Kurz zum Klima: »Carbon Capture and Storage« – was kostet die Emissionsvermeidung?

Christian Leßmann* und Arne Steinkraus**

Die fossilen Energieträger Erdgas und Kohle tragen einen großen Anteil zur weltweiten Stromerzeugung bei. Wie Abbildung 1 verdeutlicht, ist ein rapider Technologiewechsel hin zu erneuerbaren Energiequellen derzeit nicht in Sicht. Dies ist insofern problematisch, da die Verbrennung von Kohlenstoffverbindungen unweigerlich zur Emission von Kohlendioxid (CO_2) führt und damit zum Voranschreiten des Klimawandels beiträgt. Eine Möglichkeit zur Reduktion der CO_2-Emission besteht in dem Einsatz der Carbon-Capture-and-Storage-(CCS-)Technologie. Bislang wurden die Kosten dieser Technologie jedoch nur unzureichend erfasst. Existierende Studien konzentrieren sich nur auf Teile der Wertschöpfungskette (vgl. Rao und Rubin 2002; Stobbs und Clark 2005). Im vorliegenden Beitrag stellen wir die Ergebnisse einer Studie der Emissionsvermeidungskosten entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Stromproduktion vor. Die Ergebnisse dieses Cradle-to-Grave-Ansatzes vergleichen wir mit den Vermeidungskosten alternativer klimafreundlicher Technologien der Energieerzeugung, insbesondere mit der Photovoltaik und der Windkraft. Dabei zeigt sich, dass die CO_2-Vermeidungskosten bei der CCS-Technologie deutlich niedriger sind als bei der Photovoltaik, jedoch höher als bei der Windkraft. Da die Versorgungssicherheit mit Energie jedoch gerade bei der Nutzung fossiler Energieträger sehr hoch ist, kann der Einsatz von CCS-Technologie eine wichtige Rolle bei der Vermeidung von Treibhausgasen spielen.

Dieser Beitrag gliedert sich wie folgt: Wir stellen zunächst die CCS-Technologie vor und beschreiben den Cradle-to-Grave-Ansatz zur Bestimmung der CO_2-Vermeidungskosten. Im Anschluss daran vergleichen wir die Berechnungsergebnisse mit alternativen erneuerbaren Energiequellen. Abschließend erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse im Hinblick auf eine ökonomisch sinnvolle Implementierung.

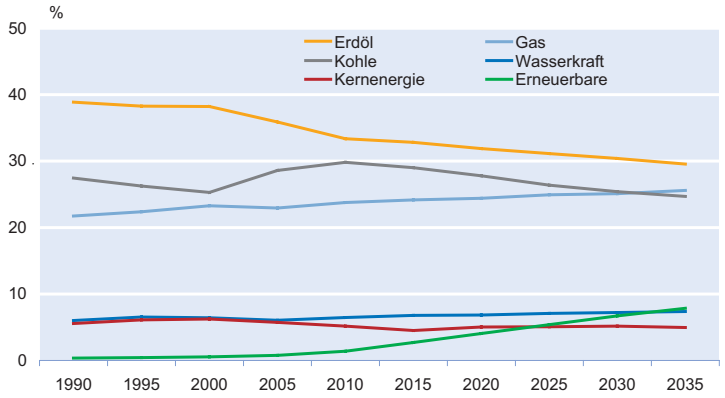
Carbon-Capture-and-Storage-Technologie

Das Verfahren des CCS setzt sich aus drei einzelnen Prozessstufen zusammen, deren Zusammenwirken eine Grundvoraussetzung für eine effektive Kohlendioxidmitigation ist. Diese Stufen umfassen die Abscheidung des Kohlendioxids, den Transport und die Speicherung desselben. Derzeit stehen insgesamt drei verschiedene Varianten zur Abscheidung des Kohlendioxids zur Verfügung, die sich hinsichtlich des Zeitpunkts der Kohlendioxidabscheidung unterscheiden. Die sogenannte Post-Combustion-Abscheidung nimmt hierbei eine besondere Rolle ein, da diese die einzige End-of-pipe-Variante ist und damit das Nachrüsten bestehender Kraftwerke ermöglicht. Als besonders effiziente Methode unter den Post-Combustion-Verfahren gilt die Abscheidung mittels Aminlösungen. Hierbei wird das Abgas des Kraftwerks chemisch mittels einer Monoethanolaminlösung ausgewaschen. Das Kohlendioxid wird dabei von dem Fluid absorbiert und kann anschließend gezielt gelöst und somit vom übrigen Abgas getrennt werden (vgl. Gibbins und Chalmers 2008; IPCC 2005; Stephenson 2013).

Nach der Abscheidung des Kohlendioxids muss dieses zunächst verdichtet werden, bevor es zur Speicherstätte verbracht werden kann. Zum Transport des komprimierten Mediums eignen sich insbesondere Pipelines und Tankschiffe, wobei Rahmenbedingungen wie Standorte der Kraftwerke und Speicherstätten sowie Entfernungen und Sicherheitsanforderungen eine entscheidende Rolle für die Transportkosten und damit zusätzlich entstehenden CO_2-Emissionen haben (vgl. IPCC 2005).

Die Speicherung des abgeschiedenen Kohlendioxids stellt die größte Herausforderung im Prozess des CCS dar. Diese resultiert aus der Vielzahl an möglichen Speicherstätten, der damit einhergehenden Unsicherheit bezüglich der Speicherstättenintegrität, den mit einem Austritt des Kohlendioxids verbundenen Gefahren sowie dem erforderlichen Monitoring des Speichers. Als geeignete Speicherstätten für die langzeitstabile Sequestrierung des Kohlendioxids werden häufig geologische Formationen sowie die Wassersäule der Meere genannt. Letztere hat jedoch durch die chemische Gleichgewichtsreaktion zwischen Wasser und Kohlendioxid und der damit einhergehenden Versauerung des Meeres erhebliche Auswirkungen auf die natürliche Umwelt. Daher ist diese Speicheralternative in der Europäischen Union verboten (vgl. EU 2009 Art. 2). Geologische

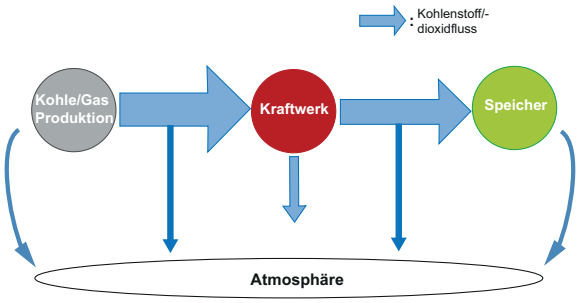
Abb. 1
Anteile der Energieträger am globalen Primärenergieverbrauch



Quelle: BP Energy Outlook 2016; BP Statistical Review of World Energy 2015.

* Prof. Dr. Christian Leßmann leitet das Institut für Volkswirtschaftslehre an der Technischen Universität Braunschweig und ist Forschungsprofessor beim ifo Institut. Vom 2004 bis 2007 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Niederlassung Dresden des ifo Instituts.
** Arne Steinkraus ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Volkswirtschaftslehre an der Technischen Universität Braunschweig.

Abb. 2
Emissionen entlang der Stromproduktionskette



Quelle: Steinkraus 2015

Formationen aus porösem Gestein hingegen bieten diverse Schutzfunktionen und scheinen infolgedessen für eine Sequestrierung geeignet zu sein. Ähnlich wie bei den Dichteanforderungen beim Transport muss jedoch auch die Lagerstätte ein gewisses Druckniveau garantieren können, um das Kohlendioxid in komprimierter Form speichern zu können. Deshalb sollte die Lagerstätte eine Tiefe von über 800 m aufweisen, da der statische Druck in den Gesteinsporen dort ausreichend groß ist, um eine hohe Speicherkapazität zu gewährleisten (vgl. Stephenson 2013). Aufgrund dieser Anforderungen und diverser weiterer Einflussfaktoren variieren die Schätzungen des global verfügbaren Speicherpotenzials zwischen 1 000 und über 10 000 Gigatonnen CO_2 (vgl. IPCC 2005; Szulczewski et al. 2012). Nichtsdestotrotz ist festzuhalten, dass selbst die konservativsten Schätzungen in einer Größenordnung liegen, die die Speicherung sämtlicher globaler Kraftwerksemissionen über mehrere Jahrzehnte erlauben.

Cradle-to-Grave-Betrachtung

Fraglich ist jedoch, inwiefern es sich bei der CCS-Technologie um ein gegenüber alternativen Energiequellen effizientes Verfahren zu Verminderung von Kohlendioxidemissionen handelt. Bisherige Studien können diese Frage nur unzureichend beantworten, da sie sich lediglich auf die Kosten und Emissionen einzelner Prozessstufen fokussieren und damit ausschließlich auf der Perspektive eines Kraftwerksbetreibers beruhen. Es erfolgt weder eine integrative Betrachtung sämtlicher zusätzlicher Kosten, noch finden die tatsächlichen Nettoemissionen, die entlang der Stromproduktionskette entstehen, Eingang in die Berechnungen (vgl. Abb. 2). Folglich sind häufig zitierte Schätzungen von Kohlendioxidvermeidungskosten von teilweise unter 40 Euro pro Tonne CO_2 mit Vorsicht zu betrachten (vgl. Stobbs und Clark 2005; IEA GHG 2004).

Um die Frage nach der Effizienz dieser Technologie beantworten zu können, ist es daher zwingend erforderlich, alle durch das CCS verursachten Veränderungen der Kosten und Emissionsgrößen entlang der Wertschöpfungskette der Stromproduktion zu erfassen. Das heißt, dass neben dem zusätzlichen Energiebedarf der Kraftwerke, der zur Kohlendioxidabscheidung notwendig ist, ebenfalls die hierdurch entstehenden vermehrten Emissionen bei der Förderung und dem Transport der Energieträger zu berücksichtigen sind. Des Weiteren gilt es, den zusätzlichen Energiebedarf beim Abtransport des Kohlendioxids in die Gesamtbilanz einzukalkulieren und etwaige Verluste während der Speicherung zu beachten.

Zur Erzielung verlässlicher Schätzungen der Kohlendioxidvermeidungskosten wurde infolgedessen die CCS-Nachrüstung repräsentativer Kohle- und Gaskraftwerke, wie sie im Bericht des IEA GHG 2011 zu finden sind, analysiert. Kosten und Emissionsdaten der Inputwege der Brennstoffe und des Outputweges des abgeschiedenen Kohlendioxids wurden verschiedenen wissenschaftlichen Artikeln entnommen (vgl. Anderson und Newell 2004; IPCC 2005; Koornneef et al. 2008; Weber und Clavin 2005). Aufgrund der dynamischen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Variablen des Kraftwerksmodells sowie der Erweiterung um die CCS-Technologie wurde ein System-Dynamics-Simulationsmodell erstellt, auf Basis dessen sich die Cradle-to-Grave-Kosten im intertemporalen Zusammenhang ermitteln lassen. Da sowohl für die Kraftwerksdaten als auch für die Kosten und Emissionen der Brennstoffinputwege, des Kohlendioxidabtransports und der -speicherung repräsentative deterministische Werte angenommen wurden, erfolgte im Anschluss eine Sensitivitätsanalyse der Vermeidungskosten auf Veränderungen der Inputparameter. Details zu den Berechnungen finden sich in Steinkraus (2015).

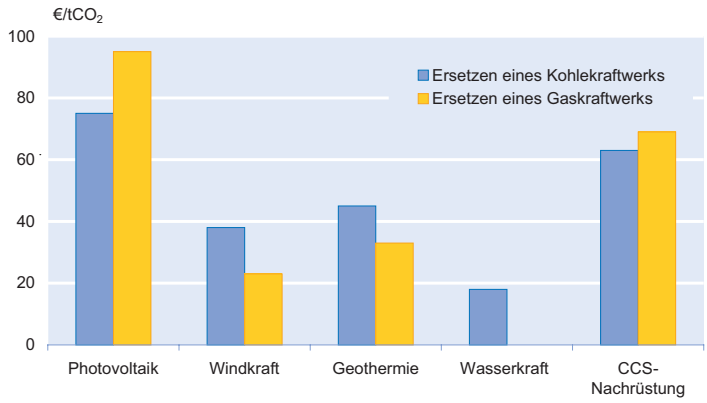
Das Ergebnis ist, dass die Kohlendioxidvermeidungskosten bei einer CCS-Nachrüstung von Kohlekraftwerken in einem Bereich von 65–70 Euro pro Tonne CO_2 und im Fall von Gaskraftwerken bei 70–85 Euro pro Tonne CO_2 liegen. Ein Vergleich dieser Werte mit den Ergebnissen bisherigen Schätzungen zeigt, dass eine integrative Betrachtung des gesamten Produktionsprozesses aus volkswirtschaftlicher Perspektive unumgänglich ist. Bisherige Schätzungen haben deutlich zu niedrige Vermeidungskosten ausgewiesen.

Vergleich mit erneuerbaren Energiequellen

Eine Bewertung der CCS-Technologie muss im Vergleich zu erneuerbaren Energiequellen erfolgen. Daher ist es zunächst notwendig, die Kohlendioxidvermeidungskosten der gängigsten regenerativen Energietechnologien Photovoltaikanlagen, Windkraftwerke, Wasserkraftwerke und Geothermie zu bestimmen. Da sich die Vermeidungskosten von erneuerbaren Energiequellen nur anhand von Referenzgrö-

Abb. 3

Vergleich der Vermeidungskosten von Kohlendioxid



Quelle: In Anlehnung an Steinkraus (2015).

ßen bestimmen lassen, muss unterschieden werden, ob diese neuen Technologien bestehende Kohle- oder Gaskraftwerke ersetzen sollen. Aufgrund der Tatsache, dass die spezifischen Kohlendioxidemissionen von Kohlekraftwerken höher sind als die von Gaskraftwerken, Kohlekraftwerke jedoch über geringere Stromproduktionskosten verfügen, ergeben sich teilweise erhebliche Differenzen bei den Vermeidungskosten. Bei dem Ersetzen eines Kohlekraftwerks durch erneuerbare Energien entstehen Kosten zwischen 18 und 75 Euro pro vermiedener Tonne CO_2, soll hingegen ein Gaskraftwerk ersetzt werden, belaufen sich diese auf 0 bis 95 Euro (vgl. Abb. 3).[1] Es zeigt sich somit, dass die CCS-Technologie selbst bei einer Cradle-to-Grave-Betrachtung über geringere Vermeidungskosten verfügt als Photovoltaikanlagen. Allerdings ist die Energieerzeugung mittels Wind- und Wasserkraft aus effizienzorientierter Sicht vorteilhaft gegenüber der CCS-Adaption. Es muss jedoch beachtet werden, dass etwaige Energieverluste, die bei einer wetterbedingten Zwischenspeicherung des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms entstehen, nicht einkalkuliert sind. Zudem sind zumindest in Deutschland nur noch wenig Potenziale für die Ausweitung der Nutzung von Wasserkraft vorhanden (vgl. Umweltbundesamt 2012).

Zusammenfassung

Die Technologie des CCS kann durch das gezielte Abscheiden von Kohlendioxid aus Kraftwerksabgasen und die anschließende unterirdische Speicherung desselben dazu beitragen, die globalen Treibhausgasemissionen signifikant zu senken. Bei einer integrativen Betrachtung sowohl der Kosten der Adaption dieser Technologie als auch der Nettoemissionseinsparungen wird jedoch ersichtlich, dass hierbei vergleichsweise hohe Kohlendioxidvermeidungskosten von bis zu 85 Euro pro Tonne Kohlendioxid entstehen. Da ein vollständiger Verzicht auf den Einsatz fossiler Energieträger zur Stromproduktion zugunsten erneuerbarer Energiequellen aufgrund der notwendigen Netzstabilität in absehbarer Zeit nicht möglich ist, erscheint ein Einsatz der CCS-Technologie dennoch bei vielen Kraftwerken durchaus als ökonomisch sinnvoll. Es muss jedoch beachtet werden, dass etwaige Gefahren, die durch ein spontanes Entweichen des Kohlendioxids aus der Speicherstätte entstehen können, nicht eingepreist wurden, da sich diese als vernachlässigbar gering und deren Auftreten als äußerst unwahrscheinlich betrachtet werden können (vgl. IPCC 2005). CCS besitzt somit trotz der vergleichsweise hohen Cradle-to-Grave-Vermeidungskosten das Potenzial, fossile Energieträger im Bereich der Stromerzeugung weiter zu nutzen und gleichzeitig klimafreundlich Energie zu erzeugen.

[1] Dass beim Ersetzen eines Gaskraftwerkes durch Wasserkraftwerke keine Vermeidungskosten entstehen, resultiert aus der Tatsache, dass Wasserkraftwerke sowohl geringere spezifische Emissionen als auch geringere Stromproduktionskosten aufweisen.

Literatur

Anderson, S. und R. Newell (2004), »Prospects for Carbon Capture and Storage Technologies«, *Annual Review of Environment and Resources* 29, 109–142.

BP (2015), »Statistical Review of World Energy 2015, Outlook to 2025«, verfügbar unter: http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook-2035/energy-outlook-to-2035.html.

BP (2016), »Energy Outlook 2016«, verfügbar unter: http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook-2035/energy-outlook-downloads.html.

EU (2009), *Amtsblatt der Europäischen Union* L140/114, Richtlinie 2009/31/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates.

Gibbins, J. und H. Chalmers (2008), »Carbon capture and storage«, *Energy Policy* 36, 4137–4322.

IEA GHG, (2004), *Improvements in power generation with postcombustion capture of* CO_2, Report PH4/33.

IEA GHG (2011), *Retrofitting* CO_2 *Capture to Existing Power Plants*, Report: 2011/02.

IPCC (2005), *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Cambridge University Press, Cambridge.

Koornneef, J. et al. (2008), »Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO_2«, *International Journal of Green-house Gas Control* 2, 448–467.

Rao, A.B. und E.S. Rubin (2008), »A technical, economic, and environmental assessment of amine-based CO_2 capture technology for power plant greenhouse gas control«, *Environmental Science and Technology* 36, 4467–4475.

Steinkraus, A. (2015), »Coal and Gas - From Cradle to Grave with Carbon Capture and Storage«, Economics Department Working Paper Series No. 14, Technische Universität Braunschweig.

Stephenson, M. (2013), *Returning Carbon to Nature: Coal, Carbon Capture, and Storage*, Elsevier, Amsterdam.

Stern, Sir N. (2007), *Stern Review: The Economics of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.

Stobbs, R. und P. Clark (2005), »Canadian Clean Power Coalition: The Evaluation of Options for CO_2 Capture from Existing and New Coal-Fired Power Plants«, in: M. Wilson, T. Morris, J. Gale und K. Thambimuthu (Hrsg.), *Proceedings of 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Vol. II: Papers, Posters and Panel Discussion, Elsevier Science, Amsterdam, 187–1192.

Szulczewski, M. L. et al. (2012), »Lifetime of carbon capture and storage as a climate-change mitigation technology«, *PNAS* 109(14), 5185–5189.

Umweltbundesamt (2012), »Wasserkraftnutzung in Deutschland«, verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/wasserkraftnutzung-in-deutschland.

Weber, C.L. und C. Clavin (2012), »Life Cycle Carbon Footprint of Shale Gas: Review of Evidence and Implications«, *Environmental Science and Technology* 46(11), 5688–5696.