

CCS – CO₂ Capture and Storage

Verfasser: M. Schmidt
Datum: 24.10.2010
Version: 2.0

Inhaltverzeichnis

Einleitende Worte.....	3
Hintergrund	4
Was ist CCS?.....	7
Definition	7
Industrielle CO ₂ Entstehung.....	7
Industrielle CO ₂ Verwertung (gegenwärtig)	8
Überblick über das Themengebiet CCS	9
CCS-Technologiebereiche	10
Einleitung	10
PRE-Prozess: Rohstoff-Aufbereitung	11
Chemische Prozess.....	11
POST-Prozess: CO ₂ -Abtrenn-Technologien.....	11
Chemische Ab- und Desorption: Amin-/Karbonat-Wäsche.....	11
POST-Prozess: Transport.....	13
Nutzung: Speicherung/Lagerung.....	15
Aktueller Stand/ derzeitige Anwendung	15
Speicherung in geologischen Formationen oder Meeren.....	15
„Unterirdische Lagerung“	15
Lagerung im Meer.....	15
Speicherung/Bindung als Carbonate oder sonstige Verbindungen	16
Speicherung/Bindung als zusätzliche Biomasse	16
Nutzung: CO ₂ -Wirtschaft (zukünftig).....	17
Überschneidung mit anderen Bereichen	17
Analyse der Vor- und Nachteile.....	18
Vorteile.....	18
Nachteile.....	18
Temp.....	18
Zusammenfassung	19
Temp.....	19
Wirkungsgrad-Entwicklung von Kohlekraftwerken	20
Anhang	23
Literaturverzeichnis.....	23
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	25

Einleitende Worte

Nachdem ich den Initiativantrag zur Ablehnung von CCS-Technologien im Liquid-Feedback System der Piratenpartei gesehen habe, ich eine zweiwöchige Mailediskussion geführt hatte und ich dann anschließend mir die Aussagen der PP Brandenburg durchlas:

[http://wiki.piratenbrandenburg.de/AG Umwelt und Energie/Themen/CCS](http://wiki.piratenbrandenburg.de/AG_Umwelt_und_Energie/Themen/CCS)

blieb mir keine andere Wahl als das Thema mal ordnungsgemäß Aufzuarbeiten.

Hintergrund ist die Definition von „Zensur“: *„Zensur (censura) ist ein politisches Verfahren, um durch Massenmedien oder im persönlichen Informationsverkehr (etwa per Briefpost) vermittelte Inhalte zu kontrollieren, unerwünschte beziehungsweise Gesetzen zuwiderlaufende Inhalte zu unterdrücken und auf diese Weise dafür zu sorgen, dass nur erwünschte Inhalte veröffentlicht oder ausgetauscht werden.“*
[Wikipedia, Zensur]

Nach dieser Definition würde die PP Brandenburg eine Zensur betreiben, da diese nicht den vollen Umfang an Informationen bzgl. dieses Themengebietes zur Verfügung stellt, sondern lediglich die Informationen Online stellt, die für Ihre Parteiaussage relevant ist.

Beachte:

Mit diesem Dokument möchte ich keine Aussagen zur Befürwortung oder Ablehnung von Kraftwerkstechnologien treffen. Vielmehr soll der Weitblick für diesen Themenbereich CCS erzeugt werden um damit die notwendigen Informationen bereitzustellen, mit deren man eine Aussage besser abschätzen kann.

Anmerkung:

Ab Version 1.0 sollten die Fehler in der Veröffentlichung der PP Brandenburg aufgezeigt werden.

Ab Version 2.0 habe ich die Online-Zitate gestrichen, da diese die Struktur und den Überblick über das Themengebiet erschweren.

Hintergrund

Durch Betrachtungen der derzeitigen Entwicklung des Weltklimas und der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre (Abbildung 1) wird ein direkter Zusammenhang zwischen dem CO₂ Gehalt der Atmosphäre und des Temperaturanstieges vermutet. Einige Szenarien zeigen auf, dass nur eine Verminderung des CO₂ Ausstoßes diesen Prozess zwar nicht aufhalten aber halten/ bzw. verlangsamen kann, und es deshalb notwendig ist, CO₂ unterirdisch Endzulagern. [ABD2008, Kap. 1, Abs. 2]

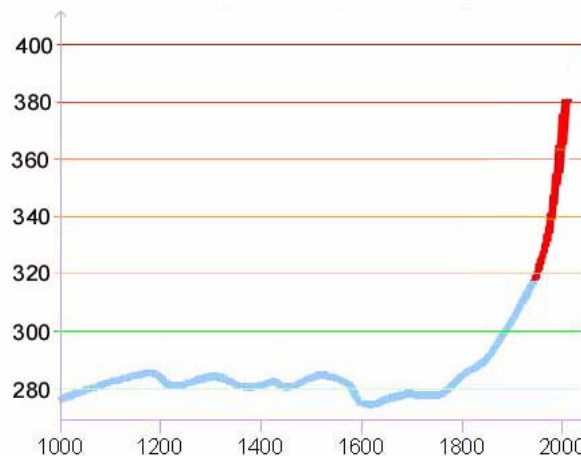


Abbildung 1: Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre der letzten tausend Jahre [1]

Bei der Gesamtbetrachtung des Systems müssen dabei die verschiedenen Bereiche berücksichtigt werden. Zum einen die Geosphären wie Lithosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre und Atmosphäre (Kohlenstoffkreislauf) und zum anderen die Entstehungs- und Verarbeitungsprozesse biologischer, geologischer und künstlicher Art (Abbildung 2). [ABD2008, Kap. 2, Abs. 1] und [WIK2010, CO₂-Zyklus]

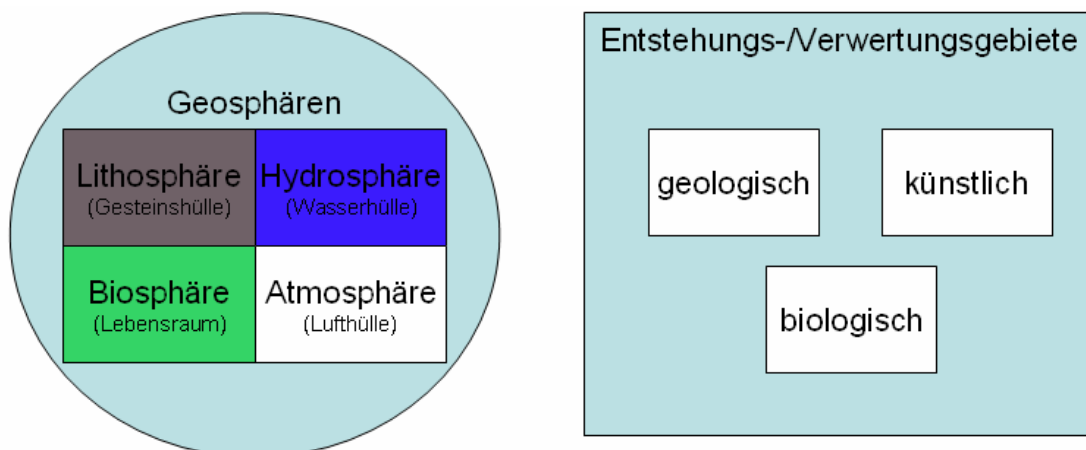


Abbildung 2: Systeme des Kohlenstoffkreislaufs

Bei der Betrachtung der Speichermengen, Arten und deren Kohlenstoff-Umsatzraten der verschiedenen Gebiete, merken einige Kritiker an [IAV2010], dass der Anteil des menschlichen Beitrags eher minimal ist. Des Weiteren sind die Mengen und Formen der

Kohlenstoffspeicherung enorm, so dass einige Überlegungen bzgl. der Speicherung von CO₂ angedacht werden. In Abbildung 3 ist die Speichermenge der einzelnen Geosphären aufgezeigt, die einen Überblick über den Anteil an der globalen Kohlenstoff-Speicherung auflistet. In Bezug auf das Weltklima ist vor allem die Speicherung in der Atmosphäre von Interesse, da diese, nach Meinungen vieler Wissenschaftler, eine Auswirkung auf das Weltklima besitzt, z.B. [RAH2003]. In Abbildung 4 hingegen wird die Umsatzzeit des Kohlenstoffs der einzelnen Geosphären aufgezeigt. Mit Abbildung 5 wird die Gesamtübersicht bzgl. der Kohlenstoffumsatzrate, den Kohlenstoffspeicherreservoirs und den Kohlenstoffströmen abgerundet. Hierbei sei jedoch zu beachten, dass dies nur als kurze Übersicht, über den Zusammenhang des Kohlenstoffzyklus gedacht ist und dass im Kohlenstoffkreislauf nicht nur CO₂ sondern auch andere C-Produkte (z.B. CH₄/Methan) berücksichtigt werden.

	Art	Reservoir/ GtC	Anteil
Atmosphäre		750	0,001%
Biosphäre		800	0,001%
Hydrosphäre	physikalisch gelöstem CO ₂ sowie gelösten Hydrogencarbonat- und Carbonationen.	38 k	0,05%
Lithosphäre	Carbonate: Calcit CaCO ₃ und Dolomit CaMg(CO ₃) ₂	60 Mio.	99,8%
	Kerogen (fossile organische Stoffe, z.B. in Ölschiefer)	15 Mio.	
	Kohle, Erdgas, Erdöl	4.100	
	Pedosphäre mit Humus, Torf, Sedimente, Mineralien	1.500	

Abbildung 3: Kohlenstoffspeicherung in den Geosphären [2]

		Reservoir / GtC	Umsatzzeit / Jahre
Atmosphäre		762	10 ⁰ (Jahre)
Biosphäre	Terrestrisch	2269	10 ¹ (Jahrzehnte)
	Maritim	3	10 ⁻¹ (Monate)
Hydrosphäre	Oberflächenwasser	918	10 ¹ (Jahrzehnte)
	Tiefenwasser	37200	10 ³ (Jahrtausende)
Lithosphäre	Oberflächensedimente	150	10 ² (Jahrhunderte)
	Restliche Erdkruste	77x10 ⁶	>>10 ⁶ (weit über Jahrmillionen)

Abbildung 4: Kohlenstoffumsatz der Geosphären in Menge und Zeit [3]

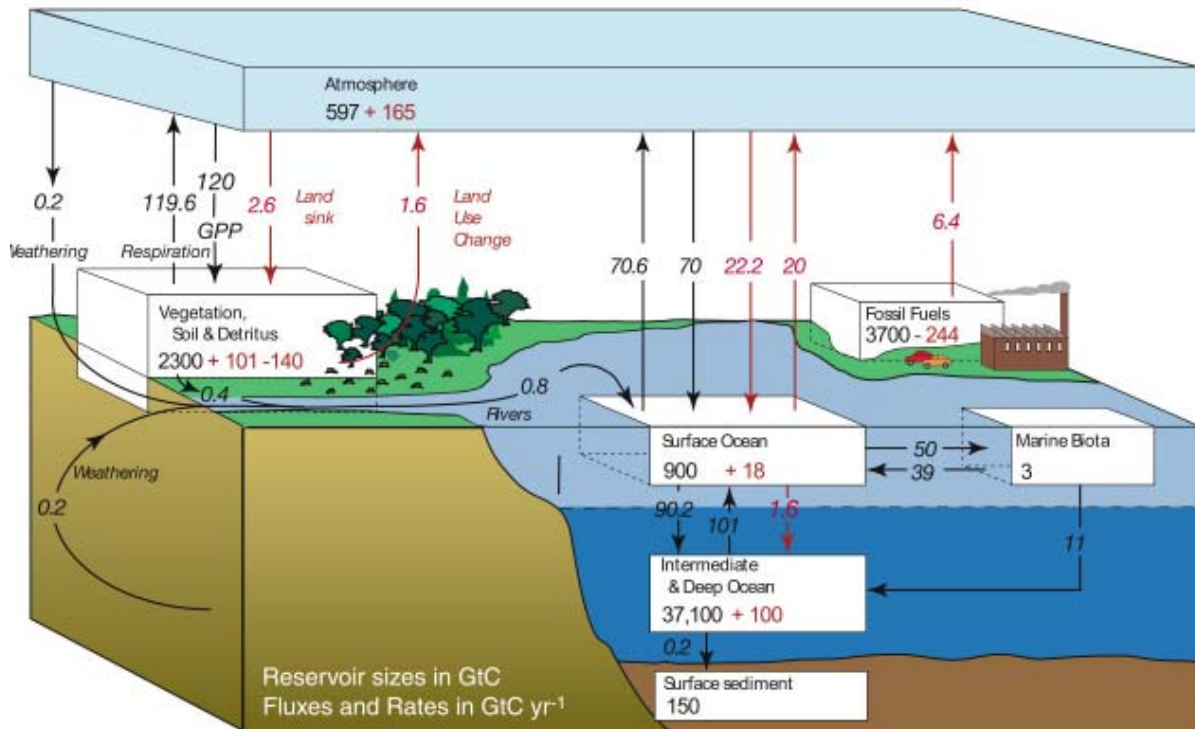


Abbildung 5: Kohlenstoffströme zwischen den Geosphären [4]

Was jedoch unbestritten ist, ist der Anstieg des CO₂ Gehaltes in der Atmosphäre (Abbildung 1). Neben der wahrscheinlichen Auswirkung auf das Weltklima, führt ein steigender CO₂ Gehalt auch zur Versauerung der Meere. [LIM2009]

Sollten Großkraftwerke noch ein paar Jahrzehnte eine bedeutende Rolle in der Energieerzeugung einnehmen [ISI2010, Kap. 2] und sollte sich die CO₂-Emission von Produktionsanlagen nicht verringern, dann könnten CO₂ Abscheidungs- und Speicherungstechnologien (engl. CCS – CO₂ Capture and Storage) eine bedeutende Rolle einnehmen. Hiermit ist angedacht, den CO₂-Ausstoß der künstlichen Quellen (Industrieanlagen) in die Atmosphäre zu reduzieren. Es wird jedoch darauf verwiesen, dass auch andere Maßnahmen wie Energieeinsparungen und der weitere Ausbau der erneuerbaren Energie betrachtet werden sollten, so dass CCS-Technologien maximal als Brückentechnologien verwendet werden sollte. [ISI2010, Kap. 6]

Was ist CCS?

Im Nachfolgenden wird ein kurzer Überblick über den Themenbereich von der Definition über die Anwendungsgebiete und eine erste Klassifikation aufgezeigt. Die Definition bestimmt den Umfang des Themenfeldes, die Anwendungsgebiete ergeben sich aus den Bereichen in denen CO₂ entsteht oder aber auch benötigt wird und mittels der Klassifikation sollen die im anschließenden Kapitel aufgezeigten Technologien eingeordnet werden.

Definition

„CO₂-Abscheidung und -Speicherung (engl. *Carbon Capture and Storage*, auch *Carbon Dioxide Capture and Storage*, kurz *CCS*) bezeichnet die Abscheidung von Kohlenstoffdioxid (CO₂) aus industriellen Prozessen sowie dessen anschließende Endlagerung. Durch die Einlagerung soll verhindert werden, dass das CO₂ in die Atmosphäre gelangt, wo es als Treibhausgas wirken könnte.“

Wenn über CCS-Technologien geredet wird, dann muss berücksichtigt werden, dass die meisten Technologien noch im Anfangsstadium von Forschung und Entwicklung stehen. [UBA2009, S. 1, rechter Abschnitt, Z. 1ff] Dies bedeutet, dass die meisten Technologien noch nicht ausgereift sind, um industriell eingesetzt zu werden. Die Konsequenz davon ist, dass das aufzeigen der einen oder anderen Technologie nur den Hinweis auf ein zukünftiges Potential darstellt, jedoch die technischen Parameter kritisch betrachtet werden müssen. D.h., ein derzeitiger schlechter oder guter Wirkungsgrad im Stadium der Erforschung kann nur Ansatzweise zur Analyse der Auswirkung des Einsatzes der Technologie verwendet werden, da sich die Forschungsergebnisse weiter verbessern können, oder ein Prototyp aufzeigt, dass die Technologie im industriellen Maßstab nicht eingesetzt werden kann. [UBA2009]

Industrielle CO₂ Entstehung

Wie zu Beginn erwähnt, liegt der Ansatz zur Reduktion des CO₂ in der Atmosphäre in der Reduktion des Ausstoßes der künstlichen CO₂ Quellen. Aus der nachfolgenden Tabelle (Abbildung 6) ist zu erkennen, dass die Energiewirtschaft hierbei den größten Anteil an der industriellen CO₂ Emission hat. Dies hat zur Folge, dass CCS-Technologien derzeit in den Medien hauptsächlich im Zusammenhang mit Kohlekraftwerken stehen, was jedoch nicht korrekt ist. Bei der nachfolgenden Tabelle besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit, jedoch verdeutlicht diese ein breites Anwendungsfeld im industriellen Sektor, so dass CCS-Technologien nicht gleich mit „Energiekraftwerks-Technologien“ gleichgesetzt werden können, jedoch in diesem Bereich eine besondere Bedeutung besitzen, da dieser Bereich einen der größten Anteil an der künstlichen (industriellen) CO₂-Erzeugung hat.

Sektor	CO ₂ -Emissionen aus großen stationären Quellen weltweit (Gt)	Prozentualer Anteil an der Gesamtemission aus diesen Quellen	CO ₂ -Konzentration im Abgasstrom
Energiewirtschaft	10,5	45%	3-4% (Gasturbine) 14% (IGCC)
Stahlherstellung	1,5	6%	15-27%
Zementherstellung	0,93	4%	14-33%
Raffinerien	0,8	3%	3-13%
Chemische Industrie	0,4 ¹²	2%	z.B. NH ₃ , EO: 100%
Transport	5,6	24%	-
Sonstige	3,4	14%	-

Abbildung 6: CO₂ Entstehung in den Industriesektoren [5]

Industrielle CO₂ Verwertung (gegenwärtig)

Neben der Entstehung von CO₂ als Abfallprodukt wird dieses auch als Rohstoff im Wirtschaftssektor gehandelt. Hierbei existieren einige Anwendungs-/Einsatzbereiche wie zum Beispiel [UIG2010]:

- in der Metallindustrie zur Härtung von Metallen,
- als Schutzgas zum Schweißen,
- Trockeneis als Ersatzmaterial zum Sandstrahlen,
- als Rohmaterial in der Chemieindustrie (Methan-, Harnstoffproduktion, ...),
- zur Ölextraktion aus Quellen,
- in der Lebensmittelindustrie zu Gefrier- und Kühlanwendungen, zur Desinfektion von Lebensmitteln, als Zusatz zu Getränken,
- in der Medizin als ein Zusatz zu Sauerstoff für Inhalationszwecke,
- als Treibmittel in Spreedosen,
- für CO₂-Löschanlagen,
- ...

Die hier aufgezeigten Anwendungen sind sehr detailliert, was darauf deutet, dass die momentane Verwendung von CO₂ in der Industrie eher unbedeutend ist. Das heißt, das CO₂ in der Industrie zwar derzeit als Rohstoff verwendet wird, aber nicht in dem Umfang, dass dieser eine bedeutende Rolle bei der CCS-Betrachtung einnehmen könnte. Für zukünftige Anwendungen siehe: Kapitel „CO₂-Wirtschaft“.

Überblick über das Themengebiet CCS

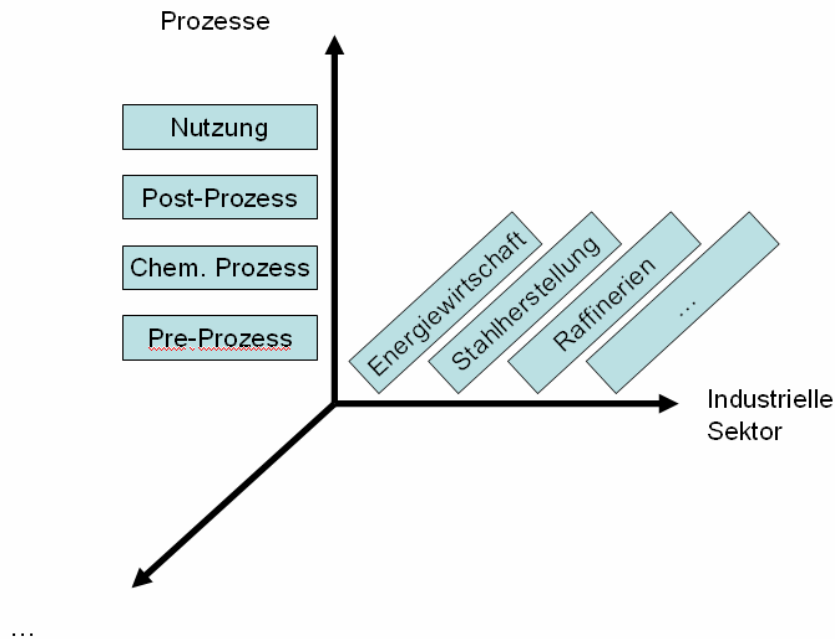


Abbildung 7: Matrix des CCS-Sektors (Skizze)

In den meisten Fällen, wird eine vereinfachte Form in „Abtrennung“, „Transport“ und „Speicherung“ verwendet. Dies hat den Vorteil der besseren Visualisierung des Themengebietes, hat aber auf der anderen Seite den Nachteil der fehlenden Detaillierung.

Als Beispiel sei die Oxyfuel-Technik genannt, bei der der Brennstoff (Kohle, Gas, Öl, Biospritt, ...) unter reiner Sauerstoffatmosphäre verbrannt wird. Hauptbestandteile sind dann CO_2 und H_2O . Dieses Verfahren wird meistens zu dem Bereich der Abtrennung gezählt oder aber auch als separate Technologie betrachtet. Jedoch verbergen sich hinter diesem Verfahren drei Bereiche. Zum einen die Sauerstoffextraktion bzw. die Kraftstoffaufbereitung (Pre-Prozess), zum anderen werden neue Technologien/Materialien für die Verbrennung benötigt (chem. Prozess), aufgrund der höher Temperaturen, und zum dritten findet eine Trennung von CO_2 und H_2O statt (Post-Prozess). Prinzipiell können weitere Prozessschritte dazwischen geschaltete werden, wie z.B. ein MHD-Generator, der aufgrund eines Hochtemperaturgases Strom erzeugt (Voraussetzung Verbrennung unter O_2 -Atmosphäre und das vorhanden sein geeigneter Materialien – Brennkammer).

Ein weiterer Bereich der eher einseitig gesehen wird, ist der Prozessbereich der Nutzung. Bei CCS-Technologien wird unter der Nutzung, in der Öffentlichkeit, meistens die Endlagerung in geologischen Formationen oder Gewässern/Meeren verstanden. Ein Schlagwort aus diesem Bereich ist die CO_2 -Wirtschaft. CO_2 wird bereits in der Wirtschaft als „Rohstoff“ genutzt (siehe „Industrielle CO_2 Verwertung“), allerdings im geringen Maße. Die Abscheidung von CO_2 wird jedoch umso bedeutender, je mehr Technologien existieren, die als Rohstoff „ CO_2 “ benötigen, bzw. könnte die Entstehung von CO_2 als Abfallstoff zur Förderung einer CO_2 -Wirtschaft führen („billiger Rohstoff“). Nähere Informationen siehe CO_2 Wirtschaft.

In den nachfolgenden Kapiteln wird versucht die Technologien den hier aufgezeigten vier Bereiche zu zuordnen.

CCS-Technologebereiche

Einleitung

In der Literatur werden verschiedene Arten von Trennverfahren aufgezeigt. Hierbei gibt es Grafiken die in Kontext mit speziellen Kraftwerkstypen gesetzt werden (Abbildung 10 – Skizze eher Allgemein gehalten, im Text ist jedoch eine deutliche Beziehung zu Kohlekraftwerken ersichtlich), oder Ansätze die sich eher auf allgemeine Verfahren beziehen ohne spezifischen Kraftwerksbezug [ISI2005].

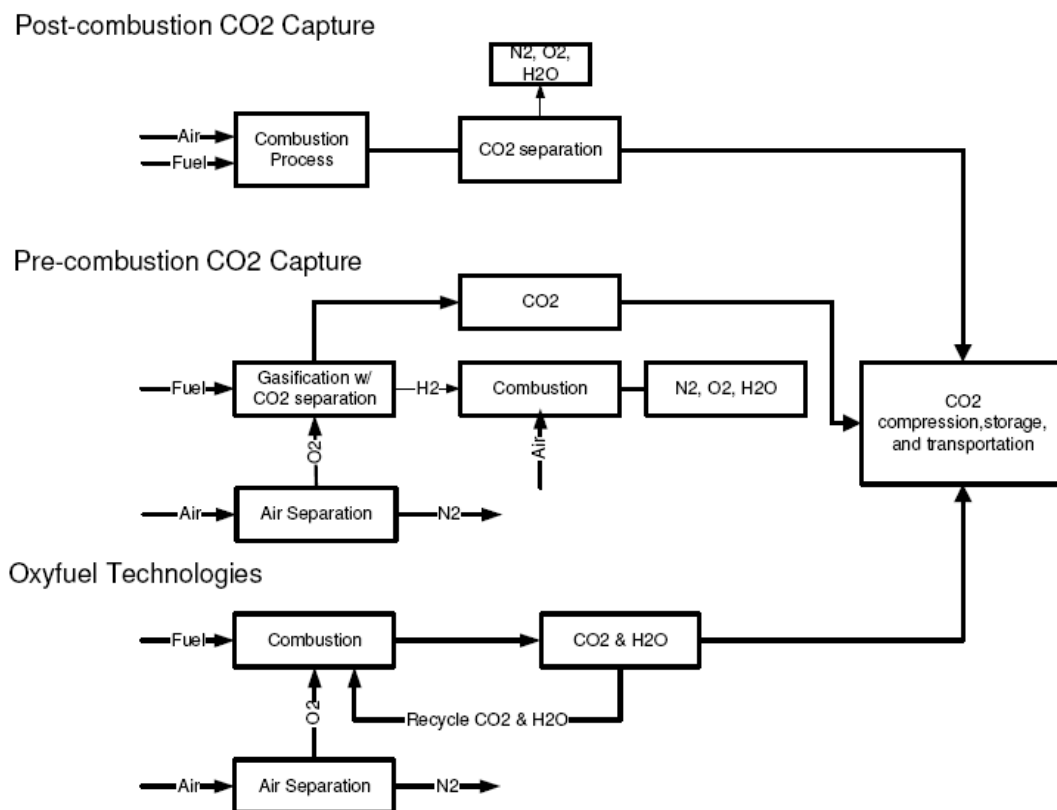


Abbildung 8: Mögliche CCS-Trennverfahren 1 [6]

Die unter Abbildung 10 aufgezeigten Bereiche und die darin enthaltenen Technologien hätten nach [ISI2005, Kap. 4.1] einen Wirkungsgradverlust von 8-18% (nach heutigem Wissenstand). Die drei aufgezeigten Bereiche beinhalten die Vorabscheidung des Kohlenstoffdioxids aus dem Treibstoff (Pre-combustion CO₂ Capture), die Nachbereitung der Abfallprodukte aus der Verbrennung (Post-combustion CO₂ Capture) und die Oxyfuel-Technik, bei der aus der Luft der Sauerstoff abgetrennt wird, so dass im Endeffekt zwei Treibstoffe Kohle/Öl/... und Sauerstoff für die chemische Umwandlung (Verbrennung) zur Verfügung stehen. Diese Klassifikation ist in 95% der Literatur wieder zu finden.

Die in diesem Dokument verwendete Einteilung wird unter Kapitel „Was ist CCS?“ aufgezeigt.

PRE-Prozess: Rohstoff-Aufbereitung

Kohlevergasung (IGCC)

Erdgasreformierung (NGCC)

Oxyfuel-Technik

Chemische Prozess

Techs????

Hochtemperatur-Verbrennung

POST-Prozess: CO₂-Abtrenn-Technologien

...

Chemische Ad- und Desorbtion: Amin-/Karbonat-Wäsche

Das derzeitig einzig wirtschaftliche Verfahren zur Trennung von CO₂ aus Abgasen ist die Aminwäsche. Für die Aminwäsche existieren unterschiedliche Verfahrensprozesse bzw. unterschiedliche Ad-/Desorbtiions-Chemikalien:

- MEA (Monoethanolamin),
- UOP
- und MHI-KEPCO.

Mittels dieses Verfahrens können ungefähr 90% des im Abgas enthaltenen CO₂ extrahiert werden. [GUL2007, S. 4, Z. 1] Eine Übersicht über existierende MEA-Anlagen ist in [HOW1999, S. 5] aufgelistet.

Bei der Aminwäsche (Abbildung 11), wird eine wässrige Aminlösung in das Rauchgas eingespritzt (Abbildung „Absorber“), welches dann zwischen 100-130°C regeneriert wird und dabei das zuvor gebundene CO₂ frei gibt (Abbildung „Desorber“). [ABD2008]

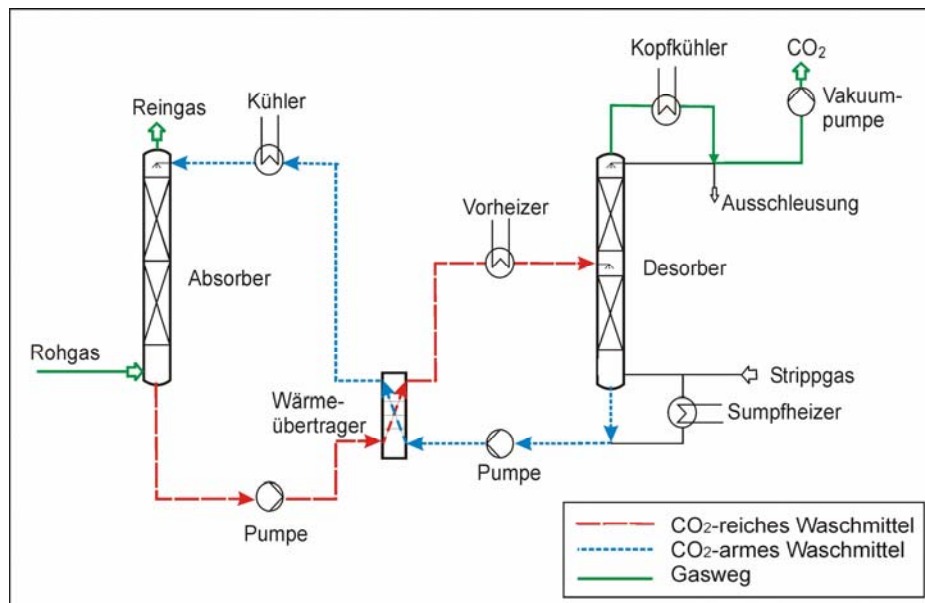


Abbildung 9: Aminwäsche [7]

Derzeit wird dieses Verfahren u.a. in Raffinerien, petrochemischen Anlagen, in der Erdgas-, in der Biogasaufbereitung und in der Rauchgasentschwefelung verwendet [WIK2010]. Bezüglich der Anwendungen im Bereich der Biogasaufbereitung siehe auch: [GUL2007, Kap. 2, S. 9].

Der UOP Benfield-Prozess wird auch als Heipottasche-Wäsche oder aber auch Heikarbonatwsche verstanden. Im Gegensatz zum MEA-Prozess wird hier das Abgas mit einer Karbonatlösung gewaschen. [UOP2000], [HIR1999, Kap. 8.9.5, S. 996]

Beim MHI-KEPCO-Prozess (Fa.: Mitsubishi Heavy Industries (MHI) und Kansai Electric Power Co. (KEPCO)) werden andere Lösungsmittel und ein etwas geänderter Prozessaufbau als bei dem MEA-Verfahren verwendet, um die Effizienz bei der CO₂ Extraktion zu steigern. [MHI2004]

Das Prinzip der hier aufgezeigten Verfahren ist jedoch dasselbe, im ersten Schritt wird mittels einer Lösung, die in das Rauchgas eingespritzt wird, das CO₂ aus dem Abgas adsorbiert und in einem zweiten Schritt wird diese Lösung regeneriert, so dass das CO₂ wieder freigegeben wird.

Molekularsieb (theoretisch)

Membran

Chemical Looping (Carbonisierung)

Kohle-Erdgas-Brennstoffzelle
Physikalische CO₂-Wäsche
H₂-Membranabtrennung
Hochtemperaturabtrennung (Carbonisierung)
CO₂-Membran
Absorption
Absorptive Rauchgaswäscher

Der Bereich der Trennverfahren ist jedoch noch weitreichender (Abbildung 11), so dass die CCS-Technologien nicht als starrer und fixer Technologiebereich betrachtet werden dürfen, sondern eher als Feld möglicher Technologien.

Option	Absorptionsverfahren	Chemical Looping	Membranverfahren	Adsorptionsverfahren	Oxyfuel
Energetischer Aufwand	Hoch (15-20% der Kraftwerksleistung)	Hoch (15-20% der Kraftwerksleistung)	Unbekannt	Hoch (20% der Kraftwerksleistung)	Derzeit sehr hoch durch Luftzerlegung
Kosten	>20 €/t CO ₂ (Abtrennung)	Unbekannt	Unbekannt	Unbekannt	Unbekannt
Stand der Technik	Großtechnisch im Einsatz	Erste Pilotversuche	Labormaßstab	Erste Pilotversuche	Konzeptionell und Pilotmaßstab
Zeithorizont	Mittelfristig	Langfristig	Langfristig	Langfristig	Mittelfristig
Forschungsbedarf	Absorptionsmittel: -verbesserte Lebensdauer -schnelle Kinetik der Be- und Entladung -reduzierter Regenerationswärmebedarf	-Entwicklung hochselektiver, langzeitstabiler Sauerstoffträger -Konzeption von Feststoffkreisläufen mit minimalem Abrieb -Überführung in den Pilotmaßstab	-Entwicklung robuster Membranverfahren zur CO ₂ Abtrennung	Adsorptionsmittel: -verbesserte Lebensdauer -schnelle Kinetik der Be- und Entladung	-Entwicklung robuster Membranverfahren für Luftzerlegung (Sauerstofftransportmembran)
-Weiterentwicklung der Technologie zur Rauchgasreinigung					

Abbildung 10: Mögliche CCS-Trennverfahren 2 [6]

Aus Abbildung 11 werden zwei weitere Technologien ersichtlich. Mittels intensiver Recherchen lässt sich dieses Feld womöglich noch erweitern. Aus der Übersicht kann ein Aspekt sehr gut identifiziert werden, und zwar der, dass der überwiegende Teil der Technologien in der Entwicklungsphase stecken. Siehe hierzu nachfolgend: „Speicherung als Carbonate“, wobei eventuell nicht exakt zwischen Trennung und Speicherung in Carbonatform unterscheidet werden kann.

POST-Prozess: Transport

Transport ist eigentlich kein einzeln zu betrachtender Bereich ... aber ...

[ISI2005]

4.2 Transport

- E-1 Hohe Kosten für die CO₂-Verdichtung oder -Verflüssigung (Energiebedarf ca. 0,12 kWh/kg CO₂ 110 bar).
- E-2 Mengen (> 1 Mio. Tonnen/a und Kraftwerk) lassen sich nur sinnvoll über Pipeline oder Schiff transportieren).
- E-3 Gefahren, die direkt von CO₂ ausgehen, sind relativ gering (ungiftig)
- E-4 Unfälle bei Pipelines selten und umfangreiche Erfahrungen mit O₂, N₂, CH₄ und H₂-Pipelines vorhanden.
- E-5 Derzeit keine CO₂-Transport-Infrastruktur vorhanden. Es besteht ein hohes finanzielles Risiko, in diese Infrastruktur zu investieren, vergleichbar den Problemen beim Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur.

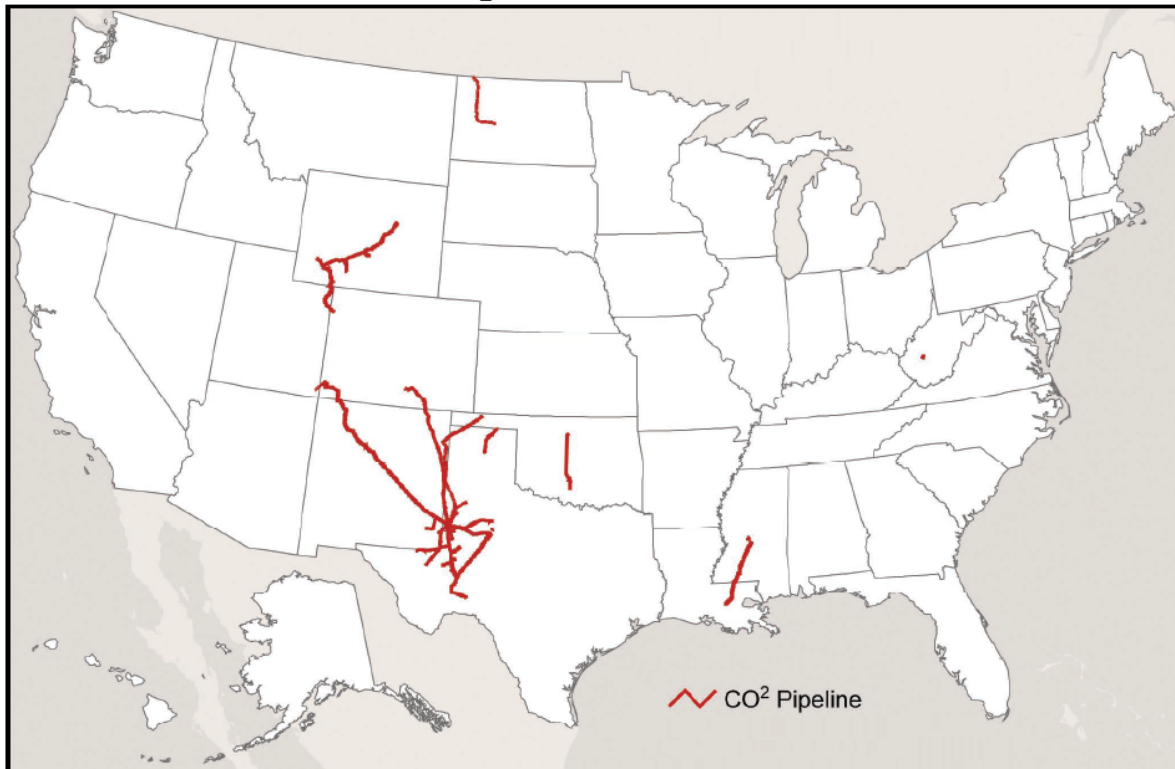
Siehe auch [UBA2009]

Transportmethode	Kosten	Anmerkungen
Pipeline, onshore	1-3 € / t _{250 km}	Hohe Investitionskosten, abhängig von Durchmesser und geographischen Gesichtspunkten
Pipeline, offshore	2-4 € / t _{250 km}	Hohe Investitionskosten, abhängig von Durchmesser und geographischen Gesichtspunkten
Schiff	1 € / t _{250 km}	Schiffe (34-82 M\$ für 10-50 kt Kapazität) und Infrastruktur nötig
Bahn, LKW	>25 € / t _{250 km}	

Abbildung 11: Transportkosten [...]

CO₂-Pipelines in den USA

Figure 1. Major CO₂ Pipelines in the United States



<http://ncseonline.org/nle/crsreports/07may/r133971.pdf>

Nutzung: Speicherung/Lagerung

„Als mögliche CO₂-Lager gelten zum einen geologische Formationen wie Erdöl- und Erdgaslagerstätten, salzhaltige Grundwasserleiter (saline Aquifere) oder Kohleflöze. Auch eine Lagerung in der Tiefsee wurde untersucht.“

In diesem Zusammenhang sollte die Lagerung etwas ausführlicher beschrieben werden. Außerdem sollten vielleicht mal eine Referenz angegeben werden, vor allem unter dem Gesichtspunkt „wurden untersucht“.

Nach Wikipedia bedeutet „Speicher, ein Ort oder eine Einrichtung zur Lagerung von Materie, Energie oder Information“ [WIK]. Die Analogie dazu wäre, dass Speicherung, das Einlagern von Materie, Energie oder Informationen an einem bestimmten Ort oder in einer bestimmten Einrichtung bedeutet. Wie aus der Definition ersichtlich wird, sind der Ort und die Art nicht definiert. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden der derzeitige Stand und die möglichen Speicherarten aufgezeigt, um das Gebiet ...

Aktueller Stand/ derzeitige Anwendung

[GUL2007] Seit September 1996 verpresst Statoil ... CO Nordsee. 20.000 t CO₂/Woche.

Speicherung in geologischen Formationen oder Meeren

„Unterirdische Lagerung

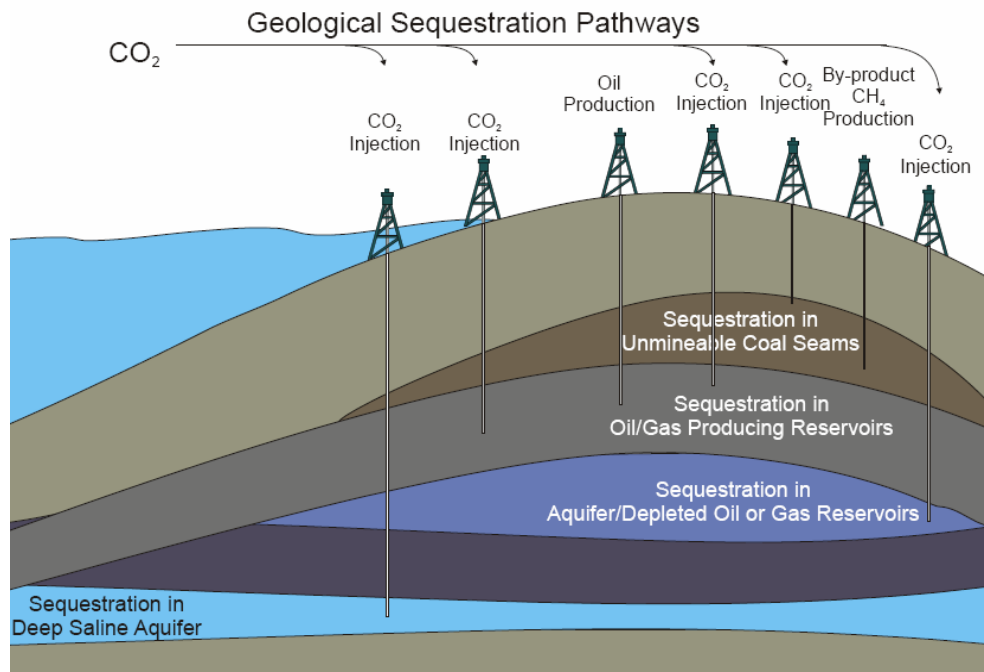
Zur Speicherung wird eine unterirdische Lagerung in tiefen Sedimentgesteinen, deren Poren mit Salzwasser gefüllt sind, favorisiert. Für eine effiziente Lagerung sind Drücke und Temperaturen notwendig, wie sie in 800 Meter Tiefe und darunter herrschen. Bei diesen Drücken besitzt das CO₂ eine etwas geringere Dichte als das Wasser aber eine erheblich niedrigere Viskosität (fluidaler Zustand) und kann so Salzwasser verdrängen und zusätzlichen Raum schaffen. Ein gewisser Teil des CO₂ (in 1000 Meter Tiefe und 40° C etwa 20 kg CO₂ pro m³ Wasser) würde sich in salzhaltigem Wasser lösen. (Enick & Klara 1990, Carroll & Mather 1992, Portier & Rochelle 2005). Das so fixierte CO₂ könnte als Gas aber wieder freigesetzt werden, falls die Tiefenwässer irgendwo aufsteigen und der Druck damit fällt.

Lagerung im Meer

Kohlenstoffdioxid kann durch Pipelines oder Rohre, die von Schiffen ins Meer ragen, in viele hundert Meter unter der Meeresoberfläche gepumpt werden.

Je nach Druck und Konzentration kann das CO₂ mit dem Meerwasser Kohlensäure bilden oder legt sich als CO₂-See, bestehend aus flüssigem CO₂, auf dem Meeresgrund ab. Diese Möglichkeit der Endlagerung wird kaum noch weiter erforscht.“

<http://isi.fraunhofer.de/isi/publ/download/isi06b45/CO2-abscheidung-speicherung-kurzfassung.pdf?pathAlias=/publ/downloads/isi06b45/CO2-abscheidung-speicherung-kurzfassung.pdf>



Speicherung/Bindung als Carbonate oder sonstige Verbindungen

Aus Abbildung 3 ist zu erkennen, dass CO₂ in gebundener Form (als Carbonat) in der Lithosphäre vorkommt (60 Mio. GtC). Unter diesen Gesichtspunkt erscheint es logisch, die Speicherung von CO₂ mittels dieser chemischen Verbindung zu ermöglichen.

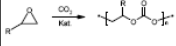
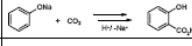
Die Grundidee dahinter ist Materialien (Silikate) einzusetzen mit denen CO₂ als Magnesium- oder Calciumcarbonat gespeichert werden kann, analog dem vorkommen in der Umwelt. Hierzu soll z.B. Schlacke aus der Stahlindustrie oder natürlich vorkommende Silikate verwendet werden.

[TEI2008]

Speicherung/Bindung als zusätzliche Biomasse

- Aufforstung
- Moore
- Algenbecken
 - o <http://www.rwe.com/web/cms/de/2652/rwe/innovationen/stromerzeugung/clean-coal/algenprojekt/>
 - o ??Stand?? Effizienz??
- ...

Nutzung: CO₂-Wirtschaft (zukünftig)

Option	Synthese von Polymeren	Synthese von Kraftstoffen	Synthese von Chemikalien	Mikroalgen	Künstliche Photosynthese
Mengenpotential	Z. Bsp: für Polycarbonate 50 kt a ⁻¹	max. 2,05 Gt CO ₂ a ⁻¹	max. 178 Mt CO ₂ a ⁻¹ z.B. Harnstoff 94 Mt a ⁻¹	Begrenzt durch Flächenbedarf, <5% eines gegebenen Kraftwerks, bei max. 25kt/km ² Fläche	unbekannt
Beispiele	Bsp: Polycarbonate 	Bsp: Methanolproduktion über trockene Reformierung $CH_4 + CO_2 \rightarrow 2CO + 2H_2$ $CO + 2H_2 \rightarrow H_3COH$	Bsp: Harnstoff Synthese: $2NH_3 + CO_2 \rightarrow CH_4N_2O$ Bsp: Salicylsäure 		unbekannt
Energetischer Aufwand	Prozessabhängig	Hoch, nur bei Verwendung regenerativer Quellen sinnvoll	Prozessabhängig	Solarer Energieeintrag+Prozessenergie	Solarer Energieeintrag + Prozessenergie
Gesamt CO₂-Bilanz	Abhängig vom Verfahren im Vergleich zum Referenzprozess	Nettoemission, wenn kein H ₂ aus regenerativen Quellen zur Verfügung steht	Abhängig vom Verfahren im Vergleich zum Referenzprozess	Nettoemission	unbekannt
Kosten	Referenz: Existierender technischer Prozess	Referenz: Kraftstoffe aus fossilen Energieträgern und Biokraftstoffe	Referenz: Existierender technischer Prozess	0,40 - 2,50 €/t Algenbiomasse ⁵³	unbekannt
Stand der Technik	Technisch realisierte Beispiele (s. Bsp.) + exploratorische Routen	Teilschritte großtechnisch im Einsatz, Pilotanlagen in Entwicklung (z. B. Mitsui Chemicals)	Technisch realisierte Beispiele (z.B. Salicylsäure, Harnstoff) + exploratorische Routen	Raceway Ponds und Algen-Photobioreaktoren Stand der Technik aber low-tech aber kostenintensiv; deutliche Effizienzsteigerungen möglich	Grundlagenforschung
Wertschöpfung	Polymere	Kraftstoffe	Chemikalien	Wertstoffe, Kraftstoffe, Biogas	Chemikalien

http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_chapter7.pdf

Erhöhung des CO₂ Gehaltes in Gewächshäusern zur Erhöhung der Produktivität [UIG2010]

Überschneidung mit anderen Bereichen

Amin-Wäsche → Biogasaufbereitung, Raffinerien, ...

Analyse der Vor- und Nachteile

Vorteile

Nachteile

Unfall in Mönchengladbach: <http://www.taz.de/1/zukunft/umwelt/artikel/1/unterschaetzte-gas-gefahren/>

Temp

- „Konkrete Risiken für Mensch und Natur
- „Gesteinsveränderungen
- Endlagerung im Meer
- „Ökonomische Nachteile
- „Kosten
- „Speicherkapazität
- „Bürgerrechtsprobleme
- „Alternativen

Zusammenfassung

Keine Betrachtung des Energiesektors → Verbrennungskraftwerke zukünftiges Szenario → Auswirkung des „nicht-einsatzes“ von CCS?

Argument Wirkungsgrad → Argument Abgasreinigung

Aussage Verbot: „Piraten setzen sich allgemein für Abschaffung von Zwängen ein ... es gibt andere Möglichkeiten“ → Unterstützung von Energiesparmaßnahmen!

Temp

McKinsey: (die viel zitierte Studie)

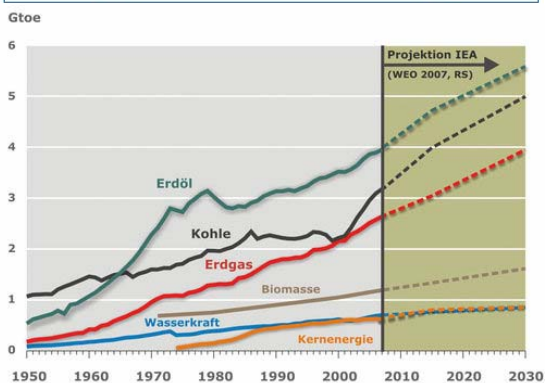
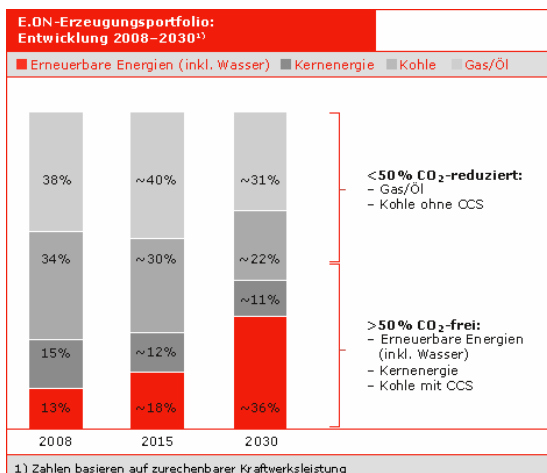
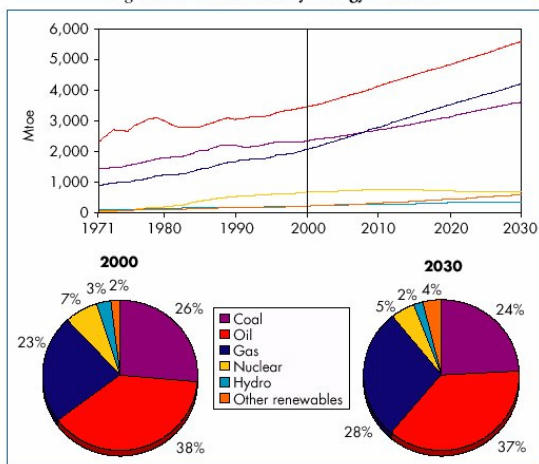
http://www.mckinsey.com/client-service/sustainability/pdf/CCS_Assessing_the_Economics.pdf

- es ist nicht vollständig, berücksichtigt nur Europa, beinhaltet nur Kohlekraftwerke (preface)
- Kostenanalyse → Hinweis auf Variationen: neue Technologien, Neubau/Upgrades/...
 - o Derzeitig 60-90 €/t CO₂
 - o Zukünftig (ab 2030) eventuell 30-45€/t CO₂
 - o Transport > 200km 10 €/t CO₂
 - o 0,4 Gt/a → 80-120 CCS-Projekte (Europa)
- Techs: standard techs „Oxy.“, „Pre“, „Post“ ...
- Vergleich: 1 CCS-Kraftwerk 1,5 Mio. Leute → 1400 Windkraftträder (2,3 MW)?!
 - o Hinterfragen, kostenvergleich ... (S. 12)
- S. 13 – Entwicklungsstadium CCS-Techs
- Ständiger Hinweis auf „Ungewissheiten“ der Kostenberechnung → nur Anhaltspunkte
 - o Kostenberechnung ab Kap. 4
 - o Untersuchung nur bei den 3 Techs

Kurzum: kann verwendet werden, jedoch kritisch hinterfragen (siehe selbsthinweise)

- Referenzen
 - o Power Plant: http://www.encapco2.org/ENCAP-CASTOR/ENCAP_SP1-Ekstrom.pdf
 - o Greenpeace „false hope“:
<http://www.greenpeace.org/raw/content/international/press/reports/false-hope.pdf>
 - Dieselben 3 Techs, kritische Betrachtung

Figure 2.1: World Primary Energy Demand



<http://www.agenda21-treffpunkt.de/archiv/02/daten/ieaprognos2030-g.jpg>

http://www.eon.com/graphics/tables/090617_energiemix_de.gif

http://www.geokommission.de/Binaries/Binary922/2-2_Energiemix.jpg

<http://www.agenda21-treffpunkt.de/lexikon/fossil.htm>

Wirkungsgrad-Entwicklung von Kohlekraftwerken

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurden Kohlekraftwerke mittels Kolbenmotoren betrieben und hatten deshalb einen Wirkungsgrad von ~ 1%. Mit der zunehmenden Entwicklung von Prozessen, Materialien und Technologien stieg der Wirkungsgrad auf nunmehr um die 45%

an (maximal möglicher Wert eines Kraftwerks). Es wird angenommen, dass ein Wirkungsgrad in den nächsten Jahrzehnten von maximal 55% erreicht werden kann (aufgrund heutiger Erkenntnisse). Bei den Kohlekraftwerken müssen zwei Arten unterschieden werden, Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke. Braunkohlekraftwerke besitzen aufgrund der Zusammensetzung des Brennstoffs einen geringeren Wirkungsgrad als Steinkohlekraftwerke. Dies könnte bei der Berücksichtigung des Einsatzes von CCS-Technologien eine Rolle spielen. Eine Minderung des Wirkungsgrades eines Kohlekraftwerkes findet derzeit auch aufgrund des Eigen-Stromverbrauchs (... ~10% ... → verwertbare Quelle????) und der Abgasreinigung (2-4%) statt. [SHD2004], [WIK2010]

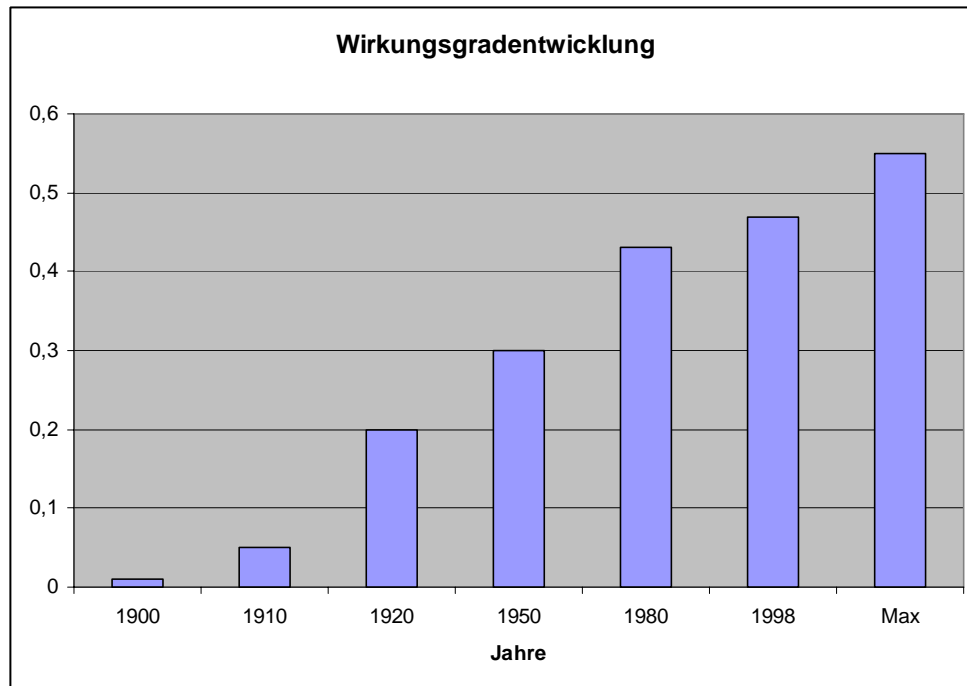


Abbildung 12: Entwicklung der Kohlekraftwerks-Wirkungsgrade

Des Weiteren müssen neben den individuellen auch die globalen Rahmendaten betrachtet werden (dies wurde ja oben schon mit dem Durchschnittswirkungsgrad angedeutet). So lässt sich der derzeitige durchschnittliche Wirkungsgrad wie folgt aufzeigen:

	η (%)	g SKE/kWh	g CO ₂ /kWh
China/Russland	23	534	1.600
Welt	31	396	1.188
Deutschland	38	323	969
Künftige Technik	55	223	669
Langfristig	60-65	205-189	612-567

Abbildung 13: durchschnittlicher Wirkungsgrad, spez. Kohleverbrauch, CO₂-Emission [SHD2004]

Die Fragestellungen die sich aus Abbildung 9 ergeben sind, wie lange werden Kohlekraftwerke noch eingesetzt, bei welchen Arten von Kraftwerken lohnt sich der Einsatz von CCS-Technologien und welche Technologien sollten, falls notwendig, eingesetzt werden)? Vor allem sollten solche Überlegungen bzgl. des Sachverhalts angestellt werden, dass die Kohlevorräte für Schätzungsweise 150 Jahre ausreichen [BMP2008, Kap. 1.1]. Das

bedeutet, dass irgendjemand auf der Welt, auch wenn die anderen Nationen diese Kraftwerke abgesetzt haben, weiter Kohle als Brennstoff nutzen wird, mit oder ohne CCS-Technologien.

Anhang

Literaturverzeichnis

Online

- [ABD2008] Ausfelder, Dr. F.; Bazzanella, Dr. A.; DECHEMA e.V. (2008): „Diskussionspapier Verwertung und Speicherung von CO₂“, Verfügbar vom World Wide Web am 28.08.2010: http://www.dechema.de/dechema_media/diskussionco2.pdf
- [BMP2008] Bove, M. P.; et al. (2008): „Verfahren zur CO₂-freien Kohleverbrennung – Einfluss auf Versicherungen“, aus dem engl. Übersetzt, IMIA WGP58 (08), Arbeitsgruppe AXA Versicherungs AG, Zürich und Münchener Rück, Verfügbar vom World Wide Web am 28.08.2010: http://www.imia.com/downloads/external_papers/EP34_2008.pdf
- [GUL2007] Günther, Dr.-Ing. Lothar (2007): „Entwicklungsstand BCM[®]-Verfahren nach einem Jahr großtechnischer Erprobung mit einem Prototypen“, INNOGAS-Fachtagung: Herstellung von Biomethan aus Biogas und dessen weitere Verarbeitung, 29. und 30. November 2007, Steigenberger Hotel Fürst Leopold Dessau, Verfügbar vom World Wide Web am 05.09.2010: http://www.dge-wittenberg.com/vortraege/5_Dr._Ing.%20Lothar%20Guenther.pdf
- [HIR1999] Hirschberg, Hans G. (1999): „Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau. Chemie, Technik und Betriebswirtschaft“, Springer-Verlag, Berlin, Auflage: 1 (1999), ISBN: 3540606238
- [HOW1999] Herzog, Howard (1999): “An Introduction to CO₂ Separation and Capture Technologies”, MIT Energy Laboratory, Verfügbar vom World Wide Web am 10.09.2010: http://sequestration.mit.edu/pdf/introduction_to_capture.pdf
- [IAV2010] Internationaler Arbeitskreis für Verantwortung in der Gesellschaft e.V., Geschäftsstelle: Dr.Hans Penner, D-76351 Linkenheim, Verfügbar vom World Wide Web am 28.08.2010: <http://www.iavg.org/html/klimawandel.htm> und http://www.klimaforschung.net/doku/CO2_Emissionen%5B1%5D.pdf
- [ISI2005] Radgen, P.; et al (2005): „Zusammenfassung – Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und –Deponierung“, Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Verfügbar vom World Wide Web am 28.08.2010: <http://isi.fraunhofer.de/isi/publ/download/isi06b45/CO2-abscheidung-speicherung-kurzfassung.pdf?pathAlias=/publ/downloads/isi06b45/CO2-abscheidung-speicherung-kurzfassung.pdf>
- [LIM2009] Limburg, M. (2009): „Der pH-Wert der Ozeane“, Verfügbar vom World Wide Web am 28.08.2010: http://www.eike-klima-energie.eu/uploads/media/Versauerung_der_Meere_01.pdf

- [MHI2004] Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.(2004): „FLUE GAS CO₂-RECOVERY“, Verfügbar vom World Wide Web am 10.09.2010:
<http://www.iea.org/work/2002/stavanger/mhi1.PDF>
- [RAH2003] Rahmstorff, S. (2003): „Klimawandel – Rote Karte für die Leugner“, Bild der Wissenschaft, 01/2003, Verfügbar vom World Wide Web am 29.08.2010:
<http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Other/klimageschichte.pdf>
- [SHD2004] Schilling, H. D. (2004): „Wie haben sich die Wirkungsgrade der Kohlekraftwerke entwickelt und was ist künftig zu erwarten?“, Verfügbar vom World Wide Web am 28.08.2010: <http://www.energie-fakten.de/pdf/wirkungsgrade.pdf>
- [TEI2008] Teir, S. (2008): “Fixation of Carbon Dioxide by Producing Carbonates from Minerals and Steelmaking Slags”, Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Energy Technology, Verfügbar vom World Wide Web am 28.08.2010:
<http://lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789512293537/isbn9789512293537.pdf>
- [UBA2009] Umweltbundesamt (2009): „CCS – Rahmenbedingungen des Umweltschutzes für eine sich entwickelnde Technik“, Pressestelle Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau, Verfügbar vom World Wide Web am 28.08.2010:
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3804.pdf>
- [UIG2010] Universal Industrial Gases Inc. (2010): “Carbon Dioxide (CO₂) Properties, Uses, Applications CO₂ Gas and Liquid Carbon Dioxide”, Website, Verfügbar vom World Wide Web am 28.08.2010:
<http://www.uigi.com/carbondioxide.html>
- [UOP2000] UOP LLC (2000): „GAS PROCESSING - BENFIELDTM PROCESS“, UOP LLC, 25 East Algonquin Road, Des Plaines, IL 60017-5017, Verfügbar vom World Wide Web am 10.09.2010: <http://www.uop.com/objects/99%20Benfield.pdf>
- [WIK2010] Online Enzyklopädie, Verfügbar vom World Wide Web am 28.08.2010:
CO₂-Zyklus: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffzyklus>
Kohlekraftwerk: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlekraftwerk>
Speicherung: <http://de.wikipedia.org/wiki/Speichern>
Aminwäsche: <http://de.wikipedia.org/wiki/Aminw%C3%A4sche>

Offline

- [ZRA2009] Zahoransky, R. A. (2009): „Energietechnik – Systeme zur Energieumwandlung“, 4. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

- [1] Wikipedia, Verfügbar vom World Wide Web am 27.08.2010:
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CO2Anstieg.png&filetimestamp=20051101144748>
- [2] [WIK2010], Verfügbar vom World Wide Web am 28.08.2010:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffzyklus>
- [3] [ABD2008], Tabelle 1
- [4] [ABD2008], Abbildung 1
- [5] [ABD2008], Tabelle 2
- [6] [BMP2008], Seite 13
- [7] Verfügbar vom World Wide Web am 10.09.2010: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ifvu/tvu/forschung_aktuell/absorption/Bild%201.jpg