ZUKUNFTSTECHNOLOGIE MIT TÜCKEN

CARMA-PROJEKT – CARBON DIOXIDE CAPTURE AND STORAGE/CCS IN DER SCHWEIZ

Die Einen erhoffen sich von der CO_2-Speicherung im Erdreich die Lösung des Klimaproblems. Anderen gilt die Technologie als trojanisches Pferd, das den fossilen Energien zu einem Revival verhelfen soll. Forscher des Paul Scherrer Instituts in Villigen (AG) haben mit Partnerinstituten die Möglichkeiten von Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS) in einem vierjährigen Forschungsprojekt untersucht. Sie loteten dabei sowohl das Potenzial der Technologie wie auch seine Grenzen aus.

Benedikt Vogel, Fachjournalist

RÉSUMÉ

UNE TECHNOLOGIE DU FUTUR MALIGNE – LE PROJET CARMA: CARBON DIOXIDE CAPTURE AND STORAGE/CCS EN SUISSE

Les technologies CCS actuellement disponibles sont capables d'éliminer 90 à 95% du CO_2 des centrales électriques grâce au procédé de séparation du CO_2. En pratique, ces valeurs ne peuvent toutefois pas être atteintes, comme les chercheurs du laboratoire pour les analyses des systèmes énergétiques de l'institut Paul Scherrer (Villigen, AG) ont pu le constater dans le cadre du projet de recherche Carma. Selon les résultats obtenus, la technologie CCS peut réduire les émissions de gaz de serre de la production électrique de 68 à 90% sur l'ensemble du cycle de vie. La réduction est la plus élevée dans les centrales à charbon avec des taux de 76 à 90%, alors qu'elle est de 68% dans les centrales à gaz combinées et que l'on peut même observer des émissions de gaz à effet de serre négatives dans les centrales à bois sur l'ensemble du cycle de vie (parce que le carburant bois pris seul est neutre en CO_2 et que la technologie CCS prend durablement du CO_2 dans la biosphère). Les chiffres se rapportent au niveau technologique supposé pour l'année 2005, la vaste plage des valeurs s'explique par le choix de la technologie de séparation. Les chercheurs soulignent que leurs calculs de modélisation disposent d'une incertitude relativement élevée, concernant le développement technologique futur et les données d'arrière-plan pour le cycle de vie.

EINLEITUNG

Zementfabriken sind neben Raffinerien bislang die grössten CO_2-Punktquellen in der Schweiz. 500 000 bis 600 000 Tonnen CO_2 stösst jedes der fünf grössten Zementwerke jährlich aus. Ebenfalls grosse CO_2-Emittenten sind die Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) mit Kohlendioxid-Emissionen von bis zu 300 000 Tonnen pro Jahr.

Mit dem Bau von Gaskombikraftwerken im Zuge des politisch geplanten Atomausstiegs würden neue Punktquellen von bisher ungekannter Grösse entstehen. Für ein Gaskombikraftwerk mit 500 MW Leistung – entspricht in etwa der halben Kapazität des Kernkraftwerks Gösgen – würde der CO_2-Ausstoss bis zu 1 300 000 Tonnen pro Jahr betragen *(Fig. 1)*.

GASKOMBIKRAFTWERKE

CO_2 IM UNTERGRUND EINLAGERN

Der hohe Ausstoss des schädlichen Klimagases CO_2 ist bisher das zentrale politische Hindernis für den Bau von Gaskraftwerken in der Schweiz. Völlig neu wäre die Ausgangslage, liesse sich das CO_2 vor der Abgabe in die Atmosphäre auffangen und an einem geeigneten Ort sicher deponieren. Genau das verspricht

* Kontakt: vogel@vogel-komm.ch

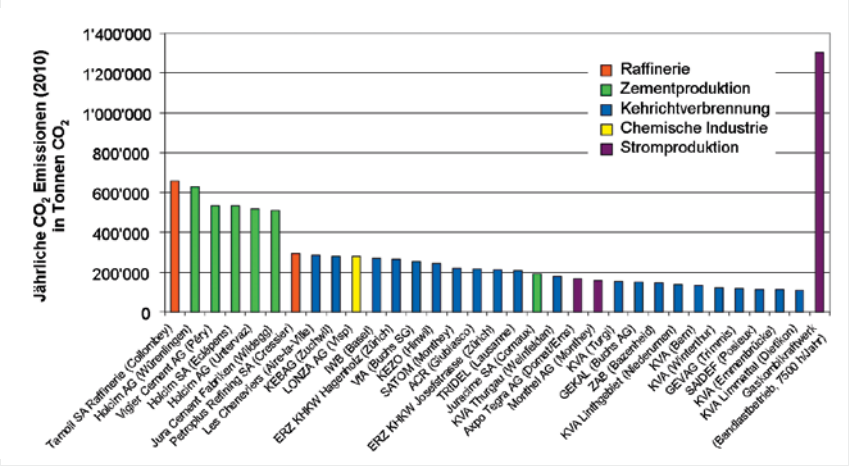


Fig. 1 Zementwerke (Holcim, Jura Cement, Vigier Cement) und Kehrichtverbrennungsanlagen sind die grössten CO_2-Punktquellen in der Schweiz. Ein 500-MW-Gaskombikraftwerk würde deutlich mehr CO_2 ausstossen als die bestehenden Zementwerke und Kehrichtverbrennungsanlagen

Les cimenteries (Holcim, Jura Cement, Vigier Cement) et les incinérateurs de déchets sont les sources ponctuelles de CO_2 les plus élevées en Suisse. Une centrale à gaz combinée de 500 MW émettrait bien plus de CO_2 que les cimenteries et incinérateurs de déchets existants (Quelle: CARMA/PSI (nach E-PRTR database, Version 9.11.2012)

die CCS-Technologie. Die Technologie zur Abscheidung (*capture*) und Speicherung (*storage*) von CO_2 bedeutet, dass Kohlendioxid im Kraftwerksbetrieb abgeschieden und dann in geeigneten, üblicherweise wasserführenden Gesteinsschichten dauerhaft eingelagert wird. Abscheidung wie Speicherung des CO_2 aus Gaskraftwerken – aber auch aus grossen Industrieanlagen und KVA – scheint nach aktuellem Wissen technisch machbar, das Risiko beherrschbar. Das legen Pilotversuche im Ausland nahe, auch wenn die CCS-Technologie bisher noch nicht bis ins Detail ausgereift ist, über die Kosten noch Unklarheit herrscht und auch Akzeptanzprobleme in der Öffentlichkeit bestehen.

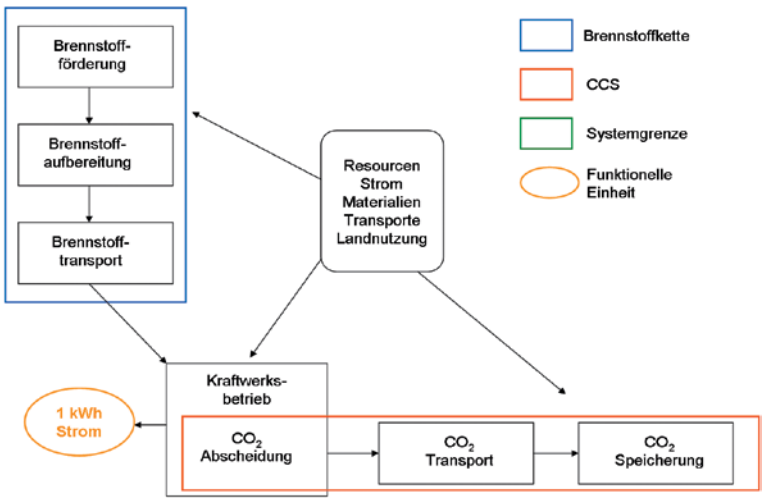
Naht mit CCS also die Technologie, Gaskraftwerke in der Schweiz salonfähig zu machen? Ist sie darüber hinaus sogar der Königsweg zur Erreichung der politisch angestrebten Senkung der Treibhausgase weltweit? Forscher der ETH Zürich und Lausanne, der Fachhochschule Nordwestschweiz, des Paul Scherrer Instituts (PSI) und der Universität Bern haben im Rahmen des *Carma*-Projekts (*Carbon Management in Power Generation*) nach Antworten gesucht. Sie haben von 2009 bis 2012 technische, ökologische, wirtschaftliche, soziale und rechtliche Fragestellungen untersucht, finanziert von den ETH-Kompetenzzentren CCES (*Competence Center Environment and Sustainability*) und CCEM (*Competence Center Energy and Mobility*), *swisselectric research, Alstom* und dem Bundesamt für Energie. Die in fünf Arbeitsgruppen erarbeiteten Teilergebnisse lassen interessante Schlüsse auf CCS zu.

LEBENSZYKLUS

Wichtige Teile der Untersuchung hat das Labor für Energiesystem-Analysen des PSI unter der Leitung von *Stefan Hirschberg* erarbeitet. Er und sein Team untersuchten die Energie- und Materialflüsse rund um CCS. Methodisches Hilfsmittel dazu war die Lebenszyklus-Analyse *(Box 1)*. Sie berücksichtigt den Ressourcenverbrauch durch das Kraftwerk einschliesslich der CO_2-Abscheidung selber, aber auch die vorgelagerten Prozesse (Abbau, Aufbereitung und Transport des Erdgases, Bau des Kraftwerks) sowie die Entsorgung (Abtransport und Einlagerung des CO_2 im Boden, Entsorgung von Abfällen und Rückbau des Kraftwerks). Für die ganze Kette werden dabei der Ver-

LEBENSZYKLUS-ANALYSE

Die Lebenszyklus-Analyse ist eine Methode, die Energie- und Materialflüsse von industriellen Prozessen ganzheitlich zu erfassen. Am Beispiel eines Gaskombikraftwerks (GuD) erklärt: Die Lebenszyklus-Analyse erfasst nicht nur das Kraftwerk selber, also mit wieviel Brennstoff wie viel Strom erzeugt wird. Vielmehr wird der ganze Lebenszyklus betrachtet, also auch die Förderung des Erdgases, die Aufbereitung des Erdgases, der (Langdistanz-) Transport, die regionale Verteilung, das GuD selbst und schliesslich die Abfallentsorgung. Bei jedem dieser Schritte wird untersucht, welche Energie (Treib- und Brennstoffe, Elektrizität) und welche weiteren Ressourcen (Material, Transport) eingesetzt werden müssen. Die Betrachtung des GuD erfasst dessen gesamten Lebenszyklus, also Bau, Betriebszeit und Rückbau. Daraus resultiert ein komplexes Modell der Wirklichkeit. Aus diesem leiten die Forscher die totale Umweltbelastung ab (z. B. Luftschadstoffe und weitere Emissionen, Flächennutzung, Abfälle). Grundlage dieser Berechnungen ist eine breite Datenbasis mit dem Namen ecoinvent, die detaillierteste ihrer Art weltweit.



Schematische Darstellung der Lebenszyklus-Analyse für Kraftwerke (Quelle: Carma/PSI)
Représentation schématisée de l'analyse de cycle de vie pour centrales électriques

Box 1

brauch von Brennstoff, Elektrizität, Material, Transport und Land erfasst.

Die heute verfügbaren Technologien können mittels CO_2-Abscheidung 90 bis 95% des CO_2 aus dem Kraftwerksbetrieb abtrennen *(Box 2)*. Allerdings reduzieren sich in der Lebenszyklus-Betrachtung die Treibhausgas-Emissionen nicht um den gleichen Betrag. Dies hat unterschiedliche Gründe:

- Der CO_2-Abscheidungsprozess braucht selbst Energie, die vom Kraftwerk zur Verfügung gestellt werden muss, was zusätzliche CO_2-Emissionen im Betrieb verursacht (direkte Emissionen).
- Dies führt dazu, dass mehr Brennstoff (hier Erdgas) gefördert und transportiert werden muss (Brennstoffförderung, -aufbereitung und -transport), wobei ebenfalls Treibhausgase emittiert werden.
- Die CO_2-Abscheideanlage muss errichtet und rückgebaut werden, und es müssen weitere Materialien für den Abscheideprozess hergestellt, transportiert und entsorgt werden (CO_2-Abscheidung und indirekte Emissionen).
- Das CO_2 muss nach der Abscheidung transportiert und eingelagert werden (CO_2-Transport und Speicherung).

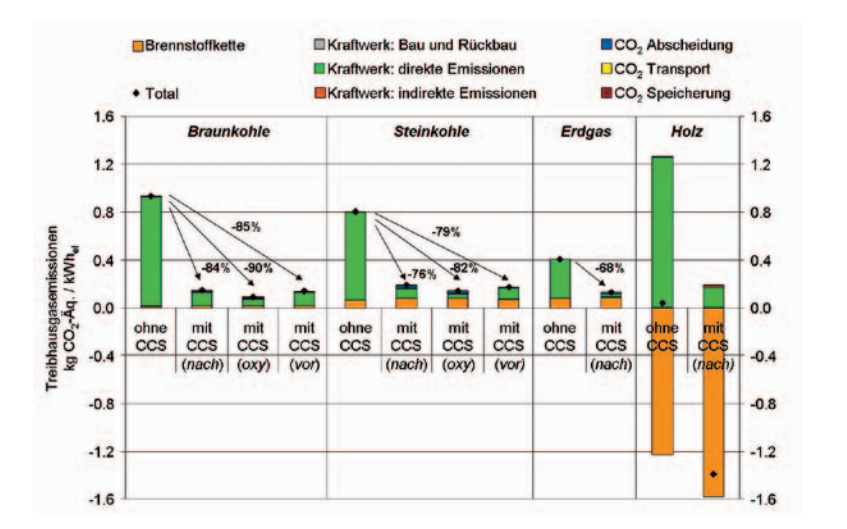


Fig. 2 Bei Kohlekraftwerken ist die CO_2-Reduktion dank CCS grösser als bei Gaskombikraftwerken. Bei Holzkraftwerken kann der CO_2-Ausstoss nicht nur vermindert, sondern dank CCS-Technologie kann der Biosphäre dauerhaft CO_2 entzogen werden

Dans les centrales à charbon, la réduction des émissions de CO_2 est plus élevée que dans les centrales à gaz combinées en raison du CCS. Dans les centrales à bois, les émissions de CO_2 ne peuvent pas seulement être réduites, mais il est possible de prélever du CO_2 durablement de la biosphère grâce à la technologie CCS

(Quelle: CARMA/PSI, Volkart et al., 2013)

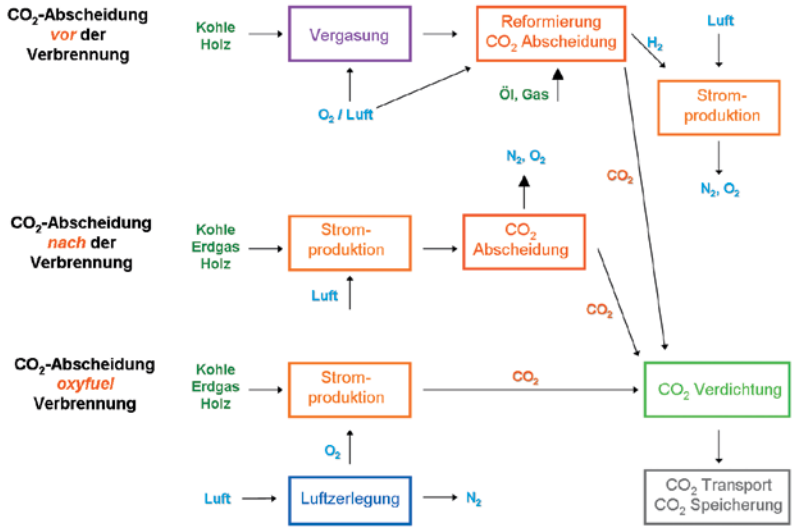
All dies führt dazu, dass die Reduktion der Treibhausgas-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus hinweg tiefer liegt als die technisch mögliche CO_2-Abscheidungsrate von 90 bis 95%.

RUND 70% WENIGER CO_2

Die PSI-Forscher haben diesen Effekt für verschiedene Kraftwerktypen (Braunkohle, Steinkohle, Erdgas, Holz) und mehrere Abscheidetechnologien im Modell durchgerechnet. «Die CCS-Technologie hat das Potenzial, die Treibhausgas-Emissionen der Stromproduktion über den gesamten Lebenszyklus hinweg um 68 bis 90% zu reduzieren», bringt Stefan Hirschberg das Ergebnis auf den Punkt. Bei Kohlekraftwerken ist die Reduktion mit 76 bis 90 % am höchsten *(Fig. 2)*, bei Gaskombikraftwerken beträgt sie 68%, während bei Holzkraftwerken über den Lebenszyklus betrachtet sogar negative Treibhausgas-Emissionen möglich sind (weil der Brennstoff Holz für sich genommen «CO_2-neutral» ist und die CCS-Technologie der Biosphäre dauerhaft CO_2 entzieht). Die Zahlenwerte beziehen sich auf ein für das Jahr 2025 angenommenes

DREI VERFAHREN ZUR CO_2-ABSCHEIDUNG

Für die Abscheidung von Kohlendioxid (CO_2) aus Erdgas sind drei Verfahren verfügbar: Entweder erfolgt die Abscheidung vor dem Verbrennungsprozess, der im Kraftwerk zur Stromerzeugung dient. Verbrannt wird dann nicht mehr Erdgas, sondern (mehr oder weniger reiner) Wasserstoff. Das zweite Verfahren ist das sogenannte Oxyfuel-Verfahren. Hier wird das Erdgas nicht unter Beigabe von Luft, sondern von Sauerstoff verbrannt. Das hat den Vorzug, dass als Abgas nur CO_2 und Wasserdampf entstehen. Letzterer lässt sich leicht kondensieren und man erhält somit einen Abgasstrom mit sehr hoher CO_2-Konzentration, was die Anwendung der CCS-Technologie begünstigt. Das dritte Verfahren setzt nach dem Verbrennungsprozess an; das CO_2 wird hier aus dem Abgas extrahiert. Das Abgas besteht hauptsächlich aus Stickstoff und CO_2, die schwieriger zu trennen sind. BV



Schematische Darstellung der CCS-Abscheidetechnologien *(Quelle: Carma)*

Représentation schématisée des technologies de séparation CCS

Box 2

Technologieniveau, die Bandbreite der Werte erklärt sich durch die Wahl der Abscheidetechnologie. Die Forscher betonen, dass ihre Modellrechnungen mit relativ grossen Unsicherheiten behaftet sind, etwa was die künftige Technologieentwicklung angeht, aber auch bezüglich der Hintergrunddaten, die in die Lebenszyklus-Analyse eingehen.

«Wenn wir global eine Chance haben wollen, CO_2 markant zu reduzieren, wird es ohne CCS nicht gehen. Wir haben weltweit gesehen ein stark fossil dominiertes System», zieht Forscher Hirschberg seinen persönlichen Schluss aus dem Forschungsergebnis. Tendenziell weniger wirksam als bei Gas- und Kohelkraftwerken ist die CCS-Technologie beim Einsatz in Zementwerken. Hier beträgt die CO_2-Reduktion 39 bis 78%, abhängig davon, ob der zur CO_2-Abscheidung benötigte Dampf aus Steinkohle (39%) oder beispielsweise aus Abwärme einer KVA (78%) stammt *(Fig. 3)*. Die Modellrechnung geht übrigens davon aus, dass für die CO_2-Abscheidung und -Verdichtung Elektrizität aus dem europäischen Strommix eingesetzt wird. Würde CO_2-armer Schweizer Strom herangezogen, würde die CCS-Technologie besser abschneiden.

«ERNÜCHTERNDES» RESULTAT BEI DEN UMWELTKOSTEN

Mit der CCS-Technologie lässt sich das in Gaskombikraftwerken und anderen Punktquellen entstehende CO_2 also in erheblichem Mass zurückhalten. Doch wie hoch sind die für Abscheidung und Speicherung nötigen Investitionen? Wirklich verbindliche Antworten dazu können die Forscher nicht vorlegen, da die CCS-Technologie erst im Pilotstadium ist, regulär arbeitende Anlagen also noch nicht in Betrieb sind. Aufgrund ihrer Modellrechnungen kommen die PSI-Forscher zum Schluss, dass die in den Kraftwerken nötige Abscheidetechnologie relativ moderate Kosten verursacht, ebenso der Transport des CO_2 und dessen unterirdische Speicherung. Der wichtigste Kostenblock ist vielmehr der zusätzliche Brennstoff, der benötigt wird, um die tiefere Energieproduktion aufgrund des gesunkenen Wirkungsgrads zu kompensieren. Die Kosten der CCS-Technologie hängen somit in hohem Mass von der künftigen Entwicklung des Gaspreises ab. Die Brennstoffkosten entscheiden also nicht nur über die Rentabilität der Gaskombikraftwerke insgesamt – der Brennstoff macht 70 bis 80% der Gestehungskosten für eine kWh Strom aus –, sondern auch über die finanzielle Tragfähigkeit der CCS-Technologie.

Ergänzend zu den Produktionskosten pro kWh (interne Kosten) haben die Wissenschaftler auch die Umweltkosten (externe Kosten) für CCS berechnet, also die Kosten infolge der Luftverschmutzung, des Landverbrauchs und der Klimaerwärmung. Die Berechnungen führten zum Ergebnis, dass die Summe von Produktions- und Umweltkosten bei einem Gaskombikraftwerk mit CCS ein wenig höher sind als ohne CCS. Dieses Ergebnis mag auf den ersten Blick verblüffen, da man erwarten würde, dass die CCS-Technologie einen grossen Nutzen zugunsten der Umwelt mit sich bringt. Doch die Berechnungen relativieren das: Offenbar ist das Geld, das man in Aufbau und Betrieb der CCS-Technologie steckt (interne Kosten) höher als der potenzielle Schaden, den man mit der Entfernung des CO_2 (externe Kosten) abwendet. «Das ist ein ernüchternder Befund», räumt Hirschberg ein. Diese Schlussfolgerung ist im Projektteam allerdings teilweise umstritten. Denn wie viel die CCS-Technologie zur Minderung der externen Kosten beiträgt, hängt wesentlich davon ab, wie hoch man die erwarteten Schäden der Klimaerwärmung (Gesundheit, Naturkatastrophen usw.) ansetzt. Und das ist extrem schwierig und unsicher.

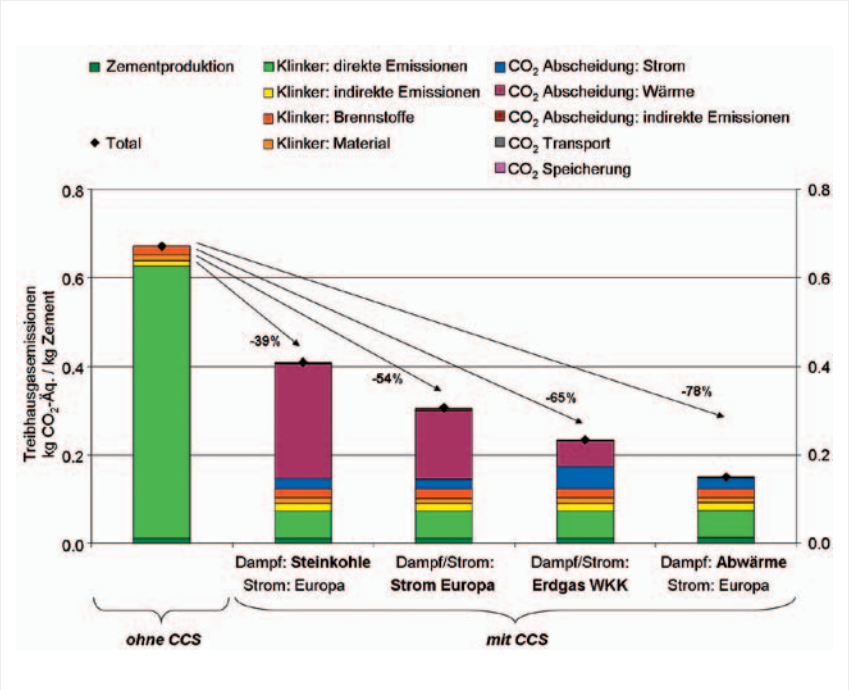


Fig. 3 In Zementwerken kann dank CCS-Technologie eine CO_2-Reduktion von 39 bis 78% erreicht werden. Wie stark die Reduktion ist, hängt davon ab, wie der im Herstellungsprozesse verwendete Dampf und Strom erzeugt wurden

Dans les cimenteries, la technologie CCS permet d'atteindre une réduction du CO_2 de 39 à 78%. L'importance de la réduction dépend de la façon dont la vapeur et l'électricité utilisées dans les processus de fabrication sont produites (Quelle: Carma/PSI, Volkart et al., 2013)

IN KONKURRENZ ZU EFFIZIENZMASSNAHMEN

Das Forschungsprojekt *Carma* nahm seinen Anfang zwei Jahre vor dem Atomunfall von Fukushima, der zu einer Kehrtwende der Schweizer Energiepolitik führte. Da seither der Bau von Gaskraftwerken als probates Mittel erscheint, den Atomausstieg zu meistern, gewann auch die Frage an Aktualität, welche Rolle CCS in der schweizerischen Energiepolitik spielen kann. Tatsächlich steht die CCS-Technologie in einem Spannungsfeld zu Effizienzmassnahmen. Denn ob Kohlendioxid im Untergrund gespeichert wird, oder ob ein fossil beheiztes Gebäude energetisch saniert wird – in beiden Fällen wird der CO_2-Ausstoss gemindert. Dort, wo Effizienzmassnahmen viel kosten, könnte die Erreichung der Klimaziele über CCS billiger sein. «Eine breite Palette von Effizienzmassnahmen wird man weiter nutzen, aber auf teurere Massnahmen könnte man dank CCS verzichten», umschreibt Ste-

fan Hirschberg die neue energiepolitische Option, die sich aus der CCS-Technologie ergibt. Mit CCS wird CO_2-armer Strom aus fossilen Energieträgern erzeugt. Das schafft neue Optionen, das Energiesystem zu elektrifizieren. Zum Beispiel mit Wärmepumpen, die unter Einsatz von Strom die Erdwärme zu Heizzwecken nutzen – dies als Ersatz für Öl- und Gasheizungen. Oder die Förderung der Elektromobilität – dies als Ersatz für benzin- und dieselbetriebene Automobile. In beiden Fällen wird fossile Energie substituiert durch CO_2-armen Strom. Aus Sicht des Klimaschutzes ist das zwar stets nur die zweitbeste Variante, nach der Verwendung von «grünem» Strom aus erneuerbaren Energiequellen. Aber CO_2-armer Strom aus fossilen Energieträgern ist eben doch klimafreundlicherer Strom als der, wie er heute mit fossilen Kraftwerken ohne CCS erzeugt wird. In Ländern, in denen Strom aus Kohle- und Gaskraftwerken stammt, liegt dieser pragmatische Schritt auf der Hand. Die Schweiz, die Strom bisher nahezu CO_2-neutral praktisch ausschliesslich aus Wasser- und Atomkraft erzeugt, muss hier eine eigene Abwägung vornehmen.

BFE-BERICHTE ZUM DOWNLOAD

Die Berichte zum BFE-Forschungsprogramm Kraftwerk 2020 und Carbon Capture and Storage (CCS) sind im Internet verfügbar unter: *www.bfe.admin.ch/forschungkraftwerk/index.html?lang=de&dossier_id=03489*

WEITERE INFORMATIONEN

Weitere Auskünfte zu dem BFE-Forschungsprogramm erteilt der zuständige Programmleiter *Peter Jansohn, Paul Scherrer Institut, peter.jansohn@psi.ch*