

# Was ist Carbon Capture and Storage?

Eine Kurzbeschreibung der  
Technologie mit kritischer Diskussion

**eLearning Ressourcen- und Klimaschutz: Band 1**

Carsten Minnecker und Michael Scharp

IZT Institut für Zukunftsstudien  
und Technologiebewertung

Berlin 2012

IZT 

## Impressum

Carsten Minnecker und Michael Scharp

»Was ist Carbon Capture and Storage?

Eine Kurzbeschreibung der Technologie mit kritischer Diskussion«

eLearning Ressourcen- und Klimaschutz – Band 1

© 2012 Institut für Zukunftsforschung

IZT, Schopenhauerstraße 26, 14129 Berlin

[www.izt.de](http://www.izt.de) und [elearning.izt.de](http://elearning.izt.de)

Alle Rechte vorbehalten

Satz und Gestaltung: IZT

## 1 Inhalt

Impressum.....	2
2 Einleitung .....	4
3 Klimawandel und Treibhauseffekt .....	5
4 Wege zur Minderung von Kohlendioxid-Emissionen .....	8
5 Technologien zur CO <sub>2</sub> -Abtrennung .....	9
5.1 Pre-Combustion: Vergasung .....	10
5.2 Post-Combustion: Rauchgaswäsche.....	12
5.3 Oxyfuel-Prozess: Verbrennung mit Sauerstoff .....	13
5.4 Die Varianten im Vergleich .....	14
5.5 Zukünftige Technologien zur CO <sub>2</sub> -Abtrennung .....	15
6 CO <sub>2</sub> -Transport.....	15
7 CO <sub>2</sub> -Speicherung .....	17
8 Risiken .....	19
9 CO <sub>2</sub> -Nutzung.....	21
10 Kosten der CO <sub>2</sub> -Entsorgung .....	23
11 Technologieakzeptanz.....	24
12 Vor- und Nachteile der Technologie .....	27
13 Zusammenfassung .....	29
14 Literaturverzeichnis.....	29

## 2 Einleitung

Moderne Gesellschaften benötigen eine Versorgung mit elektrischer Energie. Bisher wurde sie überwiegend durch fossile und atomare Energieträger gewährleistet, welche endlich sind und deren Nutzung Restrisiken bergen oder Treibhausgase freisetzen. Dieses Energiesystem wird in den nächsten Jahrzehnten zu einem nachhaltigeren Energiesystem umgebaut, das auf Erneuerbare Energien beruht. In Deutschland ist durch den Ausstieg aus der Atomkraft ein Versorgungspfad geschlossen, der die Grundlage der bisherigen Energieversorgung ist. An dessen Stelle treten sukzessive die Erneuerbaren Energien. Die Versorgung durch Braunkohle- und Gaskraftwerke findet weiterhin statt.

Die Technologiekette des Carbon, Capture and Storage [CCS] kann vor allem die übrigen Pfade der fossilen Energieerzeugung unter sich ändernden Rahmenbedingungen offen halten. Sie kann durch ihre Kompatibilität auch bei Biomassekraftwerken oder in Industriebetrieben zum Einsatz kommen. Carbon Capture and Storage ist die englische Bezeichnung für die

- Abtrennung,
- Verdichtung und Transport sowie
- langfristige unterirdische Speicherung

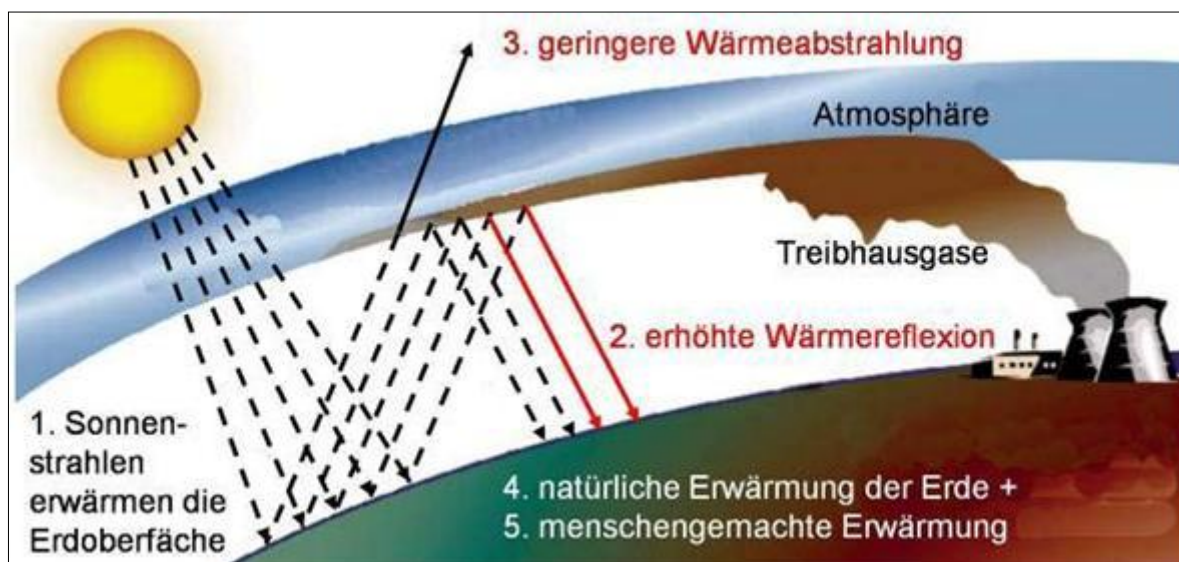
von CO<sub>2</sub>-Emissionen aus großen Punktquellen. Punktquellen sind dabei Kraftwerke und Betriebe mit mehr als 1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr. Sie sind die drei Prozessschritte von CCS. Im Prozessschritt der Abtrennung werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen am Entstehungsort durch unterschiedliche Verfahren vom Abgas abgeschieden und ihre Freisetzung verhindert. Der Prozessschritt des Transports umfasst alle Möglichkeiten und Infrastrukturen zur Beförderung des CO<sub>2</sub> vom Ort seiner Abtrennung bis hin zu seiner Lagerstätte. Bei der Speicherung wird CO<sub>2</sub> in unterirdische Gesteinsschichten injiziert, um es dort über hunderte bis tausende Jahre abzulagern. CCS wird an ein bestehendes System angeschlossen, um dort die Emissionen abzufangen. Es stellt ausschließlich die Erweiterung eines Systems dar, um CO<sub>2</sub> abzufangen und abzulagern. Ihr möglicher Einsatz ist von vielen Faktoren abhängig. Ein Faktor ist die technische Umsetzung und der Zeitpunkt der Marktreife von CCS. Hierfür sind Pilotprojekte notwendig, die mit Akzeptanzproblemen zu

kämpfen haben und daher die Marktreife verzögern. Der Einsatz von CCS hängt zudem von der Entwicklung ihrer möglichen Alternativen und Konkurrenten ab. Den Anstoß für die Entwicklung und Diskussion zu CCS gibt der Klimawandel, der vor allem durch den Treibhauseffekt beeinflusst wird.

### 3 Klimawandel und Treibhauseffekt

Die Atmosphäre der Erde unterliegt einem Treibhauseffekt durch den natürlichen Kohlendioxidgehalt, der zu einer Erwärmung führt. Diese Erwärmung ist für das Leben auf der Erde notwendig und wird als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet. Die Treibhausgase behindern in der Atmosphäre den Austritt der auf der Erdoberfläche reflektierten Sonnenstrahlen durch Absorption und ungerichtete Reflexion [siehe Abbildung 1]. Im Ergebnis ist die Durchschnittstemperatur auf der Erde bei plus 15 Grad und nicht bei minus 18 Grad, wie sie ohne den natürlichen Treibhauseffekt wäre.

**Abbildung 1: Skizze menschlicher Treibhauseffekt (aus Bundesverband Windenergie BWE, Bearbeitung M. Scharp)**



In den letzten 150 Jahren hat der Mensch durch die Verbrennung fossiler Energieträger, geänderter Landnutzungsformen und Lebensweisen den Treibhauseffekt verstärkt:

- Erdgas wird zum Heizen verbrannt,
- Autos, Lastwagen, Flugzeuge und Schiffe verbrennen Ölprodukte,

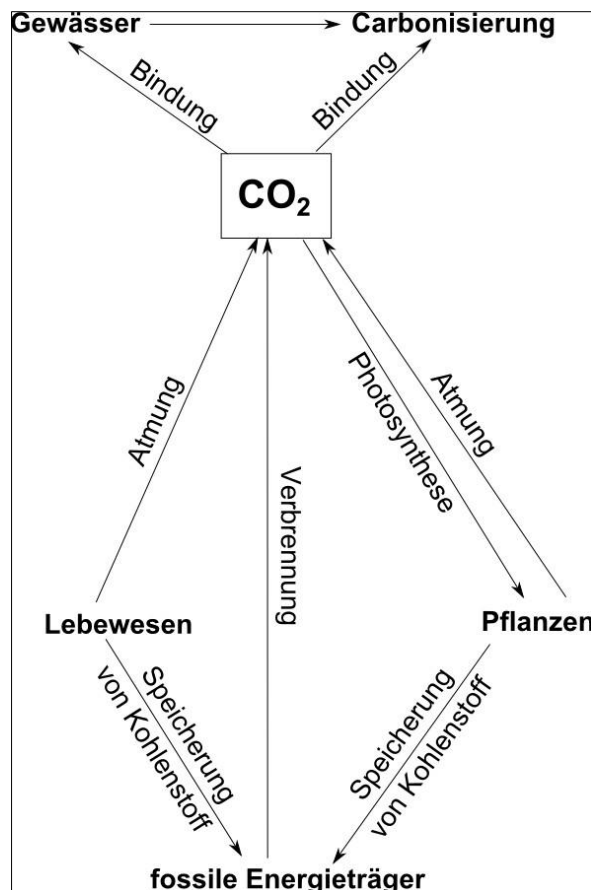
- die Düngung und Wiederkäuer (Kühe) setzen Treibhausgase frei,
- die Rodung von Wäldern reduziert die Kohlendioxidspeicherung,
- mit dem steigenden Lebensstandard brauchen wir immer mehr Strom und
- Millionen von Touristen fahren oder fliegen jedes Jahr weite Strecken in den Urlaub

Die Freisetzung von Treibhausgasen durch unsere Lebens- und Wirtschaftsweise wird als anthropogener Treibhauseffekt bezeichnet. Treibhausgase sind Kohlendioxid [CO<sub>2</sub>], Methan [CH<sub>4</sub>], Distickstoffoxid [N<sub>2</sub>O, Lachgas], Fluorkohlenwasserstoffe [FCKW], Schwefelhexafluorid und Stickstofftrifluorid.

Der globale Klimawandel bedroht die Lebensgrundlage von Menschen und Lebewesen aufgrund seiner vielfältigen Wirkungen. Ein wesentlicher Aspekt des Klimawandels ist der langfristige Anstieg der Durchschnittstemperatur auf der Erde. In ‚Worst case‘-Szenarien führt dies zu einer Ausweitung von Wüsten und tropischen Klimazonen, dem Anstieg des Meeresspiegels durch Abschmelzen kontinentaler Eisdecken und der Zunahme an Extremwetterereignissen. Als Folgen davon gehen Landflächen langfristig für die Besiedlung, die Nutzung und die Nahrungsmittelproduktion verloren. Wenn es nicht gelingen sollte, den Klimawandel zu stoppen, kann es Klimaflüchtlinge und ein verstärktes Artensterben geben.

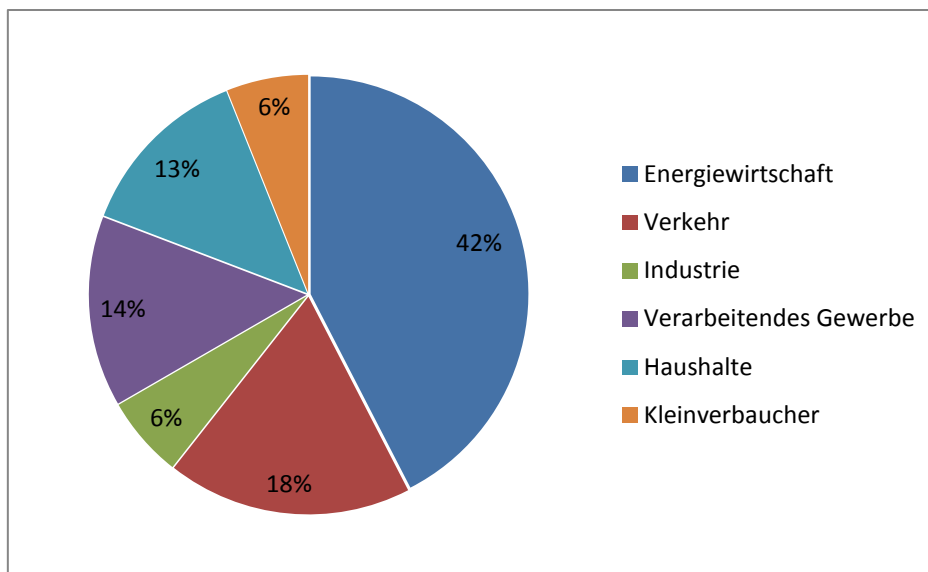
Daher muss der anthropogene Treibhausgasausstoß reduziert werden. Das wichtigste anthropogene Treibhausgas ist CO<sub>2</sub>, weil es in großen Mengen bei Verbrennungsprozessen von Erdölprodukten, Kohle und Erdgas anfällt. Kohlendioxid ist ein natürlich vorkommender Bestandteil der Atmosphäre und wird in vielen chemischen und biologischen Prozessen freigesetzt. Über Jahrmillionen ist ein natürlicher Kreislauf entstanden, durch den der CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre vor der Industrialisierung bei ca. 0,028% lag. Pflanzen entziehen der Atmosphäre über die Photosynthese CO<sub>2</sub>, Lebewesen geben es über die Atmung ab und durch Verrottung biologischer Substanzen wird es freigesetzt. Es findet durch Diffusion ein intensiver CO<sub>2</sub>-Austausch zwischen den Meeren und der Atmosphäre statt. Ist in der Atmosphäre der CO<sub>2</sub>-Anteil größer als im Wasser, nimmt das Wasser CO<sub>2</sub> auf. Umgekehrt gibt das Wasser CO<sub>2</sub> an die Atmosphäre ab, wenn der CO<sub>2</sub>-Anteil in der Luft geringer ist als im Wasser.

**Abbildung 2: schematische Darstellung CO<sub>2</sub>-Kreislauf**



Die Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre ist seit der Industrialisierung durch den Menschen um ein Drittel auf 0,0385 % gestiegen (385 ppm). Mit Abstand am meisten Kohlendioxid setzt die Nutzung fossiler Energieträger frei. Sie schließt u.a. die Gewinnung von Erdöl, Kohle und Erdgas, den Transport derselben, die Umwandlung von Erdöl in Treibstoffe oder die Verbrennung von Braun- und Steinkohle zur Stromerzeugung ein. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen können nach Sektoren ihrer Entstehung eingeteilt werden. Die Energiewirtschaft ist nach wie vor die größte Quelle von Treibhausgasen. In Deutschland verursacht sie ca. 42 % der Emissionen. An zweiter Stelle liegt der Verkehrssektor mit 18 % danach folgen die privaten Haushalte, das verarbeitende Gewerbe, Kleinverbraucher und die Industrie als größte Kohlendioxid-Quellen, wie Abbildung 3 aufzeigt.

**Abbildung 3: Anteil CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland nach Sektoren 2010 (Daten aus BMWi 2012:Tabelle 9)**



#### 4 Wege zur Minderung von Kohlendioxid-Emissionen

Um den Klimawandel abzuschwächen, sollten Kohlendioxid-Emissionen am besten vermieden werden. Bei der Erzeugung und Verwendung von Energie stehen hierfür drei Wege zur Verfügung:

1. Energie kann durch alternative Verfahren erzeugt und fossile Energieträger somit substituiert werden. Der Umstieg von fossilen Energieträgern auf Erneuerbare Energien – Solarenergie, Windenergie, Wasserkraft, Bioenergie und Geothermie - ist hierfür die Option mit den größten Potenzialen. Es fallen dadurch keine oder nur geringe Treibhausgasemissionen an.
2. Das zweite Maßnahmenbündel ist die Verbesserung der Energieeffizienz durch effizientere Technologien, Modernisierungen und dem Einsatz anderer Materialien [z.B. Kunststoffe aus Biomasse statt aus Erdöl]. Diese Maßnahmen führen zu Kohlendioxideinsparungen bei der Energieerzeugung, -umwandlung und -nutzung.
3. Die Verbesserung der Suffizienz führt zu Reduktionen des Kohlendioxidausstoßes, wodurch Einsparungen beim Energieverbrauch stattfinden. Jeder einzelne Verbraucher kann durch ein Senken seines Energiebedarfs direkt einen positiven Einfluss ausüben.

Je nach Nutzung des Energiebereichs gibt es unterschiedlich wirksame Maßnahmen gegen den Klimawandel. Die Wärmedämmung von Gebäuden bietet besonders große Einsparpotenziale im Haushaltssektor, weil ca. 80% des Energieverbrauchs



auf die Heizenergie fallen. Im Verkehrssektor sinkt der Energieverbrauch durch den Einsatz effizienterer Technologien wie Hybridmotoren [Kombination von Elektromotor und Verbrennungsmotor], Leichtbauweise, LED-Lampen, Start-Stopp-Automatik und Rückgewinnung von Bremsenergie. Große Einsparpotenziale haben zudem Verhaltensänderungen von Verbrauchern. Ein Wandel im Mobilitätsverhalten hin zu Car-Sharing, eine vermehrte Nutzung des ÖPNV und der Bahn, der Verzehr regionaler Lebensmittel oder die Nutzung effizientere Elektrogeräte können zu deutlichen Einsparungen führen. Diese Wege zur Vermeidung von Kohlenstoffdioxid sind dem integrierten Umweltschutz zuzuschreiben, weil durch sie weniger oder kein CO<sub>2</sub> entsteht. Es gibt jedoch noch eine andere Möglichkeit, um Emissionen zu vermeiden.

## **5 Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung**

Seit einiger Zeit wird eine „End-of-Pipe-Technologie“ zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung diskutiert und erprobt. Hierbei wird lediglich die Freisetzung des CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre verhindert, obwohl Kohlendioxid z.B. bei der Stromerzeugung weiter anfällt. Das CO<sub>2</sub> soll an seinem Entstehungsort abgefangen und anschließend in einer Lagerstätte gespeichert werden. Diese Idee liegt der Technologiekette des Carbon Capture and Storage [CCS] zu Grunde. Der Atmosphäre könnte mittels dieser Technologie sogar CO<sub>2</sub> entzogen werden, wenn Biomasse verbrannt und die anfallenden Emissionen gespeichert werden. Der erste Prozessschritt von CCS ist die CO<sub>2</sub>-Abtrennung. Anschließend findet ein Transport des CO<sub>2</sub> statt und im letzten Prozessschritt die Speicherung.

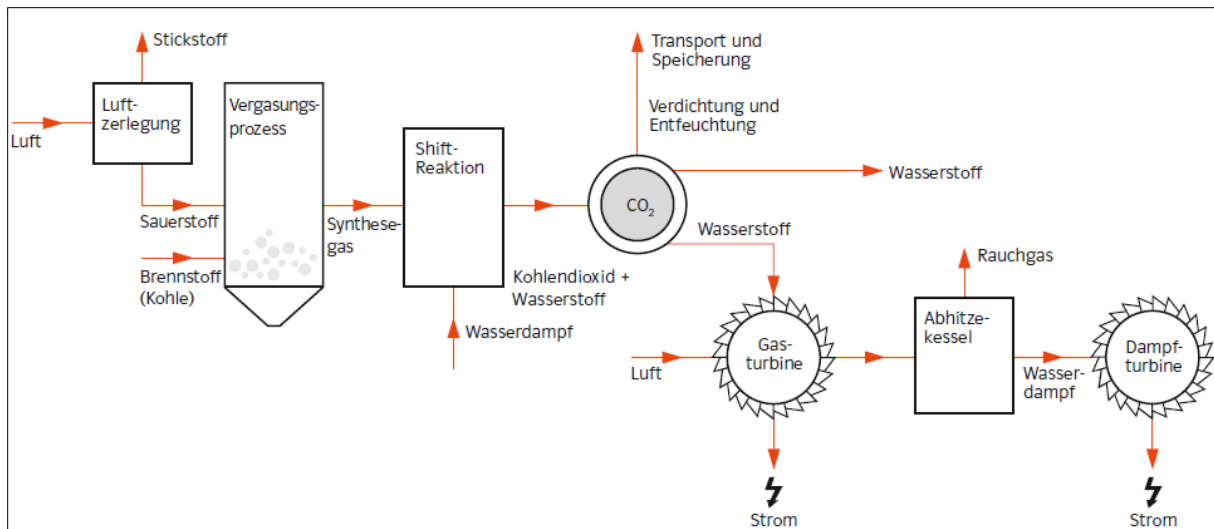
Anwendungen kann die Abtrennung von Kohlendioxid in den CO<sub>2</sub>-intensiven Industrien oder der Energiewirtschaft finden. Beispiele wie die seit vielen Jahren praktizierte Abtrennung von Stickoxiden und Schwefeldioxid aus Kraftwerken [Rauchgaswäsche] belegen dies. Das CCS-Verfahren wird vor allem in der Energiewirtschaft erforscht und erprobt, schließlich wird der Großteil an CO<sub>2</sub>-Emissionen dort ausgestoßen. Die Abtrennung kann prinzipiell sowohl bei Biomasse- und Gaskraftwerken als auch bei Stein- und Braunkohlekraftwerken eingesetzt werden. Die bisherigen Projekte sind meistens auf Stein- und Braunkohlekraftwerke ausgelegt, da diese große Mengen an Emissionen erzeugen. Die CO<sub>2</sub>-Abtrennung ist daher bei diesen am wirtschaftlichsten.

Im Folgenden wird daher die Technologie anhand der Kohleverbrennung vorgestellt. Zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> existieren zahlreiche Verfahren, die zum Teil seit langer Zeit bei der Ammoniakherstellung oder in der Petrochemie angewendet werden (DGB et al. 2011:33f.). Die bei der CO<sub>2</sub>-Abtrennung angewandten Verfahren sind Absorption, Adsorption, Membran und Kryo. Die Absorption beschreibt das Aufsaugen oder Aufnehmen eines Stoffes durch einen anderen. Sie kann als stoffliche oder chemische Wäsche des Rauchgases zum Abtrennen von CO<sub>2</sub> erfolgen. Bei der Adsorption hingegen werden Flüssigkeits- oder Gasbestandteile an Oberflächen wie Aktivkohle oder Zeoliten (kristalline Alumosilikate, die in zahlreichen Modifikationen in der Natur vorkommen) fest gebunden. Sie lassen sich nach Art des Adsorberbetts [z.B. Aktivkohle, Aluminium] oder nach Art der Regenerationsmethode unterteilen. Beim Membranverfahren wird die unterschiedliche Durchlässigkeit von CO<sub>2</sub> und anderen Stoffen in der Luft oder Rauchgas ausgenutzt. Die Membran dient dabei als Trennschicht für die Filterung des Gases. Beim Kryoverfahren wird das Gas abgekühlt und anschließend durch Destillation oder Kondensation das CO<sub>2</sub> abgetrennt (BMU RECCS 2007:50). Die Kraftwerkstechnologien zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung lassen sich in drei Technologiefamilien einteilen: Pre-Combustion, Post-Combustion und Oxyfuel-Prozess. Bei ihnen findet der Trennprozess an jeweils unterschiedlichen Stellen statt, wie im Folgenden gezeigt wird.

### **5.1 Pre-Combustion: Vergasung**

Bei der Pre-Combustion-Technologie wird die Kohle zu einem Synthesegas vergast. Das hierin enthaltene Kohlenmonoxid wird zur Reduktion von Wasser genutzt, wodurch Wasserstoff entsteht. Das Kohlendioxid wird abgetrennt und der Wasserstoff in einer Gasturbine verbrannt.

**Abbildung 4: Schema Post-Combustion (aus eon 2009, S. 7)**



Das  $\text{CO}_2$  wird bereits vor der Energieerzeugung und nach der Vergasung mittels stofflicher Wäsche abgetrennt [siehe Abbildung 4]. Als Lösungsmittel können insbesondere Methanol, Propanyl-Carbonat oder N-Methyl-Pyrrolidone dienen (BGR 2005:13). Die Vergasung ist eine Zerlegung der Kohlenwasserstoffe der Kohle in Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Durch Zuführung von Wasserstoff wird das Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid und Wasserstoff oxidiert.

In einem IGCC-Kraftwerk [Integrated Gasification Combined Cycle] wird der verbleibende Wasserstoff in einer Gasturbine verbrannt, um den Wirkungsgrad optimal zu gestalten. Die Verbrennungsgase treiben direkt die Turbine an. Das [noch heiße] Verbrennungsgas erzeugt in einem Abhitzekessel Wasserdampf, der wiederum für den Antrieb einer Dampfturbine genutzt wird. Hierbei wird der Temperaturunterschied zwischen der Gasverbrennung und dem Dampfprozess ausgenutzt: Die Verbrennung in der Gasturbine erfolgt in Temperaturen von über 1000 Grad, hingegen entsteht Wasserdampf unter Normaldruck bereits ab 100 Grad. Die Kombination aus Gas- und Dampfturbine erhöhen den Wirkungsgrad des gesamten Prozesses. Gasturbinen haben alleine nur Wirkungsgrade von unter 40 %, hingegen sind im GuD-Kraftwerk Irsching 4 in Ingolstadt bereits 60 % erreicht worden (Siemens o.J.).

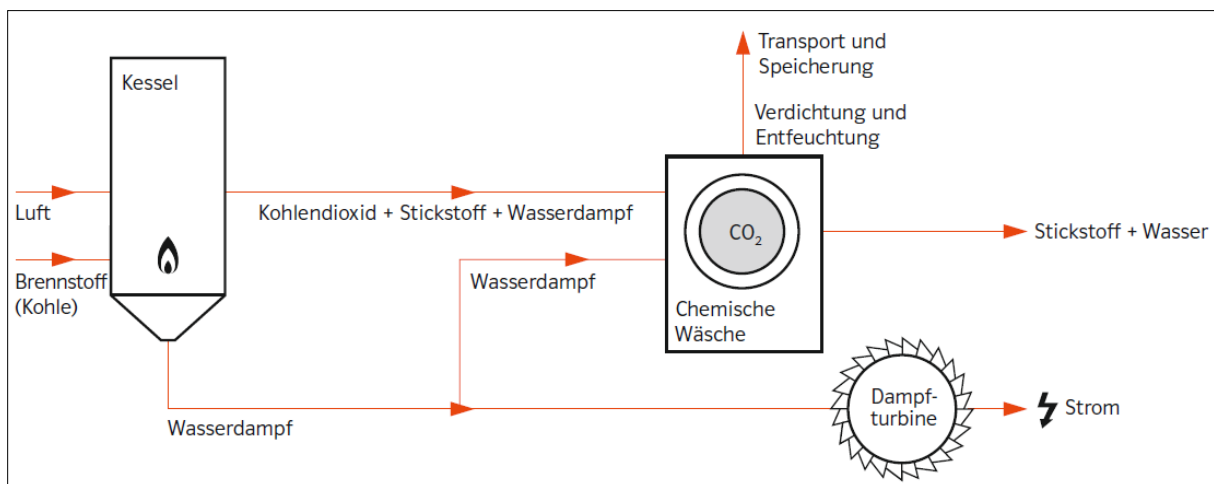
Pre-Combustion-Kraftwerke erfordern einen vollkommen neuen und komplexen Kraftwerkstyp und haben sehr energieintensive Verfahrensschritte durch die Luftzerlegung, den Vergaserprozess und das Recycling des Lösemittels (eon 2009:6). Die Technologie ist daher nicht für die Nachrüstung bestehender Kraftwerke geeignet. Vorteilhaft ist, dass sich durch die Vergasung und vorgeschalteten

Abtrennungen Schadstoffemissionen von Stoffen wie  $\text{SO}_2$  und Schwermetallen weitgehend eliminieren lassen. Sie müssen so nicht in einem nachgeschalteten Verfahren aus den Abgasen entfernt werden. Außerdem sind kleinere Reaktorgrößen als bei der Post-Combustion möglich (BGR 2005:3).

## 5.2 Post-Combustion: Rauchgaswäsche

Bei der Post-Combustion wird das  $\text{CO}_2$  aus dem Rauchgas mittels einer chemischen Wäsche abgeschieden. Sie ist einem konventionellen Verbrennungsprozess einfach nachgeschaltet.

**Abbildung 5: Schema Post-Combustion (aus eon 2009:S. 7)**

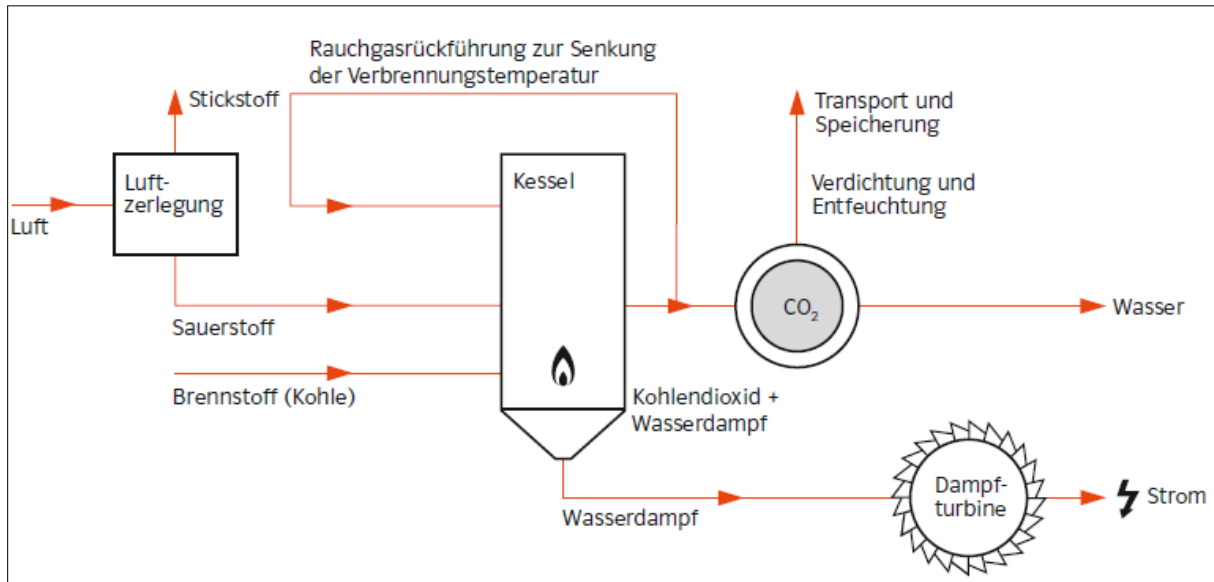


Bei der Verbrennung von Kohle entstehen Schwefeldioxid, Stickoxide und andere Schadstoffe. Konventionelle Kraftwerke verfügen daher über Rauchgasreinigungsanlagen, welche die Schadstoffe aus dem Rauchgas filtern. Der Rauchgasreinigung wird bei der Post-Combustion eine weitere Stufe hinzugefügt. Hierzu wird das Rauchgas durch eine flüssige Reinigungssubstanz - wie z.B. Amine - geleitet, welche das  $\text{CO}_2$  aufnimmt. Durch Erhitzen wird das  $\text{CO}_2$  aus der wässrigen Lösung ausgeschieden und kann daraufhin abtransportiert und gespeichert werden. Diese Methode wird standardmäßig in der chemischen Industrie zum Trennen von Gasen eingesetzt und ist damit in der Praxis bereits bewährt. Bestehende Kraftwerke können mit dieser Technologie relativ einfach nachgerüstet werden. Allerdings ist mit höheren Wirkungsgradverlusten als bei den anderen Technologien zu rechnen (eon 2009:S. 6).

### 5.3 Oxyfuel-Prozess: Verbrennung mit Sauerstoff

Im Oxyfuel-Prozess findet die Verbrennung in einer Sauerstoffatmosphäre unter Zuführung von Rauchgas statt. Er ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt.

**Abbildung 6: Schema Oxyfuel-Prozess (aus eon 2009, S. 7)**



Beim Oxyfuel-Verfahren wird Kohle konventionell im Kessel verbrannt. Über einen Wärmetauscher wird Dampf erzeugt, der eine Dampfturbine zur Stromerzeugung antreibt. Der signifikante Unterschied zu konventionellen Kraftwerken besteht in der Zusammensetzung des Verbrennungsgases, das sich aus rezykliertem Rauchgas und Sauerstoff zusammensetzt. Eine Luftzerlegungsanlage gewährleistet hierbei die Versorgung mit technischem Sauerstoff. Sie stellt eine neue Komponente im Kraftwerksprozess dar. Sie ist aber zur Herstellung von Sauerstoff und Stickstoff eine etablierte Technik. Der Luftstickstoff wird so aus dem Prozess ausgeschossen und ein Rauchgas erzeugt, das im Wesentlichen aus Kohlendioxid, Wasserdampf, Sauerstoff und den Verbrennungsgasen des Schwefels und Stickstoffs der Kohle besteht. Den Kessel ist ein Staubfilter zur Abscheidung der Asche im Rauchgas nachgeschaltet. Danach erfolgt die Entfernung des Wassers und Schwefeldioxids, so dass ein Rauchgas mit hoher CO<sub>2</sub>-Konzentration entsteht. Dies wird in einem nachfolgenden Prozess gereinigt und getrocknet, so dass am Ende ein CO<sub>2</sub>-Abgasstrom mit einem Anteil >90 Vol.-% vorliegt. In Abbildung 6 wird das Rauchgas direkt nach der Entstaubung aufgeteilt und in die Brennkammer zurückgeführt. Alternativ ist eine Auskopplung des gereinigten Rauchgases nach der

Entschwefelung möglich. Dieses Rauchgas weist geringere Wasseranteile und SO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf, was Korrosionsvorgängen vorbeugt (Tappe 2011, S.17f.).

#### **5.4 Die Varianten im Vergleich**

Rauchgase aus der Verbrennung weisen üblicherweise 5-15 Vol.-% CO<sub>2</sub> auf. Eine effiziente Ablagerung benötigt Konzentrationen von mehr als 90 % Vol.-% CO<sub>2</sub> (BGR 2005:11). Das abgetrennte CO<sub>2</sub> weist je nach Technologie Konzentrationen von 85 % bis 98 % auf. Beim Oxyfuel-Prozess wird die höchste Abscheiderate von bis zu 98 % erreicht. Die Post- und Pre-Combustion erreichen nur 85 % bis 95 %. Das abgetrennte Gas besteht daher immer aus CO<sub>2</sub> und einer kleinen Mengen an Verunreinigungen, welche vor allem bei der Verbrennung entstehen. Die CO<sub>2</sub>-Abtrennung führt zudem zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch, weil die Wirkungsgrade der Kraftwerke um 8-18%-Punkte sinken (BGR 2005:12).

Die Post-Combustion erreicht eine Reinheit des CO<sub>2</sub> von bis zu 95%. Der Brennstoffverbrauch steigt um 10-35 % und der Wirkungsgrad sinkt um 8-14 %. Diese Methode ist bereits in der chemischen Industrie bewährt und derzeitige Kraftwerke sind mit ihr leicht nachrüstbar (BMU 2007:52f.).

Die Pre-Combustion weist die geringsten Wirkungsgradverluste auf. Sie erfordert ein neues und sehr komplexes Kraftwerkskonzept. Außerdem gibt es noch keine marktfähige Wasserstoffturbine. Die Pre-Combustion wird daher am längsten bis zur Marktreife brauchen (eon o.J.:6).

Beim Oxyfuel-Prozess ist mit 98% eine besonders hohe Reinheit des CO<sub>2</sub> erreichbar (BGR 2005:16). Nachteilig sind der hohe Wirkungsgradverlust von ca. 10% und eine Verdoppelung des Energiebedarfs. Der Hauptenergieverbraucher beim Oxyfuel-Prozess ist die Luftzerlegungsanlage zur Produktion des reinen Sauerstoffs. Die Verbrennung mit reinem Sauerstoff führt zudem zu so hohen Temperaturen, dass ein neuer Dampfkesseltyp erforderlich ist (eon o.J.:6). Außerdem ist der Oxyfuel-Prozess nicht zur Wasserstoffproduktion und zur Kombination mit GuD-Prozessen geeignet (BGR 2005:15).

Ein gemeinsames Problem ist die Anschlussfähigkeit der Technologien an die bestehenden Kraftwerke. Für neugebaute Kraftwerke könnte durch eine Capture-ready-Pflicht eine Nachrüstung mit CCS beim Bau vorbereitet werden.

## 5.5 Zukünftige Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung

Neben den drei kurzfristig verfügbaren Technologien wird an mittel- bis langfristig verfügbaren Technologien geforscht, welche keine oder nur geringe Wirkungsgradverluste verursachen. Vor allem die Chemical-Looping-Combustion und die Entwicklung der Brennstoffzelle können große Potentiale haben (BMU 2007:58f). Allerdings sind sie erst in 20-30 Jahren anwendungsbereit. Bei der Chemical-Looping-Combustion wird der Sauerstoff für die Verbrennung nicht durch Luft sondern durch Metalloxide zur Verfügung gestellt. Das Abgas der Verbrennungsreaktion besteht im Idealfall nur aus CO<sub>2</sub> und Wasserdampf, die durch Kondensation leicht voneinander trennbar sind (Kronberger et al.:V30).

Brennstoffzellen können ebenfalls zur Stromerzeugung eingesetzt werden und damit Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung induzieren. Insbesondere der Typ der Festoxidbrennstoffzelle [Solid Oxide Fuel Cell] kann ein Schlüsselement für verschiedene Prozesse und neue Kraftwerkskonzepte sein. Ihr Elektrolyt ist eine sauerstoffundurchlässige Keramik, in der intern eine Trennung von Sauerstoff und Stickstoff ohne besondere Maßnahmen stattfindet. Das Abgas aus der Anodenseite enthält nur CO<sub>2</sub> und nicht reagiertes Brenngas. Die Brennstoffzelle kann trotz CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Verdichtung Wirkungsgrade von 60 % erreichen (Grundwald 2008:29). Die Festoxidbrennstoffzelle kann zum Beispiel dem ZECA-Prozess nachgeschaltet werden. Beim ZECA-Prozess wird Kohle durch hydrierende Druckvergasung mit Wasserstoff [H<sub>2</sub>] zu Methan [CH<sub>4</sub>] umgesetzt. Das Methan wird im nächsten Prozessschritt mit Wasserdampf in Anwesenheit von Calciumoxid [CaO] zu H<sub>2</sub> und Calciumcarbonat [CaCO<sub>3</sub>] umgesetzt. Zur Hälfte wird der Wasserstoff der Hydrovergasung zugeführt und die andere Hälfte wird in einer Festoxidbrennstoffzelle verstromt. Reines CO<sub>2</sub> kann aus dem Reaktor entfernt werden. Diesem Zwischenprodukt wird Kohlenstoff mittels Kalzinierung entzogen. Als Resultat entstehen Wasserstoff und CO<sub>2</sub> in getrennten Strömen. Bei diesem Prozess sind theoretische Wirkungsgrade von 70 % erreichbar (Grundwald 2008:30).

## 6 CO<sub>2</sub>-Transport

Der Transport des CO<sub>2</sub> ist erforderlich, um es von seinem Entstehungsort zu seinen potentiellen Speicherorten zu befördern. Für den Transport wird das CO<sub>2</sub> zuerst auf ca. 100 bar verdichtet und verflüssigt. Das Kohlendioxid wird dabei im überkritischen

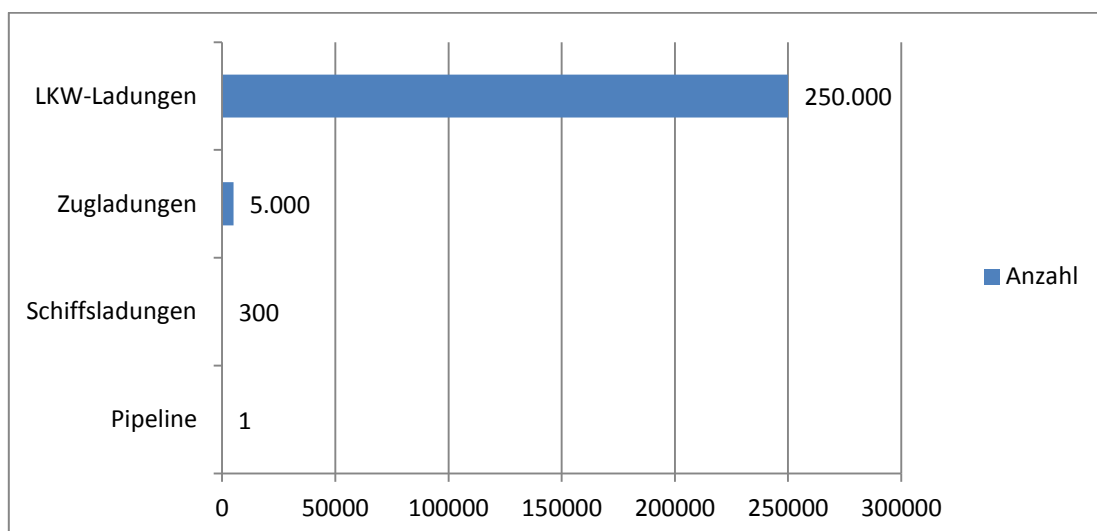
Zustand gehalten. Die Dichte von Flüssigkeit und Gas ist in diesem Zustand nicht mehr von einander unterscheidbar, so dass sich das CO<sub>2</sub> sicherer transportieren lässt (DGB 2010:28f.). Anschließend wird es mit LKWs, Züge, Schiffe oder per Pipeline transportiert. Alle vier Möglichkeiten sind in der Industrie bereits im Einsatz. Daher sind hinreichende Anwendungserfahrungen vorhanden.

Die Auswahl der Transportoption richtet sich vor allem nach drei Parametern:

- Transportkapazität,
- Entfernung von der Quelle zur Senke,
- Speicherstandort [onshore/offshore]

LKWs und Zügen sind aufgrund ihrer geringen Kapazitäten und der großen Menge an CO<sub>2</sub> ungeeignet. Die effektivste, wirtschaftlichste und sicherste Alternative sind Pipelines. Sie benötigen jedoch den Aufbau eines Pipelinenetzes. Schiffe können ab Entfernungen von 1.000 km Vorteile gegenüber Pipelines haben, wenn ein Transport über Wasser notwendig wird und die Pipelines am Meeresboden verlegt werden müssten. Pipelines haben zudem geringere Zusatzemissionen als Schiffe, weil sie für Transporte keinen Treibstoff verbrennen müssen. Schiffe können so, je nach Entfernung, 2,5 bis 18 Prozent zusätzliche Emissionen verursachen, wohingegen der Pipelinetransport nur 1 bis 2 Prozent je 1.000 km erzeugt (BMU 2007:S.68).

**Abbildung 7: Anzahl der benötigten Transportladungen für den Transport von 5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>**



Für den CO<sub>2</sub>-Transport ist der Aufbau eines Pipelinenetzes nötig, das erhebliche Investitionen und ein Monitoring erfordern. Für den Bau einer Pipeline sind



einschließlich ihrer Planung und Genehmigung 3-5 Jahren zu veranschlagen (IZ-Klima 2008:11), so dass eine zeitliche und geografische Abstimmung innerhalb der Gesamtkette des CCS erfolgen muss. Der Bedarf an Pipelines könnte sich reduzieren, wenn die Orte der großen CO<sub>2</sub>-Punktquellen und möglicher Speicherstätten sich überschneiden.

## 7 CO<sub>2</sub>-Speicherung

Im letzten Prozessschritt wird das CO<sub>2</sub> gespeichert, um es langfristig von der Atmosphäre zu isolieren. Die unterirdische Speicherung des CO<sub>2</sub> in tiefliegenden geologischen Formationen an Land oder unter dem Meeresboden sind die aussichtsreichsten Optionen. Die dort vorhandenen porösen Gesteinsschichten halten das CO<sub>2</sub> durch Absorption und Kapillarkräfte fest, so dass es schwer entweichen kann. Die CO<sub>2</sub> Speicherformationen müssen nach oben durch undurchlässige Deckschichten abgeschlossen sein, da das CO<sub>2</sub> leichter als Wasser ist und ansonsten nach oben steigen würde (DGB et al. 2011:56f.). Diese Deckschichten bestehen aus Grundwassernichtleitern, wie Tonen oder Sandstein. Sie umschließen Grundwasserleiter und werden in Aquifugen oder Aquicluden unterteilt. Die Speicher dürfen zudem keine Verwerfungen durch Brüche oder tektonische Bewegungen in ihrer Umgebung aufweisen, da sonst das CO<sub>2</sub> wandern oder Salzwasser nach oben verdrängen könnte (DGB et al. 2011:57). Die Speicherung findet vorwiegend in Tiefen von ca. 800 bis 2.500 m statt, weil dort die Druckverhältnisse das CO<sub>2</sub> im überkritischen Zustand halten und die Porosität der Gesteine gegeben ist. Die Tiefen können jedoch in Abhängigkeit der Beschaffenheit des unterirdischen Gebirges zwischen einzelnen Speicherstätten variieren. Sollte das CO<sub>2</sub> über mehrere tausend Jahre im Untergrund verbleiben, wird es sich allmählich im Formationswasser lösen und in feste Mineralien umwandeln (Grünwald 2008:33-37).

Die unterirdische Speicherung kann in salinaren Aquiferen, entleerten Öl- und Gasfeldern sowie in nichtabbaubaren Kohleflözen erfolgen. Bei den entleerten Erdgas- und Erdöllagerstätten sind die geologischen und geochemischen Eigenschaften bereits gut erkundet. Zudem haben ihre Deckgebirge eine Speichersicherheit über Millionen von Jahren bewiesen. Allerdings kann entlang der vorhandenen Bohrlöcher CO<sub>2</sub> austreten, so dass sie sicher zu versiegeln sind.

Salinare Aquifere sind salzwasserführende Grundwasserleiter aus z.B. Sandstein, welche die größten theoretischen Speicherkapazitäten aufweisen. Sie müssen jedoch noch erkundet werden, um mögliche Risiken zu ermitteln. Sollte das CO<sub>2</sub> über mehrere tausend Jahre dort verbleiben, wird es sich allmählich im Formationswasser lösen und durch eine natürliche Carbonisierung in feste Mineralien umwandeln. (Grünwald 2008:33-37).

Die unterirdische Speicherung von Kohlenstoffdioxid kann zu Nutzungskonkurrenzen führen. CO<sub>2</sub>-Speicher können eine anderweitige Nutzung entsprechender Gebiete verhindern. Eine Ablagerung von CO<sub>2</sub> würde z.B. mögliche Erdgasspeicher oder den Einsatz von Geothermie in einer Gegend ausschließen. Außerdem gibt es Konkurrenzen um die möglichen Kapazitäten von CO<sub>2</sub>-Speichern. Sie könnten für alle großen Punktquellen genutzt werden oder nur für bestimmte Sektoren oder Bereiche. Die Kapazitäten der Speicher sind schneller erschöpft, wenn sie für alle großen Punktquellen genutzt werden (Höller/Viebahn 2010:54-57). Daher könnte eine Priorisierung auf bestimmte Sektoren oder Bereiche notwendig sein. Sie könnten vorwiegend für die Energiewirtschaft, nur für Biomasse und Gaskraftwerke oder für Industrien, in welchen CO<sub>2</sub> nicht zu vermeiden ist, genutzt werden

Die Kapazitäten der CO<sub>2</sub>-Speicher in Deutschland sind noch ungenau bestimmt. Nach derzeitigen Abschätzungen reichen sie bei der unterirdischen Speicherung in Deutschland für nur 10 bis 20 Jahre. Unterstellt ist hier, dass die jährlichen Emissionen aller großen Punktquellen eingelagert werden. Die Kapazitäten könnten hingegen für mehr als eine Kraftwerksgeneration ausreichen, wenn sie ausschließlich für die Stromerzeugung reserviert sind. Außerdem wurden die Kapazitäten bei diesen Berechnungen mit 5 Mrd. t sehr konservativ abgeschätzt (Höller/Viebahn 2010:54-57). Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [BGR] schätzt hingegen die Kapazitäten für salinare Aquifere auf 6,3-12,8 Gt und zusätzlich für entleerte Erdgasfelder auf 2,75 Gt. Sie klassifiziert die Speicherregionen der salinaren Aquifere nach Norddeutsches Becken, Oberrheingraben, Süddeutschen Alpenvorland und Thüringer Becken. Die Bestimmung der gesamten Kapazitäten in Deutschland erfolgt ausgehend von Regionalstudien, welche extrapoliert werden. Die großen CO<sub>2</sub>-Quellen der Energiewirtschaft im Ruhrgebiet, in der Lausitz und in Mitteldeutschland liegen außerhalb der Speicherformationen. Zum einen muss das CO<sub>2</sub> daher über große Entfernungen transportiert werden. Zum anderen sind

Interessensgegensätzen zwischen den stromerzeugenden Ländern und den Ländern mit CO<sub>2</sub>-Speichern zu erwarten (Knopf et al. 2010:76f.).

Weitere Speicheroptionen kommen in Deutschland nicht in Betracht. Erschöpfte Erdöllagerstätten haben in Deutschland zu geringe Kapazitäten und eine Speicherung in nichtabbaubaren Kohleflözen ist aufgrund fehlender Speichersicherheit ausgeschlossen. Von einer Speicherung im Ozean ist generell wegen möglicher Umweltauswirkungen abzusehen.

## **8 Risiken**

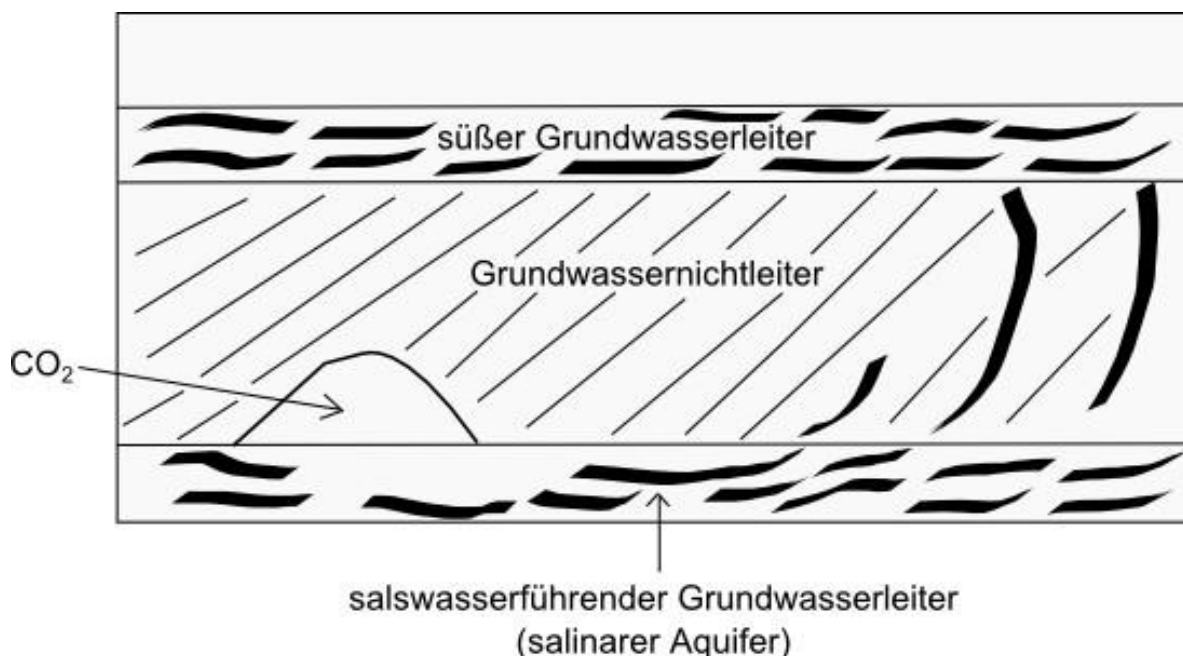
Risiken sind in allen drei Prozessschritten von CCS vorhanden. Ein Austritt von CO<sub>2</sub> ist bei der Abtrennung und beim Transport lokal, kurzfristig und in geringeren Mengen möglich, so dass eine Erstickungsgefahr für Lebewesen entsteht. Da CO<sub>2</sub> farb- und geruchlos sowie geschmacksneutral ist, kann es von Lebewesen nicht wahrgenommen werden. Ab einem Anteil von 10 % in der Luft führt es zur Erstickung. Mit 2 kg/m<sup>3</sup> ist es schwerer als Luft, wodurch es sich in Senken sammelt. Die Risiken bei der Abtrennung und beim Transport treten in bereits vertrauten Bereichen auf und bei ihnen ist hinreichende Anwendungserfahrung vorhanden.

Bei der Speicherung von CO<sub>2</sub> fehlen hingegen langfristige Erfahrungen, womit die Risiken nicht abgeschätzt werden können. Es lassen sich jedoch Risikobereiche abgrenzen. Ein Risikobereich ist die Sicherheit der Speicher. Es kann zu Austritten von CO<sub>2</sub> aus den unterirdischen Speichern kommen, so genannten Leckagen. Sie können allmählich und in kleinen Mengen oder plötzlich und in großen Mengen vonstattengehen. Durch die Erfahrungen mit natürlichen CO<sub>2</sub>-Speichern ist die Wahrscheinlichkeit eines plötzlichen Entleerens einer ganzen Lagerstätte als sehr gering einzuschätzen. Das CO<sub>2</sub> gelangt schließlich durch die Klüfte und Poren der Gesteinsschichten an die Oberfläche, wodurch es beim Austreten gehemmt wird (DBG 2010:58). Daher sind plötzliche Austritte großer Mengen an CO<sub>2</sub> nur schwer möglich. Hingegen sind Leckagen in kleinen Mengen zu erwarten. Sie dürfen jährlich nicht mehr als 0,01 % des gesamten abgelagerten CO<sub>2</sub> ausmachen (Grünwald 2008:44). Nach dem Austritt kann sich das CO<sub>2</sub> in Geländesenken sammeln, wodurch auf einigen Quadratmetern Erstickungsgefahr für Lebewesen besteht. In Deutschland ist bisher nur am Pilotstandort Ketzin die Ablagerung von CO<sub>2</sub> in ein

salinaren Aquifere erfolgt. Die Untersuchungen verliefen in Ketzin erfolgreich, so dass die Speicherung dort bisher sicher ist und das  $\text{CO}_2$  keine wesentlichen Auswirkungen auf das Gestein hat (Helmholtz-Zentrum 2012:4).

Ein zweiter Risikobereich sind die Umweltauswirkungen.  $\text{CO}_2$ -Speicher können zu einer Versauerung des Grundwassers führen. Zum einen verschiebt  $\text{CO}_2$  den pH-Wert des Wassers ins saure, wenn es sich in Wasser löst. Zum anderen kann das gespeicherte Kohlendioxid das saure Grundwasser unter Druck setzen, so dass dieses über kleinste Risse in höher gelegene Süßwasserleiter gedrückt wird, wie in untenstehender Abbildung dargestellt ist.

**Abbildung 8: Schema Grundwasserleiter**



Die Injektion von  $\text{CO}_2$  in den Untergrund kann Erdbeben verursachen, wenn es die Druckverhältnisse im Untergrund ändert. Daher müssen die Speicherstätten sorgfältig ausgewählt werden und Vorschriften für Grenzwerte erstellt werden. Die Speichersicherheit von  $\text{CO}_2$ -Speichern ist zudem durch Erdbeben gefährdet, daher muss eine Speicherung in Erdbebengebieten ausgeschlossen sein (Grünwald 2008:49).

Das  $\text{CO}_2$  kann zu geringen Anteilen Verunreinigungen wie Stickoxide, Methan oder Schwefelverbindungen enthalten, welche im Verbrennungsprozess anfallen und nicht vollständig abgetrennt wurden. Sie unterliegen in Rauchgasen gängigen Grenzwerten und Vorschriften. Das Ausmaß der Verunreinigungen kann aufgrund

der großen Speichermengen jedoch erheblich sein, weshalb sie Gefahren darstellen können (Grünwald 2008:49).

Die Risiken von CCS liegen vor allem bei der Speicherung, die noch erforscht werden muss. Hierfür sind Demonstrationsprojekte erforderlich, um die Risiken und die Speicherkapazitäten zu bestimmen. Die Ablagerung des CO<sub>2</sub> stellt so lange das schwächste Glied der CCS-Technologiekette dar. Ihre Erforschung ist ein Schlüsselement der möglichen Marktreife von CCS. Restrisiken werden sich jedoch bei der Speicherung nicht vollständig ausschließen lassen.

Nach der Ablagerung ist daher eine Überwachung [Monitoring] der Speicherstätten notwendig, die entweder bis zum Ende oder zumindest über einige Jahrzehnte aufrechterhalten werden muss. In der EU-Richtlinie 2009/31/EG „über die geologische Speicherung von Kohlendioxid“ Art. 18 ist nach einer Mindestdauer von 20 Jahren nach der Injektionsphase eine Übertragung der Verantwortung für die Speicherstätten an den Staat vorgesehen. Dafür müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein, welche vor allem die Speichersicherheit betreffen.

Während des Monitorings sind die Speicher vor allem geophysikalisch zu überwachen, d.h. durch seismische Verfahren zum Abtasten des Untergrundes anhand von Druck- und Schallwellen. Außerdem muss eine geochemische Kontrolle durch optische oder elektro-chemische Sensoren an den Bohrlöchern oder an der Oberfläche des Gesteins zur Beobachtung des CO<sub>2</sub> erfolgen. Mit den daraus gewonnen Daten können numerische Simulationen zum Verhalten des abgelagerten CO<sub>2</sub> im Speicher durchgeführt werden, so dass die Messwerten mit denen der Simulation verglichen und interpoliert werden können (Stroink 2009:22).

## **9 CO<sub>2</sub>-Nutzung**

Kohlendioxid kann stofflich genutzt werden. Es wird bei der Enhanced Oil Recovery [EOR] und Enhanced Gas Recovery [EGR] bereits zur besseren Ausschöpfung von Erdöl- und Erdgaslagerstätten genutzt. Durch das Injizieren von CO<sub>2</sub> in die Lagerstätten können konventionell nicht gewinnbare Mengen Erdöl und Erdgas gefördert werden. Zugleich wird das CO<sub>2</sub> seiner Speicherstätte zugeführt, wodurch die Kosten sinken und sich die Effizienz des Gesamtprozesses erhöht. Diese Form der Nutzung des CO<sub>2</sub> ist eher ein Nebeneffekt der geologischen Speicherung.

Außerdem kann CO<sub>2</sub> in Getränken als Kohlensäure, in Feuerlöschern, als Kühl- und Kältemittel oder zum Imprägnieren von Holz genutzt werden. Die stoffliche Nutzung macht nur einen geringen Teil der Gesamtemissionen aus, weil die anfallenden Mengen an CO<sub>2</sub>-Emissionen zu groß sind. Außerdem wird dabei das CO<sub>2</sub> nicht gespeichert. Ähnlich ist es bei der chemischen Nutzung des CO<sub>2</sub>. Fast 0,5 Prozent der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen werden in der chemischen Industrie als Rohstoff verwendet. Der Großteil davon wird in der Harnstoffproduktion genutzt. Geringe Anteile haben die Methanolproduktion, die Herstellung cyclischer Carbonate und Salicylsäure (Bazzanella 2010:1226). Die Forschung und Entwicklung darüber hinausgehender Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Nutzung ist noch nicht weit fortgeschritten (Grünwald 2008:37).

Als chemischer Rohstoff hat CO<sub>2</sub> den Nachteil, dass es thermodynamisch extrem stabil ist und eine ausgeprägte kinetische Trägheit aufweist. Um CO<sub>2</sub> dennoch zu Reaktionen zur Synthese von Kraftstoffen, Chemikalien oder Polymeren zu veranlassen sind eine hohe Energiezufuhr über energiereiche Reaktionspartner und Katalysatoren erforderlich. In der Grundlagenforschung wird u.a. im Forschungsprojekt Dream Reactions eine elektro- oder photokatalytische Aktivierung des CO<sub>2</sub> erprobt. Probleme können durch die Reinheit des eingesetzten CO<sub>2</sub> entstehen. Es darf keine Katalysatorengeifte enthalten. Daher muss geklärt werden, ob sich CO<sub>2</sub> aus Rauchgas für die chemische Synthese eignet. Außerdem müssen die Prozesse positive CO<sub>2</sub>-Bilanzen über ihren gesamten Lebenszyklus aufweisen, welche anhand von Stoff- und Energiebilanzen analysiert werden. Schließlich wird der Großteil des CO<sub>2</sub> durch die Verbrennung bei der Energieerzeugung freigesetzt, welches unter hohem Energieaufwand nun wieder gebunden wird (Bazzanella 2010:1227). Das CO<sub>2</sub> kann durch chemische Reaktionen in Kunststoffe – vor allem Polycarbonate oder Polyurethane - verwandelt werden. Sie werden u.a. in Kunststoffgehäusen, CDs, Schaumstoffen und Dämmstoffen verwendet (Bazzanella 2010:1228-1229).

Als weitere Option kann CO<sub>2</sub> vor allem in Algen fixiert werden. Algen haben schnellere Wachstumsraten und eine höhere CO<sub>2</sub>-Aufnahme als die meisten Festlandpflanzen. Nachteile sind die hohen Kosten, welche durch Skaleneffekte beim Anbau und der Ernte reduziert werden können (Styring/Jansen 2011:14).

Zusammenfassend kann CO<sub>2</sub> im Verhältnis zu den anfallenden Emissionen in nur sehr geringen Mengen genutzt werden. In absehbarer Zukunft stehen auch keine Verfahren zur Kohlendioxidnutzung bereit, welche die großen Mengen nutzen könnten.

## 10 Kosten der CO<sub>2</sub>-Entsorgung

Die Gesamtkosten der CO<sub>2</sub>-Entsorgung setzen sich bei CCS aus den Kosten der drei Prozessschritte und des Monitorings zusammen. Der Großteil der Kosten von ca. 80 % entstehen Studien zu Folge bei der Abtrennung des CO<sub>2</sub> (Bodipat 2010:10). Zur Markteinführung von CCS sind pro entsorgter Tonne CO<sub>2</sub> etwa 30 bis 50 €/t veranschlagt, welche durch Kostendegressionen aufgrund von Anwendungserfahrungen auf ca. 20 bis 40 €/t sinken (Viebahn et al. 2007:74). Der Preis für CO<sub>2</sub>-Zertifikate muss oberhalb dieser Entsorgungskosten für CO<sub>2</sub> liegen, damit diese Technologie wirtschaftlich attraktiv ist. Bis zum Beginn von Phase 3 des Emissionsrechtehandels in der EU ab 2013 lag der Preis unter 10 €/t CO<sub>2</sub> (EEX 2012). Das Absenken der Obergrenze für CO<sub>2</sub>-Emissionen und das Ende der Gratiszuteilungen können mittel- bis langfristig den Zertifikatspreis entsprechend anheben. Der Transport mittels Pipelines - als wirtschaftlichste Option - macht durchschnittlich 10 % der Kosten aus. Die Kosten des Transportes am Gesamtprozess steigen, wenn eine andere Transportart genutzt wird oder das Gelände durch Pipelines schwer erschließbar ist (IZ Klima:18). Beim Transport und der Abtrennung unterteilen sich die Kosten in Betriebs- und Investitionskosten. Hinzu kommen die Kosten für den erhöhten Brennstoffbedarf. Die Kosten der CO<sub>2</sub>-Entsorgung sind bei einer vollständigen Auslastung und längeren Lebensdauer der Kraftwerke niedriger, als wenn die Kraftwerke nicht unter Volllast betrieben oder vorzeitig vom Netzgenommen werden. Daher sind die genannten Zahlen Durchschnittswerte.

Bei den aktuellen Prognosen werden für die Ablagerung und Überwachung des Kohlenstoffdioxids nur wenige Cents je Tonne CO<sub>2</sub> veranschlagt. Damit hat der letzte Prozessschritt nur einen sehr geringen Anteil an den Gesamtkosten. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten möglicher Schäden und ihre Kosten sind bei der unterirdischen Speicherung jedoch ungewiss, da keine Erfahrungswerte über längere Zeiträume vorliegen. Somit sind die Abschätzungen für die Kosten einer

abgelagerten Tonne CO<sub>2</sub> von wenigen Cents unter Vorbehalt zu sehen. Annahmen bei diesen Abschätzungen sind, dass ein Monitoring nur 20 bis 50 Jahre nach der Injektionsphase erfolgt und Schadens- und Haftungskosten aufgrund der großen Mengen eher geringe Preisaufschläge verursachen (Grünwald 2008:56f.).

Ihre Preisvorteile erhalten Kraftwerke mit CCS gegenüber Kraftwerken ohne CCS durch das Einsparen der Emissionszertifikatspreise. Energien aus Erneuerbaren Energien emittieren mit Ausnahme von Biomassekraftwerken während ihres Betriebes hingegen kein Kohlenstoffdioxid. Daher werden zwischen Erneuerbaren Energien und fossilen Kraftwerken mit CCS die Stromgestehungskosten verglichen. Stromgestehungskosten geben an, „zu welchen Kosten elektrische Energie in einem bestimmten Kraftwerk erzeugt werden kann, wobei verschiedene Einflussgrößen und Parameter berücksichtigt werden müssen“ (Wagner et. al 2004:27). Für fossile Kraftwerke mit CCS sind je nach Art der Kraftwerksvarianten, der Energieträger und der Abtrennungstechnologien Stromgestehungskosten im Bereich von 4 bis 7 Cent je kWh prognostiziert (Grünwald 2008:51). Für einen repräsentativen Mix aus Erneuerbaren Energien in Deutschland betragen die Stromgestehungskosten zwischen 2010 und 2012 noch ca. 13 bis 14 ct./kWh. Allerdings werden diese durch weitere Lerneffekte sinken. Aktuelle Studien veranschlagen für im Jahr 2020 neuinstallierte Anlagen bereits Stromgestehungskosten von durchschnittlich 9 ct./kWh und für 2030 von 7,6 ct./kWh (BMU 2012:212-214). Damit kann ein Mix aus Erneuerbaren Energien bereits 2030 die Stromgestehungskosten von fossilen Kraftwerken mit CCS erreichen. Die Kostenabschätzungen sind jedoch eher ungenau, weil sie von vielen Faktoren beeinflusst sind, wie dem Netzausbau, der Entwicklung von Speichertechnologien oder dem Standort und der Auslastung der Anlagen.

Die Entwicklung und der mögliche Einsatz von CCS kann vor allem von der Akzeptanz abhängen, welche u.a. durch die Entwicklung der Erneuerbaren Energien beeinflusst wird.

## **11 Technologieakzeptanz**

Die geplante Zeitverfügbarkeit von CCS für das Jahr 2020 hat sich bereits weiter nach hinten verschoben. Eine Ursache ist die mangelnde Akzeptanz von CCS. Sie



wurde im Folgeprojekt CCS-Kommunikation (2012) vom Wuppertal Institut durch repräsentative Befragungen untersucht. Im Folgenden wird diese Studie kurz vorgestellt.

CCS ist vielen noch nicht bekannt und der Bekanntheitsgrad ist vor allem außerhalb möglicher Speicherregionen oder Demonstrationsprojekte niedrig (Pietzner 2012:14) 2011 hatten 57 % der Befragten schon von CCS gehört und nur 5 % gaben an einiges darüber zu wissen. Die Bekanntheit der Technologie steigt nur sehr allmählich und zudem ist ein Anstieg falscher Vorstellungen über CCS zu verzeichnen, wie z.B. dass CCS sauren Regen oder Smog reduzieren könnte (Pietzner 2012:20).

Die drei Prozessschritte von CCS stoßen auf unterschiedliche Akzeptanz. Die Abscheidung stößt auf höhere Akzeptanz als Transport und Ablagerung (Speicherung). Die Ablagerung wird am wenigsten akzeptiert. Den größten Einfluss auf die jeweilige Akzeptanz der drei Prozessschritte hat dabei die Einschätzung des gesellschaftlichen Nutzens von CCS. Je höher die Befragten den gesellschaftlichen Nutzen von CCS einschätzten, desto größer war die Akzeptanz. (Pietzner 2012:28f.)

Besonderen Einfluss auf die Akzeptanz und Stabilität der Einstellung zu CCS haben:

- die Wahrnehmung des gesellschaftliche Nutzen
- die Wahrnehmung des persönlichen Nutzen
- die Wahrnehmung des gesellschaftlichen Risikos
- die Wahrnehmung des persönlichen Risiko
- Wissen über jeweilige Prozessschritt und Inhalt des Wissens (Pietzner 2012:44)

Der gesellschaftliche Nutzen hatte in der Untersuchung den größten Einfluss auf die Akzeptanz und Stabilität der Einstellung, gefolgt vom persönlichen Nutzen. Je höher dabei der gesellschaftliche Nutzen von CCS eingeschätzt wird, umso höher ist die Akzeptanz von CCS. Die Wahrnehmung des gesellschaftlichen Risikos hat einen geringeren Einfluss als die Nutzeneinschätzungen, jedoch einen höheren als die anderen Faktoren. Die Wahrnehmung des persönlichen Risikos hat hingegen in der Befragung keinen nennenswerten Einfluss. Spezifisches Wissen in Bezug auf CCS oder verwandten Themenfeldern übt einen negativen Einfluss auf die Akzeptanz des jeweiligen Prozessschrittes aus. Wissen über eher allgemeine Umweltthemen übt

einen förderlichen Einfluss auf die Akzeptanz eines Prozessschrittes aus. (Pietzner 2012:44)

Auffällig ist, dass sich die Bürger in der Speicherregion Schleswig-Holstein direkt von CCS betroffen fühlen und die Einschätzung ihres persönlichen Risikos höher bewerten. (Pietzner 2012:28). Der Protest der Bevölkerung gegen CCS kommt besonders aus den von CCS betroffenen Regionen. Die untenstehende Abbildung gibt einen Überblick über die Berichterstattung der Akzeptanzprobleme von CCS. Sie beeinträchtigen bereits die Forschung und Entwicklung von CCS, so dass ein Einsatz in Deutschland fraglich ist.

### Abbildung 9: Bild Zeitungsausschnitte: eigene Darstellung aus Welt, Spiegel, SWR, Tagesspiegel, PNN



Über CCS ist den Befragten in der Wuppertalstudie noch zu wenig bekannt, als dass sich eine stabile Meinung über die Akzeptanz bilden kann. Die Kommunikation über CCS muss daher in den Kontext des übergeordneten Energiesystems eingebettet werden. Es müssen sowohl die technischen als auch die nicht technischen

Implikationen von CCS kommuniziert werden, damit sich die Bürger eine fundierte Meinung bilden können. (Pietzner 2012:45)

## **12 Vor- und Nachteile der Technologie**

CCS ermöglicht nur die weitere Nutzung fossiler Energieträger. Es ist eine End-of-Pipe-Technologie. Die Marktreife der Technologie ist noch offen, frühestens in 2020 würde sie zur Verfügung stehen. Bestehende und sich im Bau befindende Kraftwerke sind nur schwer und unter hohen Kosten nachrüstbar. Im Folgenden werden Argumente für und gegen die CCS-Technologie aufgeführt:

### **CCS kann die Nutzung der Erneuerbare Energien behindern weil ....**

- es einen negativen Einfluss auf Netzausbau gibt,
- CCS ist für fossile zentrale Großkraftwerke am besten geeignet,
- es kann ein Vorwand zum Bau neuer Kohlekraftwerke sein,
- jede CCS-Investitionen steht in Konkurrenz zu Investitionen in EE und
- es widerspricht dem politischen Ziel der Energieversorgung durch EE

### **CCS ist nur eine Brückentechnologie ....**

- aufgrund der begrenzten Speicherkapazitäten,
- weil die positive Entwicklung der EE die CCS-Technologie überflüssig machen kann,
- weil die Marktreife von CCS für Erneuerungsbedarfe im Kraftwerkspark und Klimaschutz zu spät kommen kann,
- weil der Beitrag zum Klimaschutz fraglich ist,
- weil die Nachrüstung aller Kraftwerke nicht möglich oder zu teuer ist sowie
- weil die langfristige Speichersicherheit des CO<sub>2</sub> im Untergrund über einen langen Zeitraum hinweg nicht gewährleistet werden kann..

### **Effizienzverluste durch CCS mindern das Potential zum Klimaschutz ....**

- weil der Rohstoffverbrauch zur Erzeugung des elektrischen Stroms steigt und
- weil sich dadurch Wirkungsgradverluste von Kraftwerken ergeben.

### **CCS hat Akzeptanzprobleme weil ....**

- fossile Energien für den Klimawandel verantwortlich gemacht werden,
- viele Menschen der Speichersicherheit nicht trauen und

- CCS zu höheren Stromgestehungskosten führen werden.

#### **CCS ist vorteilhaft aufgrund der hohen Kompatibilität ....**

- mit fossilen Kraftwerkssystemen,
- mit Biomassekraftwerken, um der Atmosphäre CO<sub>2</sub> zu entziehen,
- mit Gaskraftwerken, die als Regelleistung/Kaltreserve für EE benötigt werden sowie
- mit allen großen CO<sub>2</sub>-Punktquellen in Industrie und verarbeitenden Gewerbe.

#### **CCS trägt zur Versorgungssicherheit bei denn ....**

- erneuerbare Energien liefern nur volatil Strom,
- die Speichertechnologien des elektrischen Stroms sind nicht ausreichend und
- der heimische Energieträger Braunkohle kann in großem Umfang genutzt werden.

#### **CCS führt zu Kosteneinsparungen weil ...**

- fossile Kraftwerke in Zukunft mit CCS CO<sub>2</sub>-arm weiterbetrieben werden können,
- der Netzausbau in Deutschland sukzessive erfolgen kann wenn fossile Kraftwerke weiterbetrieben werden,
- die Unternehmen eine Einsparung der CO<sub>2</sub>-Zertifikatskosten haben und
- die Technologie Arbeit und Beschäftigung sichert wenn sie exportiert wird.

#### **CCS hat auch einen Beitrag zur Treibhausgasreduktion weil ....**

- es einen abnehmenden Grenznutzen konventioneller Maßnahmen gibt und das Minderungspotential der fossilen Kraftwerke noch nicht genutzt wird und
- die Emission der Kraftwerke nur durch CCS vermieden werden können.

#### **CCS ist Trend im Energiesystem weil ....**

- weiterhin weltweit fossile Kraftwerke gebaut werden und
- diese Kraftwerke nur durch den Einsatz von CCS klimaneutral betrieben werden können.

## 13 Zusammenfassung

Die CCS-Technologie ist eine Option, mit welcher der Umbau des Energiesystems gestaltet werden kann. Sie ist vor allem für große Punktquellen geeignet, welche durchgängig eine möglichst große Menge an CO<sub>2</sub> ausstoßen. Damit ist CCS besonders geeignet für Kohlekraftwerke oder große Industriebetriebe. Biomasse- oder Erdgaskraftwerke sind ebenfalls mit CCS kompatibel, nur ist im bestehenden Energiesystem ein Einsatz bei ihnen weniger effizient und wirtschaftlich. Weltweit werden weiterhin viele fossile Kraftwerke gebaut, welche einen Einsatz von CCS zur Begrenzung des menschlichen Treibhauseffektes erforderlich machen können. Die flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls ermöglichen ein Anrechnen von Treibhausgasreduktionen für den Finanzier der Maßnahmen im Ausland.

Die wesentlichen Einflussfaktoren für einen Einsatz von CCS sind seine Marktreife, die Speicherkapazitäten, die Entwicklung der Erneuerbaren Energien und seine Akzeptanz. CCS ist eine Brückentechnologie, weil die Speicherkapazitäten unter aktuellen technischen Voraussetzungen den Einsatz auf einige Jahrzehnte beschränken. Zwischen den Prozessschritten von CCS muss differenziert werden. Die Abtrennung und der erhöhte Energieaufwand erzeugt den Großteil der Kosten von CCS. Der Prozessschritt der Ablagerung birgt hingegen die Risiken und Unsicherheiten dieser Technologie in Bezug auf die Speicherkapazitäten. An diesem Prozessschritt kann CCS wegen mangelnder Akzeptanz schon in der Entwicklungsphase scheitern. Eine Alternative wäre die Nutzung des CO<sub>2</sub>, das in absehbarer Zukunft jedoch zu geringe Potentiale aufweist. Die Speicherung schließt zudem die Nutzung des Untergrunds für andere Zwecke aus, wie z.B. für die tiefe Geothermie. Die Kosten der CO<sub>2</sub>-Entsorgung durch CCS müssen unterhalb der Zertifikatspreise für CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen. Sie sind langfristig aufgrund fehlender Erfahrungen über die Sicherheit der unterirdischen Speicher noch nicht genau bestimmbar.

## 14 Literaturverzeichnis

Bazzanella, A., Krämer, D. und Martina Peters (2010): Nachhaltige Chemie. CO<sub>2</sub> als Rohstoff, in: Nachrichten aus der Chemie, Heft 58

- Bodipat, K., D. Dhiraj, E. Frye, L. Hua und T. McCabe (2010): Carbon Capture and Storage, o.O.
- BGR (2005): Zusammenfassung. Bewertung von Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung und –Deponierung, F+E Vorhaben Nr. 203 41 110, Karlsruhe/Hannover
- BMWi (2012): Zahlen und Fakten. Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung, o.O.
- BMU (2007): Kurzfassung RECCS, Strukturell-ökonomisch-ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien (RE) mit Carbon Capture and Storage (CCS), Wuppertal
- BMU (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, Stuttgart, Kassel, Teltow
- DBG (HG) (2010): Feuerlöscher oder Klimakiller? – Kohlendioxid CO<sub>2</sub> Facetten eines Moleküls, Frankfurt/Main
- EEX (2012): European Energy Exchange: EU Emission Allowances [online] <http://www.eex.com/en/Market%20Data/Trading%20Data/Emission%20Rights/EU%20Emission%20Allowances%20%7C%20Spot/spot-eua-table/2012-11-05> [05.11.2012]
- Eon (HG) (o.J.): CO<sub>2</sub>-Abtrennung und –Speicherung. CCS – Für den Weg in eine nachhaltige Energiezukunft, o.O.
- Fröhlich, A. (2011) Unterschriften übergeben: CCS-Projekt vor Votum im Bundesrat, in: PNN (22.09.201) [online] <http://www.pnn.de/brandenburg-berlin/579486/> [14.11.2012]
- Grünwald, R. (2008): Treibhausgas – ab in die Versenkung?. Möglichkeiten und Risiken der Abscheidung und Lagerung von CO<sub>2</sub>, Berlin (=Studien der Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag 25)
- Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungszentrum (Hg.) (2012): Geologische Speicherung von CO<sub>2</sub>. Pilotstandort Ketzin, o.O.

- Höller, S. und P. Viebahn (2010): Kritische Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Lagerkapazitäten in Deutschland. Ein Beitrag für den öffentlichen Diskurs um CCS als Klimaschutzoption, in: Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (Hg.), Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis, 19. Jg., Nr. 2, S. 53-58
- IZ Klima Informationszentrum klimafreundliches Kohlekraftwerk e. V. (Hg.) (2008): CCS Transport von CO<sub>2</sub>: Pipelines für den Klimaschutz, o. O.
- Knopf, S., May, F., Christian Müller und Johannes Peter Gerling (2010): Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO<sub>2</sub>-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen, In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 60. Jg., Heft 4
- Kronberger, B., Luisser, M., Löffler, G. und Hermann Hofbauer (2004): Chemical-Looping Combustion – Ein neuartiges Kraftwerkskonzept zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung, IN: Proceedings of the XVI. Kraftwerkstechnische Kolloquium Dresden
- Pietzner, K. (2012): Folgeprojekt CCS-Kommunikation- Multivariate Analysen der Einflussfaktoren auf die Akzeptanz von CCS. Abschlussbericht, Wuppertal
- Siemens (o.J.): GuD-Kraftwerk mit Weltrekord-Wirkungsgrad [online]  
<http://www.siemens.com/innovation/de/news/2011/gud-kraftwerk-mit-weltrekord-wirkungsgrad.htm> [26.10.2012]
- Spiegel (19.11.2010): CO<sub>2</sub>-Lager Angst vor Bürgern blockiert Klimaschutz [online]  
<http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/co2-lager-angst-vor-buergern-blockiert-klimaschutztechnik-a-729915.html> [14.11.2012]
- Stroink, L. (Hg.) (2009): Speicherung von CO<sub>2</sub> im tiefen Untergrund, Potsdam
- Styring, P. und Daan Jansen (2011): Carbon Capture and Utilisation in the green economy. Using CO<sub>2</sub> to manufacture fuel, chemicals and materials, o.O.
- SWR (13.04.2011): CO<sub>2</sub>-Speicher: Regierung will Klimakiller in die Erde verbannen [online] <http://www.swr.de/swrinfo/-/id=7612/nid=7612/did=7914858/3khk70/index.html> [14.11.2012]
- Tagesspiegel (19.03.2011): Protest gegen geplante CO<sub>2</sub>-Lagerung [online]  
<http://www.tagesspiegel.de/berlin/protest-gegen-geplante-co2-lagerung/3968478.html> [14.11.2012]

- Tappe, Stephanie (2011): Gaspotenziometrische und thermogravimetrische Abbranduntersuchungen von Braun- und Steinkohlen in Luft und in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-Atmosphären, Aachen, Shaker Verlag
- Viebahn, P., M. Fishedick und J. Nitsch (2007): CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Speicherung in Deutschland. Kosten, Ökobilanzen und Szenarien im Rahmen einer integrativen Bewertung, in: Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (Hg.), Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis, 16. Jg. Nr. 3, S. 70-77
- Wagner, U., B. Geiger, M. Hardi, O. Brückl, H. Roth und P. Tzscheuschler (2004): CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten im Kraftwerksbereich, bei den erneuerbaren Energien sowie bei nachfrageseitigen Energieeffizienzmaßnahmen, München
- Welt (25.06.09): Kohlendioxidspeicher: CO<sub>2</sub> Gesetz scheitert an der Angst der Wählern [online], <http://www.welt.de/wirtschaft/article3997992/CO2-Gesetz-scheitert-an-der-Angst-vor-Waehlern.html> [14.11.2012]