



acatech DISKUTIERT

> DIE ZUKUNFT DER ENERGIEVERSORGUNG IN DEUTSCHLAND

HERAUSFORDERUNGEN – PERSPEKTIVEN – LÖSUNGSWEGE

BERND HILLEMEIER (Hrsg.)

acatech SYMPOSIUM | 21. NOVEMBER 2006



acatech DISKUTIERT

> DIE ZUKUNFT DER ENERGIEVERSORGUNG IN DEUTSCHLAND

HERAUSFORDERUNGEN – PERSPEKTIVEN – LÖSUNGSWEGE

BERND HILLEMEIER (Hrsg.)

acatech SYMPOSIUM | 21. NOVEMBER 2006

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISSN 1861-9924 / ISBN-10: 3-8167-7220-X ISBN-13: 978-3-8167-7220-0

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung von acatech unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

© acatech – Konvent für Technikwissenschaften
der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V., 2006

Geschäftsstelle München
Residenz München
Hofgartenstraße 2
80539 München

Geschäftsstelle Berlin
Jägerstraße 22/23
10117 Berlin

Telefon + 49 (0) 89 / 520 30 90
Telefax + 49 (0) 89 / 520 30 99

Telefon + 49 (0) 30 / 39 88 50 71
Telefax + 49 (0) 30 / 39 88 50 72

E-mail: info@acatech.de
Internet: www.acatech.de

Koordination und Redaktion: Dr. Andreas Möller (acatech), Dr. Karsten Schubert (TU Berlin)
Umschlaggestaltung und Layout-Konzeption: klink, liedig werbeagentur gmbh, München
Satz/ Layout: Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS, Sankt Augustin
Herstellung und Produktion: Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart

Printed in Germany

Verlag und Vertrieb:
Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Telefon + 49 (0) 711 / 970 25 00
Fax + 49 (0) 711 / 970 25 08

E-mail: irb@irb.fraunhofer.de
Internet: www.irb.fraunhofer.de



> INHALT

EINLEITUNG UND MOTIVATION	7
Bernd Hillemeier, Chairman des Symposiums	
1 WEGE ZU EINER NACHHALTIGEN ENERGIEVERSORGUNG IN DEUTSCHLAND	11
Alfred Voß	
1.1 Einleitung	11
1.2 Ausgangslage	11
1.3 Szenarien der Energieversorgung in Deutschland	16
1.4 Schlussbemerkung	21
1.5 Weiterführende Literatur	21
2 SICHERE FOSSILE PRIMÄRENERGIE – EINE ACHILLESFERSE VON WIRTSCHAFT UND POLITIK	23
Dietrich H. Welte und Dietrich Böcker	
2.1 Ausgangssituation	23
2.2 Globale Aspekte des Primärenergieverbrauchs	23
2.3 Der Energiebedarf in China und Indien	25
2.4 Ursachen des Preisanstiegs	27
2.5 Reserven, Ressourcen und Reichweiten	28
2.6 Die Primärenergierisiken Deutschlands	31
2.7 Ansatzpunkte für eine realistische Energiestrategie	35
2.8 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen	37
2.9 Literaturangaben	38
3 DIE ROLLE DER KERNENERGIE IN DER ZUKÜNFTIGEN ENERGIEVERSORGUNG	39
3.1 DER INDUSTRIESTAAT DEUTSCHLAND OHNE KERNENERGIE: EINE SINNVOLLE POLITISCH-WIRTSCHAFTLICHE ENTSCHEIDUNG?	41
Manfred Mach und Carsten Salander	
3.1.1 Sechs Bedingungen für die Nutzung der Kernenergie	41
3.1.2 Umweltentlastung	42
3.1.3 Wirtschaftlichkeit	43
3.1.4 Rohstoffsicherheit – Die Uranreserven	44
3.1.5 Entsorgungssicherheit – Die radioaktiven Abfälle	45
3.1.6 Betriebsrisiko – Größere kerntechnische Unfälle	47
3.1.7 Missbrauchsabschluss – Die militärische Nutzung der Kerntechnik	49
3.1.8 Zusammenfassung und Ausblick	50
3.1.9 Literaturangaben	52



> INHALT

3.2 ASPEKTE DER ZUKÜNFTIGEN NUTZUNG DER KERNENERGIE	53
Kurt Kugeler, Inga Maren Tragsdorf, Nathalie Pöppe	
3.2.1 Die Notwendigkeit der zukünftigen weltweiten Kernenergienutzung	53
3.2.2 Überblick über die Nachhaltigkeits- und Sicherheitsanforderungen bei zukünftigen Kernkraftwerken	54
3.2.3 Wirtschaftliche Aspekte der Erzeugung von elektrischer Energie	55
3.2.4 Radioaktive Belastungen aus dem Normalbetrieb kerntechnischer Anlagen	56
3.2.5 Spaltstoffversorgung	56
3.2.6 Ausschluss des Spaltstoffmissbrauchs	57
3.2.7 Kernkraftwerke der Zukunft ohne eine katastrophale radiologische Belastung der Menschen und der Umwelt nach schweren Störfällen	58
3.2.8 Nukleare Entsorgung	60
3.2.9 Kernenergie zur Versorgung des Wärmemarktes	61
3.2.10 Anforderungen und Empfehlungen	62
3.2.11 Literaturangaben	63
3.3 DIE ENDLAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE IN DEUTSCHLAND – WO LIEGEN DIE PROBLEME IM INTERNATIONALEN VERGLEICH?	65
Klaus Kühn	
3.3.1 Einleitung	65
3.3.2 Die Koalitionsvereinbarung vom 20. Oktober 1998	65
3.3.3 Die Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen	70
3.3.4 Was jetzt zu tun ist: Neun Empfehlungen zur Verbesserung des Status quo	72
3.3.5 Zusammenfassung und Ausblick	76
3.3.6 Literaturangaben	77
4 DIE BEDEUTUNG DER REGENERATIVEN ENERGIEN FÜR DIE ENERGIEVERSORGUNG	79
Frank Behrendt und Eckard Dinjus	
4.1 Einleitung	79
4.2 Die elektrische Energieversorgung aus regenerativen Energien	80
4.2.1 Wasserkraft	81
4.2.2 Windkraft	81
4.2.3 Biomasse	81
4.2.4 Photovoltaik	82
4.2.5 Geothermie	82
4.3 Die Gewinnung von Kraftstoffen aus regenerativen Energien	82
4.3.1 Übersicht	82
4.3.2 Erzeugungspfade von Kraftstoffen aus Biomasse	83
4.4 Die Gewinnung von Wasserstoff aus Biomasse	89
4.5 Die stoffliche Nutzung der Biomasse	89
4.6 Zusammenfassung und Ausblick	90



> INHALT

5 DIE RATIONELLE ENERGIENUTZUNG ALS LEITLINIE DER ZUKÜNFTIGEN ENERGIEWIRTSCHAFT	91
Klaus Lucas	
5.1 Ausgangsbedingungen	91
5.2 Bewertung der Energieeffizienz	91
5.3 Von der Effizienzsteigerung zur rationellen Energienutzung	92
5.4 Rationelle Energienutzung in der Industrie	94
5.5 Rationelle Energienutzung in Gebäuden	95
5.6 Rationelle Energienutzung in Kommunen	97
5.7 Fazit	99
6 DAS POTENZIAL DER KERNFUSION	101
Alexander Bradshaw	
6.1 Einleitung	101
6.2 Der Fusionsprozess	102
6.3 ITER – Auf dem Weg zu einem Fusionskraftwerk	103
6.4 Das Fusionskraftwerk: Probleme und Chancen	106
6.5 Schlussbemerkung	109
7 AUTORENVERZEICHNIS	111



1 WEGE ZU EINER NACHHALTIGEN ENERGIEVERSORGUNG IN DEUTSCHLAND

ALFRED VOß

1.1 EINLEITUNG

Im Hinblick auf die Sicherung der Zukunftsfähigkeit des Wirtschafts- und Lebensraumes Deutschland sowie die Vermeidung von Umwelt- und Klimaveränderungen steht die Energieversorgung vor großen Aufgaben. Trotz einer schon länger andauernden Diskussion klaffen die Vorstellungen über die zukünftige Ausgestaltung der Energieversorgung, und hier insbesondere die Rolle einzelner Energieträger und Energietechniken, aber zum Teil sehr weit auseinander.

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die Ergebnisse von szenariogestützten Analysen der Entwicklungsmöglichkeiten der Energieversorgung in Deutschland erläutert. Damit soll eine Orientierung bezüglich der Wege und der Rolle heute bzw. zukünftig verfügbarer Energieoptionen zur Schaffung einer sicheren, wirtschaftlichen, umwelt- und nachweltverträglichen, d.h. dem Leitbild der „nachhaltigen Entwicklung“ entsprechenden Energieversorgung gegeben werden.

1.2 AUSGANGSLAGE

Im Jahr 2005 wurden in Deutschland 14,2 Extra-Joule (EJ) Primärenergie verbraucht. Mineralöl ist mit einem Anteil von 36 Prozent immer noch der wichtigste Energieträger, gefolgt von Erdgas (22,7 Prozent), Steinkohle (12,9 Prozent), Kernenergie (12,5 Prozent) und Braunkohle (11,2 Prozent). Die erneuerbaren Energien tragen mit 4,6 Prozent zur Deckung des Primärenergieverbrauchs bei.

Die Höhe des Primärenergieverbrauchs hat sich in den letzten 15 Jahren trotz einer Zunahme der Wirtschaftsleistung um rund 25 Prozent kaum verändert. Die sich daraus ergebende Reduktion der Energieintensität (Primärenergieverbrauch je Einheit Bruttoinlandsprodukt) hatte ihre wesentlichen Ursachen in den wirtschaftlichen Anpassungsprozessen in den neuen Bundesländern, in wirtschaftsstrukturellen Veränderungen eines rückläufigen Anteils energieintensiver Wirtschaftszweige an der gesamten Wirtschaftsleistung sowie in Effizienzverbesserungen sowohl im Umwandlungsbereich als auch bei den verschiedenen Energieanwendungen. In den ersten Jahren dieses Jahrzehnts lag die Verbesserung der gesamtwirtschaftlichen Energieproduktivität mit 0,9 Prozent p. a. allerdings deutlich niedriger als im Zeitraum von 1990 bis 2000 (2,0 Prozent p. a.).

Deutschland ist zur Bewältigung seines Energiebedarfs in einem hohen Maße auf Energieimporte angewiesen. Der Anteil der Importenergien an der Deckung des Bedarfs an Energieträgern hat dabei im Zeitverlauf von 57 Prozent (1990) auf heute 75 Prozent zugenommen. Die Abhängigkeit von importierten Energieträgern beträgt bei Uran 100 Prozent, bei Mineralöl 97 Prozent, bei Erdgas 83 Prozent und bei der Steinkohle 61 Prozent. Russland ist heute mit gut 30 Prozent der gesamten Energieeinfuhren der wichtigste ausländische Energielieferant.

Der Bruttostromverbrauch ist in Deutschland seit 1990 um 60 Terawattstunden (TWh) auf 611 TWh im Jahr 2005 angestiegen. Eine analoge Entwicklung zeigt sich bei der Bruttostromerzeugung (Abb. 1). Die Kernenergie (26,3 Prozent), die Braunkohle (25 Prozent) und die Steinkohle (21,6 Prozent) sind derzeit die tragenden Säulen der Stromerzeugung. Die Beiträge des Erdgases belaufen sich auf 11,3 Prozent und die der erneuerbaren Energien auf rund 10,1 Prozent. Seit 1990 hat sich die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, insbesondere durch den Ausbau der Windenergie, um rund 41 TWh erhöht. Das entspricht rund zwei Drittel der Zunahme des Stromverbrauchs in diesem Zeitraum.

Die installierte Gesamtleistung des deutschen Kraftwerksparks betrug Ende 2005 rund 132.265 Megawatt elektrische Leistung (MWe). Aufgrund der Altersstruktur der fossilen Kraftwerke und der bestehenden gesetzlichen Laufzeitbegrenzung der Kernkraftwerke ergibt sich ein Kraftwerkserneuerungsbedarf von rund 60.000 MWe bis zum Jahr 2020 und von rund 90.000 MWe bis zum Jahr 2030. Dies bedeutet nicht nur einen erheblichen Investitionsbedarf, sondern bietet auch einen beachtlichen Gestaltungsspielraum.

Wichtigster Energieträger im Wärmemarkt, d.h. für die Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme, ist heute Erdgas, das einen Marktanteil von knapp 50 Prozent hat. Der Anteil des Mineralöls ist seit Jahren rückläufig und beträgt derzeit 23 Prozent (2003). Des Weiteren tragen Strom, Kohle, Fernwärme und erneuerbare Energieträger mit Anteilen zwischen 5 und 10 Prozent zur Deckung des Wärmebedarfs bei.

Der Energiebedarf des Verkehrssektors wird auch heute fast ausschließlich durch Mineralölprodukte gedeckt. Elektrizität, Erdgas und Biokraftstoffe haben trotz absoluter Verbrauchszuwächse immer noch eine vergleichsweise geringe Bedeutung.

Nachdem in den 1990er Jahren die energiebedingten Emissionen von Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffoxiden (NO_x) und Staub unter anderem durch die Rauchgasreinigung bei großen Feuerungsanlagen, die Reduktion des Schwefelgehaltes der Brenn- und Kraftstoffe sowie die flächendeckende Einführung von Katalysatoren bei den Fahrzeugen deutlich gesenkt werden konnten, trat die Reduktion der Treibhausgasemissionen in das Zentrum der umweltpolitischen Bemühungen. Im Rahmen des internationalen Klimaschutzabkommens hat sich die Bundesrepublik Deutschland verpflichtet, den Ausstoß der Treibhausgase für den Zeitraum von 2008 bis 2012 um 21 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren. Mit fast 90 Prozent entfällt der überwiegende Teil der gesamten Treibhausgasemissionen auf den Energiebereich.

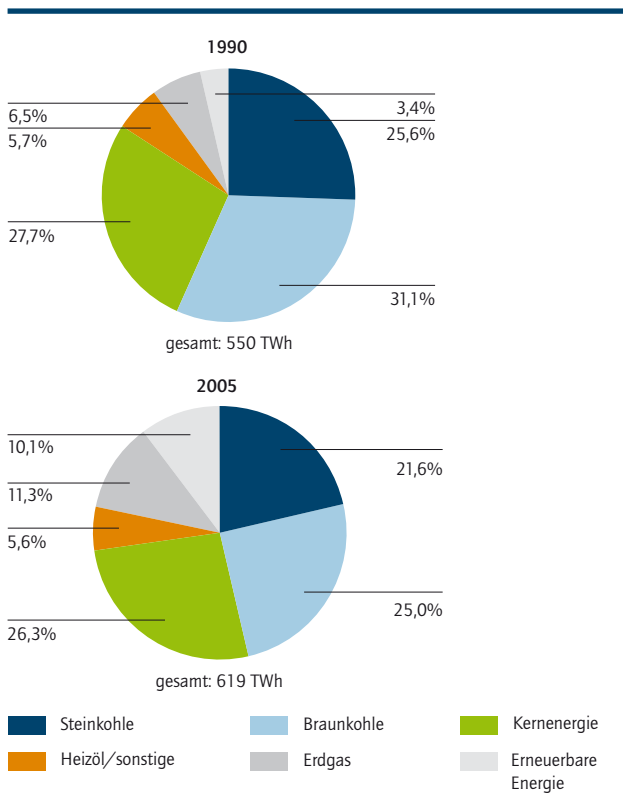


Abb. 1: Brutto-Stromerzeugung in Deutschland.

Für das wichtigste Treibhausgas CO₂ sanken entsprechend der Entwicklung des Primärenergieverbrauchs die energiebedingten Emissionen von 946 Mio. Tonnen im Jahr 1990 auf 786 Mio. Tonnen im Jahr 2005, d.h. um 17 Prozent. Der wesentliche Rückgang fand dabei zu Beginn der 1990er Jahre statt und resultierte aus den wirtschaftlichen und energiewirtschaftlichen Umstrukturierungsprozessen in den Neuen Bundesländern. Seit 2000 bewegen sich die energiebedingten CO₂-Emissionen auf einem gleich bleibenden Niveau. Mit knapp 10 Tonnen CO₂ pro Kopf und Jahr sind die energiebedingten CO₂-Emissionen in Deutschland noch deutlich höher als in den meisten Ländern der Europäischen Union.

Die inländischen Endverbraucherpreise der verschiedenen Energieträger werden im Wesentlichen bestimmt durch die Beschaffungskosten der Primärenergieträger, die Umwandlungs-, Transport- und Verteilungskosten sowie durch staatlich induzierte Steuern und Abgaben. Des Weiteren sind die angebots- und nachfragegesteuerten Preisbildungsmechanismen auf den Märkten Determinanten der Energiepreise.

Die Preise für die Energierohstoffe auf den Weltmärkten sind seit 2000 teilweise deutlich gestiegen (siehe Abb. 2). Der Rohölpreis liegt derzeit auf einem Niveau von ca. 65 US-Dollar pro Barrel und hat damit eine Größenordnung erreicht wie am Anfang der 1980er Jahre (reale Werte). Die mit dem Ölpreis verknüpften Erdgaspreise sind in den letzten Jahren ähnlich stark gestiegen. Eine Erhöhung des Ölpreises um 1 US-Dollar/Barrel belastet die deutsche Energierechnung für Öl und Erdgas mit rund 1 Mrd. Euro. Die Preisentwicklung für importierte Steinkohle verlief insofern anders, dass die Preissteigerungen seit 2000 deutlich moderater ausgefallen sind als bei Öl und Gas. Dennoch liegen sie derzeit um 25 Prozent über dem Preisniveau in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre (reale Werte).

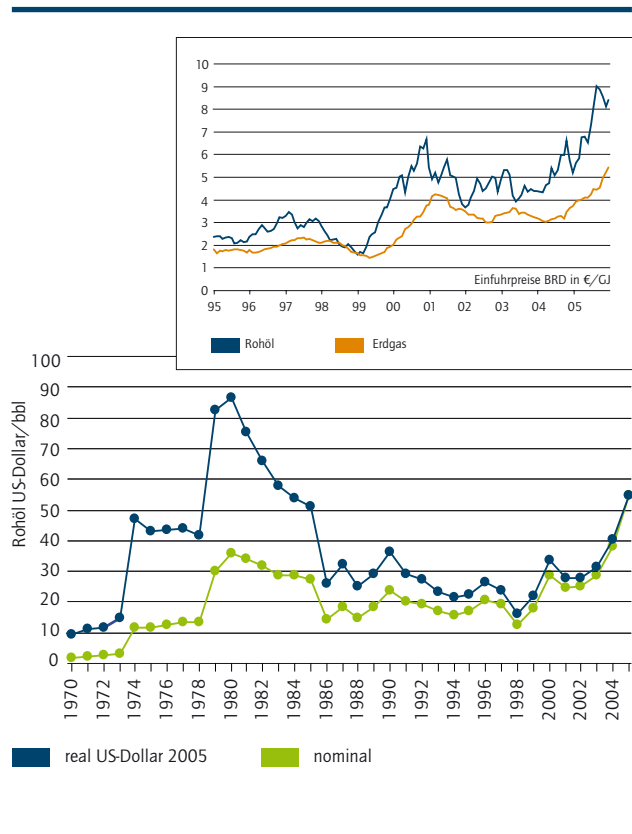


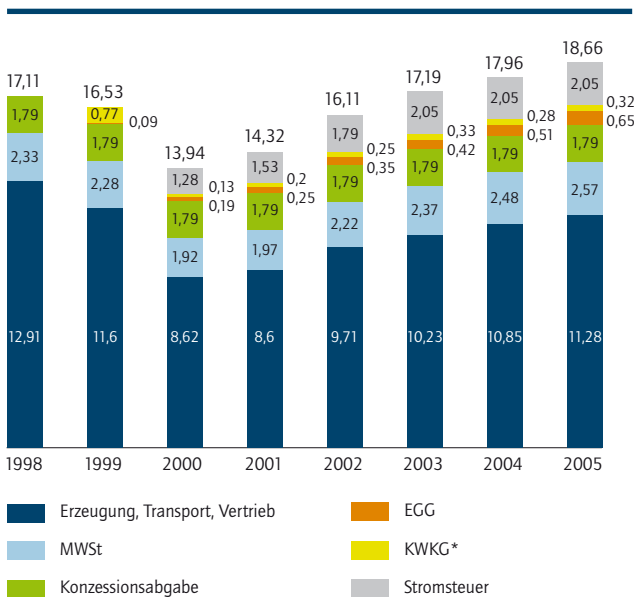
Abb. 2: Entwicklung der Öl- und Gaspreise. Quelle: EIA, BAFA, IER.

Die Entwicklung der Weltmarktpreise von Öl, Erdgas und Steinkohle hat sich unmittelbar auch auf die entsprechenden Energieverbraucherpreise unter Berücksichtigung anderer Kostenfaktoren (Steuer und Abgaben) und ihrer Entwicklung ausgewirkt. Die Preise von Heizöl und Erdgas haben sich in den letzten Jahren sowohl für die Industrie als auch für die privaten Haushalte stark erhöht, zum Teil sogar mehr als verdoppelt (nominal). Die Kraftstoffpreise stiegen wegen des hohen Steueranteils relativ geringer, sind aber heute dennoch mehr als 50 Prozent höher als 1995.

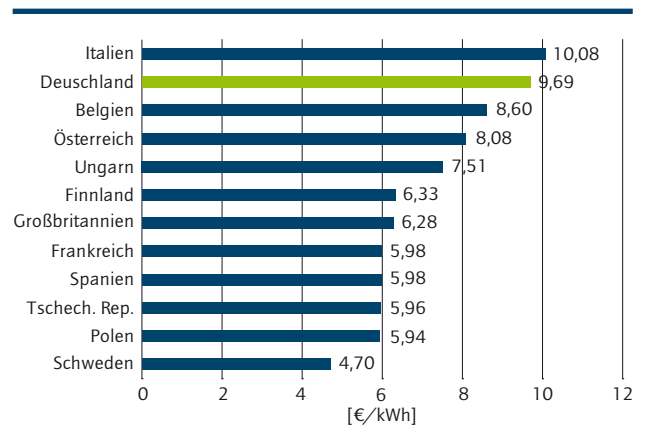
Die Strompreise sind im Zuge der Liberalisierung der Strommärkte im Jahr 1998 zunächst insbesondere für die Industriekunden deutlich gesunken. Seit 2001 sind sie wieder im Anstieg begriffen. Für die Haushaltskunden lagen die Strompreise im Jahr 2005 mit 18,66 Cent pro Kilowattstunde (kWh) wieder über denen im Jahr 1998 (Abb. 3). Neben den durch den Brennstoffpreisanstieg erhöhten Kosten der Erzeugung ist es insbesondere die Zunahme der staatlich verursachten Belastungen (Steuern und Abgaben), die für den Strompreisanstieg verantwortlich sind. Diese haben sich von 25 Prozent im Jahr 1998 auf 40 Prozent im Jahr 2005 erhöht.

Auch bei den Industriestrompreisen sind die deutlichen Preisenkungen in Folge der Liberalisierung heute wieder aufgezehrt. Wichtiger aber ist, dass die Strompreise für die Industrie in Deutschland im europäischen Vergleich hoch sind. Wie Abb. 4 zeigt, sind sie derzeit die zweithöchsten in Europa.

Das heißt: Gemessen an den Strompreisen in wichtigen europäischen Industriestaaten, mit denen wir im Wettbewerb stehen, sind die Industriestrompreise in Deutschland teilweise mehr als 50 Prozent höher.



* Gesamtbelastung durch KWKG ab 2002 gesunken; durch Entlastung Industrie steigende Belastung für Haushalte



Jahresverbrauch 24.000 MWh
Strompreise: 1. Juli 2005, incl. Steuern

Abb. 4: Industriestrompreise in verschiedenen Ländern der EU. Quelle: Eurostat.

Abb. 3: Durchschnittlicher Strompreis eines Drei-Personen-Haushaltes mit einem Jahresverbrauch von 3500 kWh/a in Cent/kWh. Quelle: VDEW.

Als letzter Aspekt zur Beschreibung der Ausgangslage sei noch auf die Energieforschung, oder genauer gesagt: auf die öffentlichen Ausgaben für Forschung und Entwicklung im Energiebereich eingegangen. Abb. 5 zeigt, dass die Aufwendungen des Bundes für Forschung und Entwicklung im Energiebereich in den letzten Jahrzehnten drastisch zurückgegangen sind. Im vereinten Deutschland betragen die Fördermittel des Bundes für die Energieforschung inflationsbereinigt derzeit nur noch etwa 30 Prozent jener Fördermittel, die in den 1970er Jahren in der alten Bundesrepublik zur Verfügung standen. Damit bleibt die staatliche Förderung der Energieforschung in Deutschland weit hinter dem Stellenwert der Energieforschung anderer Industriestaaten zurück.

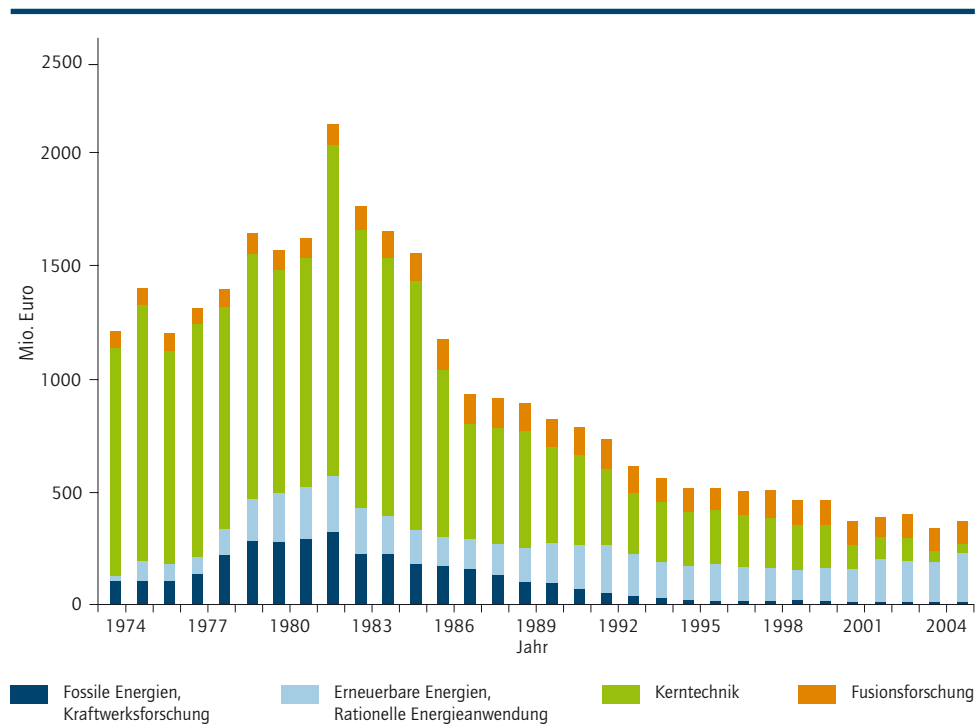


Abb. 5: Forschungs- und Entwicklungsausgaben des Bundes 1974-2005.

Die zuvor skizzierte aktuelle Situation der Energieversorgung in Deutschland ist zum einen das Ergebnis von Entwicklungen auf den internationalen Energiemärkten. Zum anderen resultiert sie aus technologischen Fortschritten bezüglich der Verfügbarkeit von Energierohstoffen sowie bei den Energiewandlungs- und -nutzungstechniken, der wirtschaftlichen Entwicklung und dem energiewirtschaftlichen Ordnungsrahmen. Von besonderer Bedeutung sind jedoch auch Maßnahmen der Politik, etwa hinsichtlich der Förderung von Energieträgern und Energietechniken, ihrer Belastung mit Steuern und Abgaben sowie der Umsetzung von umwelt- und klimapolitischen Zielvorstellungen. Das wird auch in Zukunft so sein.

Im Hinblick auf die Bewältigung der Herausforderungen zur Schaffung einer sicheren, wirtschaftlichen, umwelt- und nachweltverträglichen Energieversorgung stellt sich damit die Frage nach der Ausgestaltung einer zielführenden Energiepolitik, also einem energiepolitischen Gesamtkonzept für Deutschland.

Für die Entwicklung eines solchen Konzepts kommt belastbaren Informationen über die im Zeitablauf möglichen Beiträge von Energieträgern, bekannten und neuen Energiewandlungs- und -nutzungstechniken für eine nachhaltige Energieversorgung eine zentrale Funktion zu. Szenariogestützte Analysen der Entwicklung der Energieversorgung können diesbezügliche Orientierungen zur Fundierung eines energiepolitischen Konzeptes bereitstellen.

1.3 SZENARIEN DER ENERGIEVERSORGUNG IN DEUTSCHLAND

Szenarien sind keine Prognosen, sondern fiktive Zukunftsentwürfe, die Entwicklungen beschreiben, die sich bei Ergreifen bestimmter Maßnahmen und der Vorgabe gewisser Rahmenannahmen als Folge dieser Maßnahmen einstellen. Dabei wird weder die Vergangenheit fort-, noch die Zukunft normativ festgeschrieben, sondern unter Berücksichtigung von Unsicherheiten werden mögliche zukünftige Entwicklungen des Energiesystems analysiert. Ziel ist es, Handlungsnotwendigkeiten abzuleiten, Gestaltungsspielräume aufzuzeigen und Handlungswirkungen möglichst umfassend im Hinblick auf die energiepolitischen Ziele zu explizieren und gegebenenfalls auch auftretende Zielkonflikte aufzuzeigen.

Der Wert von Energieszenarien für die Ausgestaltung einer am Leitbild der Nachhaltigkeit ausgerichteten Energieversorgung ist dabei nicht nur davon abhängig, inwieweit die energetisch-technischen Aspekte der Energiewandlung und Energienutzung zur Bereitstellung von Energiedienstleistungen konsistent beschrieben werden. Er hängt auch davon ab, inwieweit die ökonomischen Implikationen und die umwelt- und ressourcenseitigen Effekte mit erfasst werden.

Angesichts der Vielfalt denkbarer Entwicklungen der Energieversorgung lässt sich mit Szenarien immer nur eine begrenzte Zahl derselben beschreiben. Diese sollten so ausgestaltet sein, dass sie die Hauptlinien der Handlungsmöglichkeiten zur Ausgestaltung der zukünftigen Energieversorgung sowie ihre Wirkungen umfassen. Die begrenzte Zahl von Szenarien, aber auch die notwendigerweise reduzierte Komplexität der Realität bei der Quantifizierung der möglichen Entwicklung der Energieversorgung sowie die bestehenden Unsicherheiten erfordern es, die quantitativen Ergebnisse von Szenarioanalysen qualitativ im Hinblick auf die Fundierung eines Gesamtkonzeptes zu interpretieren.

Für die Analyse und Bewertung der Rolle verschiedener Energieträger und Energietechnologien auf dem Weg zu einer sicheren wirtschaftlichen umwelt- und klimaverträglichen Energieversorgung werden vier Szenarien entwickelt, deren wesentliche Charakteristika in Tabelle 1 dargestellt sind.

SZENARIO	KUMULIERTE MINDERUNGSKOSTEN BIS 2050 [MRD. EURO]	MITTLERE STROMGESTEHUNGSKOSTEN 2050 [CENT/KWH]
Referenzszenario (REF)		4,3
Clean Coal Technologies (CCT)	262	5,4
Präferenz Erneuerbare Energien (PEE)	593	9,8
Effiziente Ressourcennutzung (ERN)	-259	2,5

Tabelle 1: Charakterisierung der Energieszenarien.

Allen Szenarien liegen identische Annahmen bezüglich der demographischen und gesamtwirtschaftlichen Entwicklung zugrunde. Bezüglich der längerfristigen Verfügbarkeit von Erdöl und Erdgas wird davon ausgegangen, dass physisch und politisch bedingte Verknappungen nicht auftreten. Allerdings steigen die realen Erdöl- und Erdgaspreise nach einem Rückgang langfristig deutlich an.

Das Referenzszenario (REF), das im Wesentlichen als Bezugsbasis für die Quantifizierung der Auswirkungen und Implikationen der alternativen Ausgestaltung der Energieversorgung in den anderen Szenarien dient, geht von einer Fortschreibung der derzeitigen energiepolitischen Rahmenbedingungen und Entwicklungstendenzen aus. Die Kernenergienutzung läuft entsprechend der Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Kernkraftwerksbetreibern nach 2020 aus. Eine Verschärfung der Klimaschutzziele über die Regelung im Rahmen des EU-burden-sharing zum Kyoto-Protokoll für die Perioden 2008/2012 wird nicht unterstellt.

In den drei Zielszenarien soll mit Blick auf die ökologische Dimension von Nachhaltigkeit eine weit gehende Reduktion der energiebedingten Treibhausgasemissionen erreicht werden. Im Einzelnen sind die CO₂-Emissionen im Vergleich zu denen des Jahres 1990 bis 2020 um 35 Prozent, bis 2030 um 50 Prozent und bis zum Jahr 2050 um 80 Prozent zu reduzieren. Wesentliche Unterschiede zwischen den Zielszenarien bestehen hinsichtlich der Frage, wie der künftige Bedarf an Energiedienstleistungen unter Beachtung der CO₂-Emissionsgrenzen gedeckt wird.

Im Szenario „Präferenz Erneuerbare Energien“ (PEE) soll die Energieversorgung zunehmend auf der Basis erneuerbarer Energiequellen erfolgen, bei gleichzeitig forcierter Umsetzung von Energieeinsparmaßnahmen. Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen zur Bereitstellung von Strom, Wärme und Treibstoffen soll im Zeitverlauf so ausgeweitet werden, dass im Jahr 2050 mindestens 50 Prozent des gesamten Primärenergieverbrauchs aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt wird. Die Nutzung der Kernenergie läuft aus, und eine Abtrennung und Deponierung von CO₂ aus fossilen Kraftwerken ist nicht zugelassen.

Im zweiten Zielszenario „Clean Coal Technologies“ (CCT) liegt der Schwerpunkt auf der Effizienzsteigerung beim Einsatz fossiler Energieträger. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass zukünftig Technologien zur Kohlenutzung in Kraftwerken zur Verfügung stehen, die eine Abtrennung des anfallenden CO₂ und seine Einlagerung in geologischen Formationen ermöglichen. Wie im Referenzfall läuft die Nutzung der Kernenergie aus.

Das dritte Zielszenario „Effiziente Ressourcennutzung“ (ERN) ist dadurch gekennzeichnet, dass die ökologischen Nachhaltigkeitsziele (Minderung der CO₂-Emissionen) im Hinblick auf die ökonomischen Aspekte der Energieversorgung möglichst effizient erreicht werden sollen. Energietechnologien, die effiziente Beiträge zu einer nachhaltigen Energieversorgung leisten können, werden politisch nicht ausgegrenzt. Eine weitere Nutzung der Kernenergie ist möglich.

Die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und seiner Struktur in den Szenarien zeigt Abb. 6. Obwohl sich das Bruttoinlandsprodukt bis 2050 um 80 Prozent erhöht, ist der Primärenergieverbrauch in allen Szenarien rückläufig. Die Energieintensität des Bruttoinlandsproduktes geht dabei von 6,5 MJ/EUR2000 (Euro-Wert im Jahr 2000) bis 2030 auf Werte zwischen 2,3 und 3,3 MJ/EUR2000 zurück.

Die Unterschiede in der Höhe des sich langfristig einstellenden Primärenergieverbrauchs resultieren vorrangig (wenn man von den Verzerrungen durch die primärenergetische Bewertung der erneuerbaren Energien nach der Wirkungsgradmethode absieht) aus den in den Szenarien unterschiedlichen Kostenniveaus der Energieträger. Im Hinblick auf eine gesamtwirtschaftlich kosteneffiziente Deckung des Energiedienstleistungsbedarfs ergibt sich daraus eine in den Szenarien unterschiedliche Ausschöpfung technisch möglicher Energieeinsparungen.

Neben der am Ende des Betrachtungszeitraums unterschiedlichen Höhe des Primärenergieverbrauchs weist auch die Struktur der genutzten Primärenergien deutliche Unterschiede auf. Im Referenzszenario dominieren die fossilen Energieträger. Kohle, Erdöl und Erdgas decken danach mehr als 85 Prozent des Primärenergieverbrauches im Jahr 2050. Mit rund 700 Mio. Tonnen liegen die CO₂-Emissionen allerdings weit oberhalb der Zielvorgaben in den anderen Szenarien (207,5 Mio. Tonnen). Entsprechend der Philosophie des Szenarios „Präferenz Erneuerbare Energien“ (PEE) decken hier die erneuerbaren Energien 50 Prozent des Primärenergieverbrauches im Jahr 2050. Auf Erdgas und Erdöl entfällt die andere Hälfte. Zur Erreichung der CO₂-Reduktionsziele wird die Nutzung von Kohle fast vollständig zurückgedrängt.

Im Szenario „Clean Coal Technologies“ (CCT) bleibt die Kohle über den gesamten Betrachtungszeitraum ein wichtiger Primärenergieträger (Deckungsanteil 2050: rund 25 Prozent). Die Einhaltung der CO₂-Reduktionsziele wird dabei durch die Nutzung von Techniken zur Abtrennung und Deponierung von CO₂

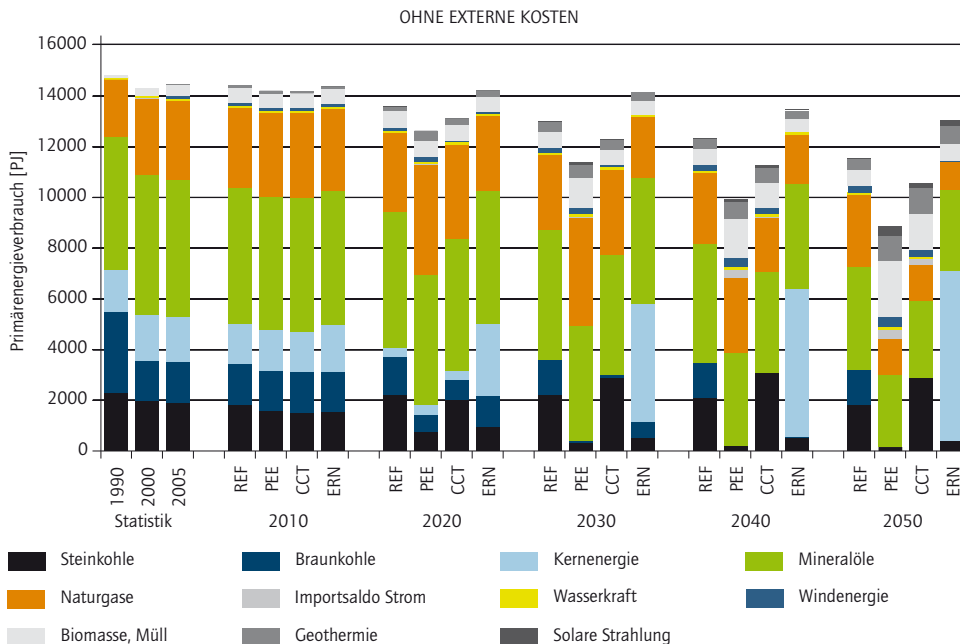


Abb. 6: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern im Szenarienvergleich.

erreicht. Diese sind im Hinblick auf eine CO₂-Minderung kosteneffizienter als eine noch weiter gehende Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Die Kernenergie entwickelt sich im Szenario „Effiziente Ressourcennutzung“ (ERN) langfristig zum wichtigsten Primärenergieträger mit einem Deckungsanteil von 50 Prozent im Jahr 2050. Von den erneuerbaren Energiequellen leisten die Biomasse, die oberflächennahe Geothermie und die solare Wärmeenergie wachsende Beiträge zur Energiebedarfsdeckung. In allen Zielszenarien halbiert sich der Verbrauch von Erdöl und Erdgas über den Betrachtungszeitraum.

Noch stärker als beim Primärenergieverbrauch unterscheiden sich die Entwicklungsmuster der Elektrizitätserzeugung in den Szenarien (Abb. 7). Aufgrund des im Vergleich zur Steinkohle stärkeren Anstiegs der Erdgaspreise und ohne eine Verschärfung der Klimaschutzziele entwickelt sich die Kohle im Referenzszenario zum wichtigsten Energieträger in der Stromerzeugung (Anteil an der Nettostrombereitstellung im Jahr 2050: knapp 70 Prozent). Die Windstromerzeugung verdreifacht sich bis 2050 und leistet den größten Beitrag aller erneuerbaren Energiequellen.

Die Entwicklung im Szenario „Präferenz Erneuerbare Energien“ ist gekennzeichnet durch eine starke Ausweitung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Mit 355 TWh im Jahr 2050 werden 75 Prozent des Stroms aus erneuerbaren Energiequellen bereitgestellt. Die größten Beiträge mit jeweils mehr als 100 TWh entfallen dabei auf die Windenergie und den Import von regenerativem Strom. Aufgrund der CO₂-Restriktionen läuft die Kohlestromerzeugung bis zum Jahr 2040 aus, so dass nur noch Erdgas am Ende des Betrachtungszeitraumes eine signifikante Bedeutung als nichtregenerativer Energieträger in der Stromerzeugung hat.

Im Szenario „Clean Coal Technology“ führt die Verfügbarkeit von Kohlekraftwerktechnologien, die eine Freisetzung von CO₂ im Kraftwerk weitgehend verhindern, ab 2020 zu einem kontinuierlichen Ausbau dieser Kraftwerkstechnologie. Dieser wird erst nach 2040 durch die sich weiter verschärfenden Treibhausgas-minderungs-vorgaben begrenzt. Mit einem Anteil von über 50 Prozent ist Kohle der Hauptträger der Stromerzeugung im Jahr 2050.

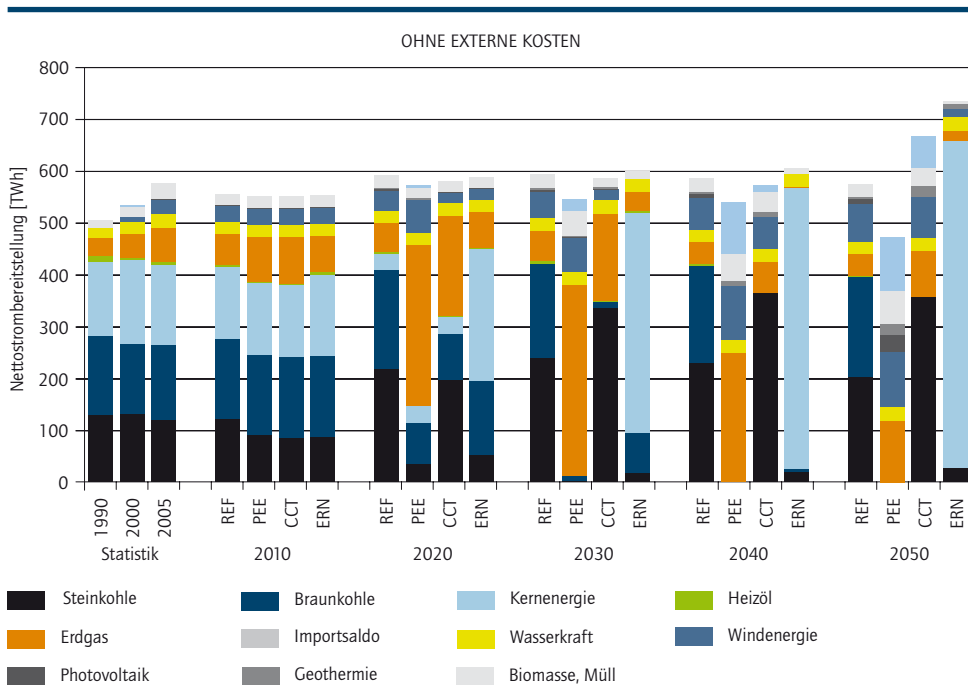


Abb. 7: Nettostrombereitstellung nach Energieträgern im Szenarienvergleich.

Gänzlich anders entwickelt sich die Stromerzeugungsstruktur im Szenario „Effiziente Ressourcennutzung“. Aufgrund der vergleichsweise geringen Stromerzeugungskosten der Kernenergie erfolgt nach 2015 ein stetiger Zubau von Kernkraftwerken, so dass der Anteil der Kernenergie an der Nettostrombereitstellung von derzeit 26 Prozent auf 86 Prozent im Jahr 2050 ansteigt. Die günstigen Stromerzeugungskosten führen in diesem Szenario auch zu einer verstärkten Nutzung von Strom im Wärmebereich (z. B. mittels Wärmepumpen), um durch eine Substitution fossiler Brennstoffe zur Minderung von CO₂-Emissionen beizutragen. Dies ist die wesentliche Ursache für den gegenüber den anderen Szenarien deutlich höheren Stromverbrauch am Ende des Betrachtungszeitraumes.

Zu erwähnen ist noch, dass aufgrund der geringen Volllastbenutzungsstunden der angebotsabhängigen Wind- und photovoltaischen Stromerzeugung und ihrer nur geringen gesicherten Leistung die notwendige Kraftwerkskapazitäten im Szenario „Präferenz Erneuerbare Energie“ um 13 Prozent höher sind als im Szenario „Effiziente Ressourcennutzung“, obwohl die Stromerzeugung gut 30 Prozent niedriger ist.

Die Zielszenarien unterscheiden sich also erheblich hinsichtlich der Entwicklung des Primärenergie- und Stromverbrauchs sowie insbesondere hinsichtlich der Struktur der genutzten Energieträger und der Energiewandlungs- und Energienutzungstechniken.

In allen Zielszenarien erscheint eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 80 Prozent bis 2050 technisch machbar. Bei vergleichbarer Erfüllung ökologischer Nachhaltigkeitsziele liegen die wesentlichen Unterschiede zwischen den Szenarien in den gesamtwirtschaftlichen Kosten der Energieversorgung, also in der ökonomischen Nachhaltigkeitsdimension. Vergleicht man die gesamten Kosten des Energiesystems bis zum Jahr 2050 der Zielszenarien mit denen des Referenzszenarios, so lassen sich die Kostendifferenzen als die energieseitigen Kosten zur Erreichung der Treibhausgasreduktionsziele, d. h. der ökologischen Nachhaltigkeitsziele interpretieren.

Tabelle 2 zeigt, dass in den Szenarien „Präferenz Erneuerbare Energien“ und „Clean Coal Technologies“ die Minderung der energiebedingten CO₂-Emissionen mit kumulierten Mehrkosten von knapp 600 bzw. knapp 260 Mrd. Euro2000 verbunden ist. Im Fall des Szenarios „Effiziente Ressourcennutzung“ ergeben sich gegenüber der Referenzentwicklung Kosteneinsparungen von rund 260 Mrd. Euro. In Abhängigkeit von der jeweiligen Ausgestaltung der zukünftigen Energieversorgung in Deutschland spannen also die energieseitigen Kostenunterschiede zur Erreichung gleicher Klimaschutzziele eine Bandbreite von 850 Mrd. Euro2000 auf.

Dass die drei Zielszenarien bezüglich der Erreichung des Zieles einer wirtschaftlichen Energieversorgung erheblich auseinanderklaffen, lässt sich auch an den jeweiligen Stromerzeugungskosten erkennen (Tabelle 2). Diese spannen im Jahr 2050 eine Bandbreite von 2,5 bis 9,8 Cent2000/kWh auf und sind damit im Szenario „Präferenz Erneuerbare Energien“ fast viermal so hoch wie im Szenario „Effiziente Ressourcennutzung“.

THG-REDUKTIONSZIELE: 2010: -21 Prozent 2020: -35 Prozent 2030: -50 Prozent 2050: -80 Prozent	Referenzszenario (REF)
	Präferenz Erneuerbare Energien (PEE)
	Clean Coal Technologies (CCT)
	Effiziente Ressourcennutzung (ERN)

Tabelle 2: Kumulierte Treibhausgasreduktionskosten und mittlere Stromgestehungskosten der verschiedenen Szenarien.

1.4 SCHLUSSBEMERKUNG

Zur Sicherung der Zukunftsfähigkeit des Wirtschaftsstandortes Deutschland und für die Eingrenzung anthropogener Klimaveränderungen kommt der Ausgestaltung der zukünftigen Energieversorgung eine zentrale Rolle zu. Mit den aus heutiger Sicht verfügbaren Optionen zur Energiebereitstellung sowie den technischen Möglichkeiten zur Energieeffizienzsteigerung zur Bereitstellung von Energiedienstleistungen lassen sich in den nächsten Jahrzehnten auch bei einem weiteren Wachstum des Bruttoinlandsproduktes weitgehende Minderungen der energiebedingten Treibhausgasemissionen erreichen, ohne die Volkswirtschaft mit hohen Energiekosten zu belasten. Die durchgeführten szenariogestützten Analysen alternativer Pfade der Entwicklung der Energieversorgung in Deutschland zeigen, dass Effizienzsteigerungen in allen Bereichen der Energieanwendung und der Energiebereitstellung sowie die Stromerzeugung aus Kernenergie die derzeit wichtigsten Optionen für eine wirtschaftliche und klimaverträgliche Energieversorgung sind.

1.5 WEITERFÜHRENDE LITERATUR

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie/Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Energieversorgung für Deutschland. Statusbericht für den Energiegipfel am 3. April 2006, Berlin 2006.

Enquete-Kommission: Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung, Erster Bericht, Drucksache 14/7509 Berlin, November 2001.

Prognos, IER, WI: Szenarienerstellung, Bericht für die Enquete-Kommission Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung des Deutschen Bundestages, Basel, Juni 2002.

Thöne, E./Fahl, U.: Energiewirtschaftliche Gesamtsituation, in: BWK, Band 58 (2006), Nr. 4, S. 37-50, Hrsg. BWK Das Energie-Fachmagazin, Düsseldorf.

Voß, A.: Energiewende: Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung?, in: Grewe, J./Flandrich, D./Ellwanger, N.: Energiewirtschaft im Wandel. Dieter Schmitt zum 65. Geburtstag, Münster 2004, S. 241-258.

Voß, A., Fahl, U.: Ergebnisse der Arbeit der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ des Deutschen Bundestages, in: Entwicklungslinien der Energietechnik, Tagung Bochum, 4. und 5. September 2002; Tagungsband, VDI-Berichte Band 1714, hrsg. v. VDI-Gesellschaft Energietechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf 2001, S. 29-40.

Wittke, F.: Hohe Energiepreise dämpfen Primärenergieverbrauch in Deutschland, in: Wochenbericht des DIW Berlin 73 (2006) 10, S. 127-131.