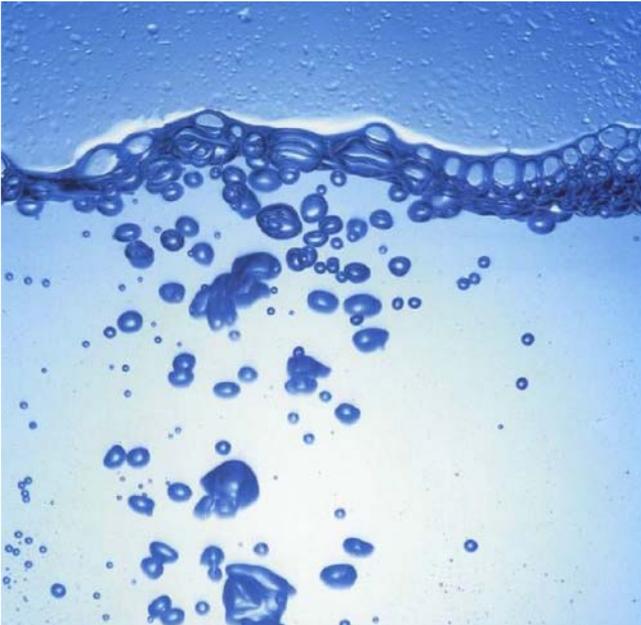




# Zukunftsmarkt CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung





# **Zukunftsmarkt CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung**

Fallstudie im Auftrag des Umweltbundesamtes

im Rahmen des Forschungsprojektes  
Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern  
(Förderkennzeichen 206 14 132/05)

durchgeführt

von

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe

Autor:

Clemens Cremer

## Impressum

Herausgeber: Umweltbundesamt (UBA)  
Postfach 1406, 06844 Dessau-Roßlau  
E-Mail: [info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
[www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Referat Öffentlichkeitsarbeit  
11055 Berlin  
E-Mail: [service@bmu.bund.de](mailto:service@bmu.bund.de)  
[www.bmu.de](http://www.bmu.de)

ISSN: 1865-0538

Projektbetreuung: Michael Golde  
Umweltbundesamt (UBA)

Peter Franz  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Autor: Dr. Clemens Cremer  
(Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe)

Titelfotos: Q-Cells AG, BMU / Rupert Oberhäuser, ccvision GmbH

Stand: Dezember 2007

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>Summary</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Potenziale von CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung</b> .....	<b>4</b>
2.1 Einführung.....	4
2.2 Die Technologie .....	5
2.3 Nutzen für Umwelt und Gesellschaft .....	9
2.4 Wirtschaftliche Potenziale .....	9
<b>3 Leistungsfähigkeit der wichtigsten Länder in der betrachteten Techniklinie</b> .....	<b>12</b>
<b>4 Innovationssystem und marktführende Unternehmen</b> .....	<b>15</b>
4.1 Überblick .....	15
4.2 Akteursanalyse.....	15
4.2.1 Technologiehersteller .....	16
4.2.2 Energieversorger.....	18
4.2.3 Öl- und Gasindustrie .....	19
4.2.4 Forschungssystem .....	21
<b>5 Fazit: SWOT-Analyse</b> .....	<b>23</b>
<b>Literatur</b> .....	<b>25</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Anteile von Ländern am Weltpatentaufkommen im Bereich CCS-relevanter Patente .....	14
Abbildung 3-2:	Relative Patentaktivität (RPA) im Bereich CCS-relevanter Patente.....	14
Abbildung 4-1:	Akteure im Technologiefeld CCS in Deutschland .....	16

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Übersicht über große Punktquellen von CO <sub>2</sub> -Emissionen (>0,1 Mt CO <sub>2</sub> pro Jahr) nach Art der Tätigkeit für das Jahr 2002 .....	4
Tabelle 5-1:	SWOT-Analyse für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der EU und Deutschlands in der Techniklinie CCS-Kraftwerke .....	24

## Zusammenfassung

Mit dem Ansatz des CO<sub>2</sub> Capture and Storage (CCS), der Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Energieumwandlungsprozessen und der Ablagerung in geologischen Formationen außerhalb der Atmosphäre, steht eine potenziell sehr wirkungsvolle Technologie für den Klimaschutz zur Verfügung. Die jährlichen weltweiten Emissionen allein aus großen Kraftwerken, wo CCS hauptsächlich ansetzen würde, liegen bei mehr als 10 Mrd. t CO<sub>2</sub>. Die wirtschaftliche Bedeutung der Technologie ist mit einem potenziellen Marktvolumen von mehreren Mrd. Euro pro Jahr allein in Europa ebenfalls hoch.

Bei CCS handelt es sich um eine architektonische Innovation, die sich aus der Weiterentwicklung und Verknüpfung von bisher bestehenden Technologien ergibt. Im Bereich der Kraftwerksprozesse werden drei Verfahren entwickelt, Pre-Combustion Capture, Post-Combustion Capture und Oxy-Fuel, bei denen der eigentliche Trennprozess an unterschiedlichen Stellen im Gesamtverfahren der Energieumwandlung durchgeführt wird. Alle drei Verfahren befinden sich noch im Anfang des Innovationszyklus, da noch keine kommerziellen Anlagen in Betrieb sind. Gegenwärtig werden die ersten Pilotanlagen errichtet und Demonstrationsanlagen geplant. Die hauptsächlich technischen Herausforderungen liegen in der effizienten Integration der Trennprozesse in den Kraftwerksprozess, um den energetischen Mehraufwand der Abscheidung zu begrenzen, der als Wirkungsgradverlust zum Tragen kommt.

Die zentralen Akteure im Technologiefeld CCS sind die vier großen Hersteller von Kraftwerkstechnologien mit eigener Entwicklung von (Gas-)Turbinen (General Electric, Siemens, Mitsubishi und Alstom), die großen Energieversorgungsunternehmen (z. B. Vattenfall, RWE, ENEL oder Endesa), die als Nachfrager nach der Technologie teilweise auch an der Entwicklung beteiligt sind sowie die großen Öl- und Gasunternehmen, die einerseits an großen Mengen CO<sub>2</sub> für die Verbesserung der Ölförderung (Enhanced Oil Recovery, EOR) interessiert sind und andererseits den Transport und die Speicherung von CO<sub>2</sub> als mögliches Geschäftsfeld sehen. Aus der Lokalisierung von wichtigen Akteuren, von staatlichen Förderprogrammen sowie von Anreizen für Unternehmen, wie insbesondere durch den europäischen Emissionshandel, haben sich aktive Innovationssysteme in den USA, in der EU und dort vor allem in Deutschland sowie in Norwegen entwickelt.

Es bestehen durchaus realistische Chancen, dass die Technologie CCS in Europa und dort in Deutschland zum Durchbruch kommt, da mit dem Emissionshandel wirtschaftliche Anreize bestehen und wichtige Akteure bei Technologieherstellern und -nutzern hier angesiedelt sind. Herausforderungen und Unsicherheiten bestehen vor allem im Erreichen von technologischen Entwicklungszielen, im Erbringen des Nachweises der Speichersicherheit und in der öffentlichen Akzeptanz der Technologie.

## Summary

The idea of CO<sub>2</sub> capture and storage (CCS) is to separate CO<sub>2</sub> from energy conversion processes and to store it safely outside the atmosphere e.g. in geologic formations. This concept constitutes a potentially very effective technology for the mitigation of climate change. The worldwide emissions from large power plants – where CCS would be applied primarily – add up to more than 10 billion tons of CO<sub>2</sub> per year. In view of a market volume of several billion Euros per year for large power plants, the economic relevance of these technologies can be considered equally high.

Carbon capture and storage is an architectural innovation that is made up from the combination and further development of existing technologies. Within the field of power plants, three main process lines are under development: pre-combustion capture, post combustion capture and oxy fuel. All three process lines are still in an early stage of the innovation cycle, as there are no commercial plants in operation yet. Instead, the first pilot plants are presently under construction and demonstration plants are being planned. The main technical challenges lie in the efficient integration of the separation processes into the power plant process with the aim to minimize the additional energy demand for the capture of CO<sub>2</sub>.

There are several groups of central actors in the technology field of CCS. The four large suppliers of electricity generation technologies with an own distinct development of (gas-)turbine technologies, General Electric, Siemens, Mitsubishi and Alstom represent the technology manufacturers. The large utilities such as Vattenfall, RWE, Enel or Endesa make up the potential demand for the CCS technologies and they are partly also involved in their development. The oil and gas majors (e.g. Shell, BP, Statoil) on the one hand are interested in having large volumes of CO<sub>2</sub> for improving the oil production (enhanced oil recovery) and on the other hand, they assess the transport and storage of CO<sub>2</sub> as a potential business area. As a result of the local activities of stakeholders, of public support programmes and of incentives for the industries, active innovation systems have evolved in the United States, in the EU (there especially in Germany) and in Norway.

There is a reasonable chance that the technology concept of CCS will make its breakthrough in Europe and possible in Germany, as the European Emissions Trade creates important incentives and as important actors among technology manufacturers and utilities are located in this region. Main challenges lie especially in reaching the objectives for the technological development, in proving the feasibility of save storage and in the public acceptance of the CCS technologies.

# 1 Einführung

Der Umwelt- und Ressourcenschutz gewinnt national und international eine zunehmende Bedeutung. Damit verbunden wird sich die Nachfrage nach Umwelttechniken weltweit dynamisch entwickeln. Inzwischen hat sich aus dem Umwelt- und Ressourcenschutz auch ein maßgeblicher Treiber für Innovationen entwickelt. Umwelt- und Innovationspolitik wachsen dadurch immer stärker zusammen, moderne Umweltpolitik muss auch Innovationspolitik sein.

Um Wachstums- und Beschäftigungspotenziale zu mobilisieren ist es wichtig, Synergieeffekte zwischen der Verbesserung der Umweltsituation, der Schaffung zukunftsfähiger Arbeitsplätze und der Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit zu identifizieren und zu nutzen. Das Forschungsprojekt „Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern“ analysiert die Innovationsdynamik in wichtigen Handlungsfeldern systematisch und auf zusammenfassender Ebene. Diese Handlungsfelder bildeten die Basis, um elf Produktgruppen/Technologien auszuwählen, die in Fallstudien vertieft untersucht werden.

Jede Fallstudie enthält eine kurze Vorstellung der Grundlagen der entsprechenden Technologie. Anschließend folgt eine nähere Analyse des Zukunftsmarktes und seiner Innovationsdynamik. Besonderes im Blickpunkt stehen dabei die Entwicklung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher und europäischer Unternehmen im internationalen Vergleich, ihr Umfeld sowie Ansatzpunkte für eine Stärkung des deutschen und europäischen Innovationssystems.

Innerhalb der Reihe: „Umwelt, Innovation, Beschäftigung“ sind Fallstudien zu den folgenden Themen erschienen: Solarthermische Stromerzeugung, CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung, Elektrische Energiespeicherung, Solares Kühlen, Energieeffiziente Rechenzentren, Biokunststoffe, Synthetische Biokraftstoffe, Hybride Antriebstechnik, Dezentrale Wasseraufbereitung und Regenwassermanagement, Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie, Stofferkennung und –trennung.

In dieser Veröffentlichung werden die Ergebnisse der Fallstudie CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung beschrieben. Zunächst werden die Potenziale von CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung mit ihren wichtigsten Komponenten, der aus der Technologie resultierende Nutzen für Umwelt und Gesellschaft sowie die wirtschaftlichen Potenziale vorgestellt. Darauf folgen eine kurze Analyse der Leistungsfähigkeit der wichtigsten Zielländer sowie eine Beschreibung des Innovationssystems und der marktführenden Unternehmen und Länder. Abschließens werden die zentralen Ergebnisse in einer SWOT-Analyse zusammengefasst.

## 2 Potenziale von CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung

### 2.1 Einführung

Im Jahr 2003 beliefen sich die Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe auf rund 25 Gt CO<sub>2</sub> (IEA 2005). Davon entfielen mehr als 50 % auf stationäre Punktquellen mit Emissionen von mehr als 100 kt CO<sub>2</sub> im Jahr. Beim Großteil dieser Punktquellen wiederum handelt es sich um Kraftwerke. Daneben bilden Anlagen aus dem produzierenden Gewerbe (z. B. Eisen- und Stahlwerke, Zementwerke) sowie Raffinerien die zweite Gruppe an großen Punktquellen von CO<sub>2</sub>-Emissionen aus anthropogenen Aktivitäten (vgl. Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Übersicht über große Punktquellen von CO<sub>2</sub>-Emissionen (>0,1 Mt CO<sub>2</sub> pro Jahr) nach Art der Tätigkeit für das Jahr 2002

Sektor	Anzahl der Anlagen	Jährliche CO <sub>2</sub> -Emissionen in Mt
Stromerzeugung	4.942	10.539
Zementherstellung	1.175	932
Raffinerien	638	798
Eisen- und Stahlindustrie	269	646
Petrochemische Industrie	470	379
andere Industrien	n.a.	83

Daten: IPCC 2005

Theoretisch ließen sich mit der Technologie der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung die Emissionen in die Atmosphäre, die aus solchen Punktquellen stammen, um 75 % bis 85 % vermindern.<sup>1</sup> Grundlegender Gedanke dabei ist es, die eingesetzten Prozesse so zu verändern, dass bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehende CO<sub>2</sub> nicht mehr in die Atmosphäre zu entlassen, sondern in weitgehend reiner Form aus dem Prozess heraus abzutrennen und dauerhaft in Kompartimente der Umwelt zu

<sup>1</sup> Der Anteil an vermiedenen Emissionen ist je nach Bezugssystem geringer als die technische Abscheidungsrate. Vergleiche hierzu z. B. Fishedick et al. (2007).

verbringen, die nicht in Verbindung mit der Atmosphäre stehen. Gesetzt eine Vermeidungsrate von 85 % gegenüber dem bestehenden System ließe sich erreichen<sup>2</sup> und es könnten genügend Speicher für das CO<sub>2</sub> gefunden werden, die den Anforderungen an Dauerhaftigkeit, Umweltverträglichkeit und Sicherheit entsprechen, könnten mit der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung weltweit bezogen auf das Jahr 2002 Emissionen aus Punktquellen allgemein in der Größenordnung von 11,4 Gt CO<sub>2</sub> vermieden werden. Wenn man nur den Bereich der Stromerzeugung in Betracht zieht, könnten CO<sub>2</sub>-Emissionen von rund 9 Gt CO<sub>2</sub> vermieden werden.

## 2.2 Die Technologie

Das Konzept der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und –Speicherung bei Kraftwerken basiert darauf, das CO<sub>2</sub> in einem modifizierten Umwandlungsprozess in hoher Konzentration abzutrennen. Nach der Abtrennung des CO<sub>2</sub> aus dem Kraftwerksprozess wird es gegebenenfalls gereinigt und dann komprimiert und zu einem Ort transportiert, wo es dauerhaft außerhalb der Erdatmosphäre gelagert bzw. gespeichert werden kann. In Europa wird dabei die geologische Speicherung in tiefen salinaren Aquiferen oder in Erdöl- und Erdgaslagerstätten angestrebt.

Neben der Entwicklung von Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung, die im Fokus der Analyse stehen, stellt die Erforschung von Lagerstätten für die Speicherung von CO<sub>2</sub> und deren dauerhafte Sicherheit eine große Herausforderung dar. Dabei sind noch eine Vielzahl von Fragen zu klären, die beispielsweise von der möglichen Ausbreitungsdynamik von CO<sub>2</sub> im Untergrund über geochemische Prozesse mit der Gesteinsmatrix bis hin zum Monitoring von Lagerstätten reichen. Für die Einschätzung, inwieweit einzelne Aquifere oder Erdgaslagerstätten für die Speicherung von CO<sub>2</sub> in Frage kämen, müssen zudem erst anlegbare und nachprüfbar Kriterien entwickelt werden.

Das Ziel der Kohlendioxidabscheidung in Kraftwerken lässt sich auf verschiedene Art und Weise realisieren. Dabei lassen sich grob drei Verfahrensrouten differenzieren: Post-Combustion Capture, Pre-Combustion und Oxy-Fuel.

Das Verfahren der **Post-Combustion Capture** lässt sich als Rauchgaswäsche beschreiben. Hier bleibt der herkömmliche Kraftwerksprozess im Grunde unverändert. Über die heute bereits üblichen Rauchgasreinigungsverfahren hinaus wird noch eine weitere Verfahrensstufe realisiert, in der das CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas entfernt wird. Da

---

<sup>2</sup> Bei diesen Annahmen ist zu berücksichtigen, dass es sich um einen Vergleich zwischen bestehenden Kraftwerken (mit niedrigen Wirkungsgraden) und neuen Kraftwerken mit CCS handelt. Wenn neue Kraftwerke ohne CCS mit neuen Kraftwerken mit CCS verglichen werden, fällt die CO<sub>2</sub>-Reduktion geringer aus.

die Rauchgase konventioneller Kraftwerke einen CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Größenordnung von 3 % (Gas- und Dampf Kombikraftwerke) bis maximal 14 % (kohlebefeuetes Dampfkraftwerk) aufweisen und das Rauchgas ungefähr bei atmosphärischem Druck vorliegt, bieten sich chemische Waschverfahren als Technik der Wahl an. Hierbei wird in einem ersten Reaktorgefäß das Rauchgas im Gegenstrom mit einem Lösungsmittel – für CO<sub>2</sub> sind dabei Aminlösungen wie Monoethanolamin oder Diethanolamin gut geeignet - in Kontakt gebracht und so weitgehend von CO<sub>2</sub> befreit. Das CO<sub>2</sub> geht mit chemischen Lösungsmitteln eine leichte chemische Bindung ein. In einem zweiten Reaktorgefäß wird das Lösungsmittel regeneriert, indem das CO<sub>2</sub> unter der Zufuhr von Wärmeenergie wieder gelöst wird. Das CO<sub>2</sub> wird auf diese Weise in hoher Konzentration bei atmosphärischem Druck gewonnen. Das regenerierte Lösungsmittel wird wieder in den Prozess eingebracht.

In Bezug auf den Kraftwerksbau bedeutet die Nutzung eines chemischen Waschverfahrens keine Veränderung der eingesetzten Technologien wie Brenner, Kessel, Turbinen usw. Allerdings muss die Abstimmung der gesamten Anlage verändert werden, da die zusätzlich benötigte Wärmeenergie für die Regeneration des Lösungsmittels bereitgestellt werden muss. Die Wärmeenergie wird dabei als Dampf aus dem Dampfkreislauf entnommen, der dann im Niederdruckteil der Dampfturbine nicht mehr zur Verfügung steht. Darüber hinaus muss die Waschanlage und die notwendige Verrohrung in die Geometrie und Topologie der Anlage mit eingeplant werden. Aus beiden Notwendigkeiten ergeben sich zusätzliche und zum Teil auch neue Anforderungen an das Engineering von CCS-Anlagen. Der Einsatz einer großen chemischen Wäsche in einem Kraftwerk würde einen deutlich höheren Wertschöpfungsanteil des chemischen Anlagenbaus in Kraftwerken mit CCS gegenüber herkömmlichen Anlagen bedeuten.

Bei der **Pre-Combustion Capture** wird das CO<sub>2</sub> abgetrennt bevor der Hauptumsatz von chemischer Energie in thermische Energie stattfindet. Hierzu wird der fossile Energieträger bei einem Einsatz von Steinkohle oder Braunkohle in einem Vergaser unter der Zugabe von reinem Sauerstoff in ein Synthesegas überführt, das hauptsächlich aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff besteht. Das Synthesegas wird im nächsten Verfahrensschritt gereinigt. Beim Einsatz von Erdgas wird keine Vergasung vorgeschaltet, sondern eine Gasreformierung, bei der ebenfalls Kohlenmonoxid und Wasserstoff als Hauptprodukte entstehen. Sowohl beim Einsatz fester Brennstoffe als auch beim Einsatz von Erdgas schließt sich nun eine Wassergaskonvertierung an, bei der das Kohlenmonoxid unter Zugabe von Dampf katalytisch in CO<sub>2</sub> und weiteren Wasserstoff umgesetzt wird. Aus dem so enthaltenen Synthesegas aus den Hauptbestandteilen Wasserstoff und CO<sub>2</sub>, das bei einem Druck von ca. 25 bis 40 bar vorliegt, kann das CO<sub>2</sub>

mittels einer physikalischen Wäsche abgetrennt werden. Hierbei wird das CO<sub>2</sub> physikalisch in einer Waschlösung wie z. B. Methanol<sup>3</sup> gelöst, da dieses Verfahren beim hohen Partialdruck des CO<sub>2</sub> im Synthesegas effizienter ist als ein chemisches Waschverfahren. Mit der Abtrennung des CO<sub>2</sub> wird ein energiereiches Brenngas erzeugt, das im Wesentlichen aus Wasserstoff besteht und in einem Gas- und Dampfprozess in elektrische Energie umgesetzt wird.

Ein mit Festbrennstoffen betriebenes Kraftwerk mit Pre-Combustion Capture entspricht weitestgehend einem IGCC Kraftwerk. Dieses Konzept der integrierten Vergasung von festen Brennstoffen und der anschließenden Nutzung des gekoppelten Gas- und Dampfprozesses war ursprünglich zur Erhöhung des Wirkungsgrades der Umsetzung fester Brennstoffe entwickelt worden. Zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung muss lediglich eine Wassergasreaktion und die physikalische Wäsche ergänzt werden. Im Bereich des Kraftwerksprozesses ergibt sich über den reinen IGCC-Prozess hinaus die Notwendigkeit, Gasturbinen zu konstruieren, in denen ein sehr wasserstoffreiches Gas effizient und emissionsarm<sup>4</sup> umgesetzt werden kann. Dazu müssen die Brenner der eingesetzten Gasturbine weiter entwickelt werden. Der eigentliche Kompressor- und Turbinenteil kann jedoch im Wesentlichen unverändert verwendet werden, da weiterhin Luft als Arbeitsmedium verwendet wird, die im Kompressorteil der Turbine komprimiert wird, von den Brennern erhitzt wird und die enthaltene Energie im Turbinenteil wieder abgibt.

Im Vergleich zu den heute weit verbreiteten Kraftwerkstypen hat ein IGCC-Kraftwerk - und insbesondere ein Kraftwerk mit Pre-Combustion Capture - einen höheren Anteil an verfahrenstechnischen Prozessen, die in der Vergasung und der Gasaufbereitung und darüber hinaus in der physikalischen Wäsche liegen. Eine große Herausforderung bei der Technologie ist die effiziente und zuverlässige Integration der Anlagenteile. Dabei kann vereinfacht gesagt werden, dass sich bei einer stärkeren Integration der Anlagenelemente ein höherer Gesamtwirkungsgrad erreichen lässt, dies aber mit einem höheren Risiko des Stillstands der Gesamtanlage erkauft wird, wenn einzelne Komponenten ungeplant ausfallen. Umgekehrt lässt sich bei einer weniger starken Integration die Redundanz von kritischen Elementen verbessern, die aber insgesamt mit einem geringeren Wirkungsgrad der Anlage erkauft wird. Die effiziente und zuverlässige Integration erwies sich schon bei IGCC-Kraftwerken ohne CO<sub>2</sub>-Abscheidung als Herausforderung. An das Engineering von IGCC-Kraftwerken mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung sind damit nochmals höhere Anforderungen gestellt.

---

<sup>3</sup> Von den Technologieherstellern werden verschiedene Lösungsmittel bzw. Gemische unter Handelsnamen wie z. B. Rectisol oder Flurisol vermarktet.

<sup>4</sup> Emissionsarm bezieht sich hier auf die entstehenden Stickoxide.

Das **Oxy-Fuel Konzept** fußt auf dem Prinzip, bei einer Verbrennung mit reinem Sauerstoff von Kohlen oder Kohlenwasserstoffen (wie z. B. Erdgas) ein Rauchgas zu schaffen, das lediglich aus CO<sub>2</sub> und Wasserdampf besteht. Letzterer kann problemlos auskondensiert werden. Die Haupttrennarbeit wird beim Oxy-Fuel-Konzept bei der Herstellung des reinen Sauerstoffs in einer Luftzerlegung durchgeführt. Stand der Technik für großtechnische Mengen ist hierbei die kryogene Luftzerlegung bei der die Luft zunächst verflüssigt wird und dann Sauerstoff und Stickstoff durch eine Destillation aufgetrennt werden. Im Vergleich zu den anderen Techniklinien würde beim Oxy-Fuel-Konzept nur wenig Technologie aus dem Bereich der chemischen Verfahrenstechnik eingesetzt werden und weite Teile der heute eingesetzten Kraftwerkstechnik könnten im Wesentlichen unverändert übernommen werden. Hauptsächlichliche Veränderungen bei einem kohlebefeuerten Dampfkraftwerk mit Oxy-Fuel-Technologie würden im Bereich des Kessels vorgenommen werden. Um ähnliche Verbrennungsbedingungen zu erhalten wie bei einem herkömmlichen, mit Luft betriebenen Kraftwerk, wird beim Oxy-Fuel-Konzept ein Teil des Rauchgases, das im Wesentlichen aus CO<sub>2</sub> besteht, rückgeführt. Auf diese Weise würde der reine Sauerstoff als Oxidationsmittel verdünnt und so die Verbrennungstemperatur erniedrigt.

Bei allen drei Verfahrensrouten, die für die Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus dem Kraftwerksprozess diskutiert werden, handelt es sich weitgehend um architektonische Innovationen. Das bedeutet, dass die einzelnen Elemente der konzipierten technischen Systeme bereits heute weitestgehend vorhanden sind und auch großtechnisch im Einsatz sind. Beispiele für solche Elemente sind Aminwäscher oder auch große Luftzerlegungsanlagen. Die Innovation besteht in diesem Fall darin, die existierenden Komponenten neu zu verbinden und in einem System effizient und zuverlässig zusammenarbeiten zu lassen. Dabei wird es auch notwendig sein, einzelne Komponenten zu verändern wie z. B. die Adaption von Gasturbinenbrennern an wasserstoffreiche Brenngase beim Verfahren der Pre-Combustion Abscheidung.

Kraftwerke mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung werden derzeit von den bisher im Markt befindlichen Technologierherstellern erforscht und entwickelt. Dies ist insoweit auch nicht erstaunlich, da es sich, wie beschrieben, um eine Weiterentwicklung bestehender Kraftwerkstechnologien handelt. Damit sind in erster Linie die Unternehmen des Kraftwerksbaus hauptsächlich an dieser Innovation beteiligt. Darüber hinaus spielen in allen Verfahrensrouten Trennprozesse eine Rolle, sei es bei der Luftzerlegung oder bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung in einer Aminwäsche. Diese Verfahren werden üblicherweise nicht vom Kraftwerksbau entwickelt und konstruiert, sondern von Unternehmen des chemischen Anlagenbaus. Dementsprechend ist zu erwarten, dass bei der Entwicklung und beim Bau von Kraftwerken mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung diese Branche eine größere Rolle spielen wird als derzeit.

## 2.3 Nutzen für Umwelt und Gesellschaft

Das Konzept der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung ist nicht unumstritten (vgl. z. B. Duckat et al. 2004). Dies liegt auch daran, dass sich ihr umweltrelevanter Nutzen allein auf die Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Atmosphäre beschränkt. Wenn dieses angestrebte Ziel mit der Technologie der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung jedoch zuverlässig erreicht wird, kann sie erheblich zum Klimaschutz beitragen. In zweiter Ordnung kann argumentiert werden, dass sich mit CCS-Technologien auch kohlenstoffreiche Primärenergieträger wie Stein- und Braunkohle klimaverträglich nutzen ließen, die auf dem Weltmarkt besser verfügbar sind bzw. auch heimische Energieträger sind. Aus diesem Blickwinkel, könnte mit CCS auch ein Beitrag zur Versorgungssicherheit unter den Bedingungen des Klimaschutzes erreicht werden.

CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung ist keineswegs die einzige technische Option auf der Angebotsseite des Strommarktes, mit der die Zielsetzungen der Klimaverträglichkeit und der Versorgungssicherheit verfolgt werden können. Konkurrierende Lösungsansätze sind dabei z. B. die erneuerbaren Energien. Daneben ist angesichts hoher Anteile von Steinkohle und Braunkohle an der Stromerzeugung die Nutzung von Erdgas als weiterer konkurrierender Lösungsansatz zu nennen. Da bei der Nutzung von Erdgas in hocheffizienten Kraftwerken nur rund die Hälfte an CO<sub>2</sub> pro erzeugter Energieeinheit emittiert wird als bei der Nutzung von Steinkohle, wäre mit solch einer Brennstoffumstellung eine deutliche aber nicht so weitgehende Verbesserung möglich wie bei CCS-Technologien. Allerdings sind hocheffiziente Erdgas GuD-Kraftwerke oder dezentrale Blockheizkraftwerke bereits heute verfügbar und stünden damit für den kurzfristiger anstehenden Ersatz von Kraftwerkskapazitäten zur Verfügung (vgl. z. B. Blohm et al. 2006).

## 2.4 Wirtschaftliche Potenziale

Im Bereich der Stromerzeugung besteht beispielsweise innerhalb der EU das Ziel durch Forschung und Entwicklung die bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung entstehenden Kosten auf ein Niveau von rund 20 €/t CO<sub>2</sub> zu senken (vgl. z. B. Europäische Kommission, 2004). Damit soll eine Technologie zur Emissionsminderung bereitgestellt werden, die nicht nur mengenmäßig sehr wirksam ist, sondern auch wirtschaftlich konkurrenzfähig zu anderen Emissionsminderungsmaßnahmen. Letztlich soll die Technologie der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung nach den Zielen ihrer Befürworter dazu verwendbar sein, große Beiträge zur Emissionsminderung zu leisten und dies bei einem gesamtwirtschaftlich vertretbaren Aufwand.

Grundsätzlich gibt es für die Betreiber von Kraftwerken nur dann einen Anreiz die Technologie der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung einzusetzen, wenn sie CO<sub>2</sub>, das bei der Verbrennung fossiler Energieträger entsteht, nicht mehr unbegrenzt in die Atmosphäre entlassen können. Da die Technologie keinen wesentlichen anderen Nutzen hat außer der Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, ist dieser Anreiz unbedingt notwendig. Wo er nicht besteht oder seine Schaffung nicht erwartet wird, sind allenfalls Demonstrationsvorhaben zu erwarten. Unter den derzeit gegebenen Rahmenbedingungen des Elektrizitätsmarktes schafft der Europäische Emissionshandel (ETS) über die Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in Europa diesen Anreiz, der zur Marktdiffusion von CCS-Technologien in Europa führen könnte. Die Zulassung von Emissionsminderungen aus dem Clean Development Mechanism (CDM) im ETS bewirkt darüber hinaus auch Anreize, CCS-Technologien in Nicht-Annex I Staaten einzusetzen, um so bewirkte CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen beispielsweise im ETS zu vermarkten. Über diese Setzung von Anreizen durch marktbasierende Instrumente hinaus existieren in der Europäischen Union Überlegungen, den Einsatz von CCS-Technologien bei Neuanlagen zur Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen ab 2020 verpflichtend vorzuschreiben. Je nach Strenge der Emissionsminderungsverpflichtungen im ETS würde dadurch nicht unbedingt eine stärkere Marktdiffusion als bei einer Regulierung nur über den ETS erreicht werden. Die Signalwirkung könnte jedoch bei einer frühzeitigen Ankündigung einer Verpflichtungsregel stärker sein.

Eine vollständige Marktdurchdringung von CCS-Technologien bei neu errichteten fossil befeuerten Kraftwerken in Europa würde bedeuten, dass in diesem Technologiebereich ein Umsatz in der Größenordnung von mehreren Milliarden Euro pro Jahr in Europa generiert werden könnte<sup>5</sup>. Davon entfielen ein größerer Anteil auf die heute sowieso schon verwendete Kraftwerkstechnik und ein relativ kleinerer Anteil auf die zusätzliche Technik zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung. Einzubeziehen ist auch der notwendige zusätzliche Energiebedarf für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und die CO<sub>2</sub>-Komprimierung für den Transport, der es erforderlich macht, auch den konventionellen Kraftwerksteil größer zu dimensionieren. Damit käme es auch in diesem Bereich mit der Einführung von CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien zu einem größeren Umsatz.

Zielländer für die Technologie der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung sind zunächst die Länder in der Europäischen Union, die bereits heute signifikante Anteile der Stromerzeugung mit fossilen Brennstoffen realisieren. Ein Vorreitermarkt für die Technologie – allerdings im Zusammenhang mit der Nutzung von Erdgas – könnte Norwegen

---

<sup>5</sup> Das Marktvolumen lässt sich aus dem erwartbaren Investitionsvolumen in Europa von üblicherweise mehreren GW pro Jahr und Technologiekosten in der Größenordnung von 1500 Euro/kW neu errichteter Leistung abschätzen.

werden. Die norwegische Stromwirtschaft ist zwar nicht dem ETS unterworfen, dennoch gibt es starke Bestrebungen in sehr naher Zukunft erdgasbefeuerte Kraftwerke mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung zu bauen, da in Norwegen die Nutzung der Wasserkraft aufgrund des hohen Bedarfswachstums immer weniger zur Deckung der Nachfrage ausreicht. Vor dem Hintergrund eines historisch weitgehend, von CO<sub>2</sub>-Emissionen freien Elektrizitätssystems, ist es in Norwegen politisch nicht durchsetzbar, heute Kraftwerke mit signifikanten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu errichten.<sup>6</sup>

Außerhalb Europas könnten Nicht-Annex I Staaten Zielländer für CCS-Technologien sein und unter diesen insbesondere jene mit einem bedeutenden Anteil an Kohle in der Stromerzeugung. Hierbei ist an erster Stelle China zu nennen, aber auch in Indien mit großen Braunkohlevorkommen könnte CCS-Technologie genutzt werden. Südafrika als Kohleexporteur mit eigener signifikanter Nutzung von Kohle in der Stromerzeugung könnte ebenfalls Zielland für CCS-Technologien sein. Unter den Annex I Staaten sind Kanada und Australien als mögliche Zielländer zu nennen. Inwieweit dort mittelfristig Anreize auf unternehmerischer Ebene geschaffen werden, CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Atmosphäre zu vermindern, ist allerdings derzeit noch offen. Anders als bei den Nicht-Annex I Staaten steht hier jedoch nicht die Möglichkeit die Investition in CCS-Technologien über den CDM abzuwickeln. Darüber hinaus sind natürlich auch die USA mögliches Zielland für CCS-Technologien, auch wenn die Einrichtung einer stringenten Klimapolitik auf Ebene des Bundes nicht absehbar ist. Allerdings könnten Regelungen auf der Ebene einzelner Bundesstaaten Anreize zur Emissionsminderung und damit zum Einsatz von CCS schaffen.

---

<sup>6</sup> Entsprechend wird auch die CO<sub>2</sub>-Steuer nur für Tätigkeiten auf dem auf dem norwegischen Kontinentalschelf erhoben, also für die Plattformen in der Nordsee, mit denen die Öl- und Gasförderung betrieben wird.

### **3 Leistungsfähigkeit der wichtigsten Länder in der betrachteten Techniklinie**

Aus der Entwicklung der Publikationen und der Fachkonferenzen lässt sich deutlich erkennen, dass die Entwicklung von CCS-Technologien mit einer deutlich wachsenden Dynamik voranschreitet (Radgen et al. 2006). Des Weiteren wurden CCS-relevante Patente analysiert. Wie in der Studie von Bradke et al (2007, S. 148 bis 176) dargelegt wurde, ist es bei den Technologien der CO<sub>2</sub>-Abscheidung nur schwer möglich, die Genese von Patenten exakt auf die Zielsetzung der Weiterentwicklung von CCS-Technologien zurückzuführen. Grundsätzlich müsste hierzu die Intention der Erfinder bekannt sein. Beispielsweise waren die ersten Entwicklungen zu IGCC-Kraftwerken aus der Motivation heraus durchgeführt worden, den Wirkungsgrad bei der Nutzung von Kohlen zu erhöhen. Mit dem Aufkommen der wissenschaftlichen Diskussion um CCS und den dann weiterreichenden Schritten zur konkreten Technologieentwicklung verlagerte sich die Motivation der Entwicklung von IGCC-Konzepten und -Technologien hin zur Bereitstellung von Pre-Combustion Capture Konzepten. Für die hier im Vordergrund stehende Analyse ist es allerdings zweitrangig, mit welchen Motiven die Technologieentwicklung erfolgte. Zentral ist die Frage, welche Leistungsfähigkeit in den einzelnen Ländern ausgemacht werden kann. Forschungseinrichtungen und Unternehmen tragen zu einem leistungsfähigen Innovationssystem bei, wenn innerhalb eines Technikfeldes eine hohe technische Kompetenz und Patentaktivität besteht, die zur Entwicklung von CCS-Technologien genutzt werden kann - unabhängig davon ob die Patente ursprünglich direkt auf die Entwicklung von CCS-Kraftwerken ausgerichtet waren. Letztlich kann ein so verstandenes technologisches Potenzial in einem breiteren Technikfeld als Indikator für die Leistungsfähigkeit eines Innovationssystems herangezogen werden.

Bei der Analyse von CCS-relevanten Patenten werden folgende drei Teilbereiche unterschieden:

- Ein enger Bereich von CCS-relevanten Patenten, der die in Abschnitt 1.2 beschriebenen Technologien umfasst, d. h. Pre- und Post-Combustion, Oxy-Fuel und IGCC-Konzepte,
- Gasturbinen, die insbesondere für eine Pre-Combustion Abscheidung eine komplementäre Technologie darstellen (technologische Herausforderungen im Bereich der Gasturbine zur Nutzung des energiereichen Brenngases), sowie
- der Kesselbau, der insbesondere für Oxy-Fuels einen komplementären Technologiebereich darstellt, da die Nutzung von reinem Sauerstoff Modifikationen im Bereich der Verbrennungsprozesse erfordert.

Für diese Bereiche ergibt sich ein kontinuierlicher Anstieg der Zahl von Patentanmeldungen, der insbesondere bei den Gasturbinen sehr stark ausgeprägt ist. Aus Abbildung 3-1 wird deutlich, dass sich in den untersuchten Bereichen der Kraftwerkstechnologien der Hauptteil der angemeldeten Patente auf wenige Länder verteilt. Besonders deutlich ist dies z. B. bei den Patenten, die dem Kesselbau zugeordnet werden, bei denen Japan einen Anteil von beinahe 50 % hält. Wie aus dem außerordentlich hohem relativem Patentanteil (RPA<sup>7</sup>) ersichtlich ist (vgl. Abb. 2-2), weist Japan hier eine extrem hohe Spezialisierung auf. Die meisten Patente im Bereich der Gasturbinen und der Pre-Combustion Capture werden in den USA angemeldet. Dieser Befund deckt sich mit der Erwartung, dass mit General Electric, dem führenden Hersteller von Gasturbinen, der seinen Sitz in den USA hat, sich auch eine hohe Patentaktivität in dessen Technologiebereichen zeigen müsste. Deutschland weist eine vergleichsweise ausgeglichene Struktur auf und belegt bei allen drei Feldern jeweils den zweiten Platz.

Für die USA lässt sich im eng abgegrenzten CCS-Patentbereich für die Summe der betrachteten Technologien eine führende Position bei den Patentanteilen feststellen. Dennoch deuten die Ergebnisse für die USA auf eine knapp signifikant negative Spezialisierung der Patentaktivität in diesem gesamten Feld hin. Im Bereich der Gasturbinen ist die Spezialisierung leicht positiv, deutlich negativ hingegen im Kesselbau. Deutschland weist eine leicht positive Spezialisierung bei den eng abgegrenzten CCS-Patenten auf, während Frankreich eine moderat positive Spezialisierung sowohl bei den eng abgegrenzten CCS-Patenten als auch den Gasturbinen zeigt. Eine sehr ausgeprägte positive Spezialisierung in beiden Bereichen weist auch die Schweiz auf. Allerdings muss bei beiden Ländern jeweils mitbedacht werden, dass sich diese Spezialisierungen jedoch auf deutlich geringere Anteile an den weltweiten Patenten stützt als bei den Ländern USA, Japan und Deutschland. Eine sehr deutliche Spezialisierung auf den eng abgegrenzten CCS-Bereich weist zwar auch Norwegen auf. Allerdings liegt hier der Patentanteil bei lediglich ca. 1 % und damit nochmals um Größenordnungen unter denen der Schweiz.

---

<sup>7</sup> Der RPA (Relativer Patent-Anteil oder Revealed Patent Advantage) gibt die Spezialisierung eines bestimmten Landes im spezifischen Kompetenzfeld in Relation zu den Patentanteilen des Landes bei allen Patenten wieder. Ist der Patentanteil für das Kompetenzfeld überdurchschnittlich hoch, dann nimmt der RPA einen positiven Wert an. Dies bedeutet, dass innerhalb des betreffenden Landes überproportional viel im Kompetenzfeld patentiert wird und daher überdurchschnittliche nationale Kenntnisse bestehen. Für jedes Land  $i$  und jedes Kompetenzfeld  $j$  wird der RPA nach folgender Formel berechnet:

$$RPA_{ij} = 100 \cdot \tanh \ln \left[ \left( p_{ij} / \sum_i p_{ij} \right) / \left( \sum_j p_{ij} / \sum_{ij} p_{ij} \right) \right]$$

Abbildung 3-1: Anteile von Ländern am Weltpatentaufkommen im Bereich CCS-relevanter Patente

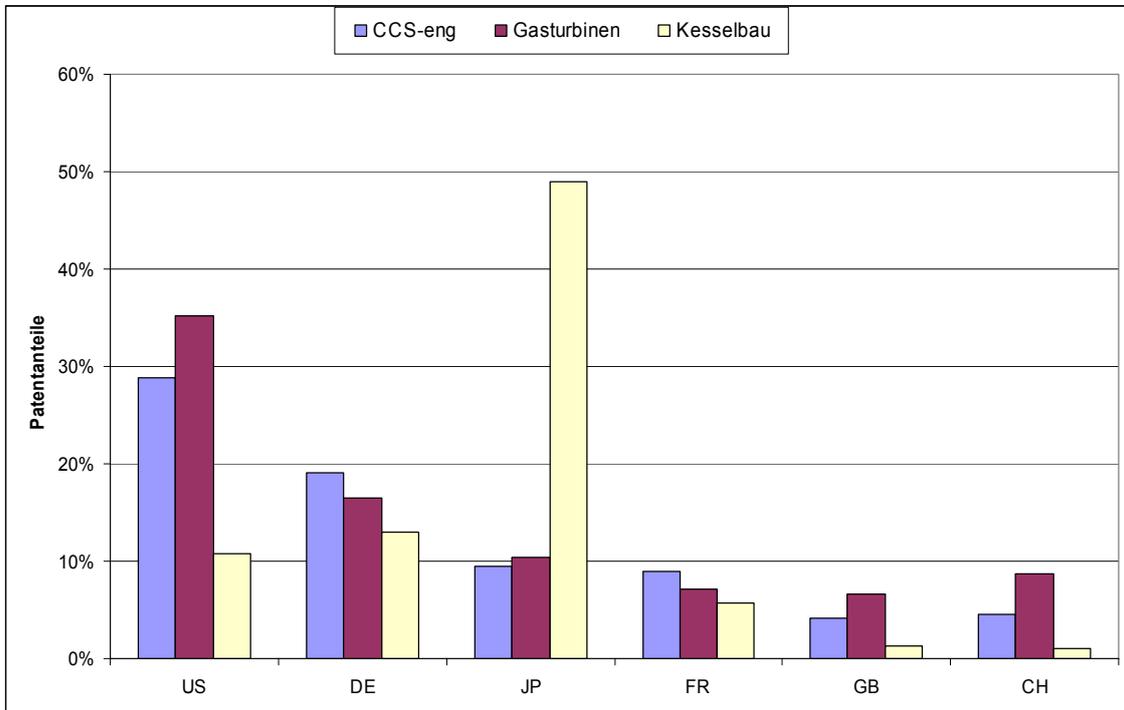
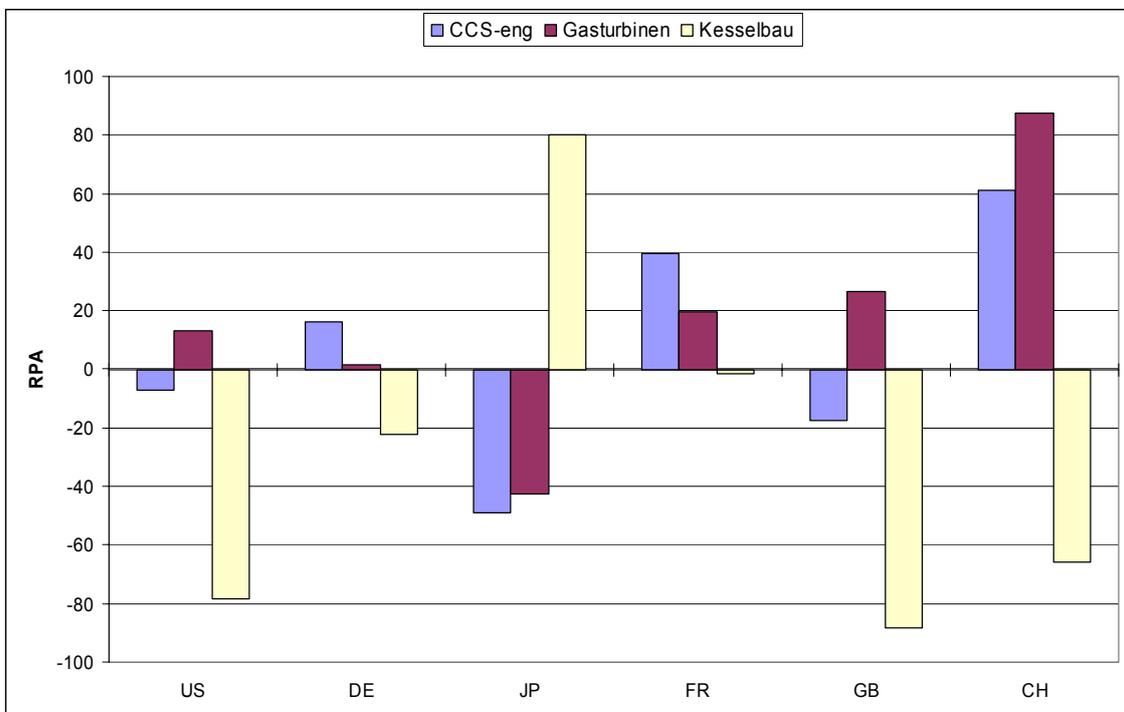


Abbildung 3-2: Relative Patentaktivität (RPA) im Bereich CCS-relevanter Patente



## **4 Innovationssystem und marktführende Unternehmen**

### **4.1 Überblick**

CCS-Technologien werden in den USA, in Japan und im westlichen Europa entwickelt. Darüber hinaus gibt es Aktivitäten in Australien, Kanada oder auch China, die jedoch in der Breite und Tiefe nicht mit den drei erstgenannten Ländern bzw. Regionen mithalten können. Die Vorteile des Innovationssystems in den USA werden in der starken Marktposition von dem in den USA ansässigen Unternehmen General Electric, dem weltweit größten Hersteller von Gasturbinen und Kraftwerkstechnologien insgesamt, gesehen. Ebenfalls eine wichtige Rolle spielt die FutureGen Initiative, die vom Präsidenten George W. Bush 2003 initiiert wurde. Im Rahmen dieser Initiative, die von der amerikanischen Regierung komplett finanziert wird, soll ein Kraftwerk zur Strom- und Wasserstoffherzeugung mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung realisiert und betrieben werden. Mit einem führenden Technologiehersteller einerseits und einem vergleichsweise weit fortgeschrittenen Demonstrationsprojekt andererseits haben die USA eine vorteilhafte Position in der weltweiten Technologieentwicklung für CCS und damit eine gute Ausgangsposition für die Besetzung zukünftiger Märkte.

Dem gegenüber steht die Europäische Union, die das Thema CO<sub>2</sub>-Abscheidung lange nicht mit hohem Nachdruck angegangen ist. Dennoch könnte die EU zum Lead-Markt werden, da hier mit dem ETS die notwendigen regulatorischen Rahmenbedingungen geschaffen wurden, um CCS einen wirtschaftlichen Nutzen zuzuordnen. Damit ist das ETS der große strategische Standortvorteil gegenüber anderen Weltregionen, das dazu beitragen könnte, dass in der Europäischen Union das aktivste Innovationssystem entstehen könnte. In Europa wurden mit dem ETS die Grundsteine für einen Markt gelegt, und das deutsche und das europäische Innovationssystem könnten von der Einbettung in diesen Markt stark profitieren.

### **4.2 Akteursanalyse**

Die wichtigsten Akteure im Technologiefeld CCS lassen sich in fünf Gruppen einteilen: Die Technologiehersteller, die Energieversorger als Nachfrager nach den CCS-Technologien, die Öl- und Gas-Unternehmen als potenzielle Nachfrager nach CO<sub>2</sub>, das Forschungssystem aus Universitäten und Einrichtungen der angewandten Forschung und das politische System mit Ministerien, EU-Behörden und Nichtregierungsorganisationen. (siehe Abbildung 4-1)



Den Herstellern von Kraftwerkstechnologien kommt eine Schlüsselrolle zu, da Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung eine architektonische Innovation darstellen. Damit sind letztlich die Hersteller von Kernkomponenten, die auch Gesamtanlagen schlüsselfertig anbieten, am besten in der Lage, die Integration der notwendigen Elemente zu bewerkstelligen.

Neben den Herstellern von Kraftwerkstechnologien sind einige relevante Hersteller von Technologiekomponenten in Deutschland ansässig, die für CCS-Kraftwerke eine Schlüsselrolle spielen. So sind z. B. mit ThyssenKrupp-Uhde und Lurgi Unternehmen aus dem chemischen Anlagenbau vertreten, deren Technologieportfolio Vergaser, Gasreinigungstechnologien und Gaswäscheverfahren umfasst. Das Unternehmen Lurgi allerdings wurde im Frühjahr 2007 vom französischen Konzern Air-Liquide übernommen, so dass möglicherweise ein Teil der Aktivitäten von Lurgi von Deutschland in andere Länder übertragen werden könnte. Mit Linde besteht ein weiteres Unternehmen mit einer Sparte im Anlagenbau, das im Bereich CCS eine wichtige Rolle spielen könnte und zwar sowohl im Bereich Synthesegaserzeugung und Aufbereitung als auch im Bereich der Sauerstofferzeugung für Oxy-Fuel-Verfahren. Die BASF entwickelt Wäscheverfahren weiter, mit denen die Abtrennung von CO<sub>2</sub> effizienter erreicht werden könnte. Für die BASF dürften die Marktchancen im Bereich CO<sub>2</sub>-Abscheidung in der Lizenzierung von Wäscheverfahren und in der Produktion und Lieferung von den notwendigen Chemikalien für den Betrieb solcher Wäschungen liegen. Auch für die MAN AG könnten im Bereich CCS Marktchancen für Ihre Kompressortechnologien bestehen, da ein erheblicher Kompressionsaufwand besteht, um das abgeschiedene CO<sub>2</sub> in den dichten, überkritischen Zustand zu befördern.

Die Hersteller von Kraftwerkstechnologien stehen in einem weltweiten internationalen Wettbewerb. An erster Stelle ist das Unternehmen General Electric zu nennen, das als das insgesamt stärkste unter den Technologieherstellern angesehen wird. General Electric ist insbesondere beim Pre-Combustion Verfahren sehr gut positioniert, da das Unternehmen nicht nur Turbinentechnologien anbietet, sondern auch die von Texaco übernommene Vergasertechnologie und damit alle Kernelemente für dieses Verfahren anbietet. Durch das FutureGen Projekt wird General Electric mit großer Wahrscheinlichkeit zudem in die vorteilhafte Position kommen, die Technologie für eines der ersten realisierten großen Kraftwerke mit CCS zu liefern - wenn nicht sogar für das erste überhaupt.

Als weiteres Unternehmen im internationalen Wettbewerb der Technologiehersteller spielt Mitsubishi Heavy Industries eine Rolle. Dieses Unternehmen entwickelt nicht nur eigene Gasturbinen für den Kraftwerksbereich, sondern ist auch in anderen für CCS relevanten Technikfeldern aktiv und hat beispielsweise ein eigenes Lösungsmittel für Aminwäschungen entwickelt, das bei CO<sub>2</sub>-Abscheidungsverfahren effizienter arbeiten soll.

Neben den vier großen Turbinen- und Komponentenherstellern, die eigene Technologien entwickeln, gibt es noch weitere Hersteller, die Turbinen in Lizenz fertigen. Hierzu gehören z. B. Ansaldo in Italien oder Hitachi Heavy Industries in Japan, die beide Turbinen von General Electric in Lizenz herstellen. Solche Unternehmen treten zwar nicht als Wettbewerber im Bereich der Innovation und Entwicklung von CCS-Kraftwerken auf, können jedoch in der Phase der Marktreife Teile des Umsatzes an sich ziehen und damit das Marktvolumen für die stärker innovierenden Unternehmen schmälern.

Im Bereich des Anlagenbaus sind in Europa und in den USA Unternehmen wie Air Liquide und Praxair im Feld der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung aktiv und stellen damit Wettbewerber zu den in Deutschland ansässigen Unternehmen dar.

#### **4.2.2 Energieversorger**

In Deutschland spielen bei den Kraftwerkstechnologien nicht nur die Technologiehersteller, sondern auch die Anwender – die Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVUs) – eine wichtige Rolle im Innovationssystem. In der Vergangenheit haben die EVUs in Deutschland eng mit den heimischen Herstellern bei der Entwicklung neuer Technologien kooperiert. Im Gegensatz zu EVUs in anderen Weltregionen wie z. B. in den USA, gab es bei den deutschen EVUs stets Bestrebungen, eine technologische Vorreiterrolle zu übernehmen. Aus diesem Selbstverständnis heraus wurden Pilotanlagen und Demonstrationsanlagen von Energieversorgern in Deutschland betrieben. Unter den Bedingungen der Liberalisierung und einer lange Zeit abgelehnten Klimapolitik hatten die deutschen EVUs dieses Selbstverständnis, was die Entwicklung von CCS-Technologien anging, eine geraume Zeit nicht im selben Maße aufrechterhalten. Mit der Einführung des ETS und der stärkeren „Verfestigung“ der durch die Klimapolitik geschaffenen Rahmenbedingungen versuchen die großen EVUs in Deutschland wieder verstärkt in diesem Bereich der Technikentwicklung Einfluss zu nehmen und wieder in eine Vorreiterrolle zu gelangen.

In Deutschland spielen mit den Unternehmen RWE und E.ON, Vattenfall Europe und EnBW vier Unternehmen auf überregionaler Ebene eine Rolle. Daneben gibt es die Stadtwerke als lokale Energieversorger, die jedoch jeweils allein kaum ein Großkraftwerk errichten und betreiben würden. Allerdings könnte ein Großkraftwerk mit CCS als Gemeinschaftskraftwerk auch von einer Gruppe von Stadtwerken errichtet werden. Dennoch spielen auf Seiten der EVUs die großen Vier die absolut wichtigste Rolle im nationalen Innovationssystem der CCS-Entwicklung. RWE hat durch seinen Vorstand angekündigt, bis zum Jahr 2014 ein IGCC-Kraftwerk mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung in Betrieb zu nehmen. Vattenfall ist dabei, eine Pilotanlage für ein Kraftwerk mit Oxy-Fuel-Abscheidung mit einer Leistung von 30 MW zu errichten, die 2008 in

Betrieb gehen soll. Diese beiden Unternehmen befinden sich damit in einer Vorreiterrolle. Dies trifft insbesondere auf Vattenfall zu, da das Unternehmen mit der Pilotanlage am Standort Schwarze Pumpe die erste Anlage im industriellen Maßstab bauen wird. Die derzeit führende Rolle der beiden Unternehmen in Deutschland liegt mit Sicherheit z. T. auch darin begründet, dass diese beiden Zugriff auf eigene Braunkohleressourcen haben, deren Nutzbarkeit mittelfristig davon abhängen wird ob es klimaverträgliche Technologien hierzu geben wird.

E.ON ist in Deutschland bisher nicht mit eigenen großen Projekten aktiv, ebenso wie EnBW. Dennoch gilt insbesondere für die beiden großen EVUs, RWE und E.ON, dass sie (bzw. ihre Vorläuferunternehmen) in enger Kooperation mit den deutschen, bzw. europäischen Technologieherstellern ein fruchtbares Umfeld für die Entwicklung und Erprobung neuer Technologien geschaffen haben.

In anderen EU-Mitgliedsländern haben sich die EVUs noch nicht so deutlich positioniert wie in Deutschland. Allerdings sind auch dort schon nationale Aktivitäten zu beobachten, in denen EVUs eine bedeutende Rolle spielen. So ist ENDESA in Spanien in einem großen Forschungs- und Entwicklungsprogramm beteiligt. ENEL in Italien ist zumindest in europäischen F+E-Projekten beteiligt, jedoch nicht mit eigenen Projektankündigungen an die Öffentlichkeit getreten. Dies könnte darin begründet liegen, dass die Nutzung von Kohle zur Stromerzeugung in Italien in der Öffentlichkeit stark umstritten ist. In Frankreich mit EdF als allein dominierendem EVU würde die Konzentration von Forschung und Entwicklung auf CCS einen grundsätzlichen Paradigmenwechsel bedeuten. Eine so geartete Abkehr von der alleinigen Dominanz der Kernkraftnutzung ist noch nicht abzusehen.

### **4.2.3 Öl- und Gasindustrie**

Die Öl- und Gasindustrie nimmt in den Innovationssystemen für CCS-Technologien eine Sonderrolle ein. Zunächst ist anzumerken, dass in Deutschland keiner der sogenannten „Oil and Gas Majors“ ansässig ist, also jener großen Öl- und Gasunternehmen, die den internationalen privatwirtschaftlichen Markt dominieren. Allerdings sind Tochterunternehmen dieser Marktführer auch in Deutschland aktiv. Darüber hinaus strahlen die internationalen Aktivitäten der großen Öl- und Gasfirmen auch nach Deutschland hinein.

In Europa spielen vor allem die Konzerne BP, Shell, Statoil und Total eine wichtige Rolle im Innovationssystem um CCS. Dies gilt nicht zuletzt für die ersten drei der genannten Konzerne, die die Aktivitäten der Öl- und Gasförderung in der Nordsee dominieren. Dort haben einige Ölfelder bereits den Mid-Depletion Point überschritten. Damit

wird ausgedrückt, dass ungefähr die Hälfte des extrahierbaren Öls gefördert wurde und die Förderrate in den Feldern zurückgeht. Mit zusätzlichen Maßnahmen, wie dem Einpressen von Wasser oder aber von CO<sub>2</sub>, kann die Fördermenge erhöht werden. Das Einpressen von CO<sub>2</sub> in Ölfelder wird als „Enhanced Oil Recovery“ bezeichnet und stellt für die Unternehmen, die Ölfelder in der Nordsee betreiben, eine wichtige Option dar, ihre Ressourcenbasis besser auszunutzen.

Den Öl- und Gaskonzernen steht für die Nutzung dieser Option jedoch nur ein begrenztes Zeitfenster zur Verfügung. Der Betrieb von Förderanlagen – insbesondere von Offshore-Anlagen in der Nordsee – bringt hohe Fixkosten mit sich, die nur dann tragbar sind, wenn der Wert des durch die Anlagen produzierten Öls diese Fixkosten deckt. Bei einer sinkenden Fördermenge verliert ein Feld ab einem gewissen Zeitpunkt die Wirtschaftlichkeit. In diesem Fall geben die Betreiber das Feld üblicherweise auf und sind dann verpflichtet alle Anlagen zurückzubauen. Eine Wiederaufnahme der Förderung nach dem Rückbau ist nicht wirtschaftlich, selbst unter Zuhilfenahme von Maßnahmen wie EOR, da sich die Neuerrichtung von Förderanlagen und Förderbohrungen für die vergleichsweise gering verbliebene Gesamtmenge in einem solchen Feld nicht lohnt. Somit sind die Öl- und Gaskonzerne daran interessiert, große Mengen an CO<sub>2</sub> so rechtzeitig beschaffen zu können, um noch vor der Außerbetriebnahme von wichtigen Feldern mit konventioneller Förderung, den wirtschaftlichen Betrieb durch EOR-Maßnahmen zu verlängern. Das so motivierte Interesse, CO<sub>2</sub> für EOR-Maßnahmen bereitgestellt zu bekommen, ist ein Grund für die Öl- und Gasfirmen, aktiv im Innovationssystem für CCS mitzuwirken.

Ein weiterer Grund für das Interesse von Öl- und Gasfirmen, sind die Aktivitäten des Transports und der Speicherung von CO<sub>2</sub>, die sich aus der Anwendung von CCS-Technologien ergeben. Der Transport von Gasen sowie der gesamte geotechnische Komplex um die Abteufung von Bohrungen, deren Ausbau und der Betrieb von Förder- bzw. Verpressungsbohrungen liegt im Kerngeschäft von Öl- und Gaskonzernen. Aus diesem Grund wird CCS von den Öl- und Gaskonzernen auch unabhängig von EOR-Unternehmungen als ein zukünftiges Geschäftsfeld gesehen und ist Anlass für sie, sich in Forschungs- und Entwicklungsprojekten zu CCS einzubringen.

Unter den großen Öl- und Gaskonzernen kommt dabei dem Unternehmen Statoil aus Norwegen eine besondere Bedeutung zu. Diese Bedeutung begründet sich aus mehreren Ursachen; zunächst betreibt Statoil im Sleipner Gasfeld das am längsten betriebene CO<sub>2</sub>-Speicherprojekt im industriellen Maßstab, daneben entwickelt Statoil im Snøhvit-Projekt bei Hammerfest ein weiteres Gasfeld, wo mitgefördertes CO<sub>2</sub> wieder verpresst werden soll. Über die klassischen Öl- und Gasunternehmungen hinaus ist Statoil mit der führenden Rolle im „Mongstad-Projekt“ und im „Tjeldbergodden-Projekt“

auch dabei, die Errichtung und den Betrieb von CCS-Kraftwerken selbst zu erkunden. Im Rahmen des Tjeldbergodden Projektes soll ein erdgasbefeuertes Kraftwerk mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung errichtet werden. Das in der Anlage abgeschiedene CO<sub>2</sub> soll in den Ölfeldern Troll und Heidrun für EOR-Maßnahmen genutzt werden. In enger Kooperation mit der Technischen Universität Norwegens in Trondheim und der Forschungsgesellschaft Sintef betreibt Statoil in vielen Bereichen der architektonischen Innovation CCS Forschung oder initiiert und finanziert diese. Unterstützt werden die Aktivitäten in Norwegen insbesondere durch die Stiftung Gassnova, die von der öffentlichen Hand mit beträchtlichen Mitteln aus den Abgaben der Öl- und Gaswirtschaft ausgestattet wurde. Die öffentliche Hand wiederum ist stark an einer Entwicklung der CCS-Technologien interessiert, da in Norwegen zusätzliche Kraftwerke benötigt werden und konventionelle fossil befeuerte Kraftwerke ohne CO<sub>2</sub>-Abscheidung politisch kaum durchsetzbar wären. Insgesamt hat sich so in Norwegen ein aktives Innovationssystem für CCS-Technologien entwickelt, das von der Nachfrageseite nach den Technologien und der akademischen und angewandten Forschung dominiert wird. Die Technologiehersteller selbst sind in Norwegen nicht vertreten.

Der Konzern BP mit Hauptsitz in Großbritannien ist ebenfalls stark an der Entwicklung von CCS-Technologien interessiert und betreibt als hauptverantwortlicher Partner in einem Konsortium das In-Salah Projekt in Algerien, wo in einem Erdgasfeld mitgefördertes CO<sub>2</sub> wieder in die gasführende Schicht verpresst wird. Daneben erkundet BP eine Reihe von Demonstrationsprojekten, bei denen CCS-Kraftwerke errichtet werden sollen und das abgeschiedene CO<sub>2</sub> für EOR-Unternehmungen genutzt werden soll. Eines dieser untersuchten Projekte würde in Peterhead in Schottland angesiedelt werden und Erdgas zur Stromerzeugung nutzen, ein anderes würde in Carsson in Kalifornien liegen und sollte mit Petrolkoks aus Raffinerien betrieben werden. BP als sehr stark international ausgerichteter Konzern ist in einige nationale Innovationssysteme eingebunden. In Großbritannien profitiert BP von einer vergleichsweise weit fortgeschrittenen Entwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen. So hat Großbritannien die Einbeziehung von CCS-Anlagen in den Emissionshandel in seinem nationalen Allokationsplan bereits angekündigt.

#### **4.2.4 Forschungssystem**

An dem Innovationssystem in Deutschland sind neben den zukünftigen Anwendern der Technologie und den Herstellern auch die Akteure aus der universitären Forschung und aus der angewandten Forschung beteiligt, die in Kooperationsprojekten und Verbundprojekten mit den Technologieherstellern und den EVUs wichtige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten leisten. Eine große Rolle spielt dabei die Vernetzung der Akteure aus den Forschungseinrichtungen, aus den Technologieherstellern und aus

den EVUs für die öffentlich geförderte Projekte und Forschungsprogramme eine wichtige Plattform darstellten. Ein Beispiel hierfür ist das COORETEC Programm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, dessen Beirat eine wichtige Plattform für die Formulierung von Forschungszielen und für den Austausch zwischen den Akteuren verschiedener Einrichtungen ist. Insgesamt ist das Forschungssystem in Deutschland mit den technischen Universitäten, den Forschungseinrichtungen wie Forschungszentrum Jülich, DLR und Geoforschungszentrum Potsdam gut aufgestellt, um im Innovationssystem eine tragende Rolle zu spielen. Die Akteure sind im nationalen Rahmen auch mit den Herstellern und den Anwendern gut vernetzt. Allerdings ist z. T. bei den Akteuren der Forschung eine geringe Bereitschaft erkennbar gewesen, sich in der internationalen Forschung zu vernetzen. Dies könnte sich auch im Hinblick des eher späten Beginns der intensiven Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der CCS-Technologien nachteilig auswirken.

Das Forschungssystem in den USA profitiert von den großen finanziellen Mitteln, die von der öffentlichen Hand für die Forschung im Bereich CCS-Technologien bereitgestellt werden. Eine wichtige Rolle spielt dabei das dem Department of Energy zugeordnete National Energy Technology Laboratory (NETL), über dessen Forschungs- und Entwicklungsprogramme wichtige Arbeiten im Bereich CCS-Technologien finanziert und koordiniert werden. Des Weiteren werden über das Electric Power Research Institute (EPRI) als Gemeinschaftseinrichtung der Kraftwerksbetreiber bedeutende Forschungsmittel bereitgestellt. Auf der Seite der Forschungseinrichtungen sind in den USA viele Universitäten, darunter auch weltweit führende wie das Massachusetts Institute of Technology oder die Princeton University, im Bereich der Forschung zu CCS tätig. Mit dem führenden Technologiehersteller General Electric ist zudem die Vernetzung zur industriellen Forschung innerhalb der USA sehr gut möglich.

Das norwegische Forschungssystem ist gegenüber dem deutschen oder dem der USA deutlich kleiner. Mit seiner starken Ausrichtung auf die Bedürfnisse der wichtigen Industrien des Landes, insbesondere der Öl- und Gasindustrie, ist es jedoch im Bereich CCS als sehr leistungsfähig einzuschätzen.

## 5 Fazit: SWOT-Analyse

Grundsätzlich ist bei der Bewertung von CCS-Technologien anzumerken, dass ihrer Nutzung ein breiter gesellschaftlicher Diskussionsprozess vorangehen sollte, da sie als risikobehaftet eingeschätzt werden könnten und aufgrund der Schaffung von großen Lagerstätten an nicht mehr genutzten Stoffen sowie aufgrund des durch sie verursachten höheren Ressourcenbedarfs im Sinne von Nachhaltigkeitsgesichtspunkten einer kritischen Diskussion ausgesetzt sein könnten. Klimapolitische Strategien, die die Nutzung von CCS beinhalten stehen damit vor der Herausforderung, eine Akzeptanz dieser Technologien in der Öffentlichkeit gewährleisten zu müssen.

Eine weitere Herausforderung für eine Strategie der Entwicklung und Nutzung von CCS ist die Realisierung der notwendigen Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen bei den Technologien, um mittel- bis langfristig mit dann ebenfalls weiter verbesserten Konkurrenztechnologien im Wettbewerb bestehen zu können. Auf der Seite der Speicherung besteht darüber hinaus die große Herausforderung, die langfristige Sicherheit von Speichern garantieren zu können.

Den genannten Herausforderungen stehen jedoch auch große Chancen und Stärken gegenüber. Europa, und dort insbesondere Deutschland, weisen ein im weltweiten Maßstab leistungsfähiges Innovationssystem auf, das von den Anreizwirkungen des Emissionshandelssystems profitiert. An dieser Stelle besteht jedoch Handlungsbedarf für die Politik, da der Emissionshandel als junger Markt unter den nur wenig in die Zukunft reichenden Festlegungen der Rahmenbedingungen leidet. Die Setzung von Zielen für die Zeit nach 2012 und damit die Garantie des Fortbestandes des Emissionshandels können hier zu einem stärkeren Vertrauen in das Anreizsystem beitragen.

Das große Minderungspotenzial von CCS-Technologien macht ihre positive Bedeutung innerhalb klimapolitischer Strategien aus. Zudem könnte in Verbindung mit tertiären Ölfördermaßnahmen (EOR) die Ressourcenversorgung der EU aus heimischen Quellen zumindest ein Stück weit verbessert werden.

Die in der Entwicklung von Großkraftwerkstechnologien übliche schrittweise Skalierung von Technologien, bis schließlich die kommerzielle Anlagengrößen erreicht wird, führt dazu, dass die Entwicklung von CCS-Technologien zur Marktreife noch einige Jahre Zeit benötigen wird. Bis zum Jahr 2020 könnte unter günstigen Umständen die Technologie in mehreren Demonstrationsanlagen kommerziellen Maßstabs erprobt worden sein und damit von den Akteuren dann als marktreif bewertet werden. Zur Erreichung dieses Ziels ist jedoch ein Zusammenspiel aus dem beschriebenen marktlichen Anreiz mit einer gezielten Technologieförderpolitik notwendig, die es den Unternehmen ermöglichen, einen Teil der Risiken abzugeben, die in der Technologieentwicklung lie-

gen. Dabei sollte jedoch darauf geachtet werden, dass keine weitestgehende oder vollständige Risikoabwälzung stattfindet, da sonst das Eigeninteresse der Hersteller und Betreiber nicht gewährleistet ist.

Tabelle 5-1: SWOT-Analyse für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der EU und Deutschlands in der Techniklinie CCS-Kraftwerke

Stärken	Chancen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Führende Technologiehersteller sind in Europa vorhanden</li> <li>• Kraftwerksbetreiber mit grundsätzlichem Interesse an Technologieführerschaft</li> <li>• Starker ökonomischer Anreiz durch Emissionshandel</li> <li>• Dynamische Innovationssysteme in Europa (z. B. Deutschland, Norwegen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundsätzlich enorm hohes Potenzial an Emissionsminderungen durch CCS.</li> <li>• Öl- und Gasindustrie als Motor der CCS-Entwicklung (BP, Statoil)</li> <li>• Steigende technologische Dynamik mit Festigung der Rahmenbedingungen des Emissionshandels</li> <li>• Nutzung von EOR-Potenzialen in der Nordsee</li> </ul>
Schwächen	Herausforderungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Später Einstieg Deutschlands in F+E im Bereich CCS-Technologien</li> <li>• Unsicherheit über Fortentwicklung des Emissionshandels</li> <li>• Mehrbedarf an Ressourcen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realisierung der notwendigen Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen bei CCS-Technologien unsicher.</li> <li>• Konkurrierende Technologien könnten sich zukünftig als effizienter erweisen (insbesondere erneuerbare Energien)</li> <li>• Speichersicherheit ist weiterhin unklar</li> <li>• Öffentliche Akzeptanz ungewiss</li> <li>• Wettbewerb durch außereuropäische Technologiehersteller (GE, Mitsubishi)</li> </ul>

## Literatur

- Blohm, M., Erdmenger C., Ginzky G., Marty, M., Beckers R., Briem S., Clausen, U., Lohse, C., Rechenberg, J., Schäfer L. und Sternkopf, R. (2006): Technische Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> - nur eine Übergangslösung. Climate Change 04/06. Berlin: Umweltbundesamt.
- Duckat, R., M. Treber, Ch. Bals and G. Kier. (2004). CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -lagerung als Beitrag zum Klimaschutz? Ergebnisse des 'IPCC Workshop on Carbon Dioxide Capture and Storage' vom November 2002 und Bewertung durch Germanwatch. Diskussionspapier. Bonn: Germanwatch e.V.  
<http://www.germanwatch.org/rio/ccs04.htm>
- Europäische Kommission (2004): European CO<sub>2</sub> Capture and Storage Projects - Project Synopses. Publikation EUR 21240. Heruntergeladen von [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/co2capt\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/co2capt_en.pdf)
- Fischedick, M., Esken, A., Pastowski, A., Schüwer, D., Supersberger, N., Nitsch, J., Viebahn, P., Bandi, A., Zuberbühler, U. und O. Edenhofer (2007): RECCS – Strukturell-ökonomisch-ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien mit Carbon Capture and Storage. Abschlussbericht eines Forschungsvorhabens im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH; DLR - Institut für Technische Thermodynamik; Zentrum für Sonnenergie und Wasserstoff-Forschung und Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Wuppertal, Stuttgart, Potsdam.
- IEA (2005): CO<sub>2</sub> Emissions From Fuel Combustion 1971-2003. Internationale Energie Agentur. Paris 2005.
- IPCC (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
- Radgen, P., Cremer, C., Warkentin, S., Gerling, P., May, F., Knopf, S., (2006): Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung. UBA-Forschungsbericht 203 41 110. UBA-FB 000938.

In der Reihe „Umwelt, Innovation, Beschäftigung“ sind bisher die folgenden Bände erschienen:

- 01/07      Wirtschaftsfaktor Umweltschutz: Vertiefende Analyse zu Umweltschutz und Innovation
- 02/07      Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen
- 03/07      Zukunftsmarkt Solarthermische Stromerzeugung
- 04/07      Zukunftsmarkt CO<sub>2</sub>-Abscheidung und –Speicherung
- 05/07      Zukunftsmarkt Elektrische Energiespeicherung
- 06/07      Zukunftsmarkt Solares Kühlen
- 07/07      Zukunftsmarkt Energieeffiziente Rechenzentren
- 08/07      Zukunftsmarkt Biokunststoffe
- 09/07      Zukunftsmarkt Synthetische Biokraftstoffe
- 10/07      Zukunftsmarkt Hybride Antriebstechnik
- 11/07      Zukunftsmarkt Dezentrale Wasseraufbereitung und Regenwassermanagement
- 12/07      Zukunftsmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie
- 13/07      Zukunftsmarkt Stofferkennung und -trennung

Alle Veröffentlichungen können kostenlos auf [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de) heruntergeladen werden.