern oder in einer anderen Form binden, sodass es gesichert nicht mehr in die Atmosphäre entweicht.

„Der Punkt ist, dass sich die CO_2-Emissionen in die Atmosphäre nicht in der Geschwindigkeit verringern, wie sie nötig ist, daher brauchen wir solche Entnahmetechnologien", betont Daniela Bas-

gut abgegrenzte Umgebung wie im
niela Basso testet so im spanischen V
griechischen Iraklion den Effekt vo
tem Kalk auf die Ökosysteme in nä
chen und -armen Gewässern.

**Nicolas Smith Sanchez' Team untersu
verschiedene Alkalinitätsdosen** auf
ria im Ökosystem des subtropischen
Dort konnten die Forscher nur vorüb
Einflüsse auf das Nahrungsnetz im Me
len. Allerdings lag im kanarischen O
die Sättigungsgrenze niedriger als erw
Kalkpartikel bildeten sich bereits un
Konzentration, die die Forscher errech

Eine solche Kalkfällung ist unerwü
sie die Säurebindungsfähigkeit des Oz
setzt, das Wasser trübt und die sessh
wesen am Meeresboden mit einer „Sta
bedeckt. „Die Partikel werden auch v
ganismen im Plankton aufgenommen
nen ihnen die Kiemen verkleben und
so Joachim Schönfeld, Geologe am G
an einem dritten Projekt beteiligt ist.

Daniela Bassos Projekt in unter
nährstoffreichen Gewässern ist noch
geschlossen, doch auch hier zeichne
schon ab, dass für die Kalkmilchb

22 FOKUS: CARBON CAPTURE & STORAGE 28. Juli 2023 · Nr. 15 vn+

VON ANGELIKA NIKIONOK-EHRLICH

Das Projekt

KLIMAPOLITIK: CCS, das Abtrennen von CO_2 aus industriellen Prozessen und sein langfristiges Speichern, ist in Deutschland de facto verboten – bisher. Das soll sich ändern.

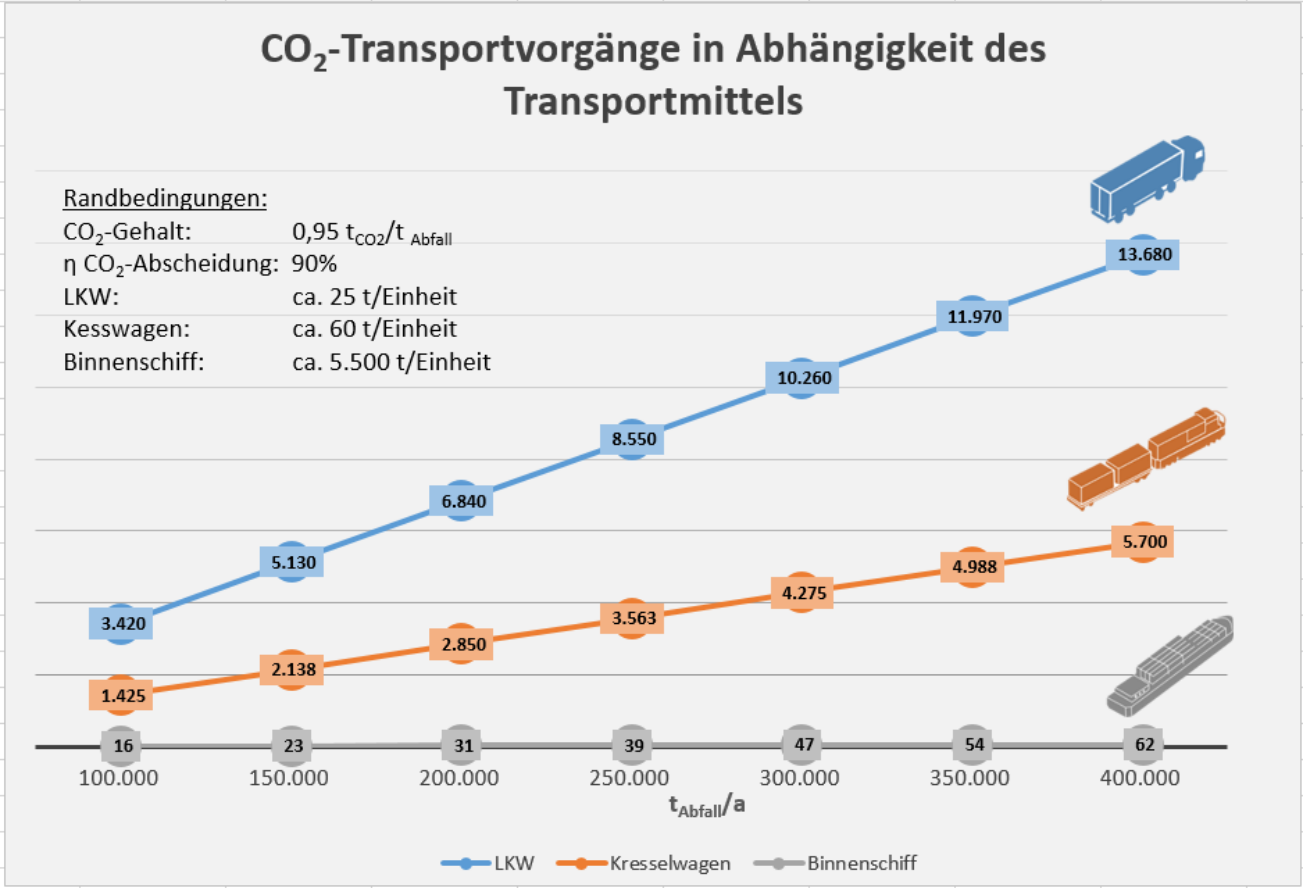
Möglichst schnell möglichst viel CO_2-Emissionen vermindern, Klimaneutralität bis 2045 erreichen – dafür spielt neben der Heizung und dem Verkehr die Dekarbonisierung der Industrie eine entscheidende Rolle.

Zwar haben sich energieintensive Unternehmen wie die der Stahlindustrie auf den Weg gemacht, ihre Energienutzung und ihre Produktionsprozesse entsprechend „grün" zu gestalten. Doch was soll mit jenen Emissionen geschehen, die sich nicht ohne Weiteres vermeiden lassen, mit sogenannten Restemissionen von CO_2, wie sie etwa in der Zementindustrie entstehen?

Diese Frage hat in jüngster Vergangenheit ein Thema wieder auf den Tisch gebracht, das in Deutschland durch gesetzliche Regelungen (Kohlenstoffspeicherungsgesetz, KSpG von 2012) als erledigt angesehen wurde: die Abscheidung und Speicherung von CO_2 im Untergrund, besser bekannt unter ihrem englischen Namen CCS (Carbon Capture & Storage). Diese ist zu kommerziellen Zwecken seitdem in Deutschland untersagt, doch mehren sich die Stimmen, dies zu ändern – zumal die Diskussion auch auf EU-Ebene läuft und EU-Länder wie Norwegen oder die Niederlande die Speicherung bereits praktizieren oder intensiv planen (s. Seite 20/21).

ete.a

CO_2-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen



ete.a

OGE CO_2-Transportnetz

besteht aus den Projekten WHVCO_2logne, Delta Rhine Corridor und den Clustern Elbmündung und Rheinisches Revier.
Ziel ist die zügige Erschließung der Exportoptionen in Wilhelmshaven, Rotterdam und Antwerpen/Zeebrügge.

Quelle: Open Grid Europe GmbH 2023

Bleiben Sie zuversichtlich

Vielen Dank!