

Treibhauseffekt

Kernenergie eine Lösung für das CO₂-Problem?

T. Kohler, P. Schaumann, A. Voß
IER Universität Stuttgart

Die Arbeit wurde mit dem 3. Preis der Jahrestagung Kerntechnik (JK-Preis 1990) in Nürnberg ausgezeichnet.

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. T. Kohler, Dipl.-Ing. P. Schaumann, Prof. Dr. A. Voß, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Univ. Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 7000 Stuttgart 80

Einleitung

Die Emission klimarelevanter Spurengase hat aufgrund der zu erwartenden Klimaveränderung durch den Treibhauseffekt in der energiepolitischen Diskussion an Bedeutung gewonnen. In diesem Beitrag sollen einige Möglichkeiten diskutiert werden, durch den Einsatz der Kernenergie in der Strom- und Fernwärmeerzeugung die Emission von Kohlendioxid zu reduzieren. Das Kohlendioxid wird hier stellvertretend für alle klimarelevanten Spurengase betrachtet, da diesem Spurengas mit einem Anteil von ca. 50% am gesamten energiebedingten Treibhauseffekt der größte Einfluß zugeordnet wird, und da Maßnahmen zur Minderung von Kohlendioxidemissionen aus der Energieerzeugung in unterschiedlichem Maße auch eine Minderung anderer klimarelevanter Spurengase wie z. B. CH₄, N₂O, CO bewirken.

Es werden hier Ergebnisse vorgestellt, die im Rahmen von Untersuchungen für die Enquete-Kommission: „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages erarbeitet wurden. Neben der CO₂-Minderung durch den verstärkten Einsatz der Kernenergie zur Energieerzeugung, der hier

behandelt wird, gibt es weitere Möglichkeiten zur CO₂-Einsparung, z. B. durch Energieeinsparung oder rationelle Energieanwendungen oder durch Substitution fossiler Energieträger untereinander. Weiter lassen sich CO₂-Emissionen durch die Verwendung erneuerbarer Energieträger vermeiden, und schließlich läßt sich Kohlendioxid gegebenenfalls auch klimaschädlich entsorgen. Hier werden die Möglichkeiten zur CO₂-Minderung durch eine verstärkte Nutzung der Kernenergie zur Erzeugung von Strom und Niedertemperaturwärme untersucht. Nicht dargestellt werden die Möglichkeiten zur CO₂-Minderung durch einen verstärkten Einsatz der Kernenergie zur Prozeßwärme- bzw. Wasserstoffherzeugung.

Grundlage und Methoden

Es werden die Möglichkeiten zur Minderung von CO₂-Emissionen durch die verstärkte Nutzung der Kernenergie in der Strom- und Fernwärmeerzeugung untersucht, die sofort bzw. in der nahen Zukunft (bis zum Jahr 2005) realisiert werden können.

Als Referenzentwicklung zur Abschätzung des zukünftigen Energieverbrauchs und damit auch der zukünftigen CO₂-Emissionen wird ein Szenario der Entwicklung der Energiewirtschaft nach *Prognos* 1987 [1] gewählt. Abb. 1 zeigt die CO₂-Emissionen dieses Szenarios, welche von 1987 mit etwa 706 Mio. t auf 743 Mio. t im Jahr 2005 ansteigen, sowie deren Aufteilung auf verschiedene Sektoren, wobei im weiteren die CO₂-Emissionen aus der Fernwärme- und der Stromerzeugung betrachtet werden. Die Fernwärme hat sowohl heute als auch im Jahr 2005 einen relativ geringen Anteil von knapp 3% an den gesamten CO₂-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland. Wie in Abb. 2 gezeigt, nimmt in dieser Referenzentwicklung der Stromverbrauch von 332,9 TWh in 1987 auf 461,8 TWh im Jahr 2005 zu. Die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung nehmen dabei von 231,6 Mio. t in 1987 auf 326,8 Mio. t im Jahr 2005 zu. Ihr Anteil an den gesamten CO₂-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland liegt bei 33% im Jahr 1987 bzw. bei 44% im Jahr 2005. Zur Deckung der Stromnachfrage des Jahres 1987 wurden 3897 PJ Energie mit folgender Zusammensetzung eingesetzt: 52,9% Kohle und andere feste Brennstoffe, 10,7% Öl bzw. Gas und 36,4% CO₂-freie Energieträger Kernenergie und Wasserkraft.

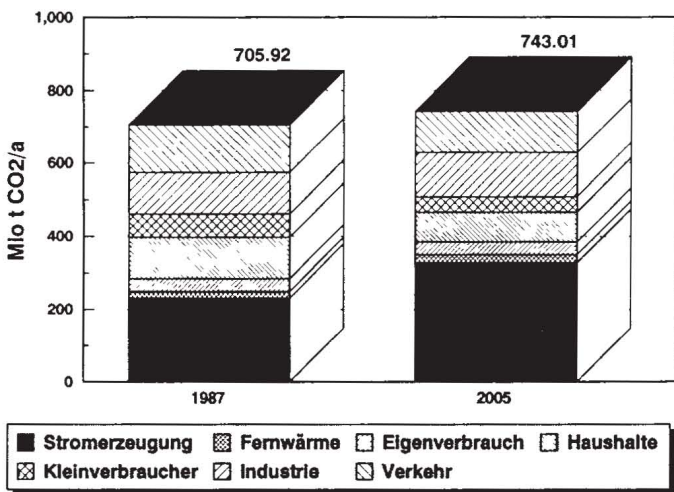


Abb. 1: CO₂-Emissionen im Jahr 1987 und im Jahr 2005.

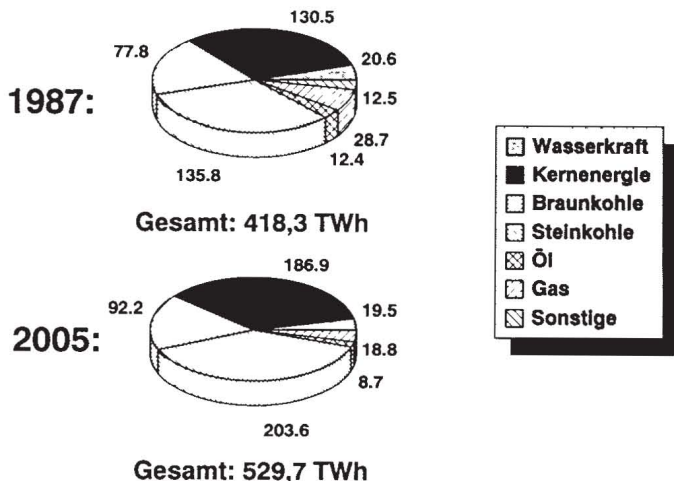


Abb. 2: Bruttostromerzeugung nach Energieträgern im Jahr 1987 und im Jahr 2005 (Referenzentwicklung).

Die durchgeführten Analysen sollen zu Aussagen über technische und wirtschaftliche Möglichkeiten zur Minderung von CO₂-Emissionen durch einen verstärkten Einsatz der Kernenergie zur Strom- und Fernwärmeerzeugung führen. Dazu werden bei der Abschätzung technischer Potentiale die rein technischen Möglichkeiten zum Einsatz der nuklearen Referenztechnologien analysiert. Für beide Bereiche Strom- und Fernwärmeerzeugung werden aktuelle Erzeugungstechnologien als Referenzanlagen gewählt. Das wirtschaftliche Potential wird als derjenige Teil des technischen Potentials definiert, der wirtschaftlich, d. h. ohne Mehrkosten, gegenüber den konventionellen Alternativen erschließbar ist. Als Kriterium zum wirtschaftlichen Vergleich verschiedener Maßnahmen, die eine Minderung von Kohlendioxid ermöglichen, werden die spezifischen CO₂-Minderungskosten definiert. Sie werden als Verhältnis der absoluten Kostendifferenz und der absoluten CO₂-Minderung einer Substitutionsmaßnahme berechnet und beschreiben die Kosten, die aufgewendet werden müssen, um eine bestimmte Menge von CO₂ nicht freizusetzen. Durch diese Kenngröße läßt sich ein Vergleich verschiedener technischer CO₂-Minderungsmaßnahmen unter wirtschaftlichem Gesichtspunkt durchführen. Darüber hinaus werden Potential-Kosten-Funktionen erstellt, die angeben, mit welchem Kostenaufwand welche CO₂-Emissionsminderungen durch einen verstärkten Kernereinsatz erzielt werden können.

Möglichkeiten der CO₂-Minderung bei der Stromproduktion

Die Kernenergie kann im Bereich der Stromerzeugung bzw. -anwendung auf zwei Arten einen CO₂-Minderungsbeitrag leisten: einmal durch die Substitution fossiler, und damit CO₂-behafteter Stromerzeugung – dies wird hier betrachtet. Andererseits kann indirekt über die Substitution fossiler Brennstoffe beim Endverbraucher durch Strom aus Kernkraftwerken eine CO₂-Minderung erreicht werden. Die Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung kann auf weitgehend bekannte und erprobte Reaktorkonzepte zurückgreifen. Für die hier durchgeführte Untersuchung werden Leichtwasserreaktoren (Nach-Konvoi-Anlagen) als Referenzanlagen zugrunde gelegt.

Sofortmaßnahmen

Die einzige, ohne lange Vorlaufzeiten realisierbare Maßnahme zur Minderung der CO₂-Emissionen durch verstärkten Einsatz der Kernenergie in der Stromerzeugung ist die Erhöhung der Stromerzeugung in bestehenden Kernkraftwerken, was durch eine Erhöhung der Auslastung dieser Anlagen erreicht werden kann. Begrenzende Faktoren der Stromerzeugung aus Kernkraftwerken liegen dabei in der Lastcharakteristik der Stromnachfrage, in der Arbeitsverfügbarkeit der Kernkraftwerke und in den Kohleabnahmeverpflichtungen durch den Jahrhundertvertrag.

Die Zeit- und Arbeitsverfügbarkeit der Leichtwasserreaktor-Kernkraftwerke konnte in den achtziger Jahren deutlich erhöht werden. Die Zeitverfügbarkeit lag dabei im Zeitraum 1984–1988 zwischen 83,0% und 89,2%. Aufgrund der vorliegenden Betriebserfahrung ließe sich die Arbeitsausnutzung gegebenenfalls um 6% bis 8% erhöhen. Bedingungen dafür waren eine gemeinsame CO₂-minimierende Kraftwerkseinsatzoptimierung und der Verzicht auf Stretch-out-Betrieb.

In der Bundesrepublik lag die Stromerzeugung der existierenden Kernkraftwerke mit einer installierten Leistung von 23,6 GW_{el} im Jahr 1989 bei 149,5 TWh. Bei dieser zur Zeit installierten Kernkraftwerksleistung könnte durch die genannten Maßnahmen eine Bruttostrommehrerzeugung zwischen 21 und 25 TWh/a erzielt werden. Daraus folgt eine Minderemission von rund 18 bis 27 Mio. t CO₂, je nachdem, ob die Stromerzeugung in Braun- oder Steinkohle durch Stromerzeugung aus Kernenergie substituiert wird.

Maßnahmen in der nahen Zukunft

Betrachtet man weiter in der Zukunft liegende Zeitpunkte, so ist ein verstärkter Ausbau der Kernkraftwerkskapazität und damit eine weitere CO₂-Minderung denkbar. Zur Ermittlung des maximalen technischen CO₂-Minderungspotentials für das Jahr 2005 wird unterstellt, daß unter Berücksichtigung des Ersatzbedarfs für Braun- und Steinkohlekraftwerke ab dem Jahr 1997 durchschnittlich ein bzw. zwei Kernkraftwerke pro Jahr zugebaut werden können. Unterstellt man eine vollständige Substitution der bis zum Jahr 2005 zuzubauenden Stein- und Braunkohlekraftwerkskapazität durch Kernkraftwerke, so ergäbe sich im Rahmen des Strombedarfszuwachses eine technisch mögliche installierte Kernkraftwerksleistung von rund 45 GWe. Dies entspräche einem Anteil von 41,5% an der gesamten installierten Kraftwerkseingabeleistung. Gegenüber dem Referenzfall konnten maximal, für den Fall des Zubaus von zwei Kernkraftwerken pro Jahr und einem CO₂-minimierenden Betrieb, etwa 150 Mio. t CO₂ und damit 46% der CO₂-Emissionen der Stromerzeugung im Jahr 2005 vermieden werden.

Tab. 1 gibt die technischen CO₂-Minderungspotentiale verschiedener Substitutionsmaßnahmen sowie deren spezifische CO₂-Minderungskosten wieder. Danach weisen alle betrachteten Maßnahmen der Substitution fossiler Stromerzeugung durch nukleare negative Minderungskosten auf. Dies bedeutet, daß diese Maßnahmen auch ohne Berücksichtigung ihrer CO₂-Minderung ökonomisch sinnvoll wären und daß ihre Umsetzung eine Kosteneinsparung für die Volkswirtschaft zur Folge hätte. Wie in Tab. 1 zu erkennen ist, liegen im Falle der Substitution von Strom aus Braunkohle und importierter Steinkohle durch Strom aus Kernenergie die spezifischen Minderungskosten zwischen –15,7 und –1,5 DM/t CO₂. Im Falle der Substitution heimischer Steinkohle liegen sie bei etwa –60 DM/t CO₂.

Tabelle 1: Technisches CO₂-Minderungspotential und spezifische Minderungskosten der verstärkten Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung im Jahr 2005

Bereich und Maßnahme	Technisches CO ₂ -Minderungspotential [Mio t CO ₂ /a]	Spezifische CO ₂ -Minderungskosten [DM/t CO ₂]
Stromerzeugung		
Zubau 1 KKW/a (maximal)		
Ersatz von Braunkohle normaler/CO ₂ -minimierender Betrieb 50–88		– 5 bis –10
Ersatz von Steinkohle normaler/CO ₂ -minimierender Betrieb 24–95		– 1 bis –15 (–61 bis –66) ¹⁾
Zubau 2 KKW/a (maximal)		
Ersatz von Braunkohle normaler/CO ₂ -minimierender Betrieb 88–149		–3,5 bis –13
Ersatz von Steinkohle normaler/CO ₂ -minimierender Betrieb 63–143		– 1 bis –13 (–59 bis –66) ¹⁾
Öffentliche Nah- und Fernwärmeversorgung		
Auskopplung aus KKW (Leichtwasserreaktor)		
	5–13 ²⁾	– 50 bis + 750 (–145 bis + 645) ¹⁾
Einsatz von Kernheizwerken	6,5–16,5 ²⁾	– 190 bis + 140 (–160 bis + 140) ¹⁾

¹⁾ Werte gelten für heimische Kohle.

²⁾ Zweiter Wert gilt für Substitution auch der mit der Koppelstromproduktion verbundenen CO₂-Emissionen durch CO₂-freie Ersatzstrombeschaffung.

Diese negativen Minderungskosten einer politisch begründeten Verstromung der Steinkohle enthalten Kostenbestandteile, die der gesamtwirtschaftlichen Versorgungssicherheit sowie den Bereichen der Sozial-, Struktur- und Arbeitsmarktpolitik zuzuordnen sind. Entsprechende Kosteneinsparungen im Energiebereich (nicht aber die CO₂-Minderungen) ließen sich auch bei einer Substitution heimischer Steinkohle durch Importkohle erzielen.

Die Ergebnisse zeigen, daß eine Ausweitung der Stromerzeugung in Kernkraftwerken bis zum Jahr 2005 die CO₂-Emissionen drastisch reduzieren könnte. Dies könnte ohne zusätzliche Kosten für die Volkswirtschaft erfolgen.

Möglichkeiten der CO₂-Minderung bei der Fernwärmeerzeugung

Diese Option betrachtet die Möglichkeiten, Kernenergie zur Erzeugung von Nah- bzw. Fernwärme einzusetzen. Hier werden zwei alternative Möglichkeiten betrachtet: Die Auskopplung von Fernwärme aus Leistungsreaktoren mit Wärmetransport zu einem nahegelegenen Fernwärmenetz und die Fernwärmeerzeugung mit Kernheizwerken (auch Heizreaktoren genannt). Die Maßnahmen sind alternativ, da sie sich auf dasselbe CO₂-Minderungspotential beziehen. In beiden Bereichen sind keine sofort wirksam werdenden Beiträge der Kernenergie zur CO₂-Minderung möglich, da die dafür notwendigen Anlagen (Bau von Fernwärmeleitungen und Erzeugungsanlagen) längere Zeiträume in Anspruch nehmen.

Je nach Art des durch Kernenergie substituierten fossilen Brennstoffs (heimische bzw. importierte Kohle, Heizöl) ergeben sich aufgrund unterschiedlicher Energieträgerpreise unterschiedliche CO₂-Minderungskosten. Wird Fernwärmeerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung durch nukleare Fernwärme

ersetzt, so wird auch der entsprechende Brennstoffeinsatz zur Koppelstromerzeugung substituiert. Wird dieser Strom aus CO₂-freien Quellen ersetzt, so ergeben sich höhere Minderungspotentiale als im folgenden angegeben.

Fernwärmeauskopplung aus Kernkraftwerken

Zur Ermittlung des Potentials der CO₂-Minderung durch Fernwärmeauskopplung aus Kernkraftwerken werden auf der Basis der örtlichen Verteilung der bestehenden Kernkraftwerke und der bestehenden Fernwärmeversorgungssysteme mögliche Auskopplungs- und Transportmöglichkeiten untersucht. In den meisten Fällen steht der angenommenen auskoppelbaren Leistung von 500 MWth bei 1300 MWe eine entsprechende Grundlast-Wärmenachfrage eines geographisch entsprechend gelegenen Fernwärmeversorgungsgebiets gegenüber. Die Grundlast der Fernwärmenachfrage, die durch die Auskopplung aus Kernkraftwerken gedeckt werden soll, wird mit 60% der Höchstlast angesetzt, welche wiederum mit 60% des Anschlußwertes angenommen wird. Die Fernwärmegrundlast liegt demnach bei 36% des Anschlußwertes. Die 27 betrachteten Wärmeauskopplungs- und Transportmöglichkeiten haben wegen unterschiedlicher Leistungen unterschiedlich technische CO₂-Minderungspotentiale.

Die für das Jahr 1987 ermittelten Auskopplungs- und Wärmetransportmöglichkeiten werden entsprechend dem Wachstum des Fernwärmebedarfs im Referenzszenario auf das Jahr 2005 hochgerechnet, wobei nicht die Leistung, sondern die Anzahl der Leitungen erhöht wird. Der dazu notwendige Zubau von Kernkraftwerken entspricht etwa der Annahme zum Zubau von Kernkraftwerken im betrachteten Referenzszenario. Die Umsetzung dieser Maßnahmen zur Fernwärmeauskopplung aus Kernkraftwerken mit anschließendem Wärmetransport zum Ort des Fernwärmebedarfs hat für das Jahr 2005 ein CO₂-Minderungspotential von ca. 5 Mio. t zur Folge. Diese Minderung entspricht knapp 1% der Gesamtemissionen in der Bundesrepublik Deutschland.

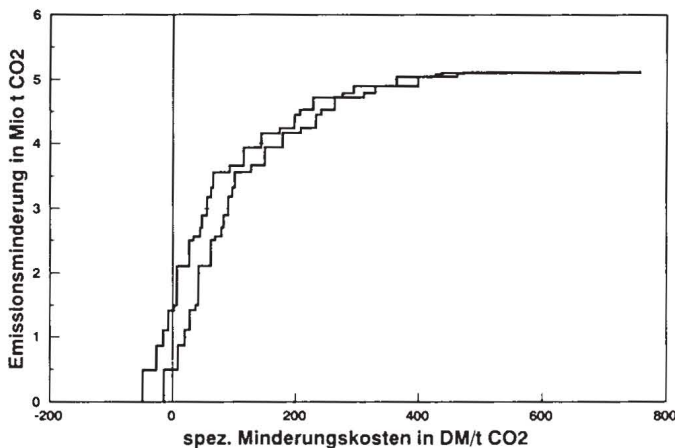


Abb. 3: Emissionsminderung bei der Fernwärmeauskopplung aus Kernkraftwerken in Abhängigkeit der Minderungskosten.

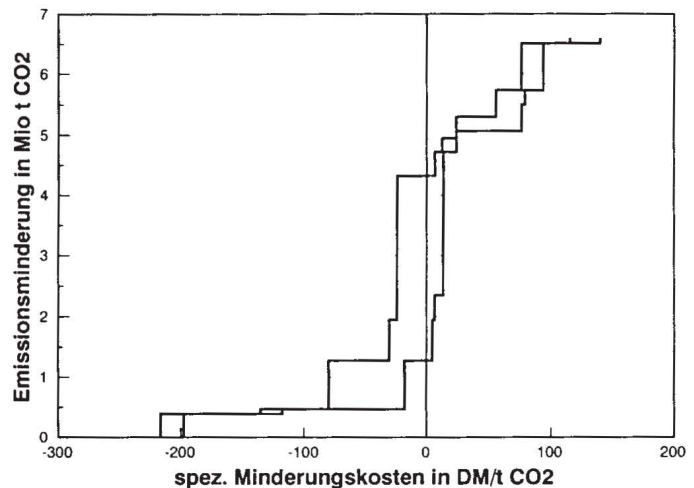


Abb. 4: Emissionsminderung bei Substitution von Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung durch Kernheizwerke.

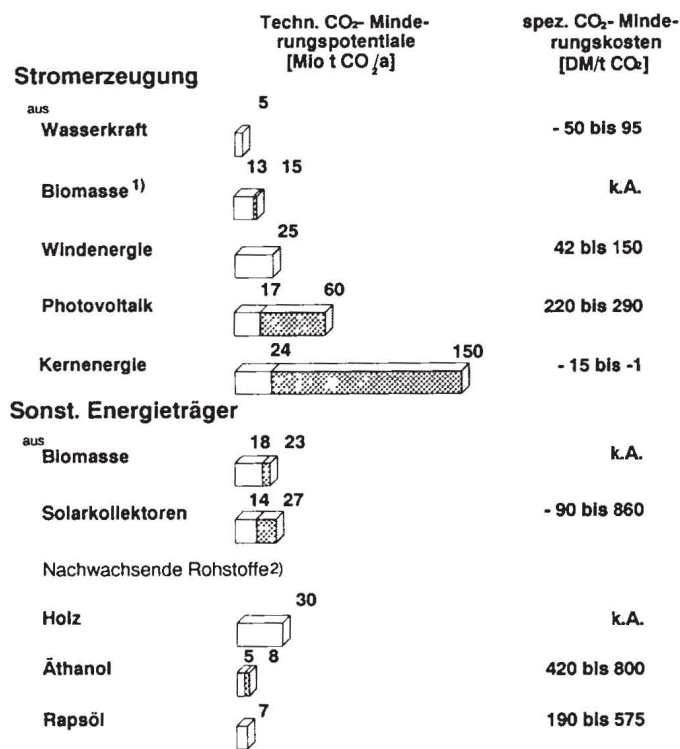
Zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit dieser Auskopplungs- und Transportmöglichkeiten werden jeweils alle Kostenkomponenten bis zur Einspeisung in die Fernwärmeverteilung sowie der mit der Wärmeauskopplung verbundene Stromverlust betrachtet. Die Summe dieser Kosten wird für jede Auskopplungs- und Transportmöglichkeit mit den Kosten der fossilen Fernwärmeerzeugung als Mix der bestehenden Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen verglichen. Wie die Kostenpotential-Funktion der CO₂-Minderung bei der Fernwärmeauskopplung aus Kernkraftwerken in Abb. 3 zeigt, sind bei Einsatz von Importkohle nur an wenigen Stellen wirtschaftliche Auskopplungsmöglichkeiten vorhanden. Tendenziell sind dies die Auskopplungsmöglichkeiten mit kurzer Transportentfernung und hoher Leistung. Das wirtschaftliche CO₂-Minderungspotential liegt zwischen 0,5 und 1,5 Mio. t. Bei Einsatz heimischer Kohle ergeben sich für mehrere Maßnahmen wirtschaftliche Bedingungen. Das wirtschaftliche CO₂-Minderungspotential beträgt dann etwa 3,5 Mio. t.

Fernwärmeerzeugung mit Kernheizwerken

Die andere Möglichkeit, Kernenergie zur Fernwärmeerzeugung zu nutzen, ist die Errichtung von Kernheizwerken. Die damit erzeugte Fernwärme soll hier fossile Fernwärmeerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen substituieren. Die bestehenden fossilen Fernwärmeerzeuger auf Basis der Kraft-Wärme-Kopplung werden nach Brennstoffen und Leistungsklassen eingeteilt. Diese Fernwärmeerzeugerstruktur wird entsprechend dem Wachstum der Fernwärmeversorgung im Referenzszenario ins Jahr 2005 skaliert. Die Substitution der fossilen Kraft-Wärme-Kopplungs-Wärmeerzeuger einer Leistungsklasse und eines Brennstoffs durch Kernheizwerke ergibt jeweils eine Maßnahme, wobei der jeweils unterschiedliche Brennstoffeinsatz ein unterschiedliches CO₂-Minderungspotential der einzelnen Maßnahmen zur Folge hat. Das gesamte technische CO₂-Minderungspotential aller Maßnahmen für das Jahr 2005 beträgt etwa 6,5 Mio. t.

In Abb. 4 sind die spezifischen CO₂-Minderungskosten der einzelnen Substitutionsmaßnahmen von fossiler Fernwärmeerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung durch Kernheizwerke in Form der Kosten-Potential-Funktion gezeigt. Bei Vergleich der Wärmeerzeugung in Kernheizwerken mit der Erzeugung in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen unter Einsatz von Import-

kohle sind einige Maßnahmen wirtschaftlich, z. B. die Substitution kohlegefeuerter Heizkraftwerke mit einer Fernwärmeleistung zwischen 50 und 200 MW durch Kernheizwerke entsprechender Leistung. Das gesamte wirtschaftliche CO₂-Minderungspotential für das Jahr 2005 bei Ersatz von Importkohle liegt zwischen 1,5 und 4,5 Mio. t. Bei Ersatz heimischer Kohle ergeben sich außer für sehr kleine Heizkraftwerke für die meisten Maßnahmen wirtschaftliche Bedingungen. Das wirtschaftliche CO₂-Minderungspotential liegt dann bei ca. 5,5 Mio. t.



Folgerungen

Die Kernenergie kann im Bereich der Stromerzeugung mit bis zu 150 Mio. t einen wesentlichen Beitrag zur Minderung von CO₂-Emissionen leisten. Im Bereich der Fernwärmeerzeugung ist der mögliche Beitrag gering. Damit ließen sich durch den verstärkten Einsatz der Kernenergie in der Strom- und Fernwärmeproduktion ca. 20% der heutigen CO₂-Emissionen zum überwiegenden Teil ohne zusätzliche Kosten für die Volkswirtschaft mindern. Die Zusammenstellung der technischen Minderungspotentiale und der spezifischen Minderungskosten von verschiedenen CO₂-Minderungsmaßnahmen in Abb. 5 zeigt, daß die verstärkte Nutzung der Kernenergie nicht die einzige, jedoch eine effiziente Möglichkeit zur Reduzierung der Freisetzung klimarelevanter Spurengase ist. Um allerdings diese möglichen Beiträge zu einer klimaverträglichen Energieversorgung erschließen zu können, müssen die politischen Voraussetzungen für die Nutzung der Kernenergie gegeben sein.

DK 621.039:551.51

Literatur

- [1] Prognos, Rationelle Energieverwendung und -erzeugung ohne Kernenergienutzung: Möglichkeiten sowie energetische, ökologische und wirtschaftliche Auswirkungen, Untersuchung im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie des Landes Nordrhein-Westfalen. Basel, Köln, Oktober 1987.

1) Abfallmasse, Deponiegas, Müll
2) Angaben gelten jeweils für eine Agrarüberschußfläche von 2 Mio ha

Abb. 5: CO₂-Minderungspotentiale und Minderungskosten verschiedener CO₂-freier bzw. -neutraler Energiequellen für das Jahr 2005 im Vergleich.