



Politikszzenarien für den Klimaschutz

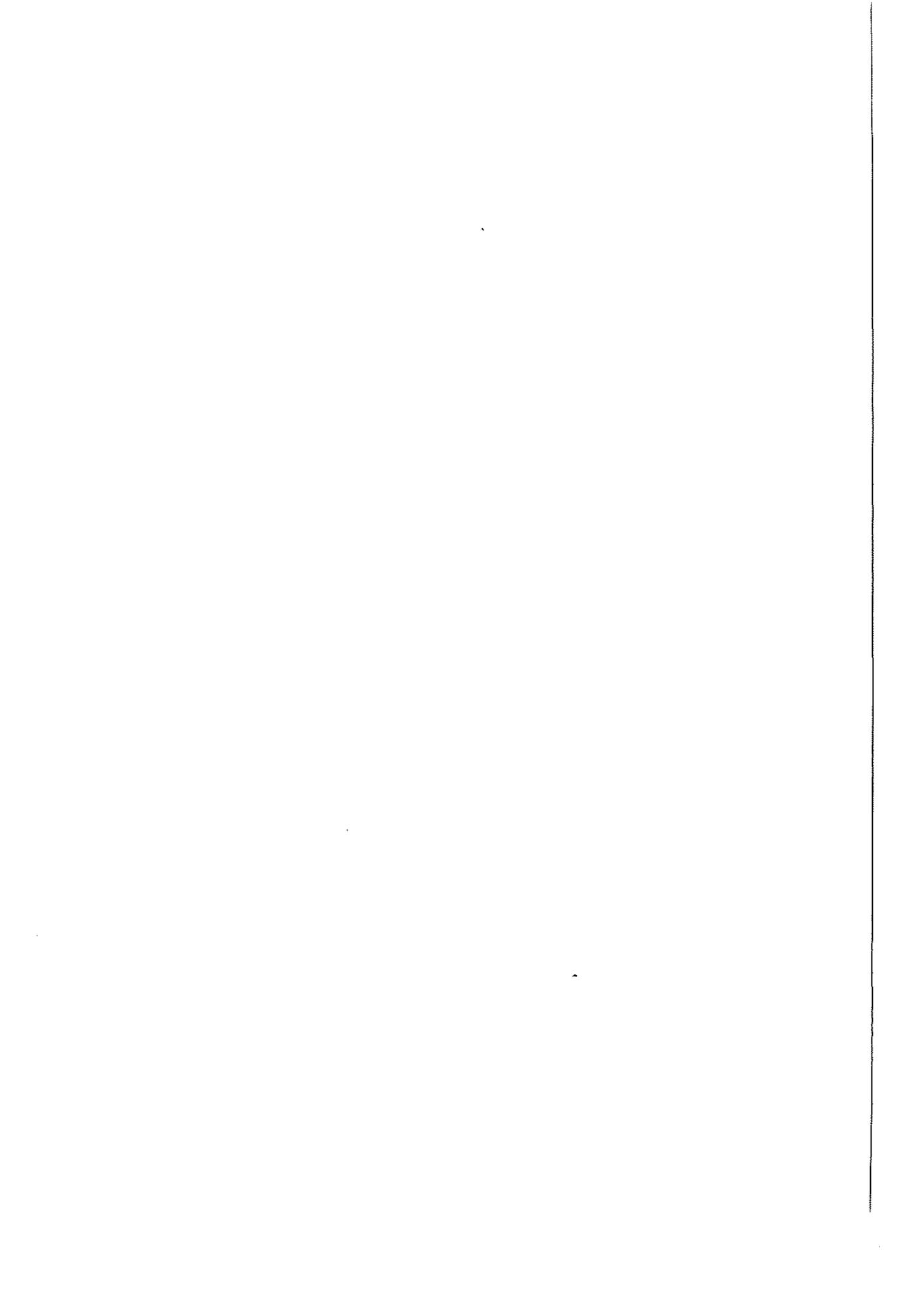
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes

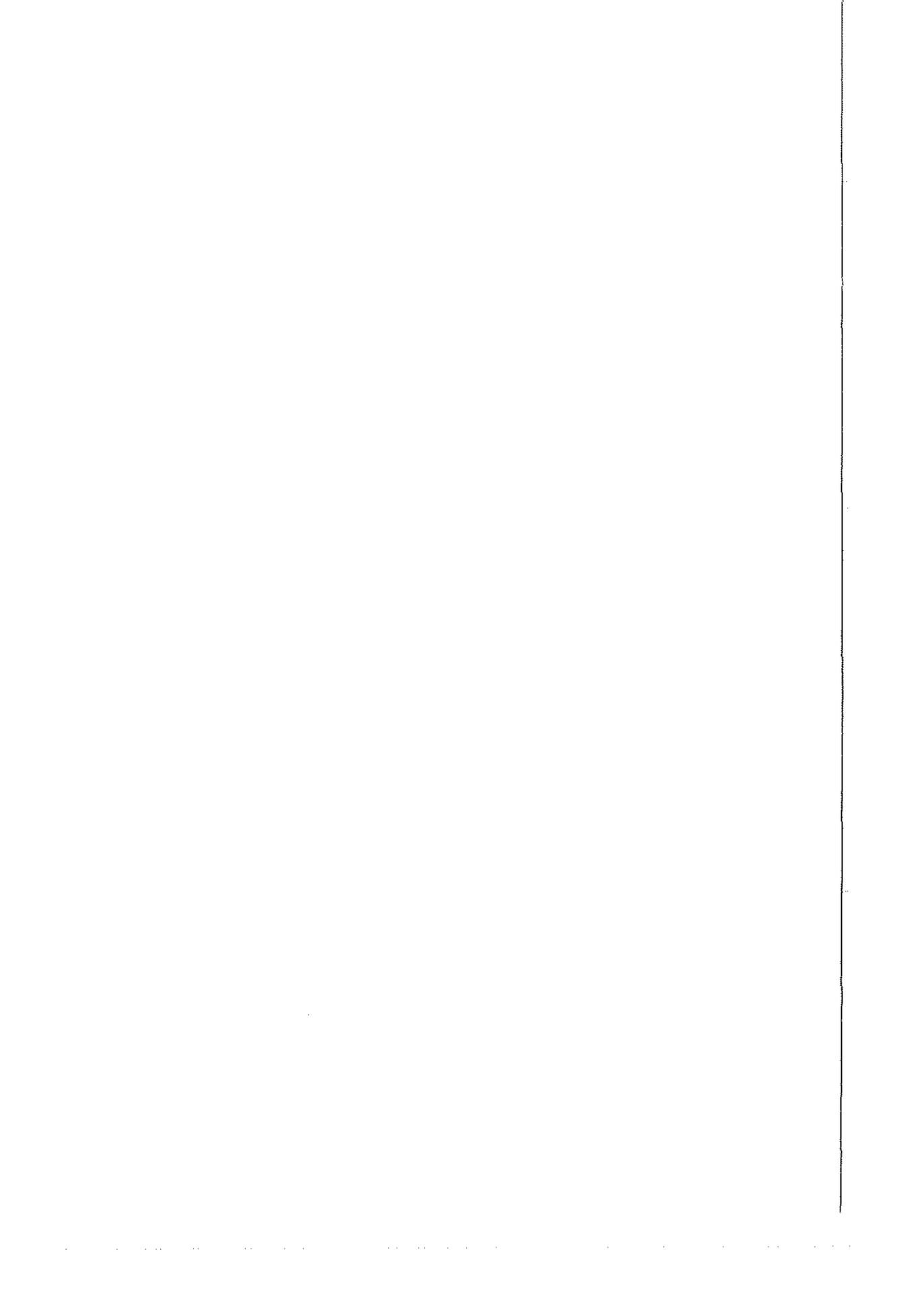
herausgegeben von
G. Stein und B. Strobel

Band 5: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung
von CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2020

von: H.-J. Ziesing, J. Diekmann, R. Hopf (DIW);
W. Katscher, M. Kleemann, A. Kraft, P. Markewitz,
D. Martinsen (FZJ-STE);
E. Jochem, B. Schlomann (FhG-ISI);
M. Cames, F. Chr. Matthes (Öko-Institut)







Forschungszentrum Jülich GmbH
Programmgruppe Systemforschung und
Technologische Entwicklung

Politiksznarien für den Klimaschutz

Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes

Band 5

Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen
in Deutschland bis 2020

herausgegeben von
Gotthard Stein und Bernd Strobel

Federführend:
Hans-Joachim Ziesing
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin

Bearbeiter:
Hans-Joachim Ziesing, Jochen Diekmann, Rainer Hopf
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin

Werner Katscher, Manfred Kleemann, Armin Kraft,
Peter Markewitz, Dag Martinsen
Forschungszentrum Jülich GmbH, Programmgruppe Systemforschung
und Technologische Entwicklung (STE), Jülich

Eberhard Jochem, Barbara Schlomann
Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung
(FhG-ISI), Karlsruhe

Martin Cames, Felix Christian Matthes
Öko-Institut, Berlin

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt/Environment

Band 20

ISSN 1433-5530 ISBN 3-89336-251-7

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Politiksznarien für den Klimaschutz : Untersuchungen im Auftr. des Umweltbundesamtes.
Forschungszentrum Jülich GmbH, Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung.
Hrsg. von Gotthard Stein und Bernd Strobel. - Jülich : Forschungszentrum, Zentralbibliothek
Bd. 5. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2020. /
Bearb.: Hans-Joachim Ziesing . . . - 1999
(Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Umwelt/Environment ; Band 20)
ISBN 3-89336-251-7

Herausgeber und Vertrieb: Forschungszentrum Jülich GmbH
ZENTRALBIBLIOTHEK
D-52425 Jülich
Telefon (0 24 61) 61- 53 68 · Telefax (0 24 61) 61-61 03
e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de
Internet: <http://www.fz-juelich.de/zb>

Umschlaggestaltung: Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright: Forschungszentrum Jülich 1999

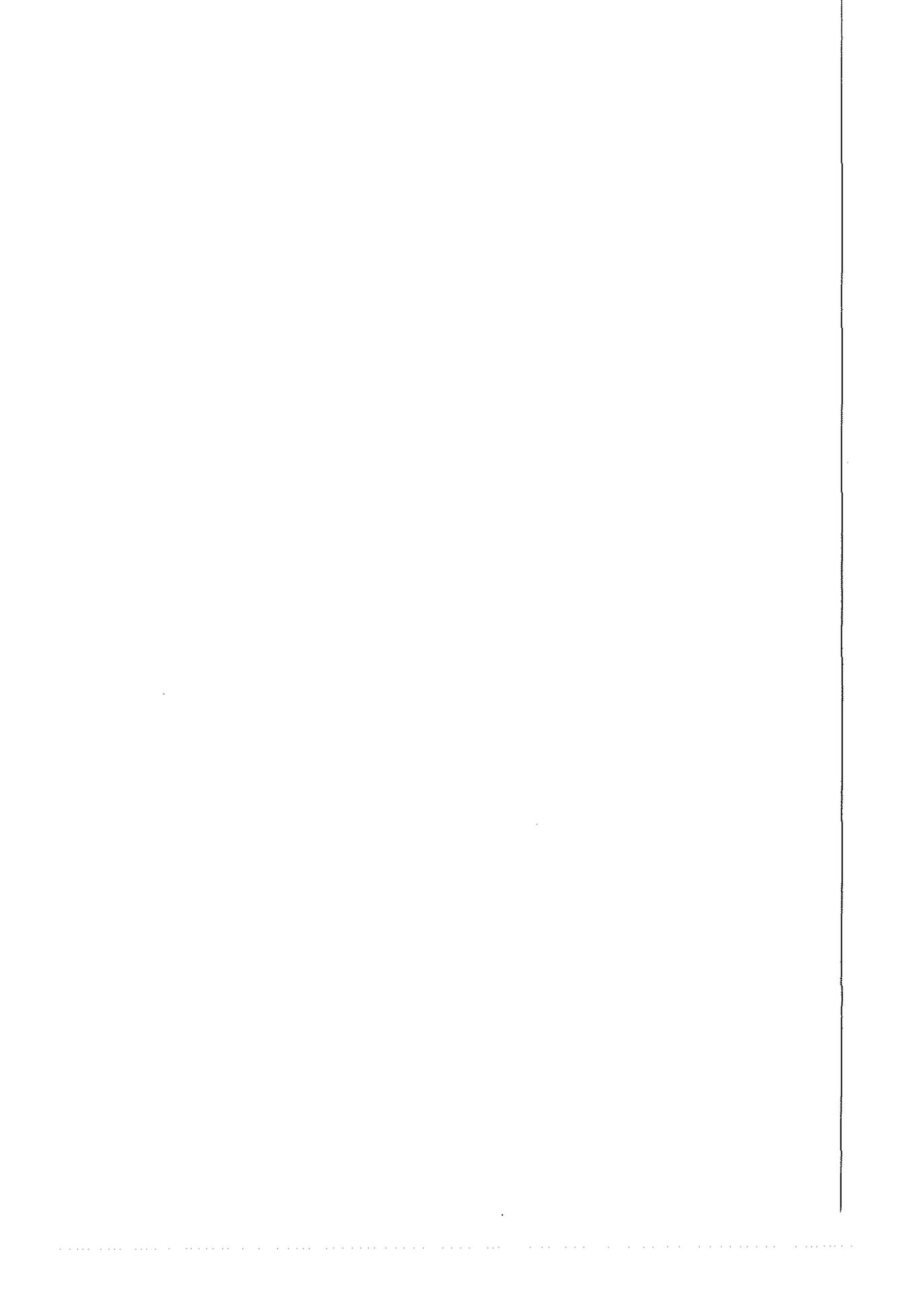
Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt/Environment Band 20

ISSN 1433-5530

ISBN 3-89336-251-7

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 109 05 005 gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



**Vorwort des
Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Jürgen Trittin**

Die Klimaschutzpolitik der Bundesregierung zielt darauf, die energiebedingten CO₂-Emissionen bis zum Jahre 2005 gegenüber 1990 um 25 % zu reduzieren. Hierbei wurden gute Fortschritte erreicht. Die Bundesrepublik Deutschland ist eines der wenigen Länder, das tatsächlich eine Emissionsminderung erreicht hat. Erst im letzten Jahr ist es erneut gelungen, die CO₂-Emission weiter zu senken.

Darüber hinaus hat sich die Bundesregierung im Rahmen der europäischen Lastenteilung zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls vom Dezember 1997 verpflichtet, die sogenannten Emissionen der sogenannten „Kyoto-Gase“ (CO₂, N₂O, CH₄, SF₆, FKW's und H-FKW's) um 21 % im Zeitraum 2008 – 2012 zu mindern (Basis ebenfalls 1990).

Diese Zielsetzungen können nur mit einer sehr anspruchsvollen Klimaschutzpolitik umgesetzt werden, die schrittweise entwickelt und immer wieder auf ihre Auswirkungen überprüft wird.

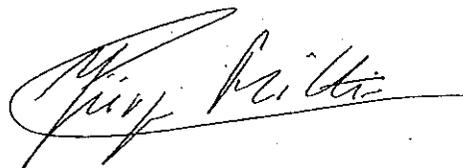
Prognosen und Szenarien sind in diesem Zusammenhang unverzichtbare Hilfsmittel, um eine derart komplexen Strategie, die in alle Bereiche von Wirtschaft und Gesellschaft hineinwirkt, umzusetzen und zu erarbeiten. Sie helfen, eine Vorstellung vom künftig Möglichen zu erhalten und die Auswirkungen bereits wirksamer sowie zusätzlicher Maßnahmen abzuschätzen.

Von besonderer Bedeutung sind Prognosen und Szenarien seit Beginn der Beratungen über die Formulierung einer weltweit abgestimmten Klimaschutzstrategie. So wurden beispielsweise im Rahmen des Zwischenstaatlichen Ausschusses für den Klimawandel (IPCC=Intergovernmental Panel on Climate Change) zahllose Prognosen und Szenarien mit unterschiedlicher

territorialer und zeitlicher Reichweite präsentiert und diskutiert. Letztlich lieferten alle von internationalen und nationalen Einrichtungen vorgelegten Abschätzungen den politischen Entscheidungsträgern eine Grundlage für die Verabschiedung und Weiterentwicklung der Klimarahmenkonvention und des Kyoto-Protokolls.

Auch für die Ausgestaltung der in Deutschland im Jahre 1990 eingeleiteten Klimavorsorgepolitik der Bundesregierung sind Szenarien unverzichtbare Instrumente zur Bilanzierung und Projektion der Entwicklung der Treibhausgasemissionen. Das Bundesumweltministerium konnte sich bei der Konstruktion der nationalen Klimaschutzpolitik auf zahlreiche Studien, Untersuchungen und Abschätzungen stützen. Eine besondere Rolle spielte in diesem Zusammenhang die vom Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin, vom Forschungszentrum Jülich GmbH, Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE), Jülich, dem Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe und dem Öko-Institut, Berlin im Jahre 1997 vorgelegte Studie „Politiksznarien für den Klimaschutz I“. Diese erste, auf den Zeithorizont 2005 gerichtete Untersuchung wurde in den letzten Jahren im Auftrag des Bundesumweltministeriums und des Umweltbundesamtes erweitert. „Politiksznarien II“ blicken nun bis in das Jahr 2020 und geben einen Eindruck von der Gestalt und Struktur einer mittelfristigen nationalen Klimaschutzpolitik. Diese Arbeit wird – das lässt sich bereits heute feststellen – eine zentrale Grundlage für das aktualisierte Klimaschutzprogramm der Bundesregierung bilden, das Bundeskanzler Gerhard Schröder vor der 5. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention im Oktober 1999 für Mitte 2000 angekündigt hat.

Ich möchte ausdrücklich allen Autorinnen und Autoren für die hervorragende Arbeit danken, die die Bundesregierung in die Lage versetzt, ihre Klimaschutzpolitik im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung systematisch fortzuentwickeln und zu überprüfen.



Jürgen Trittin

Berlin, 31. Januar 2000

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einführung und methodisches Vorgehen	1
1.1	Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2	Hinweise zum methodischen Vorgehen	5
1.3	Literatur	10
2	Analysen der Reduktion von CO₂-Emissionen mit Hilfe des IKARUS-Modells.....	11
2.1	Charakteristika des Optimierungsmodells	11
2.2	Rahmenbedingungen für die Modellszenarien	12
2.2.1	Demographische und gesamtwirtschaftliche Entwicklung	12
2.2.2	Entwicklung der Preise für Importenergieträger	15
2.2.3	Produktionsentwicklung im verarbeitenden Gewerbe	16
Exkurs:	Schätzungen/Berechnungen der Nettoproduktionswerte für die Branchen und Produktgruppen in der Struktur des IKARUS-LP- Modells	18
2.2.4	Annahmen für den Sektor Kleinverbraucher	20
2.2.5	Annahmen zur Entwicklung im Verkehr	25
2.2.6	Definition der Szenarien, CO ₂ -Reduktionsvorgaben sowie wichtige energiepolitische und technische Begrenzungen.....	27
2.3	Ergebnisse der Modellrechnungen.....	30
2.3.1	Das Modell-Basis-Szenario	30
2.3.2	Reduktionsszenarien	37
2.3.3	Kosten der CO ₂ -Emissionsminderung	47
2.3.4	Vergleich mit aktuellen Prognosen	52
2.4	Literatur	57

3	Sektorale Referenzentwicklung und Wirkungen politischer Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen	58
3.1	Methodische Vorbemerkungen zu den sektoralen Analysen.....	58
3.2	Industrie	59
3.2.1	Vorbemerkungen	59
3.2.2	Referenz-Szenario für den Sektor Industrie.....	61
3.2.3	Diskussion der Reduktions-Szenarien sowie die politischen Maßnahmen zu ihrer Realisierung	64
3.2.3.1	Das 30%-Reduktions-Szenario	65
3.2.3.2	Das 40 %-Reduktions-Szenario	69
3.2.4	Fazit	71
3.2.5	Literatur	72
3.3	Kleinverbraucher	73
3.3.1	Vorbemerkungen.....	73
3.3.2	Referenz-Szenario für den Sektor Kleinverbraucher	74
3.3.2	Diskussion der Reduktions-Szenarien sowie die politischen Maßnahmen zu ihrer Realisierung	77
3.3.2.1	Das 30 %-Reduktions-Szenario	77
3.3.2.2	Das 40%-Reduktions-Szenario	80
3.3.4	Fazit für den Sektor Kleinverbraucher.....	82
3.3.5	Literatur	83
3.4	Haushalte	84
3.4.1	Raumwärme und Warmwasser.....	84
3.4.1.1	Technische Sparpotentiale an Einzelgebäuden.....	84
3.4.1.2	Wirtschaftliche Sparpotentiale im Bestand	88
3.4.1.3	Hemmnisse bei der Ausschöpfung der Sparpotentiale.....	91
3.4.1.4	Referenz-Szenario für den Haushaltssektor	92
3.4.1.5	Diskussion der Reduktionsszenarien sowie politische Maßnahmen zu ihrer Realisierung	93
3.4.1.6	Literatur	99

3.4.2	Andere elektrische Geräte.....	101
3.4.2.1	Vorbemerkungen.....	101
3.4.2.2	Referenz-Szenario für die „Anderen Haushaltsgeräte“.....	102
3.4.2.3	Diskussion der Reduktions-Szenarien sowie die politischen Maßnahmen zu ihrer Realisierung.....	108
3.4.2.4	Fazit.....	112
3.4.2.5	Literatur.....	114
3.5	Verkehr.....	115
3.5.1	Vorbemerkungen.....	115
3.5.2	Referenz-Szenario für den Sektor Verkehr.....	118
3.5.3	Diskussion der Reduktionsszenarien sowie die politischen Maßnahmen zu ihrer Realisierung.....	121
3.5.4	Ein 40%-Reduktions-Szenario als gezielte Strategie zur Minderung der verkehrsbedingten CO ₂ -Emissionen.....	126
3.5.5	Literatur.....	135
3.6	Erneuerbare Energien.....	136
3.6.1	Vorbemerkung.....	136
3.6.2	Nutzung erneuerbarer Energien im Referenz-Szenario.....	137
3.6.3	Diskussion der Reduktions-Szenarien sowie die politischen Maßnahmen zu ihrer Realisierung.....	138
3.6.4	Fazit.....	142
3.6.5	Literatur.....	143
3.7	Umwandlungssektor.....	144
3.7.1	Vorbemerkungen.....	144
3.7.2	Referenz-Szenario für die Elektrizitätswirtschaft.....	145
3.7.3	Das 30%-Reduktions-Szenario.....	150
3.7.4	Das 40%-Reduktions-Szenario.....	154
3.7.5	Fazit.....	158

4	Gesamtbetrachtung der Reduktionsszenarien im Vergleich zum Referenz-Szenario.....	162
4.1	Vorbemerkungen.....	162
4.2	Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen im Referenz-Szenario.....	162
4.3	Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen in den Reduktions- szenarien	166
4.3.1	Das 30%-Reduktions-Szenario	166
4.3.2	Das 40%-Reduktions-Szenario	169
4.4	Zur Interpretation der quantitativen Ergebnisse.....	174
4.5	Kostenaspekte der Emissionsminderung	175
4.6	Literatur	180
5	Zusammenfassung und politische Schlußfolgerungen	181

ANHANG

Vergleich der IKARUS-Daten mit den Angaben der Energie- und Emissionsstatistik	197
---	-----

Verzeichnis der Tabellen

2-1	Demographische und gesamtwirtschaftliche Rahmendaten für die IKARUS-Modellszenarien.....	13
2-2	Annahmen zu den Preisen für die wichtigsten Importenergieträger	16
2-3	Annahmen zur Entwicklung der Nettoproduktion im verarbeitenden Gewerbe.....	17
2-4	Spezifische Nettoproduktionswerte ausgewählter energieintensiver Produktgruppen des IKARUS-LP-Modells 1995 und ihre strukturell bedingten Veränderungen bis 2005 und 2020	19
2-5	Veränderung der Endenergieintensität 1978/1994 ausgewählter Industriebranchen und geschätzte Veränderungen aufgrund intra-industriellen Strukturwandels von 1995 bis 2020	20
2-6	Entwicklung der Erwerbstätigenzahl im Sektor Kleinverbraucher in Deutschland von 1995 bis 2020.....	24
2-7	Annahmen zur Entwicklung der Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr in Deutschland bis 2020	26
2-8	Festlegung der CO ₂ -Reduktionsvorgaben.....	27
2-9	Wichtige energiepolitische und technische Begrenzungen in allen Szenarien	29
2-10	Struktur des Primärenergieverbrauchs bis zum Jahre 2020 im Modell-Basis-Szenario	31
2-11	Endenergieverbrauch nach Energieträgern bis zum Jahre 2020 im Modell-Basis-Szenario	32
2-12	Stromverbrauch nach Sektoren bis zum Jahre 2020 im Modell-Basis-Szenario	34
2-13	CO ₂ -Emissionen nach Sektoren bis zum Jahre 2020 im Modell-Basis-Szenario	36
2-14	CO ₂ -Emissionen im Modell-Basis-Szenario und in den Reduktionsszenarien	37
2-15	Sektorale CO ₂ -Minderungsbeiträge in den Reduktionsszenarien im Vergleich mit dem Modell-Basis-Szenario	38
2-16a	Strukturelle Entwicklungen bis zum Jahre 2020 im Modell-Basis-Szenario nach Sektoren	39
2-16b	Überblick der wichtigsten Minderungsmaßnahmen in den Reduktionsszenarien	40/41
2-18	Änderungen des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern in den Reduktionsszenarien gegenüber dem Modell-Basis-Szenario	42

2-19	Änderungen des Endenergieverbrauchs nach Sektoren in den Reduktionsszenarien gegenüber dem Modell-Basis-Szenario.....	44
2-20	Sektorale Mehrkosten pro Jahr in den Reduktionsszenarien gegenüber dem Modell-Basis-Szenario	48
2-21	Durchschnittliche Kosten und Grenzkosten der CO ₂ -Minderung.....	51
2-22	Endenergieverbrauch nach Sektoren im Modell-Basis-Szenario und in den LP-Reduktionsszenarien sowie nach der Prognos/EWI-Trendskizze	54
2-23	Stromverbrauch nach Sektoren im Modell-Basis-Szenario und in den LP-Reduktionsszenarien sowie nach der Prognos/EWI-Trendskizze	55
2-24	Primärenergieverbrauch nach Energieträgern im Modell-Basis-Szenario und in den LP-Reduktionsszenarien sowie nach der Prognos/EWI-Trendskizze und der ESSO-Prognose	56
3.2-1	Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der direkten CO ₂ -Emissionen im Sektor Industrie im Referenz-Szenario.....	63
3.2-2	Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der direkten CO ₂ -Emissionen im Sektor Industrie im 30%-Reduktions-Szenario	66
3.2-3	Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der direkten CO ₂ -Emissionen im Sektor Industrie im 40%-Reduktions-Szenario	70
3.3-1	Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der CO ₂ -Emissionen im Sektor Kleinverbraucher im Referenz-Szenario.....	75
3.3-2	Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der CO ₂ -Emissionen im Sektor Kleinverbraucher im 30%-Reduktions-Szenario	78
3.3-3	Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der CO ₂ -Emissionen im Sektor Kleinverbraucher im 40%-Reduktions-Szenario.....	81
3.4.1-1	Vergleich der relativen Energieeinsparpotentiale an Einzelgebäuden	87
3.4.1-2	Wirtschaftlichkeitsvergleich für die Außenwanddämmung	90
3.4.1-3	Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der CO ₂ -Emissionen im Sektor Haushalte (Raumwärme und Warmwasser) im Referenz-Szenario	94
3.4.1-4	Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der CO ₂ -Emissionen im Sektor Haushalte (Raumwärme und Warmwasser) im 30%-Reduktionsszenario	96

3.4.1-5	Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der CO ₂ -Emissionen im Sektor Haushalte (Raumwärme und Warmwasser) im 40%-Reduktionsszenario.....	97
3.4.1-6	Einfluß einer Energiesteuer auf die Energiekosteneinsparung durch Außenwanddämmung.....	98
3.4.2-1	Stromverbrauch der privaten Haushalte von 1991 bis 1996.....	101
3.4.2-2	Ergebnisse des Modell-Basis-Szenarios für die privaten Haushalte.....	103
3.4.2-3	Entwicklung von Ausstattungsraten und Gerätebestand in Deutschland bis 2020	105
3.4.2-4	Entwicklung des spezifischen sowie des gesamten Stromverbrauchs ausgewählter Haushaltsgeräte in Deutschland im Referenz-Szenario bis 2020	106
3.4.2-5	Stromverbrauch der anderen elektrischen Haushaltsgeräte und des Energiebedarfs zum Kochen im Referenz-Szenario bis 2020.....	108
3.4.2-6	Entwicklung der Höchstverbrauchsstandards sowie des durchschnittlichen Stromverbrauchs ausgewählter Haushaltsgeräte in Deutschland im 40%-Reduktions-Szenario bis 2020	110
3.4.2-7	Entwicklung des gesamten Stromverbrauchs ausgewählter Haushaltsgeräte in Deutschland im 40%-Reduktions-Szenario bis 2020.....	111
3.4.2-8	Gesamter Energiebedarf der Geräte (ohne Raumwärme und Warmwasserbereitung sowie einschließlich Kochherde) in den Reduktionsszenarien bis 2020.....	113
3.5-1	Annahmen zur Entwicklung der spezifischen Energieverbrauchs- werte nach Verkehrsmitteln im Personenverkehr	117
3.5-2	Annahmen zur Entwicklung der spezifischen Energieverbrauchs- werte nach Verkehrsmitteln im Güterverkehr	118
3.5-3	Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr nach Energie- trägern und Verkehrsträgern sowie der direkten CO ₂ -Emissionen im Referenz-Szenario.....	119
3.5-4	Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr nach Energie- trägern und Verkehrsträgern sowie der direkten CO ₂ -Emissionen im 30%-Reduktions-Szenario.....	123
3.5-5	Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr nach Energie- trägern und Verkehrsträgern sowie der direkten CO ₂ -Emissionen im 40%-Reduktions-Szenario.....	124
3.5-6	Variante zum Modal Split gegenüber den Modell-Szenarien	126
3.5-7	Variante zur Struktur der Verkehrsleistungen nach Fahrzeug- typen im 40%-Reduktions-Szenario	127
3.5-8	Energieverbrauch in der Variante zum 40%-Reduktions- Szenario nach Verkehrs- und Energieträgern.....	129

VIII

3.5-9	Verkehrsbedingte CO ₂ -Emissionen in der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario nach Verkehrs- und Energieträgern.....	130
3.5-10	Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr nach Energieträgern und Verkehrsträgern sowie der direkten CO ₂ -Emissionen in der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario	131
3.5-11	Auswirkungen der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario im Verkehr auf die Veränderungen der CO ₂ -Emissionen in den anderen Sektoren.....	134
3.5-12	Auswirkungen der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario im Verkehr auf die Kosten der CO ₂ -Emissionen im Verkehr und in den anderen Sektoren	134
3.6-1	Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland im Referenz-Szenario	137
3.6-2	Beitrag erneuerbarer Energien zur Verminderung der CO ₂ -Emissionen im Referenz-Szenario und im Modell-Basis-Szenario	138
3.6-3	Nutzung erneuerbarer Energien in den Reduktionsszenarien	139
3.6-4	Geschätzter Beitrag zur Verminderung der CO ₂ -Emissionen durch erneuerbare Energien in den Reduktionsszenarien.....	141
3.7-1	Daten zur Stromerzeugung 1990 und 1995 nach den IKARUS-Modellrechnungen	144
3.7-2	Entwicklung der Stromnachfrage im Basis- und Referenz-Szenario	146
3.7-3	Entwicklung der Kapazitäten (ohne KWK-Anlagen) und der Netto-Stromerzeugung der Kraftwerke im Modell-Basis-Szenario und im Referenz-Szenario	148
3.7-4	Entwicklung des Energieeinsatzes zur Stromerzeugung (ohne KWK-Anlagen) und der damit verbundenen direkten CO ₂ -Emissionen im Referenz-Szenario.....	149
3.7-5	Entwicklung der Stromnachfrage im 30%-Reduktions-Szenario	150
3.7-6	Entwicklung der Kapazitäten (ohne KWK-Anlagen) und der Netto-Stromerzeugung der Kraftwerke im 30%-Reduktions-Szenario	151
3.7-7	Entwicklung des Energieeinsatzes zur Stromerzeugung (ohne KWK-Anlagen) und der damit verbundenen direkten CO ₂ -Emissionen im 30%-Reduktions-Szenario.....	153
3.7-8	Entwicklung der Stromnachfrage im 40%-Reduktions-Szenario	154
3.7-9	Entwicklung der Kapazitäten (ohne KWK-Anlagen) und der Netto-Stromerzeugung der Kraftwerke im 40%-Reduktions-Szenario	155
3.7-10	Entwicklung des Energieeinsatzes zur Stromerzeugung (ohne KWK-Anlagen) und der damit verbundenen direkten CO ₂ -Emissionen im 40%-Reduktions-Szenario.....	157

3.7-11	Entwicklung der CO ₂ -Emissionen im Umwandlungssektor insgesamt in den Szenarien.....	161
4-1	Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen nach Sektoren im Referenz-Szenario.....	163
4-2	Veränderungen der CO ₂ -Emissionen innerhalb des Zeitraumes von 1990 bis 2020 nach Sektoren im Referenz-Szenario.....	165
4-3	Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen nach Sektoren im 30%-Reduktions-Szenario.....	167
4-4	Veränderungen der CO ₂ -Emissionen innerhalb des Zeitraumes von 1990 bis 2020 nach Sektoren im 30%-Reduktions-Szenario.....	169
4-5	Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen nach Sektoren im 40%-Reduktions-Szenario.....	170
4-6	Veränderungen der CO ₂ -Emissionen innerhalb des Zeitraumes von 1990 bis 2020 nach Sektoren im 40%-Reduktions-Szenario.....	172
4-7	Absolute und spezifische CO ₂ -Vermeidungskosten verschiedener Reduktionsläufe für die Jahre 2010 und 2020 gegenüber dem Modell-Basis-Szenario und dem Referenz-Szenario.....	178
5-1	Demographische und gesamtwirtschaftliche Rahmendaten	184
5-2	Entwicklung der CO ₂ -Emissionen in den Szenarien	184
5-3	Veränderungen der gesamtwirtschaftlichen Energieintensität und Emissionsintensität sowie des CO ₂ -Gehaltes des Energieverbrauchs in den Szenarien.....	188
5-4	Sektorale Mehrkosten pro Jahr in den Reduktionsszenarien gegenüber dem Modell-Basis-Szenario	189

Verzeichnis der Abbildungen

1-1	CO ₂ -Emissionen in Deutschland bis 2005 in den Politik-Szenarien.....	2
1-2	Entwicklung der temperaturbereinigten CO ₂ -Emissionen in Deutschland von 1990 bis 1998 sowie in den Politik-Szenarien bis 2005	3
1-3	Veränderungen der CO ₂ -Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2020 nach aktuellen Vorausschätzungen.....	4
2-1	Primärenergieverbrauch nach Energieträgern bis zum Jahre 2020 im Modell-Basis-Szenario	31
2-2	Endenergieverbrauch nach Sektoren bis zum Jahre 2020 im Modell-Basis-Szenario	33

2-3	Stromerzeugung nach Energieträgern bis zum Jahre 2020 im Modell-Basis-Szenario	35
2-4	Kraftwerkskapazitäten der öffentlichen Versorgung im Modell-Basis-Szenario bis zum Jahre 2020.....	36
2-5	Primärenergieverbrauch nach Energieträgern im Modell-Basis-Szenario und in den Reduktionsszenarien.....	43
2-6	Endenergieverbrauch nach Sektoren im Modell-Basis-Szenario und in den Reduktionsszenarien	44
2-7	Öffentliche Netto-Stromerzeugung im Modell-Basis-Szenario und in den Reduktionsszenarien	45
2-8	Installierte Leistung (netto) des öffentlichen Kraftwerksparks im Modell-Basis-Szenario und in den Reduktionsszenarien.....	47
2-9	Durchschnittliche Kosten und Grenzkosten der CO ₂ -Minderung.....	51
2-10	Veränderungen der CO ₂ -Emissionen insgesamt im Modell-Basis- Szenario und in den LP-Reduktionsszenarien sowie nach der Prognos/EWI-Trendskizze und der ESSO-Prognose	52
3.4.2-1	Stromverbrauch anderer Geräte im Modell-Basis-Szenario und nach Prognos	104
3.4.2-2	Stromverbrauch von Haushaltsgeräten im Modell-Basis-Szenario und im Referenz-Szenario sowie nach Prognos.....	107
3.5-1	Abweichungen des Energieverbrauchs im Verkehr im Modell-Basis- Szenario von demjenigen in der Prognos/EWI-Trendskizze.....	120
3.5-2	Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr in den Szenarien.....	122
3.5-3	Abweichungen des Energieverbrauchsniveaus im Verkehr in den Reduktionsszenarien vom Modell-Basis-Szenario.....	122
3.5-4	Verkehrsbedingte CO ₂ -Emissionen in den Modell-Szenarien und in der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario	130
3.7-1	Struktur der CO ₂ -Emissionen durch die Stromerzeugung (ohne KWK-Anlagen) nach Energieträgern im 40%-Reduktions-Szenario.....	158
3.7-2	Entwicklung der CO ₂ -Emissionen durch die Stromerzeugung (ohne KWK-Anlagen) in den Szenarien.....	159
3.7-3	Entwicklung der Struktur der Stromerzeugung (ohne KWK-Anlagen) nach Energieträgern in den Szenarien	159
3.7-4	Entwicklung der spezifischen CO ₂ -Emissionen bei der Strom- erzeugung (ohne KWK-Anlagen) in den Szenarien.....	160
4-1	Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen im Referenz-Szenario	164
4-2	Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen im 30%-Reduktions- Szenario.....	168

4-3	Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen im 40%-Reduktions-Szenario.....	171
4-4	Entwicklung des Energieverbrauchs in den Szenarien	173
4-5	Entwicklung der CO ₂ -Emissionen in den Szenarien	173
4-6	Durchschnittliche CO ₂ -Vermeidungskosten in den Reduktions- Szenarien im Vergleich zum Modell-Basis-Szenario 2005 bis 2020.....	177
5-1	Energieverbrauch in den Szenarien.....	185
5-2	CO ₂ -Emissionen in den Szenarien.....	185
5-3	Veränderungen der CO ₂ -Emissionen in den Szenarien von 1990 bis 2005 und von 1990 bis 2020	186

Verzeichnis der Übersichten

1-1	Kennzeichnung der untersuchten Szenarien.....	7
1-2	Annahmen und Ergebnisse der untersuchten Szenarien im Hinblick auf die Nutzung der Kernenergie	8
5-1	Kennzeichnung der untersuchten Szenarien	183
5-2	Überblick über die wichtigsten Maßnahmen und Instrumente für das 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung im Sektor Industrie	192
5-3	Überblick über die wichtigsten Maßnahmen und Instrumente für das 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung im Sektor Haushalte.....	193
5-4	Überblick über die wichtigsten Maßnahmen und Instrumente für das 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung im Sektor Kleinverbraucher	194
5-5	Überblick über die wichtigsten Maßnahmen und Instrumente für das 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung im Sektor Verkehr	195
5-6	Überblick über die wichtigsten Maßnahmen und Instrumente für das 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung im Umwandlungssektor (Elektrizitätswirtschaft)	196

Tabellen im Anhang

1	Differenzen der Daten zum Endenergieverbrauch nach dem IKARUS-Modell und nach den Energiebilanzen für 1990 und 1995 in Deutschland	199
2	Differenzen der Daten zum Stromverbrauch nach dem IKARUS-Modell und nach den Energiebilanzen für 1990 und 1995 in Deutschland	200
3	Differenzen der Daten zu den Stromerzeugungs-kapazitäten nach dem IKARUS-Modell und nach der amtlichen Statistik für 1990 und 1995 in Deutschland.....	200
4	Differenzen der Daten zum Primärenergieverbrauch nach dem IKARUS-Modell und nach den Energiebilanzen für 1990 und 1995 in Deutschland	201
5	Differenzen der Daten zu den CO ₂ -Emissionen nach dem IKARUS-Modell und nach Umweltbundesamt/ Energiebilanzen für 1990 und 1995 in Deutschland.....	201

1 Einführung und methodisches Vorgehen

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Vor dem Hintergrund der im Zusammenhang mit der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen übernommenen Verpflichtungen sowie des Klimaschutzprogrammes der Bundesrepublik Deutschland beauftragte das Umweltbundesamt (UBA) im Dezember 1995 das Forschungszentrum Jülich mit der Durchführung eines Vorhabens "Politikszenerarien für den Klimaschutz". Ziel war es zunächst, unter Nutzung der Erkenntnisse und Instrumente aus dem vom Bundesministerium für Forschung, Technologie, Bildung und Wissenschaft (BMBF) geförderten IKARUS-Projekt¹ ein Referenzszenario für CO₂-Emissionen im Zeitraum 1990 bis 2005 zu entwickeln, die CO₂-Minderungspotentiale der bis Mitte 1996 ergriffenen klimaschutzpolitischen Maßnahmen zu analysieren und zusätzliche Maßnahmen vorzuschlagen, mit denen das Ziel einer 25 %-igen Reduktion der CO₂-Emissionen bis zum Jahre 2005 erreicht werden kann.

Die administrative Koordination des Vorhabens oblag der Programmgruppe "Technologiefolgenforschung" (TFF) des Forschungszentrums Jülich; die fachliche Durchführung erfolgte durch das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin, das Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (FhG-ISI), Karlsruhe, das Öko-Institut, Berlin und die Programmgruppe "Systemforschung und Technologische Entwicklung" (STE) des Forschungszentrums Jülich.

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden im Dezember 1997 in einer Pressekonferenz der Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit öffentlich vorgestellt sowie in 3 Bänden veröffentlicht.² Vorab fanden Szenarioaussagen auch im zweiten Na-

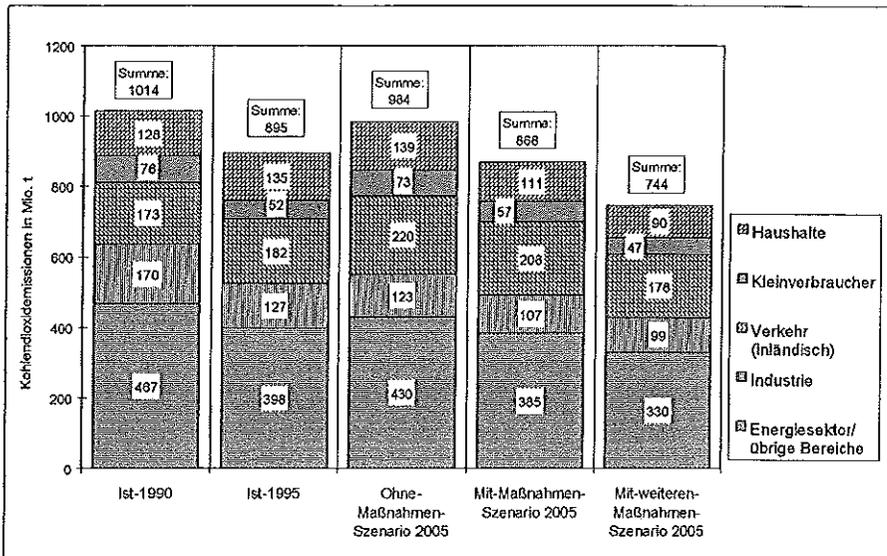
¹ Im Projekt IKARUS (Instrumente für Klimagas-Reduktions-Strategien) wurde ein aus energiewirtschaftlichen Computermodellen und einer umfangreichen Datenbank bestehendes Instrumentarium entwickelt, mit dessen Hilfe Strategien zur Reduktion von Treibhausgasemissionen des deutschen Energiesystems, insbesondere CO₂, formuliert und gegeneinander abgewogen werden können. Einen Überblick vermittelt der zusammenfassende Endbericht "Energiestrategien für den Klimaschutz in Deutschland - das IKARUS-Projekt des BMBF" des Forschungszentrums Jülich, ISSN 0946-0012, April 1997. Vgl. auch G. Stein, H.-F. Wagner (Hrsg.): Das IKARUS-Projekt: Klimaschutz in Deutschland. Strategien für 2000-2020. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1999.

² G. Stein und B. Strobel (Hrsg.): "Politikszenerarien für den Klimaschutz - Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes", Schriften des Forschungszentrums Jülich. Band 1: Szenarien und Maß-

tionalbericht der Bundesregierung³ Berücksichtigung. Die zentralen Ergebnisse der damaligen Studie sind der Abbildung 1-1 zu entnehmen.

Abbildung 1-1:

CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2005 in den Politik-Szenarien



Quelle: Ziesing et al. (1997).

Danach würden im "Ohne-Maßnahmen-Szenario" die CO₂-Emissionen in Deutschland im Jahre 2005 lediglich um rund 3 % niedriger sein als 1990. Gegenüber 1995 würden sie sich sogar wieder erhöhen. Demgegenüber wären die CO₂-Emissionen im Jahre 2005 im "Mit-Maßnahmen-Szenario" um 14,5 % niedriger als 1990. Die in den letzten Jahren insbesondere auf Bundesebene ergriffenen Klimaschutzpolitischen Maßnahmen führen also dazu, daß die CO₂-Emissionen in dieser Periode in allen Sektoren - außer im Ver-

nahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005. ISSN 1433-5530; ISBN 3-89336-215-0. **Band 2:** Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgase, ausgenommen energiebedingtes CO₂; ISSN 1433-5530; ISBN 3-89336-216-9. **Band 3:** Methodik-Leitfaden für die Wirkungsabschätzung von Maßnahmen zur Emissionsminderung. ISSN 1433-5530; ISBN 3-89336-222-3 (auch in englischer Übersetzung unter ISBN 3-89336-232-0 erhältlich).

³ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Klimaschutz in Deutschland; Zweiter Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. Stand April 1997.

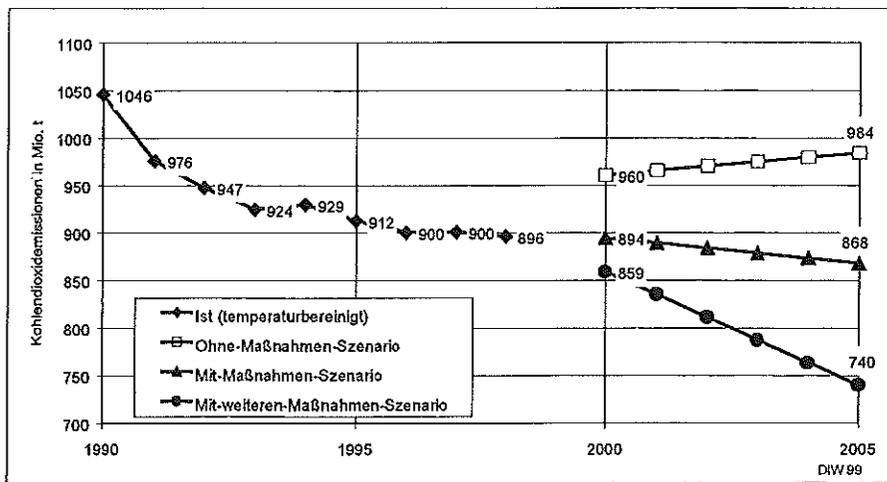
kehr - sinken. Trotz dieser Erfolge bleiben die Ergebnisse des "Mit-Maßnahmen-Szenarios" aber deutlich hinter dem Reduktionsziel von 25 % zurück.

Daß dieses Ziel erreicht werden könnte, zeigt das "Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario", das die grundsätzlich als realisierbar erscheinenden Klimaschutzpolitischen Maßnahmen untersucht. Unter den Voraussetzungen dieses Szenarios könnten die CO₂-Emissionen bis 2005 im Vergleich zu 1990 um knapp 27 % reduziert werden. Besonders hohe Zielerreichungsbeiträge werden dabei von der Industrie, der Kraftwirtschaft und von den Haushalten erwartet. Im Verkehr kommt es in diesem Szenario gegenüber 1990 immerhin nur noch zu einem leichten Anstieg der Emissionen.

Andererseits entspricht die tatsächliche Entwicklung seit 1990 allenfalls einem Pfad wie im "Mit-Maßnahmen-Szenario", zumal die (temperaturbereinigten) CO₂-Emissionen seit Mitte der neunziger Jahre eher stagnieren (Abbildung 1-2).

Abbildung 1-2:

Entwicklung der temperaturbereinigten CO₂-Emissionen in Deutschland von 1990 bis 1998 sowie in den Politik-Szenarien bis 2005



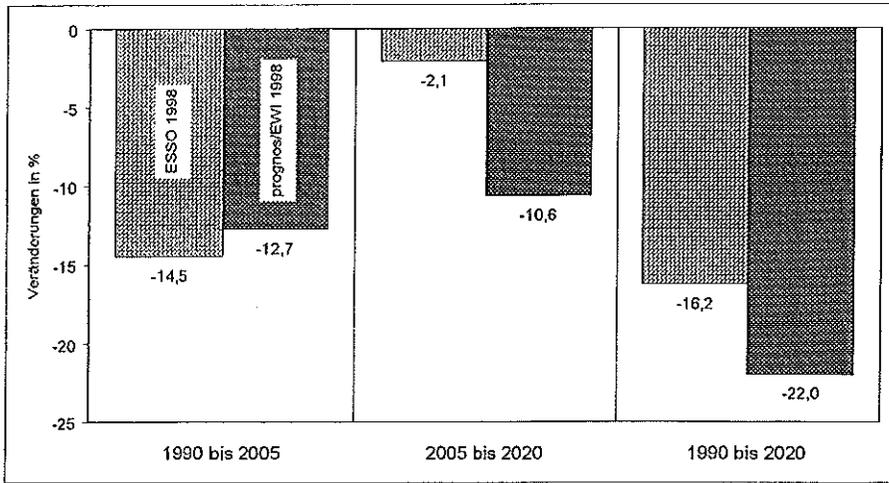
Quellen: Umweltbundesamt; AG Energiebilanzen; Ziesing et al. (1997); Berechnungen des DIW.

Aus der Sicht des Jahres 1999 erscheint eine Realisierung des Emissionsreduktionszieles bis zum Jahre 2005 innerhalb der inzwischen nur noch verbleibenden kurzen Zeitspanne

von sechs bis sieben Jahren als sehr unwahrscheinlich. Dafür sprechen auch die aktuellsten Prognosen, deren Ergebnisse in Abbildung 1-3 dargestellt sind.

Abbildung 1-3:

Veränderungen der CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2020 nach aktuellen Vorausschätzungen



Quellen: ESSO 1998; Prognos/EWI 1998.

Danach würden sich beispielsweise die CO₂-Emissionen nach der Vorausschätzung der ESSO AG bis 2005 gegenüber 1990 lediglich um 14,5 % vermindern und anschließend bis 2020 nur noch um rund 2 % sinken.⁴ Nach der jüngsten Trendskeizze von Prognos/EWI fällt die Emissionsreduktion im Zeitraum von 1990 bis 2005 mit knapp 13 % sogar noch schwächer aus; danach wird allerdings bis 2020 ein recht kräftiger Rückgang erwartet, so daß die CO₂-Emissionen nach dieser Studie im Jahre 2020 um rund 22 % (ESSO: reichlich 16 %) niedriger sein könnten als 1990.⁵

Auf der dritten Vertragsstaatenkonferenz zur Klimarahmenkonvention, die im Dezember 1997 im japanischen Kyoto stattfand, wurde als Zielkorridor zum Erreichen erstmals rechtsverbindlich verabredeter Emissions-Reduktionsziele der Zeitraum 2008 bis 2012

⁴ ESSO Energieprognose 1998: Mehr Intelligenz im Verkehr. Esso, November 1998.

⁵ Prognos/EWI: Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Trendskeizze. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft. Basel, Oktober 1998.

festgelegt. Damit spielte das Jahr 2005 für die international abgestimmte Klimapolitik keine wesentliche Rolle mehr, wenn auch die Bundesregierung nach wie vor an ihrem o.g. CO₂-Reduktionsziel festhält.⁶

Um auch unter diesen neuen Randbedingungen das IKARUS-Instrumentarium für die Ziel- und Maßnahmenformulierung nutzen zu können, wurde im Frühjahr 1998 der Auftrag des UBA erweitert mit einer Ausdehnung des Zeithorizonts bis zum Jahr 2020. Dieses machte allerdings einige methodische Änderungen notwendig, die im folgenden angesprochen werden.

1.2 Hinweise zum methodischen Vorgehen

Die Szenarioarbeit der ursprünglichen Studie basierte auf der zu dem damaligen Zeitpunkt aktuellsten Energieprognose, die Ende 1995 im Auftrag des Bundesministers für Wirtschaft von der Prognos AG erstellt worden war und die bereits die bis Mitte 1995 ergriffenen Klimaschutzpolitischen Maßnahmen berücksichtigte. Hierauf aufbauend und unter Berücksichtigung der bis Mitte 1996 hinzugekommenen Maßnahmen, wie die Selbstverpflichtungserklärung der deutschen Wirtschaft vom März 1996, wurden die zuvor zitierten Szenarien entwickelt.

Dabei beruhten die damals erarbeiteten Szenarien vorrangig auf sektorbezogenen Einzelanalysen. Zusätzlich wurden aber durch Rechnungen mit dem IKARUS-Optimierungsmodell Handlungsfelder ausgewiesen, in denen unter dem Aspekt volkswirtschaftlich minimaler Kosten besonders vorteilhafte Reduktionsmaßnahmen erwartet werden können.

Für die erweiterte Studie, die Gegenstand dieses Berichts ist, mußte ein anderes Vorgehen gewählt werden, zumal die genannte Prognos-Studie wegen inzwischen veränderter wesentlicher Rahmenbedingungen wie Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung als

⁶ Ein Ziel, das in dem Vertrag vom 20. Oktober 1998 zwischen den Koalitionspartnern der neuen Bundesregierung erneut bekräftigt wurde. Vgl.: Aufbruch und Erneuerung - Deutschlands Weg ins 21. Jahrhundert. Koalitionsvereinbarung zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands und Bündnis 90/Die GRÜNEN. 20. Oktober 1998.

nicht mehr aktuell anzusehen war und andere geeignete Prognosen nicht zeitgerecht zur Verfügung standen. Daher wurde eine Verfahrensweise vereinbart, die sich im wesentlichen auf Analysen mit dem IKARUS-Optimierungsmodell stützen sollte. Dabei wurde eine Reihe von Szenarien untersucht, deren Charakteristika und Bezeichnungen in Übersicht 1-1 zusammengefaßt sind. Danach wurden unmittelbar mit Hilfe des LP-Modells

- das *Modell-Basis-Szenario*,
- das *30%-Reduktions-Szenario*
- das *40%-Reduktions-Szenario (mit auslaufender Kernenergienutzung)*

sowie als Variante dazu

- das *40%-Reduktions-Szenario mit (maximal) konstanter Kernenergiekapazität*

berechnet. Die speziell zum Mengengerüst für die Kernenergie jeweils getroffenen Annahmen sind in Übersicht 1-2 zusammengestellt.

Die Ergebnisse der LP-Modellrechnungen bilden eine Energiewirtschaft ab, in der die Nachfragen nach Energiedienstleistungen unter den jeweiligen CO₂-Restriktionen zu volkswirtschaftlich minimalen Kosten befriedigt werden, und zwar ohne Rücksicht auf betriebswirtschaftliche Handlungsweisen und sonstige Hemmnisse, sofern sie nicht im Modell durch bestimmte Grenzwerte (Bounds) vorgegeben sind.

Ausgehend von dem "Modell-Basis-Szenario" werden daher in einem weiteren Schritt sektorbezogene Einzelanalysen durchgeführt, in denen die „gehemmten Potentiale“ berücksichtigt werden. Auf diesem Weg wird ein *Referenz-Szenario* entwickelt, das - weil es solche Hemmnisse und volkswirtschaftlich suboptimale Lösungen in die Überlegungen einbezieht -- generell höhere CO₂-Emissionen aufweist als das Basisszenario. Grob ange nähert trägt dieses Szenario einen quasi-prognostischen Charakter.

Dieses Referenz-Szenario ist schließlich Ausgangspunkt für die Formulierung von Klimaschutzpolitischen Maßnahmen, mit denen die jeweils vorgegebenen Emissionswerte für die Reduktionsszenarien unter weitgehender Berücksichtigung der mit Hilfe des LP-Modells ermittelten kostenoptimalen Handlungsfelder zu erreichen sind.

Übersicht 1-1:

Kennzeichnung der untersuchten Szenarien**Modell-Basis-Szenario**

Das mit dem IKARUS-LP-Modell ermittelte Basisszenario beschreibt eine gesamtwirtschaftlich kostenoptimale Entwicklung ohne Vorgabe eines CO₂-Reduktionszieles. Dabei bleiben das von gesamtwirtschaftlichen Überlegungen abweichende einzelwirtschaftliche Entscheidungsverhalten sowie die in der Realität vielfältig vorfindbaren anderen Umsetzungshemmnisse für verschiedene Technologien unberücksichtigt. Energiepolitische Randbedingungen werden dem Modell exogen vorgegeben. So wird z.B. im Basisszenario keine Ausweitung der gegenwärtig installierten Kernkraftwerkskapazität zugelassen. Die maximale Betriebszeit der bestehenden Kernkraftwerke wird mit 35 Jahren angenommen.

Referenz-Szenario

Das Referenz-Szenario setzt auf dem Modell-Basis-Szenario auf und stellt in der Form sektoraler Einzelabschätzungen eine Entwicklung dar, wie sie sich unter Berücksichtigung des einzelwirtschaftlichen Entscheidungsverhaltens und anderer Hemmnisse in der Realität vollziehen könnte. Dabei werden die bereits beschlossenen klimaschutzpolitischen Maßnahmen einbezogen, es wird aber kein bestimmtes CO₂-Reduktionsziel vorgegeben.

30%-Reduktions-Szenario

Bei diesem Szenario wird dem Modell eine CO₂-Reduktion von 30 % bis zum Jahre 2020 (20 % bis 2005) bezogen auf das Emissionsniveau von 1990 vorgegeben. Ansonsten gelten die gleichen Voraussetzungen wie im Modell-Basis-Szenario.

40%-Reduktions-Szenario (mit auslaufender Kernenergienutzung)

Bei diesem Szenario wird dem Modell unter ansonsten gleichen Bedingungen wie im Modell-Basis-Szenario eine CO₂-Reduktion von 40 % bis zum Jahre 2020 (25 % bis 2005) bezogen auf das Emissionsniveau von 1990 vorgegeben. Alle Kernkraftwerke werden nach einer Betriebszeit von 35 Jahren stillgelegt und nicht durch neue ersetzt. Im Jahre 2020 sind dann 7,2 GW_{netto} in Betrieb.

Als Variante zu diesem Szenario wird bei den LP-Modellrechnungen ein

40%-Reduktions-Szenario mit (maximal) konstanter Kernenergiekapazität betrachtet, bei dem Ersatzinvestitionen in Kernkraftwerke für die nach Ende ihrer Betriebsdauer stillzulegenden Kernkraftwerke zugelassen werden. Die heute installierte Kernkraftwerksleistung von rund 21 GW_{netto} darf dabei nicht überschritten werden.

Übersicht 1-2:

**Annahmen und Ergebnisse der untersuchten Szenarien
im Hinblick auf die Nutzung der Kernenergie**

Szenario	Vorgabe	Ergebnis
Allgemeine Vorgabe: Maximale Betriebszeit der Kernkraftwerke 35 Jahre		
Modell-Basis-Szenario	Ersatzinvestitionen von Kernkraftwerken zugelassen, aber kein Ausbau der Kernkraftwerksleistung über die gegenwärtig installierte Kapazität (21,1 GW _{netto}) möglich	Bei einer volkswirtschaftlichen Kostenoptimierung ohne CO ₂ -Minderungsvorgabe werden nach den Modellrechnungen keine Ersatzinvestitionen auf Kernenergiebasis vorgenommen, installierte Leistung 2020: 7,2 GW _{netto}
Referenz-Szenario	Wie Modell-Basis-Szenario	
30%-Reduktions-Szenario	Wie Modell-Basis-Szenario	Bei einer volkswirtschaftlichen Kostenoptimierung mit einer CO ₂ -Minderungsvorgabe von 30% werden nach den Modellrechnungen bis 2020 Ersatzinvestition auf Kernenergiebasis in Höhe von 1,1 GW vorgenommen (insgesamt installierte Leistung 2020: 8,3 GW _{netto})
40%-Reduktions-Szenario (mit auslaufender Kernenergienutzung)	Auslaufen der Kernenergienutzung, kein Ersatz auf Kernenergiebasis zugelassen	Verbleibende Kapazität 2020: 7,2 GW _{netto} entsprechend der vorgegebenen maximalen Betriebsdauer
Variante: 40%-Reduktions-Szenario mit (maximal) konstanter Kernenergiekapazität	Wie Modell-Basis-Szenario	Vollständiger Ersatz der stillzulegenden Anlagen auf Kernenergiebasis, gegenüber heute unveränderte installierte Leistung 2020 von 21,1 GW _{netto}

In der ersten Studie zum Vorhaben „Politiksznarien für den Klimaschutz“ waren Kostenberechnungen nicht Auftragsgegenstand und nur in den zusätzlichen Modellrechnungen enthalten. Dagegen spielen sie in der jetzt erweiterten Studie eine wesentliche Rolle. Kostenangaben resultieren zunächst aus den Kostendifferenzen, die in den Rechnungen mit dem Optimierungsmodell zwischen den Reduktions-Szenarien und dem Modell-

Basis-Szenario ausgewiesen werden. Weiterhin werden in grober Näherung aber auch die Kostendifferenzen geschätzt, die aus den Abweichungen zwischen dem Modell-Basis-Szenario und dem Referenz-Szenario resultieren.

Weitere methodische Erläuterungen zu den Rechnungen mit dem LP-Modell werden in Kapitel 2 gegeben, das sich ausschließlich auf die Darstellung des IKARUS-Instrumentariums und dessen Nutzung für dieses Vorhaben konzentriert. Dabei lassen sich aus der rein modellseitigen Abbildung der einzelnen Szenarien wesentliche Informationen über die aus volkswirtschaftlicher Sicht kostenminimalen - technischen - Handlungsfelder für eine zielgeleitete Klimaschutzpolitik ableiten, die dann im Kapitel 3 für die einzelnen Energieverbrauchs- und Umwandlungssektoren weiter analysiert und mit Blick auf den Einsatz möglicher politischer Instrumente zur Umsetzung der jeweiligen technischen Maßnahmen diskutiert werden.

Eine sektorübergreifende Zusammenfassung der Untersuchung mit Hinweisen auf die wichtigsten Kostenaspekte, die im Zusammenhang mit Emissionsminderungsstrategien zu beachten sind, ist Gegenstand des Kapitels 4.

Im abschließenden Kapitel 5 werden die zentralen quantitativen Ergebnisse des Vorhabens interpretiert und einige Schlußfolgerungen für klimaschutzpolitische Aktivitäten gezogen.

Zum leichteren Verständnis sei darauf hingewiesen, daß im folgenden die erste Studie verkürzend als „Politiksznarien I“ und die hier vorliegende erweiterte Studie als „Politiksznarien II“ zitiert werden soll. Dabei wurde die frühere Arbeitsteilung zwischen den beteiligten Instituten beibehalten:

DIW:	Verkehr, Umwandlungssektor, erneuerbare Energiequellen, Gesamtbetrachtung der Szenarien, Zusammenfassung, Koordination
FhG-ISI:	Industrie und Kleinverbraucher (einschließlich Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in diesen Sektoren)
ÖKO:	Elektrogeräte und Warmwasserbereitung im Sektor Haushalte
FZJ/STE:	IKARUS-Modell-Analysen, Raumwärme im Sektor Haushalte

1.3 Literatur

- Aufbruch und Erneuerung - Deutschlands Weg ins 21. Jahrhundert. Koalitionsvereinbarung zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands und Bündnis 90/Die GRÜNEN. 20. Oktober 1998
- BMU (1977): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Klimaschutz in Deutschland; Zweiter Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Rahmentabereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. Stand April 1997
- Diekmann, J. et al. (1998): Politikszenerarien für den Klimaschutz. Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes. Band 3: Methodik-Leitfaden für die Wirkungsabschätzung von Maßnahmen zur Emissionsminderung. Stein, G., Strobel, B. (Hrsg.), Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 6. ISSN 1433-5530; ISBN 3-89336-222-3 (auch in englischer Übersetzung unter ISBN 3-89336-232-0 erhältlich), Jülich 1998
- ESSO AG (1998): ESSO Energieprognose 1998: Mehr Intelligenz im Verkehr. Hamburg, November 1998.
- Forschungszentrum Jülich (1997): Energiestrategien für den Klimaschutz in Deutschland - das IKARUS-Projekt des BMBF. ISSN 0946-0012, Jülich, April 1997
- Prognos (1995): Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa - Perspektiven bis zum Jahr 2020. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft. Basel 1995
- Prognos, EWI (1998): Trendskeizze - Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Basel, Oktober 1998
- Schön, M. et al. (1997): Politikszenerarien für den Klimaschutz. Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes. Band 2: Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgase, ausgenommen energiebedingtes CO₂. Stein, G., Strobel, B. (Hrsg.), Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 6 ISSN 1433-5530; ISBN 3-89336-216-9, Jülich 1997
- Stein, G., Wagner, H.-F. (Hrsg.): Das IKARUS-Projekt: Klimaschutz in Deutschland. Strategien für 2000-2020. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1999
- Ziesing, H.-J. et al. (1997): Politikszenerarien für den Klimaschutz. Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes. Band 1: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005. Stein, G., Strobel, B. (Hrsg.), Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 5, ISSN 1433-5530; ISBN 3-89336-215-0, Jülich 1997

2 Analysen der Reduktion von CO₂-Emissionen mit Hilfe des IKARUS-Modells

2.1 Charakteristika des Optimierungsmodells

Das IKARUS-Optimierungsmodell bildet die Energieflüsse, Energietechniken, Emissionen und Kosten des gesamten Energiesystems der Bundesrepublik Deutschland ab. Dabei wird das mathematische Verfahren der linearen Programmierung (LP) eingesetzt. Die Energieflüsse aller Energieträger werden von der Primärenergiebereitstellung bis zur Energiedienstleistung beim Endverbraucher unter Einbeziehung vorgegebener Restriktionen (z.B. CO₂-Reduktion) vom Modell in kostenminimaler Weise berechnet. Eine genauere Beschreibung der Modellstruktur sowie der Kostenphilosophie findet sich in (Martinsen et al. 1998, Ziesing et al. 1997). Der dem Modell zugrunde liegende Datensatz wurde im Rahmen des Projektes IKARUS-Anwendung erarbeitet bzw. aktualisiert.

Anders als beim Vorhaben Politikszenerarien I, wo die Berechnungen getrennt für die Stützjahre 1989 und 2005 vorgenommen wurden, wird nun über einen mehrperiodischen Zeitraum optimiert. Ausgehend von 1990 wird in 5-Jahresschritten bis zum Jahre 2020 gerechnet. Wesentliche Ursache für diese Änderung ist die vom Auftraggeber gewünschte Einbeziehung des Jahres 2010, für das im Rahmen des IKARUS-Anwendungsprojektes keine Daten erhoben wurde. Die entsprechenden Datensätze für die zwischen den IKARUS-Stützjahren (1995, 2005, 2020) liegenden Zeitpunkte wurden durch Interpolation ermittelt.

Die erforderliche makroökonomische Einbettung des IKARUS-Modells wird modell-exogen durchgeführt. Sie umfaßt die Bereitstellung von wirtschaftlichen und demographischen Rahmendaten und leitet daraus energieverbrauchsbestimmende Nachfragewerte ab, die wiederum direkter Bestandteil des Optimierungsdatensatzes sind. Die Rahmendaten beschreiben ein konsistentes makroökonomisches Szenario, das innerhalb des IKARUS-Anwendungsprojektes erarbeitet wurde (vgl. dazu Kapitel 2.3).

Durch die Vernetzung vieler Technologien und Energieträger im IKARUS-LP-Modell ist - mathematisch gesehen - der Lösungsraum sehr groß. Läßt man dem nach kostenmini-

malen Kriterien entscheidenden Modell alle Freiheitsgrade, wählt es *ausschließlich* die kostengünstigste Möglichkeit zur Befriedigung der vorgegebenen Nachfragen aus. Dabei werden jedoch eine Reihe von wichtigen Rahmenbedingungen nicht adäquat abgebildet. Erstens werden energiepolitische Vorgaben nicht einbezogen, z.B. würde in der Optimierungsrechnung anstelle der heimischen Steinkohle nur noch die billigere Importkohle eingesetzt, obwohl eine durch politische Maßnahmen definierte Mindestmenge zu berücksichtigen wäre. Zweitens wird die Beschränkung von Ressourcen (z.B. der heimischen Öl- und Gasvorkommen) nicht abgebildet. Drittens können Umstellungen von alten auf neue Anlagen oder Technologien (z.B. im Kraftwerksbereich) oft nicht "schlagartig" erfolgen. Viertens unterscheidet sich schließlich das Entscheidungskalkül der Wirtschaftssubjekte in der Regel deutlich von gesamtwirtschaftlichen Entscheidungskriterien. Diese Aspekte werden im Modell zumindest teilweise durch Annahmen und Aktivitätsbegrenzungen (Bounds) berücksichtigt. Der dem Modell noch verbleibende Optimierungsspielraum wird also eingeengt. Insofern gibt es kein absolutes Kostenoptimum, sondern nur ein Optimum unter bestimmten Bedingungen und Begrenzungen. Ergebnisse solcher Modellbetrachtungen können daher nur als Erkenntnishilfen dienen, um bestimmte Vor- und Nachteile von Entwicklungen mit Hilfe der Szenariotechnik zu zeigen.

2.2 Rahmenbedingungen für die Modellszenarien

Die demographischen, ökonomischen und technologischen Rahmenbedingungen beruhen im wesentlichen auf den Annahmen, die für die Rechnungen im Rahmen des IKARUS-Projektes Mitte 1998 festgelegt worden sind. Einzelne Annahmen zu speziellen Strukturen in den Endenergiesektoren mögen zwar etwas abweichen, aber die wesentlichen exogenen Annahmen, z.B. zur Wirtschaftsentwicklung, Entwicklung der Bevölkerung, der Wohnflächen und der Verkehrsnachfrage sind in beiden Vorhaben gleich.

2.2.1 Demographische und gesamtwirtschaftliche Entwicklung

Die demographische Entwicklung wird entsprechend der Variante 2 der Bevölkerungsprognose des Statistischen Bundesamtes (1994) angenommen. Danach wächst die Bevölkerung von knapp 81,7 Mio. Personen im Jahre 1995 bis zum Jahre 2005 auf ein Maximum von 83,8 Mio., geht dann aber auf 81,2 Mio. im Jahre 2020 zurück (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1:

**Demographische und gesamtwirtschaftliche Rahmendaten
für die IKARUS-Modellszenarien**

	Einheit	Jeweilige Werte				Veränderungen in %/a	
		1995	2005	2010	2020	1995/05	2005/20
Bevölkerung	Mio.	81,661	83,8	82,9	81,2	0,3	-0,2
Zahl der Haushalte	Mio.	36,9	38,6	38,5	38,4	0,4	0,0
Personen je Haushalt	Anzahl	2,21	2,17	2,15	2,12	-0,2	-0,2
Wohnungen	Mio.	35,954	37,90	37,97	38,10	0,5	0,0
Wohnungen je 1000 Haushalte	Anzahl	973	983	986	992	0,1	0,1
Wohnungsfläche	Mio. m ²	3005	3272	3313	3394	0,9	0,2
Wohnfläche je Einwohner	m ²	36,8	39,0	39,9	41,8	0,6	0,5
Wohnungsgröße EFH ¹⁾	m ²	104,72	120	120	120	1,4	0,0
Wohnungsgröße MFH ¹⁾	m ²	66,40	68	66	65	0,2	-0,3
Erwerbspersonen	Mio.	38,443	38,7	38,0	36,6	0,1	-0,4
Bruttoinlandsprodukt (BIP)	Mrd. DM (95)	3276	3997	4404	5218	2,0	1,8
BIP je Einwohner	DM	40117	47691	53100	64265	1,7	2,0

¹⁾ bezogen auf Neubauten; EFH = Ein- und Zweifamilienhäuser, MFH = Mehrfamilienhäuser.

Die Zahl der privaten Haushalte entwickelt sich infolge der zunehmend kleiner werdenden Haushalte (aufgrund von längeren Ausbildungszeiten, geringerer Kinderzahl je Familie, Scheidungen und höherer Lebenserwartung) etwas anders. So fällt die Zunahme in der ersten Periode von 1995 bis 2005 größer aus als das Bevölkerungswachstum (von 35,9 Mio. auf 38,6 Mio. Haushalten); in der zweiten Periode von 2005 bis 2020 stagniert die Zahl der Haushalte etwa auf diesem Niveau (2010: 38,5 Mio. und 2020: 38,4 Mio. Haushalte).

Die Zahl der Wohnungen erhöht sich wiederum etwas schneller, da die Zahl der Haushalte, die sich eine Wohnung teilen, weiterhin sinkt. Außerdem nehmen die Zweitwohnungen für berufstätige Pendler und Rentnerhaushalte zu. Auf diese Weise steigt die Zahl der Wohnungen von fast 36 Mio. im Jahre 1995 auf knapp 38,0 Mio. im Jahre 2010 und 38,1 Mio. im Jahre 2020.

Bezüglich der Wohnungsgröße wird angenommen, daß sich die Wohnungsgröße in neuen Einfamilienhäusern von derzeit knapp 105 m² auf 120 m² pro Wohnung bis zum Jahre 2005 erhöht und danach aufgrund der kleiner werdenden Haushalte auf diesem Niveau

stagniert. Im Bereich der Mehrfamilienhäuser wird angenommen, daß die Größe neuer Wohnungen wegen des zunehmenden Bedarfs von Ein-Personenhaushalten nur noch unwesentlich zunimmt, nämlich von $66,4 \text{ m}^2$ auf 68 m^2 (2005), und anschließend wieder auf 66 m^2 (2010) und 65 m^2 (2020) zurückgeht.

Insgesamt wird unterstellt, daß sich die gesamte Wohnungsfläche innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 3,0 Mrd. m^2 im Jahre 1995 auf fast 3,4 Mrd. m^2 im Jahre 2020, also um etwa 13 %, vergrößert. Bezogen auf die Zahl der Einwohner bedeutet dies einen Anstieg der durchschnittlichen Wohnungsfläche von $36,8 \text{ m}^2/\text{Einwohner}$ (1995) auf $41,8 \text{ m}^2/\text{Einwohner}$ (2020).

Die Annahmen zur Wirtschaftsentwicklung wurden von der Arbeitsgemeinschaft Energie- und Systemplanung (AGEP) auf der Grundlage des MIS-Modells entwickelt. Danach wächst das Bruttoinlandsprodukt (in Preisen von 1995) von 3,276 Billionen DM im Jahre 1995 auf knapp 4,0 Billionen DM im Jahre 2005. Das entspricht einem jahresdurchschnittlichen Zuwachs von 2,0 %. In der Periode von 2005 bis 2020 schwächt sich das jährliche Wachstum mit 1,8 % leicht ab; im Jahre 2020 beträgt es etwa 5,2 Billionen DM. Je Einwohner steigt das Bruttoinlandsprodukt in der Periode von 1995 bis 2005 im Jahresdurchschnitt um 1,7 % (von rund 40 TDM auf 46,7 TDM); in der Periode von 2005 bis 2020 nimmt das Tempo mit 2,0 % sogar noch etwas zu, so daß es am Ende des Betrachtungszeitraumes reichlich 64 TDM beträgt.

Alles in allem wird also mit einer vergleichsweise optimistischen Entwicklung der Gesamtwirtschaft gerechnet. Bis 2005 wird noch ein leichter Anstieg der Zahl der Erwerbspersonen angenommen, und zwar von 38,4 Mio. im Jahre 1995 auf 38,7 Mio., der anschließend aber von einem Rückgang auf 36,6 Mio. im Jahre 2020 abgelöst würde (Tabelle 2-1).

Das MIS-Modell unterscheidet im Bereich der Wirtschaft die Industrie nach neun Branchen, den Kleinverbrauchsbereich nach fünf Branchen (darunter Wohnungsvermietung, für die keine Erwerbstätigen ausgewiesen werden), acht Sektoren im Verkehr und sechs Energiewirtschaftssektoren. Außerdem wird ein Sektor Raumwärme separat ausgewiesen, ohne diesem Bereich allerdings Erwerbstätige zuzuordnen.

Wesentliche allgemeine Ergebnisse sind:

- Das verarbeitende Gewerbe entwickelt sich in der ersten Periode um etwa 15 % und in der zweiten Periode um etwa 10 % langsamer als die Gesamtwirtschaft. Gemessen am Anteil des tertiären Sektors an der gesamten Wertschöpfung verläuft die Tertiärisierung der Wirtschaft mit einer Steigerung von 75,2 % im Jahre 1995 auf rund 77 % im Jahre 2020 recht moderat.
- Die Zahl der Erwerbstätigen steigt zunächst von 35,2 Mio. (1995) auf 35,9 Mio. im Jahre 2005, und nimmt dann wieder ab, und zwar auf 35,7 Mio. im Jahre 2020. In der Industrie geht die Zahl der Erwerbstätigen durchgehend zurück; im Jahre 2020 werden es nur noch 8,4 Mio. sein gegenüber 9,02 Mio. im Jahre 1995.

Implizit wird hiermit unterstellt, daß die hohe derzeitige Arbeitslosigkeit (von rund 4,5 Mio.) nur dann vermindert werden kann, wenn mehr Teilzeitarbeit geleistet würde. Diese Überlegungen wären im Bereich des verarbeitenden Gewerbes nicht von Einfluß, wohl aber in raumwärmeintensiven Sektoren des Kleinverbrauchs.

2.2.2 Entwicklung der Preise für Importenergieträger

Im Unterschied zu den inländischen Energiepreisen, die im IKARUS-Modell modellendogen ermittelt werden, müssen die Annahmen zu den Preisen für die importierten Energieträger exogen festgelegt werden. Dazu sind die in Tabelle 2-2 ausgewiesenen Annahmen für die wichtigsten Importenergieträger getroffen worden. Dieser Entwicklung liegen die folgenden Annahmen zugrunde:

- Der reale Ölpreis erhöht sich von 2005 bis 2020 von 20 auf 28 US-Dollar je Barrel.
- Der Wechselkurs sinkt in dieser Zeit von 1,70 auf 1,60 DM/US-Dollar.
- Die Preise der Mineralölprodukte und Erdgas sind in Relationen zum Rohölpreis geschätzt worden.
- Für hohe Erdgasimporte wird zusätzlich ein um 25 % höherer Preis berücksichtigt.
- Importkohle kostet im Jahre 2005 rund 100 DM/t SKE und verteuert sich danach um 1,0 % pro Jahr.

Tabelle 2-2:

Annahmen zu den Preisen für die wichtigsten Importenergieträger

Energieträger	Importpreise in DM je GJ zu Preisen von 1995				Veränderungen in %/a	
	1995	2005	2010	2020	1995/05	2005/20
Steinkohle	2,58	3,41	3,59	3,96	2,8	1,0
Rohöl	4,36	5,85	6,47	7,71	3,0	1,9
Benzin	5,84	8,28	9,03	10,53	3,6	1,6
Diesel	5,28	7,10	7,80	9,11	3,0	1,7
Heizöl, leicht	5,31	7,18	7,85	9,20	3,1	1,7
Heizöl, schwer	3,52	4,75	5,23	6,18	3,0	1,8
Erdgas A	4,06	4,68	5,31	6,56	1,4	2,3
Erdgas B	5,07	5,85	6,63	8,20	1,4	2,3
z.Vgl. deutsche Steinkohle	9,90	8,19	8,02	7,68	-1,9	-0,4

Bei einer Bewertung der zunächst als vergleichsweise hoch erscheinenden Preisveränderungen insbesondere innerhalb der Periode von 1995 bis 2005 ist zu berücksichtigen, daß die Energiepreise im Jahre 1995 ein äußerst niedriges Niveau aufgewiesen hatten. Gegenüber den Energiepreisen Ende der achtziger, Anfang der neunziger Jahre sind diejenigen, die für 2005 angenommen worden sind, überwiegend sogar niedriger.

Im Vergleich zu aktuellen Prognosen – vgl. etwa die Trendskeizze von Prognos/EWI vom Oktober 1998 - sind die den IKARUS-Rechnungen zugrunde liegenden Annahmen über die künftige Preise für Importenergieträger allerdings noch immer erheblich höher. Prognos/EWI unterstellen beispielsweise für das Rohöl selbst noch im Jahre 2020 einen Preis von 18,5 US-\$/barrel (2010: 17 US-\$/barrel).

2.2.3 Produktionsentwicklung im verarbeitenden Gewerbe

Die Ausgangslage für die Struktur der Nettoproduktion der Industrie und ihrer künftigen Entwicklung bildeten

- zum einen die Nettoproduktionswerte von etwa 40 Industriebranchen nach der neuen Wirtschaftszweigsystematik WZ 93 für das Jahre 1995 (Statistisches Bundesamt 1997),

- zum anderen die Wachstumsraten der Bruttowertschöpfung von acht Industriesektoren und der restlichen Industrie (in der Abgrenzung der Systematik für das produzierende Gewerbe, SYPRO, und nach der funktionalen Zuordnung) für die Zeiträume von 1995 bis 2005 und von 2005 bis 2020. Diese Wachstumsraten waren das Ergebnis des Basislaufes des MIS-Modells für Gesamtdeutschland (Lauf MISIOT 60, MISVAR 60 zum 29.1.1998).

Die Wachstumsannahmen entsprechend dem MIS-Modell für die insgesamt 9 Branchen des verarbeitenden Gewerbes wurden dann im allgemeinen als Wachstumszahlen für die Nettoproduktion der entsprechenden Industriebranchen der IKARUS-Datenbank interpretiert. Als Ausnahme wurde aber beispielsweise in der Periode von 2005 bis 2020 für die chemische Industrie mit einem jahresdurchschnittlichen Produktionswachstum von 2,5 % statt von 2,0 % gerechnet, weil die Entwicklung einiger anderer Industriezweige (etwa der Nahrungs- und Genußmittelindustrie aufgrund der unterstellten Bevölkerungsentwicklung) etwas niedriger anzusetzen war. Der Tabelle 2-3 sind die den Modellrechnungen zugrunde gelegten Annahmen zur Entwicklung der industriellen Nettoproduktion zu entnehmen.

Tabelle 2-3:

Annahmen zur Entwicklung der Nettoproduktion im verarbeitenden Gewerbe

Wirtschaftszweig	Nettoproduktion in Mrd. DM zu Preisen von 1995				Veränderungen in %/a	
	1995	2005	2010	2020	1995/05	2005/20
Steine und Erden	27,7	28,5	29,4	31,2	0,3	0,6
Eisenschaffende Industrie	18,4	18,5	18,0	17,0	0,0	-0,6
NE-Metalle	17,3	19,0	20,3	23,0	0,9	1,3
Gießereien	4,1	4,8	5,2	5,9	1,7	1,4
Zellstoff und Papier	44,3	50,0	52,0	56,0	1,2	0,8
Chemie	120,4	153,0	177,0	225,0	2,4	2,6
Fahrzeugbau, Elektrotechnik	269,4	320,8	351,5	422,9	1,8	1,9
Nahrungsmittel	109,5	128,0	136,0	152,0	1,6	1,2
sonstige Industrien	421,9	500,4	544,6	622,0	1,7	1,5
Industrie insgesamt	1033,0	1223,0	1334,0	1555,0	1,7	1,6

Für die energieintensiven Einzelprodukte (z.B. Roheisen, Zement, Hüttenaluminium, Chlor, Zellstoff oder Zucker) wurden die Schätzungen häufig zunächst auf der Ebene der physischen Produktion durchgeführt. Hierzu wurden sowohl Schätz- und Erfahrungs-

werte von Branchenkennern als auch spezielle Langfristproduktionsschätzungen für einzelne Branchen herangezogen. Anschließend wurde festgelegt, wie sich die zugehörigen Nettoproduktionswerte für 1995 errechnen, soweit sie nicht in der amtlichen Statistik verfügbar sind, und ob sich die spezifischen Nettoproduktionswerte (bezogen auf physische Werte) in Zukunft verändern.

Da der Übergang der Wirtschaftsstatistik von der SYPRO auf die WZ 93 nicht in allen Feinheiten nachvollzogen werden konnte, wurden die sonstigen Investitionsgüter als "catch all"-Gruppe gewählt. Die Differenzbildung zur Summe der Branchen und der Gesamtangabe für das verarbeitende Gewerbe beinhaltet also eventuell auch Nettoproduktionswerte anderer Industriezweige, die diesen aber aufgrund der Umstellung von SYPRO auf WZ 93 nicht mehr zugeordnet waren. Diese Differenz liegt allerdings unterhalb von 5 % des Gesamtwertes des verarbeitenden Gewerbes.

Exkurs: Schätzungen/Berechnungen der Nettoproduktionswerte für die Branchen und Produktgruppen in der Struktur des IKARUS-LP-Modells

Die spezifischen Nettoproduktionswerte für energieintensive Einzelprodukte, für die bisher lediglich Angaben auf der Preisbasis 1985 vorlagen, wurden für diejenigen Einzelprodukte, für die für 1995 keine Nettoproduktionsdaten verfügbar waren, auf die Preisbasis von 1995 hochgerechnet oder durch andere Schätzverfahren (z.B. über die Ermittlung durchschnittlicher Grenzübergangswerte anhand der Außenhandelsstatistik für 1995 und dem Verhältnis der Nettoproduktion zum Bruttoproduktionswert der jeweils beteiligten Branche) neu bestimmt (Tabelle 2-4).

Zur Abschätzung der künftigen Entwicklung wurde jeweils überlegt, ob die spezifischen Nettoproduktionswerte in Zukunft konstant bleiben oder infolge von steigenden Anteilen höherwertiger Produktsegmente leicht zunehmen dürften (z.B. Elektrostahl mit höheren Edeltahlanteilen oder Kalk mit höheren Anteilen hochwertiger Kalkprodukte oder Glas mit höheren Anteilen an technischem Glas und Glasfasern) oder durch Einführung neuer Verfahren auch rückläufig sein könnten (z.B. Chlorherstellung).

Tabelle 2-4:

Spezifische Nettoproduktionswerte ausgewählter energieintensiver Produktgruppen des IKARUS-LP-Modells 1995 und ihre strukturell bedingten Veränderungen bis 2005 und 2020 in DM/t

Produktgruppe	Spezifische Nettoproduktionswerte in DM/t zu Preisen von 1995			Veränderungen in %/a	
	1995	2005	2020	1995/05	2005/20
Roheisen	80	80	80	0,0	0,0
Elektrostahl	150	160	170	0,6	0,4
Walzstahl	281	317	341	1,2	0,5
Hüttenaluminium	1300	1300	1300	0,0	0,0
Zement	93	95	95	0,2	0,0
Kalk	89	95	100	0,7	0,3
Ziegel	176	200	215	1,3	0,5
Chlor	170	160	155	-0,6	-0,2
Soda	125	125	125	0,0	0,0
Olefine	260	260	260	0,0	0,0
Zellstoff	600	600	600	0,0	0,0
Glas	700	740	880	0,6	1,2
Zucker	730	740	740	0,1	0,0

Quelle: Berechnungen FhG-ISI.

Nach Festlegung der spezifischen Nettoproduktionswerte wurden diese mit den Projektionswerten der physischen Produktion multipliziert. Durch Differenzbildung mit dem Nettoproduktionswert der Gesamtbranche wurde dann der Nettoproduktionswert der Restbranche ermittelt. Nicht selten ist davon auszugehen, daß sich auch - oder insbesondere - in den auf diese Weise definierten Restbranchen ein erheblicher intra-industrieller Strukturwandel abspielt, der sich auch in der Vergangenheit an den deutlichen Verminderungen des spezifischen Endenergieverbrauchs ablesen läßt. Diese Verminderungen um mehr als 2 % pro Jahr sind daher nicht allein durch Effizienzgewinne zu erklären, sondern auch durch Wandlungen hin zu Produktstrukturen mit höherer Wertschöpfung. Aufgrund dieser Überlegungen und von Einzelhinweisen in der Fachliteratur wurden dann die intra-industriellen Effekte auf den Endenergieverbrauch geschätzt (Tabelle 2-5).

Auch wenn die sehr energieintensiven Produktgruppen bei diesen Strukturüberlegungen ausgeklammert waren, so erkennt man doch einen erheblichen Struktureinfluß infolge eines Trends zu höherwertigen Produkten von etwa 1 % pro Jahr, wenn man eine Energieeffizienzverbesserung von 1 bis 2 % pro Jahr unterstellt. Insofern wird deutlich, daß die strukturellen Effekte auf die Energieintensität energieintensiver Industriebranchen

nicht nur auf das relativ geringe Produktionsvolumen sehr energieintensiver Einzelprodukte zurückzuführen sind, sondern auch in den jeweiligen Restbranchen ähnliche Einflüsse (z.B. höherwertige Produkte und mehr Dienstleistungsanteile) wirksam werden.

Tabelle 2-5:

Veränderung der Endenergieintensität von 1978 bis 1994 in ausgewählten Industriebranchen und geschätzte Veränderungen aufgrund intra-industriellen Strukturwandels von 1995 bis 2020

Produktgruppe	Verminderung des spezifischen Endenergieverbrauchs	Verminderung allein durch unterstellten intra-industriellen Strukturwandel	
	1978/1994	1995/2005	1995/2020
	jahresdurchschnittliche Veränderung in %		
Stahlprodukte (außer Walzstahl)	kA	1,75	1,27
Rest NE-Metalle (außer Hütten al)	2,00	1,80	1,10
Rest Steine und Erden (ohne Zement, Kalk, Ziegel)	3,30	1,00	0,73
Papier und Pappe (ohne Zellstoff)	2,80	1,30	0,90
Investitionsgüter	2,70	0,77	0,73
sonstige Verbrauchsgüter (ohne Glas, Kunststoffe)	3,10	0,68	0,56
Nahrungs- und Genußmittel (ohne Zucker)	3,00	1,40	1,20

Quellen: Schätzungen und Berechnungen des ISI.

2.2.4 Annahmen für den Sektor Kleinverbraucher

Für die Projektion im Dienstleistungsbereich lagen die Daten zur Bruttowertschöpfung und zu den Erwerbstätigen des MIS-Modells in der funktionalen Abgrenzung und in einer relativ hoch aggregierten Form vor, wie folgende Übersicht zeigt:

	Erwerbstätige 1995 in Mio.	
	Funktional: MIS-Modell	Institutionell: IKARUS- Datenbank
• Land- und Forstwirtschaft,	1,087	1,026
• Baugewerbe	2,862	3,039
• Verkehr, Speditionen, Nachrichten	1,929	1,959
• Staat	5,591	5,424
• sonstige Dienstleistungen (mit und ohne Erwerbscharakter)	14,190	14,474

Von diesen fünf Sektoren wurden dann die weiteren Disaggregationen entsprechend der vorhandenen Statistik in der Abgrenzung der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung und den für die IKARUS-Datenbank benötigten Subsektoren für 1995 vorgenommen (Tabelle 2.6). Hierzu seien zunächst für das Basisjahr 1995 einige Hinweise gegeben:

- Bei den Gebietskörperschaften wurden anhand verfügbarer Statistiken (Statistisches Bundesamt 1997) Bereiche wie Krankenhäuser, Schulen, Sport- und Badeanlagen sowie Militär unterschieden.
- Im Bereich Gastgewerbe/Heime wurden die Zahlen auf Basis der Erhebungen für Westdeutschland (1,014 Mio.) für Gesamtdeutschland geschätzt (Statistisches Jahrbuch 1997, S. 108).
- Für die Erwerbstätigen in den Bereichen Bildung, Wissenschaft, Kultur und Verlagswesen wurde in gleicher Weise verfahren (Westdeutschland: 504 000).
- Die Zahlen für das Handwerk und die Kleinindustrie stammen zum Teil direkt aus der amtlichen Statistik (Statistisches Bundesamt Fachserie 4; Reihe 7.1), teilweise wurden sie geschätzt durch Summenbildung der Beschäftigten in Betrieben bis zu 10 Beschäftigten, der Zahl der betroffenen Betriebe und der ausgewiesenen mitarbeitenden Angehörigen (Statistisches Jahrbuch 1997, S. 232-234). Für einige Branchen wurden die Angaben zu den Erwerbstätigen nach Berufsgruppen zugrunde gelegt, indem Abschläge für die institutionelle Zuordnung geschätzt wurden (z.B. im Kfz-Gewerbe, Holzhandwerk).
- Die Aufteilung der Erwerbstätigenzahlen nach der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung im Bauhauptgewerbe wurde nach der Struktur der Erwerbstätigen nach Berufsgruppen durchgeführt (Statistisches Jahrbuch 1997, S.113).
- Die Differenzierung der Erwerbstätigenzahlen im Sektor Land- und Forstwirtschaft wurde auf die gleiche Weise vorgenommen, und zwar unter der Annahme, daß nur ein Teil der Gartenbauberufe in diesem Sektor des Gartenbaus erwerbstätig sind (andere z. B. bei Kommunen und anderen Wirtschaftszweigen). Die Zahlen für die Fischerei wurden geschätzt.
- Die Zahl der Erwerbstätigen der sonstigen privaten Dienstleistungen und freien Berufe bildet die Differenz zu allen Einzelposten der Erwerbstätigen; hierbei mußten Annahmen für diejenigen Erwerbstätigen getroffen werden, die der Kleinindustrie in Betrieben unter 20 Beschäftigten zuzuordnen sind, um sie von den Zahlen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung abzuziehen (1994: 379 000 lt. Statistik und 1995: 344 000 geschätzt).

Da die Daten für die Erwerbstätigen vom MIS-Modell für 1995 wegen der funktionalen Abgrenzung von den Daten im IKARUS-Modell mit dessen institutioneller Abgrenzung abweichen, werden für alle Projektionen der o.g. fünf Hauptsektoren die Zuwachsraten oder Minderungsraten der Erwerbstätigenzahlen des MIS-Modells unterstellt und mit den Basisdaten für 1995 multipliziert (institutionelle Abgrenzung).

Generell erscheinen die Gesamtzahlen der Erwerbstätigenentwicklung im Kleinverbrauchsbereich mit einem Zuwachs von 1,16 Mio. relativ hoch, zumal die Informations- und Kommunikationstechniken die Arbeitsproduktivität in vielen Dienstleistungsbereichen in Zukunft sehr erhöhen dürften (vgl. Häbler et al. 1989). Insofern sind die Erwerbstätigenzahlen so zu interpretieren, daß die Erwerbstätigkeit in zunehmendem Umfang in Teilzeitarbeit erfolgt, ohne daß im einzelnen bekannt wäre, wieviel Teilzeitarbeit letztendlich dabei entsteht. Für die Raumwärme-Berechnungen dürften aber die Zahlen der Erwerbstätigen, wie sie jetzt projiziert wurden, die angemessenen Werte sein, weil auch die in Teilzeitarbeit Erwerbstätigen in vielen Fällen räumlich einen vollen Arbeitsplatz benötigen.

Andererseits wurden andere Effekte noch nicht quantifiziert, beispielsweise die Auswirkungen der Telearbeit auf den realen Raumbedarf der Erwerbstätigen oder eine weitere Ausdehnung der Schichtarbeit in ausgewählten Branchen (z. B. Banken, Ingenieurbüros und Handel), was zu spezifisch geringerem Flächenbedarf für Raumwärme führen dürfte und in den Annahmen zur Büroflächenentwicklung berücksichtigt werden muß.

Insgesamt wird die in Tabelle 2-6 ausgewiesene Entwicklung der Erwerbstätigenzahlen im Sektor Kleinverbrauch unterstellt. Für die Projektionen wurden dabei im einzelnen folgende Annahmen für die Entwicklung der Einzelbranchen getroffen:

- Innerhalb der Gebietskörperschaften sind die Erwerbstätigenzahlen für die Bundeswehr und die Sozialversicherungen (wegen Rationalisierung) rückläufig. Anhand der demographischen Entwicklung wurde unterstellt, daß die Zahl der Erwerbstätigen in öffentlichen Schulen nach 2005 sinkt, ein Trend, der möglicherweise aufgrund der Finanzlage von Kommunen und Ländern schon früher einsetzen könnte. Bei Krankenhäusern und Kliniken wird eine leichte Zunahme auch nach 2005 angenommen;

trotz Kostensenkungsbemühungen könnte die demographische Komponente (wachsender Anteil der älteren Bevölkerung) die Entwicklung beeinflussen.

- Die Schätzungen zu den Erwerbstätigen beim Militär umfassen auch die Grundwehrdienstleistenden, um den Raumwärmebedarf abschätzen zu können. Die Zahlen wären dann zu hoch, wenn die Bundeswehr bis 2020 in ein Berufsheer umgewandelt würde (eine durchaus denkbare Entwicklung mit der Frage, wie das Vakuum der Zivildienstleistenden gefüllt werden kann).
- Bei den privaten Dienstleistungen nimmt die Zahl der Erwerbstätigen im Handel um etwa 600 000 ab, wobei der Einzelhandel stärker durch Aufgabe kleiner Einzelhandelsgeschäfte und weitere Rationalisierungen betroffen sein dürfte. Beim Gastgewerbe und bei den Heimen wird aufgrund veränderter Eßgewohnheiten, mehr Single-Haushalten und eines höheren Anteils der älteren Bevölkerung ein weiterhin steigender Trend zu höherer Erwerbstätigkeit unterstellt (Zuwachs um 300 000 bis 2020); zum Vergleich: 1970 bis 1995 in den alten Bundesländern +350 000).
- Im Bereich Bildung, Wissenschaft, Kultur und Verlagsgewerbe wird eine Stagnation angenommen, da dann die Rationalisierungen im Verlagsgewerbe durch IuK-Techniken den Zuwachs im Kultur- und Wissenschaftsbereich kompensieren. Möglicherweise ist dieser Kompensationseffekt überschätzt.
- Der Zuwachs der sonstigen privaten Dienstleistungen und freien Berufe, der methodisch durch Differenzbildung entstand (s.o.), impliziert mehr Erwerbstätigkeit sowohl im Bereich wissensintensiver Dienstleistungen (z.B. Betriebs- und Steuerberatung, Finanz- und IuK-Dienstleistungen) sowie in sonstigen Berufen (z.B. Versorgungsdienstleistungen, Gebäudereinigung und Sicherheitsdienste).
- Im Verkehr sind die Zahlen wegen erheblicher Rationalisierungen im Bereich Bahn, Post und Speditionen mit 0,6% jährlich leicht rückläufig, während der Nachrichtensektor infolge der neuen Märkte der IuK-Techniken mit 2,6% jährlich expandiert.
- Das Handwerk und die Kleinindustrie bauen in geringem Umfang Arbeitsplätze ab.
- Ebenso gehen die Erwerbstätigenzahlen im Baugewerbe nach dem Bauboom Anfang der neunziger Jahre wieder (um 200 000) zurück, was möglicherweise eine sehr optimistische Annahme ist.

- Die Zahl der Erwerbstätigen in der Landwirtschaft ist durch Aufgabe der kleineren Höfe mit 310 000 Erwerbstätigen (oder -2% pro Jahr) stark rückläufig, in abgeschwächter Form auch im Gartenbau, der Forstwirtschaft und Fischerei mit weitaus geringeren absoluten Zahlen.

Tabelle 2-6:

**Entwicklung der Erwerbstätiqenzahl im Sektor Kleinverbraucher
in Deutschland von 1995 bis 2020**

Wirtschaftssektoren	Erwerbstätige in 1000				Veränderungen in %/a	
	1995	2005	2010	2020	1995/05	2005/20
A. Öffentliche Dienstleistungen						
Dienstleistungen	7238	7400	7410	7420	0,2	0,0
* Gebietskörperschaften	5424	5450	5440	5420	0,0	0,0
* Org.- o. Erwerbscharakter	1814	1950	1970	2000	0,7	0,2
B. Private Dienstleistungen	10263	11443	11610	11893	1,1	0,3
* Handel	4613	4500	4350	4000	-0,2	-0,8
* Gastgewerbe, Heime	1100	1250	1300	1400	1,3	0,8
* Banken, Versicherungen	1042	950	920	850	-0,9	-0,7
* Kultur, Verlage	600	600	600	600	0,0	0,0
* freie Berufe	2908	4143	4440	5043	3,6	1,3
C. Verkehr, Nachrichten	1992	2045	2055	2064	0,3	0,1
* Verkehr	1587	1440	1410	1350	-1,0	-0,4
* Nachrichten	372	590	630	700	4,7	1,1
* Wasserversorgung	33	15	15	14	-7,6	-0,5
D. Handwerk, Kleinindustrie	2364	2305	2295	2245	-0,3	-0,2
E. Baugewerbe	3039	2984	2920	2822	-0,2	-0,4
F. Land- und Forstwirtschaft	1026	880	795	640	-1,5	-2,1
* Landwirtschaft	801	690	620	490	-1,5	-2,3
* Gartenbau	131	110	105	95	-1,7	-1,0
* Forstwirtschaft, Fischerei	94	80	70	55	-1,6	-2,5
Kleinverbraucher, insgesamt	25922	27057	27085	27084	0,4	0,0
Quelle: Berechnungen des ISI.						

Insgesamt könnte sich die Zahl der Erwerbstätigen von 1995 bis 2005 um 1,13 Mio. auf gut 27 Mio. erhöhen und dann bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes im Jahre 2020 auf diesem Niveau verharren. Dies läßt sich als Ausgleich der verschiedenen Effekte von Wertschöpfungszuwachs einerseits und Arbeitsproduktivitätsfortschritten (einschließlich Auslagerung von Funktionen an die privaten Haushalte, z.B. bei Bank- und Versicherungsdienstleistungen) andererseits interpretieren.

2.2.5 Annahmen zur Entwicklung im Verkehr

Als wichtigste bedarfsbestimmende Größe im Verkehrssektor werden im IKARUS-Modell die Verkehrsleistungen zugrunde gelegt. Dabei wird zwischen Personenverkehr (Personenkilometer, Pkm) und Güterverkehr (Tonnenkilometer, tkm) sowie darunter zwischen dem Nah- und dem Fernverkehr und über alle Segmente hinweg zwischen den jeweils relevanten Verkehrsmitteln unterschieden. Die entsprechend strukturierten Annahmen sind der Tabelle 2-7 zu entnehmen.

Danach würden die gesamten Personenverkehrsleistungen im Jahre 2020 um rund ein Viertel höher ausfallen als 1995; in der Periode von 1995 bis 2005 würde die Zunahme rund 15 % betragen. Insgesamt würde sich der Anstieg der Personenverkehrsleistung im Zeitablauf deutlich abschwächen: Einer jahresdurchschnittlichen Zuwachsrate von 1,4 % von 1995 bis 2005 steht eine solche von 0,5 % in den Jahren von 2005 bis 2020 gegenüber.

Innerhalb des Personenverkehrs weist der Nahverkehr den geringsten Zuwachs auf, wobei hier der – ohnehin dominierende – Pkw-Verkehr noch am stärksten zulegt. Beim Personenfernverkehr, dessen Verkehrsleistung bis 2020 um 36 % steigt, behält der Pkw-Verkehr seine überragende Bedeutung; das Gewicht des Luftverkehrs nimmt etwas zu.

Weitaus kräftiger als der Personenverkehr wächst der Güterverkehr. Über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg wird mit einer Zunahme von 75 % gerechnet. Von 1995 bis 2005 beträgt die jahresdurchschnittliche Zuwachsrate 2,7 %; von 2005 bis 2020 schwächt sich das Wachstumstempo zwar etwas ab, doch beläuft sich die Rate noch immer auf rund 2 %.

Innerhalb des Güterverkehrs herrschen die Lkw vor (über die der Nahverkehr ausschließlich und der Fernverkehr überwiegend abgewickelt wird). Im Fernverkehr wird der Lkw nach den hier zugrunde gelegten Annahmen seine führende Position allerdings nicht weiter ausbauen; vielmehr werden - dies sicher eine äußerst optimistische, wenn nicht sogar unrealistische Unterstellung - überdurchschnittliche Steigerungsraten für den Bahntransport erwartet.

Tabelle 2-7:

**Entwicklung der Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr
in Deutschland bis 2020**

	Einheit	Jeweilige Werte				Veränderungen in %/a		
		1995	2005	2010	2020	1995/05	2005/20	
		Personen-Nahverkehr						
Pkw	Mrd. Pkm	425	488	490	494	1,4	0,1	
Busse		43	45	45	45	0,5	0,0	
Bahnen		32	33	32	30	0,3	-0,6	
Summe		500	566	567	569	1,2	0,0	
			Personen-Fernverkehr					
Pkw		338	386	412	462	1,3	1,2	
Busse		26	30	30	30	1,6	0,0	
Bahnen		31	48	44	40	4,3	-1,1	
Luftverkehr		5	9	10	14	5,3	3,1	
Summe		400	472	497	546	1,7	1,0	
Summe Personenverkehr			900	1038	1063	1114	1,4	0,5
			Güter-Nahverkehr					
Lkw		Mrd. tkm	72	99	103	110	3,3	0,7
	Güter-Fernverkehr							
Lkw	194		228	266	338	1,6	2,7	
Bahnen	74		112	138	193	4,2	3,7	
Luftverkehr	0,03		0,04	0,05	0,05	2,9	1,5	
Schifffahrt	73		101	94	82	3,4	-1,4	
Summe	341		441	499	613	2,6	2,2	
Summe Güterverkehr			413	541	601	723	2,7	2,0

2.2.6 Definition der Modell-Szenarien, CO₂-Reduktionsvorgaben sowie wichtige energiepolitische und technische Begrenzungen

Definition der Szenarien und CO₂-Reduktionsvorgaben

In der vorliegenden Untersuchung werden für die Modellrechnungen in Übereinstimmung mit dem Auftraggeber die folgenden Szenarien definiert (vgl. auch weiter oben Übersicht 1-1):

- Modell-Basis-Szenario für Deutschland bis zum Jahre 2020 ohne CO₂-Zielvorgabe.
- Reduktions-Szenario mit einer CO₂-Minderungsvorgabe von -30% bis zum Jahre 2020 bezogen auf das Emissionsniveau im Jahre 1990 (30%-Reduktions-Szenario).
- Zwei Reduktionsszenarien mit einer CO₂-Minderungsvorgabe von jeweils -40% bis zum Jahre 2020 bezogen auf das Emissionsniveau im Jahre 1990 (40%-Reduktions-Szenario). Diese beiden Szenarien unterscheiden sich durch die Option, Ersatzinvestitionen in Kernkraftwerke für die heute bestehenden und nach Ende ihrer Betriebsdauer stillzulegenden Kernkraftwerke zuzulassen oder nicht.

Die Reduktionsszenarien differieren vom Modell-Basis-Szenario nur dadurch, daß für die einzelnen Stützjahre bestimmte CO₂-Minderungsziele vorgegeben werden (Tabelle 2-8).

Tabelle 2-8:

Festlegung der CO₂-Reduktionsvorgaben

	Einheit	Ausgangswerte		Zielwerte		
		1990	1995	2005	2010	2020
30%-Reduktions-Szenario	Mio. t CO ₂	977	856	781	748	683
	%		-12	-20	-23	-30
40%-Reduktions-Szenario	Mio. t CO ₂	977	856	732	683	585
	%		-12	-25	-30	-40

Die CO₂-Ausgangswerte der Jahre 1990 und 1995 weichen von den Werten der offiziellen Emissionsstatistiken ab (vgl. dazu den Anhang zu diesem Bericht). Eine Ursache

hierfür ist beispielsweise eine im Rahmen dieser Untersuchung vorgenommene vorrats- und temperaturbereinigte Betrachtung. Ein weiterer Grund ist der, daß den offiziellen Statistiken andere Abgrenzungen zugrunde liegen. Derartige Differenzen werden bewußt in Kauf genommen, da sie zumindest einen Vergleich der Ergebnisse für das Basis- und die Reduktionsszenarien nicht wesentlich beeinflussen und insoweit auch zu keinen "verzerrten" Schlußfolgerungen führen.

Begrenzungen

Der methodische Vorteil der Vorgabe von Begrenzungen besteht darin, bestimmte Lösungsmöglichkeiten testen zu können. Begrenzungen (als „Bounds“ bezeichnet) lassen sich für folgende Zwecke einsetzen:

- Justierung des Modells auf ein in der Vergangenheit liegendes Referenzjahr. Durch das Setzen von Begrenzungen werden die Ist-Werte dieses Jahres reproduziert.
- Energiepolitische Maßnahmen können im Modell durch die Vorgabe von Begrenzungen berücksichtigt werden. Ein Beispiel ist der Einsatz der im Vergleich zur Importkohle teuren deutschen Steinkohle.
- Ressourcenbeschränkungen lassen sich durch Bounds abbilden, z.B. die begrenzte heimische Öl- und Gasförderung.
- Umstellungen von einer alten auf eine neue Technologie, die das Modell u.U. schlagartig durchführt, beanspruchen in der Realität oft einen Übergangszeitraum. Beispiel: Zubau von Kraftwerkskapazität.
- Das Abbilden von Verhaltensmustern der in der Energiewirtschaft handelnden Akteure läßt sich mit Modellen in der Regel überhaupt nicht oder nur sehr unzureichend abbilden. Einige Verhaltensweisen können jedoch in Form von Begrenzungen „eingestellt“ werden.

Die Vorgabe von Begrenzungen engt den Optimierungsspielraum des Modells ein. Es ist deshalb wichtig darauf hinzuweisen, daß die Ergebnisse eines Modellaufs nur im Kontext der getroffenen Annahmen gesehen werden dürfen.

Eine Auswahl der wichtigsten Begrenzungen, die in allen Szenarien einheitlich zugrunde gelegt wurden, enthält Tabelle 2-9. Die hier angenommenen Begrenzungen sind im Sinne von Szenarioannahmen, nicht aber als energiepolitische Empfehlungen zu verstehen. Es gilt zu beachten, daß die oberen und unteren Grenzwerte vom Modell je nach Szenario unterschiedlich ausgeschöpft werden können, wobei der jeweilige aus den Optimierungsberechnungen resultierende Ergebniswert sich im Rahmen dieser Bandbreite bewegen kann und daher nicht unbedingt mit den oberen oder unteren Begrenzungen identisch sein muß.

Tabelle 2-9:

Wichtige energiepolitische und technische Begrenzungen in allen Szenarien

	Einheit	Zum Vergleich 1996	2005	2010	2020
Steinkohle-Gewinnung	PJ	1433	> 730	> 587	> 300
Steinkohle-Importe	PJ	527	< 1070	< 1250	< 1600
Braunkohle-Förderung	PJ	1660	> 1320 und < 1700	> 1173 und < 1700	> 880 und < 1700
Erdgas-Förderung	PJ	665	< 840	< 753	< 580
Erdgas-Importe A	PJ	2600	< 3500	< 3500	< 3500
Erdgas-Importe B	PJ		< 3500	< 3500	< 3500

In Abstimmung mit dem Auftraggeber und ausgehend von den Kohlepolitikbeschlüssen der Bundesregierung wurde für das Jahr 2005 eine Mindestfördermenge heimischer Steinkohle von 730 PJ (25 Mio. t SKE) angenommen. Diese Menge reduziert sich bis zum Jahre 2020 auf 300 PJ (10 Mio. t SKE).

Die Erdgasimporte werden in Form unterschiedlicher Preiskategorien vorgegeben. Wird das Potential der billigeren Erdgaskategorie A ausgeschöpft, besitzt das Modell die Möglichkeit das teurere Erdgas der Kategorie B zu importieren.

Weitere wichtige Annahmen sind die Vorgaben hinsichtlich der künftigen Rolle der Kernenergie. Hierzu sei auf die bereits weiter oben kommentierten Übersichten 1-1 und 1-2 verwiesen.

2.3 Ergebnisse der Modellrechnungen

2.3.1 Das Modell-Basis-Szenario

Das Modell-Basis-Szenario für die Entwicklung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen bis zum Jahre 2020 läßt sich im Sinne eines volkswirtschaftlich optimalen Szenarios interpretieren, in dem alle „no-regret“-Maßnahmen in Lösung gehen. Unter der Annahme, daß über die bislang implementierten bzw. eingeleiteten Reduktionsmaßnahmen hinaus keine zusätzlichen CO₂-Minderungsmaßnahmen ergriffen werden, berechnet das Modell für den betreffenden Zeitraum eine unter volkswirtschaftlichen Kriterien kostenoptimale Struktur des Energiesystems sowie die daraus resultierenden Energieverbrauchsmengen und Emissionen. Dieser Aspekt ist insbesondere zu beachten, wenn Vergleiche mit den Ergebnissen von Referenzentwicklungen anderer Szenarien oder Prognosen (vgl. Abschnitt 2.3.4) angestellt werden, die meistens von einer Business-as-Usual-Entwicklung ausgehen und insoweit nicht kostenoptimal sind.

Bei der Bewertung und Analyse der im folgenden beschriebenen Ergebnisse ist vor allem die Entwicklung der energieverbrauchsbestimmenden Nachfragen zu beachten. Daneben ist besonderes Augenmerk auf Strukturänderungen sowie autonome Effizienzverbesserungen zu legen, die ebenfalls das Ergebnis des Modell-Basis-Szenarios maßgeblich beeinflussen. Schließlich sind bei der Ergebnisbewertung auch die technologie-spezifischen Annahmen (z.B. Kosten) und Beschreibungen in die Betrachtungen mit einzubeziehen.

Gegenüber 1995 nimmt der gesamte Primärenergieverbrauch (Abbildung 2-1, Tabelle 2-10) bis zum Jahre 2005 um 5,5 %, bis 2010 um 7,8% und bis 2020 um 15,9 % ab. Der Steinkohleneinsatz reduziert sich bis 2005 auf 1 800 PJ (rund 62 Mio. t SKE), wobei die maximal mögliche Importsteinkohlenmenge eingesetzt wird. Nach 2005 sinkt der Steinkohleneinsatz deutlich stärker und beträgt im Jahre 2020 rund 1 310 PJ (10 Mio. t heimische Steinkohle, 35 Mio. t Importsteinkohle). Ursache hierfür ist die rückläufige Steinkohleverstromung sowie der Rückgang der kohlen- bzw. koksintensiven Roheisenproduktion. So sinkt der industrielle Steinkohlen- und -kokseinsatz gegenüber 1995 bis zum Jahre 2020 um etwa 36 % auf ungefähr 390 PJ. Der Einsatz von Braunkohle vermindert sich gegenüber den Startjahren 1990 und 1995 drastisch; im Jahre 2020 er-

reicht er einen Wert von 1 024 PJ (116 Mio. t), der allerdings noch deutlich über der unteren Begrenzung von 880 PJ liegt. Gegenüber der heutigen Braunkohlenförderung von 187 Mio. t ist dies ein Rückgang von fast 40 %, der bis zum Jahre 2005 hauptsächlich in den Endverbrauchssektoren stattfindet und nach 2005 im wesentlichen auf die rückläufige Braunkohlenverstromung zurückzuführen ist.

Der Einsatz von Mineralöl und -produkten nimmt gegenüber der Ausgangssituation ab und erreicht im Jahre 2020 einen Wert von rund 4 900 PJ. Einerseits nimmt der Einsatz von Mineralölprodukten im Verkehrssektor nachfragebedingt bis zum Jahre 2005 deutlich und danach moderat zu; andererseits werden im Haushaltssektor Ölheizungen durch Gasheizungssysteme substituiert. Dieser „Switch“, der auch bei den Kleinverbrauchern und im Industriesektor auftritt, führt in der Summe zu einem sinkenden Mineralöleinsatz.

Gemessen an dem Verbrauchsniveau im Jahre 1995 erhöht sich der Erdgaseinsatz bis 2005 nur moderat und steigt danach aber drastisch. Wesentlicher Grund ist neben der zuvor erläuterten Entwicklung die zunehmende Verstromung von Erdgas. Gegenüber dem heutigen Erdgasverbrauch liegt der vergleichbare Wert für das Jahr 2020 um fast 35 % höher. Der Einsatz von Kernbrennstoffen ist bis zum Jahre 2020 stark rückläufig und beschränkt sich auf die verbleibenden Restkapazitäten. Kernkraftwerke werden im Modell-Basis-Szenario also nicht gebaut; das in diesem Szenario prinzipiell zugelassene Ersatzinvestitionspotential wird demzufolge nicht genutzt.

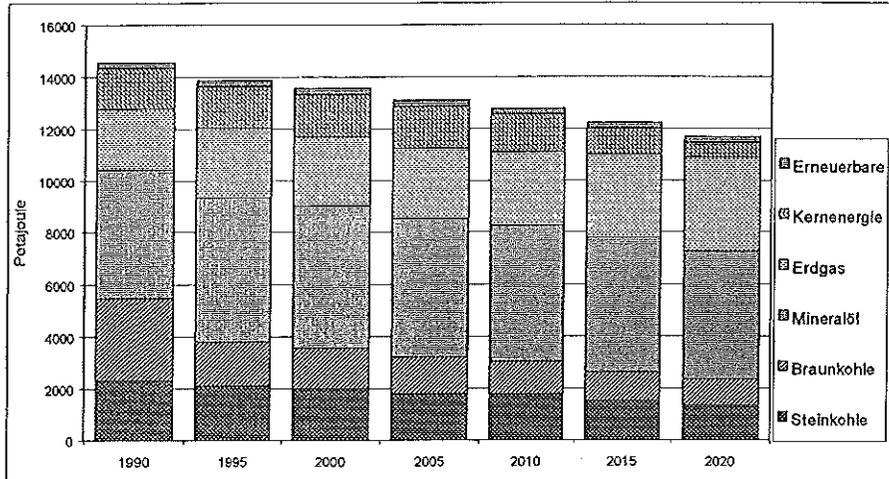
Tabelle 2-10:

**Struktur des Primärenergieverbrauchs bis zum Jahre 2020
im Modell-Basis-Szenario**

	Primärenergieverbrauch in PJ					Änderung geg. 1990 in %			Änderung geg. 1995 in %		
	1990	1995	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020
Steinkohle	2290	2100	1800	1767	1310	-21,4	-22,8	-42,8	-14,3	-15,8	-37,6
Braunkohle	3179	1700	1402	1248	1024	-55,9	-60,8	-67,8	-17,5	-26,6	-39,8
Mineralöl	4955	5545	5311	5229	4928	7,2	5,5	-0,6	-4,2	-5,7	-11,1
Erdgas	2356	2700	2716	2857	3636	15,3	21,3	54,4	0,6	5,8	34,7
Kernenergie	1565	1586	1628	1445	556	4,1	-7,7	-64,5	2,7	-8,9	-65,0
Erneuerbare	201	228	242	235	206	20,7	17,2	2,7	6,4	3,4	-9,4
Summe	14546	13859	13099	12782	11660	-9,9	-12,1	-19,8	-5,5	-7,8	-15,9

Abbildung 2-1:

**Primärenergieverbrauch nach Energieträgern bis zum Jahre 2020
im Modell-Basis-Szenario**



Der Endenergieverbrauch (Tabelle 2-11, Abbildung 2-2) nimmt gegenüber 1995 bis 2005 um 2,7 %, bis 2010 um 4,2 % und bis 2020 um 8,2 % ab. Besonders drastisch ist die Abnahme des industriellen Energieverbrauchs, der im Jahre 2010 um fast 12,5 % und im Jahre 2020 um rund 18 % niedriger ist als 1995. Wesentliche Gründe für diese Entwicklung sind die sinkende Nachfrage energieintensiver Industrieprodukte sowie branchenstrukturelle Effekte.

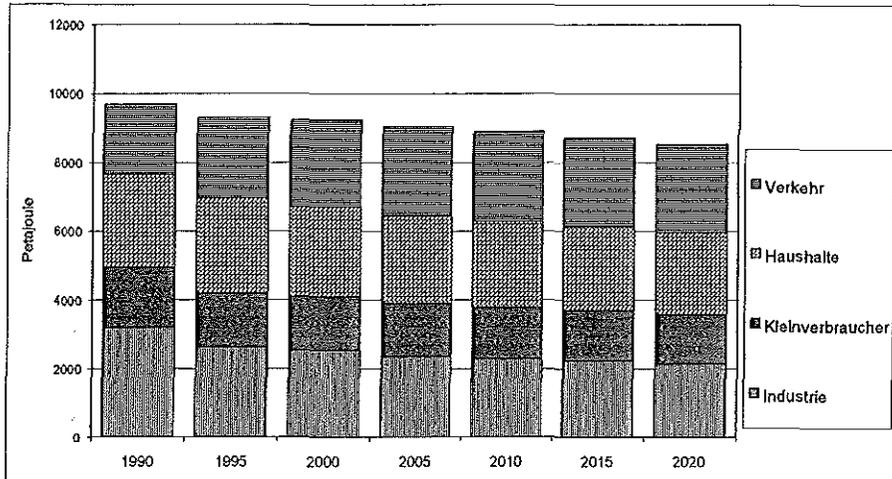
Tabelle 2-11:

**Endenergieverbrauch nach Energieträgern bis zum Jahre 2020
im Modell-Basis-Szenario**

	Endenergieverbrauch in PJ					Änderung geg. 1990 in %			Änderung geg. 1995 in %		
	1990	1995	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020
Feste Brennstoffe	2013	971	638	577	494	-68,3	-71,3	-75,5	-34,3	-40,6	-49,1
Mineräölprodukte	3823	4342	4364	4255	4003	14,2	11,3	4,7	0,5	-2,0	-7,8
Gase	1885	2025	2125	2181	2272	12,7	15,7	20,5	4,9	7,7	12,2
Strom	1640	1603	1592	1575	1531	-2,9	-4,0	-6,6	-0,7	-1,7	-4,5
Fernwärme	278	274	252	248	180	-9,4	-10,8	-35,3	-8,0	-9,5	-34,3
Erneuerbare	53	80	75	69	55	41,5	30,2	3,8	-6,3	-13,8	-31,3
Gesamt	9692	9295	9046	8905	8535	-6,7	-8,1	-11,9	-2,7	-4,2	-8,2

Abbildung 2-2:

Endenergieverbrauch nach Sektoren bis zum Jahre 2020 im Modell-Basis-Szenario



Der abnehmende Energieverbrauch im Haushaltssektor ist zum einen mit der Substitution von Heizungssystemen mit festen und flüssigen durch hocheffiziente Erdgasheizungen zu erklären. Zum anderen spielt die Wärmedämmung in Altbauten innerhalb des Renovierungszyklus und in Neubauten mit fortschreitendem Betrachtungszeitraum eine immer größere Rolle. Im Jahre 2020 verbrauchen die Haushalte rund 1 010 PJ Erdgas; das sind etwa 20 % mehr als 1995. Dagegen nimmt der Heizöleinsatz gegenüber 1995 um etwa 34 % ab.

Innerhalb des gesamten Endenergiebereiches kommt es lediglich im Verkehrssektor zu einem deutlichen Anstieg: Hier nimmt der Endenergieverbrauch bis zum Jahre 2010 gegenüber 1995 um 12,8 % zu; erst anschließend ist er leicht rückläufig. Im Jahre 2020 liegt der Energieverbrauch aber immer noch etwa 8,6 % über dem heutigen Verbrauchsniveau. Dabei sind im Personen- und Güterverkehr unterschiedliche Entwicklungen festzustellen. Im Personenverkehr steigt der Energieeinsatz gegenüber 1995 bis zum Jahre 2005 nachfragebedingt um 6,7 %. Trotz des moderaten Zuwachses der Personenverkehrsleistungen im Zeitraum von 2005 bis 2020 nimmt der Energieeinsatz bis zum Jahre 2020 ab und erreicht fast den Verbrauch des Jahres 1995. Der nachfragebe-

dingte Anstieg wird durch die verbesserte Energieeffizienz der Pkw mehr als ausgeglichen.

Demgegenüber ergibt sich für den Güterverkehr ein kontinuierlicher Anstieg des Energieverbrauchs, der mit dem signifikanten Anstieg der Güterverkehrsleistungen zu begründen ist. Gegenüber 1995 nimmt der Verbrauch bis zum Jahre 2010 um fast 30 % und bis zum Jahre 2020 sogar um nahezu 35 % zu.

Für den rückläufigen Energieverbrauch im Sektor Kleinverbraucher sind im wesentlichen die Wärmedämmung sowie die Substitution von Kesseln auf Basis fester bzw. flüssiger Energieträger durch Erdgaskessel verantwortlich.

Entsprechend dem Stromverbrauch (Tabelle 2-12), der in der Summe bis zum Jahre 2005 (454 Mrd. kWh) nahezu stagniert und danach bis zum Jahre 2020 (437 Mrd. kWh) abnimmt, ist der Verlauf der Stromerzeugung (Abbildung 2-3). Gegenüber 1995 ist die Aufteilung auf die jeweiligen Energieträger mit Ausnahme der Erdgas- und Windstromerzeugung nahezu unverändert. Die Erdgasverstromung verdoppelt sich gegenüber 1995 und erreicht im Jahre 2005 einen Wert von rund 47 Mrd. kWh. Die Nutzung der Windenergie beschränkt sich auf die exogen vorgegebenen Mindestkapazitäten (im Jahre 2005 etwa 2,7 GW).⁷ Für den Zeitraum nach 2005 ist die Entwicklung durch einen Rückgang der Kohle- und Kernenergieverstromung sowie durch einen massiven Zubau hocheffizienter GuD-Kraftwerke auf Erdgasbasis charakterisiert.

Tabelle 2-12:

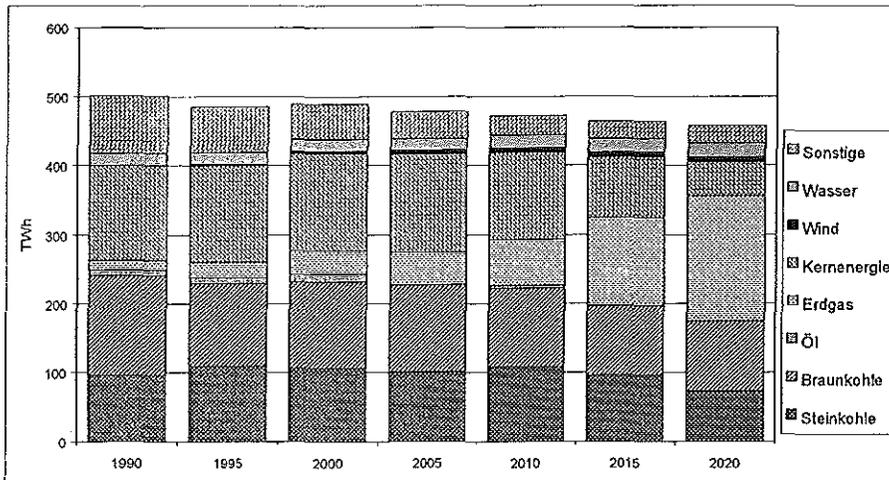
Stromverbrauch nach Sektoren bis zum Jahre 2020 im Modell-Basis-Szenario

	Stromverbrauch in TWh					Änderung geg. 1990 in %			Änderung geg. 1995 in %		
	1990	1995	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020
Kleinverbraucher	99,9	109,7	98,2	94,7	89,0	-1,8	-5,3	-10,9	-10,5	-13,7	-18,9
Industrie	222,0	195,3	196,7	200,0	202,9	-11,4	-9,9	-8,6	0,8	2,4	3,9
Haushalte	120,8	127,6	130,2	125,5	115,4	7,8	4,0	-4,4	2,0	-1,6	-9,6
Verkehr	12,6	12,4	17,0	17,2	17,9	34,9	36,6	42,1	36,7	38,4	44,1
sonstige	21,0	15,4	12,1	11,0	11,4	-42,5	-47,5	-45,6	-21,9	-28,7	-26,1
Summe	476,3	460,5	454,1	448,5	436,6	-4,6	-5,8	-8,3	-1,4	-2,6	-5,2

⁷ Die für das Jahr 2005 vorgegebene Mindestkapazität von 2,7 GW wurde Ende 1998 mit 2,9 GW bereits überschritten (DEWI, 1999).

Abbildung 2-3:

**Stromerzeugung nach Energieträgern bis zum Jahre 2020
im Modell-Basis-Szenario**



Die installierte Nettoleistung (Abbildung 2-4) nimmt gegenüber 1995 bis 2020 um rund 15 GW ab, was neben der Verminderung des Stromverbrauchs auf den Zubau effizienter Kraftwerke und den Abbau von Überkapazitäten (z.B. Kraftwerke mit öl- und gasbefeuerten Dampferzeugern) zurückzuführen ist. Kernkraftwerke werden sukzessive stillgelegt; ihre installierte Kapazität (Restbestand) erreicht 2020 nur noch 7,2 GW. Über 40 % der 2020 bestehenden öffentlichen Kraftwerkskapazität sind im Modell-Basis-Szenario erdgasgefeuerte Anlagen, die teilweise auch in der Grundlast gefahren werden.

Gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 nehmen die energiebedingten CO₂-Emissionen (Tabelle 2-13) bis 2005 um 17,5 % ab. Der Rückgang bis 2010 beträgt 19,3 % und rund 24 % bis 2020. Nach den Ergebnissen dieser Modellrechnungen wird damit die 25 %-Minderungsmarke der Bundesregierung für das Jahr 2005 deutlich verfehlt.⁸

Die Reduktion der CO₂-Emissionen bis zum Jahre 2005 gegenüber 1995 um insgesamt fast 50 Mio. t findet hauptsächlich im Umwandlungssektor (-28 Mio. t), bei den Haushalten (-23 Mio. t) sowie im Industriesektor (-19 Mio. t) statt. Dagegen kommt es im

⁸ Die im Vorhaben Politikszenerarien I für 2005 vergleichbare CO₂-Minderung gegenüber 1990 ist mit 16,8 % etwas schwächer, was im wesentlichen auf die geänderten Nachfragen zurückzuführen ist.

Verkehr noch zu einem Anstieg um 20 Mio. t. Die Entwicklung in den Jahren von 2005 bis 2020 zeigt ein deutlich anderes Bild. Verglichen mit dem Emissionsniveau des Jahres 2005 teilt sich die CO₂-Einsparung von insgesamt 65 Mio. t etwa je zur Hälfte auf den Umwandlungssektor mit 33 Mio. t und die Endverbrauchssektoren mit 32 Mio. t auf. Fast 50% der gesamten (direkten) CO₂-Einsparung aller Endverbrauchssektoren stammt aus dem Industriesektor.

Abbildung 2-4:

Kraftwerkskapazitäten der öffentlichen Versorgung bis zum Jahre 2020 im Modell-Basis-Szenario

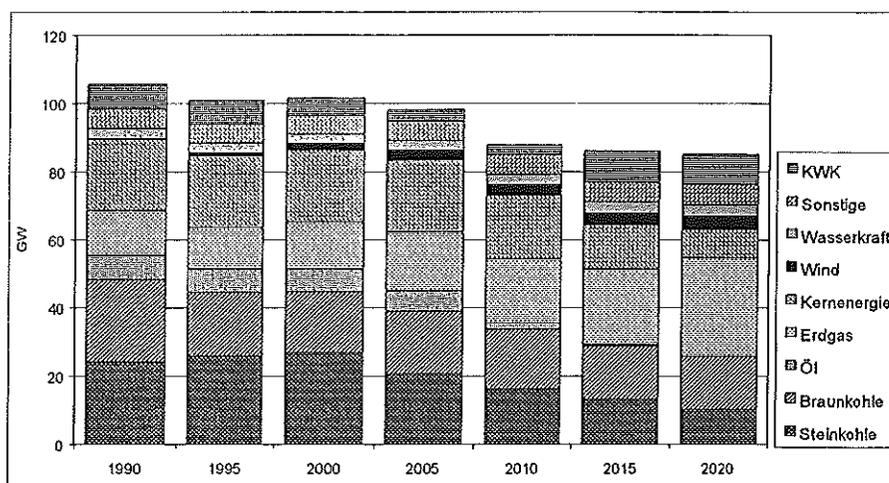


Tabelle 2-13:

CO₂-Emissionen nach Sektoren bis zum Jahre 2020 im Modell-Basis-Szenario

	CO ₂ -Emissionen in Mio. t					Änderung geg. 1990 in %			Änderung geg. 1995 in %		
	1990	1995	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020
Kleinverbraucher	97	71	72	71	66	-26,1	-26,5	-31,7	0,7	0,2	-6,9
Industrie	189	135	116	108	101	-38,8	-42,8	-46,7	-14,6	-20,1	-25,6
Haushalte	158	149	126	123	118	-19,8	-22,0	-24,9	-15,2	-17,6	-20,6
Verkehr	145	166	186	187	183	28,1	28,8	26,2	11,7	12,3	10,1
Umwandlung	388	334	306	299	273	-21,1	-23,0	-29,5	-8,3	-10,5	-18,1
Summe	976	855	805	788	742	-17,5	-19,3	-24,0	-5,9	-7,9	-13,3

2.3.2 Reduktionsszenarien

Im Modell-Basis-Szenario sind die CO₂-Emissionen im Jahre 2005 deutlich höher als der von der Bundesregierung angestrebte Zielwert. Erst im Jahre 2020 wird eine CO₂-Minderung von nahezu 25 % erreicht, wobei unterstellt wird, daß keine über die bis heute implementierten und eingeleiteten Minderungsmaßnahmen hinausgehenden Maßnahmen ergriffen werden. Tabelle 2-14 enthält die CO₂-Emissionswerte des Modell-Basis-Szenarios sowie die vorgegebenen Emissionsbegrenzungen für die Reduktionsszenarien.

Tabelle 2-14:

CO₂-Emissionen im Modell-Basis-Szenario und in den Reduktionsszenarien

	Modell-Basis-Szenario	30%-Reduktions-Szenario		40%-Reduktions-Szenario	
		CO ₂ -Emissionen	Änderung gegenüber Modell-Basis-Szenario	CO ₂ -Emissionen	Änderung gegenüber Modell-Basis-Szenario
Mio. t					
1990	977	977	0	977	0
1995	855	855	0	855	0
2005	805	781	-25	732	-74
2010	788	748	-39	683	-105
2020	742	683	-59	585	-157

Fett gedruckt: Reduktionsvorgaben. Abweichungen in den Summen durch Rundungen.

Da bereits im Modell-Basis-Szenario die CO₂-Emissionen bis 2010 bzw. 2020 gegenüber 1990 rund 19 % bzw. 24 % sinken, sind die Minderungsvorgaben des 30%-Reduktions-Szenarios relativ moderat. Gemäß den Modellrechnungen stammt der wesentliche zusätzliche Minderungsbeitrag in diesem Szenario aus dem Umwandlungsbereich, während die Minderungsbeiträge der Endverbrauchersektoren dagegen eher gering ausfallen (Tabelle 2-15). Die Minderung im Umwandlungssektor ist hauptsächlich auf eine rückläufige Steinkohlenverstromung zurückzuführen, die im Jahre 2020 nur noch einen Wert von etwa 40 Mrd. kWh erreicht. An Stelle der Steinkohlenverstromung tritt die Elektrizitätserzeugung aus Erdgaskraftwerken, von denen nach 2010 zunehmend Anlagen auf KWK-Basis eingesetzt werden.

Tabelle 2-15:

**Sektorale CO₂-Minderungsbeiträge in den Reduktionsszenarien
im Vergleich mit dem Modell-Basis-Szenario**

	Modell-Basis-Szenario			30%-Reduktions-Szenario			40%-Reduktions-Szenario					
							mit konstanter Kernenergiekapazität			mit auslaufender Kernenergienutzung		
	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020
CO ₂ -Emissionen in Mio. t												
Umwandlung	306	299	273	-19	-32	-43	-49	-70	-99	-49	-64	-76
Industrie	116	108	101	0	0	-5	-4	-3	-10	-4	-3	-13
Kleinverbraucher	72	71	66	-3	-2	-2	-8	-10	-10	-7	-11	-17
Haushalte	126	123	118	-3	-4	-6	-12	-20	-34	-13	-25	-45
Verkehr	186	187	183	0	-1	-3	-1	-2	-4	-1	-2	-6
Summe	805	788	742	-25	-39	-59	-74	-105	-157	-74	-105	-157

Ein Vergleich mit den Ergebnissen des 30%-Reduktions-Szenarios zeigt, daß im 40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität die Minderungslasten ähnlich verteilt sind. Der Minderungsbeitrag des Umwandlungssektors ist ebenfalls am größten, allerdings sind die von den Endverbrauchssektoren zu leistenden Minderungen deutlich höher als im 30%-Szenario. Die Minderung im Umwandlungssektor fällt etwa doppelt so hoch aus wie im 30%-Szenario. Diese Verdopplung wird durch einen weiteren Rückgang der Kohleverstromung, eine halbierte Erdgasverstromung und durch einen deutlichen Zubau von Kernkraftwerken erreicht, der bereits nach dem Jahre 2005 einsetzt, indem die stillgelegten Kernkraftkapazitäten sukzessive durch neue Anlagen ersetzt werden. Hierbei wird in jeder Zeitperiode das maximal mögliche Kapazitätsniveau von 21,1 GW_{netto} durch entsprechende Ersatzinvestitionen der altersbedingten Stilllegungen von Kernkraftwerken ausgeschöpft.

Verglichen mit diesem 40%-Reduktions-Szenario liegen die absoluten CO₂-Emissionen des Umwandlungssektors im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung im Jahre 2020 etwa um 23 Mio. t höher. Die Ursache hierfür ist, daß der wegfallende und nicht mit CO₂-Emissionen behaftete Kernenergiestrom durch Strom auf Erdgasbasis substituiert wird. Um das Minderungsziel von 40% einzuhalten, müssen diese Mehremissionen durch zusätzliche Minderungsmaßnahmen in den Endverbrauchssektoren kompensiert werden. Eine zentrale Rolle spielen hierbei die Sektoren Haushalte und Kleinverbraucher, die fast 75 % der Mehremissionen zusätzlich reduzieren, wobei vor allem die Wärmedämmung auch außerhalb der Renovierungszyklen ver-

stärkt wird. Die Tabellen 2-16a und 2-16b enthalten einen Überblick über die wichtigsten Maßnahmen, die im Modell-Basis-Szenario sowie in den Reduktionsszenarien gegenüber diesem Modell-Basis-Szenario in den einzelnen Sektoren ergriffen werden.

Tabelle 2-16a:

**Strukturelle Entwicklungen bis zum Jahre 2020
im Modell-Basis-Szenario nach Sektoren
(Änderungen von 1990 bis 2020)**

Umwandlung	<ul style="list-style-type: none"> - Abnahme der Kernenergiekapazität um ca. 14 GW auf 7,2 GW entsprechend einer technischen Lebensdauer von 35 Jahren - Verstärkter Einsatz von Importsteinkohle, allerdings insgesamt Abnahme der Steinkohlenverstromung um 20 TWh auf 74 TWh - Abnahme der Braunkohlenverstromung um 45 TWh auf 100 TWh - Abnahme des endenergieseitigen Fernwärmeverbrauchs um ein Drittel und somit Abnahme der Erzeugung in Heizwerken und KWK-Anlagen - Starke Zunahme der Erdgasverstromung um 160 TWh auf 180 TWh, Zubau von 23 GW hocheffizienten GuD-Kraftwerken - Zunahme der regenerativen Stromerzeugung um rund 50 % auf 28 TWh - CO₂-Reduktion gegenüber 1990: 115 Mio. t
Kleinverbraucher	<ul style="list-style-type: none"> - Starke Abnahme des Kohle- und Heizölverbrauchs und Substitution durch erdgasbefeuerte Systeme - Kontinuierliche Umsetzung der WärmeschutzVO im Neubaubereich sowie standardmäßige Altbauanierung innerhalb des normalen Renovierungszyklus - CO₂-Reduktion gegenüber 1990: 31 Mio. t
Industrie	<ul style="list-style-type: none"> - Abnahme des Kohleverbrauchs aufgrund von Strukturänderungen, wie die Abnahme der Produktion energieintensiver Produkte (z.B. Roheisen) - Abnahme der Fernwärmeproduktion auf 20 PJ - Abnahme des Stromverbrauchs um 10 % auf ca. 200 TWh - Substitution von kohle- und ölbefeuerten Kesseln durch Kessel auf Erdgasbasis - CO₂-Reduktion gegenüber 1990: 88 Mio. t
Haushalte	<ul style="list-style-type: none"> - Substitution von Öl- und Kohleheizungen durch erdgasbefeuerte Heizungssysteme, Zunahme des Erdgaseinsatzes um 50 % auf 1000 PJ - Rückgang des Stromverbrauchs um etwa 20 PJ auf 415 PJ - Kontinuierliche Umsetzung der WärmeschutzVO im Neubaubereich sowie standardmäßige Altbauanierung innerhalb des normalen Renovierungszyklus - Abnahme des Fernwärmeverbrauchs um fast 25% - CO₂-Reduktion gegenüber 1990: 40 Mio. t
Verkehr	<ul style="list-style-type: none"> - Trotz steigender Nachfragen nur moderate Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs im Personenverkehr auf das Verbrauchsniveau von 1995 wegen autonomer effizienzsteigernder Maßnahmen - Starke Zunahme des Dieserverbrauchs im Güterverkehr aufgrund steigender Nachfragen - Moderate Zunahme des schienengebundenen Verkehrs - CO₂-Erhöhung gegenüber 1990: 38 Mio. t

Tabelle 2-16b:

**Überblick über die wichtigsten Minderungsmaßnahmen
in den Reduktionsszenarien**
- Änderungen im Jahre 2020 gegenüber dem Modell-Basis-Szenario -

	30%-Reduktions-Szenario Reduktion bis 2020: -30%	40%-Reduktions-Szenario Reduktion bis 2020: -40%	
		mit konstanter Kernenergiekapazität	mit auslaufender Kernenergienutzung
Umwandlung	43	99	76
Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> - Bau eines Kernkraftwerks (+1,2 GW) - Zubau von Braunkohlekraftwerken mit höherem Wirkungsgrad - Rückgang konventioneller Gaskraftwerke um 9 GW - Rückgang der Braunkohleverstromung um 5 TWh_{el} und der Steinkohleverstromung um 34 TWh_{el} - Mittelfristige (2005-2015) Substitution von Steinkohleverstromung durch GuD-Kraftwerke - Mehr Fernwärme aus GuD-HKW (+6 GW_{el}) - Stärkerer Einsatz von Müll in Kraftwerken (+44 PJ) - Rückgang des Stromverbrauchs um 0,7% 	<ul style="list-style-type: none"> - maximal möglicher Ersatz von KKW (Gesamtkapazität: 21 GW) - ausschließlicher Einsatz von Braunkohlekraftwerken mit höherem Wirkungsgrad - Rückgang konventioneller Gaskraftwerke um 9 GW und Rückgang der GuD-Kapazitäten um 8 GW bis 2020 - Rückgang der Steinkohleverstromung um 57 TWh_{el}, Braunkohleverstromung konstant - kein weiterer Ausbau der GuD-Kapazität (ohne KWK) - Mehr Fernwärme aus GuD-HKW (+3 GW_{el}) - Stärkerer Einsatz von Müll in Kraftwerken (+44 PJ) - Ausbau der Windenergie (+2,4 GW) und der Wasserkraft (+400 MW) - Ausbau der Nahwärmeversorgung auf Basis Erdgas, Biogas und Sonnenkollektoren - Rückgang des Stromverbrauchs um 1% 	<ul style="list-style-type: none"> - keine Ersatzinvestitionen von Kernkraftwerken zugelassen - ausschließlicher Einsatz von Braunkohlekraftwerken mit höherem Wirkungsgrad - Rückgang konventioneller Gaskraftwerke um 9 GW - Rückgang der Steinkohleverstromung um 57 TWh_{el}, Braunkohleverstromung konstant - maximaler Ausbau der GuD-Kapazitäten - Mehr Fernwärme aus GuD-HKW (+5,3 GW_{el}) - Stärkerer Einsatz von Müll in Kraftwerken (+44 PJ) - Ausbau der Windenergie (+5,2 GW) und der Wasserkraft (+400 MW) - Weiterer Ausbau der Nahwärmeversorgung auf Basis Erdgas, Biogas und Sonnenkollektoren - Ausbau der Fernwärmeversorgung mit Biomasse-Heizkraftwerken (+0,9 GW) - Rückgang des Stromverbrauchs um 2,3%
Industrie	5	10	13
Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> - zusätzlicher Einsatz von Spar- und Superspartechiken in einigen Branchen (Aluminium, Investitionsgüter, Chemie, Zement, Roheisen) - Substitution von Steinkohle und Öl durch Erdgas bei der Prozeßdampf- und -wärmeerzeugung - Rückgang des Kohleverbrauchs um 48 PJ und des Ölverbrauchs um 13 PJ 	<ul style="list-style-type: none"> - Einsatz von Spar- und Superspartechiken in allen Branchen - Prozeßdampf- und -wärmeerzeugung weitestgehend aus Erdgaskesseln - Ausbau der industriellen KWK und Stromeinspeisung ins öffentliche Netz - Rückgang des Kohleverbrauchs um 67 PJ und des Ölverbrauchs um 166 PJ 	<ul style="list-style-type: none"> - Maximaler Einsatz von Superspartechiken in allen Branchen - Prozeßdampf- und -wärmeerzeugung ausschließlich aus Erdgaskesseln und Biomasse - weiterer Ausbau der industriellen KWK und Stromeinspeisung ins öffentliche Netz - Rückgang des Kohleverbrauchs um 67 PJ und des Ölverbrauchs um 178 PJ

Tabelle 2.16b (Fortsetzung):

**Überblick über die wichtigsten Minderungsmaßnahmen
in den Reduktionsszenarien**
- Änderungen im Jahre 2020 gegenüber dem Modell-Basis-Szenario -

	30%-Reduktions-Szenario Reduktion bis 2020: -30%	40%-Reduktions-Szenario Reduktion bis 2020: -40%	
		mit konstanter Kernenergiekapazität	mit auslaufender Kernenergienutzung
Haushalte	Reduktion (Mio. t) 6	34	45
Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> - zusätzliche Wärmeschutzmaßnahmen bei Mehrfamilienhäusern - Brennstoffwechsel von Heizöl (-200 PJ) zu Erdgas (+170PJ) - erhöhter Einsatz von Gasbrennwertkesseln - leichte Zunahme der Nah- und Fernwärmeversorgung (+5 PJ) 	<ul style="list-style-type: none"> - weitgehendes Ausschöpfen der Renovierungspotentiale innerhalb Renovierungszyklen; bis 2020 Sanierung von 2/3 der Wohnfläche - verbesserter Wärmeschutz im Neubau - Energieträgerwechsel von Heizöl (-400 PJ) und Kohle (-33 PJ) zu Erdgas (konstant), Fernwärme und Biomasse - maximal möglicher Einsatz von Brennwertkesseln bei Gas- und Ölheizungen - weiterer Ausbau der Nah- und Fernwärme (+10 PJ) 	<ul style="list-style-type: none"> - noch weitergehendes Ausschöpfen der Renovierungspotentiale innerhalb Renovierungszyklen - zusätzliche Sanierungsmaßnahmen außerhalb von Renovierungszyklen; bis 2020 Sanierung des kompletten Wohnflächenbestandes - weiter verbesserter Wärmeschutz im Neubau bis unter Niedrigenergiehaus-Standard - Energieträgerwechsel von Heizöl (-444 PJ), Kohle (-57 PJ) und Erdgas (-104 PJ) zu Fernwärme und Biomasse - maximal möglicher Einsatz von Brennwertkesseln bei Gas- und Ölheizungen - weiterer Ausbau der Nah- und Fernwärme (+15 PJ)
Kleinverbraucher	Reduktion (Mio. t) 2	10	18
Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> - Rückgang des Endenergiebedarfs um 30 PJ durch besseren Wärmeschutz 	<ul style="list-style-type: none"> - Rückgang des Endenergiebedarfs um 95 PJ durch Wärmeschutz und andere Spartechniken - Zubau elektrischer Wärmepumpen - Zunahme der Dampferzeugung aus Biomasse und Biogas - Substitution von Kohle (-23 PJ) und Öl (-100 PJ) durch Erdgas (+9 PJ) 	<ul style="list-style-type: none"> - Rückgang des Endenergiebedarfs um 133 PJ durch Wärmeschutz und andere Spartechniken - Zubau elektrischer Wärmepumpen - Zunahme der Dampferzeugung aus Biomasse und Biogas - Substitution von Kohle (-23 PJ), Öl (-162 PJ) und Erdgas (-14 PJ) durch Wärmeschutz
Verkehr	Reduktion (Mio. t) 3	4	6
Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> - Einsatz von besonders effizienten Fahrzeugen - diverse andere Detailmaßnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> - Einsatz von besonders effizienten Fahrzeugen - diverse andere Detailmaßnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> - Verstärkter Einsatz von besonders effizienten Fahrzeugen - diverse andere Detailmaßnahmen
CO₂-Reduktion über alle Sektoren gegenüber Modell-Basis-Szenario	-59	-157	-157

Primär- und Endenergieverbrauch in den Reduktionsszenarien

Gegenüber dem 30%-Szenario, in dem verglichen mit dem Modell-Basis-Szenario der Primärenergieverbrauch um rund 2 % (2010) bzw. um 3,3 % (2020) niedriger ist, sind die vergleichbaren Einsparungen im 40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität mit 5,9 % (2010) bzw. 4,8 % (2020) deutlich ausgeprägter (Tabelle 2-17, Abbildung 2-5). Dieser Trend setzt sich ebenfalls beim Endenergieverbrauch fort, dort allerdings in verschiedenen Ausprägungen. Im 30%-Reduktions-Szenario vermindert sich der Endenergieverbrauch gegenüber dem Modell-Basis-Szenario um 0,4 % (2010) bzw. um 1,7 % (2020); Einsparungen finden somit überwiegend im Umwandlungssektor statt (z.B. Einsatz hocheffizienter GuD-Kraftwerke). Im 40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität beträgt die endenergieseitige Einsparung (Tabelle 2-18, Abbildung 2-6) im Jahre 2020 rund 7 % verglichen mit dem Modell-Basis-Szenario. Sie liegt deutlich höher als der vergleichbare Wert für die Primärenergie. Das verdeutlicht die großen Anforderungen, die unter den Bedingungen dieses Reduktionsszenarios an die Endverbraucher gestellt werden, um die 40%-Zielmarke zu erreichen.

Tabelle 2-17:

Änderungen des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern in den Reduktionsszenarien gegenüber dem Modell-Basis-Szenario

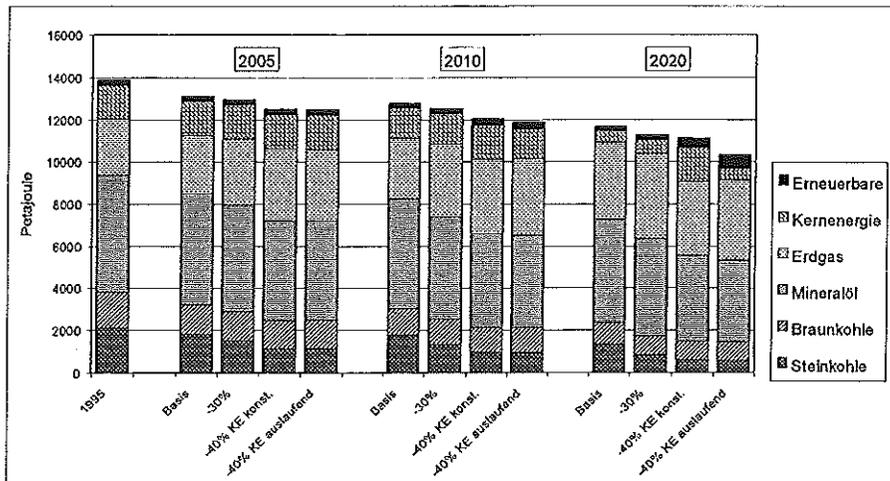
	Modell-Basis-Szenario			30%-Reduktions-Szenario			40%-Reduktions-Szenario					
							mit konstanter Kernenergiekapazität			mit auslaufender Kernenergienutzung		
	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020
	Primärenergieverbrauch in PJ											
Steinkohle	1800	1767	1310	-303	-454	-469	-691	-808	-717	-668	-827	-740
Braunkohle	1402	1248	1024	-19	-23	-132	-70	-73	-144	-68	-72	-144
Mineralöl	5311	5229	4928	-246	-370	-315	-558	-787	-855	-579	-835	-1073
Erdgas	2716	2857	3636	417	582	400	703	666	-144	675	753	181
Kernenergie	1628	1445	556	0	0	83	0	184	1072	0	0	0
Erneuerbare	242	235	206	3	0	44	13	68	225	14	66	421
Summe	13099	12781	11660	-147	-265	-389	-603	-750	-562	-627	-915	-1355

Wie aus den Tabellen 2-17 und 2-18 zu entnehmen ist, erfordert das 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung deutlich höhere Energieeinsparungen, sowohl primär- als auch endenergieseitig. Gegenüber dem Modell-Basis-Szenario beträgt die Primärenergieeinsparung im Jahre 2020 rund 11,6 %; sie ist damit doppelt so

hoch wie im 40%-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität. Die entsprechende Endenergieeinsparung des Szenarios mit auslaufender Kernenergienutzung liegt bei rund 9,5 %.

Abbildung 2-5:

Primärenergieverbrauch nach Energieträgern im Modell-Basis-Szenario und in den Reduktionsszenarien



Verglichen mit dem 40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität spielt der Einsatz des CO₂-armen Erdgases im 30%-Reduktions-Szenario die entscheidende Rolle. Der Erdgasanteil am gesamten Primärenergieeinsatz beträgt in diesem Szenario im Jahre 2020 rund 36 % (4 000 PJ); das sind etwa 50 % mehr als heute (20 %, rund 2 700 PJ). Zur Erreichung der 40%-Zielmarke wird der mit CO₂-Emissionen behaftete Erdgasverbrauch sowohl gegenüber dem 30%-Reduktions-Szenario als auch dem Modell-Basis-Szenario deutlich zurückgefahren. Etwa 70 % des Erdgases werden in den Endverbrauchssektoren eingesetzt, wo Anlagen auf Basis fester und flüssiger Energieträger substituiert werden. Gegenüber dem Modell-Basis-Szenario und dem 30%-Reduktions-Szenario wird im 40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität im Umwandlungssektor die Erdgasverstromung durch die Ersatzinvestitionen in Kernkraftwerke substituiert. Der Einsatz von Stein- und Braunkohle nimmt in beiden 40%-Szenarien deutlich ab und beschränkt sich dort auf die vorgegebenen unteren Bounds.

Gegenüber dem 40%-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität wird im Fall der auslaufenden Kernenergienutzung deutlich weniger Erdgas in den Endverbrauchssektoren und dementsprechend mehr im Umwandlungssektor eingesetzt. Der in den Endverbrauchssektoren eingesetzte Erdgasanteil beträgt - gemessen am gesamten Erdgasverbrauch - etwa 60 %. Um das Minderungsziel von 40 % zu erreichen, ist auch der Einsatz des mit CO₂-Emissionen behafteten Erdgases begrenzt und es muß deutlich mehr Energie insbesondere in den Endverbrauchssektoren eingespart werden.

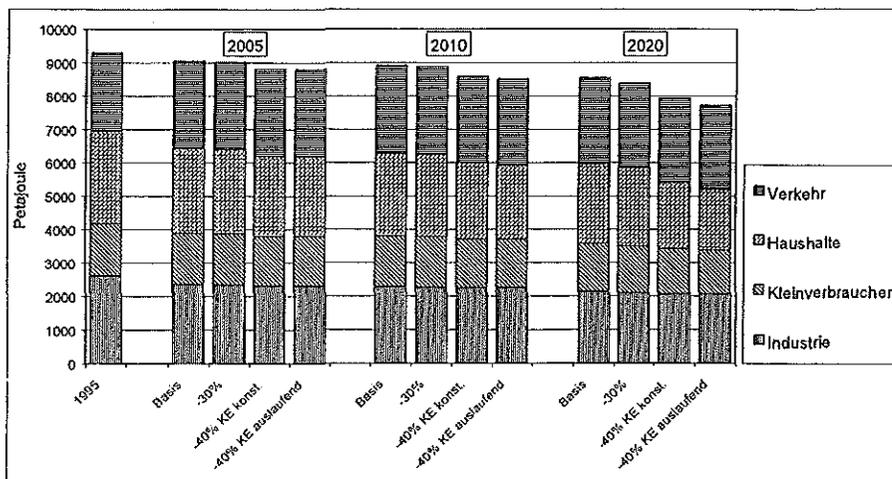
Tabelle 2-18:

Änderungen des Endenergieverbrauchs nach Sektoren in den Reduktionsszenarien gegenüber dem Modell-Basis-Szenario

	Modell-Basis-Szenario		30%-Reduktions-Szenario		40%-Reduktions-Szenario			
	2010	2020	2010	2020	mit konstanter Kernenergiekapazität		mit auslaufender Kernenergienutzung	
					2010	2020	2010	2020
	Endenergieverbrauch in PJ							
Industrie	2296	2147	-21	-49	-46	-77	-46	-78
Kleinverbraucher	1499	1429	-4	-31	-59	-95	-59	-133
Haushalte	2479	2375	-4	-26	-185	-371	-261	-549
Verkehr	2631	2583	-10	-44	-32	-51	-32	-52
Summe	8905	8534	-39	-150	-322	-594	-398	-812

Abbildung 2-6:

Endenergieverbrauch nach Sektoren im Modell-Basis-Szenario und in den Reduktionsszenarien



Ein signifikanter Anstieg des Einsatzes erneuerbarer Energieträger ist erst in den 40%-Reduktionsszenarien nach 2010 festzustellen. Die Anteile am gesamten Primärenergieverbrauch im Jahre 2020 betragen 3,8 % (Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität) bzw. 6 % (Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung). Der Zuwachs rührt hauptsächlich aus der Windenergieverstromung sowie aus dem Biomasse- und Biogaseinsatz her. Letztere werden zur Strom- wie zur Wärmeerzeugung genutzt.

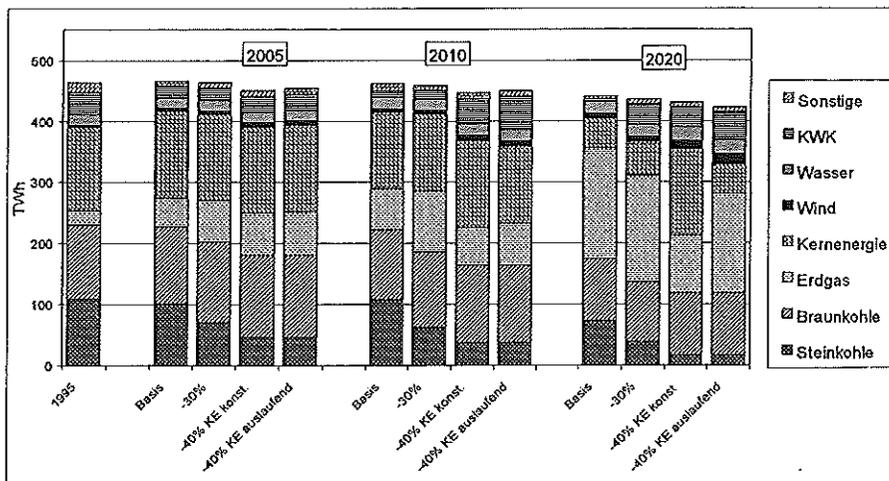
Im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung beträgt der Anteil des eingesetzten Biogases sowie der Biomasse etwa 60 % des gesamten Einsatzes erneuerbarer Energieträger.

Stromverbrauch und -erzeugung

Im Vergleich zum Modell-Basis-Szenario weicht der Stromverbrauch in den Reduktionsszenarien nur wenig nach unten ab. Der Stromverbrauch ist in den 40%-Reduktionsszenarien im Jahre 2020 lediglich um rund 4 Mrd. kWh (mit konstanter Kernenergiekapazität) bzw. 8 Mrd. kWh (mit auslaufender Kernenergienutzung) niedriger als im Modell-Basis-Szenario. Gleiches gilt für die Stromerzeugung, die in den einzelnen Reduktionsszenarien jeweils einen analogen Verlauf aufweisen (Abbildung 2-7).

Abbildung 2-7:

Öffentliche Netto-Stromerzeugung im Modell-Basis-Szenario und in den Reduktionsszenarien



(sonstige: Müll, Pumpspeicher, Öl etc.)

Die Steinkohlenverstromung nimmt in allen Szenarien sukzessive ab. Im 30%-Reduktions-Szenario erreicht sie im Jahre 2020 einen Wert von etwa 40 Mrd. kWh. In beiden 40%-Szenarien werden 2020 nur noch etwa 17 Mrd. kWh Steinkohlenstrom produziert, was ungefähr einer Steinkohleneinsatzmenge von 5 Mio. t SKE entspricht.

Da der Braunkohleneinsatz bereits im Modell-Basis-Szenario fast identisch mit den vorgegebenen Mindestmengen ist, ist ein weiterer Rückgang im Modell nicht möglich. Allerdings wird die Braunkohle im Jahre 2020 nur noch in hocheffizienten Kraftwerken eingesetzt, deren Netto-Nutzungsgrade im Durchschnitt etwa 43 % betragen.

Sowohl im Modell-Basis-Szenario als auch im 30%-Reduktions-Szenario ist der Anteil der Verstromung von Erdgas im Jahre 2020 mit 182 Mrd. kWh (etwa 40 % der gesamten öffentlichen Stromerzeugung) bzw. 175 Mrd. kWh (38,5 %) dominierend. Erdgaskraftwerke übernehmen in diesen Szenarien Grundlastaufgaben und werden bereits von 2000 an signifikant zugebaut. Nach 2005 kommt es im 30%-Reduktions-Szenario zusätzlich zu einem deutlichen Zubau von KWK-Anlagen auf Erdgasbasis. Verglichen damit halbiert sich die Erdgasverstromung im 40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität im Jahre 2020 auf einen Wert von 95 Mrd. kWh. Erdgasanlagen übernehmen in diesem Szenario Spitzen- und Mittellastaufgaben bei einer mittleren Auslastung von etwa 2 200 Stunden pro Jahr (h/a).

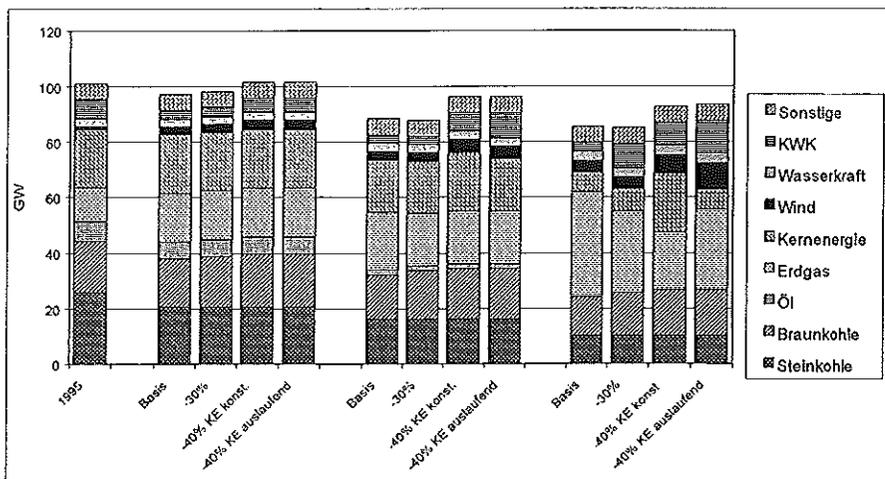
In jeder Zeitperiode werden in diesem Szenario die stillgelegten Kernkraftwerke durch neue Kernkraftwerke vollständig ersetzt, so daß die maximal mögliche Kapazität durchweg ausgeschöpft wird (Abbildung 2-8). In allen Szenarien werden die Kernkraftwerke im Grundlastbereich mit einer durchschnittlichen Vollastbenutzungsdauer von rund 6 700 h/a gefahren.

Im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung kommt es zu einer verstärkten Verstromung von Erdgas. Diese erreicht im Jahre 2020 einen Wert von etwa 163 Mrd. kWh und liegt gegenüber der 40%-Variante mit konstanter Kernenergiekapazität um fast 72 % höher. Der Anteil der Erdgasverstromung an der gesamten öffentlichen Nettostromerzeugung macht dann rund 36 % aus. Die installierte Leistung der in der Grundlast betriebenen GuD-Anlagen beträgt etwa 29 GW (rund 30 % der gesamten installierten öffentlichen Kraftwerksleistung).

Regenerative Energieträger werden erst in den 40%-Reduktionsszenarien forciert zur Stromerzeugung eingesetzt. Verglichen mit dem Modell-Basis-Szenario und dem 30%-Reduktions-Szenario liegt die installierte Windkraftanlagenkapazität im Jahre 2020 um 2,4 GW (mit konstanter Kernenergiekapazität) bzw. 5,2 GW (mit auslaufender Kernenergienutzung) höher und erreicht Absolutwerte von 6,4 GW (mit konstanter Kernenergiekapazität) bzw. 9,2 GW (mit auslaufender Kernenergienutzung). Außerdem werden in beiden 40%-Szenarien die Kapazitäten der Wasserkraftanlagen ausgebaut, und zwar um ungefähr 0,4 GW. Ein stärkerer Einsatz von regenerativen Energieträgern findet im Bereich der Nahwärmeerzeugung statt (im wesentlichen Biomasse). Im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung werden in erheblichem Umfang auch Blockheizkraftwerke auf Biogasbasis errichtet.

Abbildung 2-8:

Installierte Leistung (netto) des öffentlichen Kraftwerksparks im Modell-Basis-Szenario und in den Reduktionsszenarien



(sonstige: Müll, Pumpspeicher etc.)

2.3.3 Kosten der CO₂-Emissionsminderung

Sektorale Mehrkosten

Das Modell-Basis-Szenario führt unter den gegebenen Rahmenbedingungen zu einer volkswirtschaftlich kostenoptimalen Struktur der Energieversorgung. Deshalb muß jede zusätzliche Restriktion – beispielsweise die Vorgabe bestimmter CO₂-Minderungs-

ziele – im Ergebnis zwangsläufig höhere Kosten bewirken. Diese Mehrkosten, deren Höhe vom Ausmaß der vorgegebenen CO₂-Emissionsbegrenzung abhängt, können für jede der betrachteten Perioden ermittelt werden, sowohl in ihrer Gesamtheit als auch für die einzelnen Sektoren. Bei der sektoralen Aufteilung werden den Endverbrauchssektoren die Investitions- und Betriebskosten (ohne Brennstoffkosten) der jeweiligen Techniken zugeordnet. Der Umwandlungssektor enthält vorgelagerte Prozesse, zum Beispiel Kraft- und Heizwerke, Strom-, Gas- und Wärmenetze sowie die Raffinerien. Im Primärsektor werden die Gewinnungskosten der einheimischen Energieträger und die Kosten der Energieimporte verbucht. Die jährlichen Mehrkosten werden jeweils als Differenz zwischen den Kosten in den Reduktionsszenarien und denjenigen im Modell-Basis-Szenario ermittelt (Tabelle 2-19).

Es zeigt sich, daß die Mehrkosten in beiden 40%-Reduktionsszenarien mit 5,7 Mrd. DM bzw. 6,5 Mrd. DM im Jahre 2010 und 10,6 Mrd. DM bzw. 19 Mrd. DM im Jahre 2020 etwa um den Faktor 10 größer sind als im 30%-Reduktionsszenario, obwohl die CO₂-Einsparung nur etwa drei mal so groß ist. Das heißt, daß diejenigen Maßnahmen, die wirtschaftlich sind oder nahe an der Wirtschaftlichkeit liegen, bereits im 30%-Reduktions-Szenario weitgehend ausgeschöpft werden, so daß eine 40%-Reduktion nur durch wesentlich teurere Maßnahmenkombinationen erreicht werden kann.

Tabelle 2-19:

**Sektorale Mehrkosten pro Jahr in den Reduktionsszenarien
gegenüber dem Modell-Basis-Szenario**

	30%-Reduktions-Szenario		40%-Reduktions-Szenario			
			mit konstanter Kernenergiekapazität		mit auslaufender Kernenergienutzung	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020
	Mrd. DM zu Preisen von 1995					
Primärsektor	-0,73	-1,87	-0,93	-3,63	-0,70	-1,07
Umwandlungssektor	1,12	1,88	1,67	4,90	0,77	2,70
Industrie	0,36	0,58	1,51	1,56	1,33	2,19
Verkehr	0,12	0,32	0,33	0,49	0,34	1,17
Haushalte	-0,21	0,03	2,80	6,26	4,46	11,75
Kleinverbraucher	-0,16	0,31	0,33	1,08	0,33	2,23
Summe	0,50	1,26	5,71	10,65	6,53	18,96
Abweichungen in den Summen durch Rundungen.						

Sektoral ist die Verteilung der Reduktionskosten sehr unterschiedlich:

- Im Primärsektor ergibt sich in allen Perioden und Szenarien eine Kostenreduktion, die von 0,7 bis 3,6 Mrd. DM/a reicht. Ursache ist die Energieeinsparung in den Endverbrauchssektoren und die effizientere Energienutzung im Umwandlungsbereich, was sich vor allem in niedrigeren Kosten bei den Energieträgerimporten niederschlägt. Daß die Entlastung des Primärsektors im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung deutlich niedriger ausfällt, liegt auch daran, daß in diesem Fall ein erheblich höherer Anteil teurer erneuerbarer Energieträger wie Biomasse, Biogas und Rapsöl nötig ist.
- Im Umwandlungssektor steigen die Kosten, allerdings ist der Kostenanstieg im Verhältnis zur dadurch erreichten CO₂-Minderung moderat. Es muß berücksichtigt werden, daß der lange Zeithorizont bis zum Jahre 2020 einen großen Spielraum läßt für Umstrukturierungen der Strom- und Wärmeerzeugung. Insbesondere die Substitution von Kohleverstromung durch Kernkraftwerke im 40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität bzw. durch Erdgas-GuD-Anlagen im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung führt zu einer erheblichen CO₂-Reduktion bei nur geringen Mehrkosten.
- Im Industriesektor finden etliche Sparmaßnahmen bereits im Modell-Basis-Szenario Anwendung, wobei zu beachten ist, daß hierbei keine Hemmnisse gegenüber der rationalen Energieverwendung berücksichtigt werden. Die Erschließung zusätzlicher Minderungspotentiale beruht weitgehend auf der Substitution kohlenstoffreicher Energieträger wie Kohle und Heizöl durch Erdgas, was nur zu moderaten Mehrkosten im Industriesektor führt, da die Brennstoffkosten hier nicht mit bilanziert werden.
- Im Verkehrssektor fallen in allen Szenarien nur geringe Zusatzkosten an, da viele Maßnahmen - wie ein massiver Einsatz von Sparfahrzeugen - unter den getroffenen Annahmen so teuer sind, daß sie vom Modell nicht gewählt werden. Entsprechend ist auch die erreichte CO₂-Reduktion mit maximal 6 Mio. t selbst im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung relativ gering.
- Bei den Haushalten und Kleinverbrauchern ist die Entwicklung in den Reduktionsfällen sehr verschieden: Im 30%-Reduktionsszenario sind die Kosten im Jahre 2010

sogar niedriger als im Basisfall; erst eine weitere Verschärfung bis zum Jahre 2020 führt dann zu geringen Zusatzkosten. Das liegt daran, daß im Modell bei einer allmählichen Verschärfung der Reduktionsanforderung zuerst ein Brennstoffwechsel von Heizöl zu Erdgas vorgesehen wird, der dann zu niedrigeren Investitions- und Betriebskosten bei einem höheren Anteil Erdgasheizungen führt⁹. Erst wenn diese Potentiale weitgehend ausgeschöpft sind (was in den 40%-Reduktionsszenarien der Fall ist) führen Sanierungsmaßnahmen im Altbau und der Wechsel zu effizienteren Brennwertkesseln zu erheblichen Zusatzkosten. Im Jahre 2020 belaufen sich die jährlichen Mehrkosten der Haushalte und Kleinverbraucher auf 7,3 Mrd. DM im 40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität und auf 14 Mrd. DM im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung. Damit tragen diese beiden raumwärmeintensiven Sektoren die kostenseitige Hauptlast der Kohlendioxidminderung im Bereich der Endverbrauchssektoren, vor allem im Reduktionsfall mit auslaufender Kernenergienutzung, in dem sich die Lasten der Reduktion stärker zu den Endverbrauchern verschieben.

Spezifische Minderungskosten

Setzt man die durchschnittlichen Mehrkosten ins Verhältnis zur erreichten CO₂-Minderung, erhält man die durchschnittlichen Reduktions- oder Vermeidungskosten, die wiederum für jede Periode dargestellt werden können. In Tabelle 2-20 und in Abbildung 2-9 sind die spezifischen Reduktionskosten wie die Grenzkosten (marginale Minderungskosten) der CO₂-Reduktion ausgewiesen. Gut zu erkennen ist, daß sowohl die durchschnittlichen als auch die marginalen Minderungskosten in den 40%-Reduktionsszenarien erheblich höher sind als im Fall einer 30%-Reduktion. Im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung sind die Reduktionskosten erwartungsgemäß am höchsten; sie liegen im Jahre 2020 bei 120 DM/t mit Grenzkosten von etwa 440 DM/t. Im Zeitverlauf bis zum Jahre 2020 steigen vor allem die Grenzkosten durch die schärfer werdenden Restriktionsvorgaben deutlich.

⁹ Die höheren Brennstoffkosten für Erdgas (beim Endverbraucher im Vergleich zu Heizöl rund 10 bis 20 % teurer) werden im Primär- und Umwandlungssektor bilanziert und tauchen hier nicht auf.

Tabelle 2-20:

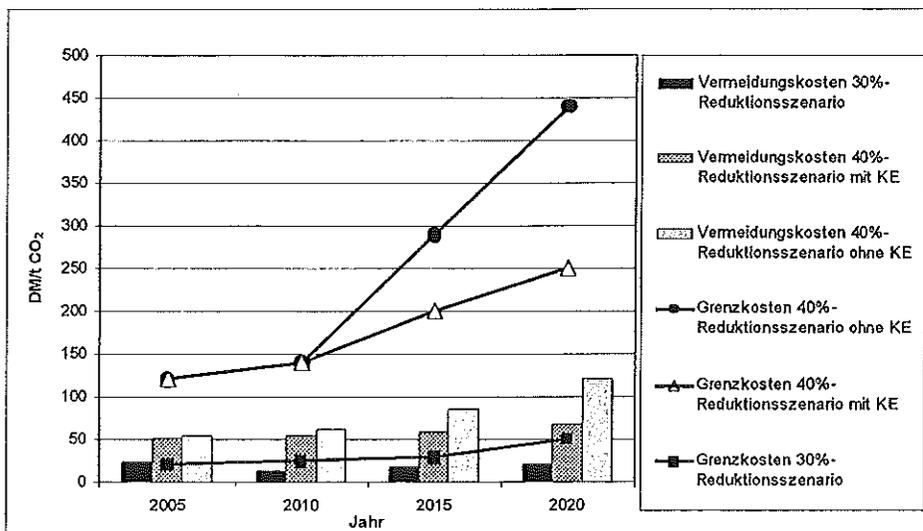
Durchschnittliche Kosten und Grenzkosten der CO₂-Minderung

	2005	2010	2015	2020
	DM je t CO ₂			
Vermeidungskosten 30%-Reduktions-Szenario	23 ¹⁾	13	18	21
Grenzkosten im 30%-Reduktions-Szenario	20	25	30	50
CO ₂ -Minderung in Mio. t	-25	-40	-47	-58
Vermeidungskosten 40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität	51	55	59	68
Grenzkosten im 40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität	120	140	200	250
CO ₂ -Minderung in Mio. t	-74	-105	-129	-156
Vermeidungskosten 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung	54	62	85	121
Grenzkosten im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung	120	140	290	440
CO ₂ -Minderung in Mio. t	-74	-105	-129	-156

¹⁾ Daß in diesem einzigen Fall die Durchschnittskosten höher sind als die Grenzkosten, liegt an der Struktur eines Mehrperiodenmodells, das Kapazitäten bereits in früheren Perioden aufbauen kann, um sie später zu nutzen.

Abbildung 2-9:

Durchschnittliche Kosten und Grenzkosten der CO₂-Minderung

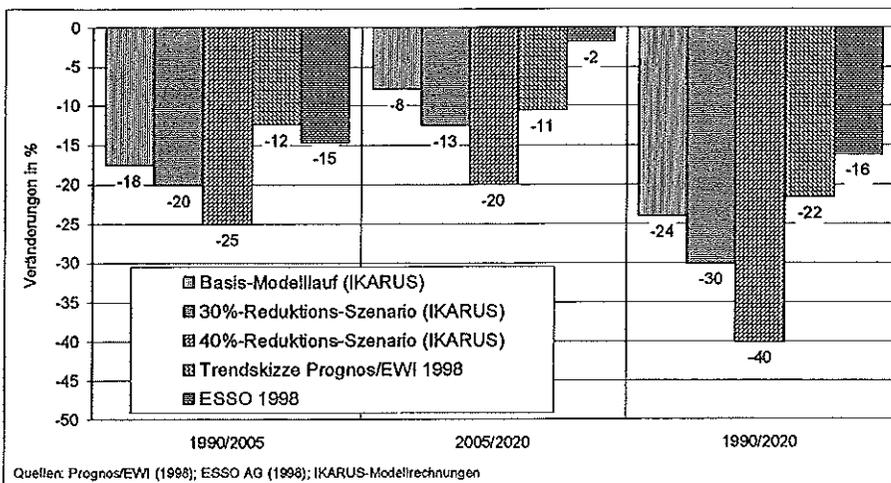


2.3.4 Vergleich mit aktuellen Prognosen

Ende 1998 ist von der Prognos AG und dem Energiewirtschaftlichen Institut an der Universität Köln (Prognos/EWI 1998) eine sog. Trendschizze zur künftigen energiewirtschaftlichen Entwicklung in Deutschland vorgelegt worden; gleichzeitig hat die ESSO AG ihre Energieprognose veröffentlicht. Es ist daher von Interesse, die Ergebnisse dieser prognostischen Arbeiten mit den Szenarien zu vergleichen, die hier mit dem IKARUS-LP-Modells entwickelt worden sind. Tabelle 2-21 gibt einen Vergleich der Ergebnisse für die einzelnen Endenergiesektoren, Tabelle 2-22 stellt die sektoralen Stromverbrauchsentwicklungen gegenüber und in Tabelle 2-23 ist der jeweilige Primärenergieverbrauch nach Energieträgern ausgewiesen. Die Abbildung 2-10 schließlich läßt die in den einzelnen Untersuchungen ermittelten Veränderungen der gesamten CO₂-Emissionen erkennen.

Abbildung 2-10:

Veränderungen der CO₂-Emissionen insgesamt im Modell-Basis-Szenario und in den LP-Reduktionsszenarien sowie nach der Prognos/EWI-Trendschizze (1998) und der ESSO-Prognose (1998)



Als Fazit läßt sich die Feststellung treffen, daß schon das mit dem IKARUS-Modell ermittelte Modell-Basis-Szenario nahezu in allen Bereichen zu erheblich niedrigeren Werten führt, als dies unter prognostischen Aspekten derzeit erwartet werden kann. Im

Vergleich zu den vorliegenden Prognosen zeichnet das an volkswirtschaftlicher Kostenminimierung orientierte Modell ein zu optimistisches Bild. Darüber hinaus ist zu sehen, daß grundlegende Annahmen (wie die branchenspezifische Wirtschaftsentwicklung) in Einzelfällen deutlich voneinander abweichen und demzufolge das Gesamtergebnis prägen. So liegt beispielsweise der industrielle Stromverbrauch der Prognos/EWI-Trendskizze deutlich über dem entsprechenden Wert des Modell-Basis-Szenarios. Gleiches gilt für den Stromverbrauch des Kleinverbrauchssektors. Während etwa Prognos/EWI und ESSO zu dem Ergebnis kommen, daß sich die CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005 gegenüber 1990 um vielleicht 12 % oder 15 % mindern könnten, errechnet das IKARUS-Modell eine Minderung von knapp 18 %. Bemerkenswert ist allerdings, daß die Reduktionsraten für die Periode 1990 bis 2020 zwischen Prognos/EWI und dem IKARUS-Modell-Basis-Szenario mit -22 % bzw. -24 % nur wenig voneinander abweichen, während die ESSO AG für diesen Zeitraum nur eine Reduktion um 16 % vorhersagt.

Tabelle 2-21:

Endenergieverbrauch nach Sektoren im Modell-Basis-Szenario und in den LP-Reduktionsszenarien sowie nach der Prognos/EWI-Trendskizze (1998)

	Energieverbrauch in PJ				Abweichungen von Prognos/EWI in %			
	1995	2005	2010	2020	1995	2005	2010	2020
	Industrie							
Modell-Basis-Szenario	2623	2361	2296	2147	6	-4	-7	-15
30%-Reduktions-Szenario	2624	2346	2275	2098	6	-4	-8	-17
40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität	2628	2314	2250	2070	6	-6	-9	-19
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung z. Vgl. Prognos/EWI (1998)	2631	2315	2251	2069	7	-6	-9	-19
	2468	2453	2472	2541				
	Kleinverbraucher							
Modell-Basis-Szenario	1556	1532	1499	1429	4	-4	-7	-9
30%-Reduktions-Szenario	1553	1528	1496	1398	4	-4	-7	-11
40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität	1556	1479	1441	1335	4	-7	-10	-15
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung z. Vgl. Prognos/EWI (1998)	1556	1483	1439	1296	4	-7	-10	-18
	1495	1593	1607	1573				
	Haushalte							
Modell-Basis-Szenario	2783	2537	2479	2375	4	1	4	8
30%-Reduktions-Szenario	2784	2526	2475	2349	4	1	4	7
40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität	2783	2410	2294	2004	4	-4	-4	-8
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung z. Vgl. Prognos/EWI (1998)	2780	2381	2218	1826	4	-5	-7	-17
	2664	2507	2391	2189				
	Verkehr							
Modell-Basis-Szenario	2332	2616	2631	2583	-11	-8	-7	-3
30%-Reduktions-Szenario	2332	2616	2621	2539	-11	-8	-8	-5
40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität	2332	2608	2599	2532	-11	-8	-8	-5
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung z. Vgl. Prognos/EWI (1998)	2333	2608	2599	2531	-11	-8	-8	-5
	2615	2843	2836	2666				
	Summe Endenergie							
Modell-Basis-Szenario	9295	9046	8905	8535	1	-4	-4	-5
30%-Reduktions-Szenario	9293	9016	8866	8385	1	-4	-5	-7
40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität	9299	8811	8583	7941	1	-6	-8	-11
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung z. Vgl. Prognos/EWI (1998)	9301	8787	8507	7722	1	-6	-9	-14
	9242	9396	9306	8969				

Tabelle 2-22:

**Stromverbrauch nach Sektoren im Modell-Basis-Szenario und in den
LP-Reduktionsszenarien sowie nach der Prognos/EWI-Trendskizze (1998)**

	Stromverbrauch in Mrd. kWh				Abweichungen von Prognos/EWI in %			
	1995	2005	2010	2020	1995	2005	2010	2020
	Industrie							
Modell-Basis-Szenario	195	197	200	203	2	-6	-9	-13
30%-Reduktions-Szenario	195	196	199	201	2	-6	-9	-14
40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität	195	194	198	200	2	-7	-10	-14
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung z.Vgl. Prognos/EWI (1998)	191	209	219	234				
	Kleinverbrauch							
Modell-Basis-Szenario	110	98	95	89	-10	-27	-34	-42
30%-Reduktions-Szenario	110	98	95	89	-10	-27	-34	-42
40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität	110	100	98	93	-10	-26	-32	-39
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung z.Vgl. Prognos/EWI (1998)	121	135	144	153				
	Haushalt							
Modell-Basis-Szenario	128	130	126	115	1	-1	-3	-8
30%-Reduktions-Szenario	128	130	126	115	1	-1	-3	-8
40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität	128	130	126	115	1	-1	-3	-8
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung z.Vgl. Prognos/EWI (1998)	127	131	129	126				
	Verkehr							
Modell-Basis-Szenario	12	17	17	18	-24	-15	-22	-26
30%-Reduktions-Szenario	12	17	17	18	-24	-15	-22	-26
40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität	12	17	17	18	-24	-15	-22	-26
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung z.Vgl. Prognos/EWI (1998)	16	20	22	24				
	Stromverbrauch in den Endenergiesektoren							
Modell-Basis-Szenario	445	442	437	425	-2	-11	-15	-21
30%-Reduktions-Szenario	445	442	437	424	-2	-11	-15	-21
40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität	445	442	438	426	-2	-11	-15	-21
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung z.Vgl. Prognos/EWI (1998)	455	496	514	537				

Tabelle 2-23:

**Primärenergieverbrauch nach Energieträgern im Modell-Basis-Szenario
und in den LP-Reduktionsszenarien sowie nach der Prognos/EWI-
Trendskizze (1998) und der ESSO-Prognose (1998)**

	Primärenergieverbrauch in PJ				Abweichungen von Prognos/EWI in %			
	1995	2005	2010	2020	1995	2005	2010	2020
Modell-Basis-Szenario								
Steinkohle	2100	1800	1767	1310	2	-13	-2	8
Braunkohle	1700	1402	1248	1024	-2	-6	-17	-30
Mineralöl	5545	5311	5229	4928	-2	-6	-4	0
Erdgas	2700	2716	2857	3636	-4	-14	-14	-5
Kernenergie	1586	1628	1445	556	-6	-10	-19	-51
Erneuerbare	228	242	235	206	-37	-18	-30	-55
Summe	13859	13099	12782	11660	-3	-10	-10	-11
30%-Reduktions-Szenario								
Steinkohle	2100	1497	1314	842	2	-28	-27	-30
Braunkohle	1700	1383	1224	892	-2	-7	-19	-39
Mineralöl	5545	5065	4859	4613	-2	-10	-11	-6
Erdgas	2700	3133	3440	4036	-4	-1	3	5
Kernenergie	1586	1628	1445	639	-6	-10	-19	-44
Erneuerbare	220	245	235	251	-39	-17	-30	-46
Summe	13851	12952	12517	11271	-3	-11	-12	-14
40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität								
Steinkohle	2100	1109	960	593	2	-47	-47	-51
Braunkohle	1732	1332	1175	880	0	-11	-22	-40
Mineralöl	5547	4752	4443	4073	-2	-16	-19	-17
Erdgas	2707	3418	3523	3492	-3	8	6	-9
Kernenergie	1586	1628	1628	1628	-6	-10	-9	43
Erneuerbare	232	256	303	432	-36	-13	-10	-6
Summe	13904	12496	12031	11098	-3	-14	-15	-15
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung								
Steinkohle	2100	1132	941	570	2	-45	-48	-53
Braunkohle	1774	1334	1176	880	2	-11	-22	-40
Mineralöl	5545	4732	4394	3855	-2	-16	-19	-22
Erdgas	2707	3390	3610	3818	-3	7	8	0
Kernenergie	1586	1628	1445	556	-6	-10	-19	-51
Erneuerbare	232	256	301	627	-36	-13	-10	36
Summe	13943	12472	11866	10305	-3	-14	-17	-21
zum Vergleich: Prognos/EWI (1998)								
Steinkohle	2060	2075	1808	1208				
Braunkohle	1735	1493	1510	1471				
Mineralöl	5677	5636	5456	4933				
Erdgas	2799	3166	3335	3836				
Kernenergie	1682	1816	1786	1136				
Erneuerbare ¹⁾	362	294	335	461				
Summe	14315	14480	14230	13045				
zum Vergleich: ESSO (1998)								
Steinkohle	2078	1993	2022	2081	1	-4	12	72
Braunkohle	1685	1495	1495	1495	-3	0	-1	2
Mineralöl	5800	5451	5275	4807	2	-3	-3	-3
Naturgase	3156	3370	3458	3693	13	6	4	-4
Kernenergie	1764	1758	1700	1143	5	-3	-5	1
Erneuerbare ¹⁾	255	410	440	645	-30	40	31	40
Summe	14739	14478	14390	13863	3	0	1	6

¹⁾ Einschließlich Stromaußenhandelsaldo sowie übrige Energieträger.

2.4 Literatur

ESSO AG (1998): Esso Energieprognose 1998. Hamburg, November 1998

Häbler, H., Höflich-Häberlein, L., Pfeiffer, U., Thomae, M. (1989): Technikdiffusion und Beschäftigungswirkungen im privaten Dienstleistungssektor. Berlin, New York 1989.

Martinsen, D., Markewitz, P., Walbeck, M., Jagodzinski, P., Müller, D. (1998): Das IKARUS-Optimierungsmodell. In: Markewitz u.a.: Modelle für die Analyse energiebedingter Klimagasreduktionsstrategien. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 7, S.57-138, Jülich 1998

Prognos (1995): Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa – Perspektiven bis zum Jahr 2020. Gutachten im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums für Wirtschaft. Basel 1995

Prognos, EWI (1998): Trendskeizze - Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Basel, Oktober 1998

Statistisches Bundesamt (o. J.): Fachserie 4, Produzierendes Gewerbe; Reihe 7.1, Beschäftigte und Umsatz im Handwerk, vierteljährlich.

Statistisches Bundesamt (1997): Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland 1997

Ziesing et al. (1997): Politiksznarien für den Klimaschutz. Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes. Band 1; Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005. Stein, G., Strobel, B. (Hrsg.), Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 5, Jülich 1997

3 Sektorale Referenzentwicklung und Wirkungen politischer Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen

3.1 Methodische Vorbemerkungen zu den sektoralen Analysen

Im vorstehenden Kapitel wurden die Annahmen und Ergebnisse der mit Hilfe des IKARUS-Modells entwickelten Szenarien beschrieben. Gemessen an gesamtwirtschaftlichen Kriterien geben diese Szenarien eine kostenoptimale Struktur der Energieversorgung an. Sie zeigen weiterhin, in welchen Sektoren - wiederum unter Kostenaspekten - die günstigsten Handlungsfelder zur Realisierung der jeweiligen Zielvorgaben hinsichtlich des künftigen Niveaus der CO₂-Emissionen bestehen. Allerdings geben die Modellszenarien keine Hinweise auf die unter eher prognostischen Gesichtspunkten in der Zukunft zu erwartende Entwicklung, da einzelwirtschaftliche Entscheidungskriterien, Hemmnisse gegenüber (selbst einzelwirtschaftlich rentablen) Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung sowie andere Marktunvollkommenheiten u.ä. nicht berücksichtigt werden.

Für die Ableitung von politischen Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen kommt es aber auch darauf an, zunächst eine Vorstellung darüber zu gewinnen, wie sich das Energiesystem unter realitätsnäheren Erwartungen entwickeln könnte. Deshalb wird in den folgenden Abschnitten - aufbauend auf dem mit dem IKARUS-Modell berechneten Modell-Basis-Szenario - jeweils gesondert für die betrachteten Sektoren ein sog. Referenz-Szenario beschrieben. Von diesem Referenz-Szenario ausgehend sollen dann die politischen Maßnahmen skizziert werden, die einen Übergang auf die mit den Reduktionsszenarien vorgezeichneten Pfade ermöglichen dürften. Dabei sind die anzustrebenden Reduktionsszenarien - abgesehen von Datenmodifikationen an der ein oder anderen Stelle - praktisch identisch mit dem im vorherigen Kapitel vorgestellten 30%- bzw. 40%-Reduktions-Szenario.

Erinnert sei daran, daß von den beiden 40%-Reduktionsszenarien im folgenden allein das 40%-Reduktions-Szenario *mit auslaufender Kernenergienutzung* als Standardszenario betrachtet wird, um die notwendige Breite und Intensität der unter diesen Bedingungen für die Zielrealisierung erforderlichen politischen Maßnahmen abbilden zu können. Im übrigen wird damit auch der derzeit von der Bundesregierung eingeleiteten Politik eines sukzessiven Ausstiegs aus der Kernenergie am ehesten Rechnung getragen. Insoweit läßt

sich auch der Umriß einer Politik entwickeln, die dem Klimaschutzziel ebenso Rechnung trägt wie dem angestrebten Kernenergieverzicht.

3.2 Industrie

3.2.1 Vorbemerkungen

Ein kurzer Rückblick

Vor allem aufgrund der vereinigungsbedingten Strukturbrüche in der ostdeutschen Wirtschaft haben sich Niveau und Struktur des industriellen Energieverbrauchs innerhalb des Zeitraumes von 1990 bis 1995 teilweise grundlegend verändert. Zum besseren Verständnis insbesondere der rasanten Abnahme der energiebedingten CO₂-Emissionen der Industrie sei kurz eingegangen (Jochem/Bradke, 1996, S. 51 ff):

- In vielen Fällen nutzte die ostdeutsche Industrie bis 1989/90 einen relativ alten Kapitalstock mit schlechten Wirkungsgraden. Hinzu kam die Tatsache, daß die mit vergleichsweise geringen Wirkungsgraden nutzbare heimische Braunkohle in relativ hohem Maße eingesetzt wurde. Seit 1990 ging dann die Braunkohlenutzung der deutschen Industrie von 368 PJ (12,4 % Anteil am Endenergieverbrauch) auf rund 70 PJ (3 %) im Jahre 1997 zurück (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, 1998).
- Im Vergleich zur westdeutschen Industrie hatte die Grundstoffindustrie in Ostdeutschland 1989/90 noch einen hohen Anteil an der industriellen Produktion. Das kehrte sich aber während weniger Jahre um: Heute ist der Anteil der ostdeutschen Grundstoffindustrie an der Industrieproduktion geringer als in Westdeutschland.
- Die ostdeutsche Industrieproduktion ging infolge der abbrechenden Lieferverflechtungen mit Osteuropa von 1990 bis 1995 drastisch zurück. Ein hoher Anteil des überalterten Kapitalstocks wurde außer Betrieb genommen und teilweise durch modernste und sehr energieeffiziente Anlagen (z.B. in der Steine und Erden Industrie, in der chemischen Industrie) ersetzt.

Insgesamt führten diese strukturellen Veränderungen in der gesamtdeutschen Industrie zu einem Rückgang des Endenergieverbrauchs von 2 977 PJ im Jahre 1990 auf etwa

2 460 PJ im Jahre 1997, d. h. um -18% (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, 1998). Allerdings nimmt der Strombedarf seit 1993 wieder zu. Infolge des Strukturwandels im Mix der Energieträgern (geringere Nutzung kohlenstoffintensiver Stein- und Braunkohlen und Heizöle, aber höhere Erdgasnutzung) nahmen die direkten CO_2 -Emissionen der deutschen Industrie noch schneller ab, und zwar von 170 Mio. t (1990) um 27% auf gut 123 Mio. t CO_2 (1997); 1995 betrug die CO_2 -Emissionen der Industrie 127 Mio. t, das waren 25% weniger als 1990 (DIW, 1999).¹⁰ Es ist evident, daß sich die grundlegenden Veränderungen während der ersten Hälfte der neunziger Jahre in Zukunft nicht fortsetzen werden, da der Umstrukturierungsprozeß 1995 weitgehend abgeschlossen war und nunmehr mit Entwicklungsmustern gerechnet werden muß, wie sie in der zweiten Hälfte der 80er Jahre in der westdeutschen Industrie zu beobachten waren.

Das Basisjahr der Projektionen 1995 und die bedarfsbestimmenden Größen

Ein Vergleich der Daten der Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland mit den Rechenergebnissen des IKARUS-Modells für das Basisjahr 1995 ist nicht ohne weiteres möglich, da die Energiebilanzen den Brennstoffeinsatz für die industrielle Eigenstromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen) nicht als Endenergie (sondern als Unwandlungseinsatz) ausweisen, während die entsprechenden Brennstoffverbrauchsmengen in den Zahlen des IKARUS-Modells zum industriellen Energieverbrauch enthalten sind. Der Unterschied beträgt rund 150 PJ, der mit dem in KWK erzeugten Strom von knapp 36 Mrd. kWh im Jahre 1995 mit den durchschnittlichen Gesamtwirkungsgraden von etwa 80% plausibel zurechenbar ist. Die entsprechende Erhöhung des Brennstoffverbrauchs aus den Zahlen der Endenergiebilanz für 1995 wurde zu geringen Anteilen beim Heizöl und zu hohen Anteilen bei Naturgas und Steinkohle vorgenommen (vgl. Tabelle 3.2-1).

Wegen des erheblichen Strukturwandels, den man in Zukunft in der Grundstoffindustrie erwarten muß, wurden als energiebedarfsbestimmende Größen für die künftige Ent-

¹⁰ Es sei schon an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß die hier genannten Emissionsdaten aufgrund unterschiedlicher Abgrenzungen nicht übereinstimmen mit den CO_2 -Emissionen nach den Rechnungen des IKARUS-Modells.

wicklung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen neben den geschätzten branchenbezogenen Nettoproduktionswerten für die Jahre 2005, 2010 und 2020 auch die Produktionserwartungen für einzelne energieintensive Grundstoffe wie Stahl, Zement, Aluminium, Papier, Glas und petrochemische Vorprodukte herangezogen (zu den energiebedarfsbestimmenden Faktoren vgl. Abschnitt 2.2.3). Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen, da sich strukturelle Einflüsse und Effizienzentwicklungen gegenseitig überlagern und deshalb auch zu sich ändernden Trends führen können.

3.2.2 Referenz-Szenario für den Sektor Industrie

Das Referenz-Szenario baut auf dem Modell-Basis-Szenario auf, das keine Hemmnisse rationeller Energieanwendung berücksichtigt und insofern relativ geringe Energiebedarfswerte ausweist. Dies wird auch bei einem Vergleich mit den Ergebnissen der Trendskeizze von Prognos/EWI (1998) für den industriellen Energiebedarf deutlich (vgl. Tabelle 2-21), wonach der Endenergiebedarf der Industrie bis 2010 auf dem Niveau von 2 470 PJ stagniert und bis 2020 auf 2 540 PJ leicht zunimmt, während der Energiebedarf im Modell-Basis-Szenario bis 2005 bereits um 10 % abnimmt.

Aufgrund dieser Gegebenheiten wurde eine Referenzentwicklung geschätzt, die für 2005 um 7 % über den Energieverbrauchswerten des Modell-Basis-Szenarios liegt und auch für die folgenden Jahre diesen prozentualen Abstand von dessen Werten beibehält (vgl. Tabelle 3.2-1).

Die Struktur des Modell-Basis-Szenarios zeigt für die Jahre 1995, 2005 und 2010 eine deutliche Abweichung bei den Heizölen, Stein- und Braunkohle, Naturgas und sonstigen fossilen Brennstoffen von der Struktur der Energiebilanz für 1995. Deshalb wurden für das Jahr 2005 - und teilweise auch die folgenden Jahre - die Ergebnisse des Modell-Basis-Szenarios bei diesen Energieträgern zunächst korrigiert, bevor die Struktur des Referenz-Szenarios festgelegt wurde. Diese Korrekturen, die in den entsprechenden Tabellen jeweils fett gedruckt sind, nehmen mit zunehmendem Prognosehorizont ab; allerdings wird für die Fernwärme im Jahre 2020 zusätzlich eine Korrektur vorgenommen, da

nach den Rechnungen im Modell-Basis-Szenario der Fernwärmebedarf von 2010 bis 2020 um - allerdings wenig realistische - 70 % zurückging (vgl. Tabelle 3.2-1).

Insgesamt nimmt der industrielle Energiebedarf im Referenz-Szenario (einschließlich der Brennstoffe für industriellen KWK-Strom) von 2 625 PJ im Jahre 1995 um gut 9 % auf 2 380 PJ im Jahre 2020 ab (d. h. um durchschnittlich 0,4 % jährlich). Bei einem durchschnittlichen Produktionszuwachs der Industrie von 1,65 % pro Jahr bedeutet dies immerhin eine Verminderung der Energieintensität um durchschnittlich 2 %/a. Dies wird nicht zuletzt auch durch strukturelle Veränderungen zu weniger energieintensiven Branchen und know-how-intensiven Produkten bewirkt (vgl. auch Tabelle 2.5 in Abschnitt 2.2.3). Diese Abnahme der Energieintensität entspricht auch derjenigen in der Trendschilderung von Prognos/EWI (1998), wo man allerdings von einem höheren Produktionswachstum der Industrie von 2,1 % pro Jahr ausging - und deshalb bei gleicher Abnahme der Energieintensität zu der o.g. leichten Zunahme (+2,8%) des Endenergiebedarfs in 2020 kam.

Obwohl der industrielle Energieverbrauch insgesamt rückläufig ist, steigt der Strombedarf bis 2020 um insgesamt etwa 85 PJ, d. h. um durchschnittlich 0,5 % jährlich. Damit nimmt aber die Stromintensität der Industrie um knapp 1,2 % jährlich ab. Zwar gibt es stromverbrauchssteigernde Aktivitätseffekte (z.B. mehr Elektrostahl und deutliches Wachstum der Investitionsgüterindustrie), doch tragen sowohl strukturelle Effekte (z.B. Stagnation stromintensiver Produktionen wie von Zement, Chlor, Kupfer oder gar rückläufige Produktionen wie beim Hüttenaluminium) als auch effizienzsteigernde Innovationen zu der sinkenden Stromintensität bei. Hinsichtlich der Entwicklung der Stromintensität kommen Prognos/EWI (1998) zu vergleichbaren Ergebnissen (-1,3 %/a).

Als Resultat bilden sich der Brennstoff- und Fernwärmeverbrauch mit -335 PJ, d.h. um fast 1% jährlich, noch deutlich schneller zurück als der gesamte industrielle Energieverbrauch. Dies ist sowohl auf Effizienzgewinne als auch auf strukturelle Veränderungen, insbesondere in der Grundstoffindustrie (z.B. Stagnation der Steine und Erden-Produktion, von Glas, Zucker und anorganischen Grundchemikalien sowie Rückgang der Roheisen- und Oxigenstahlherstellung) zurückzuführen.

Die erneuerbaren Energiequellen und die thermische Nutzung brennbarer Rückstände und Abfallstoffe nimmt von 2010 auf 2020 merklich zu, wenn auch auf sehr geringem Niveau.

Tabelle 3.2-1:

Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der direkten CO₂-Emissionen im Sektor Industrie im Referenz-Szenario

	1995		2005	2010	2020
	Energie-Bilanz ¹⁾	E-Bilanz + KWK ²⁾	Referenz-Szenario		
	Energieverbrauch in PJ				
Insgesamt	2474	2625	2600	2510	2380
dav.: Heizöl S	147	165	150	135	120
Heizöl EL	136	155	150	130	110
Naturgas	748	790	820	820	800
Steinkohle, -koks	398	470	420	375	350
Braunkohle	81	81	60	55	50
sonst. fossile Brennstoffe	197	197	170	155	105
Erneuerbare Energien, Müll	11	11	10	10	15
Strom	686	686	750	760	770
Fernwärme	70	70	70	70	60
	Abweichungen vom Modell-Basis-Szenario				
Insgesamt		0	168	164	152
dav. Heizöl S		-24	-33	-32	-92
Heizöl EL		-41	3	-1	0
Naturgas		5	92	115	171
Steinkohle, -koks		-107	-33	-36	-37
Braunkohle		-8	11	9	7
sonst. fossile Brennstoffe		149	80	66	17
Erneuerbare Energien, Müll		1	1	1	6
Strom		-17	42	40	40
Fernwärme		43	5	2	40
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
Referenz-Szenario		141,9	129,9	121,1	110,5
Modell-Basis-Szenario		141,9	118,7	110,6	106,1
Abweichungen des Referenz-Szenarios vom Modell-Basis-Szenario			11,2	10,5	4,3
Abweichungen in den Summen durch Rundungen					
Korrekturen in 1995 gegenüber Modell-Basis-Szenario erforderlich, die sich teilweise in der Projektionsperiode bis 2020 fortsetzen.					
1) Quelle: AG Energiebilanzen, Energiebilanz Deutschland für 1995.					
2) Brennstoffstruktur gemäß Energiebilanz plus KWK-Brennstoffeinsatz					

Im Referenz-Szenario nehmen die direkten CO₂-Emissionen von 1995 bis 2020 um gut 30 Mio. t, um rund 22 % ab; nicht berücksichtigt sind dabei die mit der Fernwärme- und Stromerzeugung verbundenen CO₂-Emissionen, die insgesamt für alle Endenergiesektoren im Umwandlungssektor behandelt werden (vgl. Abschnitt 3.7).

Unter Berücksichtigung der bis 1998 ergriffenen Maßnahmen wird mit einer Entlastung um rund 12 Mio. t CO₂ bis 2005 und um weitere 19 Mio. t CO₂ bis 2020 gerechnet. Zur Reduktion der CO₂-Emissionen tragen die durch Länder- und Kommunalaktivitäten erreichbaren Einsparerfolge in Höhe von 1 Mio. t pro Fünf-Jahres-Zeitraum bis zur Summe von 5 Mio. t CO₂ im Jahr 2020 bei. Deutlich geringere, aber kontinuierlich weiter wachsende Einsparerfolge mit jeweils 0,25 Mio. t pro Fünf-Jahres-Zeitraum werden auch

- vom ERP-Energiesparprogramm,
- vom Investitionsprogramm zur Verminderung von Umweltbelastungen,
- von der Wärmeschutzverordnung von 1994, gültig ab 1.1.1995, sowie
- von den Ergebnissen der Energie-, Technologie- und Bauforschung

erwartet. Dagegen wurde angenommen, daß die Selbstverpflichtungen der Industrie nur bis zum Jahre 2005 wirken dürften (mit einem Emissionsminderungseffekt von rund 10 Mio. t) und dieses Instrument wegen der inhärenten Schwierigkeiten der Trittbrettfahreridentifikation und des Monitoring aufgegeben wird.

Die Einsparerfolge der übrigen bereits ergriffenen Maßnahmen (HeizungsanlagenVO und Kleinf FeueranlagenVO) werden als bis 2005 bereits erschöpft bzw. als nicht sehr durchschlagend eingeschätzt (EU-Öko-Audit); sie addieren sich bis 2020 auf 1,3 Mio. t zusätzlich gegenüber dem Stand im Jahre 2005.

3.2.3 Diskussion der Reduktions-Szenarien sowie die politischen Maßnahmen zu ihrer Realisierung

Von den insgesamt drei Reduktions-Szenarien stellt das 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung das energiepolitische Szenario mit größter Eingriffstiefe dar. Im Industriebereich ist das 40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität für die Jahre 2005 und 2010 freilich mit dem 40%-Reduktions-Szenario mit

auslaufender Kernenergienutzung identisch; für 2020 weicht es nur unwesentlich davon ab, so daß hier für beide 40%-Reduktions-Szenarien von den gleichen Werten und Überlegungen zu Maßnahmen ausgegangen werden kann.

3.2.3.1 Das 30%-Reduktions-Szenario

Ähnlich wie bei den Ergebnissen im Modell-Basis-Szenario ergab sich für einige Brennstoffe ein leichter Korrekturbedarf, wenn man nicht zu große Strukturbrüche zum Ausgangsjahr 1995 unterstellen wollte. Die Korrekturen betreffen für 2005 und 2010 das schwere Heizöl, Naturgas, Kohle und "sonstige fossile Brennstoffe" sowie Fernwärme. Auch hier nimmt der Korrekturbedarf im Zeitverlauf deutlich ab (vgl. Tabelle 3.2-2).

Gegenüber der Referenz-Entwicklung reduziert sich der gesamte Energiebedarf der Industrie im 30%-Reduktions-Szenario um 176 PJ (knapp 7 %) im Jahr 2005 und um fast 200 PJ (etwa 8,3 %) im Jahr 2020 (Tabelle 3.2-2).

Der Rückgang des Strombedarfs im 30%-Reduktions-Szenario ist bis 2005 mit knapp 6 % gegenüber der Referenzentwicklung etwas geringer als derjenige für die Brennstoffe und Fernwärme (gut 7 %). Deutlich schneller verringert sich bis 2010 der Verbrauch der sonstigen fossilen Brennstoffe und der Braunkohle, während Naturgasverbrauch wegen der vorherigen Substitutionsgewinne erst 2020 gegenüber dem Referenz-Szenario überproportional sinkt. Heizöl S und EL nehmen relativ am wenigsten ab, was

- beim Heizöl S unterstellt, daß dies als Abfallprodukt aus den Raffinerien nicht so stark rückläufig sein kann im Hinblick auf eine kaum sinkende Naphta- und nur leicht fallende Kraft- und Treibstoffnachfrage (Abschnitt 3.5); es wird also kein Zubau von katalytischen oder Hydro-Crackern angenommen,
- beim Heizöl EL voraussetzt, daß dezentral gelegene Betriebe über keinen Erdgasanschluß verfügen und die Gasverträge mit abschaltbarem Gasbezug einen bestimmten Sockel an Heizöl-Nachfrage erforderlich machen.

Gegenüber dem Referenz-Szenario gehen die direkten CO₂-Emissionen im 30%-Reduktions-Szenario um rund 9 bis 10 Mio. t CO₂ - von 7 % (2005) auf 9,3 % (2020) steigend - zurück. Gegenüber 1995 sinken sie um reichlich 20 Mio. t (-15 %) bis 2005 und um insgesamt fast 42 Mio. t (-30 %) bis 2020.

Tabelle 3.2-2:

Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der direkten CO₂-Emissionen im Sektor Industrie im 30%-Reduktions-Szenario

	1995		2005	2010	2020
	Energie-Bilanz ¹⁾	E-Bilanz + KWK ²⁾	30%-Reduktions-Szenario		
	Energieverbrauch in PJ				
Insgesamt	2474	2625	2424	2332	2183
dav.: Heizöl S	147	165	150	130	115
Heizöl EL	136	155	145	129	106
Naturgas	748	790	781	765	730
Steinkohle, -koks	398	470	400	370	322
Braunkohle	81	81	48	44	40
sonst. fossile Brennstoffe	197	197	125	108	81
Erneuerbare Energien, Müll	11	11	9	9	9
Strom	686	686	706	717	725
Fernwärme	70	70	60	60	55
	Abweichungen vom Referenz-Szenario				
Insgesamt			-176	-178	-197
dav. Heizöl S			0	-5	-5
Heizöl EL			-5	-1	-4
Naturgas			-39	-55	-70
Steinkohle, -koks			-20	-5	-28
Braunkohle			-12	-11	-10
sonst. fossile Brennstoffe			-45	-47	-24
Erneuerbare Energien, Müll			-1	-1	-6
Strom			-44	-43	-45
Fernwärme			-10	-10	-5
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
30%-Reduktions-Szenario			141,9	120,6	112,3
Referenz-Szenario			141,9	129,9	121,1
Modell-Basis-Szenario			141,9	118,7	110,6
Abweichungen des 30%-Reduktions-Szenarios vom Referenz-Szenario				-9,3	-8,8
Abweichungen des 30%-Reduktions-Szenarios vom Modell-Basis-Szenario				1,9	1,6
Abweichungen in den Summen durch Rundungen					
Korrekturen in 1995 gegenüber Modell-Basis-Szenario erforderlich, die sich teilweise in der Projektionsperiode bis 2020 fortsetzen.					
1) Quelle: AG Energiebilanzen, Energiebilanz Deutschland für 1995.					
2) Brennstoffstruktur gemäß Energiebilanz plus KWK-Brennstoffeinsatz					

Wenn man die industriellen CO₂-Emissionen (einschließlich derjenigen in industriellen KWK-Anlagen) entsprechend den IKARUS-Modellrechnungen für 1990 mit 199 Mio. t

zugrunde legt, betragen die Emissionsminderung bis 2005 beinahe 80 Mio. t oder fast 40 %, wobei der größte Rückgang allerdings bereits bis 1995 realisiert worden ist.

Der "Sprung" der CO₂-Minderung zwischen dem 30%-Reduktions-Szenario und dem Referenz-Szenario erfolgt von 1995 bis 2005. Dies ist dadurch zu erklären, daß bereits im Referenz-Szenario die wesentlichen Veränderungen der Energieträgerstruktur zugunsten weniger kohlenstoffhaltigen Energieträgern stattfinden und im 30%-Reduktions-Szenario die Effizienzgewinne dominieren.

Im Ergebnis ist dieses 30%-Reduktions-Szenario etwa so zu interpretieren, daß alle gehemmten, aber rentablen Energieeffizienzpotentiale ausgeschöpft und nur wenige mit zusätzlichen Kosten erschließbaren Potentiale in der Industrie in Anspruch genommen werden müßten, um das Reduktionsziel insgesamt zu erreichen.

Der Unterschied der Energieverbrauchs- und CO₂-Emissionswerte für 2005 und 2010 zwischen dem 30%-Reduktions-Szenario und dem Modell-Basis-Szenario ist deshalb nicht sehr groß. Dennoch macht dies eine erhebliche energiepolitische Aktivität erforderlich, um die gehemmten Potentiale zu erschließen. Bei der Erwägung zusätzlicher energiepolitischer Maßnahmen ist jeweils zu berücksichtigen, daß einige der zusätzlichen Maßnahmen auf die gleichen Potentiale und Zielgruppen wirken, so daß ihre zunächst partiell geschätzte Wirkung in integraler Betrachtungsweise sich mehr oder weniger stark reduziert.

Den größten Einzelbeitrag mit etwa 5 bis 7 Mio. t CO₂ könnte man von der geplanten Wärmenutzungsverordnung erwarten (vgl. Ziesing et al. 1997). Allerdings wird damit gerechnet, daß deren Potentiale mit Durchlauf eines 15-jährigen Investitionszyklus im Jahre 2015 ausgeschöpft sind und die politische Durchsetzbarkeit wegen des hohen administrativen Aufwandes fraglich ist. Weitere nennenswerte Beiträge mit kontinuierlicher Steigerung und je etwa 2 Mio. t im Jahre 2020 ergeben sich aus den folgenden Maßnahmen (vgl. auch Ziesing et al. 1997):

- Energiesparverordnung 2000, die an der Raumwärme der Fabrik- und Verwaltungsgebäude der Industrie ansetzen und den Bestand miterfassen würde,

- Verbesserung der Kreditprogramme ERP, DtA und KfW,
- öffentliche Unterstützung eines "grünen" Kapitalmarktes (z.B. durch kapitalsteuerbefreite Dividenden von Unternehmen mit Umweltschutzgütern wie in den Niederlanden),
- Nutzung der Ergebnisse verstärkter Forschung und Entwicklung in energieeffizientere Industrieprozesse und Nebenanlagen.

Auch eine neue Verbändevereinbarung (BDI/VDEW/VIK/VEA) könnte eine Entlastung um etwa 2 Mio. t CO₂ durch verstärkte Nutzung von KWK-Anlagen (später auch Brennstoffzellen) bewirken. Allerdings wird damit gerechnet, daß diese Entlastung zwar kurz- und mittelfristig (bis 2010) erreicht wird, danach aber keine wesentlichen Beiträge mehr zu erwarten sind, weil die Potentiale weitgehend ausgeschöpft sein würden. Ebenfalls noch spürbare Beiträge mit wachsenden Potentialen liefern bis 2020

- zusätzliche Länder- und Kommunalprogramme sowie Programme der Industrie- und Handelskammern (1,5 Mio. t), die insbesondere auf Fortbildung und Information der mittelständischen Wirtschaft abzielen,
- Förderung des Contracting (rund 1 Mio. t), das insbesondere auf die vernachlässigten Nebenanlagen (z. B. Kessel, Kälte- und Drucklufterzeugung) zielt,
- bewußte kooperative Beschaffungsprogramme von Unternehmen (rund 1 Mio. t), die auf standardisierte und in Großserie gefertigte Effizienzkomponenten (z.B. hocheffiziente Elektromotoren) ausgerichtet sein könnten, sowie
- verstärkte Initialberatung und Informationsverbreitung durch Energieagenturen (etwa 0,4 Mio. t), insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen,

während weitere Maßnahmen (z.B. GebäudevermietungsVO, Novelle der KleinfeuerungsanlagenVO) nicht mehr nennenswert zu Buche schlagen dürften.

Stromseitig könnte man den größten Entlastungsbeitrag von einer Elektromotorenanwendungs-Verordnung erwarten (überschlägig etwa 2 bis 3 Mio. t CO₂), in dem für alle Massenanwendungen von Elektromotoren (z.B. für Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren) mit bestimmten Einsatzbereichen klare technische Spezifikationen (z.B. hocheffizi-

enter Motor, elektronische Lastregelung) erfüllt sein müssen. Eine alternative Entlastungsmaßnahme wäre eine freiwillige Vereinbarung der Verbände ZVEI und VDMA zur stromsparenden Auslegung von Motoren, Aggregaten, Geräten und Maschinen (etwa 1,5 Mio. t).

3.2.3.2 Das 40%-Reduktions-Szenario¹¹

Auffallend im 40%-Reduktions-Szenario ist, daß nach den Modellrechnungen keine weiteren energiebezogenen Effizienzpotentiale in der Industrie mehr erschlossen werden, sondern die zusätzliche Minderung der CO₂-Emissionen gegenüber dem 30%-Reduktions-Szenario ausschließlich durch Substitution zugunsten CO₂-ärmerer Brennstoffe erzielt wird (vgl. die Tabellen 3.2-3 und 3.2-2). Dieses Ergebnis schließt nicht aus, daß noch weitergehende, wenngleich etwas kostenintensivere Effizienzinvestitionen in der Industrie vorhanden sind, die aber als Technikoptionen in der Modelldatenbank fehlen. Insofern kann es auch sein, daß ein insgesamt kostengünstigeres CO₂-Minderungsergebnis erzielbar wäre als dies derzeit vom Modell aufgrund der dort berücksichtigten Daten ausgewiesen wird (vgl. auch Abschnitt 4.3).

Um die Energieträgersubstitution zu kohlenstoffärmeren und kohlenstofffreien Energieträgern zu gewährleisten und auch allgemeine, langfristig klare Rahmenbedingungen für Investoren zu setzen, wäre die Einführung der Energie-/CO₂-Steuer nach dem Vorschlag der EU von 1992 und 1995 für die Umsetzung des 40%-Reduktions-Szenarios notwendig. Denn die Steuerspreizung zwischen Braunkohle und Naturgas von fast 0,5 Pf/kWh bei einem Steueraufschlag von 1,1 Pf/kWh für Naturgas (2010) wäre schon erheblich, und auch die Energiepreissteigerungen für industrielle Verbraucher läge bei 30 bis 50 % in der Periode bis 2020. Bei einer langfristigen Preiselastizität von durchschnittlich -0,4 wäre deshalb theoretisch mit Effizienzsteigerungen um 10 bis 20 % zu rechnen.

¹¹ Der Korrekturbedarf zur strukturellen Entwicklung der Energieträger beschränkt sich in diesem Szenario im wesentlichen auf das Naturgas, die Steinkohle und die Fernwärme, die möglicherweise bei den Modellrechnungen zu schnell an Marktanteilen verlieren.

Tabelle 3.2-3:

Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der direkten CO₂-Emissionen im Sektor Industrie im 40%-Reduktions-Szenario

	1995		2005	2010	2020
	Energie-Bilanz ¹⁾	E-Bilanz + KWK ²⁾	40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung		
	Energieverbrauch in PJ				
Insgesamt	2474	2625	2424	2340	2182
dav.: Heizöl S	147	165	119	87	63
Heizöl EL	136	155	105	96	61
Naturgas	748	790	899	899	838
Steinkohle, -koks	398	470	390	370	300
Braunkohle	81	81	42	41	37
sonst. fossile Brennstoffe	197	197	110	86	81
Erneuerbare Energien, Müll	11	11	9	9	52
Strom	686	686	700	712	720
Fernwärme	70	70	50	40	30
	Abweichungen vom Referenz-Szenario				
Insgesamt			-176	-170	-198
dav. Heizöl S			-31	-48	-57
Heizöl EL			-45	-34	-49
Naturgas			79	79	38
Steinkohle, -koks			-30	-5	-50
Braunkohle			-18	-14	-13
sonst. fossile Brennstoffe			-60	-69	-24
Erneuerbare Energien, Müll			-1	-1	37
Strom			-50	-48	-50
Fernwärme			-20	-30	-30
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
40%-Reduktions-Szenario	141,9	119,1	112,1	96,8	
30%-Reduktions-Szenario	141,9	120,6	112,3	100,1	
Referenz-Szenario	141,9	129,9	121,1	110,5	
Modell-Basis-Szenario	141,9	118,7	110,6	106,1	
Abweichungen des 40%-Reduktions-Szenarios vom Referenz-Szenario			-10,8	-9,0	-13,7
Abweichungen des 40%-Reduktions-Szenarios vom Modell-Basis-Szenario			0,4	1,4	-9,4
Abweichungen in den Summen durch Rundungen					
Korrekturen in 1995 gegenüber Modell-Basis-Szenario erforderlich, die sich teilweise in der Projektionsperiode bis 2020 fortsetzen.					
1) Quelle: AG Energiebilanzen, Energiebilanz Deutschland für 1995.					
2) Brennstoffstruktur gemäß Energiebilanz plus KWK-Brennstoffeinsatz					

Auch beim Strombedarf würden bei einem Steueraufschlag von knapp 3 Pf/kWh im Jahre 2010 die durchschnittlichen Strompreise der Industrieunternehmen um 15 bis 40 % erhöht; bei einer Preiselastizität von -0.2 bis -0.3 würde die Stromnachfrage um etwa 5 bis 15 % rückläufig sein. Dieses Instrument hätte auch den Vorteil, daß auf viele sektorale Einzelmaßnahmen mit zuweilen nicht geringen Programmkosten verzichtet werden könnte.

Neben der Energie-/CO₂-Steuer wären einzelne sektorale Maßnahmen, wie sie im 30%-Reduktions-Szenario beschrieben wurden, weiterhin erforderlich, um die energiebezogenen Effizienz- und Substitutionseffekte, die gegenüber dem Referenz-Szenario erzielt werden müßten, auch wirklich zu erreichen. Diese Maßnahmen sollten insbesondere auf die weniger energieintensiven Branchen ausgelegt sein, die erfahrungsgemäß größere rentable Energieeffizienzpotentiale nicht ausschöpfen (Gruber, Brand 1991).

3.2.4 Fazit

Durch strukturelle Änderungen zwischen und innerhalb der Branchen, weitere autonome Effizienzverbesserungen und die bereits laufenden Maßnahmen von Bund, Ländern (Energie-Agenturen) und Selbstorganisationen der Wirtschaft zur Steigerung der Energieeffizienz ergibt sich bereits im Referenz-Szenario von 1995 bis 2020 ein Rückgang des Energieverbrauchs der Industrie um 245 PJ (oder 9 %), obwohl die Nettoproduktion der Industrie in dieser Periode um 50 % zunimmt. Mit 31 Mio. t sind die CO₂-Emissionen noch stärker rückläufig (-22 %), weil es in einem erheblichen Umfang zu Substitutionsprozessen zugunsten des Erdgases und des Stroms kommt.

Im 30%-Reduktions-Szenario, in dem keine weiteren strukturellen Veränderungen zwischen oder innerhalb der Branchen unterstellt werden, müßte der weitere Rückgang des Energieverbrauchs gegenüber der Referenzentwicklung um zusätzlich 200 PJ (oder 8 %) in 2020 bzw. um weitere 10 t CO₂ (oder 9,3 %) mit erheblichen energiepolitischen Anstrengungen begleitet sein.

Die Tatsache, daß das Modell im 40%-Reduktions-Szenario keine weiteren Energieeffizienzgewinne ausweist, deutet darauf hin, daß die im Modell vorhandenen Optionen bereits relativ kostengünstig sind und weitere – weniger kostengünstige – hätten definiert sein müssen, um auf zusätzliche Effizienzpotentiale in diesem Klimaschutzpolitisch anspruchsvollsten Szenario hinweisen zu können. Diese – durch die dem Modell vorgegebene Datenbasis bewirkte - "Inflexibilität der Modellergebnisse führt letztlich dazu, , daß die sektoralen CO₂-Vermeidungskosten im 40%-Reduktions-Szenario mit knapp 2,2 Mrd. DM im Jahre 2020 gegenüber dem Modell-Basis-Szenario recht hoch - möglicherweise auch zu hoch - ausfallen.

3.2.5 Literatur

- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (1998): Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 1997. Berlin/Köln 13.8.1998
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanz (1999): Energiebilanz für Deutschland im Jahre 1995. Berlin/Köln 1999 (Manuskript)
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft) (1998): Energiedaten '97/'98. Nationale und internationale Entwicklung. Bonn 1998
- DIW (1999): CO₂-Emissionen in Deutschland: Weiterhin vom Zielpfad entfernt. Von H.-J. Ziesing. In: DIW-Wochenbericht 6/99
- Geiger, B.; Gruber, E.; Kleeberger, H.; Köwener, D.; Laszig, L.; Megele, W.; Saller, A. (1998): Energieverbrauch und Energieeinsparung in Handel, Gewerbe und Dienstleistung. Karlsruhe 1998
- Gruber, E.; Brand, M. (1990): Rationelle Energiewirtschaft der mittelständischen Wirtschaft. Verlag TÜV Rheinland. Köln 1990
- Jochem, E., Bradke, H. (1996): Energieeffizienz, Strukturwandel und Produktionsentwicklung der deutschen Industrie. Abschlußbericht Teilprojekt 6 Industrie. Bd. 19 Monographie des Forschungszentrums Jülich. Jülich 1996
- Prognos, EWI (1998): Trendskeizze. Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Basel/Köln 1998
- Ziesing, H. J. et al. (1997): Politiksznarien für den Klimaschutz. Band 1: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005. Reihe Umwelt Band 5, Forschungszentrum Jülich 1997

3.3 Kleinverbraucher

3.3.1 Vorbemerkungen

Der Sektor Kleinverbraucher gehört - insgesamt gesehen - mit einem Anteil am Bruttoinlandsprodukt von rund 70 % nicht nur zu den wichtigsten, sondern gleichermaßen zu den expansivsten Wirtschaftsbereichen. Von 1995 bis 2020 wird mit einem Wachstum in diesem Segment von 62 % gerechnet. Andererseits hat dieser Sektor eine um den Faktor 5 geringere Energieintensität, gemessen als Verhältnis von Energieverbrauch und Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt. Zu den Kleinverbrauchern zählen fast alle Wirtschaftsbereiche außerhalb des verarbeitenden Gewerbes, der Energiewirtschaft und des Verkehrs, also Kleingewerbe, Handwerk, Handel, Banken/Versicherungen, sonstige private Dienstleistungen, Landwirtschaft und alle öffentlichen Dienstleistungen. Der Kleinverbrauchssektor ist energiestatistisch bei weitem am schlechtesten erfaßt. Eine 1998 abgeschlossene Erhebung (Geiger et al. 1998) erbrachte erstmalig nach 15 Jahren wieder eine Aufschlüsselung des Energieverbrauchs nach Branchen und Energieträgern.

Infolge des relativ hohen Raumwärmeanteils am Energieverbrauch dieses Sektors (rund 66 %) ist der Witterungseinfluß deutlich zu beobachten. Dies ist bei der Interpretation der jährlich seitens der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen ausgewiesenen Endenergieverbrauchsdaten zu beachten. Der Endenergieverbrauch entwickelte sich von 1 702 PJ im Jahr 1990 leicht rückläufig auf 1 559 PJ (-8,4 %) im Jahr 1995 (Tabelle 3.3-1), wobei allerdings 1995 ein relativ warmes Jahr war (zum Vergleich: 1996, ein relativ kaltes Jahr: 1694 PJ; Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 1997).

Das Basisjahr der Projektionen 1995 und die bedarfsbestimmenden Größen

Vergleicht man die Daten der Energiebilanz für die Kleinverbraucher mit den Rechenergebnissen des IKARUS-Modells für das Jahr 1995, so ergeben sich bis auf den Stromverbrauch mit einem Unterschied von fast 50 PJ¹² und beim Flüssiggas um 43 PJ keine

¹² Dieser Unterschied dürfte vor allem darauf zurückzuführen sein, daß in den Energiebilanzen von 1995 an die früheren statistischen Differenzen beim Strom nunmehr sachgerecht den Kleinverbrauchern zugeordnet werden, was bei den IKARUS-Rechnungen noch nicht berücksichtigt werden konnte.

größeren Abweichungen. Bei dem Vergleich der Ergebnisse für die Projektionsjahre sollten diese Abweichung im Auge behalten werden. Wo dies erforderlich ist, werden die Daten entsprechend an die Struktur von 1995 angepaßt.

Die energiebedarfsbestimmenden Größen sind je nach Subbranche die Entwicklung der Büro- und sonstigen (beheizten) Flächen sowie der Beschäftigten und Produktion (vgl. Abschnitt 2.3.4). Die Werte dieser Größen für die einzelnen Projektionsjahre wurden für alle Szenarien gleich gehalten, so daß sich Energie- und CO₂-Emissionswerte der Szenarien nur aufgrund veränderter Energieeffizienz und Energieträgerstrukturen unterscheiden können.

3.3.2 Referenz-Szenario für den Sektor Kleinverbraucher

Das Referenz-Szenario wurde ausgehend vom Modell-Basis-Szenario konstruiert, in dem keine Hemmnisse und Marktunvollkommenheiten berücksichtigt werden. Deshalb fallen dort die Energiebedarfswerte für die Projektionsjahre niedriger aus, als man sie in einer Referenzentwicklung erwarten darf. Für das Jahr 2005 wurde pauschal ein um etwa 10 % höherer Energieverbrauch unterstellt, wobei die jeweilige Energieträgerstruktur entsprechend angepaßt worden ist. Der größte "Korrekturbedarf" liegt dabei im Strombereich, wo - wenig plausibel - die Werte im Modell-Basis-Szenario im Zeitverlauf deutlich abnehmen (von 396 PJ im Jahr 1995 auf 321 PJ im Jahr 2020), obwohl man erwarten kann, daß mit weiter zunehmenden Beschäftigtenzahlen im tertiären Sektor, höheren Quadratmeterzahlen je Beschäftigten, mehr Büroautomation und weiteren privaten und öffentlichen Dienstleistungen auf hochtechnisiertem Niveau der Strombedarf eher zunimmt. Davon geht auch die Trendskeizze von Prognos/EWI (1998) für den Kleinverbrauchssektor aus, wo ein Zuwachs um 26 % auf 550 PJ bis 2020 - allerdings bei höherem Wirtschaftswachstum - projiziert wird.

Im Referenz-Szenario wird der Strombedarf - deutlich abweichend vom Modell-Basis-Szenario - bis zum Jahr 2020 auf 500 PJ steigen; das bedeutet einen Zuwachs um knapp 12 % innerhalb von 25 Jahren. Da das Modell den Flüssiggas- und Stadtgasbedarf bereits für 1995 um etwa 45 PJ zu hoch berechnet, wurden auch hier die Ergebnisse korrigiert und die Differenz zusammen mit den Strombedarfskorrekturen mit dem Naturgasver-

brauch abgeglichen. Die Korrekturen beim Stromverbrauch im Jahr 2020 führen dazu, daß der Erdgasverbrauch im Referenz-Szenario niedriger ist als im Modell-Basis-Szenario (Tabelle 3.3-1).

Tabelle 3.3-1:

Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der CO₂-Emissionen im Sektor Kleinverbraucher im Referenz-Szenario

	1995		2005	2010	2020
	Energie-Bilanz ¹⁾	Modell-Basis-Szenario	Referenz-Szenario		
	Energieverbrauch in PJ				
Insgesamt	1570	1556	1700	1650	1570
dav.: Heizöl EL u. S	411	321	410	370	230
Kraftstoffe	139	140	150	150	150
Naturgas	398	388	497	492	546
Steinkohle	18	32	18	16	15
Braunkohle	31	95	27	24	15
sonst. fossile Brennstoffe	9	54	11	10	10
Erneuerbare Energien	2	0	3	3	4
Strom	447	396	470	480	500
Fernwärme	115	131	114	105	100
	Abweichungen vom Modell-Basis-Szenario				
Insgesamt			168	150	140
dav. Heizöl EL u. S			13	3	28
Kraftstoffe			1	-1	3
Naturgas			81	39	-63
Steinkohle,			-3	0	3
Braunkohle			4	2	4
sonst. fossile Brennstoffe			-49	-48	-43
Erneuerbare Energien			3	3	4
Strom			116	139	179
Fernwärme			2	13	25
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
Referenz-Szenario	68,3		74,3	70,4	62,2
Modell-Basis-Szenario	68,3		71,8	71,0	65,4
Abweichungen des Referenz-Szenarios vom Modell-Basis-Szenario			2,6	-0,6	-3,3
Abweichungen in den Summen durch Rundungen					
Datenkorrekturen erforderlich, um eine plausible Referenzentwicklung zu erhalten.					
1) Quelle: AG Energiebilanzen, Energiebilanz Deutschland für 1995.					

Im Referenz-Szenario steigt der Energieverbrauch von 1 570 PJ im Jahre 1995 auf 1 700 PJ im Jahre 2005 (normale Witterung unterstellt) und vermindert sich danach bis zum Jahr 2020 wieder auf den Ausgangswert von 1 570 PJ. Die langfristig rückläufige Tendenz (rund 0,3 %/a) wurde aus dem Modell-Basis-Szenario abgeleitet. Diese Tendenz erklärt sich vor allem aus der zunehmenden Energieeffizienz (insbesondere im Gebäude- und Kesselbereich) und auch aus einem höheren Anteil der wissensintensiven Dienstleistungen. Zusammen mit dem Wachstum des Beitrages der Sektoren des Kleinverbrauchs zum Bruttoinlandsprodukt von durchschnittlich knapp 2 % pro Jahr ergibt sich eine Energieintensitätsverminderung um fast 2,3 % jährlich. Die Stromintensität vermindert sich um 1,5 %/a. Die Analysen von Prognos/EWI (1998) kommen zu vergleichbaren Ergebnissen.

Die direkten CO₂-Emissionen nehmen im Referenz-Szenario bis 2020 gegenüber 1995 um 9 % auf 62,2 Mio. t CO₂ ab. Davon beruhen fünf Prozentpunkte auf Effizienzverbesserungen und vier Prozentpunkte auf der Substitution von Heizöl und Kohle durch Erdgas. Die CO₂-Emissionen der Erzeugung von Strom und Fernwärme sind in diesen Angaben nicht enthalten, da sie im Umwandlungssektor entstehen (vgl. Abschnitt 3.7).

Auf der energiepolitischen Seite umfaßt das Referenz-Szenario die bis 1998 ergriffenen Maßnahmen. Zu den wichtigen Maßnahmen zählen diejenigen der Bundesländer und Kommunen sowie die WärmeschutzVO von 1995 (pro Fünf-Jahres-Zeitraum etwa 1 Mio. t CO₂).

Zwei weitere bisher ergriffene Maßnahmen tragen nach dieser Einschätzung bedeutsam, aber mittelfristig mit sinkenden Anteilen zu der gewünschten Minderung der CO₂-Emissionen bei (vgl. Ziesing et al. 1997, S. 123-170):

- Die Selbstverpflichtung der Verbände der Versorgungswirtschaft (BGW, MWV, VKU und VDEW) vermindert die CO₂-Emissionen im Jahre 2005 um 5 Mio. t. Danach wird aber keine weitere Wirkung erwartet, da man dieses Instrument in diesem Bereich aus Gründen des überaus schwierigen Monitorings vermutlich nicht weiter anwenden wird.

- Von der HeizungsanlagenVO 1994 wird angenommen, daß sie ihr Potential in Höhe von knapp 4 Mio. t CO₂ nach Durchlauf entsprechender Investitionszyklen im Jahre 2010 erschöpft hat.

Von weiteren bisher ergriffenen Maßnahmen werden deutlich geringere Effekte mit kleinen Entlastungsbeiträgen in der Größenordnung zwischen 0,01 und 0,03 Mio. t je Fünf-Jahres-Zeitraum erwartet, durch die aber insgesamt bis zum Jahr 2020 auch eine CO₂-Minderung in Höhe von etwa 2 Mio. t erreicht werden könnte.

3.3.2 Diskussion der Reduktions-Szenarien sowie die politischen Maßnahmen zu ihrer Realisierung

3.3.2.1 Das 30%-Reduktions-Szenario

In ähnlicher Weise wie beim Referenz-Szenario wurden einige aus den Modellrechnungen resultierenden Energieverbrauchsdaten korrigiert. Dabei handelt es sich vor allem um die sonstigen fossilen Brennstoffe und um den Strom, deren Bedarfszahlen vom Modell entweder zu hoch oder zu niedrig berechnet wurden. Der jeweilige Ausgleich wurde über den Naturgasverbrauch geschaffen. Außerdem wurde unterstellt, daß - wie im Referenz-Szenario - die erneuerbaren Energiequellen eine leicht steigende Tendenz auf sehr niedrigem Niveau haben.

Gegenüber der Referenzentwicklung reduziert sich der gesamte Endenergiebedarf der Kleinverbraucher bis 2020 um etwa 170 PJ oder um 11 % (Tabelle 3.3-2). Der Strombedarf geht im 30%-Reduktions-Szenario mit 60 bis 120 PJ ganz erheblich gegenüber dem Referenz-Szenario zurück (2020: -24 %). Dieser gewaltige Rückgang ist möglicherweise etwas überzeichnet und erfordert zweifellos erhebliche energiepolitische Aktivitäten, um diese Abnahme zu erzielen (s. u.). Der Brennstoff- und Fernwärmebedarf nimmt mit rd. 10 % langsamer ab als im Referenz-Szenario. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der Kraftstoffbedarf der Land- und Forstwirtschaft praktisch stagniert und das Naturgas aufgrund seines relativ moderaten Zuwachses keine größeren Effizienzverbesserungen durch den Brennstoffwechsel auslösen kann.

Tab. 3.3-2:

**Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der
CO₂-Emissionen im Sektor Kleinverbraucher im 30%-Reduktions-Szenario**

	1995		2005	2010	2020
	Energie- Bilanz ¹⁾	Modell- Basis- Szenario	30%-Reduktions-Szenario		
	Energieverbrauch in PJ				
Insgesamt	1570	1556	1530	1496	1400
dav.: Heizöl EL u. S	411	321	279	257	195
Kraftstoffe	139	140	149	151	147
Naturgas	398	388	525	548	569
Steinkohle	18	32	18	16	12
Braunkohle	31	95	23	22	7
sonst. fossile Brennstoffe	9	54	11	10	10
Erneuerbare Energien	2	0	3	3	5
Strom	447	396	410	400	380
Fernwärme	115	131	113	89	75
	Abweichungen vom Referenz-Szenario				
Insgesamt			-170	-154	-170
dav. Heizöl EL u. S			-131	-113	-35
Kraftstoffe			-1	1	-3
Naturgas			28	56	23
Steinkohle,			0	0	-3
Braunkohle			-4	-2	-8
sonst. fossile Brennstoffe			0	0	0
Erneuerbare Energien			0	0	1
Strom			-60	-80	-120
Fernwärme			-1	-16	-25
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
30%-Reduktions-Szenario	68,3		65,7	65,3	59,6
Referenz-Szenario	68,3		74,3	70,4	62,2
Modell-Basis-Szenario	68,3		71,8	71,0	65,4
Abweichungen des 30%-Reduktions- Szenarios vom Referenz-Szenario			-8,6	-5,1	-2,6
Abweichungen des 30%-Reduktions- Szenarios vom Modell-Basis-Szenario			-6,0	-5,8	-5,9
Abweichungen in den Summen durch Rundungen					
1) Quelle: AG Energiebilanzen, Energiebilanz Deutschland für 1995.					

Gegenüber dem Referenz-Szenario nehmen die CO₂-Emissionen im 30%-Reduktions-Szenario anfangs (2005) um knapp 9 Mio. t CO₂ ab. Dieser Wert schrumpft aber auf knapp 3 Mio. t CO₂ im Jahr 2020, weil die Werte bereits im Referenz-Szenario von 2010

bis 2020 stark rückläufig sind. Gegenüber den Modellwerten(!) für 1990 in Höhe von 99 Mio. t CO₂ beträgt der Rückgang der CO₂-Emissionen rund 33 Mio. t oder etwa ein Drittel.

Der relativ hohe Rückgang im 30%-Reduktions-Szenario gegenüber 1995 von 2,6 Mio. t bis 2005 anstelle eines Anstiegs um 6 Mio. t im Referenz-Szenario ist im wesentlichen effizienzbestimmt.

Etwas deutlicher als in der Industrie zeichnet das 30%-Reduktions-Szenario für die Kleinverbraucher eine Entwicklung, die alle als rentabel einzuschätzenden, aber gehemmten Energieeffizienzpotentiale vollständig ausnutzt und zusätzliche Reduktionspotentiale mit Gesamtkosten von etwa 300 Mio. DM im Jahre 2020 mobilisiert. Außerdem zeigen sich erste strukturelle Reduktionen der kohlenstoffhaltigen Energieträger Kohle und Heizöl zugunsten des emissionsarmen Erdgases und - quantitativ freilich nahezu bedeutungslos - der erneuerbaren Energiequellen.

Wichtigste Maßnahme zur Erreichung dieser Reduktionen ist die EnergiesparVO, wobei aufgrund der Ausschöpfung des damit verbundenen Potentials innerhalb eines Investitionszyklus der Kesselanlagen von rund 15 Jahren eine deutliche Abflachung der CO₂-Minderung erwartet wird. Durch zusätzliche Länder- und Kommunalaktivitäten (z. B. Motivation, Information, finanzielle Anreize) wird bis zum Jahre 2020 mit einer Minderung um etwa 1 Mio. t gerechnet.

Eine Reihe weiterer Maßnahmen trägt zu einer kontinuierlich steigenden Minderung - insbesondere des Stromverbrauchs - bei (vgl. Ziesing et al. 1997, S. 123-170):

- die Verbesserung der Kreditprogramme ERP, DtA, KfW, wobei insbesondere auf die rentablen Stromeinsparpotentiale zu achten sein wird,
- Nutzung der Ergebnisse verstärkter Forschung und Entwicklung, insbesondere im Bereich moderner Fassaden- und Fenstersysteme, Beleuchtungssysteme, Klimatisierung und Kälteerzeugung,
- ein gezieltes Fortbildungsprogramm für Heizung-, Lüftung- und Klima-Fachpersonal (Potential nach eine rund 15-jährigen Laufzeit bis 2015 im wesentlichen ausgeschöpft),

- eine erweiterte Förderung und Rolle von Energieagenturen der Bundesländer, auch unterstützt von einer Bundes-Energieagentur,
- Contracting-Förderung und in geeigneten Fällen eine kooperative Beschaffung in Kettenunternehmen des Einzelhandels, von Hotel- und Restaurantketten sowie von Filialunternehmen,
- eine ElektroanwendungsVO für Büromaschinen, Umwälzpumpen, Ventilatoren, Klimageräte und -anlagen bzw. alternativ entsprechende Selbstverpflichtungen der Hersteller und Importeure.

Im Vergleich zur Industrie ist in diesem 30%-Reduktions-Szenario die energiepolitische Eingriffstiefe im Kleinverbrauchssektor zwar höher, doch liegen hier auch die größeren rentablen Energiesparpotentiale infolge der geringen spezifischen Energiekosten und der relativ kleineren Betriebsgrößen (und des hier meist fehlenden energietechnischen Fachpersonals) (vgl. Gruber, Brand 1990 und Geiger et al. 1998).

3.3.2.2 Das 40%-Reduktions-Szenario¹³

Das 40%-Reduktions-Szenario bringt gegenüber dem Referenz-Szenario im Jahre 2020 einen weiteren Rückgang des Energieverbrauchs um gut 270 PJ (oder gut 17 %), aber auch eine deutliche Substitution von Heizöl und Kohle durch Naturgas (+10 PJ in 2020) und Fernwärme (+49 PJ). Zwar gehen die erneuerbaren Energiequellen in diesem Szenario im Modell etwas stärker in Lösung, doch liegen ihre Versorgungsbeiträge weiterhin noch unter 10 PJ (Tabelle 3.3-3). Auch die Kraftstoffe gehen in diesem Reduktions-Szenario erstmalig in 2020 um 10 PJ (-7%) zurück. Extrem rückläufig ist der Bedarf an Heizöl mit 166 PJ (-40%) im Jahr 2005 bis 189 PJ (-80%) im Jahr 2020.

¹³ Der Korrekturbedarf bei den Daten in diesem Szenario ist gering: Es handelt sich um eine langsame Rückführung der Braunkohle und Steinkohle in 2020 sowie eine Reduktion der weiterhin recht hohen Flüssiggaszahlen (sonstige fossile Brennstoffe), die entsprechend den vorhergegangenen Szenarien reduziert werden mußten. Der Ausgleich erfolgt jeweils über die Naturgaszahlen. Auch hier mußte wiederum der Strombedarf entsprechend den anderen Szenarien angehoben werden. Die Korrekturen fallen jetzt allerdings kleiner aus, da durch den Einsatz von Elektrowärmepumpen und anderen Stromnutzungen die zusätzlichen Stromverbräuche im 40%-Reduktions-Szenario gegenüber dem 30%-Reduktions-Szenario gestiegen sind.

Tabelle 3.3-3:

**Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der
CO₂-Emissionen im Sektor Kleinverbraucher im 40%-Reduktions-Szenario**

	1995		2005	2010	2020
	Energie- Bilanz ¹⁾	Modell- Basis- Szenario	40%-Reduktions-Szenario		
	Energieverbrauch in PJ				
Insgesamt	1570	1556	1483	1439	1296
dav.: Heizöl EL u. S	411	321	244	167	41
Kraftstoffe	139	140	149	151	140
Naturgas	398	388	523	548	556
Steinkohle	18	32	17	14	5
Braunkohle	31	95	10	7	4
sonst. fossile Brennstoffe	9	54	10	9	8
Erneuerbare Energien	2	0	3	4	8
Strom	447	396	415	405	385
Fernwärme	115	131	113	134	149
	Abweichungen vom Referenz-Szenario				
Insgesamt			-217	-211	-274
dav. Heizöl EL u. S			-166	-203	-189
Kraftstoffe			-1	1	-10
Naturgas			26	56	10
Steinkohle,			-1	-2	-10
Braunkohle			-17	-17	-11
sonst. fossile Brennstoffe			-1	-1	-2
Erneuerbare Energien			0	1	4
Strom			-55	-75	-115
Fernwärme			-1	29	49
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
40%-Reduktions-Szenario	68,3		61,6	56,8	45,8
30%-Reduktions-Szenario	68,3		65,7	65,3	59,6
Referenz-Szenario	68,3		74,3	70,4	62,2
Modell-Basis-Szenario	68,3		71,8	71,0	65,4
Abweichungen des 40%-Reduktions- Szenarios vom Referenz-Szenario			-12,8	-13,7	-16,4
Abweichungen des 40%-Reduktions- Szenarios vom Modell-Basis-Szenario			-10,2	-14,3	-19,6
Abweichungen in den Summen durch Rundungen					
1) Quelle: AG Energiebilanzen, Energiebilanz Deutschland für 1995.					

Die CO₂-Emissionen fallen wegen dieser Veränderungen um knapp 13 Mio. t (2005) bis reichlich 16 Mio. t (2020) gegenüber dem Referenz-Szenario niedriger aus (-17 % bis -26 %). Diese Werte bedeuten für 2020 ganz erhebliche Umstrukturierungen im Ener-

gieträgerangebot und weitere Effizienzgewinne, die nur mit erheblichen energiepolitischen Anstrengungen und einem Kostenaufwand von gut 1 Mrd. DM im Jahre 2020 (entsprechend 65 DM/t CO₂) zu realisieren wären.

Die hierzu erforderlichen sektoralen energiepolitischen Maßnahmen, die bereits im Abschnitt 3.3.2.1 genannt wurden, müßten mit größerer Intensität verfolgt werden. Eine große Unterstützung wäre die Veränderung der ökonomischen Rahmenbedingungen durch Einführung der Energie-/CO₂-Steuer nach dem Vorschlag der EU von 1992 und 1995. Ähnlich wie in der Industrie würde die Steuer dazu beitragen, daß die Substitution zu kohlenstoffärmeren Energieträgern ebenso wie die Effizienzsteigerungen (zu rund 10 %) unterstützt würden. Die Steuer hätte auch den Vorteil, daß einzelne sektorale Maßnahmen (z.B. finanzielle Anreize) weniger eingriffsintensiv sein müßten und damit Programmkosten staatlicher Maßnahmen begrenzt werden könnten.

3.3.4 Fazit für den Sektor Kleinverbraucher

Für das Referenz-Szenario ist anzunehmen, daß der (temperaturbereinigte) Energiebedarf im Vergleich zu 1995 in Zukunft trotz deutlichen Wirtschaftswachstums infolge der Effizienzgewinne leicht rückläufig sein dürfte. Dieser Rückgang ist bis 2020 mit 7 % relativ moderat, doch verstärken die Energieträgersubstitutionen den Rückgang auf Seiten der CO₂-Emissionen auf 17 % (ebenfalls temperaturbereinigt). Der Erfolg der bisher ergriffenen Maßnahmen - insbesondere im Bereich der Verordnungen des Bundes sowie der Aktivitäten der Länder und Kommunen - ist somit durchaus beachtlich.

Das 30%-Reduktions-Szenario eröffnet mit erheblichen Strom- und Brennstoffeinsparungen (-10 bis -12 % als Endenergiebedarf) ein merkliches energiepolitisches Handlungsfeld, das insbesondere auf die Stromeinsparpotentiale ausgelegt sein müßte. Die zusätzlichen CO₂-Minderungen nehmen gegenüber dem Referenz-Szenario im Zeitverlauf allerdings deutlich ab, weil die Brennstoffsubstitution im Jahr 2020 nur noch wenig zur CO₂-Reduktion beiträgt. Die genannten energiepolitischen Maßnahmen könnten zur Umsetzung der modellmäßig abgebildeten Emissionsminderungen beitragen. Sowohl die Maßnahmen auf Länder- und Kommunalebene als auch auf EU-Ebene würden die

Maßnahmen der Bundesregierung merklich unterstützen. Auch die Förderung des Contracting könnte die gerade in diesem Endenergiesektor bestehenden Hemmnisse rationaler Energieanwendung überwinden helfen. Bei größeren Energieverbrauchern könnten die Energiedienstleistungsangebote der Energieversorger und Technologieproduzenten auch eine wichtige Rolle spielen.

Im 40%-Reduktions-Szenario errechnet das Modell gegenüber dem 30%-Reduktions-Szenario für 2020 eine zusätzliche Reduktion des Endenergiebedarfs in Höhe von reichlich 100 PJ und von knapp 14 Mio. t CO₂. Im Vergleich zum Referenz-Szenario fallen im Jahr 2020 der Energieverbrauch um reichlich 270 PJ und die CO₂-Emissionen um gut 16 Mio. t niedriger aus. Demnach ist es möglich, erhebliche weitere Effizienz- und Substitutionspotentiale zu erschließen. Allerdings setzt dies eine zunehmende Intensität der sektoralen Maßnahmen und die Einführung einer Energie-/CO₂-Steuer, wie sie etwa von der EU vorgeschlagen wurde, voraus. Die Zusatzkosten für den Kleinverbrauchssektor - gemessen an dem Referenz-Szenario - würden schätzungsweise 65 DM/t CO₂ betragen; dies wäre deutlich weniger als in der Industrie im selben Reduktions-Szenario.

Auffallend war in allen Szenarien modellbedingt vor allem der rückläufige Strombedarf, so daß hier aus der analytischen Sicht Änderungen notwendig wurden. Die geänderten Werte sind zwar mit Einschätzungsunsicherheiten behaftet, doch weichen sie im Referenz-Szenario nicht wesentlich von anderen Projektionen (z.B. Prognos, EWI 1998) ab.

3.3.5 Literatur

- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (1997): Auswertung zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 1996. Berlin/Köln 15.7.1997
- Geiger, B.; Gruber, E.; Kleeberger, H.; Köwener, D.; Laszig, L.; Megele, W.; Saller, A. (1998): Energieverbrauch und Energieeinsparung in Handel, Gewerbe und Dienstleistung. Karlsruhe 1998
- Gruber, E.; Brand, M. (1990): Rationelle Energiewirtschaft der mittelständischen Wirtschaft. Verlag TÜV Rheinland. Köln 1990
- Prognos, EWI (1998): Trendskeizze. Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Basel/Köln 1998
- Ziesing, H.-J. et al. (1997): Politiksznarien für den Klimaschutz. Band 1: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005. Reihe Umwelt Band 5, Forschungszentrum Jülich 1997

3.4 Haushalte

3.4.1 Raumwärme und Warmwasser

In diesem Abschnitt werden zunächst die technischen und wirtschaftlichen Energieeinsparpotentiale im Gebäudebereich sowie die Hemmnisse beleuchtet, die einer Ausschöpfung der Sparpotentiale entgegenstehen. Vor diesem Hintergrund wird anschließend ein Referenz-Szenario entwickelt, und es werden die Reduktionsszenarien mit den Maßnahmen zu ihrer Realisierung dargestellt.

3.4.1.1 Technische Sparpotentiale an Einzelgebäuden

Einsparung an Neubauten

Für die Energie- und CO₂-Einsparung im Bereich der Neubauten sind die folgenden ordnungsrechtlichen Maßnahmen von besonderer Bedeutung:

- Wärmeschutzverordnung 1995 (WSchV95)
- Energiesparverordnung 2000 (ESpV2000)

Im Jahre 1990 war noch die Wärmeschutzverordnung von 1984 (WSchV84) in Kraft, die je nach Gebäudetyp einen jährlichen Heizwärmeverbrauch von rund 85 bis 150 kWh/m² gefordert hat. Die jetzt geltende Verordnung (WSchV95) verlangt eine wesentlich bessere Wärmedämmung und läßt nur noch Jahresverbrauchsmengen von 54 bis 100 kWh/m² zu (Rathert 1995). Bezogen auf die "alte" Wärmeschutzverordnung werden dadurch in Einzelgebäuden mittlere spezifische Heizwärmeeinsparungen von rund 35 % erreicht.

Mit der für das Jahr 2000 in Vorbereitung befindlichen Energiesparverordnung (ESpV2000) wird gegenüber der WSchV95 das Anforderungsniveau weiter verschärft, und es soll die Anlagentechnik mit einbezogen werden. Der Jahresbedarf soll im Bereich von rund 50 bis 90 kWh/m² liegen (Hauser 1998). Er bezieht sich auf Endenergie und ist mit den obigen Angaben zum Heizwärmeverbrauch nicht direkt vergleichbar. Rechnet man die Anforderungen der WSchV84 mit einem mittleren Nutzungsgrad von z. B. 80 % in Heizenergie um, dann ergeben sich spezifische Verbrauchsmengen von rund 110 bis 190 kWh/m². Bezogen auf diese Referenzwerte werden mit der ESpV2000 also Endenergieeinsparungen von rund 55 % erzielt.

Eine weitere technische Möglichkeit, den Heizwärmeverbrauch in neuen Gebäuden zu senken, besteht in dem Bau von Passivhäusern: Hier wird durch den Einsatz modernster Technik eine drastische Heizwärmeeinsparung und ein maximaler solarer Zugewinn angestrebt. Damit wird ein Jahresheizwärmebedarf von höchstens 15 kWh/m² erreicht (Feist, Knissel 1997). Bezogen auf die im Jahre 1990 gültige WSchV84 bedeutet dies eine Einsparung von 80 bis 90 %. Die Anzahl der bis 2020 zu erwartenden Passivhäuser ist in Relation zum Gebäudebestand allerdings sehr gering. Die realisierbaren Energieeinsparung rechtfertigen aber eine Unterstützung des verstärkten Baus von Passivhäusern - wie generell von Niedrigenergiehäusern - durch politische Maßnahmen.

Einsparpotentiale in Altbauten

Im Bereich der Altbauten stellt sich die Situation anders dar als bei Neubauten. Als Bezug für die Einsparung dient hier der tatsächliche Verbrauch für den Istzustand im Jahre 1990. Im Vergleich zur geltenden Wärmeschutzverordnung ist der Verbrauch in älteren Gebäuden zwei bis z. T. viermal zu hoch. Die WSchV95 schreibt für bestehende Gebäude vor, daß im Falle einer baulichen Erweiterung sowie im Falle einer Ersatz- oder Erneuerungsmaßnahme, die mehr als 20 % der Bauteilfläche betrifft, bestimmte Anforderungen an den Wärmeschutz zu erfüllen sind. Diese Anforderungen sind etwas weniger scharf als diejenigen für Neubauten. Es ist vorgesehen, die geplante ES_pV2000 sinngemäß auf Altbauten anzuwenden.

Im Bereich der Altbauten sind im Hinblick auf die Energie- und CO₂-Einsparung die folgenden technischen Einzelmaßnahmen relevant, die auch kombiniert werden können:

- Sanierung der Gebäudehülle,
- Austausch der Heizungsanlage,
- Wechsel des Brennstoffs.

Das jeweilige Einsparpotential durch Sanierung der Gebäudehülle hängt vom Baualter ab. So können bei älteren Gebäuden wegen der fehlenden Dämmung Einsparungen von 65 bis 75 %, bezogen auf den Istzustand, erzielt werden (Gülic et al. 1994 und Rechnungen der STE). Bei jüngeren Gebäuden, die bis kurz vor Einführung der Wärmeschutz-

verordnung 1984 gebaut wurden, sind Einsparquoten bis 35 % möglich. Insgesamt existiert also im Gebäudebestand ein erhebliches Sparpotential, das in den alten Bundesländern im Mittel mit rund 50 % angegeben werden kann. Die Einsparpotentiale in den neuen Bundesländern waren im Jahre 1990 noch deutlich höher.

Hinzu kommen Einsparmöglichkeiten durch den Austausch von Heizungsanlagen. Nach ESSO (1995) sind rund 40 % des Ölheizungsbestandes von etwa 6 Mio. Anlagen älter als 15 Jahre. Für die Gasheizkessel dürfte die Situation ähnlich sein. Außerdem ist noch ein gewisser Anteil von alten Festbrennstoff- und Einzelöfen in Betrieb. Der Nutzungsgrad alter Heizungsanlagen (Heizung plus Verteilung) beträgt nach Hauser et al. (1997) häufig nur 45 bis 65 %. Dafür sind folgende Gründe maßgebend:

- veraltete Kesselbauweisen mit hohen Abgas- und Oberflächenverlusten,
- stark überdimensionierte Kessel (früher übliche Auslegungspraxis),
- unzureichende Regeleinrichtungen am Kessel und an den Heizkörpern und
- unzureichend gedämmtes Verteilungssystem (Rohrleitungen).

Nach ESSO (1995) und Stehmeier (1996) kann durch konsequente Modernisierung der Heizungsanlagen, d.h. durch Austausch von Wärmeerzeuger und Regelung, der Brennstoffverbrauch gegenüber der Altanlage um mindestens 20 bis 25 % gesenkt werden.

Öl- und Gasheizungen (einschließlich Warmwasser und Kochen) deckten 1997 rund 71 % des gesamten Endenergieverbrauchs der privaten Haushalte (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 1998). Der Ölanteil (1997 knapp 35 %) verringert sich stetig zugunsten der Gasheizungen (Prognos/EWI 1998). Durch den Übergang vom alten Ölkessel (Nutzungsgrad 74 %) zum Gasbrennwertkessel (Nutzungsgrad 100 %) werden CO₂-Einsparungen bis 44 % erzielt.¹⁴ Davon entfällt etwa die Hälfte auf den Wechsel des Brennstoffs.

Der volle Spareffekt wird nur in Gebäuden erreicht, die bei verbesserter Wärmedämmung auch mit einer modernen Heizungsanlage ausgestattet sind. Wird die Wärme-

¹⁴ Der Wert ergibt sich aus dem besseren Nutzungsgrad und dem Verhältnis der Emissionsfaktoren
($1 - 0,74 \cdot 0,76 = 0,44$)

dämmung ohne Kesselaustausch verstärkt, dann ist die alte Anlage durch den verminderten Heizwärmebedarf u.U. stark überdimensioniert. Ihr Nutzungsgrad wird dadurch noch schlechter. Je nach Gebäudetyp und Heizungsart können durch die gleichzeitige bauliche Sanierung und Heizungserneuerung Energieeinsparungen von 45 bis 80 % gegenüber dem unsanierten Zustand erzielt werden.

Einsparpotentiale durch energiebewußteres Nutzerverhalten

Bei übermäßigem und unkontrollierten Lüften, unnötig hohen Raumtemperaturen und Mitheizen von nicht genutzten Räumen können die technischen Verbesserungen zum Teil wieder zunichte gemacht werden. Durch ein sehr energiebewußtes, sparsames Verhalten können in einem Gebäude zusätzlich bis zu 25 % eingespart werden.

Zusammenfassung der Sparpotentiale an Einzelgebäuden

Die relativen mittleren Energie-Sparpotentiale an Einzelgebäuden im Neu- und Altbaubereich werden in Tabelle 3.4.1-1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3.4.1-1:

Vergleich der relativen Energieeinsparpotentiale an Einzelgebäuden

	Neubau (Bezug: WSchV84)	Altbau (Bezug: Instzustand 1990)
	Einsparquoten in %	
WSchV95	35	-
ESpV2000	55	-
Passivhäuser	80 - 90	-
Sanierung Gebäudehülle nach WSchV95	-	35 - 75
Neue Heizungsanlage	-	20 - 25
Brennstoffwechsel (von Öl zu Gas)	-	25 (bezogen auf CO ₂)
Nutzerverhalten	< 25	< 25

3.4.1.2 Wirtschaftliche Sparpotentiale im Bestand

Einsparpotentiale im Gesamtbestand

Da der Umfang der Neubautätigkeit in Deutschland bis 2020 im Mittel pro Jahr nur bis zu 1 % des Wohnflächenbestandes ausmacht, kann eine weitere Verschärfung der Wärmeschutzverordnung für Neubauten allein auf absehbare Zeit keine signifikante Energie- und CO₂-Einsparung im Wohngebäudebereich bewirken, zumal durch eine Erhöhung der Wohnfläche der Gesamtverbrauch zunächst ja zunimmt.

Gemessen an den Wärmeschutzstandards kann man bis 2020 alle Gebäude als energetisch sanierungsfähig bezeichnen, die vor Einführung der zweiten Wärmeschutzverordnung 1984 gebaut worden sind und die noch nicht modernisiert wurden. Die Wohnfläche der Wohngebäude, die vor 1984 gebaut wurden, beträgt in den alten Bundesländern rund 2050 Mio. m². Das entspricht einem Anteil von etwa 83 % am Bestand in den alten Bundesländern im Jahre 1990. Erst ein relativ kleiner Teil davon dürfte in der Vergangenheit auf das Niveau der heute geltenden Wärmeschutzverordnung saniert worden sein. In den neuen Bundesländern, deren Gebäude eine andere Alters- und Typstruktur haben, dürften nach Gülic et al. (1994) zum Zeitpunkt der Wiedervereinigung rund 95 % der Gebäudefläche energetisch sanierungsbedürftig gewesen sein.

Diese Zahlen zeigen, daß von der Menge der Wohnfläche her im Gebäudebestand sehr große Sanierungspotentiale schlummern. Das wirtschaftliche Potential ist bei den derzeitigen Energiepreisen jedoch viel geringer.

Anmerkungen zum Kostenkonzept

Die Kosten für die einzelnen Maßnahmen bei der Sanierung eines Gebäudes gliedern sich nach Gruson, Kerschberger (1994) in die folgenden zwei Komponenten:

- *Sowieso-Kosten:* Das sind Kosten, die nach Ablauf der Lebensdauer eines Bauteils zu dessen baulicher Sanierung sowieso notwendig sind. Sie können nicht den Wärmeschutzmaßnahmen zugerechnet werden, wenn diese im baulichen Renovierungszyklus durchgeführt werden. Diese Kosten werden z.B. im Falle der Dachdämmung der gleichzeitig durchgeführten Erneuerung der Dacheindeckung zugerechnet. Bei der

Außenwanddämmung werden sie durch das Stahlrohrgerüst, die Fassadenreinigung, die Putzerneuerung, den Anstrich und eine Reihe weiterer Reparaturarbeiten verursacht.

- *Wärmeschutz-Kosten:* Sie werden direkt durch die Wärmeschutzmaßnahmen verursacht und diesen zugeordnet (z.B: Kosten für Isoliermaterial und dessen Anbringung).

Gebäude unterliegen einem Instandhaltungs- und Modernisierungsszyklus von 40 bis 50 Jahren. Werden Wärmeschutzmaßnahmen an die ohnehin durchzuführende Renovierung der Außenbauteile gekoppelt, dann ist der finanzielle Aufwand geringer, weil nicht die Sowieso-Kosten, sondern nur die Zusatzkosten für die Wärmedämmung anzusetzen sind. Werden die Renovierungszeitpunkte nicht genutzt, dann sind die Chancen für eine billige Energieeinsparung bis zum nächsten Modernisierungszeitpunkt, d.h. auf Jahrzehnte, vertan (IWU 1995).

Am Beispiel der Außenwanddämmung werden in Tabelle 3.4.1-2 die eingesparten Energiekosten mit den Jahreskosten für die Dämmung verglichen. Es wurde angenommen, daß die Maßnahme im Renovierungszyklus stattfindet, so daß nur die Wärmeschutz-Kosten anzusetzen sind. Die Jahreskosten wurden für zwei Kombinationen von Abschreibungsdauer und Zinssatz berechnet. Gebäudebesitzer aus dem privaten Bereich dürften eher bereit sein, Abschreibungsdauern von 40 Jahren zu akzeptieren. Bei den Unternehmen der Wohnungswirtschaft sind höchstens 15 Jahre anzusetzen. Bei einem derzeitigen Energiepreis von 0,045 DM/kWh kommt die Außenwanddämmung nur dann in den Bereich der Wirtschaftlichkeit, wenn mit Abschreibungsdauern von 40 Jahren und einem niedrigen Zinssatz von 4 % pro Jahr gerechnet wird. Dies ist aber im Bereich der gewerblichen Wohnungswirtschaft nicht realistisch. Bei einer Abschreibungszeit von 15 Jahren ist nur die Dämmung mit den niedrigsten spezifischen Investitionen bei großen Mehrfamilienhäuser wirtschaftlich.

Bei der Dachdämmung und insbesondere beim Fenstertausch ist die wirtschaftliche Situation im Vergleich zur Außenwanddämmung wegen der höheren spezifischen Kosten ungünstiger.

Tabelle 3.4.1-2:

Wirtschaftlichkeitsvergleich für die Außenwaddämmung

	Einheit	Einfamilienhaus	Reihendoppelhaus	Kleines Mehrfamilienhaus	Großes Mehrfamilienhaus
Investition	DM/m ²	60 - 110	40 - 70	45 - 70	35 - 70
Jahreskosten ¹⁾	DM/m ² a	3,0 - 5,5	2,0 - 3,5	2,3 - 3,5	1,8 - 3,5
Jahreskosten ²⁾	DM/m ² a	6,2 - 11,3	4,1 - 7,2	4,6 - 7,2	3,6 - 7,2
Energieeinsparung	kWh/m ² a	90	43	80	109
Energiekosteneinsparung ³⁾	DM/m ² a	4,1	2,0	3,6	4,9
1) 40 Jahre, 4 % Verzinsung. - 2) 15 Jahre, 6 % Verzinsung. - 3) Heizölpreis 0,45 DM/Liter (0,045 DM/kWh)					
Quelle: Berechnungen der STE, basierend auf IKARUS-Daten					

Dieses Ergebnis stimmt lediglich in der Tendenz mit den optimistischen Rechnungen z.B. in IWU (1995) überein, wo bei einem Energiepreis von 0,045 DM/kWh ein wirtschaftliches Einsparpotential im Altbaubestand von bis zu 30 % angegeben wird. Dabei ist auch vorausgesetzt, daß die Dämmmaßnahmen mit ohnehin durchzuführenden bauliche Maßnahmen gekoppelt werden. Bei einer Verdopplung des Energiepreises würde sich das wirtschaftliche Potential nach IWU auf rund 50 % vergrößern. Für die Umsetzung dieses Potentials wird ein Zeithorizont bis 2050 angegeben. Zum Vergleich: Das LP-Modell errechnet im Basisszenario eine wirtschaftliche Gesamteinsparung im Wohnungssektor durch Wärmedämmung von rund 6 %, bezogen auf den Verbrauch für Raumwärme im Jahre 1990.

Bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung darf nicht vergessen werden, daß eine gute Wärmedämmung eine Reihe von weiteren geldwerten Vorteilen für das Gebäude mit sich bringt. Dazu gehören:

- Vermeidung von Bauschäden,
- Wertsteigerung des Gebäudes,
- Verschönerung des Hauses,
- Verbesserung des Wohnkomforts und
- leichtere Vermietbarkeit der Wohnungen.

3.4.1.3 Hemmnisse bei der Ausschöpfung der Sparpotentiale

Trotz einer Vielzahl von guten Ansätzen und vieler vorbildlicher Einzelprojekte kommt die großflächige Umsetzung der Einsparpotentiale im Gebäudebestand nicht schnell genug voran. Neben der oftmals unzureichenden Wirtschaftlichkeit gibt es eine Reihe von Hemmnissen, die die Realisierung von existierenden Sparmaßnahmen begrenzen oder sogar verhindern. Dazu gehören:

- *Das sogenannte Investor-Nutzer-Dilemma:* In vielen Fällen unterbleiben für sich genommen wirtschaftliche Maßnahmen, weil sie für den Vermieter (Investor) keinen Nutzen bringen, da nur der Mieter von den geringeren Heizkosten profitiert, oder weil der Mieter bei einer unzureichenden Wirtschaftlichkeit der Maßnahme durch die Modernisierungumlage finanziell zu stark belastet wird.
- *Mangelnde Information* bei Eigentümern und Mietern über die technischen Möglichkeiten.
- *Mangelnde Motivation* aufgrund eines unzureichenden Umweltbewußtseins.
- *Unzureichender Vollzug der WSchV:* Es gibt Hinweise darauf, daß Bauanträge zwar die geforderten Wärmeschutzmaßnahmen ausweisen, daß aber in der Praxis die Bauausführung z. T. unzureichend ist und nicht wirksam kontrolliert wird. Daten hierüber sind jedoch nicht verfügbar.

Aus Sicht des Klimaschutzes ist es notwendig, die Handlungsschwellen der Gebäudeeigentümer zu senken, um die energetische Sanierung des Gebäudebestands in "breiter Front" voran zu treiben. Hierzu werden in Zukunft geeignete Motivations- und Förderprogramme benötigt.

Behandlung der Hemmnisse im LP Modell

Hemmnisse können im Optimierungsmodell modelltechnisch auf dreierlei Weise berücksichtigt werden:

- über technisch-wirtschaftliche Inputdaten (z. B. Kosten, Kapazitäten),
- durch zusätzliche zahlenmäßige Beschränkung (Bounds) relevanter Parameter oder Inputdaten oder
- in Form zusätzlicher Restriktionen (mathematische Nebenbedingungen).

Alle drei Möglichkeiten schränken die Freiheitsgrade und damit den mathematischen Lösungsraum des Modells ein. Damit Hemmnisse in das Modell einbezogen werden können, müssen sie modellexogen, z.B. in Form von Kostendaten oder Kapazitäten, quantifiziert werden. Hier liegt in der Regel das Hauptproblem, da bestimmte Hemmnisse kaum oder nicht in der vom Modell geforderten Schärfe zu quantifizieren sind.¹⁵

3.4.1.4 Referenz-Szenario für den Haushaltssektor

Für das Jahr 2010 stimmt der gesamte Endenergieverbrauch der Haushalte im Modell-Basis-Szenario relativ gut mit den Ergebnissen der Trendskeizze von Prognos/EWI (1998) überein. Im Jahre 2005 sind die Ergebnisse nahezu identisch; im Jahre 2020 weist das Modell-Basis-Szenario aber um etwa 8 % höhere Verbrauchswerte aus als Prognos/EWI. Im Modell-Basis-Szenario sinkt der gesamte Energieverbrauch der Haushalte vor allem aus zwei Gründen:

- Durch autonome Wirkungsgradverbesserungen an den Heizungsanlagen und einen zunehmenden Einsatz von Brennwertkesseln wird der Brennstoffverbrauch laufend verringert. Dies beruht auf der prognostizierten technischen Entwicklung. Eine Modifizierung des Modell-Basis-Szenarios ist in diesem Punkt nicht notwendig.
- Die Reduzierung des Heizenergiebedarfs durch Modernisierung einer bestimmten Anzahl von Altbauten resultiert im Modell aus den vorgegebenen Kostendaten für die Maßnahmen zur Wärmedämmung. Hemmnisse, die in der Praxis die Sanierungsrate begrenzen, werden daher nicht berücksichtigt. Im folgenden wird deshalb ein Ansatz beschrieben, der versucht, die Hemmnisse bei der Altbausanierung pauschal zu berücksichtigen.

Gemäß dem Modell-Basis-Szenario werden bis zum Jahre 2020 rund 390 Mio. m² an Altbaufläche energetisch saniert. Bezogen auf den Bestand im Jahre 1990 von rund

¹⁵ In bestimmten Fällen kann das Modell die Schwelle zur Überwindung der Hemmnisse ermitteln, z.B. in Form von anlegbaren Kosten oder in Form eines notwendigen finanziellen Förderbedarfs für bestimmte Maßnahmen. Hierzu sind - ausgehend von einem Referenzfall - Sensitivitätsanalysen notwendig, bei denen die relevanten Parameter z.B. bestimmte Kosten schrittweise verändert werden, bis eine geeignete Lösung gefunden ist. Durch einen Vergleich der gefundenen Lösung mit der Referenzlösung lassen sich Maßnahmen zur Beeinflussung des Systems ableiten.

2,8 Mrd. m² sind das knapp 14 %. Auf einen Zeitraum von 30 Jahren verteilt bedeutet dies eine mittlere jährliche Sanierungsrate von etwa 0,5 % des Bestandes.

Das derzeit laufende CO₂-Minderungsprogramm der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) erfaßt während seiner Laufzeit im Jahresmittel rund 0,25 % des Bestandes in den alten Bundesländern (Kleemann et al. 1999). Die Gesamtrate von 0,5 % pro Jahr erscheint deshalb langfristig als zu hoch. Wenn das KfW-Programm im Jahre 2000 ausläuft, dürfte für das Referenz-Szenario eher eine langfristige autonome Sanierungsrate von nur 0,25 % für Deutschland realistisch sein.

Mit dieser Annahme wird bis 2020 eine Wohnfläche von nur rund 200 Mio. m² erfaßt¹⁶. Das ist die Hälfte dessen, was im Modell-Basis-Szenario (ohne Hemmnisse) berechnet wurde. Die zugrunde gelegte Sanierungsrate entspricht einem jährlichen Durchschnitt von 6,7 Mio. m² Wohnfläche oder rund 80 000 Wohnungen. Schätzungen anderer Autoren gehen von nur 50 000 Wohnungen aus. Diese Zahlen erscheinen jedoch als zu gering.

Die unter diesen einschränkenden Überlegungen resultierende Entwicklung des Energieverbrauchs der Haushalte zur Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs im Referenz-Szenario ist in Tabelle 3.4.1-3 dargestellt. Der in diesem Szenario zu erwartende Mehrverbrauch wurde dem Heizöl zugeschlagen, weil der Gasverbrauch im Modell-Basis-Szenario schon an der oberen Grenze liegt.

3.4.1.5 Diskussion der Reduktionsszenarien sowie politische Maßnahmen zu ihrer Realisierung

Die Minderung der CO₂-Emissionen in der gesamten Energiewirtschaft belaufen sich in den beiden Reduktionsszenarien entsprechend der jeweiligen Vorgabe auf 30 % bzw. 40 % im Jahre 2020. Wegen unterschiedlicher sektoraler Reduktionskosten verteilt das Optimierungsmodell die Minderungslasten nicht gleichmäßig auf die Sektoren. So beträgt die CO₂-Sparrate des Haushaltssektors im 30 %-Reduktions-Szenario etwa 30 %,

¹⁶ Die sanierte Wohnfläche wurde mit einer im KfW-Programm ermittelten Einsparung von durchschnittlich 90 kWh/(m²a) berechnet. Dadurch ergeben sich Abweichungen gegenüber den im Modell verwendeten Flächen.

während sie im 40 %-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung auf rund 53 % steigt (Tabellen 3.4.1-4 und 3.4.1-5). Im Falle einer schärferen Klimaschutzpolitik muß der Haushaltssektor also überproportional zur CO₂-Reduktion beitragen.

Tabelle 3.4.1-3

Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der CO₂-Emissionen im Sektor Haushalte (Raumwärme und Warmwasser) im Referenz-Szenario

	1990	1995	2005	2010	2020
	Energieverbrauch in PJ				
	Referenz-Szenario				
Insgesamt	2394	2436	2213	2174	2113
dav.: Heizöl	930	1121	879	835	836
Erdgas	684	839	985	1005	1010
Steinkohle	147	78	48	47	42
Braunkohle	333	100	50	41	25
Biomasse	53	70	66	59	46
Strom	119	112	104	86	56
Fernwärme	128	116	101	100	97
	Abweichungen vom Modell-Basis-Szenario				
Insgesamt			41	60	97
dav. Heizöl			41	60	97
Erdgas			0	0	0
Steinkohle			0	0	0
Braunkohle			0	0	0
Biomasse			0	0	0
Strom			0	0	0
Fernwärme			0	0	0
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t ¹⁾				
Referenz-Szenario	158,1	148,5	129,0	127,0	125,2
Modell-Basis-Szenario	158,1	148,5	125,6	122,6	117,7
Abweichungen des Referenz-Szenarios vom Modell-Basis-Szenario			3,4	4,4	7,6
Abweichungen in den Summen durch Rundungen					
1) Einschließlich geringer Emissionen durch Erdgasinsatz zum Kochen.					

Um die errechneten Einsparungen in den Reduktionsszenarien zu erreichen, sind folgende technische Maßnahmen im Haushaltssektor notwendig:

- weiterer Wechsel von Heizöl zu Erdgas,
- verstärkter Einsatz von Brennwertkesseln und
- forcierte Sanierung der Altbauten.

Für beide Reduktionsszenarien kommen die gleichen Maßnahmen in Frage, wenn auch mit unterschiedlicher Intensität.

Verstärkter Wechsel von Heizöl zu Erdgas

Während Prognos, EWI (1998) im Jahre 2020 einen Erdgasanteil im Haushaltssektor von rund 40 % erwarten, sind es in den Reduktionsszenarien 59 bzw. 61 %. Dieser höhere Anteil kann aufgrund der rasanten Zuwachsraten des Erdgases in den letzten Jahren jedoch durchaus als realistisch angesehen werden. Für den Heizölanteil bedeutet dies aber eine dramatische Verringerung. So werden im 30%-Reduktions-Szenario bis 2020 rund 40 % der 1990 vorhandenen Ölkessel auf Gas umgestellt. Im 40%-Reduktions-Szenario ist die notwendige Umstellungsrate mit 70 % fast doppelt so hoch. Ob ein so starker Rückgang der Ölnutzung allein durch die Marktkräfte zustande kommt, erscheint derzeit als fraglich. Um die höhere Rate der Umstellung in den Reduktionsszenarien zu erreichen, ist u. a. eine weitere Förderung der Gasbrennwerttechnik notwendig.

Verstärkter Einsatz von Brennwertkesseln

Der Einsatz von Gasbrennwertgeräten ist aufgrund der technischen Vorteile, der Umweltfreundlichkeit und der verschiedenen Förderprogramme in den letzten Jahren sehr stark gestiegen. Von 1990 bis 1995 hat der Gasverbrauch dieser Kessel von rund 6 PJ auf fast 50 PJ zugenommen. Dies entspricht einer mittleren Wachstumsrate von 42 % pro Jahr. Im 30%-Reduktions-Szenario werden in den Optimierungsrechnungen bis 2020 rund 290 PJ erwartet und im 40%-Reduktions-Szenario 445 PJ. Im 40%-Reduktions-Szenario bedeutet dies, daß im Jahre 2020 die Hälfte aller Gaskessel Brennwertkessel sein müßten. Diese Anteile sind aus heutiger Sicht erreichbar, wenn die Förderprogramme für diese Technologie fortgeführt werden.

Verstärkte Renovierung der Altbauten

Im 30%-Reduktions-Szenario müssen entsprechend den Optimierungsergebnissen des Modells in Deutschland bis 2020 umgerechnet rund 450 Mio. m² an Altbaufläche energetisch saniert werden. Rechnet man davon die Sanierungen ab, die im Referenz-Szenario für die Jahre von 1990 bis 1999 unterstellt worden sind, dann müssen von 2000 bis 2020 rund 380 Mio. m² saniert werden. Pro Jahr würde dies im Mittel eine sanierte Wohnfläche von 19 Mio. m² bedeuten. Das entspricht etwa dem dreifachen jährlichen Sanierungsvolumen des laufenden KfW-Förderprogramms.

Tabelle 3.4.1-4:

**Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der
CO₂-Emissionen im Sektor Haushalte (Raumwärme und Warmwasser)
im 30%-Reduktionsszenario**

	1990	1995	2005	2010	2020
	Energieverbrauch in PJ 30%-Reduktions-Szenario				
Insgesamt	2394	2436	2162	2109	1990
dav.: Heizöl	930	1121	737	591	536
Erdgas	684	839	1051	1181	1183
Steinkohle	147	78	48	47	42
Braunkohle	333	100	50	41	25
Biomasse	53	70	66	59	46
Strom	119	112	104	86	56
Fernwärme	128	116	106	104	102
	Abweichungen vom Referenz-Szenario				
Insgesamt			-51	-65	-123
dav. Heizöl			-142	-244	-300
Erdgas			86	176	173
Steinkohle			0	0	0
Braunkohle			0	0	0
Biomasse			0	0	0
Strom			0	0	0
Fernwärme			5	4	5
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
30%-Reduktions-Szenario	158,1	148,5	123,6	118,7	112,6
Referenz-Szenario	158,1	148,5	129,0	127,0	125,2
Modell-Basis-Szenario	158,1	148,5	125,6	122,6	117,7
Abweichungen des 30%-Reduktions-Szenarios vom Referenz-Szenario			-5,4	-8,3	-12,6
Abweichungen des 30%-Reduktions-Szenarios vom Modell-Basis-Szenario			-2,0	-3,9	-5,0
Abweichungen in den Summen durch Rundungen					
1) Einschließlich geringer Emissionen durch Erdgaseinsatz zum Kochen.					

Im 40%-Reduktions-Szenario beläuft sich die zusätzlich zu sanierende Fläche auf fast 1 700 Mio. m² oder 60 % des Bestandes. Für den verbleibenden Zeitraum bis 2020 erfordert dies eine jährliche Sanierungsrate von fast 82 Mio. m². Bezogen auf das laufende KfW-Programm ist das eine Verzwölfachung. Im Vergleich zum Bestand von 1990 entspricht dies einer Sanierungsrate von 2,9 % pro Jahr. Legt man für die Gebäudeaußenhülle einen Renovierungszyklus von 40 bis 50 Jahren zugrunde, dann kann im Mittel pro Jahr nur 2,0 bis 2,5 % des Bestandes renoviert werden. Bei einer geforderten Sanie-

rungsrate von 2,9 % müßte ein erheblicher Teil der energetischen Sanierungen außerhalb des Renovierungszyklus stattfinden und wäre dann mit deutlich höheren Kosten verbunden.

Tabelle 3.4.1-5:

Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern und der CO₂-Emissionen im Sektor Haushalte (Raumwärme und Warmwasser) im 40%-Reduktionsszenario

	1990	1995	2005	2010	2020
	Energieverbrauch in PJ 40%-Reduktions-Szenario				
Insgesamt	2394	2436	2017	1853	1484
dav.: Heizöl	930	1121	656	476	294
Erdgas	684	839	1004	1014	907
Steinkohle	147	78	44	41	10
Braunkohle	333	100	38	21	0
Biomasse	53	70	66	106	106
Strom	119	112	104	86	55
Fernwärme	128	116	104	108	112
	Abweichungen vom Referenz-Szenario				
Insgesamt			-196	-321	-629
dav.: Heizöl			-223	-359	-542
Erdgas			39	9	-103
Steinkohle			-4	-6	-32
Braunkohle			-12	-20	-25
Biomasse			0	47	60
Strom			0	0	-1
Fernwärme			3	8	15
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
40%-Reduktions-Szenario	158	149	113	98	72
30%-Reduktions-Szenario	158	149	124	119	113
Referenz-Szenario	158	149	129	127	125
Modell-Basis-Szenario	158	149	126	123	118
Abweichungen des 40%-Reduktions-Szenarios vom Referenz-Szenario			-16	-29	-53
Abweichungen des 40%-Reduktions-Szenarios vom Modell-Basis-Szenario			-13	-25	-46
Abweichungen in den Summen durch Rundungen					
1) Einschließlich geringer Emissionen durch Erdgaseinsatz zum Kochen.					

Einfluß einer Energiesteuer auf die Wirtschaftlichkeit der Dämmung

Auf der Grundlage der in Tabelle 3.4.1-2 genannten Daten werden bei der Berechnung der Energiekosteneinsparungen durch eine Außenwanddämmung Steueraufschläge berücksichtigt. In Anlehnung an die Energie-/CO₂-Steuervorschläge der EU-Kommission wird von Matthes (1999) für leichtes Heizöl für das Jahr 2005 ein Aufschlag von 0,0079 DM/kWh angesetzt. Die damit erreichten höheren Energiekosteneinsparungen sind in der letzten Zeile von Tabelle 3.4.1-6 dargestellt.

Tabelle 3.4.1-6:

Einfluß einer Energiesteuer auf die Energiekosteneinsparung durch Außenwanddämmung

	Einfamilienhaus	Reihen-doppelhaus	Kleines Mehr-familienhaus	Großes Mehr-familienhaus
	spezifische Kosten in DM/(m ² a)			
Jahreskosten ¹⁾	3,0 - 5,5	2,0 - 3,5	2,3 - 3,5	1,8 - 3,5
Jahreskosten ²⁾	6,2 - 11,3	4,1 - 7,2	4,6 - 7,2	3,6 - 7,2
Energiekosteneinsparung, ohne zusätzliche Steuer ³⁾	4,1	2,0	3,6	4,9
Energiekosteneinsparung, mit Steueraufschlag	4,8	2,3	4,2	5,8
1) 40 Jahre, 4 % Verzinsung.- 2) 15 Jahre, 6 % Verzinsung.- 3) Heizölpreis 0,45 DM/Liter (0,045 DM/kWh)				
Quelle: Berechnungen der STE, basierend auf IKARUS-Daten				

Gegenüber der Rechnung ohne Steueraufschlag ergibt sich eine Erhöhung der spezifischen Energiekosteneinsparung um etwa 0,3 DM/(m² a) bei einem Reihendoppelhaus bis zu 0,9 DM/(m² a) bei einem großen Mehrfamilienhaus. Daraus dürften keine grundlegenden Änderungen der Wirtschaftlichkeitsrelationen resultieren. Erst bei deutlich höheren Steueraufschlägen (Verdopplung bis Verdreifachung) würden sich insbesondere die Ergebnisse der Rechnungen über 15 Jahre wesentlich verbessern.

Förderprogramm zur Altbauanierung

Im Rahmen des laufenden KfW-Förderprogrammes zur CO₂-Einsparung im Altbaubereich in den alten Bundesländern wird mit einem Kreditvolumen von 5 Mrd. DM in fünf Jahren rund 28 Mio. m² Wohnfläche saniert. Im Durchschnitt werden mit 1 Mrd. DM an Kreditmitteln rund 7 Mio. m² saniert. Dementsprechend sind für die Reduktionsszenarien

in den nächsten 20 Jahren rein rechnerisch insgesamt zusätzliche Kreditmittel von 3 bzw. 12 Mrd. DM pro Jahr für die Wärmedämmung notwendig (Preisbasis 1998). Ob dieses Kreditvolumen z.B. im 40%-Reduktions-Szenario von den privaten Investoren im Haushaltsbereich überhaupt abgerufen werden, ist derzeit unklar.

Um die berechneten CO₂-Einsparungen zu erreichen und die genannten Hemmnisse zu überwinden, müssen auf jeden Fall Anreize in Form eines Förderprogramms für Wärmeschutzmaßnahmen im Gebäudebestand geschaffen werden. Dies ist die zentrale und wichtigste Maßnahme, um langfristig zu einer wirkungsvollen CO₂-Einsparung im Haushaltssektor zu kommen. Ohne massive Förderprogramme ist das gesetzte Reduktionsziel nicht erreichbar (IWU 1995, DPG 1998). Wie das KfW-Förderprogramm gezeigt hat, werden in der Regel durch die Investitionen im Wärmeschutz weitere Investitionen in der Bauwirtschaft angestoßen, die fast noch einmal den gleichen Betrag ausmachen. Dies dürfte einen erheblichen Impuls auf den Arbeitsmarkt in der Bauwirtschaft auslösen.

3.4.1.6 Literatur

- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 1997. Berlin/Köln 13.8.1998
- DPG (1998): Hake, Groscurth, Kleemann, Schultze, Aktionsprogramm "Klimaschutz im Gebäudebestand", Internes Papier des Arbeitskreises Energie (AKE) der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) Jülich, Aachen
- Esso (1995): Energieprognose, Moderne Heizung - aktiver Klimaschutz, Faltblatt.
- Feist, W. und Knissel, J. (1997): Das Passivhaus in Groß-Umstadt- fast ohne Heizen durch den Winter, Bauphysik 19, Heft 5
- Gruson, C. und Kerschberger, A. (1994): Kostenermittlung für wärmetechnische Maßnahmen an der Gebäudehülle, IKARUS Teilprojekt 5 "Haushalte und Kleinverbraucher", Band 5-10, Forschungszentrum Jülich
- Gülic, T., Kolmetz, S. und Rouvel, L. (1994): Energiesparpotential im Gebäudebestand durch Maßnahmen an der Gebäudehülle, IKARUS Teilprojekt 5 "Haushalte und Kleinverbraucher" Band 5-22, Forschungszentrum Jülich
- Hauser, G., Stiegel, T. und Otto, F. (1997): Energieeinsparung im Gebäudebestand, Bauliche und anlagentechnische Lösungen, Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e. V., Berlin
- Hauser, G. (1998): Grundzüge der zukünftigen Energiesparverordnung, IVPU Nachrichten Nr. 63, Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V., Stuttgart

- IWU (1995): Energieeinsparungen beim Heizwärmebedarf - ein Schlüssel zum Klimaproblem, Hrsg. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt
- KfW (1998): KfW-Programm zur CO₂-Minderung, Informationsblatt, Frankfurt
- Matthes, F. Chr. (1999): Tabellen für Steueraufschläge nach dem EU Vorschlag von 1992, auf einen neuen Zeitplan umgerechnet und dynamisiert
- Prognos, EWI (1998): Trendskeizze. Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Basel/Köln, 1998
- Kleemann, M., Kuckshinrichs, W., Heckler, R. (1999): CO₂-Reduktion und Beschäftigungseffekte durch das CO₂-Minderungsprogramm der KfW, Studie im Auftrag der KfW, Forschungszentrum Jülich, Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung
- Rathert, P. (1995): Wärmeschutzverordnung und Heizungsanlagenverordnung, Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH, Köln
- Stehmeier (1996): Umsetzung des Vollzugs zur Heizungsanlagenverordnung, Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks, Sankt Augustin

3.4.2 Andere elektrische Geräte

3.4.2.1 Vorbemerkungen

Der Einsatz von Heizöl, Gas, Kohle sowie Fernwärme in den privaten Haushalten dient vor allem der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser. Einzig für Strom werden wesentliche Anteile des gesamten Verbrauchs im Haushaltssektor durch andere Nachfragen verursacht. Tabelle 3.4.2-1 zeigt die Entwicklung der Stromabnahme der privaten Haushalte aus dem Netz der öffentlichen Versorgung. Auch wenn berücksichtigt wird, daß Teile der Stromabnahme außerhalb von Heizstrom-Sonderverträgen für die (Teil-) Raumheizung bzw. die Bereitung von warmem Wasser genutzt werden, verbleibt ein wesentlicher Anteil des Stromverbrauchs in den privaten Haushalten für andere Haushaltsgeräte.¹⁷

Tabelle 3.4.2-1:

Stromverbrauch der privaten Haushalte von 1991 bis 1996

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
	Mrd. kWh					
Stromverbrauch gesamt	122,2	122,8	126,1	124,6	127,2	134,2
Alte Bundesländer	105,6	105,9	108,7	108,4	110,7	
Neue Bundesländer	16,6	16,9	17,4	16,2	16,5	
Heizstrom-Sonderabkommen	21,9	20,4	21,0	19,2	20,2	22,4
Alte Bundesländer	20,5	19,3	19,9	18,3	19,1	
Neue Bundesländer	1,4	1,1	1,1	0,9	1,1	

Quelle: BMWi

Im Jahre 1995 wurden in Deutschland rund 54 % des gesamten in den privaten Haushalten verbrauchten Stroms für elektrische Geräte verwendet, die *nicht* der Warmwasserbereitung, dem Kochen oder der Raumheizung dienen. Dabei dürfte der Stromverbrauchsanteil dieser - im folgenden als "Andere Geräte" bezeichneten - Anwendungen in den neuen Bundesländern vor dem Hintergrund der hier wesentlich schwächer vertretenen

¹⁷ Außer für Strom erfolgt neben dem Energieeinsatz für Raumwärme und Warmwasser für die verbleibenden Energieträger ein nennenswerter Einsatz nur noch für Gasherde. Der Gaseinsatz für Kochzwecke bildet jedoch mit einem Anteil von deutlich unter 5% - und derzeit sinkender Tendenz - nur ein relativ kleines Verbrauchssegment.

elektrischen Raumheizung und der wesentlich geringeren Durchdringung elektrischer Herde noch um bis zu 10 Prozentpunkte höher liegen.

Zu den größten Stromverbrauchern unter den gut typisierbaren Stromanwendungen im Bereich der Anderen Geräte gehören Kühl- und Gefriergeräte (zusammen rund 32 %), Beleuchtung (14 %), Waschmaschinen (11 %), Wäschetrockner (5 %), Geschirrspüler sowie TV-Geräte (jeweils 6 %). Weiterhin ist zu beachten, daß viele Geräte heute mit Standby-Vorrichtungen versehen sind, die einen eigenen großen Verbrauchsblock bilden. 1995 summierte sich der Stromverbrauch von Bereitschaftsschaltungen auf 14 Mrd. kWh (UBA 1997). Dabei entfallen allein auf die Gruppe TV, Video, Audio, PC rund 9 Mrd. kWh. Dies entspricht gut 14 % des gesamten Stromverbrauchs für elektrische Geräte im Haushalt. Das Institut für Stadtforschung und Strukturpolitik (IfS 1996) gibt hierfür einen Gesamtstromverbrauch von rund 3,7 Mrd. kWh an. Dies entspricht mit rund 6 % des Stromverbrauchs für elektrische Geräte im Jahre 1995 in etwa dem Verbrauch aller Geschirrspülmaschinen in Deutschland. Im IKARUS-LP-Modell wird der Stromverbrauch in den privaten Haushalten auf vergleichsweise hoher Aggregationsstufe abgebildet. So werden neben dem Block Raumwärme und zentrale Warmwasserbereitung nur noch vier weitere Verbrauchsbereiche unterschieden. Dies sind die dezentrale Warmwasserbereitung (mit stark abnehmender Bedeutung), Kochprozesse, Waschmaschinen und zusammengefaßt der gesamte Restbestand an Haushaltsgeräten.

Die mit dem Optimierungsmodell ermittelten Szenarienergebnisse für den Stromverbrauch der privaten Haushalte bedürfen damit einer detaillierenden Interpretation bzw. ergänzenden Nebenbetrachtungen.

3.4.2.2 Referenz-Szenario für die „Anderen Haushaltsgeräte“

Im Modell-Basis-Szenario zeigen sich für die verschiedenen Anwendungen im Bereich der privaten Haushalte deutlich unterschiedliche Entwicklungen. Während sich der Energieeinsatz für Raumwärme und Warmwassererzeugung erheblich vermindert, bleibt der Energieeinsatz für Kochanwendungen und die Anderen Geräte von 1995 bis 2020 nahezu konstant. Für die Kochherde ergibt sich allerdings eine signifikante Verschiebung von

Gas- zu Elektroherden, die vor allem mit der weiteren Ausbreitung von Zentralheizungsanlagen einhergeht und insofern plausibel ist.

Tabelle 3.4.2-2:

Ergebnisse des Modell-Basis-Szenarios für die privaten Haushalte

	1995	2005	2010	2020
	PJ			
Raumwärme und Warmwasser	2418	2164	2106	2010
Heizöl	1121	838	775	739
Erdgas	821	957	998	1005
Steinkohle	78	48	47	42
Braunkohle	100	50	41	25
Biomasse	70	66	59	46
Strom	112	104	86	56
Fernwärme	116	101	100	97
Kochen	67	66	66	66
Erdgas	18	8	7	5
Strom	49	57	59	61
Andere Geräte - Strom	298	307	306	298

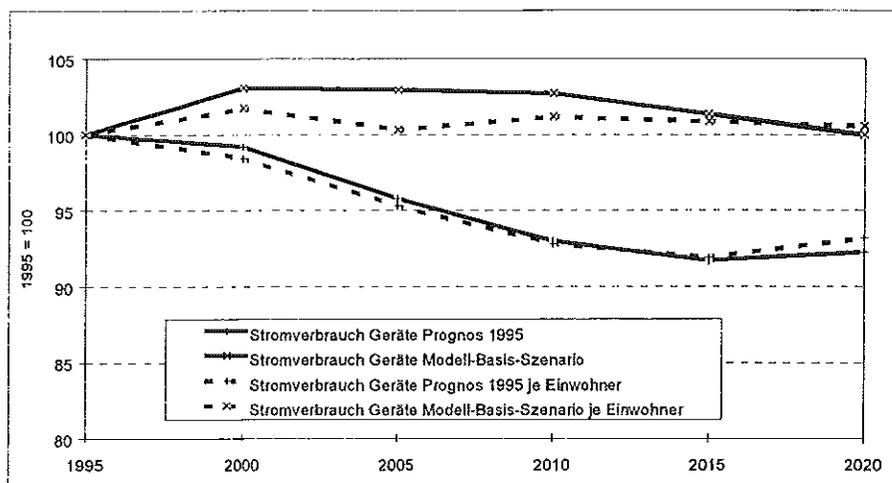
Quelle: Berechnungen mit dem IKARUS-LP-Modell

Zur Einordnung der Ergebnisse des Modell-Basis-Szenarios ist der summarische Verbrauch der Anderen Geräte in Abbildung 3.4.2-1 der prognostisch angelegten Arbeit von Prognos (1995) gegenübergestellt. Während der Strombedarf der Anderen Geräte im Modell-Basis-Szenario im Jahr 2020 nach leichten Steigerungen wieder das Niveau von 1995 erreicht, geht die Prognose von einer relativ stetigen Verbrauchsminderung bis zum Jahr 2015 und einer nachfolgend fast stagnierenden Entwicklung aus. Die Gegenüberstellung der auf die Bevölkerungsentwicklung normierten Entwicklung zeigt weiterhin, daß die deutlichen Differenzen der beiden - sehr unterschiedlichen methodischen Ansätzen folgenden - Projektionen zumindest nicht durch demographische Prozesse erklärt werden können.

Vor diesem Hintergrund - aber auch für die folgenden Analysen zu den entsprechenden politischen Instrumenten - ist die Entwicklung eines eigenen Referenz-Szenarios erforderlich.

Abbildung 3.4.2-1:

Stromverbrauch anderer Geräte im Modell-Basis-Szenario und nach Prognos (1995)



Quellen: Prognos (1995), Berechnungen mit dem IKARUS-LP-Modell, Berechnungen des Öko-Instituts

In einem ersten Schritt wurde hierfür ein prognostisch angelegtes Szenario für die Ausstattungsraten bei den wichtigsten Haushalts-Großgeräten entwickelt, die auf der o.g. Arbeit von Prognos (1995), Vorausschätzungen der VDEW (1993 und 1994) sowie auf eigenen Erhebungen basiert. Tabelle 3.4.2-3 zeigt die erwartete Entwicklung der Ausstattungsraten und des Bestands für die genannten Geräte. Für die neuen Bundesländer wurde hierbei unterstellt, daß die Ausstattungsraten für die betrachteten Elektrogeräte im Jahre 2005 weitgehend identisch mit den alten Bundesländern sein dürften. Lediglich für Wäschetrockner und Geschirrspüler wurde angenommen, daß hier die Angleichung etwas später erfolgt (2010).

Für den Lebensdauerzyklus wurden - je nach Gerätegruppe - Zeiträume von 12 bis 16 Jahren angenommen. Im Zeitraum von 2000 bis 2020 kommt es damit in allen gezeigten Gerätegruppen mindestens zu einem Geräteaustausch bzw. zu einer Neuanschaffung. Die Entwicklung des spezifischen Geräteverbrauchs wurde über ein Stock-Exchange-Modell ermittelt, wobei hinsichtlich der historischen Werte auf Angaben des ZVEI (1992 und 1998) zurückgegriffen wurde. Die Daten zur Altersstruktur des jeweiligen Geräteparks

basieren ebenfalls auf diesen Angaben des ZVEI, für die neuen Bundesländer wurde auch auf Umfragen zur Ausstattung mit langlebigen Gebrauchsgütern im Rahmen der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe 1993 (StBA 1994) zurückgegriffen.

Tabelle 3.4.2-3:

Entwicklung von Ausstattungsraten und Gerätebestand in Deutschland bis 2020

	1995	2000	2005	2010	2015	2020
	Ausstattungsraten in %					
Kühlschrank	82	80	79	77	75	74
Gefriergerät	56	59	63	66	70	73
Kühl-Gefrier-Kombination	27	30	30	33	37	40
Waschmaschine	93	93	93	94	96	97
Wäschetrockner	25	32	39	46	53	59
Geschirrspüler	36	45	53	62	69	76
	Gerätebestand in Mio.					
Kühlschrank	30	30	30	30	29	28
Gefriergerät	21	23	24	26	27	28
Kühl-Gefrier-Kombination	10	11	12	13	14	15
Waschmaschine	34	35	36	36	37	37
Wäschetrockner	9	12	15	18	20	23
Geschirrspüler	13	17	20	24	27	29
	Entwicklung 1995 = 100					
Kühlschrank	100	101	100	99	96	94
Gefriergerät	100	109	116	123	129	135
Kühl-Gefrier-Kombination	100	115	119	132	143	155
Waschmaschine	100	103	104	107	108	109
Wäschetrockner	100	131	158	190	216	241
Geschirrspüler	100	127	151	178	198	219

Quellen: Prognos (1995), VDEW (1993 und 1994), Berechnungen des Öko-Instituts

Die Annahmen zur künftigen Entwicklung des spezifischen Verbrauchs von Neugeräten und der Ausstattungsraten basieren auf den Haushaltskundenbefragungen der VDEW (1992 und 1997) für die Jahre 1971 bis 1996, auf den Auswertungen dieser Befragungen (VDEW 1993 und 1994) sowie auf den Markterhebungen zur Ermittlung besonders sparsamer Haushaltsgeräte (HMUEB 1993, BE 1995, HMUEJFG 1995, NEI 1995). Der Strombedarf von Standby-Einrichtungen wurde mit einem vereinfachten Modell bestimmt. Es wurden lediglich die Gruppe "TV, Video, Audio und PC" betrachtet und keine Differenzierung nach alten und neuen Bundesländern vorgenommen. Zunächst wurde davon ausgegangen, daß die Zahl der Standby-Anwendungen bis zum Jahre 2020 um gut 70 %

steigen wird. Ein durchschnittliches Neugerät verbrauchte 1995 im Standby-Betrieb etwa ein Viertel weniger als der Bestand (UBA 1997). Bis 2020 kann in der Referenzentwicklung der spezifische Strombedarf für Bereitschaftsschaltungen von Neugeräten um gut ein Drittel reduziert werden. Der spezifische Flottenverbrauch reduziert sich deshalb von 1995 bis 2020 auch in der Referenzentwicklung um gut die Hälfte.

Tabelle 3.4.2-4:

Entwicklung des spezifischen sowie des gesamten Stromverbrauchs ausgewählter Haushaltsgeräte in Deutschland im Referenz-Szenario bis 2020

	1995	2000	2005	2010	2015	2020
	Durchschnittsverbrauch in kWh/a					
Kühlschrank	290	253	218	195	177	166
Gefriergerät	384	332	293	246	212	189
Kühl-Gefrier-Kombination	370	347	325	260	224	209
Waschmaschine	200	171	145	124	114	108
Wäschetrockner	315	305	295	280	268	257
Geschirrspüler	306	271	239	206	188	173
Standby-Verbrauch je Gerät	74	60	51	45	40	38
	Gesamtverbrauch Deutschland ¹⁾ in Mrd. kWh					
Deutschland ¹⁾	43,2	42,1	40,1	38,0	36,4	35,9
Alte Bundesländer	27,9	27,3	31,8	24,2	23,3	22,9
Neue Bundesländer	6,4	6,3	25,8	5,7	5,4	5,2

¹⁾ Standby-Verbrauch nicht nach alten und neuen Bundesländern differenziert, nur in der Summe enthalten

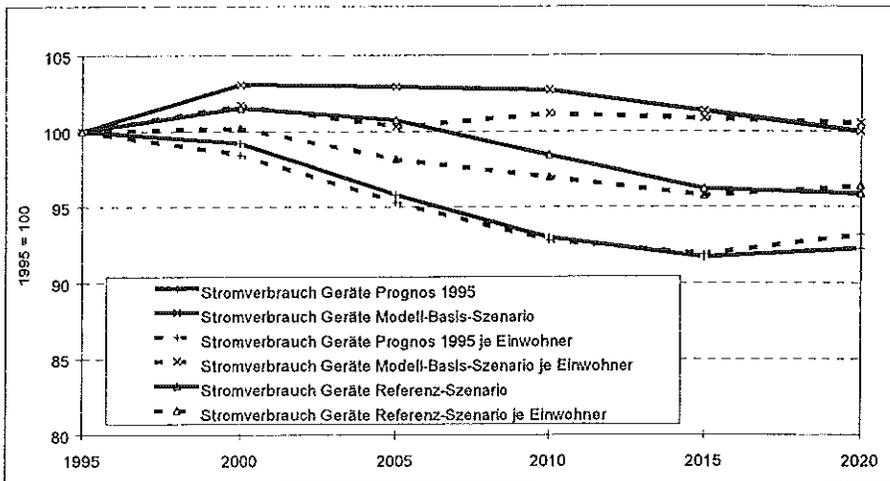
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

Tabelle 3.4.2-4 zeigt die spezifischen Stromverbrauchswerte für die betrachteten Geräte sowie den sich daraus ergebenden Gesamtverbrauch dieser elektrischen Haushaltsanwendungen. Über ein Indizierungsverfahren wurde die Entwicklung des Gesamtstromverbrauchs der ausgewählten Haushalts-Großgeräte auf den Gesamtbedarf der Anderen Elektrogeräte hochgerechnet.

Abbildung 3.4.2-2 verdeutlicht die Einordnung des Referenz-Szenarios. Die in der prognostischen Arbeit (Prognos 1995) unterstellte autonome Effizienzentwicklung erscheint als deutlich zu ambitioniert, während sich die auch ohne weitere politische Eingriffe vollziehende Verbesserung der Energieeffizienz bei den Anderen Haushaltsgeräten im Basislauf des IKARUS-LP-Modells als wesentlich zu gering erweist.

Abbildung 3.4.2-2:

Stromverbrauch von Haushaltsgeräten im Modell-Basis-Szenario und im Referenz-Szenario sowie nach Prognos (1995)



Quellen: Prognos (1995), Berechnungen mit dem IKARUS-LP-Modell, Berechnungen des Öko-Instituts

Schließlich wurde grob die Entwicklung des Energieverbrauchs durch Kochherde geschätzt. So ergibt sich der gesamte Energieverbrauch der privaten Haushalte, der nicht der Raumwärmebereitstellung und der Warmwasserbereitung zuzuordnen ist. Über die spezifischen CO₂-Emissionskennwerte, für die vereinfachend der Brennstoffmix für die Stromerzeugung im Modell-Basis-Szenario zugrunde gelegt wurden, können überschlägig die durch den hier betrachteten Verbrauchsbereich verursachten CO₂-Emissionen abgeschätzt werden (Tabelle 3.4.2-5).

Die erhebliche CO₂-Minderung bis zum Jahr 2020 resultiert aus zwei - sich überlagernden - Tendenzen. Erstens werden die Emissionen durch den verringerten Energiebedarf vermindert, zweitens wirken sich aber die Strukturveränderungen im Kraftwerkssektor in erheblichem Maße emissionsmindernd aus. So ist etwa ein Viertel der gezeigten Emissionsminderung dem verminderten Energieverbrauch zuzurechnen, drei Viertel des Emissionsrückgangs sind bedingt durch den veränderten Mix der Stromerzeugung.

Tabelle 3.4.2-5:

**Stromverbrauch der anderen elektrischen Haushaltsgeräte und des
Energiebedarfs zum Kochen¹⁾ im Referenz-Szenario bis 2020**

	Einheit	1995	2005	2010	2020
Stromverbrauch Elektrogeräte	PJ	346	350	342	332
Differenziert betrachtete Geräte	PJ	156	144	137	129
Restbestand andere Geräte und Elektroherde	PJ	190	205	206	202
Stromverbrauch Elektrogeräte	Mrd. kWh	96,0	97,1	95,1	92,1
Differenziert betrachtete Geräte	Mrd. kWh	43,2	40,1	38,0	35,9
Restbestand andere Geräte und Elektroherde	Mrd. kWh	52,8	57,0	57,1	56,2
Gasverbrauch Gasherde	PJ	12,5	9,3	8,5	6,7
Nachrichtlich: CO ₂ -Emissionen					
Referenz-Szenario	Mio. t	53,7	49,9	48,2	44,3
Basis-Szenario	Mio. t	53,7	51,6	48,8	38,7
Abweichungen des Referenz- Szenarios vom Basis-Szenario	Mio. t		-1,7	-0,6	5,6

¹⁾ Ohne Raumwärme und Warmwasserbereitung

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

Im Unterschied zu anderen Nachfragesektoren, in denen der LP-Optimierungslauf des IKARUS-Modells im Modell-Basis-Szenario die Entwicklung der Energieeffizienz deutlich überschätzen dürfte, liegen die dem hier betrachteten Verbrauchsbereich zuzurechnenden CO₂-Emissionen - vor allem begründet durch die wenig differenzierte Modell-Abbildung - *über* dem aus prognostischer Sicht zu erwartenden Energieverbrauchs- bzw. Emissionsniveau.

3.4.2.3 Diskussion der Reduktionsszenarien sowie die politischen Maßnahmen zu ihrer Realisierung

Investitionsentscheidungen im Bereich der elektrischen Geräte in den privaten Haushalten folgen komplexen Entscheidungskalkülen. So bildet der Energieverbrauch erstens nur eines von vielen Entscheidungskriterien, die insbesondere im Haushaltsbereich besonders breit gefächert sind (Anschaffungspreis, Markenausrichtung, Qualitätserwartungen, Paßfähigkeit zur Einrichtung, Sonderangebote und Verkaufskampagnen etc.). Zweitens ist die Erlangung einer hinreichenden Marktübersicht mit teilweise hohen Transaktionskosten verbunden, gleichzeitig sind hinsichtlich der Qualität und des Umfangs der Fach-

beratung im Handel vor allem in bezug auf die Energieeffizienz im Regelfall eine Vielzahl von Defiziten zu beobachten. Obwohl gerade im Bereich der elektrischen Haushaltsgeräte in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Förderprogrammen vor allem der Energieversorgungsunternehmen durchgeführt wurden, eine ganze Reihe von Informationsangeboten existieren und - ausgehend von der Europäischen Union - sogar eine gesetzliche Kennzeichnungspflicht zum Energieverbrauchsniveau eingeführt wurde, bleibt gerade im Bereich der elektrischen Haushaltsgeräte ein erheblicher Handlungsbedarf zu konstatieren.

Angesichts der erheblichen Hemmnisse im Bereich des Produktabsatzes bietet sich die politische Intervention an einer anderen Stelle des Produktzyklus, auf der Herstellerseite an: Die Zahl der Hersteller ist überschaubar, die Produkte sind gut typisierbar und schließlich existieren eine ganze Reihe von kostengünstigen Möglichkeiten der Effizienzsteigerung.

Als Instrument soll hier eine Elektroanwendungsverordnung für den Haushaltsbereich betrachtet werden, die für Neugeräte Mindeststandards definiert sowie einen bestimmten Höchstverbrauch für Standby-Einrichtungen bzw. entsprechende Sparschaltungen vorschreibt. Alternativ zu einer gesetzlichen Regelung könnten gleichwertige Standardsetzungen über freiwilliger Vereinbarungen mit der herstellenden Industrie bzw. den Geräteimporteuren erfolgen. Dabei ist jedoch darauf hinzuweisen, daß die entsprechenden Regelungen vorzugsweise auf europäischer Ebene durchzusetzen wären.

Als Zielbereich für eine solche normierende Verordnung bzw. eine gleichwertige Vereinbarung ergeben sich vor allem die Gerätegruppen der sogenannten "Weißen Ware" (Kühlgeräte, Waschmaschinen, Wäschetrockner und Geschirrspüler). Angesichts des zukünftig wahrscheinlich stark steigenden Anteils von Geräten mit Standby-Einrichtungen und der ebenfalls guten Typisierbarkeit dieser Ausrüstung wird auch hierfür eine entsprechende Initiative angenommen.

Als Standard für die Verordnung, deren Inkrafttreten für das Jahr 2000 unterstellt werden soll, wurde der Jahresverbrauch des jeweiligen Bestgeräts fünf Jahre zuvor definiert (NEI 1995). Zum Zeitpunkt des Inkrafttretens der Verordnung dürfte dieser Standard

auch in der Trendentwicklung bereits von einer größeren Anzahl Geräte erreicht worden sein, denn bei linearer Fortschreibung ergibt sich aus der historischen Entwicklung eine Effizienzverbesserung von 2 bis 3 % p.a.¹⁸ Weiterhin wird angenommen, daß die Höchstverbrauchsstandards jeweils nach fünf Jahren - also 2005, 2010, 2015 und 2020 - angepaßt werden. Die reduzierten Standards orientieren sich dabei wiederum an den Bestgeräten 5 Jahre zuvor.

Tabelle 3.4.2-6 zeigt die Entwicklung des spezifischen Flottenverbrauchs im Reduktionsszenario sowie die Entwicklung der Höchstverbrauchsstandards entsprechend der hier unterstellten Annahmen. Die Standards sinken demnach innerhalb dieses Zeitraums um gut 40 % bei Gefriergeräten und Kühl-Gefrier-Kombinationen und um etwa 15 % bei Wäschetrocknern.

Tabelle 3.4.2-6

Entwicklung der Höchstverbrauchsstandards sowie des durchschnittlichen Stromverbrauchs ausgewählter Haushaltsgeräte in Deutschland im 40%-Reduktions-Szenario bis 2020

	1995	2000	2005	2010	2015	2020
	Höchstverbrauchsstandard (Neugeräte) in kWh/a					
Kühlschrank	-	182	160	144	132	124
Gefriergerät	-	191	162	140	123	109
Kühl-Gefrier-Kombination	-	227	199	174	153	134
Waschmaschine	-	116	105	97	92	90
Wäschetrockner	-	258	247	236	226	216
Geschirrspüler	-	207	178	157	142	132
Standby-Verbrauch je Gerät	-	27	23	20	18	17
	Durchschnittsverbrauch in kWh/a					
Kühlschrank	290	250	202	168	147	135
Gefriergerät	384	327	269	202	152	134
Kühl-Gefrier-Kombination	370	345	314	228	181	169
Waschmaschine	200	170	139	114	101	95
Wäschetrockner	315	303	283	259	240	231
Geschirrspüler	306	270	230	188	166	149
Standby-Verbrauch je Gerät	74	58	42	30	22	19

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

¹⁸ Von 1978 bis 1991 verringerte sich der spezifische Stromverbrauch für Waschmaschinen um 34 %, für Kühlschränke im Mittel um 30 %, für Gefrierschränke um 35 % sowie für Geschirrspüler um 38 %.

Die hier dargestellte Entwicklung der spezifischen Verbrauchswerte wird als Grundlage für das 40%-Reduktions-Szenario gewählt. Im Ergebnis kann der Stromverbrauch der hier differenziert betrachteten Gerätegruppen in diesem Szenario bis 2020 im Vergleich zum Referenz-Szenario um etwa 24 % reduziert werden (Tabelle 3.4.2-7).

Tabelle 3.4.2-7:

**Entwicklung des gesamten Stromverbrauchs ausgewählter Haushaltsgeräte
in Deutschland im 40%-Reduktions-Szenario bis 2020**

	1995	2000	2005	2010	2015	2020
	Gesamtverbrauch in Mrd. kWh					
Deutschland ¹⁾	43,2	41,5	36,9	31,7	28,1	27,3
Alte Bundesländer	27,9	27,3	25,8	24,2	23,3	22,9
Neue Bundesländer	6,4	6,3	6,1	5,7	5,4	5,2
	Veränderungen in % gegenüber Vorjahr					
Deutschland insgesamt ¹⁾		-1,4	-8,0	-16,6	-22,8	-24,0
Kühlschrank	-	-1,0	-7,2	-11,8	-16,5	-18,5
Gefriergerät	-	-1,5	-8,5	-13,9	-16,8	-29,3
Kühl-Gefrier-Kombination	-	-0,5	-3,4	-18,1	-28,5	-19,3
Waschmaschine	-	-0,6	-3,8	-12,4	-19,3	-11,6
Wäschetrockner	-	-0,8	-4,1	-8,0	-11,1	-10,4
Geschirrspüler	-	-0,6	-3,9	-7,6	-10,5	-14,0
Standby-Verbrauch je Gerät	-	-3,0	-17,6	-33,5	-46,7	-48,8
¹⁾ Standby-Verbrauch nicht nach alten und neuen Bundesländern differenziert, nur in der Summe enthalten						

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

Der Stromverbrauch der privaten Haushalte für die betrachteten Gerätegruppen könnte durch die Einführung einer Elektroanwendungsverordnung oder gleichwertiger Vereinbarungen im Jahr 2020 um über 8 Mrd. kWh gesenkt werden. Unter den Geräten der "Weißen Ware" fällt die Reduktionswirkung dieses Instruments am stärksten bei den Kühlgeräten aus (zusammen rund -23%), während die Wirkung bei Wäschetrocknern unterdurchschnittlich ausfällt (-10%). Der Standby-Stromverbrauch von Bestgeräten liegt 1995 um gut die Hälfte unter dem Marktdurchschnitt. Wird der Standby-Höchstverbrauchsstandard für die Gruppe "TV, Video, Audio und PC" ähnlich wie bei der weißen Ware entsprechend dem Bestgerät 5 Jahre zuvor festgelegt, so reduziert sich der Standby-Stromverbrauch im Jahre 2020 im Minderungs-Szenario um gut 3,8 auf insgesamt 4 Mrd. kWh (-49%). Die Regelung zeigt damit die größten Minderungswirkungen in Bezug auf den Standby-Verbrauch zeigt. Der Grund hierfür ist vor allem im

schnellen Zuwachs der Stromanwendungen mit Standby-Einrichtungen und den erheblichen spezifischen Einsparpotentialen zu suchen, wogegen sich für die meisten Geräte der "Weißen Ware" deutliche Sättigungstendenzen zeigen.

Der Strom- bzw. Gasverbrauch für die verbleibenden Geräte sowie die Kochherde wurde gegenüber dem Referenz-Szenario konstant gehalten.¹⁹ In der Summe ergibt sich damit die in Tabelle 3.4.2-8 zusammengefaßte Entwicklung des Strom- und Erdgasverbrauchs für diejenigen Haushaltsgeräte, die nicht der Raumwärmebereitstellung bzw. der Warmwassererzeugung dienen. Für die in dieser Tabelle ebenfalls ausgewiesenen Werte für ein 30%-Reduktions-Szenario wurde vereinfachend angenommen, daß die besonders verbrauchsgünstigen Elektrogeräte eine etwas schwächere Marktdurchdringung erfahren als im 40%-Reduktions-Szenario. Danach könnten die CO₂-Emissionen durch die beschriebenen Standardsetzungen bei den Elektrogeräten bis zum Jahr 2020 gegenüber dem Referenz-Szenario im 30%-Reduktions-Szenario größenordnungsmäßig um knapp 3 Mio. t und im 40%-Reduktions-Szenario um gut 4 Mio. t vermindert werden.²⁰

3.4.2.4 Fazit

Aufgrund der spezifischen Hemmnisstrukturen im Bereich der elektrischen Haushaltsgeräte erscheint die Erschließung von Effizienzpotentialen durch Regelungen bzw. Vereinbarungen zu Höchstverbrauchsstandards für die wichtigsten Haushaltsgeräte als ein besonders wirksames und effizientes politisches Instrumentarium. Obwohl, wie bereits in der Vergangenheit, auch bei den Haushaltsgeräten ein erhebliches Maß an autonomer Effizienzverbesserung zu erwarten ist, könnten mit einer solchen Regelung Stromeinsparungen in erheblichem Maße erschlossen werden. Bemerkenswert ist dabei vor allem, daß Höchstverbrauchsstandards sich besonders im Bereich der Standby-Anwendungen als ein äußerst wirksames Instrument zur Erschließung großer Stromsparerpotentiale erweisen. Die Einspareffekte der Höchstverbrauchsstandards belaufen sich bis zum Jahr

¹⁹ In diesem Kontext ist darauf hinzuweisen, daß auch bei den verbleibenden Geräten nicht unerhebliche Effizienz- bzw. Substitutionspotentiale existieren, deren instrumentelle Erschließung an dieser Stelle jedoch nicht behandelt werden konnte.

²⁰ Für die Schätzung der - im Stromsektor entstehenden - CO₂-Emissionen sind vereinfachend die spezifischen CO₂-Emissionen des Referenz-Szenarios unterstellt worden.

2020 im 40 %-Reduktions-Szenario – gegenüber dem Referenz-Szenario - allein für Kühl- und Gefrierschränke, Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspüler sowie Standby-Einrichtungen auf rund 8 Mrd. kWh oder überschlägig 4 Mio. t CO₂.

Tabelle 3.4.2-8:

Gesamter Energiebedarf der Geräte (ohne Raumwärme und Warmwasserbereitung, aber einschließlich Kochherde) in den Reduktionsszenarien bis 2020

	Einheit	1995	2005	2010	2020
40%-Reduktions-Szenario					
Stromverbrauch Elektrogeräte	PJ	346	338	320	301
Differenziert betrachtete Geräte	PJ	156	133	114	98
Restbestand andere Geräte und Elektroherde	PJ	190	205	206	202
Stromverbrauch Elektrogeräte	Mrd. kWh	96,0	93,9	88,8	83,5
Differenziert betrachtete Geräte	Mrd. kWh	43,2	36,9	31,7	27,3
Restbestand andere Geräte und Elektroherde	Mrd. kWh	52,8	57,0	57,1	56,2
Gasverbrauch Gasherde	PJ	12,5	9,3	8,5	6,7
Abweichungen vom Referenz-Szenario					
Stromverbrauch Elektrogeräte	Mrd. kWh		-3,2	-6,3	-8,6
Gasverbrauch Gasherde	PJ		0,0	0,0	0,0
30%-Reduktions-Szenario					
Stromverbrauch Elektrogeräte	PJ	346	343	329	313
Differenziert betrachtete Geräte	PJ	155,5	137,8	123,1	110,3
Restbestand andere Geräte und Elektroherde	PJ	190,0	205,2	205,7	202,5
Stromverbrauch Elektrogeräte	Mrd. kWh	96,0	95,3	91,3	86,9
Differenziert betrachtete Geräte	Mrd. kWh	43,2	38,3	34,2	30,6
Restbestand andere Geräte und Elektroherde	Mrd. kWh	52,8	57,0	57,1	56,2
Gasverbrauch Gasherde	PJ	12,5	9,3	8,5	6,7
Abweichungen vom Referenz-Szenario					
Stromverbrauch Elektrogeräte	Mrd. kWh		-1,8	-3,8	-5,3
Gasverbrauch Gasherde	PJ		0,0	0,0	0,0
Nachrichtlich: CO ₂ -Emissionen					
40%-Reduktions-Szenario	Mio. t	53,7	48,3	45,0	40,2
30%-Reduktions-Szenario	Mio. t	53,7	48,5	45,8	41,4
Referenz-Szenario	Mio. t	53,7	49,9	48,2	44,3
Modell-Basis-Szenario	Mio. t	53,7	51,6	48,8	38,7
Abweichungen des 40%-Reduktions-Szenarios vom Referenz-Szenario	Mio. t		-1,6	-3,2	-4,1
Abweichungen des 30%-Reduktions-Szenarios vom Referenz-Szenario	Mio. t		-1,4	-2,4	-2,9

3.4.2.5 Literatur

- BE (Berliner Energieagentur GmbH) (1995): Gefriergeräte auf dem Prüfstand. Berlin
- HMUEB (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten) (1993): Besonders sparsame Hausgeräte - Auswertung der Domotechnika 1993. Erarbeitet von Dipl. Pol. Klaus Michael, Wiesbaden
- HMUEJFG (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familien und Gesundheit) (1995): Besonders sparsame Hausgeräte 1995/96 - Eine Verbraucherinformation - Energiesparinformationen 16. Wiesbaden
- IfS (Institut für Stadtforschung und Strukturpolitik) (1996): Perspektiven eines Umweltzeichens für Elektro- und Elektronikgeräte im Haushalt, UBA-Texte 42/96, Berlin
- NEI (Niedrig-Energie-Institut) (1995): Besonders sparsame Haushaltsgeräte 1995, Detmold
- Prognos (1995): Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa - Perspektiven bis zum Jahr 2020. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft, Basel
- StBA (Statistisches Bundesamt) (1994): Wirtschaftsrechnungen - Einkommens- und Verbrauchsstichprobe 1993 - Langlebige Gebrauchsgüter privater Haushalte. Fachserie 15, Heft 1, Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart
- UBA (Umweltbundesamt) (1997): UBA-Texte 45/97, Leerlaufverluste bei Elektrogeräten. Berlin.
- VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V.) (1992): Haushaltskundenbefragung 1991 für die Bundesrepublik Deutschland (11 Länder). Frankfurt/Main
- VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V.) (1993): Analyse und Prognose des Stromverbrauchs der privaten Haushalte 1970 - 1990 - 2005 - 2010 - Auswertungsbericht alte Bundesländer - Herbst 1992. Frankfurt/Main
- VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V.) (1994): Analyse und Prognose des Stromverbrauchs der privaten Haushalte 1990 - 2010 - Auswertungsbericht neue Bundesländer - Juni 1992. Frankfurt/Main
- VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V.) (1997): Haushaltskundenbefragung 1996 - Auswertungsbericht. Frankfurt/Main
- ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.) (1992): Entwicklung des Stromverbrauchs von Elektro-Hausgeräten - Energieeinsparung 1988-1991. Frankfurt
- ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.) (1998): Entwicklung des Stromverbrauchs von Elektro-Hausgeräten / Energiebericht 1994.

3.5 Verkehr

3.5.1 Vorbemerkungen

Der verkehrsbedingte Energieverbrauch erhöhte sich in Deutschland von 1990 bis 1997 um 11 %; er nahm damit stärker als der gesamte Endenergieverbrauch zu, so daß sein Anteil von rund 25 % (1990) auf knapp 28 % (1997) stieg. Allerdings hat sich die starke Expansion von 1993 an erheblich abgeschwächt; seither ist der verkehrsbedingte Energieverbrauch kaum noch gewachsen (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 1998).

Etwa parallel zum Energieverbrauch haben sich die verkehrsbedingten CO₂-Emissionen entwickelt. Nach Angaben des Umweltbundesamtes und Berechnungen des DIW waren die verkehrsbedingten CO₂-Emissionen im Jahre 1997 mit gut 173 Mio. t um reichlich 9 % höher als 1990. An den gesamten energiebedingten Emissionen war der Verkehr im Jahre 1997 mit rund 20 % beteiligt; 1990 waren es erst rund 16 %. Innerhalb des Verkehrssektors ist der Straßenverkehr der mit weitem Abstand bedeutendste Energieverbraucher und CO₂-Emittent: Von den gesamten verkehrsbedingten CO₂-Emissionen entfielen auf den Straßenverkehr 1997 gut 95 % (DIW 1999).²¹

Bei der Bewertung der IKARUS-Szenarien zur künftigen Entwicklung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen im Verkehr ist zu berücksichtigen, daß das Verkehrsmodul innerhalb des Optimierungsmodells eine vergleichsweise geringe Flexibilität aufweist. Dies liegt nicht zuletzt daran, daß das Modell nach volkswirtschaftlichen Kriterien entscheidet, welche Techniken "in Lösung gehen". Dabei werden aber Steuern, Subventionen u.ä. nicht berücksichtigt. Auf den Verkehrssektor bezogen heißt dies, daß hier nicht - wie in der Realität - die Verbraucherpreise für die Kraftstoffe zum Tragen kommen, sondern lediglich die im Modell endogen ermittelten Kraftstoffkosten, in denen die Mineralölsteuer eben nicht enthalten ist. Gegenüber diesen - sehr viel niedrigeren - Kosten können sich aber Techniken, wie die im Modell prinzipiell vorgesehenen Sparautos, aufgrund der dabei angenommenen (hohen) Mehrkosten wirtschaftlich kaum oder nur

²¹ Es sei hier nur darauf aufmerksam gemacht, daß es zwischen den im Rahmen der nationalen Emissionsberichterstattung verwendeten CO₂-Daten und den im IKARUS-Modell enthaltenen Angaben aufgrund von divergierenden Abgrenzungen einige Abweichungen gibt (vgl. dazu auch den Anhang).

schwer durchsetzen. Eher wählt das Modell Einspartechniken in anderen Sektoren, die im Vergleich zum Verkehr ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen. Im übrigen scheidet das Modell die Möglichkeit aus, zugunsten von Treibstoffeinsparungen (und damit der Emissionsminderung) von Fahrzeugen mit einer höheren Hubraumklasse (mit höherem spezifischen Kraftstoffbedarf) auf solche mit einer niedrigeren Hubraumklasse (mit niedrigerem spezifischen Kraftstoffbedarf) zu wechseln. Beide Gründe schränken somit die Flexibilität des Modells wesentlich ein.

Als bedarfsbestimmende Größen werden im Modell die Verkehrsleistungen angesehen, und zwar differenziert nach Personen- und Güterverkehr (jeweils Nah- und Fernverkehr) einerseits und innerhalb dieser beiden Gruppen nach den Verkehrsmitteln Pkw, Lkw, Busse, Bahnen, Flugzeuge und Binnenschiffe andererseits. Dabei bleiben die Verkehrsleistungen dieser Verkehrsmittel in allen Szenarien unverändert; der Modal Split wird also als konstant angesehen (vgl. oben Tabelle 2-7).

Lediglich innerhalb eines Verkehrsträgers kann unter diesen Voraussetzungen das Modell zwischen Fahrzeugtypen mit jeweils unterschiedlichem spezifischen Energieverbrauch und unterschiedlicher Energieträgerbasis "wählen". Insofern werden die Ergebnisse ausschließlich von der jeweiligen Fahrzeugstruktur bestimmt.

Die für die einzelnen Fahrzeugtypen für sämtliche Szenarien gleichermaßen angenommenen spezifischen Energieverbrauchsmengen sind den Tabelle 3.5-1 (Personenverkehr) und 3.5-2 (Güterverkehr) zu entnehmen.

Tabelle 3.5-1:

**Annahmen zur Entwicklung der spezifischen Energieverbrauchswerte
nach Verkehrsmitteln im Personenverkehr**

	1995	2005	2010	2020	2005	2010	2020
	PJ/Mrd. Pkm				Pkw-Benzin (konventionell) = 100		
Personennahverkehr							
Pkw-Ethanol	-	2,256	2,141	1,911	102	102	102
Pkw-Benzin (konventionell)	2,424	2,208	2,096	1,871	100	100	100
Pkw-Benzin (Sparversion)	-	1,502	1,381	1,140	68	66	61
Pkw-Diesel (konventionell)	2,016	1,863	1,777	1,606	84	85	86
Pkw-Diesel (Sparversion)	-	1,381	1,250	0,988	63	60	53
Pkw-elektrisch	-	0,723	0,723	0,723	33	34	39
Pkw-CNG	-	2,410	2,270	2,010	109	108	107
Pkw-LPG	-	2,210	2,100	1,870	100	100	100
Pkw-Biodiesel	-	1,863	1,777	1,606	84	85	86
Bus-Diesel (konventionell)	1,694	1,584	1,553	1,491	72	74	80
Bus-CNG	-	1,778	1,742	1,673	81	83	89
Bus-LPG	-	1,667	1,633	1,568	75	78	84
Bus-Biodiesel	-	1,231	1,206	1,159	56	58	62
Bahn-Diesel	1,795	1,526	1,496	1,436	69	71	77
Bahn-elektrisch	0,752	0,703	0,689	0,662	32	33	35
Bahn-elektrisch (Sparversion)	-	0,650	0,650	0,650	29	31	35
Pkw-Brennstoffzelle	-	0,900	0,810	0,750	41	39	40
Personenfernverkehr							
Pkw-Ethanol	-	1,643	1,559	1,392	102	102	102
Pkw-Benzin (konventionell)	1,782	1,608	1,526	1,363	100	100	100
Pkw-Benzin (Sparversion)	-	1,144	1,053	0,869	71	69	64
Pkw-Diesel (konventionell)	1,584	1,451	1,385	1,251	90	91	92
Pkw-Diesel (Sparversion)	-	1,053	0,953	0,753	65	62	55
Pkw-CNG	-	1,754	1,657	1,462	109	109	107
Pkw-LPG	-	1,643	1,559	1,392	102	102	102
Pkw-Biodiesel	-	1,451	1,385	1,251	90	91	92
Bus-Diesel (konventionell)	0,551	0,534	0,523	0,502	33	34	37
Bus-Diesel (Sparversion)	-	0,422	0,413	0,397	26	27	29
Bus-CNG	-	0,560	0,549	0,527	35	36	39
Bus-LPG	-	0,529	0,519	0,498	33	34	37
Bus-Biodiesel	-	0,422	0,413	0,397	26	27	29
Bahn-Diesel	1,159	1,074	1,052	1,011	67	69	74
Bahn-elektrisch	0,608	0,594	0,582	0,559	37	38	41
Bahn-elektrisch (Sparversion)	-	0,523	0,513	0,493	33	34	36
Flugzeug-konventionell	7,390	6,757	6,487	5,978	420	425	439
Flugzeug-Sparversion	-	6,113	5,868	5,408	380	385	397

Tabelle 3.5-2:

**Annahmen zur Entwicklung der spezifischen Energieverbrauchswerte
nach Verkehrsmitteln im Güterverkehr**

	1995	2005	2010	2020	2005	2010	2020
	PJ/Mrd. tkm				Lkw-Diesel (konventionell) = 100		
Güternahverkehr							
Lkw-Benzin (konventionell)	2,638	2,579	2,476	2,282	83	83	83
Lkw-Benzin (Sparversion)	-	2,064	1,981	1,826	67	67	67
Lkw-Diesel (konventionell)	3,303	3,098	2,974	2,741	100	100	100
Lkw-Diesel (Sparversion)	-	2,480	2,381	2,194	80	80	80
Lkw-CNG	-	3,300	3,168	2,920	107	107	107
Lkw-LPG	-	2,695	2,587	2,384	87	87	87
Lkw-Biodiesel	-	2,480	2,381	2,194	80	80	80
Güterfernverkehr							
Lkw-Diesel (konventionell)	1,539	1,663	1,596	1,471	100	100	100
Lkw-Diesel (Sparversion)	-	1,464	1,405	1,295	88	88	88
Lkw-CNG	-	1,615	1,550	1,429	97	97	97
Lkw-Biodiesel	-	1,467	1,408	1,298	88	88	88
Bahn-Diesel	0,399	0,330	0,323	0,310	20	20	21
Bahn-elektrisch	0,176	0,146	0,143	0,140	9	9	10
Bahn-elektrisch (Sparversion)	-	0,140	0,137	0,134	8	9	9
Flugzeug-konventionell	77,000	74,000	71,040	65,470	4451	4451	4451
Flugzeug-Sparversion	-	52,000	49,920	46,010	3128	3128	3128
Binnenschiff	1,014	0,530	0,519	0,499	32	33	34

3.5.2 Referenz-Szenario für den Sektor Verkehr

Zusammen mit den Annahmen über die nach Verkehrsmitteln strukturierten Verkehrsleistungen errechnen sich die in Tabelle 3.5-3 nach Verkehrsträgern, Energieträgern sowie direkten CO₂-Emissionen zusammengefaßten Ergebnisse für das Modell-Basis-Szenario, das - wie unten erläutert - zugleich als Referenz-Szenario aufgefaßt werden soll.

Tabelle 3.5-3:

Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr nach Energieträgern und Verkehrsträgern sowie der direkten CO₂-Emissionen im Referenz-Szenario

	1990	1995	2005	2010	2020
	Energieverbrauch in PJ				
	Referenz-Szenario				
Insgesamt	2052	2332	2616	2631	2583
dav.: Benzin	1283	1236	1360	1385	1400
Diesel	695	1011	1129	1108	1021
Kerosin	29	41	62	71	85
LPG	0	0	5	5	12
Strom	45	45	61	62	65
dav.: Straßenverkehr ¹⁾	1873	2152	2426	2439	2384
Eisenbahn	82	66	75	72	73
Luftverkehr	29	41	62	71	85
Schifffahrt	68	74	54	49	41
	Referenz-Szenario = Modell-Basis-Szenario				
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
Referenz-Szenario = Modell-Basis-Szenario	145,0	166,2	185,7	186,7	183,0
Abweichungen in den Summen durch Rundungen.					
1) Pkw, Busse und Lkw.					

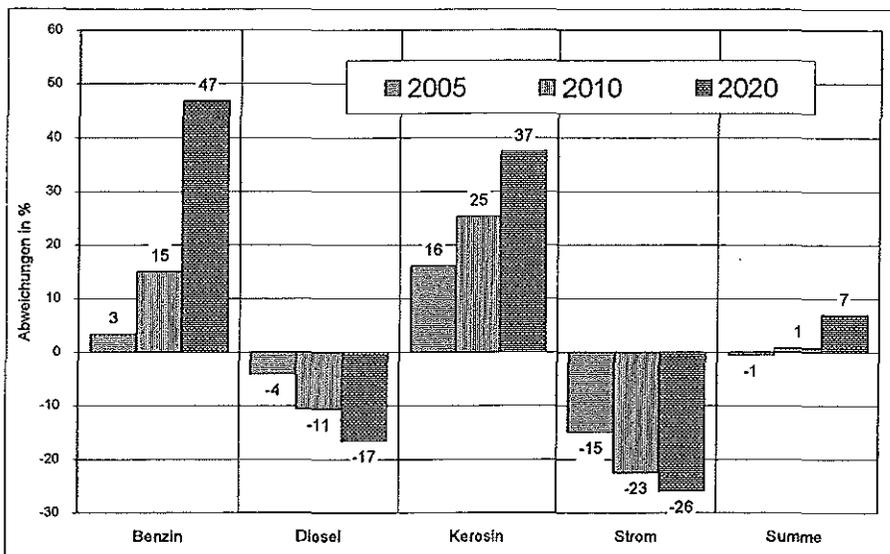
Im Modell-Basis-Szenario ist danach der verkehrsbedingte Energieverbrauch im Jahre 2020 um 26 % höher als 1990 (+11 % gegenüber 1995). Dabei würde aber der Verbrauchshöhepunkt im Jahre 2010 überschritten; danach kommt es zu einem leichten Rückgang. Mit einem Zuwachs von beinahe 80 % expandiert der Energieverbrauch im Güterverkehr innerhalb der Periode von 1990 bis 2020 besonders stark. Dagegen fällt der Verbrauchsanstieg im Personenverkehr mit 10 % (1990 bis 2020) vergleichsweise schwach aus; hier wird das Verbrauchsmaximum bereits im Jahre 2005 erreicht sein. Unter den Verkehrsträgern wird nach wie vor der Straßenverkehr mit Verbrauchsanteilen von über 90 % dominieren. Die größte Expansion weist zwar der Luftverkehr auf, doch spielt dessen Treibstoffverbrauch unter mengenmäßigen Aspekten für die gesamten verkehrsbedingten CO₂-Emissionen im Inland keine wesentliche Rolle.

Vergleicht man die Ergebnisse des Modell-Basis-Szenarios mit der von Prognos, EWI vorgelegten Trendskeizze, so zeigt sich im Niveau bis zum Jahre 2010 mit Abweichungen von lediglich +/-1 % eine vergleichsweise gute Übereinstimmung. Allerdings ist der ver-

kehrbedingte Energieverbrauch im Modell-Basis-Szenario im Jahre 2020 um rund 7 % höher als bei Prognos, EWI. Erhebliche Diskrepanzen zeigen sich darüber hinaus bei den einzelnen Energieträgern (Abbildung 3.5-1). So fallen im Modell-Basis-Szenario der Benzin- wie der Kerosinverbrauch bei weitem höher, der Dieseldienststoff- und der Stromverbrauch aber umgekehrt wesentlich niedriger aus als bei Prognos, EWI.

Abbildung 3.5-1:

Abweichungen des Energieverbrauchs im Verkehr im Modell-Basis-Szenario von demjenigen in der Prognos, EWI-Trendskizze



Gravierende Unterschiede zeigen sich auch im Vergleich zur aktuellen ESSO-Prognose (ESSO 1998) hinsichtlich der Entwicklung des Benzin- und Dieseldienststoffverbrauchs im Straßenverkehr. Während ESSO bis 2020 gegenüber 1995 einen Rückgang um reichlich 20 % erwartet, kommt es im Modell-Basis-Szenario zu einer Erhöhung um 10 %. Zugleich werden auch die Tendenzen mit Blick auf die Veränderungen des Benzinverbrauchs einerseits und des Dieseldienststoffverbrauchs andererseits verschiedenartig eingeschätzt: Nach ESSO geht der Benzinverbrauch bis 2020 um immerhin ein Drittel, der Dieseldienststoffverbrauch aber nur um 4 % zurück; das Modell-Basis-Szenario führt zu einem im Jahre 2020 noch um 13 % höheren Benzin- und zu einem um 6 % höheren Dieseldienststoffverbrauch.

Im Hinblick auf die Formulierung eines an prognostischen Erwartungen ausgerichteten Referenzszenarios wäre vor dem Hintergrund dieses Vergleichs mit der Prognos/EWI-Trendskizze und der zitierten ESSO-Prognose der verkehrsbedingte Energieverbrauch im Unterschied zu den meisten anderen Endenergiesektoren eher nach unten als nach oben zu revidieren. Dann aber würde man sich sehr schnell auf den mit den beiden Reduktionsszenarien beschriebenen Pfaden bewegen. Aus systematischen Gründen und vereinfachend wird daher hier das Referenz-Szenario dem Modell-Basis-Szenario gleichgesetzt.

Mit Blick auf die modellseitig ermittelten CO₂-Emissionen bedeutet dies einen Anstieg von rund 145 Mio. t im Jahr 1990 um 41 Mio. t CO₂ (28 %) auf 186 Mio. t im Jahr 2005. Erst nach 2010 werden sich nach diesen Rechnungen die Emissionen rückläufig entwickeln; das Emissionsniveau wird aber im Jahr 2020 noch immer um rund ein Viertel höher sein als 1990.

3.5.3 Diskussion der Reduktionsszenarien sowie die politischen Maßnahmen zu ihrer Realisierung

Bei einer Bewertung der Reduktionsszenarien fällt insbesondere die Tatsache auf, daß die Ergebnisse des 30%-Reduktions-Szenarios wie die des 40%-Reduktions-Szenarios bis 2005 praktisch identisch mit denjenigen für das Modell-Basis-Szenario sind und in den Jahren 2010 und 2020 nur unwesentlich niedriger ausfallen (Abbildungen 3.5-2 und 3.5-3 sowie Tabellen 3.5-4 und 3.5-5).

Selbst im Jahre 2020 und im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung betragen die Abweichungen beim gesamten verkehrsbedingten Energieverbrauch gegenüber dem Modell-Basis-Szenario maximal 2 %, und die CO₂-Emissionen fallen mit 3,2 Mio. t (30%-Reduktions-Szenario) bzw. 6 Mio. t (40%-Reduktions-Szenario) ebenfalls sehr bescheiden aus.

Abbildung 3.5-2:

Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr in den Szenarien

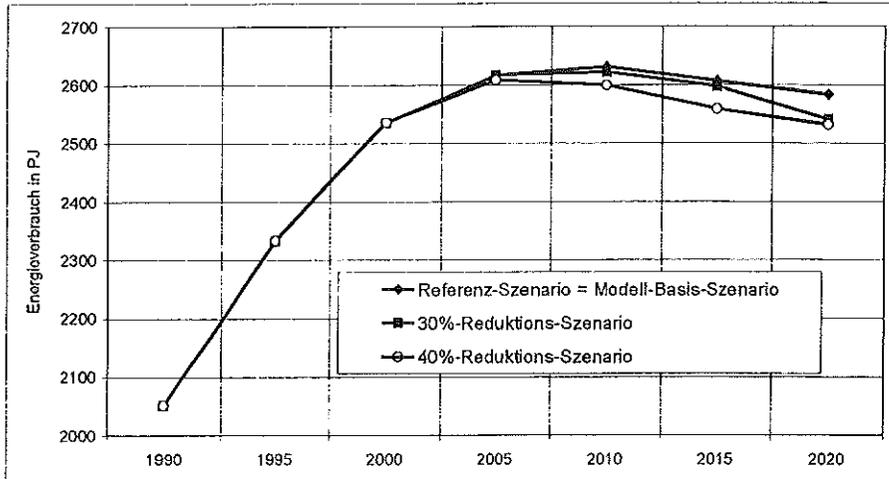


Abbildung 3.5-3:

Abweichungen des Energieverbrauchs im Verkehr in den Reduktionsszenarien vom Modell-Basis-Szenario

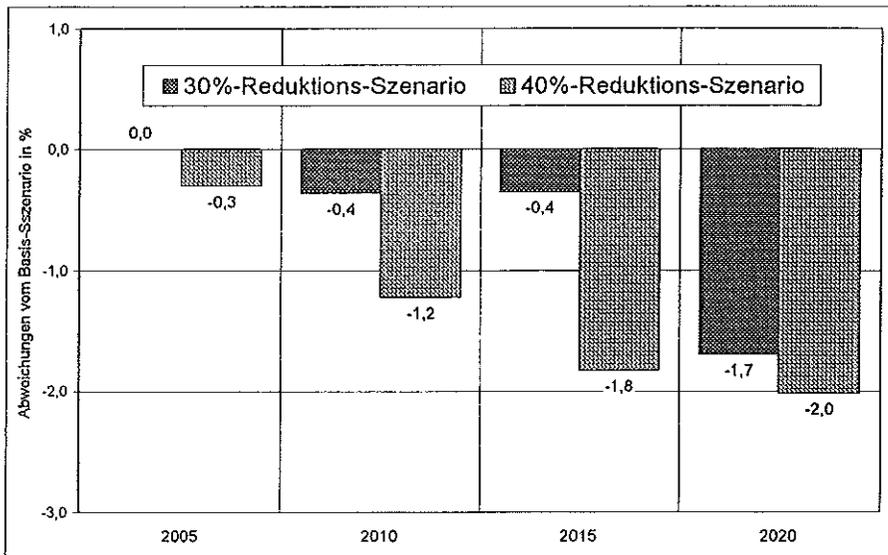


Tabelle 3.5-4:

**Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr nach Energieträgern
und Verkehrsträgern sowie der direkten CO₂-Emissionen
im 30%-Reduktions-Szenario**

	1990	1995	2005	2010	2020
	Energieverbrauch in PJ				
	30%-Reduktions-Szenario				
Insgesamt	2052	2332	2616	2621	2539
dav.: Benzin	1283	1236	1360	1385	1342
Diesel	695	1011	1130	1100	1012
Kerosin	29	41	62	71	85
LPG	0	0	4	4	12
Methanol	0	0	0	0	23
Strom	45	45	61	62	65
dav.: Straßenverkehr ¹⁾	1873	2152	2426	2429	2340
Eisenbahn	82	66	75	72	73
Luftverkehr	29	41	62	71	85
Schifffahrt	68	74	54	49	41
	Abweichungen vom Referenz-Szenario				
Insgesamt			0	-10	-44
dav.: Benzin			0	0	-58
Diesel			1	-8	-9
Kerosin			0	0	0
LPG			-1	-1	0
Methanol			0	0	23
Strom			0	0	0
dav.: Straßenverkehr ¹⁾			0	-10	-44
Eisenbahn			0	0	0
Luftverkehr			0	0	0
Schifffahrt			0	0	0
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
30%-Reduktions-Szenario	145,0	166,2	185,7	186,1	179,8
Referenz-Szenario = Modell-Basis-Szenario	145,0	166,2	185,7	186,7	183,0
Abweichungen des 30%- Reduktions-Szenarios vom Referenz-Szenario = Modell- Basis-Szenario	0,0	0,0	0,0	-0,7	-3,2
Abweichungen in den Summen durch Rundungen.					
1) Pkw, Busse und Lkw.					

Tabelle 3.5-5:

**Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr nach Energieträgern
und Verkehrsträgern sowie der direkten CO₂-Emissionen
im 40%-Reduktions-Szenario**

	1990	1995	2005	2010	2020
	Energieverbrauch in PJ				
	40%-Reduktions-Szenario				
Insgesamt	2052	2332	2608	2599	2531
dav.: Benzin	1283	1236	1346	1360	1231
Diesel	695	1011	1129	1092	1005
Kerosin	29	41	62	71	85
LPG	0	0	5	5	107
Rapsöl	0	0	0	0	10
Methanol	0	0	5	10	27
Strom	45	45	61	62	65
dav.: Straßenverkehr ¹⁾	1873	2152	2418	2407	2332
Eisenbahn	82	66	75	72	73
Luftverkehr	29	41	62	71	85
Schifffahrt	68	74	54	49	41
	Abweichungen vom Referenz-Szenario				
Insgesamt			-8	-32	-52
dav.: Benzin			-13	-25	-169
Diesel			0	-17	-16
Kerosin			0	0	0
LPG			0	0	95
Rapsöl			0	0	10
Methanol			5	10	27
Strom			0	0	0
dav.: Straßenverkehr ¹⁾			-8	-32	-52
Eisenbahn			0	0	0
Luftverkehr			0	0	0
Schifffahrt			0	0	0
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
40%-Reduktions-Szenario	145,0	166,2	185,1	184,4	177,0
30%-Reduktions-Szenario	145,0	166,2	185,7	186,1	179,8
Referenz-Szenario = Modell-Basis-Szenario	145,0	166,2	185,7	186,7	183,0
Abweichungen des 40%- Reduktions-Szenarios vom Referenz-Szenario = Modell- Basis-Szenario	0,0	0,0	-0,6	-2,4	-6,0
Abweichungen in den Summen durch Rundungen.					
1) Pkw, Busse und Lkw.					

Vor diesem Hintergrund könnte noch nicht einmal das 40%-Reduktions-Szenario als prognostisches Referenz-Szenario bezeichnet werden. Dies verdeutlicht nur die Problematik der Abbildung des Verkehrssektors innerhalb des IKARUS-Modells.

Folgt man der Philosophie des hier verfolgten Vorhabens, so dürfte der Verkehrssektor angesichts der Ergebnisse für die beiden Reduktionsszenarien nicht zu jenen Bereichen gerechnet werden, in denen durch politische Maßnahmen die Ausschöpfung hoher und ökonomisch besonders vorteilhafter Emissionsminderungspotentiale induziert werden könnte. Die Nutzung der sehr geringen (und ohnehin eher im prognostischen Unsicherheitsbereich liegenden) Emissionsminderungspotentiale in den Reduktionsszenarien ließe sich vermutlich schon bei Fortführung der im Vorgängervorhaben ("Politikscenario I") vorgeschlagenen politischen Maßnahmen der "leichten Hand" (z.B. "allgemeine Schulung in mehr Energieeffizienz") erreichen.

In diesem Zusammenhang sei auch daran erinnert, daß im Vorhaben Politikscenario I zwischen den dort untersuchten Szenarien die folgenden, durch politische Maßnahmen induzierten, CO₂-Emissionsminderungen geschätzt worden waren:

Reduktion im "Mit-Maßnahmen-Szenario" gegenüber dem "Ohne-Maßnahmen-Szenario"	12	Mio. t CO ₂
Reduktion im "Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario" gegenüber dem "Mit-Maßnahmen-Szenario"		
• Variante a)	40	Mio. t CO ₂
• (bevorzugte) Variante b)	30	Mio. t CO ₂

Demnach wurde bereits für das Jahr 2005 die Möglichkeit von Emissionsminderungspotentialen in einer Größenordnung von 30 bis 40 Mio. t CO₂ gesehen. Auch unter Berücksichtigung der damaligen Überlegungen kann kaum ein Zweifel daran bestehen, daß es in der Realität einen weitaus größeren Spielraum auch zur Minderung der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen gibt, als er durch die vorwiegend auf volkswirtschaftliche Aspekte abstellenden IKARUS-Modellrechnungen ausgewiesen wird. Hierauf soll im folgenden unter Rückgriff auf die im IKARUS-Modell verwendeten Daten beispielhaft eingegangen werden.

3.5.4 Ein 40%-Reduktions-Szenario als gezielte Strategie zur Minderung der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen

Wesentliche Stellgrößen für die Bestimmung der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen im Rahmen des IKARUS-Modells sind der Modal Split zwischen den Verkehrsträgern sowie die jeweilige Fahrzeugstruktur (z.B. Pkw, Lkw, Bahnen, Flugzeuge), die sich jeweils hinsichtlich ihres spezifischen Energiebedarfs unterscheidet. Verläßt man unter Beibehaltung der für die Modell-Szenarien unterstellten gesamten Personen- und Güterverkehrsleistung die Annahme eines für alle Szenarien unveränderten Modal Split und modifiziert zugleich die Verteilung innerhalb der einzelnen Verkehrsträger zugunsten der eher energiesparenden Fahrzeugtypen bei ansonsten aber jeweils gleichen spezifischen Energieverbrauchsmengen, so ergeben sich schon bei relativ moderaten Änderungen deutliche Abweichungen gegenüber den Resultaten nach den beiden IKARUS-gestützten Reduktionsszenarien. In den Tabellen 3.5-6 und 3.5-7 sind die für diese Variante zum 40%-Reduktions-Szenario getroffenen Annahmen und in Tabelle 3.5-8 die daraus resultierenden Ergebnisse zusammengefaßt.

Tabelle 3.5-6:

Variante zum Modal Split gegenüber den Modell-Szenarien

	Standardszenarien			Variante		
	2005	2010	2020	2005	2010	2020
Struktur in %						
Personen-Nahverkehr						
Pkw	86	86	87	85	80	75
Busse	8	8	8	8	11	14
Bahnen	6	6	5	7	9	11
Summe	100	100	100	100	100	100
Personen-Fernverkehr						
Pkw	82	83	85	81	79	77
Busse	6	6	5	6	7	7
Bahnen	10	9	7	11	12	14
Luftverkehr	2	2	3	2	2	2
Summe	100	100	100	100	100	100
Güter-Nahverkehr						
Lkw	100	100	100	100	100	100
Güter-Fernverkehr						
Lkw	52	53	55	50	49	45
Bahnen	25	28	31	27	30	35
Luftverkehr	0,009	0,010	0,008	0,009	0,010	0,008
Schifffahrt	23	19	13	23	21	20
Summe	100	100	100	100	100	100

Tabelle 3.5-7:

**Variante zur Struktur der Verkehrsleistungen nach Fahrzeugtypen
im 40%-Reduktions-Szenario**

	40%-Reduktions-Szenario			Variante		
	2005	2010	2020	2005	2010	2020
Struktur der Verkehrsleistungen in %						
Personennahverkehr						
Pkw-Benzin (konventionell)	80	83	75	74	63	29
Pkw-Benzin (Sparversion)	0	0	0	5	10	25
Pkw-Diesel (konventionell)	19	15	7	16	14	5
Pkw-Diesel (Sparversion)	0	0	0	4	8	20
Pkw-LPG	0	0	11	0	0	11
Pkw-Brennstoffzelle	1	2	7	1	5	10
Summe Personenkraftwagen	100	100	100	100	100	100
Bus-Diesel (konventionell)	97	97	89	97	97	90
Bus-LPG	3	3	0	3	3	0
Bus-Biodiesel	0	0	10	0	0	10
Summe Busse	100	100	100	100	100	100
Bahn-Diesel	6	4	2	6	4	2
Bahn-elektrisch	94	96	98	94	94	93
Bahn-elektrisch (Sparversion)	0	0	0	0	2	5
Summe Bahnen	100	100	100	100	100	100
Personenfernverkehr						
Pkw-Benzin (konventionell)	78	81	86	67	60	32
Pkw-Benzin (Sparversion)	0	0	0	10	15	40
Pkw-Diesel (konventionell)	22	19	14	20	17	8
Pkw-Diesel (Sparversion)	0	0	0	3	8	20
Summe Personenkraftwagen	100	100	100	100	100	100
Bus-Diesel (konventionell)	84	84	22	79	76	7
Bus-Diesel (Sparversion)	0	0	0	5	8	15
Bus-LPG	16	16	39	16	16	39
Bus-Biodiesel	0	0	39	0	0	39
Summe Busse	100	100	100	100	100	100
Bahn-Diesel	8	6	11	8	6	5
Bahn-elektrisch	92	94	89	92	94	95
Bahn-elektrisch (Sparversion)	0	0	0	0	0	0
Summe Bahnen	100	100	100	100	100	100
Flugzeug-konventionell	100	100	100	100	98	90
Flugzeug-Sparversion	0	0	0	0	2	10
Summe Flugzeug	100	100	100	100	100	100
Güternahverkehr						
Lkw-Diesel (konventionell)	100	100	100	95	75	50
Lkw-Diesel (Sparversion)	0	0	0	5	25	50
Gesamt = Summe LKW	100	100	100	100	100	100
Güterfernverkehr						
Lkw-Diesel (konventionell)	100	68	28	95	65	25
Lkw-Diesel (Sparversion)	0	32	72	5	35	75
Summe Lkw	100	100	100	100	100	100
Bahn-Diesel	16	12	5	16	12	5
Bahn-elektrisch	63	55	47	63	53	40
Bahn-elektrisch (Sparversion)	20	33	47	20	35	55
Summe Bahnen	100	100	100	100	100	100
Flugzeug-konventionell	100	100	100	95	90	80
Flugzeug-Sparversion	0	0	0	5	10	20
Summe Luftverkehr	100	100	100	100	100	100
Binnenschiff	100	100	100	100	100	100

Demnach wird unterstellt, daß die Anteile des motorisierten Individualverkehrs (hier nur Pkw) an der Personenverkehrsleistung im Jahre 2020 im Nahverkehr "nur" 75 % statt 87 % und im Fernverkehr 77 % statt 85 % betragen; die Anteile der Busse wie der Bahnen nehmen entsprechend zu. Im Güterfernverkehr (im Nahverkehr nur Lkw) soll sich der Modal Split gegenüber den "Standardszenarien" zugunsten der Bahn (2020: 35 % statt 31 %) sowie der Binnenschifffahrt (2020: 20 % statt 13 %) verändern.

Gleichzeitig wird angenommen, daß innerhalb der jeweiligen verkehrsträgerspezifischen Fahrzeugstruktur die sog. Fahrzeug-Sparversionen, die im 40%-Reduktions-Szenario mit wenigen Ausnahmen (im Güterfernverkehr) keine Rolle spielen, bis zum Jahre 2020 wesentlich stärker zum Zuge kommen. So könnten dann im Personennahverkehr (Personenfernverkehr) die Sparversionen der Benzin-Pkw mit 25 % (40 %) und diejenigen der Diesel-Pkw mit 20 % (20 %) - statt jeweils mit 0 % - an der Verkehrsleistung beteiligt sein. Anders als für den Güterfernverkehr, für den nur unwesentliche Änderungen vorgenommen werden, wird für den Güternahverkehr unterstellt, daß die Verkehrsleistungen im Jahre 2020 jeweils zur Hälfte auf konventionelle Lkw und auf die Lkw-Sparversionen entfallen, während im 40%-Reduktions-Szenario ausschließlich konventionelle Diesel-Lkw in Lösung gehen.

Die Effekte dieser gegenüber dem 40%-Reduktions-Szenario modifizierten Annahmen sind beträchtlich. So würde der gesamte verkehrsbedingte Energieverbrauch im Jahr 2020 um rund ein Fünftel niedriger sein als im 40%-Reduktions-Szenario; beim Personenverkehr wären es 23 % und beim Güterverkehr 11 % weniger. Die stärkste Verringerung ist beim Straßen- und Luftverkehr zu verzeichnen, während der Energieverbrauch der Bahnen und der Schifffahrt noch zulegen würde. Der Benzin- und der Kerosinverbrauch würden besonders stark zurückgehen. Höher als im 40%-Reduktions-Szenario wären dagegen der Verbrauch von Dieselmotorkraftstoff und Strom sowie - wenn auch auf sehr geringem Niveau - von Methanol und Rapsöl. Wie in allen anderen Szenarien dominieren weiterhin die Mineralölprodukte mit Anteilen von deutlich über 90 %. Anders als in den übrigen Szenarien könnte es auf dem hier skizzierten Wege aber gelingen, den Energieverbrauch im Verkehr nach einem zunächst noch deutlichen Anstieg bis 2005 bis zum Jahre 2020 wieder etwa auf das Niveau im Jahre 1990 zu senken.

Tabelle 3.5-8:

**Energieverbrauch in der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario
nach Verkehrs- und Energieträgern**

	40%-Reduktions-Szenario			Variante zum 40%-Reduktions-Szenario			Variante versus 40%-Reduktions-Szenario		
	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020
	Energieverbrauch in PJ						Abweichungen in %		
	Personenverkehr insgesamt								
Personenkraftwagen	1644	1606	1496	1573	1381	1026	-4	-14	-31
Busse	87	86	79	87	115	133	-1	34	68
Bahnen	55	50	45	63	73	87	14	47	94
Luftverkehr	59	67	82	64	64	65	8	-5	-21
Insgesamt	1846	1809	1702	1786	1634	1310	-3	-10	-23
	Güterverkehr insgesamt								
Lastkraftwagen	686	715	756	669	664	641	-2	-7	-15
Bahnen	20	22	28	21	24	31	6	9	11
Luftverkehr	3	4	3	3	3	3	-1	-3	-6
Schifffahrt	54	49	41	54	54	61	0	11	49
Insgesamt	763	790	829	747	746	736	-2	-5	-11
	Verkehr insgesamt nach Verkehrsträgern								
Straßenverkehr ¹⁾	2418	2407	2332	2329	2160	1800	-4	-10	-23
Eisenbahn	75	72	73	84	98	118	12	35	62
Luftverkehr	62	71	85	67	68	68	8	-5	-21
Schifffahrt	54	49	41	54	54	61	0	11	49
Insgesamt	2608	2599	2531	2533	2380	2047	-3	-8	-19
	Verkehr insgesamt nach Energieträgern								
Benzin	1346	1360	1231	1275	1082	683	-5	-20	-45
Diesel	1129	1092	1005	1113	1121	1045	-1	3	4
Kerosin	62	71	85	67	68	68	8	-5	-21
LPG	5	5	107	5	6	95	-3	26	-11
Rapsöl	0	0	10	0	0	15			51
Methanol	5	10	27	5	18	32	-1	88	18
Strom	61	62	65	69	85	109	12	37	69
Gesamt	2608	2599	2531	2533	2380	2047	-3	-8	-19

1) Pkw, Busse und Lkw.

Mit einer solchen Entwicklung ließen sich auch die verkehrsbedingten CO₂-Emissionen größenordnungsmäßig wieder auf das Ausgangsniveau von rund 140 Mio. t im Jahre 1990 zurückführen.²² Im Vergleich zu dem 40%-Reduktions-Szenario könnten die CO₂-Emissionen unter den für die Variantenrechnung getroffenen Annahmen im Jahre 2020 um rund 38 Mio. t (-22 %) niedriger sein; 2005 wären es allerdings erst 6 Mio. t (-3 %) und 2010 rund 17 Mio. t CO₂ (-9 %) weniger. Den größten Beitrag zur Emissionsminderung würde der Personenverkehr mit 31 Mio. t (2020) leisten (Tabelle 3.5-9). Gegenüber

²² Ein wenig wird der Emissionsminderungseffekt dadurch überzeichnet, daß aufgrund des steigenden Anteils der Bahnen mit Elektrotraktion an der Verkehrsleistung auch die mit der Stromerzeugung verbundenen Emissionen zunehmen.

dem Modell-Basis-Szenario könnten die CO₂-Emissionen im Jahre 2020 sogar um 44 Mio. t geringer ausfallen (Tabelle 3.5-10).

Nach den Ergebnissen der ESSO-Prognose unterschreiten die CO₂-Emissionen im Jahre 2020 das Emissionsniveau des Jahres 1990 aber immer noch weitaus stärker als dies selbst in der hier skizzierten Variantenrechnung der Fall ist (Abbildung 3.5-4).

Tabelle 3.5-9:

Verkehrsbedingte CO₂-Emissionen in der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario nach Verkehrs- und Energieträgern

	40%-Reduktions-Szenario			Variante zum 40%-Reduktions-Szenario			Variante versus 40%-Reduktions-Szenario		
	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020
	direkte CO ₂ -Emissionen in Mio. t						Abweichungen in Mio. t CO ₂		
Verkehr insgesamt nach Personen- und Güterverkehr									
Personenverkehr	130	127	118	125	113	86	-5	-14	-31
Güterverkehr	55	57	59	54	54	52	-1	-3	-7
Verkehr Insgesamt	185	184	177	180	167	139	-6	-17	-38
Verkehr insgesamt nach Energieträgern									
Benzin	97	98	89	92	78	49	-5	-20	-39
Diesel	84	81	74	82	83	77	-1	2	3
Kerosin	5	5	6	5	5	5	0	0	-1
LPG	0	0	6	0	0	5	0	0	-1
Rapsöl	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Methanol	0	1	2	0	1	2	0	1	0
Gesamt	185	184	177	180	167	139	-6	-17	-38

Abbildung 3.5-4:

Verkehrsbedingte CO₂-Emissionen in den Modell-Szenarien und in der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario

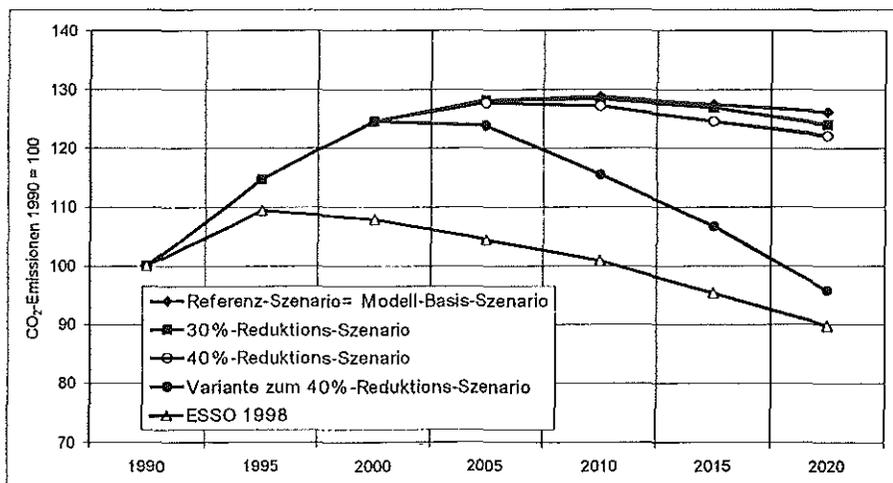


Tabelle 3.5-10:

**Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr nach Energieträgern
und Verkehrsträgern sowie der direkten CO₂-Emissionen
in der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario**

	1990	1995	2005	2010	2020
	Energieverbrauch in PJ				
	Variante zum 40%-Reduktions-Szenario				
Insgesamt	2052	2332	2533	2380	2047
dav.: Benzin	1283	1236	1275	1082	683
Diesel	695	1011	1113	1121	1045
Kerosin	29	41	67	68	68
LPG	0	0	5	6	95
Rapsöl	0	0	0	0	15
Methanol	0	0	5	18	32
Strom	45	45	69	85	109
dav.: Straßenverkehr ¹⁾	1873	2152	2329	2160	1800
Eisenbahn	82	66	84	98	118
Luftverkehr	29	41	67	68	68
Schifffahrt	68	74	54	54	61
	Abweichungen der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario vom Referenz-Szenario				
Insgesamt			-83	-251	-536
dav.: Benzin			-85	-303	-717
Diesel			-16	13	24
Kerosin			5	-3	-18
LPG			0	1	83
Rapsöl			0	0	15
Methanol			5	18	32
Strom			8	23	45
dav.: Straßenverkehr ¹⁾			-97	-278	-584
Eisenbahn			9	25	45
Luftverkehr			5	-3	-18
Schifffahrt			0	5	20
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
Variante zum 40%-Reduktions-Szenario	145,0	166,2	179,6	167,3	138,8
40%-Reduktions-Szenario	145,0	166,2	185,1	184,4	177,0
30%-Reduktions-Szenario	145,0	166,2	185,7	186,1	179,8
Referenz-Szenario = Modell-Basis-Szenario	145,0	166,2	185,7	186,7	183,0
Abweichungen des 40%- Reduktions-Szenarios vom Referenz-Szenario = Modell- Basis-Szenario	0,0	0,0	-6,1	-19,4	-44,2
Abweichungen in den Summen durch Rundungen.					
1) Pkw, Busse und Lkw.					

Unabhängig davon, ob die von ESSO erwartete Entwicklung nicht ohnehin eintreten könnte, ist zu fragen, mit welchen politischen Maßnahmen die hier genannten Veränderungen in der Variante zu dem im IKARUS-Modell abgebildeten 40%-Reduktions-Szenario umgesetzt werden könnten.

Zur Umsetzung der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario gilt es grundsätzlich, die energieeffizienteren öffentlichen (Massen-)Verkehrsmittel und die energiesparenderen Fahrzeugtypen attraktiver zu machen. Hierzu steht ein Bündel von Instrumenten zur Verfügung (Ziesing et al. 1997). Eine Kombination von ordnungsrechtlichen Maßnahmen (Kraftstoffverbrauchsgrenzwerte, Richtwerte für CO₂-Emissionen, Höchstgeschwindigkeiten auf Bundesautobahnen und Außerortsstraßen), ökonomischen Anreizen (fühlbare Besteuerung der Kraftstoffe, fahrleistungsabhängige Straßenbenutzungsgebühren) sowie Maßnahmen der Beratung und Schulung wird als besonders wirksam eingeschätzt. Diese könnten im Jahr 2005 die folgenden Emissionsminderungen bewirken:

Maßnahme	CO ₂ -Min- derung in Mio. t
Anhebung EU-Mindestsätze bei Mineralölsteuer; Ziel: 2,- DM/l für VK/DK	5,0
Alternativ: Steuererhöhung auf Kraftstoffpreis von 3,- DM/l VK/DK (in Summe nicht berücksichtigt)	23,0
Richtwerte für CO ₂ -Emissionen bei neuen Kfz	7,0
Telematik	1,0
Senkung der Höchstgeschwindigkeiten auf BAB/AO-Straßen (80/120 km/h)	8,0
Kraftstoffverbrauchsgrenzwerte	11,3
Fahrleistungsabhängige Straßenverkehrsgebühren	15,0
Allgemeine Schulung in mehr Energieeffizienz	11,0
Gewichtete Summe der vorgenannten Einzelmaßnahmen	40,0
Maßnahmen-Alternative (Maßnahmen-Bündel)	
Maßnahmenbündel Personenverkehr	25,0
Maßnahmenbündel Güterverkehr	5,0
Summe Maßnahmenbündel	30,0

Danach könnten bis zum Jahr 2005 die verkehrsbedingten CO₂-Emissionen um immerhin 30 bis 40 Mio. t reduziert werden. Da die Wirkungen derartiger Maßnahmen weit über das Jahr 2005 hinausreichen dürften, ist damit zu rechnen, daß die in der Variante zum

40%-Reduktions-Szenario ermittelte Emissionsminderung bei Umsetzung eines solchen Instrumentenmixes bis 2020 realisiert werden kann.

Einige Reaktionsmöglichkeiten der Verkehrsteilnehmer sind im übrigen weder in den IKARUS-Modellszenarien noch in der hier vorgenommenen Variantenrechnung berücksichtigt worden: So ist die gesamte Personen- und Güterverkehrsleistung in allen Szenarien gleich. Nicht auszuschließen ist aber, daß beispielsweise im Personennahverkehr durch die skizzierte Maßnahmenkombination auch auf die Verkehrsteilnehmer in der Weise eingewirkt wird, daß sie ihre Mobilitätsbedürfnisse weniger mit Hilfe des motorisierten Verkehrs, sondern durch Fußwege oder verstärkten Fahrradverkehr befriedigen. Außerdem sollte nicht unterschätzt werden, daß die Verkehrsteilnehmer bei einer Klimaschutzpolitik, die die notwendigerweise eingriffsintensiven Maßnahmen zur Realisierung eines 40%-Reduktions-Szenarios tatsächlich ergreifen müßte, auch in erheblichem Umfang auf (energiesparendere) Fahrzeuge unterer Hubraumklassen zurückgreifen würden.

Sofern sich im Verkehrssektor eine Entwicklung induzierten ließe, die hier größenordnungsmäßig mit der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario beschrieben worden ist, könnten die Anforderungen zur Minderung der CO₂-Emissionen in den anderen Sektoren entsprechend vermindert werden. Aus einer Zusatzrechnung mit dem IKARUS-Modell, bei der die wesentlichen Eckdaten der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario dem Modell exogen vorgegeben wurden, ergab sich, daß in erster Linie die Umwandlungssektoren und die Haushalte von den absoluten "Entlastungen" profitieren. Relativ würden aber die Haushalte sowie die Kleinverbraucher am meisten entlastet; dagegen fallen die Wirkungen auf die Industrie vergleichsweise bescheiden aus (Tabelle 3.5-11).

Diesen Entlastungswirkungen, die sich bei den anderen Sektoren nicht nur hinsichtlich Energieverbrauch und CO₂-Minderung, sondern auch mit Blick auf die mit der Emissionsreduktion verbundenen Kosten ergeben, stehen aber unter den für das IKARUS-Modell getroffenen Annahmen nicht nur für den Verkehrssektor selbst sondern auch für das gesamte Energiesystem erhebliche zusätzliche Kosten gegenüber (Tabelle 3.5-12).

Im Vergleich zum 40%-Reduktions-Szenario würden im Jahre 2005 insgesamt um knapp 10 Mrd. DM und 2020 um rund 38 Mrd. DM höhere Gesamtkosten entstehen. Diese

zusätzlichen Kosten sind allerdings ausschließlich auf die Mehrkosten im Verkehrssektor zurückzuführen, wo sie in der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario im Jahre 2020 mehr als 50 Mrd. DM ausmachen würden. Dagegen kommt es in allen anderen Sektoren zu Kostenentlastungen, deren Höhe jedoch begrenzt bleibt. Absolut sind die Kostenentlastungen noch am höchsten im Primärsektor (-5,4 Mrd. DM im Jahre 2020) und bei den Haushalten (5,2 Mrd. DM); relativ fallen sie am stärksten bei den Kleinverbrauchern und bei den Haushalten ins Gewicht. Insoweit würde die zusätzliche CO₂-Emissionsminderung im Verkehrssektor bei der hier angesprochenen Variantenrechnung insgesamt durch erheblich höhere Emissionsvermeidungskosten erkauft.

Tabelle 3.5-11:

Auswirkungen der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario im Verkehr auf die Veränderungen der CO₂-Emissionen in den anderen Sektoren

	2005	2010	2020	2005	2010	2020
	Veränderungen gegenüber dem 40%-Reduktions-Szenario					
	in Mio. t CO ₂			in %		
Verkehr	-9	-20	-39	-5	-11	-22
Industrie	1	1	4	0	1	4
Kleinverbrauch	0	2	6	0	3	13
Haushalt	3	9	14	3	10	19
Umwandlung	5	8	15	2	3	8
Summe	0	0	0	0	0	0

Tabelle 3.5-12:

Auswirkungen der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario im Verkehr auf die Kosten der CO₂-Emissionen im Verkehr und in den anderen Sektoren

	2005	2010	2020
	Veränderungen gegenüber dem 40%-Reduktions-Szenario		
	in Mrd. DM		
Primärsektor	-0,9	-2,1	-5,4
Umwandlungssektor	0,5	0,3	-1,0
Industrie	0,0	-0,1	-0,9
Verkehr	11,2	24,9	52,2
Haushalt	-1,0	-2,2	-5,2
Kleinverbraucher	0,0	0,0	-1,5
Summe	9,9	20,7	38,2

Zur Bewertung dieser Ergebnisse sei aber an die eingangs erwähnten Gründe für die Inflexibilität des Verkehrsmoduls im Rahmen des IKARUS-Modells erinnert. Hinzu kommt, daß die im Modell unterstellten Investitionsmehrkosten für Sparfahrzeuge im Vergleich zu der jeweiligen konventionellen Fahrzeugversion offenkundig sehr (zu?) hoch angesetzt sind. In diesem Zusammenhang ist auch nochmals darauf zu verweisen, daß sich im IKARUS-Modell der Ersatz eines konventionellen Fahrzeugs durch eine Sparversion grundsätzlich immer auf ein Fahrzeug derselben Größen- und Ausstattungs-klasse bezieht. Der Wechsel von einem großen, leistungsstarken Personenkraftwagen auf ein kleineres und zugleich deutlich energiesparsamerer Fahrzeug ist aber unter den Bedingungen einer starken CO₂-Restriktion und den dazu flankierenden politischen Maßnahmen eine vermutlich viel attraktivere Ausweichstrategie. Dies würde dann aber auch bedeuten, daß die hier beispielhaft skizzierte Variante zum 40%-Reduktions-Szenario in der Realität nicht zwangsläufig teurer sein müßte als das Reduktions-Szenario selbst.

3.5.5 Literatur

- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (1998): Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 1997. Berlin, Köln 13.8.1998
- DIW (1999): CO₂-Emissionen in Deutschland: Weiterhin vom Zielpfad entfernt. Von H.-J. Ziesing. In: DIW-Wochenbericht 6/99
- Prognos, EWI (1998): Trendskeizze. Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Basel, Köln 1998
- Ziesing, H.-J. et al. (1997): Politiksznarien für den Klimaschutz. Band 1: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005. Reihe Umwelt Band 5, Forschungszentrum Jülich 1997

3.6 Erneuerbare Energien

3.6.1 Vorbemerkung

Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen trägt bisher nur in geringem Maße zur Energieversorgung in Deutschland bei. Nach Angaben der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen betrug ihr Anteil am Primärenergieverbrauch (nach der sogenannten Wirkungsgradmethode) im Jahre 1995 knapp 2 %. Hierbei handelt es sich im wesentlichen um Wasserkraft, Müll und sonstige Biomasse. Dagegen werden neuere Systeme z.B. zur direkten Nutzung von Sonnenenergie - vor allem aufgrund der relativ hohen Kosten - hierzulande noch wenig eingesetzt.

Das Bild einer Referenzentwicklung der künftigen Nutzung erneuerbarer Energien weicht aus unterschiedlichen Gründen von der Entwicklung ab, die mit dem Optimierungsmodell im Modell-Basis-Szenario ermittelt wurde. Das Modell bildet das Energiesystem vereinfachend – und ausschließlich unter Kostenaspekten - ab. Insoweit wird im Modell-Basis-Szenario der Beitrag erneuerbarer Energien zur Ressourcenschonung und zur Umweltentlastung auch nicht berücksichtigt. Dies ist aber für Betreiber solcher Anlagen ein wesentliches Motiv. Außerdem werden staatliche Maßnahmen zur finanziellen Förderung erneuerbarer Energien ebenfalls nicht explizit in die Modellrechnungen einbezogen. Um dennoch realistische Modellergebnisse zu erhalten, werden deshalb dem Modell für eine Reihe von Techniken bestimmte Mindestmengen für die Nutzung erneuerbarer Energien exogen vorgegeben. Solche Untergrenzen werden allerdings mit Blick auf den notwendigen Optimierungsspielraum des Modells in der Regel niedriger angesetzt als die unter Status-Quo-Bedingungen zu erwartende Nutzung der Systeme. Außerdem wurden einige, quantitativ im Einzelfall weniger bedeutsame Mindestmengen bei den Modellrechnungen außer Acht gelassen.

Aus diesen Gründen wird der Beitrag erneuerbarer Energien in Optimierungsmodellen systematisch unterschätzt. Auf der anderen Seite werden zwar auch Hemmnisse, die der Ausschöpfung wirtschaftlicher Potentiale entgegenstehen, im Modell nicht explizit (sondern nur als Obergrenzen des Technikeinsatzes) erfaßt. Solche Hemmnisse spielen bei

erneuerbaren Energien allerdings in einem rein an den Kosten orientierten Modell-Basis-Szenario eine geringere Rolle als in zielorientierten Reduktionsstrategien.

3.6.2 Nutzung erneuerbarer Energien im Referenz-Szenario

Ausgehend vom Stand im Jahre 1995 zeigt Tabelle 3.6-1, wie sich die Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland in einem Referenz-Szenario bis 2020 entwickeln könnte. Danach würde sich der Beitrag erneuerbarer Energiequellen von gut 310 PJ (1995) auf etwa 420 PJ (2020) - also um rund ein Drittel - erhöhen. Dieser Zuwachs würde zum größten Teil vom Ausbau der Windkraft getragen, die in den letzten Jahren nahe an die Schwelle der Wirtschaftlichkeit getreten ist. Auch bei anderen Systemen wie Solarkollektoren sind angesichts der bisherigen Marktentwicklung zum Teil hohe Zuwachsraten zu erwarten, wenn die Nutzung erneuerbarer Energien finanziell gefördert wird. Dennoch dürften auch zum Ende des Betrachtungszeitraumes - abgesehen von Windkraft - die traditionellen Systeme (Wasserkraft, Biomasse, Müll) nach wie vor überwiegen.

Tabelle 3.6-1:

Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland im Referenz-Szenario in PJ

	1995	2005	2010	2020
Wasserkraft	71,1	71,4	74,7	81,8
Windkraft	6,6	40,0	55,0	80,0
Photovoltaik	0,0	0,9	1,5	2,9
Solarkollektoren	1,7	5,0	7,0	10,0
Wärmepumpen	5,0	7,0	8,0	10,0
Geothermie	0,4	0,5	0,7	1,0
Feste Biomasse	122,0	140,0	140,0	140,0
Müll (Strom und Wärme)	77,0	87,0	77,0	49,0
Biogas	0,4	4,6	5,0	5,6
Klärgas	13,5	15,0	15,0	15,0
Deponiegas	6,0	10,5	8,5	4,4
Rapsöl	10,0	15,0	17,0	20,0
Summe (Referenz)	313,7	396,9	409,4	419,7
Zum Vergleich:				
Modell-Basis-Szenario	228,0	242,0	235,0	206,0
Differenz	85,7	154,9	174,4	213,7
Quelle: Berechnungen und Schätzungen des DIW. Müll (Strom und Wärme) wie im Modell-Basis-Szenario.				

Insgesamt betrachtet ist der Beitrag erneuerbarer Energien im hier dargestellten Referenz-Szenario im Jahre 2020 etwa doppelt so hoch wie im Modell-Basis-Szenario des

Optimierungsmodells. Die Gesamtdifferenz ergibt sich hierbei vor allem aus der Summe jeweils relativ geringer Beiträge einzelner Techniklinien, die in dem Modell-Basis-Szenario nicht berücksichtigt worden sind. Diese Abweichungen sind für die Frage nach der Rolle erneuerbarer Energien im Rahmen von Reduktionsstrategien aber durchaus von Bedeutung.

Überschlägig geschätzt, erhöht sich der Beitrag erneuerbarer Energien zur Verminderung der CO₂-Emissionen in Deutschland im Referenz-Szenario von 35 Mio. t CO₂ im Jahre 1995 (bzw. von 30 Mio. t CO₂ im Jahre 1990) auf 56 Mio. t CO₂ im Jahre 2020 (Tabelle 3.6-2). Im Vergleich zum Modell-Basis-Szenario sind das im Jahre 2020 immerhin 24 Mio. t CO₂ mehr.

Tabelle 3.6-2:

**Beitrag erneuerbarer Energien zur Verminderung der CO₂-Emissionen
im Referenz-Szenario und im Modell-Basis-Szenario**

	1995	2005	2010	2020
	Gesamtbeitrag in Mio. t CO ₂			
Referenz-Szenario	35,3	46,7	50,4	55,8
Modell-Basis-Szenario	28,7	31,5	32,3	31,8
	Abweichung vom Modell-Basis-Szenario in Mio. t CO ₂			
Referenz-Szenario	6,6	15,3	18,0	24,0
	Differenzen gegenüber 1995 in Mio. t CO ₂			
Referenz-Szenario	0,0	11,4	15,0	20,5
Modell-Basis-Szenario	0,0	2,7	3,6	3,0

Quelle: Berechnungen des DIW.

3.6.3 Diskussion der Reduktionsszenarien und sowie die politischen Maßnahmen zu ihrer Realisierung

Maßnahmen zum Klimaschutz sollen in dieser Untersuchung auf der Grundlage der Rechenergebnisse des Optimierungsmodells abgeleitet werden. Hierzu sind zum einen die Abweichungen zwischen den Reduktionsszenarien und dem Modell-Basis-Szenario und zum anderen die Differenzen zwischen dem Modell-Basis-Szenario und dem Referenz-Szenario zu beachten.

Hinsichtlich der Nutzung erneuerbarer Energien weicht das 30%-Reduktions-Szenario kaum vom Modell-Basis-Szenario ab (Tabelle 3.6-3). Lediglich die energetische Verwendung von Müll ist im Jahre 2020 (+45 PJ) höher, dessen Ergebnisse beim Mülleinsatz im Referenz-Szenario unmodifiziert übernommen worden sind. Die Verwertung von Müll ist jedoch primär unter dem Aspekt der Abfallentsorgung und nicht als Strategie zum Klimaschutz zu bewerten.

Tabelle 3.6-3

Nutzung erneuerbarer Energien in den Reduktionsszenarien
Abweichungen gegenüber dem Modell-Basis-Szenario in PJ

	30%-Reduktions-Szenario			40%-Reduktions-Szenario		
	2005	2010	2020	2005	2010	2020
Wasserkraft				3	6	8
Windkraft				5	12	34
Photovoltaik						
Solarkollektoren						13
Wärmepumpen						
Geothermie						
Feste Biomasse					46	219
Müll (Strom und Wärme)			45	6	8	32
Biogas						115
Klär gas						
Deponie gas						
Rapsöl						10
Summe			45	14	72	431

Quelle: Modellrechnungen von FZJ/STE.

Im 40%-Reduktions-Szenario erhöht sich der Beitrag erneuerbarer Energien gegenüber dem Modell-Basis-Szenario um 431 PJ auf 637 PJ; diese Erhöhung um über 200 % wird allerdings zur Hälfte bereits im Referenz-Szenario realisiert. Aus dem Vergleich dieser Szenarien lassen sich für die betrachteten Nutzungssysteme die folgenden Hinweise für klimaschutzpolitische Maßnahmen ableiten:

- Die Nutzung der Wasserkraft (ohne Pumpspeicher) ist im 40%-Reduktions-Szenario im Jahre 2020 mit 83 PJ um 8 PJ oder 2,2 TWh höher als im Modell-Basis-Szenario. Sie wäre damit in etwa so hoch wie in der Trendskeizze von Prognos, EWI (1998). Eine solche Entwicklung setzt neben einer Vergütungsregelung wie nach dem jetzigen Einspeisungsgesetz voraus, daß Hemmnisse bei der Genehmigung von Wasserkraftanlagen abgebaut werden.

- Die Stromerzeugung aus Windkraftanlagen steigt im 40%-Reduktions-Szenario gegenüber dem Modell-Basis-Szenario um 34 PJ auf 61 PJ. Die Modellrechnungen belegen damit, daß die Nutzung der Windenergie eine kosteneffiziente Maßnahme zum Klimaschutz darstellt. Im Referenz-Szenario werden unter Status-Quo-Bedingungen, die insbesondere die Einspeisungsvergütungen in der bisherigen Höhe einschließen, bereits 80 PJ erzeugt.
- Die Stromerzeugungskosten von Photovoltaikanlagen sind - selbst bei optimistischen Annahmen über die technische Weiterentwicklung und Kostendegressionseffekte - im Jahre 2020 noch so hoch, daß Photovoltaik auch im 40%-Reduktions-Szenario des Optimierungsmodells nicht eingesetzt wird. Die Entwicklung im Referenz-Szenario beruht hier im wesentlichen auf der Voraussetzung, daß Solarstrom künftig noch in zunehmendem Maße finanziell gefördert wird. Solche Maßnahmen sind vor allem erforderlich, um die Voraussetzungen für eine längerfristig angelegte Strategie der Sonnenenergienutzung zu verbessern.
- Ähnliche Überlegungen gelten auch für den Einsatz von thermischen Solarkollektoren, die im Betrachtungszeitraum allein unter Kostenaspekten nicht konkurrenzfähig werden. Im 40%-Reduktions-Szenario wird im Jahre 2020 insgesamt eine solare Wärmeerzeugung von 13 PJ berücksichtigt. Ausschlaggebend ist hierfür der Kostenvorteil von größeren Systemen zur solaren Nahwärmeversorgung. Die Realisierung eines solchen Beitrags von Solarkollektoren, der noch etwas höher als im Referenz-Szenario ist, setzt eine steigende finanzielle Förderung voraus .
- Wärmepumpen und geothermische Anlagen werden im 40%-Reduktions-Szenario nicht genutzt. Im Referenz-Szenario werden dagegen - ebenfalls unter der Voraussetzung von Fördermaßnahmen - zunehmende Beiträge dieser Techniken erwartet.
- Unter allen erneuerbaren Energiequellen spielt feste Biomasse im 40%-Reduktions-Szenario die größte Rolle. Mit einem Gesamteinsatz von 274 PJ beträgt die Zunahme gegenüber dem Modell-Basis-Szenario 219 PJ und gegenüber dem Referenz-Szenario immerhin noch 134 PJ oder 100 %. Dies würde eine weitgehende Ausschöpfung der Potentiale von Reststroh, Waldrestholz und Industrierestholz bedeuten, die insgesamt auf 310 PJ geschätzt werden (die Nutzung von Holzplantagen und Miscanthus würden zu deutlich höheren Kosten führen). Im Vergleich zur Referenzentwicklung müßte insbesondere der Einsatz von fester Biomasse im Umwandlungsbereich zur Strom- und Wärmeerzeugung erhöht werden.
- Die energetische Verwendung von Müll erhöht sich im 40%-Reduktions-Szenario bereits ab dem Jahre 2005, der Zuwachs gegenüber dem Modell-Basis-Szenario ist aber im Jahre 2020 geringer als im 30%-Reduktions-Szenario, so daß in der Summe ein Mülleinsatz wie im Jahre 1990 erreicht wird.

- Im 40%-Reduktions-Szenario nehmen als erneuerbare Energieträger außer fester Biomasse insbesondere die Biogase zu, die im Modell-Basis-Szenario gar nicht berücksichtigt werden. Der Einsatz von 115 PJ bedeutet aber auch gegenüber dem Referenz-Szenario, in dem einschließlich Klär- und Deponiegas 25 PJ Biogas genutzt werden, eine wesentliche Erhöhung. Die Potentiale würden damit im Jahre 2020 vollständig ausgeschöpft. Hierbei ist zu beachten, daß Biogasanlagen im Bereich der Landwirtschaft recht heterogene Anwendungen darstellen, die sich einzelwirtschaftlich nur bei einer mehr oder weniger hohen Förderung rentieren.
- Auch flüssige Biomasse in Form von Rapsöl zählt nach den Modellrechnungen zu den kosteneffizienten Optionen zur Emissionsminderung. Im 40%-Reduktions-Szenario wird mit 10 PJ allerdings nur halb soviel Rapsöl verwendet wie im Referenz-Szenario. Eine wesentliche Fördermaßnahme ist hier die Befreiung von der Mineralölsteuer.

Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen würde im 40%-Reduktions-Szenario im Jahre 2020 insgesamt CO₂-Emissionen in einer geschätzten Größenordnung von 68 Mio. t vermeiden (Tabelle 3.6-4). Dies wären 39 Mio. t mehr als im Jahre 1995. In diesem Szenario würden erneuerbare Energien allerdings in den Jahren 2005 und 2010 noch einen geringeren Reduktionsbeitrag leisten als im Referenz-Szenario; erst im Jahre 2020 wäre dieser Beitrag um rund 12 Mio. t CO₂ höher.

Tabelle 3.6-4:

**Geschätzter Beitrag zur Verminderung der CO₂-Emissionen
durch erneuerbare Energien in den Reduktionsszenarien**

	1995	2005	2010	2020
	Gesamtbeitrag in Mio. t CO ₂			
30%-Reduktions-Szenario	28,7	31,5	32,3	35,9
40%-Reduktions-Szenario	29,1	33,9	38,8	67,9
	Differenzen gegenüber 1995 in Mio. t CO ₂			
30%-Reduktions-Szenario	0,0	2,7	3,6	7,2
40%-Reduktions-Szenario	0,0	4,8	9,8	38,8
	Differenzen gegenüber dem Modell-Basis-Szenario in Mio. t CO ₂			
30%-Reduktions-Szenario	0,0	0,0	0,0	4,2
40%-Reduktions-Szenario	0,4	2,5	6,5	36,1
	Differenzen gegenüber dem Referenz-Szenario in Mio. t CO ₂			
30%-Reduktions-Szenario	-6,6	-15,3	-18,0	-19,8
40%-Reduktions-Szenario	-6,2	-12,8	-11,5	12,1
Quelle: Berechnungen des DIW.				

3.6.4 Fazit

Insgesamt betrachtet ergeben sich aus den Modellrechnungen - abgesehen von fester Biomasse und Biogasen - nur schwache Hinweise auf einen forcierten Einsatz erneuerbarer Energien. Im 40%-Reduktions-Szenario wäre ihre Nutzung im Jahre 2020 immerhin etwa dreimal so hoch wie im Modell-Basis-Szenario; dies zeigt grundsätzlich, daß erneuerbare Energien zum Teil zu den kosteneffizienten Maßnahmen zur Emissionsminderung gezählt werden können. Allerdings wird im Modell-Basis-Szenario nur die Hälfte des Beitrages erneuerbarer Energien erfaßt, der in einer Referenzentwicklung nicht zuletzt aufgrund bestehender Fördermaßnahmen zu erwarten ist. Im Vergleich zur Referenzentwicklung liegt der Beitrag im 40%-Reduktions-Szenario damit um gut die Hälfte höher.

Der im Vergleich zu den technischen Potentialen geringe Beitrag erneuerbarer Energien resultiert zum Teil daraus, daß ihre Vorteile im Optimierungsmodell auch in Reduktionsszenarien nicht ausreichend zur Geltung kommen. So wird hierbei ausschließlich ihr Beitrag zur Verminderung der CO₂-Emissionen berücksichtigt, während andere Beiträge zur Umweltentlastung und Ressourceneinsparung nicht eingerechnet werden. Außerdem kann der Stellenwert erneuerbarer Energien nicht allein nach dem Versorgungsbeitrag im betrachteten Zeitraum bis zum Jahre 2020 bewertet werden. In längerfristiger Perspektive könnten erneuerbare Energien zu einem Hauptpfeiler einer nachhaltigen Energieversorgung heranreifen. Um einen solchen Strukturwandel rechtzeitig einzuleiten, sind schon jetzt Maßnahmen zur Verbesserung der Marktchancen erforderlich. Hierzu gehören Forschung und Entwicklung, Förderung der Markteinführung und Abbau von Hemmnissen.

Die Schwerpunkte der Förderung sind in Abhängigkeit von dem jeweiligen Entwicklungsstand der Nutzungssysteme zu setzen. So lassen auch die Modellrechnungen erkennen, daß z.B. der Nutzung der Windenergie gegenwärtig und in den nächsten Jahren eine größere energiewirtschaftliche Bedeutung zukommt als etwa der Photovoltaik, die erst langfristig große Potentiale verspricht. Dennoch sollte bei der Förderung erneuerbarer Energien nicht allein auf die Techniklinien gesetzt werden, die im Reduktions-Szenario des Optimierungsmodells hervortreten.

3.6.5 Literatur

- Bayer (1998): Erneuerbare Energieträger 1991 bis 1996. In: *Wirtschaft und Statistik* 5/1998. S. 438-443
- Diekmann, J., G.C. Goy und F. Wittke (1999): Die Rolle von erneuerbaren Energien in der Energieversorgung. In: *Das IKARUS-Projekt: Klimaschutz in Deutschland - Strategien für 2000-2020*. Herausgegeben von H.-F. Wagner und G. Stein. Springer-Verlag Berlin u.a. 1999
- Diekmann, J., M. Eichelbrönnner und O. Langniß unter Mitarbeit von B. Beck (1997): Aktionsprogramm Abbau von Hemmnissen bei der Realisierung von Anlagen erneuerbarer Energien.. Schriftenreihe des Forums für Zukunftsenergien, Band 41. Bonn 1997
- Diekmann, J., M. Horn, P. Hrubesch, B. Praetorius, F. Wittke, H.-J. Ziesing (1995): Fossile Energieträger und erneuerbare Energiequellen. Abschlußbericht zum IKARUS-Teilprojekt 3 „Primärenergie“. Monographien des Forschungszentrums Jülich. Band 15. Jülich 1995
- Ziesing, H.-J. et al. (1997): Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005. Politikszenerarien für den Klimaschutz. Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes herausgegeben von G. Stein und B. Strobel. Band 1. Studie von DIW, FhG-ISI, Forschungszentrum Jülich, Öko-Institut. Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Umwelt. Band 5. Jülich 1997
- Prognos (1995): Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa - Perspektiven bis zum Jahre 2020. Basel 1995
- Prognos, EWI (1998): Trendsckizze. Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Basel, Köln 1998

3.7 Umwandlungssektor

3.7.1 Vorbemerkungen

Der Umwandlungssektor ist in erheblichem Maße an den gesamten energiebedingten CO₂-Emissionen beteiligt; 1995 entfielen nach Berechnungen des DIW rund 43 % (DIW 1999) und nach den IKARUS-Modellergebnissen knapp 40 % auf diesen Bereich. Innerhalb der Umwandlungssektoren spielen die Kraftwerke mit Anteilen von 80 bis 85 % die herausragende Rolle. Dies rechtfertigt es, die folgende Analyse auf diesen Sektor zu begrenzen und die übrigen Umwandlungssektoren nur cursorisch zu behandeln oder für sie unmittelbar auf die Modellrechnungen zurückzugreifen. Einschränkend sei weiterhin darauf verwiesen, daß innerhalb des Elektrizitätssektors vorrangig die Stromerzeugung ohne Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen betrachtet wird, die allerdings etwa 88 % der gesamten Nettostromerzeugung (und reichlich 82 % der auf die Stromerzeugung zurückgehenden CO₂-Emissionen) ausmacht. Für 1990 und 1995 sind in der Tabelle 3.7-1 die wichtigsten Merkmale des im folgenden untersuchten Segments auf der Grundlage der IKARUS-Daten zusammengestellt.

Tabelle 3.7-1:

Daten zur Stromerzeugung 1990 und 1995 nach den IKARUS-Modellrechnungen (ohne Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen)

	1990	1995	1990	1995	1990	1995
	Nettokapazität in GW		Auslastung in h/a		Nettoerzeugung in TWh	
Steinkohle	24,1	25,9	3963	4185	95,5	108,4
Braunkohle	24,1	18,5	6022	6756	145,1	124,9
Öl	7,1	6,9	1182	1125	8,4	7,8
Erdgas	13,3	12,1	1049	2033	13,9	24,6
Kernenergie	21,1	21,1	6485	6857	136,7	144,6
Wind	0,0	0,9	x	1964	0,0	1,8
Sonne	0,0	0,0	x	x	0,0	0,0
Wasser	7,4	7,3	2468	2695	18,3	19,7
Sonstige	1,2	1,2	6537	6644	8,1	7,7
Insgesamt	98,3	93,9	4335	4680	426,0	439,5
	Jahresnutzungsgrad in % ¹⁾		Energieeinsatz in PJ		CO ₂ -Emissionen in Mio. t	
Steinkohle	36,2	36,6	949	1065	88,2	99,0
Braunkohle	31,0	32,7	1686	1376	185,5	146,5
Öl	31,4	33,7	96	83	7,6	6,6
Erdgas	39,3	40,4	128	219	7,2	11,8
Kernenergie	31,4	31,4	1565	1655	0,0	0,0
Wind	100,0	100,0	0	6	0,0	0,0
Sonne	100,0	100,0	0	0	0,0	0,0
Wasser	100,0	100,0	66	71	0,0	0,0
Sonstige	33,9	34,3	86	81	5,2	4,9
Insgesamt	33,5	34,7	4576	4556	293,6	288,7

¹⁾ Bei Wind, Sonne und Wasser entsprechend der Wirkungsgradmethode gleich 100 % gesetzt

Danach werden also für 1995 Nettokapazitäten von rund 94 GW (von einer insgesamt in Deutschland im Jahre 1995 installierten Nettoengpaßleistung von 119 GW) mit einer Nettostromerzeugung von knapp 437 Mrd. kWh (insgesamt: 498 Mrd. kWh), einem Energieeinsatz von reichlich 4 500 PJ (insgesamt gut 5 100 PJ) und von CO₂-Emissionen in Höhe von beinahe 270 Mio. t (insgesamt 323 Mio. t) betrachtet.

3.7.2 Referenz-Szenario für die Elektrizitätswirtschaft

Für die Formulierung eines Referenz-Szenarios für die Elektrizitätswirtschaft in der hier gewählten Abgrenzung sind abweichend von dem modellseitig beschriebenen Modell-Basis-Szenario die folgenden "Stellgrößen" zu berücksichtigen:

1. Die Stromnachfrage ändert sich aufgrund der für die einzelnen Endenergiesektoren entwickelten Referenz-Szenarien. Damit ändert sich auch der Umfang der von der Elektrizitätswirtschaft bereitzustellenden Stromerzeugung;
2. Die Struktur des Kraftwerksparks ist entsprechend den heutigen Erwartungen zu variieren.

Stromnachfrage

Die Änderungen der Stromnachfrage sind mit den oben beschriebenen sektoralen Referenzszenarien vorgegeben. Einschließlich des zusätzlich geschätzten Stromverbrauchs in den übrigen Umwandlungssektoren sowie der Netzverluste ergibt sich das in Tabelle 3.7-2 zusammengefaßte Bild der gesamten Stromnachfrage im Referenz-Szenario. Danach würde es - anders als im Modell-Basis-Szenario - bis 2005 noch zu einem leichten Verbrauchsanstieg kommen. Gegenüber den Ausgangsdaten für das IKARUS-Modell würde der Zuwachs von 1995 bis 2005 reichlich 7 % (0,7 %/a) betragen. Im Vergleich zum Modell-Basis-Szenario sind das 43 Mrd. kWh (9 %) mehr; bis 2020 erhöht sich die Zusatznachfrage auf 58 Mrd. kWh (knapp 13 %). Deutlich vom Modell-Basis-Szenario nach oben abweichende Entwicklungen zeigen sich schwergewichtig bei den Kleinverbrauchern (z.T. allerdings abgrenzungsbedingt), nachrangig auch in der Industrie. Umgekehrt ist es bemerkenswert, daß die Stromnachfrage der privaten Haushalte wegen der Entwicklung des Stromeinsatzes im Bereich Kochen/andere Elektrogeräte (vgl. Ab-

schnitt 3.4.2) im Referenz-Szenario sogar noch etwas unterhalb der Werte für das Modell-Basis-Szenario rangiert.

Insgesamt beläuft sich die Stromnachfrage im Referenz-Szenario im Jahre 2005 auf reichlich 520 Mrd. kWh; sie nimmt danach bis auf 515 Mrd. kWh im Jahre 2020 ab. Dagegen sehen Prognos, EWI innerhalb des Betrachtungszeitraumes bis 2020 noch keinen Rückgang des Stromverbrauches (wenn auch eine deutliche Abschwächung des Stromverbrauchszuwachses). Im Jahre 2020 wäre der Stromverbrauch in den *Endenergieverbrauchssektoren* im Referenz-Szenario zwar um rund 55 Mrd. kWh höher als im Modell-Basis-Szenario, doch würde der von Prognos, EWI für dieses Jahr geschätzte Werte von 537 Mrd. kWh ähnlich stark (nämlich um 56 Mrd. kWh) unterschritten (Prognos, EWI 1998). Insoweit markiert das Referenz-Szenario vermutlich sogar noch eher den unteren Rand der künftig zu erwartenden Stromverbrauchsentwicklung.

Tabelle 3.7-2:

Entwicklung der Stromnachfrage im Basis- und Referenz-Szenario

	IKARUS-Ausgangswerte		Modell-Basis-Szenario			Referenz-Szenario			Referenz-Szenario abzgl. Modell-Basis-Szenario		
	1990	1995	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020
Stromverbrauch/-erzeugung in Mrd. kWh											
Industrie	222	195	197	200	203	208	211	214	12	11	11
Kleinverbraucher	100	110	98	95	89	131	133	139	32	39	50
Haushalte gesamt	121	128	130	126	115	126	119	108	-4	-6	-8
Verkehr	13	12	17	17	18	18	19	20	1	2	2
Summe Endenergiesektoren	455	445	442	437	425	483	483	481	41	45	55
Stromverbrauch in der Umwandlung ¹⁾	21	15	12	11	11	12	11	11	0	0	0
Netzverluste ²⁾	24	24	24	23	20	26	26	23	2	2	3
Summe Verbrauch = Nettoerzeugung	500	485	478	472	457	521	519	515	43	47	58

¹⁾ Ohne Kraftwerkseigenverbrauch. - ²⁾ Einschließlich Stromaußenhandelsaldo und statistische Differenzen.

Stromerzeugung

Der in Tabelle 3.7-2 ausgewiesene Stromverbrauch muß durch eine entsprechende Nettostromerzeugung gedeckt werden. Unter der Voraussetzung, daß die Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen einen Verlauf wie im Modell-Basis-Szenario

nimmt, muß die im folgenden detaillierter betrachtete ungekoppelte Nettostromerzeugung im Referenz-Szenario folgende Entwicklung nehmen (Angaben in Mrd. kWh):

	1995	2005	2010	2020
Modell-Basis-Szenario				
Nettostromerzeugung insgesamt	485	478	472	457
abzgl. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK)	59	31	21	21
Nettostromerzeugung ohne KWK-Anlagen	427	447	451	457
Referenz-Szenario				
Nettostromerzeugung insgesamt	485	521	519	515
abzgl. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (wie Modell-Basis-Szenario)	59	31	21	21
Nettostromerzeugung ohne KWK-Anlagen	427	490	499	494

Abweichungen in den Summen durch Rundungen

Danach ist im Referenz-Szenario in den Jahren von 2005 bis 2020 eine Nettostromerzeugung außerhalb der KWK-Anlagen in einer Größenordnung von 490 bis 500 Mrd. kWh zu erbringen - rund 50 Mrd. kWh mehr als im Modell-Basis-Szenario. Um diese zusätzliche Stromerzeugung darzustellen, sind höhere Kraftwerkskapazitäten erforderlich. Sie dürften im Referenz-Szenario im Vergleich zum Modell-Basis-Szenario im Jahre 2005 um etwa 5,6 GW und im Jahre 2020 um beinahe 18 GW höher ausfallen.

Die Struktur des Kraftwerksparks dürfte sich unter den Bedingungen des Referenz-Szenarios wesentlich weniger zu Lasten der Kapazitäten wie der Stromerzeugung in Steinkohlen- und Braunkohlenkraftwerken vermindern als im Modell-Basis-Szenario; auf der anderen Seite dürfte die Kapazität der Windkraftanlagen angesichts der inzwischen schon tatsächlich eingetretenen und der künftig absehbaren Entwicklung kräftiger ausgeweitet werden.

Ein gegenüber dem Modell-Basis-Szenario an sich erwartbarer stärkerer Zubau von Erdgaskraftwerken wird für das Referenz-Szenario nicht angenommen, weil bereits im Modell-Basis-Szenario bis 2020 gegenüber dem IKARUS-Ausgangswert im Jahre 1995 eine drastische Steigerung, nämlich von knapp 25 Mrd. kWh um das mehr als Siebenfache auf reichlich 180 Mrd. kWh, errechnet worden ist. Dies ist im übrigen eine Größenordnung, mit der auch Prognostik/EWI für 2020 rechnen (178,2 Mrd. kWh).

Details zur Entwicklung der Stromerzeugung und ihrer Determinanten im Referenz-Szenario sind der Tabelle 3.7-3 zu entnehmen. Energieeinsatz und CO₂-Emissionen sind in Tabelle 3.7-4 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3.7-3:

**Entwicklung der Kapazitäten (ohne KWK-Anlagen) und der Netto-
Stromerzeugung der Kraftwerke im Modell-Basis-Szenario
und im Referenz-Szenario**

	IKARUS-Ausgangswerte		Modell-Basis-Szenario			Referenz-Szenario			Referenz-Szenario abzgl. Modell-Basis-Szenario		
	1990	1995	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020
Nettokapazität in GW											
Steinkohle	24,1	25,9	20,6	16,2	10,1	22,2	18,0	14,9	1,6	1,8	4,8
Braunkohle	24,1	18,5	17,5	15,9	14,0	18,0	18,0	16,9	0,5	2,1	2,9
Öl	7,1	6,9	6,0	1,8	0,0	6,0	1,8	1,2	0,0	0,0	1,2
Erdgas	13,3	12,1	17,4	20,6	37,6	17,4	20,6	37,6	0,0	0,0	0,0
Kernenergie	21,1	21,1	21,1	18,7	7,2	21,1	18,7	7,2	0,0	0,0	0,0
Wind	0,0	0,9	2,7	3,1	4,0	5,9	7,9	11,8	3,1	4,7	7,8
Sonne	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,5	1,0	0,3	0,5	1,0
Wasser	7,4	7,3	7,2	7,5	7,8	7,2	7,5	7,8	0,0	0,0	0,0
Sonstige	1,2	1,2	1,2	1,5	1,1	1,2	1,5	1,1	0,0	0,0	0,0
Insgesamt	98,3	93,9	93,6	85,3	81,9	99,2	94,4	99,6	5,6	9,1	17,7
Nettoerzeugung in Mrd. kWh											
Steinkohle	95,5	108,4	101,1	108,0	73,6	109,1	108,0	89,6	8,0	0,0	16,0
Braunkohle	145,1	124,9	125,8	113,9	100,6	125,8	128,9	121,6	0,0	15,0	21,0
Öl	8,4	7,8	0,0	4,5	0,0	6,0	4,5	3,0	6,0	0,0	3,0
Erdgas	13,9	24,6	47,1	66,4	181,6	67,1	87,4	181,6	20,0	21,0	0,0
Kernenergie	136,7	144,6	142,2	126,2	48,6	142,2	126,2	48,6	0,0	0,0	0,0
Wind	0,0	1,8	5,2	5,9	7,4	11,2	14,9	22,4	6,0	9,0	15,0
Sonne	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,4	0,8	0,3	0,4	0,8
Wasser	18,3	19,7	16,8	18,7	20,7	19,8	20,7	22,7	3,0	2,0	2,0
Sonstige	8,1	7,7	8,7	7,4	3,7	8,7	7,4	3,7	0,0	0,0	0,0
Insgesamt	426,0	439,5	447,0	451,2	436,2	490,2	498,6	494,0	43,3	47,4	57,8
Abweichungen in den Summen durch Rundungen.											

Entsprechend der höheren Nettostromerzeugung übertreffen auch der Brennstoffeinsatz wie die CO₂-Emissionen im Referenz-Szenario deutlich die entsprechenden Werte des Modell-Basis-Szenarios. So sind die CO₂-Emissionen im Jahre 2005 um 17 Mio. t (7 %) und im Jahre 2020 um 37 Mio. t (16 %) höher. Während die CO₂-Emissionen in dem hier betrachteten Segment im Modell-Basis-Szenario bis 2020 gegenüber 1995 um 14 % zurückgehen, bleiben sie im Referenz-Szenario innerhalb des gesamten Betrachtungszeitraumes nahezu unverändert in einer Größenordnung von knapp 270 Mio. t. Dazu trägt

auf der einen Seite die im Referenz-Szenario insgesamt höhere Stromerzeugung bei, auf der anderen Seite verhindert aber auch der höhere Einsatz insbesondere der kohlenstoffhaltigen (und damit CO₂-intensiven) Stein- und Braunkohle eine Minderung der CO₂-Emissionen.

Tabelle 3.7-4:

Entwicklung des Energieeinsatzes zur Stromerzeugung (ohne KWK-Anlagen) und der damit verbundenen direkten CO₂-Emissionen im Referenz-Szenario

	1990	1995	2005	2010	2020
	Energieverbrauch in PJ				
	Referenz-Szenario				
Insgesamt	4576	4556	4634	4530	3889
dav.: Steinkohle	949	1065	1047	1015	806
Braunkohle	1686	1376	1229	1235	1120
Öl	96	83	59	41	27
Erdgas	128	219	471	595	1183
Kernenergie	1565	1655	1628	1445	556
Wind	0	6	40	54	81
Sonne	0	0	1	1	3
Wasser	66	71	71	75	82
Sonstige	86	81	86	70	31
	Abweichungen vom Modell-Basis-Szenario				
Insgesamt			310	328	429
dav.: Steinkohle			77	0	144
Braunkohle			0	144	193
Öl			59	0	27
Erdgas			141	143	0
Kernenergie			0	0	0
Wind			22	32	54
Sonne			1	1	3
Wasser			11	7	7
Sonstige			0	0	0
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
Referenz-Szenario	294	269	269	271	268
Modell-Basis-Szenario	294	269	249	247	232
Abweichungen des Referenz-Szenarios vom Modell-Basis-Szenario			20	24	37
Abweichungen in den Summen durch Rundungen.					

3.7.3 Das 30%-Reduktions-Szenario

Nach den IKARUS-gestützten Modellrechnungen sind die Unterschiede in der Entwicklung des Stromverbrauchs zwischen den einzelnen Szenarien vergleichsweise gering. So entspricht auch der Stromverbrauch im 30%-Reduktions-Szenario weitgehend dem demjenigen im Modell-Basis-Szenario; entsprechend fallen die Unterschiede zu dem zuvor beschriebenen Referenz-Szenario aus (Tabelle 3.7-5). Danach ist der gesamte Stromverbrauch im Jahre 2005 um 34 Mrd. kWh und im Jahre 2020 um 57 Mrd. kWh im 30%-Reduktions-Szenario niedriger als im Referenz-Szenario - mit den größten Abweichungen bei den Kleinverbrauchern und in der Industrie.

Tabelle 3.7-5:

Entwicklung der Stromnachfrage im 30%-Reduktions- Szenario

	IKARUS-Ausgangswerte		30%-Reduktions-Szenario			30%-Reduktions-Szenario abzgl. Referenz-Szenario		
	1990	1995	2005	2010	2020	2005	2010	2020
	Stromverbrauch/-erzeugung in Mrd. kWh							
Industrie	222	195	196	199	201	-12	-12	-13
Kleinverbraucher	100	110	114	111	106	-17	-22	-33
Haushalte gesamt	121	128	124	115	102	-2	-4	-5
Verkehr	13	12	17	17	18	-1	-2	-2
Summe Endenergiesektoren	455	445	451	443	427	-32	-40	-53
Stromverbrauch in der Umwandlung ¹⁾	21	15	12	10	8	-1	-1	-3
Netzverluste ²⁾	24	24	24	24	22	-2	-2	-1
Summe Verbrauch = Nettoerzeugung	500	485	487	477	458	-34	-42	-57

¹⁾ Ohne Kraftwerkseigenverbrauch.- ²⁾ Einschließlich Stromaußenhandelsaldo und statistische Differenzen.

Die diesem Szenario zugrunde liegenden Stromerzeugungsstrukturen sind der Tabelle 3.7-6 zu entnehmen. Anders als im Modell-Basis-Szenario, in dem die Stromerzeugung aus KWK-Anlagen von rund 58 Mrd. kWh im Jahre 1995 auf kaum mehr als 20 Mrd. kWh deutlich zurückgeht, verringert sie sich im 30%-Reduktions-Szenario nur auf knapp 52 Mrd. kWh. Dadurch sinkt die ungekoppelte Stromerzeugung überdurchschnittlich

stark; ihr Anteil an der gesamten Nettostromerzeugung beträgt im Jahre 2020 aber immer noch knapp 89 %.

Tabelle 3.7-6:

**Entwicklung der Kapazitäten (ohne KWK-Anlagen) und der Netto-
Stromerzeugung der Kraftwerke im 30%-Reduktions-Szenario**

	IKARUS- Ausgangswerte		30%-Reduktions-Szenario			30%-Reduktions-Szenario abzgl. Referenz-Szenario		
	1990	1995	2005	2010	2020	2005	2010	2020
	Nettokapazität in GW							
Steinkohle	24,1	25,9	20,6	16,2	10,1	-1,6	-1,8	-4,8
Braunkohle	24,1	18,5	18,3	17,4	12,6	0,3	-0,6	-4,3
Öl	7,1	6,9	6,0	1,8	1,0	0,0	0,0	-0,2
Erdgas	13,3	12,1	17,5	18,8	29,0	0,1	-1,8	-8,7
Kernenergie	21,1	21,1	21,1	18,7	8,3	0,0	0,0	1,1
Wind	0,0	0,9	5,9	7,9	11,8	0,0	0,0	0,0
Sonne	0,0	0,0	0,3	0,5	1,0	0,0	0,0	0,0
Wasser	7,4	7,3	7,3	7,5	7,8	0,2	0,0	0,0
Sonstige	1,2	1,2	1,2	1,3	1,5	0,0	-0,1	0,5
Insgesamt	98,3	93,9	98,2	90,1	83,1	-1,0	-4,3	-16,5
	Nettoerzeugung in Mrd. kWh							
Steinkohle	95,5	108,4	71,1	63,0	39,3	-37,9	-45,0	-50,3
Braunkohle	145,1	124,9	130,2	114,9	76,1	4,4	-14,0	-45,4
Öl	8,4	7,8	2,0	2,0	1,0	-4,0	-2,5	-2,0
Erdgas	13,9	24,6	68,0	100,7	174,9	0,9	13,3	-6,7
Kernenergie	136,7	144,6	142,2	126,2	55,8	0,0	0,0	7,2
Wind	0,0	1,8	11,2	14,9	22,4	0,0	0,0	0,0
Sonne	0,0	0,0	0,3	0,4	0,8	0,0	0,0	0,0
Wasser	18,3	19,7	19,8	20,7	22,7	0,0	0,0	0,0
Sonstige	8,1	7,7	9,0	7,7	13,0	0,3	0,3	9,3
Insgesamt	426,0	439,5	453,8	450,7	406,0	-36,4	-47,9	-88,0
Nachrichtlich: KWK-Anlagen	74,3	58,1	33,4	26,0	51,7	x	x	x
Zusammen	500,3	497,6	487,2	476,7	457,7	x	x	x

Insgesamt fällt die (ungekoppelte) Nettostromerzeugung im Jahre 2020 um 88 Mrd. kWh niedriger aus als im Referenz-Szenario. Dabei beschränken sich die Änderungen in der Erzeugungsstruktur im 30%-Reduktions-Szenario im wesentlichen auf die insgesamt deutlich niedrigere Stromerzeugung der Steinkohlen- und Braunkohlenkraftwerke, während die Unterschiede bei allen übrigen Kraftwerkstypen relativ gering sind.

Bei dem 30%-Reduktions-Szenario handelt es sich also um ein eher weniger stark kohlenbasiertes Stromerzeugungssystem. Im Jahre 2020 wären die Nettokapazitäten der Steinkohlenkraftwerke um 4,8 GW und diejenigen der Braunkohlenkraftwerke um 4,3 GW geringer als im Referenz-Szenario; zudem würde deren Auslastung spürbar sinken. Die Kapazitäten der Erdgaskraftwerke wären ebenfalls - um 8,7 GW im Jahre 2020 - geringer, doch würden diese Anlagen erheblich besser ausgelastet, so daß die Stromerzeugung nur wenig schwächer ausfällt. In der Summe wären 2020 rund 16,5 GW niedrigere Kraftwerkskapazitäten installiert.

Gegenüber dem Referenz-Szenario würde das 30%-Reduktions-Szenario zu einer erheblichen Reduktion des Energieeinsatzes zur Stromerzeugung und der damit verbundenen CO₂-Emissionen führen (Tabelle 3.7-7).

- Der Energieverbrauch wäre unter den Voraussetzungen des 30%-Reduktions-Szenarios um knapp 370 PJ (-8 %) im Jahre 2005 und um 875 PJ (-23 %) im Jahre 2020 niedriger. Dabei sind besonders starke Verbrauchsminderungen sind bei den Stein- und Braunkohlen zu verzeichnen.
- Wegen der insgesamt "emissionsgünstigeren" Struktur der Stromerzeugung würden die CO₂-Emissionen sogar noch stärker zurückgehen, und zwar um 35 Mio. t (-13 %) im Jahre 2005 und um 96 Mio. t (-35 %) im Jahre 2020. Gegenüber dem Modell-Basis-Szenario sind die CO₂-Emissionen im 30%-Reduktions-Szenario um 15 Mio. t (2005) bzw. um 59 Mio. t (2020) niedriger.

Auch im Zeitablauf kommt es im 30%-Reduktions-Szenario zu einer kräftigen Verminderung: Im Vergleich zu 1990 (1995) sinken die CO₂-Emissionen bis 2005 um 20 % (13 %) und bis 2020 um 41 % (35 %).

Um eine derartige Strategie zugunsten der weniger emissionsintensiven Kraftwerksstruktur umzusetzen, kommen am ehesten steuerliche Anreize durch eine differenzierte Belastung der Einsatzenergieträger entsprechend dem CO₂-Gehalt der eingesetzten Energieträgerin Betracht kommen. Das kann eine reine CO₂-Steuer oder eine Energie-

steuer mit einer ausgeprägten CO₂-Komponente sein, wie sie dem Steuervorschlag der EU-Kommission entspricht.

Tabelle 3.7-7:

Entwicklung des Energieeinsatzes zur Stromerzeugung (ohne KWK-Anlagen) und der damit verbundenen direkten CO₂-Emissionen im 30%-Reduktions-Szenario

	1990	1995	2005	2010	2020
	Energieverbrauch in PJ				
	30%-Reduktions-Szenario				
Insgesamt	4576	4556	4265	3966	3014
dav.: Steinkohle	949	1065	683	593	353
Braunkohle	1686	1376	1229	1028	640
Öl	96	83	19	18	9
Erdgas	128	219	504	681	1085
Kernenergie	1565	1655	1628	1445	639
Wind	0	6	40	54	81
Sonne	0	0	1	2	3
Wasser	66	71	71	75	82
Sonstige	86	81	88	72	122
	Abweichungen vom Referenz-Szenario				
Insgesamt			-369	-564	-875
dav.: Steinkohle			-364	-423	-452
Braunkohle			0	-206	-480
Öl			-40	-24	-19
Erdgas			33	86	-98
Kernenergie			0	0	83
Wind			0	0	0
Sonne			0	0	0
Wasser			0	0	0
Sonstige			2	2	91
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
30%-Reduktions-Szenario	294	269	234	212	172
Referenz-Szenario	294	269	269	271	268
Modell-Basis-Szenario	294	269	249	247	232
Abweichungen des 30%-Reduktions-Szenarios vom Referenz-Szenario			-35	-59	-96
Abweichungen des 30%-Reduktions-Szenarios vom Modell-Basis-Szenario			-15	-35	-59
Abweichungen in den Summen durch Rundungen.					

3.7.4 Das 40%-Reduktions-Szenario

Im 40%-Reduktions-Szenario ist die Entwicklung des Stromverbrauchs nahezu identisch mit derjenigen im 30%-Reduktions-Szenario. Leichte Modifikationen könnten sich dann ergeben, wenn man die für den Sektor Verkehr entwickelte Variante zum 40%-Reduktions-Szenario (mit ihrem größeren Gewicht der -elektrisch - betriebenen Bahnen) berücksichtigt (Tabelle 3.7-8).

Tabelle 3.7-8:

Entwicklung der Stromnachfrage im 40%-Reduktions- Szenario

	IKARUS-Ausgangswerte		40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung			40%-Reduktions-Szenario abzgl. Referenz-Szenario		
	1990	1995	2005	2010	2020	2005	2010	2020
Stromverbrauch/-erzeugung in Mrd. kWh								
Industrie	222	195	194	198	200	-14	-13	-14
Kleinverbraucher	100	110	115	113	107	-15	-21	-32
Haushalte gesamt	121	128	123	113	99	-3	-6	-9
Verkehr	13	12	17	17	18	-1	-2	-2
Summe End-energiesektoren	455	445	450	440	424	-33	-42	-57
Stromverbrauch in der Umwandlung ¹⁾	21	15	9	8	5	-3	-3	-6
Netzverluste ²⁾	24	24	24	23	22	-2	-2	-1
Summe Verbrauch = Nettoerzeugung	500	485	483	472	450	-38	-48	-64

¹⁾ Ohne Kraftwerkseigenverbrauch. - ²⁾ Einschließlich Stromaußenhandelsaldo und statistische Differenzen.

Die für das 40%-Reduktions-Szenario modellseitig ermittelten Erzeugungsstrukturen gehen aus Tabelle 3.7-9 hervor. Danach sind die Erzeugungskapazitäten insgesamt (ohne KWK) im Jahre 2020 um beinahe 15 GW niedriger als im Referenz-Szenario. Daran sind vor allem Erdgas- (-8,7 GW), Steinkohlen- (-4,8 GW) und Braunkohlenkraftwerke (-2,5 GW) beteiligt. Die (ungekoppelte) Stromerzeugung nimmt im 40%-Reduktions-Szenario innerhalb des Betrachtungszeitraumes kräftig ab, und zwar von rund 440 Mrd. kWh (1995) auf knapp 380 Mrd. kWh (2020). Dagegen erhöht sich die Stromerzeugung in KWK-Anlagen von 58 Mrd. kWh (1995) auf 71 Mrd. kWh (2020) deutlich; ihr Anteil an der gesamten Nettostromerzeugung wächst dadurch von gut 12 % auf knapp 16 %.

Tabelle 3.7-9:

**Entwicklung der Kapazitäten (ohne KWK-Anlagen) und der Netto-
Stromerzeugung der Kraftwerke im 40%-Reduktions-Szenario**

	IKARUS- Ausgangswerte		40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung			40%-Reduktions-Szenario abzgl. Referenz-Szenario			
	1990	1995	2005	2010	2020	2005	2010	2020	
	Nettokapazität in GW								
Steinkohle	24,1	25,9	20,6	16,2	10,1	-1,6	-1,8	-4,8	
Braunkohle	24,1	18,5	19,2	18,2	14,5	1,2	0,2	-2,5	
Öl	7,1	6,9	6,0	1,8	1,0	0,0	0,0	-0,2	
Erdgas	13,3	12,1	17,5	16,8	29,0	0,1	-3,8	-8,7	
Kernenergie	21,1	21,1	21,1	18,7	7,2	0,0	0,0	0,0	
Wind	0,0	0,9	6,6	9,9	17,7	0,7	2,0	5,9	
Sonne	0,0	0,0	0,3	0,5	1,0	0,0	0,0	0,0	
Wasser	7,4	7,3	7,3	7,5	8,2	0,2	0,0	0,4	
Sonstige	1,2	1,2	1,3	1,5	1,5	0,1	0,0	0,4	
Insgesamt	98,3	93,9	99,8	91,1	90,1	0,6	-3,3	-9,5	
	Nettoerzeugung in Mrd. kWh								
Steinkohle	95,5	108,4	45,8	37,2	16,7	-63,2	-70,8	-72,9	
Braunkohle	145,1	124,9	129,3	113,0	80,1	3,5	-15,9	-41,4	
Öl	8,4	7,8	3,0	2,0	1,0	-3,0	-2,5	-2,0	
Erdgas	13,9	24,6	71,7	68,6	163,2	4,6	-18,8	-18,4	
Kernenergie	136,7	144,6	142,2	126,2	48,6	0,0	0,0	0,0	
Wind	0,0	1,8	12,6	18,2	31,8	1,4	3,3	9,4	
Sonne	0,0	0,0	0,3	0,4	0,8	0,0	0,0	0,0	
Wasser	18,3	19,7	20,6	22,4	24,9	0,8	1,7	2,2	
Sonstige	8,1	7,7	10,1	10,1	11,5	1,4	2,7	7,8	
Insgesamt	426,0	439,5	435,7	398,3	378,7	-54,5	-100,3	-115,3	
Nachrichtlich: KWK-Anlagen	74,3	58,1	47,1	74,0	71,3	x	x	x	
Zusammen	500,3	497,6	482,8	472,3	450,0	x	x	x	

Die im Vergleich zum Referenz-Szenario im Jahre 2020 insgesamt um 115 Mrd. kWh niedrigere (ungekoppelte) Stromerzeugung geht insbesondere zu Lasten der Stromerzeugung in Steinkohlenkraftwerken. Aber auch bei den Braunkohlen- und Erdgaskraftwerken fällt die Stromerzeugung merklich schwächer aus. Insgesamt spielen die Erdgaskraftwerke gleichwohl eine herausragende Rolle mit einem Anteil an der Nettostromerzeugung von 43 % (2020). Im übrigen folgen die strukturellen Veränderungen im 40%-Reduktions-Szenario etwa dem Verlauf, der mit dem 30%-Reduktions-Szenario vorgezeichnet worden ist.

Gegenüber dem 30%-Reduktions-Szenario können der Energieeinsatz zur Stromerzeugung wie die damit einhergehenden CO₂-Emissionen im 40%-Reduktions-Szenario noch einmal deutlich gesenkt werden (Tabelle 3.7-10):

- Im Vergleich zum Referenz-Szenario wird der Energieverbrauch um rund 590 PJ (-13 %) im Jahre 2005 und um fast 1 200 PJ (-31 %) im Jahre 2020 niedriger sein.
- Aufgrund der insgesamt tendenziell weniger emissionsintensiven Erzeugungsstruktur wird das Niveau der CO₂-Emissionen des Referenz-Szenarios im 40%-Reduktions-szenario im Jahre 2005 um 59 Mio. t oder um 22 % sowie im Jahre 2020 um 119 Mio. t oder um 44 % unterschritten. Gegenüber 1990 (1995) bedeutet das bis 2005 einen Rückgang um 29 % (-22 %) und bis 2020 fast eine Halbierung (-44 %).

Über alle Jahre hinweg wird im 40%-Reduktions-Szenario - wie in den anderen Szenarien - die Braunkohlenverstromung am meisten zur Entstehung der CO₂-Emissionen beitragen. Dagegen werden die Emissionen aus der Steinkohlenverstromung, die in den Ausgangsjahren 1990 und 1995 an zweiter Stelle hinter der Braunkohle rangierten, gegen Ende des Betrachtungszeitraumes von den erdgasbedingten CO₂-Emissionen übertroffen (Abbildung 3.7-1).

Insgesamt nimmt die Emissionsintensität der Stromerzeugung - gemessen an den CO₂-Emissionen je Einheit (ungekoppelter) Nettostromerzeugung - im 40%-Szenario deutlich ab, und zwar von rund 690 g CO₂/kWh (1990) und 610 g CO₂/kWh (1995) über etwa 480 g CO₂/kWh (2005) auf knapp 400 g CO₂/kWh (2020).

Unter der Voraussetzung, daß die dem 40%-Reduktions-Szenario deutlich rückläufige - durch die Entwicklung in den Endenergiesektoren aber praktisch vorgegebene - Stromnachfrage tatsächlich eintritt, dürfte der strukturellen Anpassung auf der Stromangebotsseite schon aus ökonomischen Gründen keine grundlegenden Hemmnisse entgegenstehen. Eine schon beim 30%-Reduktions-Szenario erwähnte CO₂-/Energiesteuer dürfte dazu zusätzliche Impulse geben. Es erscheint sogar keinesfalls als ausgeschlossen, den Stromerzeugungsbeitrag der besonders emissionsreichen Braunkohle durch den Einsatz eines entsprechend ausgestalteten Steuerregimes noch weiter als im 40%-Reduktions-Szenario zu senken. Immerhin könnten die CO₂-Emissionen durch den Ersatz von 10 Mrd. kWh auf Braunkohlenbasis durch eine emissionsfreie Stromerzeugung um rund

10 Mio. t gesenkt werden; bei einem Ersatz durch Erdgasverstromung bliebe immer noch ein spezifisches Minderungspotential von etwa 5 bis 6 Mio. t CO₂.

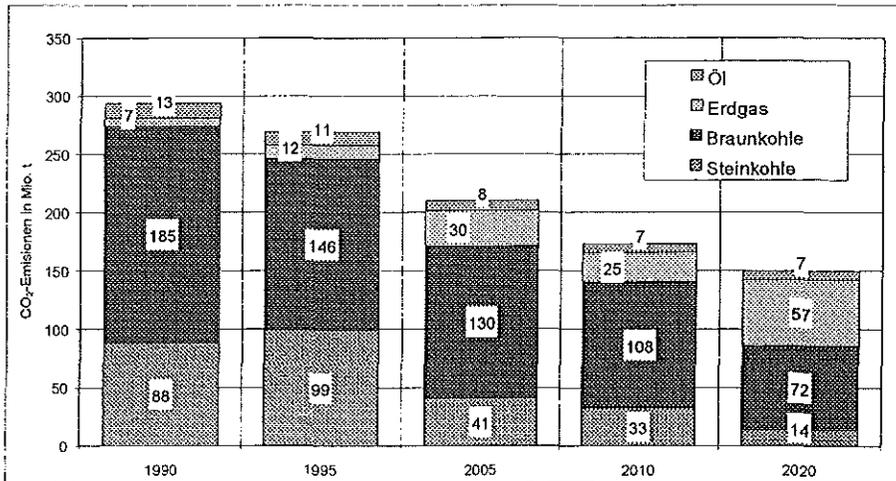
Tabelle 3.7-10:

Entwicklung des Energieeinsatzes zur Stromerzeugung (ohne KWK-Anlagen) und der damit verbundenen direkten CO₂-Emissionen im 40%-Reduktions-Szenario

	1990	1995	2005	2010	2020
	Energieverbrauch in PJ				
	40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung				
Insgesamt	4576	4556	4041	3489	2694
dav.: Steinkohle	949	1065	440	350	150
Braunkohle	1686	1376	1184	980	650
Öl	96	83	29	18	9
Erdgas	128	219	537	449	1013
Kernenergie	1565	1655	1628	1445	556
Wind	0	6	45	66	115
Sonne	0	0	1	2	3
Wasser	66	71	74	81	90
Sonstige	86	81	102	100	109
	Abweichungen vom Referenz-Szenario				
Insgesamt			-593	-1042	-1195
dav.: Steinkohle			-607	-665	-656
Braunkohle			-45	-255	-470
Öl			-30	-24	-19
Erdgas			66	-146	-170
Kernenergie			0	0	0
Wind			5	12	34
Sonne			0	0	0
Wasser			3	6	8
Sonstige			16	30	77
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t				
40%-Reduktions-Szenario	294	269	210	173	149
30%-Reduktions-Szenario	294	269	234	212	172
Referenz-Szenario	294	269	269	271	268
Modell-Basis-Szenario	294	269	249	247	232
Abweichungen des 40%-Reduktions-Szenarios vom Referenz-Szenario			-59	-98	-119
Abweichungen des 40%-Reduktions-Szenarios vom Modell-Basis-Szenario			-39	-74	-82
Nachrichtlich: 40%-Reduktions-Szenario bei der Szenariovariante im Verkehr			212	179	161
Abweichungen in den Summen durch Rundungen.					

Abbildung 3.7-1:

Struktur der CO₂-Emissionen durch die Stromerzeugung (ohne KWK-Anlagen) nach Energieträgern im 40%-Reduktions-Szenario



3.7.5 Fazit

Die CO₂-Emissionen im Bereich der Stromerzeugung (ohne Kraft-Wärme-Kopplung) geben innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 1990/1995 bis 2020 in allen modellseitig gerechneten Szenarien spürbar zurück (Abbildung 3.7-2). Mit erheblichen Einschränkungen trifft dies auch für das Referenz-Szenario zu, für das sich gegenüber 1990 ebenfalls noch eine Emissionsminderung ergibt; im Vergleich zu 1995 kommt es aber allenfalls zu allen in allem stagnierenden CO₂-Emissionen.

Dabei ist die unterschiedliche Entwicklung der stromerzeugungsbedingten CO₂-Emissionen weniger die Folge entsprechend voneinander abweichender Stromerzeugungsniveaus, sondern vor allem auf die in den einzelnen Szenarien verschiedenartige Stromerzeugungsstruktur zurückzuführen (Abbildung 3.7-3). Dies kommt auch darin zum Ausdruck, daß die auf die gesamte Nettostromerzeugung (ohne KWK) bezogenen spezifischen CO₂-Emissionen in den beiden Reduktionsszenarien wesentlich stärker zurückgehen als im Basis- oder im Referenz-Szenario (Abbildung 3.7-4).

Aus klimaschutzpolitischer Sicht gilt es also zunächst, Maßnahmen zur möglichst rationellen und sparsamen Stromverwendung auf Seiten der Endenergieverbraucher zu för-

dern, dann aber auf der Stromangebotsseite Anreize für eine emissionsärmere Stromerzeugungsstruktur zu geben. Aus ökonomischer Sicht ist dazu am ehesten eine CO₂-/Energiesteuer geeignet. Bei entsprechender Auslegung und Steuersätzen kann auch mit einer zielgerichteten Lenkungswirkung gerechnet werden.

Abbildung 3.7-2:

**Entwicklung der CO₂-Emissionen durch die Stromerzeugung
(ohne KWK-Anlagen) in den Szenarien**

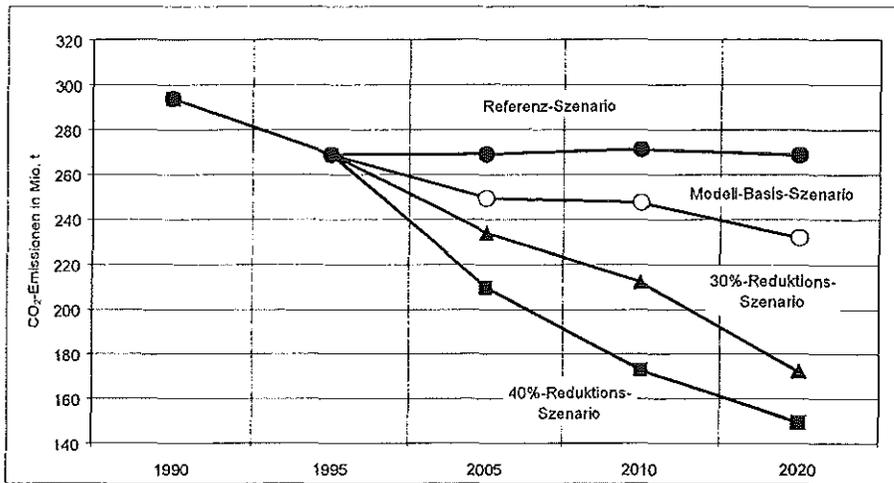


Abbildung 3.7-3:

**Entwicklung der Struktur der Stromerzeugung
(ohne KWK-Anlagen) nach Energieträgern in den Szenarien**

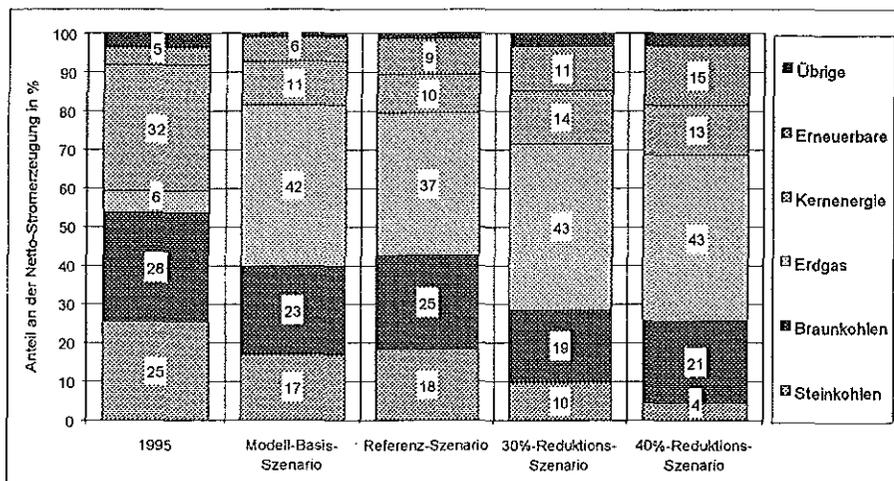
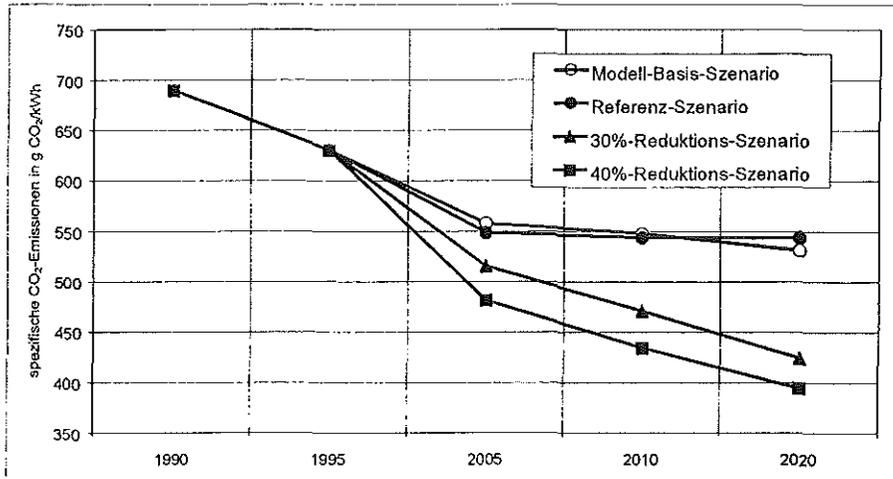


Abbildung 3.7-4:

**Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung
(ohne KWK-Anlagen) in den Szenarien**



Abschließend sei noch ein Überblick über die CO₂-Emissionen im Umwandlungssektor insgesamt gegeben (Tabelle 3.7-11), für den die Emissionen in den nicht im Einzelnen betrachteten Bereichen entweder unmittelbar aus den Modellszenarien übernommen wurden oder (wie für das Referenz-Szenario) mit Hilfe bestimmte Koeffizienten geschätzt worden sind.

Unter den Bedingungen des Modell-Basis-Szenarios würden sich danach die CO₂-Emissionen im gesamten Umwandlungsbereich bis 2005 gegenüber 1990 um 20 % und bis 2020 um fast 30 % vermindern. Im Referenz-Szenario wären es aber lediglich 14 % (bis 2005) oder 17 % (bis 2020) weniger. In den beiden Reduktionsszenarien kommt es bis dagegen 2020 zu einer kräftigen Verringerung um 44 % im 30%-Reduktions-Szenario und um reichlich 50 % im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung. Gemessen an den Emissionsvorgaben leistet der Umwandlungssektor in den Reduktionsszenarien also einen überdurchschnittlich großen Reduktionsbeitrag. Dies trifft auch für die Variante zum modellseitig abgebildeten 40%-Reduktions-Szenario für den Verkehr zu, in der aufgrund der Verlagerung des modal split zugunsten der (elektrisch betriebenen) Bahnen ein etwas höherer Stromverbrauch berücksichtigt werden muß.

Tabelle 3.7-11:

**Entwicklung der CO₂-Emissionen im Umwandlungssektor insgesamt
in den Szenarien**

	1990	1995	2005	2010	2020	1990/05	1990/20
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t					Veränderungen in %	
	Stromerzeugung (ohne KWK)						
Modell-Basis-Szenario			249	247	232	-15	-21
Referenz-Szenario			269	271	268	-8	-9
30%-Reduktions-Szenario	294	269	234	212	172	-20	-41
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung			210	173	149	-29	-49
" mit der Variante im Verkehr			212	179	161	-28	-45
	Übrige Umwandlungsbereiche (einschl. KWK)						
Modell-Basis-Szenario			54	49	36	-36	-57
Referenz-Szenario ¹⁾	84	58	58	53	44	-31	-48
30%-Reduktions-Szenario			51	46	40	-39	-53
40%-Reduktions-Szenario			41	48	28	-52	-67
	Umwandlungssektoren insgesamt						
Modell-Basis-Szenario			303	296	268	-20	-29
Referenz-Szenario			327	324	312	-14	-17
30%-Reduktions-Szenario	378	327	285	258	212	-25	-44
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung			250	221	177	-34	-53
" mit der Variante im Verkehr			252	226	189	-33	-50

¹⁾ Ohne Entlastung durch zusätzliche Nutzung erneuerbarer Energien.

4 Gesamtbetrachtung der Reduktionsszenarien im Vergleich zum Referenz-Szenario

4.1 Vorbemerkungen

In den vorstehenden Abschnitten sind die Veränderungen von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen in den einzelnen Sektoren untersucht und politische Maßnahmen diskutiert worden, die als geeignet zur Umsetzung der jeweiligen Reduktionsszenarien erscheinen. Dabei stellten die Reduktionsszenarien in ihrer quantitativen Ausprägung im wesentlichen die Ergebnisse der mit Hilfe des IKARUS-Modells entwickelten Szenarien dar.

An der einen oder anderen Stelle ergab sich bei verschiedenen Daten jedoch ein Anpassungsbedarf, so daß die Modellergebnisse und die für die einzelnen Sektoren vorgestellten Szenarien nicht in jedem Fall übereinstimmen. Allerdings sind die Differenzen in ihrer Summe gegenüber den Modelldaten nicht ergebnisverfälschend. Erinnerung sei aber daran, daß es aus verschiedenen Gründen zwischen den Modelldaten für die Ausgangsjahre 1990 und 1995 teilweise deutliche Divergenzen zu den statistisch belegbaren Daten gibt (vgl. dazu den Anhang zu diesem Bericht). Grundsätzlich wird bei den weiteren Überlegungen unter Konsistenzaspekten aber den Modelldaten gefolgt. Daher sind bei der Interpretation der Ergebnisse vielfach auch nicht die absoluten Werte, sondern vorrangig die sich im Zeitablauf ergebenden Veränderungen von vorrangigem Interesse.

Nachstehend werden die Ergebnisse aus den vorstehenden Sektorabschnitten zusammengeführt und zu einem Referenz-Szenario sowie zu einem 30%-Reduktions-Szenario und zu einem 40%-Reduktions-Szenario verdichtet.

4.2 Energieverbrauch und CO₂-Emissionen im Referenz-Szenario

Im Referenz-Szenario ist der Energieverbrauch im Jahre 2005 um fast 10 % und im Jahre 2020 um knapp 15 % niedriger als 1990. Zu diesem Rückgang tragen vor allem die (ungekoppelte) Stromerzeugung (1990 bis 2020: -931 PJ), die Industrie (-887 PJ) sowie die übrigen Umwandlungsbereiche (-453 PJ) bei. Lediglich im Verkehr ist der Energieverbrauch im Jahre 2020 höher als 1990. Hier kommt es erst nach 2010 zu einem Ver-

brauchsrückgang (Tabelle 4-1 und Abbildung 4-1). Im Vergleich zum Modell-Basis-Szenario fällt der gesamte Energieverbrauch innerhalb des Betrachtungszeitraumes um rund 5 bis 6 % höher aus.

Tabelle 4-1:

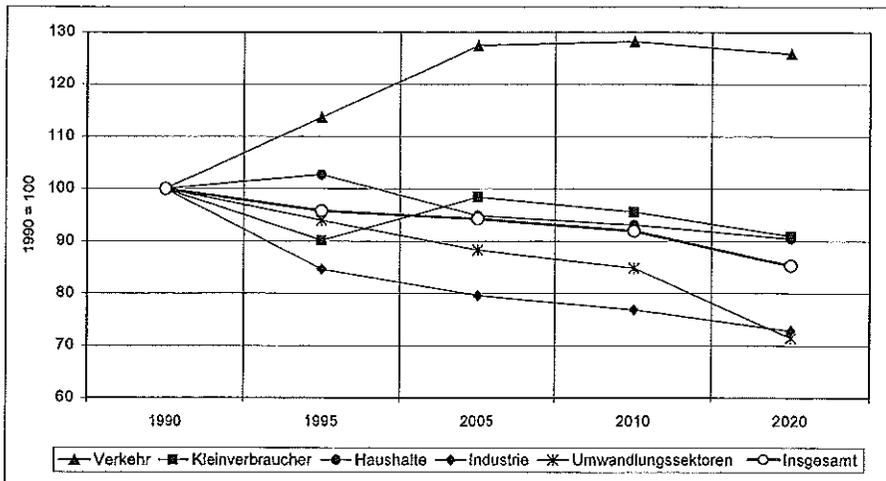
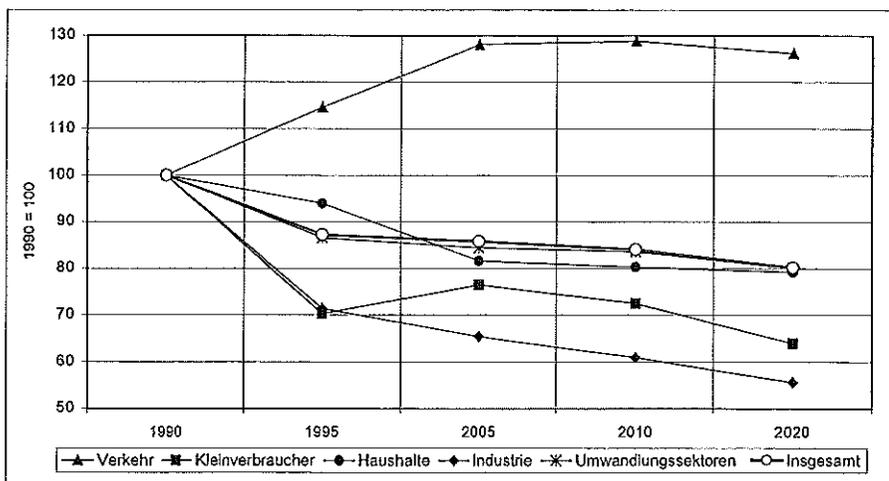
Energieverbrauch und CO₂-Emissionen nach Sektoren im Referenz-Szenario

	Ausgangswerte		Szenario-Werte			Veränderungen		
	1990	1995	2005	2010	2020	1990/ 2005	2005/ 2020	1990/ 2020
	Energieverbrauch in PJ					%		
Insgesamt	14609	14000	13773	13430	12454	-6	-10	-15
dav.: Industrie	3267	2764	2600	2510	2380	-20	-8	-27
Kleinverbraucher	1726	1556	1700	1650	1570	-2	-8	-9
Haushalte	2710	2783	2572	2524	2451	-5	-5	-10
Verkehr	2052	2332	2616	2631	2583	28	-1	26
Endenergiesektoren insgesamt	9755	9436	9488	9315	8984	-3	-5	-8
Stromerzeugung ¹⁾	3042	2892	2869	2735	2111	-6	-26	-31
Sonstige Umwandlungsbereiche ²⁾	1812	1672	1416	1380	1359	-22	-4	-25
Umwandlungssektoren insgesamt	4854	4564	4285	4116	3470	-12	-19	-29
Abweichungen des Referenz-Szenarios Insgesamt vom Modell-Basis-Szenario	in PJ		601	598	714			
	in %		4,6	4,7	6,1			
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t					%		
Insgesamt	977	852	838	821	784	-14	-6	-20
dav.: Industrie	199	142	130	121	110	-35	-15	-44
Kleinverbraucher	97	68	74	70	62	-23	-16	-36
Haushalte	158	149	129	127	125	-18	-3	-21
Verkehr	145	166	186	187	183	28	-1	26
Endenergiesektoren insgesamt	599	525	519	505	481	-13	-7	-20
Stromerzeugung ¹⁾	294	269	269	271	268	-8	0	-9
Sonstige Umwandlungsbereiche ²⁾	84	58	50	45	34	-40	-32	-59
Umwandlungssektoren insgesamt	378	327	319	316	303	-16	-5	-20
Abweichungen des Referenz-Szenarios Insgesamt vom Modell-Basis-Szenario			33	34	44	4,2	4,4	5,9
Abweichungen in den Summen durch Rundungen.								
1) Ohne KWK-Strom und ohne industrielle Stromerzeugung.- 2) Übrige Umwandlungssektoren einschließlich KWK-Strom und industrielle Kraftwirtschaft.								

Abbildung 4-1:

Energieverbrauch und CO₂-Emissionen im Referenz-Szenario

a) Energieverbrauch

b) CO₂-Emissionen

Die CO₂-Emissionen gehen von 1990 bis 2005 um 139 Mio. t oder um reichlich 14 % zurück; im Vergleich zu 1995 beträgt die Reduktion 14 Mio. t oder knapp 2 %. Von 2005 bis 2020 schwächt sich der Rückgang auf 54 Mio. t oder 6,5 % ab; insgesamt werden im Jahre 2020 die CO₂-Emissionen um 193 Mio. t oder rund 20 % niedriger sein als 1990 (Tabelle 4-1). Gegenüber dem Modell-Basis-Szenario sind sie im Referenz-

Szenario im Jahre 2005 um 33 Mio. t (4,2 %) und im Jahre 2020 um 44 Mio. t (5,9 %) höher.

Über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg weist die Industrie mit 88 Mio. t CO₂ die mit Abstand größte Emissionsminderung auf, gefolgt von den sonstigen Umwandlungsbereichen mit 50 Mio. t, den Kleinverbrauchern mit 35 Mio. t, den Haushalten mit 33 Mio. t und der Elektrizitätswirtschaft (ohne KWK) mit 25 Mio. t. Beim Verkehr ist von 1990 bis 2020 eine Emissionszunahme um 38 Mio. t zu verzeichnen (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2:

**Veränderungen der CO₂-Emissionen innerhalb des Zeitraumes
von 1990 bis 2020 nach Sektoren im Referenz-Szenario**

	1990/ 2005	2005/ 2020	1990/ 2020	1990/ 2005	2005/ 2020	1990/ 2020
	Mio. t CO ₂			Anteil an den Veränderungen in %		
Industrie	-69	-19	-88	50	36	46
Kleinverbraucher	-23	-12	-35	16	22	18
Haushalte	-29	-4	-33	21	7	17
Verkehr	41	-3	38	-29	5	-20
Summe Endenergiesektoren	-80	-38	-118	58	70	61
Stromerzeugung ¹⁾	-25	0	-25	18	1	13
Sonstige Umwandlungsbereiche ²⁾	-34	-16	-50	25	29	26
Summe Umwandlungssektoren	-59	-16	-75	42	30	39
Insgesamt	-139	-54	-193	100	100	100

1) Ohne KWK-Strom und ohne industrielle Stromerzeugung.- 2) Übrige Umwandlungssektoren einschließlich KWK-Strom und industrielle Kraftwirtschaft.

Den Klimaschutzpolitischen Zielen der Bundesregierung, die CO₂-Emissionen bis 2005 gegenüber 1990 um 25 % zu senken, sowie den im Rahmen des EU-„burden sharing“ zum Kyoto-Protokoll eingegangenen Reduktionsverpflichtungen (-21 % im Mittel der Jahre 2008 bis 2012) läuft die mit dem Referenz-Szenario - aber auch mit dem Modell-Basis-Szenario - vorgezeichnete Entwicklung erheblich entgegen. Insoweit ist eine deutliche Zielverfehlung zu konstatieren. Angesichts des kurzen Zeithorizonts bis 2005 wird dies nur zu vermeiden sein, wenn es unverzüglich zur Umsetzung einer wirksamen Klimaschutzpolitik kommt. Eine solche Umsetzung ist Voraussetzung für die in den beiden folgenden Abschnitten beschriebenen Reduktionsszenarien.

4.3 Energieverbrauch und CO₂-Emissionen in den Reduktionsszenarien

4.3.1 Das 30%-Reduktions-Szenario

Anders als im Basis- und Referenz-Szenario, in denen keinerlei Emissionsbegrenzungen berücksichtigt worden sind, wird dem 30%-Reduktions-Szenario (wie dem 40%-Reduktions-Szenario, das im Abschnitt 4.3.2 beschrieben wird) direkt eine entsprechende Minderung der CO₂-Emissionen bis 2020 (30 % bis 2020, 20 % bis 2005) vorgegeben. Insoweit bewegen sich auch die gesamten für dieses Szenario ermittelten CO₂-Emissionen auf diesem Pfad.²³

Damit verbunden ist ein Rückgang des gesamten Energieverbrauchs von 1990 bis 2005 um knapp 11 % und bis 2020 um fast 23 % (Tabelle 4-3 und Abbildung 4-2). Wie im Referenz-Szenario sind auch im 30%-Reduktions-Szenario die Elektrizitätswirtschaft (ohne KWK) und die Industrie besonders stark an der Verringerung des Energieverbrauchs beteiligt. Auch in diesem Szenario weist lediglich der Verkehr einen Verbrauchsanstieg auf (1990 bis 2020: +24 %).

Gegenüber dem Referenz-Szenario gibt es im 30%-Reduktions-Szenario die folgenden Abweichungen:

- Der gesamte Energieverbrauch ist im Jahre 2005 um reichlich 5 %, im Jahre 2010 um knapp 7 % und im Jahre 2020 um gut 9 % niedriger.
- Die CO₂-Emissionen unterschreiten diejenigen im Referenz-Szenario um 57 Mio. t (2005), 81 Mio. t (2010) und 120 Mio. t (2020).

Mit einem Rückgang gegenüber 1990 um 196 Mio. t (rund 20 %) bis 2005 und um 313 Mio. t (32 %) bis 2020 folgen die CO₂-Emissionen insgesamt dem vorgegebenen Ver-

²³ Die Abweichungen der in Tabelle 4-3 (und unten Tabelle 4-5) ausgewiesenen Veränderungen der CO₂-Emissionen von der "exakten" Reduktionsvorgabe sind darauf zurückzuführen, daß in einigen Fällen bei den sektorspezifischen Betrachtungen zu den Reduktionsszenarien leichte Datenanpassungen vorgenommen worden sind, die die Veränderungsdaten gegenüber 1990 geringfügig beeinflussen.

lauf. Dabei sind allerdings die Veränderungsraten (Tabelle 4-3) wie das Veränderungsvolumen (Tabelle 4-4) aus sektoraler Sicht sehr unterschiedlich.

Tabelle 4-3:

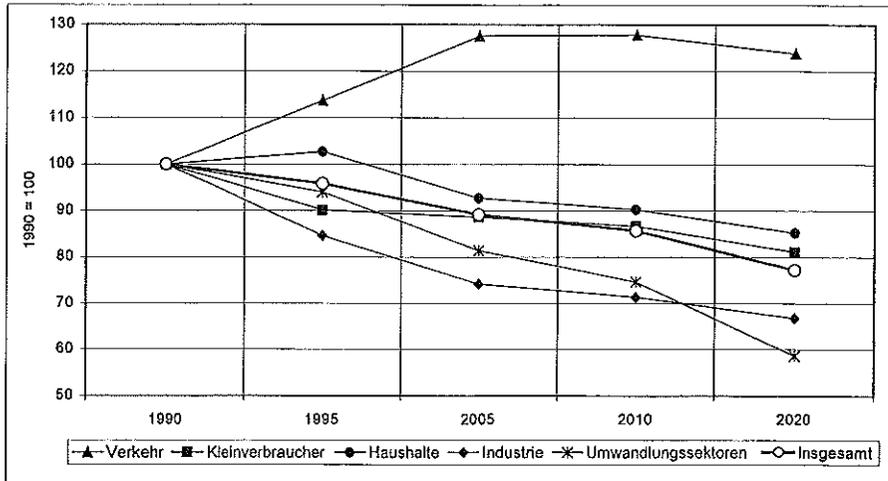
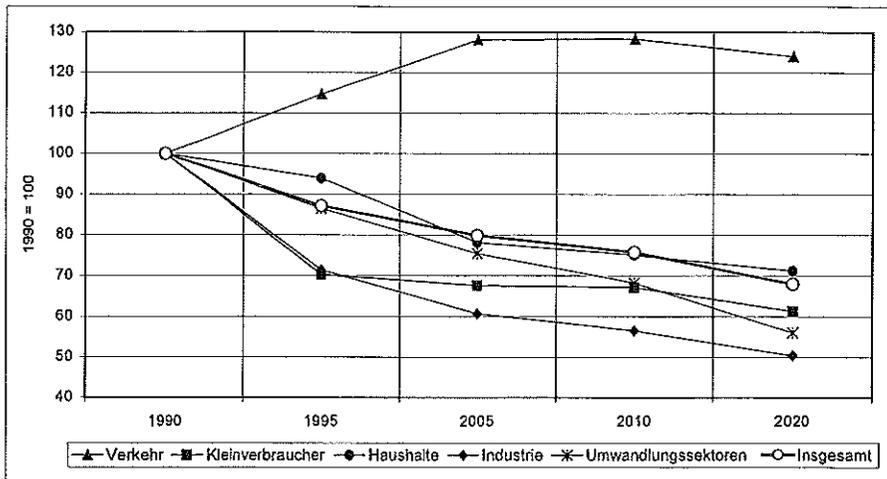
**Energieverbrauch und CO₂-Emissionen nach Sektoren
im 30%-Reduktions-Szenario**

	Ausgangswerte		Szenario-Werte			Veränderungen		
	1990	1995	2005	2010	2020	1990/ 2005	2005/ 2020	1990/ 2020
	Energieverbrauch in PJ					%		
Insgesamt	14609	14000	13034	12518	11279	-11	-13	-23
dav.:Industrie	3267	2764	2424	2332	2183	-26	-10	-33
Kleinverbraucher	1726	1556	1530	1496	1400	-11	-8	-19
Haushalte	2710	2783	2513	2446	2309	-7	-8	-15
Verkehr	2052	2332	2616	2621	2539	28	-3	24
Endenergiesektoren insgesamt	9755	9436	9083	8895	8431	-7	-7	-14
Stromerzeugung ¹⁾	3042	2892	2631	2344	1553	-14	-41	-49
Sonstige Umwandlungsbereiche ²⁾	1812	1672	1320	1279	1295	-27	-2	-29
Umwandlungssektoren insgesamt	4854	4564	3951	3623	2847	-19	-28	-41
Abweichungen des 30%-Reduktions-Szenario insgesamt vom Referenz-Szenarios insgesamt	in PJ		-739	-912	-1175			
	in %		-5,4	-6,8	-9,4			
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t					%		
Insgesamt	977	852	781	740	664	-20	-15	-32
dav.:Industrie	199	142	121	112	100	-39	-17	-50
Kleinverbraucher	97	68	66	65	60	-32	-9	-39
Haushalte	158	149	124	119	113	-22	-9	-29
Verkehr	145	166	186	186	180	28	-3	24
Endenergiesektoren insgesamt	599	525	496	482	452	-17	-9	-25
Stromerzeugung ¹⁾	294	269	234	212	172	-20	-26	-41
Sonstige Umwandlungsbereiche ²⁾	84	58	51	46	40	-39	-23	-53
Umwandlungssektoren insgesamt	378	327	285	258	212	-25	-26	-44
Abweichungen des 30%-Reduktions-Szenarios insgesamt vom Referenz-Szenarios insgesamt			-57	-81	-120	-6,8	-9,9	-15,3
Abweichungen in den Summen durch Rundungen.								
1) Ohne KWK-Strom und ohne industrielle Stromerzeugung.- 2) Übrige Umwandlungssektoren einschließlich KWK-Strom und industrielle Kraftwirtschaft.								

Abbildung 4-2:

Energieverbrauch und CO₂-Emissionen im 30%-Reduktions-Szenario

a) Energieverbrauch

b) CO₂-Emissionen

Den größten absoluten Minderungsbeitrag leistet im 30%-Reduktions-Szenario die Elektrizitätswirtschaft (1990 bis 2020: -121 Mio. t) noch vor der Industrie (-98 Mio. t), den Haushalten und sonstigen Umwandlungsbereichen (jeweils -45 Mio. t) und den Kleinverbrauchern (-38 Mio. t). Die verkehrsbedingten Emissionen steigen mit 41 Mio. t oder 28 % bis 2005 selbst im 30%-Reduktions-Szenario zunächst noch immer stark.

Erst in der zweiten Teilperiode sinken sie um 6 Mio. t, so daß es in diesem Sektor insgesamt zu einer Zunahme von 35 % kommt.

Tabelle 4-4:

**Veränderungen der CO₂-Emissionen innerhalb des Zeitraumes
von 1990 bis 2020 nach Sektoren im 30%-Reduktions-Szenario**

	1990/ 2005	2005/ 2020	1990/ 2020	1990/ 2005	2005/ 2020	1990/ 2020
	Mio. t CO ₂			Anteil an den Veränderungen in %		
Industrie	-78	-20	-98	40	18	31
Kleinverbraucher	-31	-6	-38	16	5	12
Haushalte	-35	-11	-45	18	9	15
Verkehr	41	-6	35	-21	5	-11
Summe Endenergiesektoren	-103	-44	-147	53	37	47
Stromerzeugung ¹⁾	-60	-62	-121	31	53	39
Sonstige Umwandlungsbereiche ²⁾	-33	-12	-45	17	10	14
Summe Umwandlungssektoren	-93	-73	-166	47	63	53
Insgesamt	-196	-117	-313	100	100	100

1) Ohne KWK-Strom und ohne industrielle Stromerzeugung. - 2) Übrige Umwandlungssektoren einschließlich KWK-Strom und industrielle Kraftwirtschaft.

4.3.2 Das 40%-Reduktions-Szenario²⁴

Entsprechend der Vorgabe sinken die CO₂-Emissionen im 40%-Reduktions-Szenario bis 2005 im Vergleich zu 1990 um ein Viertel und bis 2020 um rund zwei Fünftel. Wegen der Änderungen der Energieträgerstrukturen zugunsten weniger emissionsintensiver Brennstoffe geht der Energieverbrauch demgegenüber deutlich langsamer zurück; im Jahre 2005 ist er um 14 % und im Jahre 2020 um 30 % niedriger als 1990. Den relativ stärksten Verbrauchsrückgang weisen in diesem Szenario die Elektrizitätswirtschaft (ohne KWK), dann aber schon die privaten Haushalte, die sonstigen Umwandlungsbereiche sowie die Industrie und schließlich die Kleinverbraucher auf. Ähnlich stark wie im 30%-Reduktions-Szenario steigt im modellseitig gerechneten 40%-Reduktions-Szenario wiederum der verkehrsbedingte Energieverbrauchs. Legt man dafür aber die Berechnungen entsprechend der weiter oben skizzierten Variante zugrunde, so könnte der Energie-

²⁴ Es sei daran erinnert, daß in diesem Kapitel lediglich das 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung behandelt wird.

verbrauch im Verkehrssektor nach einem vorübergehenden Anstieg am Ende des Betrachtungszeitraumes wieder etwa auf das Ausgangsniveau im Jahre 1990 fallen (Tabelle 4-5 und Abbildung 4-3).

Tabelle 4-5:

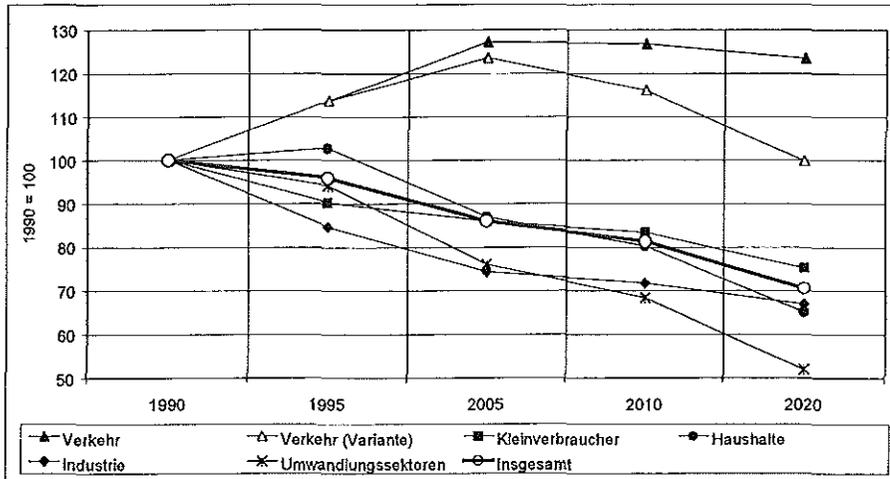
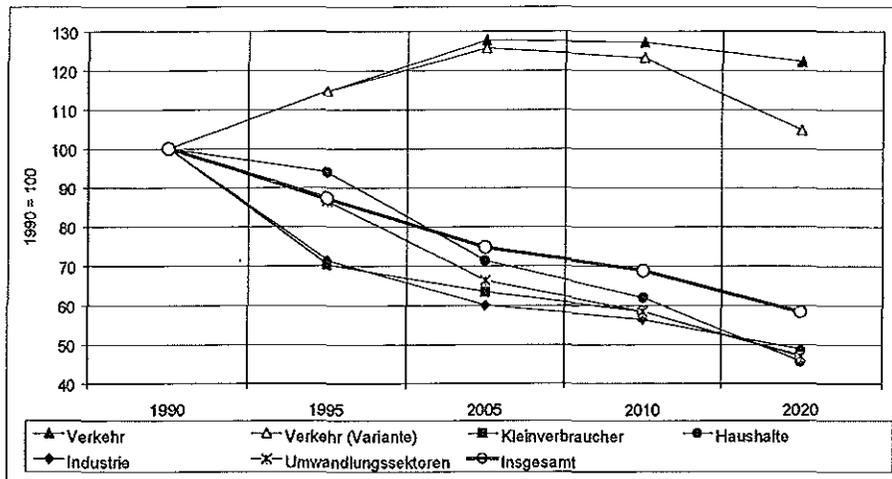
**Energieverbrauch und CO₂-Emissionen nach Sektoren
im 40%-Reduktions-Szenario**

	Ausgangswerte		Szenario-Werte			Veränderungen		
	1990	1995	2005	2010	2020	1990/ 2005	2005/ 2020	1990/ 2020
	Energieverbrauch in PJ					%		
Insgesamt	14609	14000	12556	11865	10294	-14	-18	-30
dav.: Industrie	3267	2764	2424	2340	2182	-26	-10	-33
Kleinverbraucher	1726	1556	1483	1439	1296	-14	-13	-25
Haushalte	2710	2783	2355	2173	1762	-13	-25	-35
Verkehr	2052	2332	2608	2599	2531	27	-3	23
Endenergiesektoren insgesamt	9755	9436	8870	8551	7771	-9	-12	-20
Stromerzeugung ¹⁾	3042	2892	2473	2055	1330	-19	-46	-56
Sonstige Umwandlungsbereiche ²⁾	1812	1672	1213	1260	1192	-33	-2	-34
Umwandlungssektoren insgesamt	4854	4564	3686	3314	2523	-24	-32	-48
Abweichungen des 40%-Reduktions-Szenario insgesamt vom Referenz-Szenarios insgesamt	in PJ		-1217	-1565	-2160			
	in %		-8,8	-11,7	-17,3			
Nachrichtlich: Variante zum 40%-Reduktions-Szenario im Verkehrssektor								
Summe Verkehr	2052	2332	2533	2380	2047	23	-19	0
	CO ₂ -Emissionen in Mio. t					%		
Insgesamt	977	852	729	672	569	-25	-22	-42
dav.: Industrie	199	142	119	112	97	-40	-19	-51
Kleinverbraucher	97	68	62	57	46	-37	-26	-53
Haushalte	158	149	113	98	72	-29	-36	-54
Verkehr	145	166	185	184	177	28	-4	22
Endenergiesektoren insgesamt	599	525	478	451	392	-20	-18	-35
Stromerzeugung ¹⁾	294	269	210	173	149	-29	-29	-49
Sonstige Umwandlungsbereiche ²⁾	84	58	41	48	28	-52	-32	-67
Umwandlungssektoren insgesamt	378	327	250	221	177	-34	-29	-53
Abweichungen des 40%-Reduktions-Szenarios insgesamt vom Referenz-Szenarios insgesamt			-109	-150	-215	-13,0	-18,2	-27,4
Nachrichtlich: Variante zum 40%-Reduktions-Szenario im Verkehrssektor								
Summe Verkehr	145	166	180	167	139	24	-23	-4
Abweichungen in den Summen durch Rundungen.								
1) Ohne KWK-Strom und ohne industrielle Stromerzeugung. - 2) Übrige Umwandlungssektoren einschließlich KWK-Strom und industrielle Kraftwirtschaft.								

Abbildung 4-3:

Energieverbrauch und CO₂-Emissionen im 40%-Reduktions-Szenario

a) Energieverbrauch

b) CO₂-Emissionen

Im Vergleich zum Referenz-Szenario ergeben sich im 40%-Reduktions-Szenario die folgenden Abweichungen:

- Der gesamte Energieverbrauch im Jahre 2005 um knapp 9 %, im Jahre 2010 um fast 12 % und im Jahre 2020 um reichlich 17 % niedriger.
- Die CO₂-Emissionen fallen gegenüber dem Referenz-Szenario um 109 Mio. t (2005), 150 Mio. t (2010) und 215 Mio. t (2020) geringer aus.

Mit einem Rückgang gegenüber 1990 um 248 Mio. t bis 2005 und um fast 410 Mio. t bis 2020 entsprechen die CO₂-Emissionen insgesamt den Emissionsvorgaben. Zwischen den einzelnen Sektoren weichen die Veränderungsdaten (Tabelle 4-3) wie das Veränderungsvolumen (Tabelle 4-4) auch in diesem Szenario erheblich voneinander ab.

Tabelle 4-6:

**Veränderungen der CO₂-Emissionen innerhalb des Zeitraumes
von 1990 bis 2020 nach Sektoren im 40%-Reduktions-Szenario**

	1990/ 2005	2005/ 2020	1990/ 2020	1990/ 2005	2005/ 2020	1990/ 2020
	Mio. t CO ₂			Anteil an den Veränderungen in %		
Industrie	-80	-22	-102	32	14	25
Kleinverbraucher	-36	-16	-51	14	10	13
Haushalte	-45	-41	-86	18	25	21
Verkehr	40	-8	32	-16	5	-8
Summe Endenergiesektoren	-120	-87	-207	49	54	51
Stromerzeugung ¹⁾	-84	-60	-144	34	38	35
Sonstige Umwandlungsbereiche ²⁾	-44	-13	-57	18	8	14
Summe Umwandlungssektoren	-128	-73	-201	51	46	49
Insgesamt	-248	-160	-408	100	100	100
Nachrichtlich: Variante zum 40%-Reduktions-Szenario im Verkehrssektor						
Summe Verkehr	35	-41	-6	x	x	x
1) Ohne KWK-Strom und ohne industrielle Stromerzeugung.- 2) Übrige Umwandlungssektoren einschließlich KWK-Strom und Industrielle Kraftwirtschaft.						

Den größten absoluten Minderungsbeitrag leistet im 40%-Reduktions-Szenario die Elektrizitätswirtschaft (1990 bis 2020: -144 Mio. t) vor der Industrie (-102 Mio. t), den Haushalten -86 Mio. t), den sonstigen Umwandlungsbereichen (-57 Mio. t) und den Kleinverbrauchern (-51 Mio. t). Die direkten CO₂-Emissionen des Verkehrs nehmen nach den Modellrechnungen bis 2005 erneut kräftig zu, und zwar um 40 Mio. t. Danach gehen sie bis 2020 um 8 Mio. t zurück; über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg kommt es also noch immer zu einem Anstieg um 32 Mio. t. Erst unter Bedingungen, wie sie in der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario für den Verkehr beschrieben worden sind, ließen sich die CO₂-Emissionen in diesem Sektor bis 2020 aber wieder etwas unter das 1990er Emissionsniveau senken. Gegenüber dem modellseitig gerechneten 40%-Reduktions-Szenario könnten dann die CO₂-Emissionen um zusätzlich um 5 Mio. t im

Jahre 2005, 17 Mio. t im Jahre 2010 und 38 Mio. t im Jahre 2020 gesenkt oder aber die Reduktionsanstrengungen in anderen Sektoren entsprechend entlastet werden.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der zuvor diskutierten Szenarien in den Abbildungen 4-4 und 4-5 gegenübergestellt.

Abbildung 4-4:

Entwicklung des Energieverbrauchs in den Szenarien

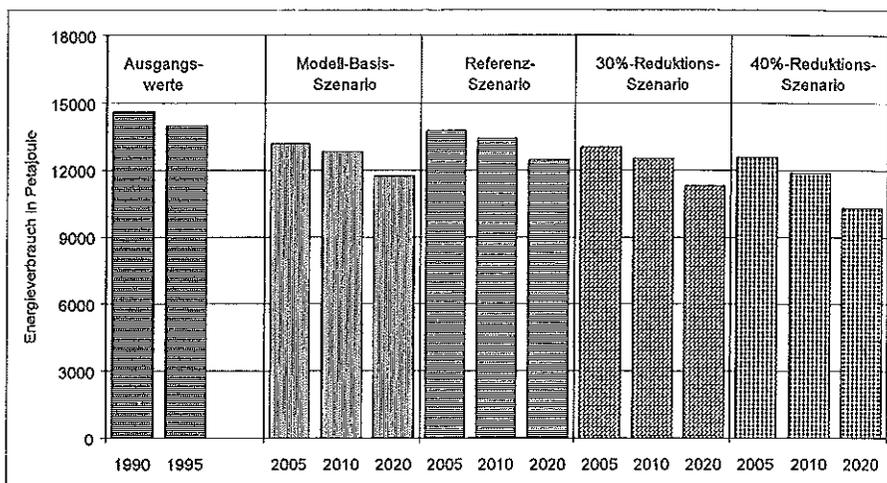
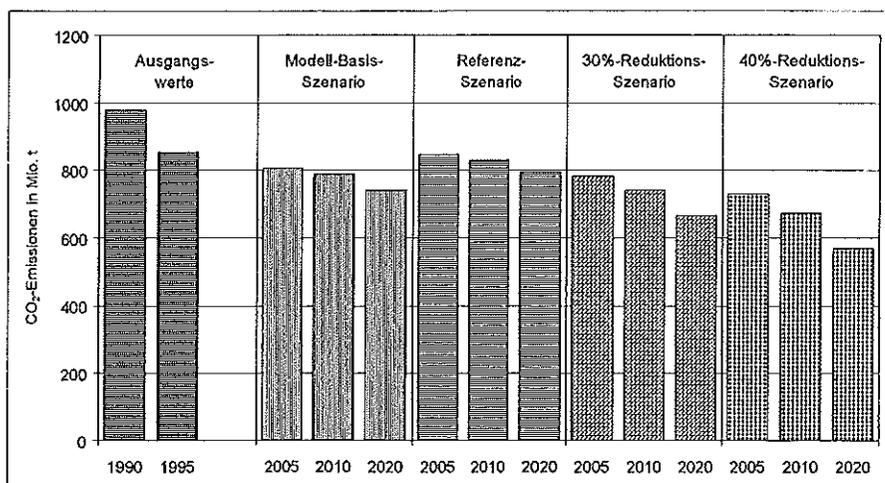


Abbildung 4-5:

Entwicklung der CO₂-Emissionen in den Szenarien



4.4 Zur Interpretation der quantitativen Ergebnisse

Die in den vorhergehenden Abschnitten dargestellten Szenarien beruhen im Hinblick auf ihre Datenbasis im wesentlichen auf den Angaben, die im LP-Modell verwendet werden. An anderer Stelle wurde schon darauf aufmerksam gemacht, daß diese Modellangaben teilweise deutlich abweichen von den amtlichen und halbamtlichen Daten aus der Energiestatistik, aber auch von den offiziellen Emissionsdaten etwa des Umweltbundesamtes. Einige Details zu diesen Datendiskrepanzen sind im Anhang aufgeführt. In einigen Fällen wurden bei der Entwicklung der sektoralen Szenarien Modifikationen der Modellangaben vorgenommen, um so in bessere Übereinstimmung mit den statistischen Daten zu gelangen.

Aus zwei Gründen wurde aber darauf verzichtet, eine vollständige Datenübereinstimmung herzustellen:

1. Dies hätte zu stark von außen in die Systematik des Modells eingegriffen, ohne daß dies noch in seinen Auswirkungen nachvollzogen werden könnte.
2. Der Erkenntnisgewinn wäre vergleichsweise gering gewesen, weil es bei den Ergebnissen der Modellrechnungen weniger auf die exakten absoluten Werte als auf die jeweiligen Veränderungen ankommt.

Schließlich ist auch zu bedenken, daß die Datendiskrepanzen nicht derart gravierend sind, daß dadurch die Ergebnisse "verfälscht" worden wären. Es muß nur im Auge behalten werden, daß die Modelldaten für die Basisjahre 1990 und 1995 nicht mit den "Realdaten" verwechselt werden sollten.

Mehr noch als die hier angesprochene Datenproblematik sind bei der Interpretation der quantitativen Ergebnisse insbesondere für die Reduktionsszenarien die demographischen und ökonomischen Rahmendaten für die Szenariorechnungen sowie die Philosophie und die Konstruktionsprinzipien des hier verwendeten LP-Modells zu beachten.

Speziell für den Verkehrssektor räumt das Modell Anpassungsstrategien einen bei weitem zu geringen Spielraum ein. Das hat dann zur Konsequenz, daß die Anpassungslasten

bei sehr starken Emissionsrestriktionen in vermutlich zu starkem Ausmaß auf die anderen Sektoren verlagert und insgesamt zu hohe Vermeidungskosten ausgewiesen werden.

4.5 Kostenaspekte der Emissionsminderung

Optimierungsmodelle, wie hier in dieser Analyse angewandt, haben den Vorteil, daß sie theoretisch die kostenminimale Lösung aller CO₂-Emissionsminderungsmaßnahmen suchen und die dazu gehörenden Gesamtkosten ermitteln. Dieser Ansatz beruht aber auf einer Reihe wichtiger Annahmen; es wird insbesondere unterstellt, daß die Kosten für die einzelnen technischen Reduktionsmaßnahmen hinreichend genau geschätzt sind und daß in allen Sektoren die jeweils zur Verfügung stehenden Optionen vollständig erfaßt sind. Während die erste Annahme durch einen intensiven Vergleich mit unabhängig entstandenen Datenbanken²⁵ oder durch einen intensiven Review-Prozeß unter Beteiligung entsprechender Fachleute überprüfbar ist, läßt sich die zweite Annahme anhand der sektoralen Durchschnittskosten eines Reduktions-Szenarios überprüfen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse und der berechneten Kosten dieser Modelltypen sind allerdings folgende Fakten zu beachten, die die Aussagen der Rechenergebnisse insbesondere in Hinblick auf die Höhe der CO₂-Vermeidungskosten einschränken:

- *Organisatorische und verhaltensbedingte Maßnahmen* (z.B. Stoßbelüftung statt Kippen von Fenstern, Abschalten von Absauganlagen in Pausen, Geschwindigkeitsbegrenzungen im Straßenverkehr), die u.U. sehr kosteneffizient bzw. rentabel sein können, werden im Optimierungsmodell (bis auf ganz wenige Ausnahmen) nicht berücksichtigt. Die fast ausschließliche Konzentration auf investive Maßnahmen auch in den Endenergieverbrauchssektoren führt deshalb tendenziell zu höheren CO₂-Vermeidungskosten, als man in Wirklichkeit zu erwarten hätte.²⁶ Dies dürfte insbesondere für die stark steigenden Grenzkosten im 40%-Reduktions-Szenario gelten,

²⁵ Hierfür wurden die IKARUS-Daten u.a. mit den niederländischen Icarus-Daten und denjenigen von ETSU, Harvell, Großbritannien verglichen und die zum Teil erheblichen Kostenabweichungen bei einzelnen Reduktionsmaßnahmen analysiert.

²⁶ Auf diesen Fall scheinen auch die relativ hohen durchschnittlichen spezifischen Vermeidungskosten beim Verkehr hinzuweisen.

da bei der Verfolgung einer solchen Zielsetzung auch organisatorische Maßnahmen und Verhaltensänderungen eine größere Rolle spielen würden.

- Da LP-Modelle keine Hemmnisse rationeller Energieanwendung oder von Energiesubstitutionen simulieren (können)²⁷, sind die *gesamtenenergiewirtschaftlichen Effizienzvorteile* des Modell-Basis-Szenarios gegenüber dem Referenz-Szenario modellendogen nicht ermittelbar. Ausgehend vom Referenz-Szenario sind die Effizienzverbesserungen möglicherweise erheblich; ihre Bedeutung ist aber nicht unumstritten: Einige Autoren und Institutionen unterstellen aufgrund ihrer Beobachtungen ein gehemmtes Energieeinsparpotential von 10 bis 20 %, (vgl. Enquête-Kommission 1990, Ravel 1994, IEA 1995, Jochem, Bradke 1996, de Beer et al. 1998, Hennicke et al. 1998, Neyer, Strebel 1996). Andere Autoren, insbesondere aus dem angelsächsischen Sprachraum, argumentieren, daß der weitaus größte Teil (scheinbar) nicht realisierter Effizienzpotentiale aufgrund hoher Transaktionskosten gar nicht rentabel sei. Unterstellt man ein "no-regret"-Potential von 5 % bis 10 % würde dies einen Betrag von vielleicht 1 bis 2 Mrd. DM vermeidbare Energiekosten pro Jahr für Deutschland ausmachen und damit dieselbe Größenordnung erreichen, die durch das LP-Modell für das 30%-Reduktions-Szenario für 2020 berechnet wurde. Insoweit der energiewirtschaftliche Beitrag der "no regrets" nicht von LP-Modellen ausgewiesen wird, kommt es zu einer systematischen Überschätzung der angegebenen durchschnittlichen Emissionsminderungskosten.

Die in Abbildung 4-6 ausgewiesenen durchschnittlichen CO₂-Vermeidungskosten der vier Szenarien sind unter den o.g. Vorbehalten zu interpretieren; dabei sind die Kostenreduktionen im Primärsektor (inländische Energieproduktion und Energieimporte) bereits verrechnet:

- Dem *Modell-Basis-Szenario* werden per Definition keine Vermeidungskosten zugerechnet. Die Energienutzungs- und -versorgungsstrukturen können sich hier ohne Emissions-Restriktion nach dem Gesichtspunkt minimaler Gesamtkosten bei gegebener Nachfrage nach Energiedienstleistungen bzw. Nutzenergie einstellen.
- Das *30%-Reduktions-Szenario* führt zu relativ geringen durchschnittlichen CO₂-Vermeidungskosten, die ab 2010 mehr und mehr zunehmen.²⁸

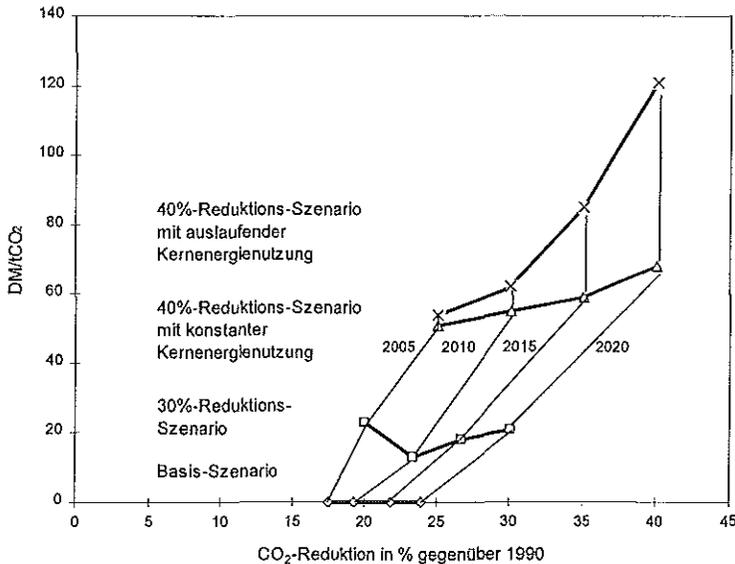
²⁷ In begrenztem Umfang ist dies allenfalls durch die exogene Setzung von „bounds“ möglich.

²⁸ Zu den höheren Kosten im Jahre 2005 vgl. Abschnitt 2.3.3.

- Auf deutlich höherem Niveau bewegen sich die CO₂-Minderungskosten in den beiden 40%-Reduktions-Szenarien. Mit auslaufender Kernenergienutzung kommt es zu einer weiteren Erhöhung der Vermeidungskosten.²⁹

Abbildung 4-6:

Durchschnittliche CO₂-Vermeidungskosten in den Reduktions-Szenarien im Vergleich zum Modell-Basis-Szenario 2005 bis 2020



Anmerkung: In der Abbildung sind die durchschnittlichen CO₂-Vermeidungskosten der Reduktions-Szenarien in den Jahren 2005, 2010, 2015 und 2020 gegenüber dem Modell-Basis-Szenario dargestellt. Gegenüber dem (nicht kostenoptimalen) Referenz-Szenario ergeben sich jeweils geringere Nettokosten; vgl. Tabelle 4-7.

Im 30 %-Reduktions-Szenario liegen die CO₂-Emissionen im Jahre 2020 um etwa 8 % niedriger als im Modell-Basis-Szenario. Man könnte vermuten, daß sich in diesem Szenario im Vergleich zum Referenzszenario der energiewirtschaftliche Nutzen der "no-regrets" und die (gegenüber dem Modell-Basis-Szenario ermittelten) Vermeidungskosten etwa kompensieren (vgl. Tabelle 4-7). Wendet man diese grobe Schätzung auf die Kosten der beiden 40%-Reduktions-Szenarien an, so würden sich die durchschnittlichen

²⁹ Hierbei ist zu berücksichtigen, daß der im Modell verwendete reale Zinssatz von 5 % Minderungsoptionen mit hohem Kapitalkostenanteil relativ günstig erscheinen läßt. Die tatsächlichen energiewirtschaftlichen Entscheidungen orientieren sich - zumal nach der Liberalisierung der Strom- und Gaswirtschaft - wegen der höheren Risiken und Rendite-Erwartungen an weitaus höheren Zinssätzen; damit gewinnen weniger kapitalintensive Minderungsoptionen an Bedeutung.

spezifischen Nettokosten in diesen Szenarien für 2010 um etwa 5 DM/t CO₂ und für 2020 um rd. 8 DM/t CO₂ reduzieren.

Tabelle 4-7:

Absolute und spezifische CO₂-Vermeidungskosten in den Reduktions-Szenarien¹⁾ für die Jahre 2010 und 2020 gegenüber dem Modell-Basis-Szenario und dem Referenz-Szenario

Art der Vermeidungskosten	30%-Reduktions-Szenario		40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität (21 GW im Jahre 2020)		40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung (7,2 GW im Jahre 2020)	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020
Insgesamt gegenüber dem Basis-Szenario (einschl. Primärsektor)						
- insgesamt in Mrd. DM	0,5	11,3	5,7	10,7	6,5	19,0
- spezifisch in DM/t CO ₂	13	21	55	68	62	121
Nettokosten ²⁾						
- insgesamt in Mrd. DM	~ 0	~ 0	5,2	9,4	6,0	17,7
- spezifisch in DM/t CO ₂	~ 0	~ 0	50	60	57	113

¹⁾ Im wesentlichen nur investive Maßnahmen, keine organisatorischen Maßnahmen.

²⁾ Nach Abzug der Kosteneinsparung durch „no regret“-Maßnahmen gegenüber dem Referenz-Szenario in Höhe von 0,5 Mrd. DM im Jahre 2010 und von 1,3 Mrd. DM im Jahre 2020.

Die für das 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung ermittelten Mehrkosten im Jahre 2020 von rund 19 Mrd. DM gegenüber dem Modell-Basis-Szenario bzw. 17,7 Mrd. DM gegenüber dem Referenz-Szenario entsprechen 0,35 % des für 2020 unterstellten Bruttoinlandsproduktes (5 220 Mrd. DM) oder knapp 1 % des BIP-Zuwachses von 1995 bis 2020 (1 940 Mrd. DM).³⁰

Angaben zu den Vermeidungskosten sind besonders bei den 40%-Reduktions-Szenarien mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Denn in diesen Szenarien würden ohne Zweifel

³⁰ Zu vergleichbaren Ergebnissen kommt eine Untersuchung, in der die CO₂-Minderungskosten bis zum Jahre 2050 untersucht wurden (Tönsing u. a. 1997). Selbst im Falle einer CO₂-Minderung um 80 % bis 2050, wie es die Enquête-Kommission (1990) empfohlen hatte, und einem Ausstieg aus der Kernenergie erhöht sich der Anteil der Kosten des gesamten Energiesystems am Bruttoinlandsprodukt infolge des unterstellten Wirtschaftswachstums von durchschnittlich 1,7 % nicht.

Forschung und Entwicklung intensiviert, um CO₂-Minderungsoptionen zu verbessern, und es dürften auch in erheblichem Umfang Skaleneffekte energieeffizienter und kohlenstoffärmer technischer Lösungen erzielt werden. Insoweit derartige Effekte nicht hinreichend in dem verwendeten Datenbestand berücksichtigt werden oder in einigen Sektoren (insbesondere Verkehr und Industrie) kostengünstige Vermeidungsoptionen nicht vollständig modellmäßig erfaßt sind, werden die Vermeidungskosten systematisch überschätzt.

In der Zusammenschau dieser Ergebnisse lassen sich qualitativ die folgenden Schlußfolgerungen ziehen:

- Je mehr die Politik daran denkt, die Nutzung der Kernenergie auslaufen zu lassen und zugleich klimaschutzpolitische Verpflichtungen einzulösen und längerfristig für 2020 weitere CO₂-Minderungsziele in Anlehnung an die Empfehlungen der Enquête-Kommission (1990) einzugehen, desto wichtiger werden Forschung, Entwicklung und Diffusion, um zusätzliche Kostensenkungspotentiale bei der rationellen Energieverwendung und auch bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen zu eröffnen.
- Die Rolle von organisatorischen Maßnahmen sowie Verhaltensänderungen müßte in Energiesystemmodellen besser abgebildet oder durch separate Analysen präzisiert werden. Denn es ist nicht auszuschließen, daß bei Reduktionspolitiken vorrangig solche Maßnahmen in erheblichem Umfang seitens der energiewirtschaftlichen Akteure und Energieverbraucher mit relativ geringen Grenzkosten ergriffen werden könnten.
- Auf längere Sicht, d.h. mehr als 20 Jahre, dürften noch manche zusätzliche Energieeffizienzverbesserung oder Kostenreduktion durch neue Technologien bzw. Lernprozesse sowie economics of scale erreichbar sein, die in quantitativen Modellen noch nicht genügend berücksichtigt werden. Wie sehr bisher die Vermeidungskosten überschätzt werden, läßt sich kaum genau quantifizieren; aber die Tatsache, daß in den letzten 15 Jahren in hohem Umfang rentable Effizienzpotentiale realisiert wurden, obwohl die Energiepreise seit 1986 real deutlich gesunken sind, und selbst bei den gegenwärtig niedrigen Energiepreisen weiterhin rentable Energieeffizienzpotentiale bestehen, deutet darauf hin, daß die Grenzkosten häufig niedriger als vermutet

sind und daß sie sich künftig weiter reduzieren lassen, wenn die technologische Entwicklung 10 oder 15 Jahre weiter vorangeschritten sein wird.

Aus diesen Überlegungen geht letztlich hervor, daß bis zum Jahre 2020 eine CO₂-Minderung von 40 % gegenüber 1990 technologisch vorstellbar ist; sie erscheint auch als energie- und klimaschutzpolitisch erreichbar und vor dem Hintergrund der gebotenen Notwendigkeit einer signifikanten Emissionsreduktion auch unter gesamtwirtschaftlichen Aspekten als finanzierbar.

4.6 Literatur

- Enquête-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" (1990): Dritter Bericht zum Thema Schutz der Erde. BS 11/8030, Bonn 1990
- de Beer J. et al. (1998): Potential for Industrial Energy-Efficiency in the Long Term, Proefschrift, Universität Utrecht, Utrecht 1998
- Jochem, E.; Bradke, H. (1996): Energieeffizienz, Strukturwandel und Produktionsentwicklung der deutschen Industrie. in Monographien des Forschungszentrums Jülich, Bd. 19/1996
- IEA (1995): Market Barriers and the Development of New Energy Technologies. Working Party on Energy End-Use Technology. OECD Paris, March 1995
- Grubb, M. (1998): The Timing of CO₂ Emissions Abatement. An Overview of Economic Issues. Energy & Environment, Vol. 9, No. 4, Brentwood 1998, p. 399
- Hourcade, J. Ch. et al. (1998): Dynamic consisting problems behind the Kyoto protocol. Shared Analysis Project. 2nd Interim Report, Karlsruhe 1998, p. 39-62
- Tönsing, E. et al. (1997): Energieszenarien mit reduzierten CO₂-Emissionen bis 2050. in Energiewirtschaftliche Tagesfragen 47 Jg. (1997) Heft 8

5 Zusammenfassung und politische Schlußfolgerungen

Fragestellung und methodischer Ansatz der Untersuchung

Als Meilenstein ihrer Klimaschutzpolitik hatte sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt, die CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahr 2005 gegenüber 1990 um 25 % zu senken. Zur Konkretisierung der notwendigen Maßnahmen wurden im Jahr 1997 im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) entsprechende "Politiksznarien für den Klimaschutz" erarbeitet. Hierbei wurden die Analyseinstrumente verwendet, die zuvor im IKARUS-Projekt des Bundesministeriums für Forschung, Technologie, Bildung und Wissenschaft (BMBF) entwickelt worden waren.

Auf der dritten Vertragsstaatenkonferenz zur Klimarahmenkonvention im Dezember 1997 im japanischen Kyoto wurden erstmals Emissions-Reduktionsziele für den Zeitraum von 2008 bis 2012 rechtsverbindlich festgelegt. Für diesen Zeitraum hat die Bundesregierung im Rahmen des EU-"burden sharing" eine Emissionsminderung von sechs Treibhausgasen um 21 % zugesagt, während sie national nach wie vor an ihrem o.g. CO₂-Reduktionsziel für 2005 festhält.

Vor diesem Hintergrund wurde im Frühjahr 1998 der Untersuchungsauftrag des UBA erweitert mit einer Ausdehnung des Betrachtungshorizonts bis zum Jahr 2020. Gleichzeitig sollten die inzwischen veränderten Einschätzungen der künftigen gesamtwirtschaftlichen und demographischen Rahmenbedingungen in die Modellrechnungen einbezogen werden.

Anders als bei der Vorgängeruntersuchung, die sich vorrangig auf sektorbezogene Einzelanalysen stützte, steht nun die Anwendung des IKARUS-Optimierungsmodell im Vordergrund, mit dessen Hilfe aus gesamtwirtschaftlicher Sicht kostenoptimale Handlungsfelder identifiziert werden können. Dabei wird eine Reihe von Szenarien untersucht, deren Charakteristika in Übersicht 5-1 zusammengefaßt sind.

Das IKARUS-Optimierungsmodell bildet die Energieflüsse, Energietechniken, Emissionen und Kosten des gesamten Energiesystems der Bundesrepublik Deutschland ab. Dabei

wird das mathematische Verfahren der linearen Programmierung (LP) eingesetzt. Mit den LP-Modellrechnungen wird eine Energiewirtschaft beschrieben, in der die Nachfragen nach Energiedienstleistungen unter den jeweiligen CO₂-Restriktionen zu volkswirtschaftlich minimalen Kosten befriedigt werden, und zwar ohne Rücksicht auf betriebswirtschaftliche Handlungsweisen und sonstige Hemmnisse, sofern sie nicht im Modell durch bestimmte Grenzwerte (Bounds) vorgegeben sind.

Ausgehend von einem Modell-Basis-Szenario werden in einem weiteren Schritt sektorbezogene Einzelanalysen durchgeführt, in denen die „gehemmten Potentiale“ berücksichtigt werden. Das auf diesem Weg entwickelte *Referenz-Szenario* ist Ausgangspunkt für die Untersuchung von klimaschutzpolitischen Maßnahmen, die in ihrer Gesamtheit so angelegt sind, daß die jeweils vorgegebenen Emissionswerte für die *Reduktionsszenarien* unter weitgehender Berücksichtigung der mit Hilfe des LP-Modells ermittelten kostenoptimalen Handlungsfelder zu erreichen sind.

Demographische und gesamtwirtschaftliche Rahmenbedingungen

Die demographischen und gesamtwirtschaftlichen Rahmendaten beruhen im wesentlichen auf den Annahmen, die im IKARUS-Projekt Mitte 1998 festgelegt worden sind. Danach wächst die Bevölkerung von knapp 81,7 Mio. Personen im Jahre 1995 bis zum Jahre 2005 auf ein Maximum von 83,8 Mio., geht dann aber auf 81,2 Mio. im Jahre 2020 zurück. Der Wohnungsbestand steigt von fast 36 Mio. (1995) auf rund 38 Mio. in den Jahren von 2005 bis 2020. Gleichzeitig wird unterstellt, daß die Wohnungen im Durchschnitt größer werden; die gesamte Wohnungsfläche wird daher von 3,0 Mrd. m² im Jahre 1995 auf fast 3,4 Mrd. m² im Jahre 2020 zunehmen.

Hinsichtlich der Wirtschaftsentwicklung wird angenommen, daß das Bruttoinlandsprodukt im Jahresdurchschnitt in der Periode von 1995 bis 2005 um rund 2 % und im Zeitraum von 2005 bis 2020 um 1,8 % wächst. Bis 2005 wird noch ein leichter Anstieg der Zahl der Erwerbspersonen erwartet, und zwar von 38,4 Mio. im Jahre 1995 auf 38,7 Mio., der anschließend aber von einem Rückgang auf 36,6 Mio. im Jahre 2020 abgelöst würde (Tabelle 5-1).

Übersicht 5-1:

Kennzeichnung der untersuchten Szenarien**Modell-Basis-Szenario**

Das mit dem IKARUS-LP-Modell ermittelte Basisszenario beschreibt eine gesamtwirtschaftlich kostenoptimale Entwicklung ohne Vorgabe eines CO₂-Reduktionszieles. Dabei bleiben das von gesamtwirtschaftlichen Überlegungen abweichende einzelwirtschaftliche Entscheidungsverhalten sowie die in der Realität vielfältig vorfindbaren anderen Umsetzungshemmnisse für verschiedene Technologien unberücksichtigt. Energiepolitische Randbedingungen werden dem Modell exogen vorgegeben. So wird z.B. im Basisszenario keine Ausweitung der gegenwärtig installierten Kernkraftwerkskapazität zugelassen. Die maximale Betriebszeit der bestehenden Kernkraftwerke wird mit 35 Jahren angenommen.

Referenz-Szenario

Das Referenz-Szenario setzt auf dem Modell-Basis-Szenario auf und stellt in der Form sektoraler Einzelabschätzungen eine Entwicklung dar, wie sie sich unter Berücksichtigung des einzelwirtschaftlichen Entscheidungsverhaltens und anderer Hemmnisse in der Realität vollziehen könnte. Dabei werden die bereits beschlossenen klimaschutzpolitischen Maßnahmen einbezogen, es wird aber kein bestimmtes CO₂-Reduktionsziel vorgegeben.

30%-Reduktions-Szenario

Bei diesem Szenario wird dem Modell eine CO₂-Reduktion von 30 % bis zum Jahre 2020 (20 % bis 2005) bezogen auf das Emissionsniveau von 1990 vorgegeben. Ansonsten gelten die gleichen Voraussetzungen wie im Modell-Basis-Szenario.

40%-Reduktions-Szenario (mit auslaufender Kernenergienutzung)

Bei diesem Szenario wird dem Modell unter ansonsten gleichen Bedingungen wie im Modell-Basis-Szenario eine CO₂-Reduktion von 40 % bis zum Jahre 2020 (25 % bis 2005) bezogen auf das Emissionsniveau von 1990 vorgegeben. Alle Kernkraftwerke werden nach einer Betriebszeit von 35 Jahren stillgelegt und nicht durch neue ersetzt. Im Jahre 2020 sind dann 7,2 GW_{netto} in Betrieb.

Als Variante zu diesem Szenario wird bei den LP-Modellrechnungen ein

40%-Reduktions-Szenario mit (maximal) konstanter Kernenergiekapazität

betrachtet, bei dem Ersatzinvestitionen in Kernkraftwerke für die nach Ende ihrer Betriebsdauer stillzulegenden Kernkraftwerke zugelassen werden. Die heute installierte Kernkraftwerksleistung von rund 21 GW_{netto} darf dabei nicht überschritten werden.

Tabelle 5-1:

Demographische und gesamtwirtschaftliche Rahmendaten

	Einheit	Jeweilige Werte				Veränderungen in %/a	
		1995	2005	2010	2020	1995/05	2005/20
Bevölkerung	Mio.	81,7	83,8	82,9	81,2	0,3	-0,2
Zahl der Haushalte	Mio.	36,9	38,6	38,5	38,4	0,4	0,0
Wohnungen	Mio.	36,0	37,9	38,0	38,1	0,5	0,0
Wohnungsfläche	Mio. m ²	3005	3272	3313	3394	0,9	0,2
Erwerbspersonen	Mio.	38,4	38,7	38,0	36,6	0,1	-0,4
Bruttoinlandsprodukt (BIP)	Mrd. DM (95)	3276	3997	4404	5218	2,0	1,8
BIP je Einwohner	1000 DM	40,1	47,7	53,1	64,3	1,7	2,0

Ausgewählte quantitative Ergebnisse

Die zentralen Ergebnisse für die Entwicklung der CO₂-Emissionen in den untersuchten Szenarien sind der Tabelle 5-2 und den Abbildungen 5-1 bis 5-3 zu entnehmen.

Tabelle 5-2:

Entwicklung der CO₂-Emissionen in den Szenarien

	IKARUS-Ausgangswerte		Modell-Basis-Szenario	Referenz-Szenario	Reduktions-Szenarien		
					30%-Reduktion	40%-Reduktion	
						konstante Kernenergiekapazität ¹⁾	auslaufende Kernenergienutzung
CO ₂ -Emissionen in Mio. t							
	1990	1995			2005		
Industrie	199	142	119	130	121	112	119
Kleinverbraucher	97	68	72	74	66	64	62
Haushalte	158	149	126	129	124	115	113
Verkehr ²⁾	145	166	186	186	186	185	185
Umwandlungssektoren	378	327	306	319	285	256	250
Insgesamt	977	852	808	838	781	732	729
	1990	1995			2010		
Industrie	199	142	111	121	112	105	112
Kleinverbraucher	97	68	71	70	65	61	57
Haushalte	158	149	123	127	119	103	98
Verkehr ²⁾	145	166	187	187	186	185	184
Umwandlungssektoren	378	327	299	316	258	229	221
Insgesamt	977	852	790	821	740	683	672
	1990	1995			2020		
Industrie	199	142	106	110	100	91	97
Kleinverbraucher	97	68	66	62	60	56	46
Haushalte	158	149	118	125	113	84	72
Verkehr ²⁾	145	166	183	183	180	179	177
Umwandlungssektoren	378	327	273	303	212	174	177
Insgesamt	977	852	746	784	664	585	569

¹⁾ Unmodifizierte Modellergebnisse. - ²⁾ In der Tabelle sind Modellergebnisse ausgewiesen.
CO₂-Emissionen im Verkehr in der Variante zum 40%-Reduktions-Szenario: 180 Mio. t (2005), 167 Mio. t (2010) und 139 Mio. t (2020).

Abbildung 5-1:

Energieverbrauch in den Szenarien

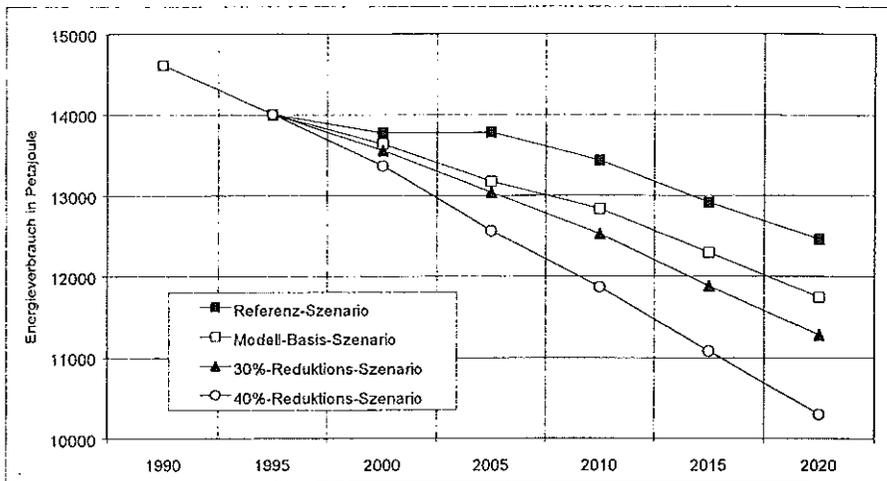
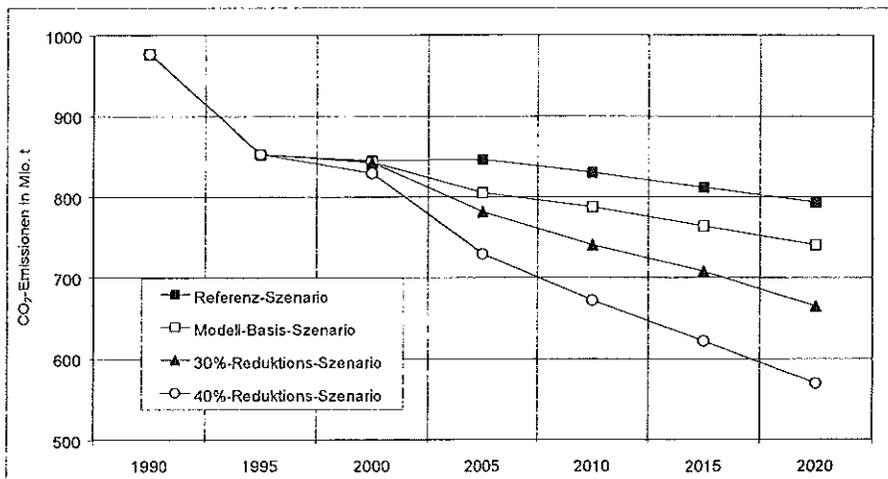


Abbildung 5-2:

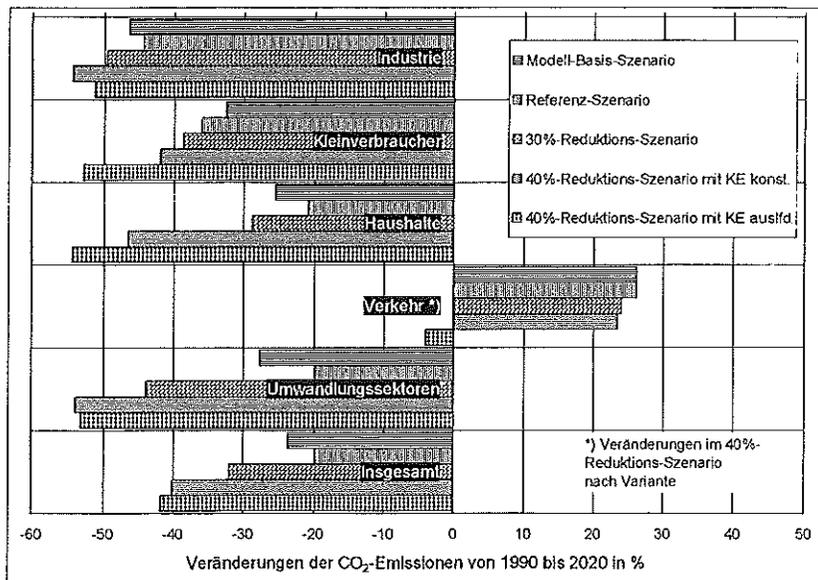
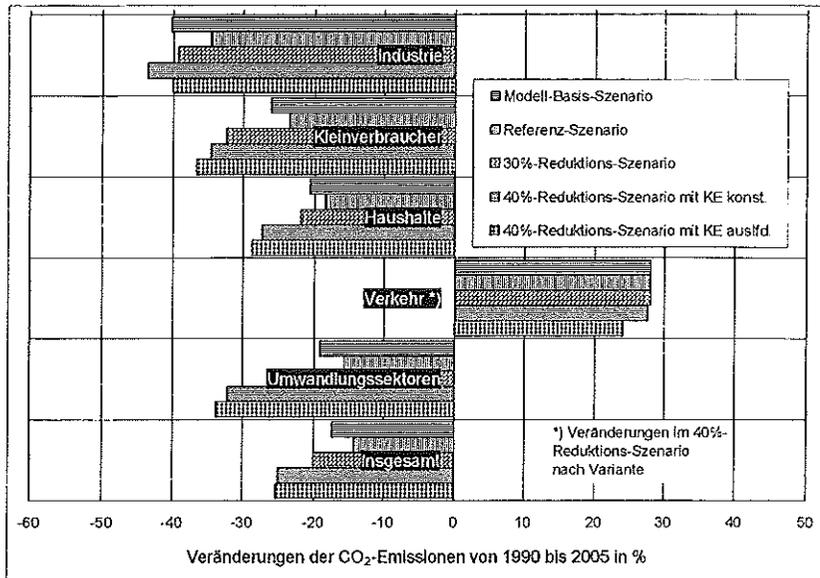
CO₂-Emissionen in den Szenarien

Im Modell-Basis-Szenario gehen die CO₂-Emissionen bis 2005 auf 808 Mio. t, bis 2010 auf 790 Mio. t und bis 2020 auf 746 Mio. t zurück; im Vergleich zu 1990 sind das rund 17 % (bis 2005), 19 % (bis 2010) und 24 % (bis 2020) weniger. Die von der Bundesregierung verfolgten Ziele würden damit deutlich verfehlt. Noch stärker kommt dies im Referenz-Szenario zum Ausdruck, in dem die Reduktion bis 2005 nur 14 %, bis 2010 etwa 16 % und bis 2020 lediglich 20 % betragen würde. Dabei leisten in diesen beiden

Szenarien vor allem die Industrie, aber auch die Kleinverbraucher und die privaten Haushalte einen überdurchschnittlich Reduktionsbeitrag, während es im Verkehr zu einem deutlichen Emissionsanstieg kommt.

Abbildung 5-3:

Veränderungen der CO₂-Emissionen in den Szenarien von 1990 bis 2005 und von 1990 bis 2020



In den Reduktionsszenarien wird in der Gesamtheit die Emissionsvorgabe mit -30 % bzw. -40 % bis 2020 eingehalten. Dabei ändert sich die Rangfolge des Reduktionsbeitrages der einzelnen Sektoren insofern, als nun der Umwandlungssektor relativ zum Referenz-Szenario - und zwar in allen Reduktionsszenarien - wesentlich stärker herangezogen wird. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, daß sich die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor auch in den Reduktionsszenarien kaum schwächer erhöhen als im Referenz-Szenario, so daß ein Großteil der Anpassungslast modellseitig von den anderen Sektoren und dabei insbesondere vom Umwandlungssektor getragen werden muß.

Allerdings ist im Verkehrssektor auch eine Entwicklung denkbar, wie sie in einer Variante zum 40%-Reduktions-Szenario beschrieben wurde. Danach erscheint es als vorstellbar, die verkehrsbedingten CO₂-Emissionen bis 2020 wieder etwas unter das Niveau im Ausgangsjahr 1990 zu senken. In diesem Fall könnten die Anforderungen zur Minderung der CO₂-Emissionen in den anderen Sektoren spürbar vermindert werden. Das würde in erster Linie die Umwandlungssektoren und die Haushalte entlasten.

Zur Realisierung der Reduktionsszenarien müßten die gesamtwirtschaftliche Energieintensität (Energieverbrauch je Einheit Bruttoinlandsprodukt) wie die gesamtwirtschaftliche Emissionsintensität (CO₂-Emissionen je Einheit Bruttoinlandsprodukt) erheblich vermindert werden (Tabelle 5-4):

- Während die gesamtwirtschaftliche Energieintensität im Referenz-Szenario von 1990 bis 2020 jahresdurchschnittlich um 2,3 % sinkt, sind es im 40%-Reduktions-Szenario (mit auslaufender Kernenergienutzung) 2,9 %.
- Die gesamtwirtschaftliche CO₂-Intensität geht in allen Szenarien noch stärker zurück als die gesamtwirtschaftliche Energieintensität: Von 1990 bis 2020 beträgt die jahresdurchschnittliche Reduktionsrate im Referenz-Szenario 2,5 % und im 40%-Reduktions-Szenario (mit auslaufender Kernenergienutzung) 3,6 %.

Die unterschiedlichen Entwicklungen der beiden genannten Kennziffern sind auf die Veränderungen im CO₂-"Gehalt" des Energieverbrauchs zurückzuführen: Die CO₂-Emissionen je Einheit Energieverbrauch vermindern sich von rund 67 t CO₂/TJ im Jahre 1990 bis zum Jahre 2020 auf 63 t CO₂/TJ (-6 %) im Referenz-Szenario und auf

55 t CO₂/TJ (-17 %) im 40%-Reduktions-Szenario (mit auslaufender Kernenergienutzung).³¹

Tabelle 5-3:

Veränderungen der gesamtwirtschaftlichen Energieintensität und Emissionsintensität sowie des CO₂-Gehaltes des Energieverbrauchs in den Szenarien

	Veränderungen in %		
	1990 bis 2005	2005 bis 2020	1990 bis 2020
Gesamtwirtschaftliche Energieintensität			
Modell-Basis-Szenario	-32	-32	-53
Referenz-Szenario	-29	-31	-51
30%-Reduktions-Szenario	-32	-34	-55
40%-Reduktions-Szenario ¹⁾	-35	-37	-59
Gesamtwirtschaftliche Emissionsintensität			
Modell-Basis-Szenario	-37	-29	-56
Referenz-Szenario	-35	-28	-53
30%-Reduktions-Szenario	-39	-35	-61
40%-Reduktions-Szenario ¹⁾	-43	-40	-66
Gesamtwirtschaftlicher CO ₂ -Gehalt des Energieverbrauchs			
Modell-Basis-Szenario	-8	4	-5
Referenz-Szenario	-9	3	-6
30%-Reduktions-Szenario	-10	-2	-12
40%-Reduktions-Szenario ¹⁾	-13	-5	-17

¹⁾ Mit auslaufender Kernenergienutzung.

Das mit den Reduktionsszenarien verfolgte Ziel läßt sich also prinzipiell durch die Kombination von Maßnahmen zur Steigerung der gesamtwirtschaftlichen Energieproduktivität und der strukturellen Änderungen zugunsten der weniger emissionsintensiven Energieträger erreichen.

Mehrkosten in den Reduktionsszenarien

Das Modell-Basis-Szenario führt unter den gegebenen Rahmenbedingungen zu einer volkswirtschaftlich kostenoptimalen Struktur der Energieversorgung. Deshalb muß jede

³¹ Erwähnt sei, daß im 40%-Reduktions-Szenario mit konstanter Kernenergiekapazität die gesamtwirtschaftliche Energieintensität wie die Emissionsintensität etwas langsamer als im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung zurückgehen, dafür aber der CO₂-Gehalt des Energieverbrauchs um 21 % auf 53 t CO₂/TJ im Jahre 2020 sinkt.

zusätzliche Restriktion – beispielsweise die Vorgabe bestimmter CO₂-Minderungsziele – im Ergebnis zwangsläufig höhere Kosten bewirken (Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4:

Sektorale Mehrkosten pro Jahr in den Reduktionsszenarien gegenüber dem Modell-Basis-Szenario

	30%-Reduktions-Szenario		40%-Reduktions-Szenario			
			mit konstanter Kernenergiekapazität		mit auslaufender Kernenergienutzung	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020
Mrd. DM zu Preisen von 1995						
Primärsektor	-0,73	-1,87	-0,93	-3,63	-0,70	-1,07
Umwandlungssektor	1,12	1,88	1,67	4,90	0,77	2,70
Industrie	0,36	0,58	1,51	1,56	1,33	2,19
Verkehr	0,12	0,32	0,33	0,49	0,34	1,17
Haushalte	-0,21	0,03	2,80	6,26	4,46	11,75
Kleinverbraucher	-0,16	0,31	0,33	1,08	0,33	2,23
Summe	0,50	1,26	5,71	10,65	6,53	18,96
Abweichungen in den Summen durch Rundungen.						

Nach den Modellrechnungen sind die Mehrkosten im 30%-Reduktions-Szenario gegenüber dem Basis-Szenario vergleichsweise gering. In den beiden 40%-Reduktionsszenarien steigen sie bis zum Jahre 2020 auf rund 11 Mrd. DM (mit konstanter Kernenergiekapazität) oder 19 Mrd. DM (mit auslaufender Kernenergienutzung) pro Jahr. Während es im Primärsektor aufgrund der Energieeinsparung durchweg zu einer spürbaren Kostenentlastung kommt, fallen im 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung vor allem die Mehrkosten bei den privaten Haushalten ins Gewicht.

Solche Kostenschätzungen sind allerdings aus unterschiedlichen Gründen mit großen Unsicherheiten behaftet: So stehen die Modellergebnisse generell unter dem Vorbehalt, daß alle künftig zur Verfügung stehenden Minderungsoptionen vollständig erfaßt sind und daß ihre jeweiligen Kosten unter Berücksichtigung von technischem Fortschritt und Lerneffekten hinlänglich genau geschätzt sind. Hinzu kommt, daß in solchen Modellen technologische Substitutionen im Vordergrund stehen, während organisatorische und verhaltensbedingte Verbesserungen, die oftmals kostengünstiger sind, nicht oder nur zum Teil einbezogen werden. Außerdem bewirkt der Vergleich der Reduktionsszenarien mit

dem Modell-Basis-Szenario eine systematische Verzerrung der Kostenaussagen; im Vergleich zum Referenz-Szenario ergeben sich nämlich tendenziell geringere Mehrkosten, weil in dieser realistischeren Vergleichssituation die Systemkosten aufgrund von nicht genutzten Effizienzpotentialen höher sind als im Basisszenario.

Politische Schlußfolgerungen

Mit den Szenariorechnungen wurden in der Logik des Optimierungs-Modells die unter volkswirtschaftlichen Aspekten kostengünstigen Handlungsfelder für die jeweils angestrebte Reduktion der CO₂-Emissionen aufgezeigt. Dabei handelt es sich zunächst im wesentlichen um "technisch" definierte Handlungsfelder, die noch nichts darüber aussagen, auf welche Weise die konkreten Akteure in den jeweiligen Sektoren - beispielsweise Industriebetriebe, private Haushalte, Gewerbetreibende - dazu veranlaßt werden können, die zur Realisierung der Szenarien notwendigen Maßnahmen zu ergreifen.

Aus technischer Sicht bestehen offenkundig ausreichende Möglichkeiten, die CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2005 um 20 bis 25 % und bis 2020 um 30 bis 40 % zu reduzieren. Da es aber - wie sowohl die gängigen Prognosen als auch das im Rahmen dieser Studie abgeleitete Referenz-Szenario zeigen - keine marktendogene Tendenz zur Verwirklichung der klimaschutzpolitisch geforderten Reduktion der CO₂-Emissionen gibt, müssen die Anreizstrukturen geändert werden, um derartige Klimaschutzziele doch noch zu erreichen.

Unabhängig von der Notwendigkeit eines breiten gesellschaftlichen Konsenses über die Notwendigkeit klimaschutzpolitischen Handelns ist die Schaffung der erforderlichen Anreizstrukturen nicht zuletzt Aufgabe der politischen Entscheidungsträger auf allen Ebenen, also auf Kommunalebene ebenso wie auf Landes- und Bundesebene sowie - künftig noch zunehmend - auf EU-Ebene.

In dieser Untersuchung ist der Versuch unternommen worden, die für die Umsetzung des 30%- wie des 40%-Reduktions-Szenarios notwendigen politischen Maßnahmen herauszuarbeiten. Dabei konnte auch auf die detaillierten Analysen aus dem Vorhaben "Politiksznarien I" zurückgegriffen werden, in dem die bis 2005 erforderlichen Maßnahmen

abgeleitet worden waren. Mit Blick auf das Jahr 2005 ist schon aus zeitlicher Sicht höchste Dringlichkeit für politischen Handeln geboten.

Einen Überblick über die in den einzelnen Sektoren im besonders anspruchsvollen 40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung modellseitig "in Lösung" gehenden (technischen) Anpassungsmaßnahmen sowie über die in den einzelnen Sektoren jeweils zur Umsetzung dieser Maßnahmen als geeignet erscheinenden politischen Instrumente geben die abschließenden Übersichten 5-2 bis 5-6.

Die Politik darf sich danach nicht nur auf einige wenige Maßnahmen und Sektoren stützen, da dies notwendigerweise in den betroffenen Bereichen zu übersteigerten - und damit kaum akzeptierbaren - Eingriffen führen müßte, sondern sollte den Einsatz komplexer, aber wohldosierter, zielgerichteter Maßnahmenbündel über sämtliche Bereiche hinweg vorsehen. Die politisch zu schaffenden Anreizstrukturen sollten insbesondere auch ökonomisch wirkende Hebel nutzen. Dies überläßt den Wirtschaftssubjekten die Art und Weise ihrer Anpassung, ohne daß die Lenkungswirkung bezogen auf das angestrebte Ziel vernachlässigt würde.

Übersicht 5-2:

**Überblick über die wichtigsten Maßnahmen und Instrumente für das
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung
im Sektor Industrie**

CO ₂ -Emissionen im Jahre 2020 gegenüber	
• Modell-Basis-Szenario im Jahre 2020	- 9 Mio. t = - 9 %
• Referenz-Szenario im Jahre 2020	- 13 Mio. t = -12 %
• 1990	-102 Mio. t = -51 %
Auswahl (technischer) Maßnahmen, die im Modell in Lösung gegangen sind	<ul style="list-style-type: none"> • Maximaler Einsatz von Superspartechniken in allen Branchen • Prozeßdampf- und -wärmeerzeugung ausschließlich aus Erdgaskesseln und Biomasse • weiterer Ausbau der industriellen KWK und Stromeinspeisung ins öffentliche Netz • Rückgang des Kohleverbrauchs um 67 PJ und des Ölverbrauchs um 178 PJ gegenüber Modell-Basis-Szenario
Politische Instrumente, die für die Umsetzung der Maßnahmen als geeignet erscheinen	<ul style="list-style-type: none"> • ERP-Energiesparprogramm • Investitionsprogramm zur Verminderung von Umweltbelastungen • Wärmenutzungsverordnung • Energiesparverordnung 2000, die an der Raumwärme der Fabrik- und Verwaltungsgebäude der Industrie ansetzen und den Bestand miterfassen • Verbesserung der Kreditprogramme (ERP, DfA und KfW) • öffentliche Unterstützung eines "grünen" Kapitalmarktes (z.B. kapitalsteuerbefreite Dividenden von Unternehmen mit Umweltschutzgütern wie in den Niederlanden) • Nutzung der Ergebnisse verstärkter Forschung und Entwicklung in energieeffizientere Industrieprozesse und Nebenanlagen • neue Verbändevereinbarung • zusätzliche Länder- und Kommunalprogramme sowie Programme der Industrie- und Handelskammern, insbesondere für Fortbildung und Information der mittelständischen Wirtschaft • Förderung des Contracting, das insbesondere auf die vernachlässigten Nebenanlagen (z.B. Kessel, Kälte- und Druckluftherzeugung) zielt • bewußte kooperative Beschaffungsprogramme von Unternehmen, die auf standardisierte und in Großserie gefertigte Effizienzkomponenten (z.B. hocheffiziente Elektromotoren) ausgerichtet sein könnten • verstärkte Initialberatung und Informationsverbreitung durch Energieagenturen, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen • Energie-/CO₂-Steuer

Übersicht 5-3:

**Überblick über die wichtigsten Maßnahmen und Instrumente für das
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung
im Sektor Haushalte**

CO ₂ -Emissionen im Jahre 2020 gegenüber	
• Modell-Basis-Szenario im Jahre 2020	-46 Mio. t = -39 %
• Referenz-Szenario im Jahre 2020	-53 Mio. t = -42 %
• 1990	-86 Mio. t = -54 %
Auswahl (technischer) Maßnahmen, die im Modell in Lösung gegangen sind	<ul style="list-style-type: none"> • weitestgehendes Ausschöpfen der Einsparpotentiale innerhalb Renovierungszyklen • zusätzliche Sanierungsmaßnahmen außerhalb von Renovierungszyklen; bis 2020 Sanierung des kompletten Wohnflächenbestandes • weiter verbesserter Wärmeschutz im Neubau bis unter Niedrigenergiehaus-Standard • Energieträgerwechsel von Heizöl (-444 PJ), Kohle (-57 PJ) und Erdgas (-104 PJ) zu Fernwärme und Biomasse¹⁾ • maximal möglicher Einsatz von Brennwertkesseln bei Gas- und Ölheizungen • weiterer Ausbau der Nah- und Fernwärme (+15 PJ)¹⁾ <p>¹⁾ Veränderungen gegenüber Modell-Basis-Szenario im Jahre 2020</p>
Politische Instrumente, die für die Umsetzung der Maßnahmen als geeignet erscheinen	<ul style="list-style-type: none"> • Energiesparverordnung 2000 • Ausweitung des KfW-Förderprogramms für die wärmetechnische Sanierung von Altbauten • Förderprogramme für die Installation von Brennwertkesseln • Energie-/CO₂-Steuer • Elektroanwendungsverordnung, die für Neugeräte einen Mindeststandard sowie einen bestimmten Höchstverbrauch für Standby-Einrichtungen vorschreiben • alternativ: freiwillige Vereinbarungen mit der geräteherstellenden Industrie und den Geräteimporteuren

Übersicht 5-4:

**Überblick über die wichtigsten Maßnahmen und Instrumente für das
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung
im Sektor Kleinverbraucher**

CO ₂ -Emissionen im Jahre 2020 gegenüber	
• Modell-Basis-Szenario im Jahre 2020	-20 Mio. t = -30 %
• Referenz-Szenario im Jahre 2020	-16 Mio. t = -26 %
• 1990	-51 Mio. t = -53 %
Auswahl (technischer) Maßnahmen, die im Modell in Lösung gegangen sind	<ul style="list-style-type: none"> • Rückgang des Endenergiebedarfs um 133 PJ durch Wärmeschutz und andere Spartechniken¹⁾ • Zubau elektrischer Wärmepumpen • Zunahme der Dampferzeugung aus Biomasse und Biogas • Substitution von Kohle (-23 PJ), Öl (-162 PJ) und Erdgas (-14 PJ) durch Wärmeschutz¹⁾ <p>¹⁾ Veränderungen gegenüber Modell-Basis-Szenario im Jahre 2020</p>
Politische Instrumente, die für die Umsetzung der Maßnahmen als geeignet erscheinen	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Kreditprogramme (ERP, DtA und KfW) • verstärkte Forschung und Entwicklung, insbesondere im Bereich moderner Fassaden- und Fenstersysteme, Beleuchtungssysteme, Klimatisierung und Kälteerzeugung • gezieltes Fortbildungsprogramm für Heizung-, Lüftung- und Klima-Fachpersonal • erweiterte Förderung und Rolle von Energieagenturen der Bundesländer • Contracting-Förderung und in geeigneten Fällen eine kooperative Beschaffung in Kettenunternehmen des Einzelhandels, von Hotel- und Restaurantketten sowie von Filialunternehmen • Energiesparverordnung 2000 • ElektroanwendungsVO für Büromaschinen, Umwälzpumpen, Ventilatoren, Klimageräte und -anlagen bzw. alternativ entsprechende Selbstverpflichtungen der Hersteller und Importeure. • Energie-/CO₂-Steuer

Übersicht 5-5:

**Überblick über die wichtigsten Maßnahmen und Instrumente für das
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung
im Sektor Verkehr (Variante zum modellseitigen 40%-Reduktions-Szenario)**

CO ₂ -Emissionen im Jahre 2020 gegenüber	
• Modell.Basis-Szenario = Referenz-Szenario im Jahre 2020	-44 Mio. t = -24 %
• 1990	- 6 Mio. t = - 4 %
Handlungsfelder, die außerhalb der Modellrechnungen berücksichtigt worden sind	<ul style="list-style-type: none"> • Veränderung des Modal Split im Personen- und Güterverkehr jeweils zugunsten der Massentransportmittel (Busse und Bahnen im Personenverkehr sowie Bahnen und Binnenschifffahrt im Güterverkehr) • verstärkter Einsatz der bei den jeweiligen Verkehrsträgern besonders effizienten Fahrzeuge (z.B. mehr Sparversionen bei Personen- und Lastkraftwagen)
Politische Instrumente, die für die Umsetzung der Maßnahmen als geeignet erscheinen	<ul style="list-style-type: none"> • Beratung und Schulung • Telematik • fahrleistungsabhängige Straßenbenutzungsgebühren • deutliche Anhebung der Mineralölsteuer auf Kraftstoffe • Kraftstoffverbrauchsgrenzwerte • Richtwerte für CO₂-Emissionen • Senkung der Höchstgeschwindigkeiten auf Bundesautobahnen und Außerortsstraßen • langfristig: verkehrsvermeidende Raumordnungspolitik

Übersicht 5-6:

**Überblick über die wichtigsten Maßnahmen und Instrumente für das
40%-Reduktions-Szenario mit auslaufender Kernenergienutzung
im Umwandlungssektor (Elektrizitätswirtschaft)**

CO ₂ -Emissions-Veränderung gegenüber	
• Modell-Basis-Szenario im Jahre 2020	- 82 Mio. t = -35 %
• Referenz-Szenario im Jahre 2020	-126 Mio. t = -42 %
• 1990	-201 Mio. t = -53 %
Auswahl (technischer) Maßnahmen, die im Modell in Lösung gegangen sind	<ul style="list-style-type: none"> • keine Ersatzinvestitionen von Kernkraftwerken (Vorgabe) • Einsatz von Braunkohlekraftwerken ausschließlich mit höherem Wirkungsgrad • Rückgang konventioneller Gaskraftwerke um 9 GW • Rückgang der Steinkohleverstromung um 57 TWh_{el}, Braunkohleverstromung konstant • maximaler Ausbau der GuD-Kapazitäten • mehr Fernwärme aus GuD-HKW (+5,3 GW_{el}) • stärkerer Einsatz von Müll in Kraftwerken (+44 PJ) • Ausbau der Windenergie (+5,2 GW) und der Wasserkraft (+400 MW) • Weiterer Ausbau der Nahwärmeversorgung auf Basis Erdgas, Biogas und Sonnenkollektoren • Ausbau der Fernwärmeversorgung mit Biomasse-Heizkraftwerken (+0,9 GW) • Rückgang des Stromverbrauchs um 2,3 %
Politische Instrumente, die für die Umsetzung der Maßnahmen als geeignet erscheinen	<ul style="list-style-type: none"> • Förderung des Einsatzes von Erdgas-GuD-Heizkraftwerken (Befreiung von der Stromsteuer bei Erreichen von Mindest-Nutzungsgraden) • Förderung des Einsatzes dezentraler KWK-Anlagen • Erhebung einer Energie-/CO₂-Steuer • Fortbestand und Ausweitung der Förderung erneuerbarer Energiequellen (Stromeinspeisungsgesetz, Förderprogramme, Befreiung von der Stromsteuer oder Rückerstattung der Stromsteuer u.ä.)

ANHANG

Vergleich der IKARUS-Daten mit den Angaben der Energie- und Emissionsstatistik

Ein unmittelbarer Vergleich der im IKARUS-Modell enthaltenen Daten mit den Angaben in den Energiestatistiken und den offiziellen Emissionsdaten ist aufgrund einiger Abgrenzungsdifferenzen nur bedingt möglich. Im folgenden soll dies an einigen Beispielen deutlich gemacht werden:

Die Unterschiede in den Ausgangsdaten zum sektoralen Endenergieverbrauch sind in Tabelle 1 dargestellt. Während sich in der Summe wie bei den Kleinverbrauchern eine vergleichsweise geringe Abweichung zeigt, sind die IKARUS-Daten für den Endenergieverbrauch der Industrie wie für die Haushalte deutlich höher als die tatsächlichen Verbrauchswerte nach den Energiebilanzen. Umgekehrtes gilt für den verkehrsbezogenen Endenergieverbrauch, der im IKARUS-Modell deutlich niedriger ausfällt. Ein wesentlicher Grund hierfür dürfte darin liegen, daß in den Energiebilanzen die gesamten auf den deutschen Flughäfen vertankten Treibstoffe erfaßt sind, während im IKARUS-Modell lediglich die den Inlandsflügen zurechenbaren Treibstoffmengen berücksichtigt werden. Wenn dennoch die Differenzen bei den Mineralprodukten so gering ausfallen, so liegt dies an gegenläufigen Tendenzen in anderen Sektoren.

Erhebliche relative Differenzen zeigen sich bei den festen Brennstoffen, bei der Fernwärme sowie bei den erneuerbaren Energieträgern. Auffällig sind auch die Abweichungen bei den Daten zum Endenergieverbrauch des Gases im Jahre 1995. Mengenmäßig sind vor allem die Unterschiede bei den festen Brennstoffen (1990 und 1995) sowie bei den Gasen (1995) bedeutsam.

Auch die Ausgangsdaten zum sektoralen Stromverbrauch nach dem IKARUS-Modell einerseits und der offiziellen Statistik andererseits stimmen nicht vollständig überein (Tabelle 2). Ins Gewicht fallen dabei vor allem die Unterschiede bei den Kleinverbrauchern, beim Verkehr und bei den sonstigen Stromverbrauchern. Bei den Kleinverbrauchern liegen die Differenzen vermutlich daran, daß die in den Energiebilanzen in früheren Jahren ausgewiesenen sog. statistischen Differenzen beim Strom, die sachgerecht den Kleinver-

brauchern zuzuordnen sind (was in den Energiebilanzen auch von 1995 an geschieht), im IKARUS-Modell nicht berücksichtigt worden sind. Insgesamt sind die Stromverbrauchsangaben nach IKARUS um reichlich 12 Mrd. kWh oder um 2,6 % niedriger als in der offiziellen Statistik.

Erheblich Abweichungen bestehen bei den Daten zu den Stromerzeugungskapazitäten. Nach IKARUS betrug die installierte Nettokapazität im Jahre 1995 etwa 101 GW, während vom Bundesministerium für Wirtschaft für dieses Jahr eine installierte Netto-Engpaßleistung von reichlich 115 GW - also rund 14 GW mehr - ausgewiesen wird (Tabelle 3). Der Grund für diese Differenzen ist darin zu sehen, daß die Daten des Bundeswirtschaftsministerium die Stromerzeugungskapazitäten der Industriekraftwerke enthalten, während im IKARUS-Modell diese Kapazitäten direkt im Industriesektor ausgewiesen werden. Bezieht man diese Kapazitäten ein, zeigt sich eine vergleichsweise gute Datenübereinstimmung.

Recht gut stimmen auch die Daten zum Primärenergieverbrauch überein (Tabelle 4). In der Summe machen die Abweichungen zwischen den IKARUS-Daten und den Energiebilanzen in den Jahren 1990 und 1995 lediglich 2 bis 3 % aus. Unter allen Energieträgern zeigen sich größere - relative - Differenzen lediglich bei den erneuerbaren Energieträgern. Abgesehen von der Steinkohle sind die Verbrauchsangaben der übrigen Energieträger nach IKARUS im Jahre 1995 niedriger als nach der Energiebilanz.

Nur geringfügige Unterschiede gibt es auch in der Summe der CO₂-Emissionen (Tabelle 5). Allerdings überdeckt dies die gravierenden Abweichungen bei fast allen Emittentengruppen. Beispielsweise würden in der Abgrenzung nach dem IKARUS-Modell die CO₂-Emissionen im Jahre 1995 im gesamten Umwandlungssektor lediglich 311 Mio. t betragen, während es nach den energiebilanzgestützten Rechnungen 373 Mio. t gewesen wären. Umgekehrt sind die IKARUS-Angaben zu den CO₂-Emissionen bei den Sektoren Industrie, Haushalte und Kleinverbraucher deutlich höher als nach den offiziellen Daten.

Diese - zum Teil erheblichen - Abweichungen zwischen den einzelnen Sektoren haben unterschiedliche Ursachen: Generell gilt, daß im IKARUS-Modell im Unterschied zu den Energiebilanzen grundsätzlich nur temperatur- und lagerbestandsbereinigte Werte be-

rücksichtigt werden. Bedeutsamer sind aber verschiedenartige Abgrenzungen. So sind im Industriesektor die Emissionen der industriellen Stromerzeugung ebenso enthalten wie diejenigen der Hochöfen, die beide nach der Systematik der Energiebilanzen dem Umwandlungssektor zugerechnet werden. Die verbleibenden Differenzen sind teilweise aber auch darauf zurückzuführen, daß beispielsweise der Stromverbrauch im Sektor der Kleinverbraucher im IKARUS-Modell offensichtlich nur unzureichend abgebildet ist.

Um Mißverständnisse bei der Interpretation der mit dem IKARUS-Modell ermittelten Ergebnisse zu vermeiden, sind die vorstehend skizzierten Differenzen zu der "tatsächlichen" Ausgangslage wie die in einigen Fällen verschiedenartigen sektoralen Abgrenzungen zu beachten.

Tabelle 1:

Differenzen der Daten zum Endenergieverbrauch nach dem IKARUS-Modell und nach den Energiebilanzen für 1990 und 1995 in Deutschland

	IKARUS-98 in PJ		Energiebilanz in PJ		Abweichung IKARUS-98 von Energiebilanz in %	
	1990	1995 ¹⁾	1990	1995	1990	1995
	Nach Sektoren					
Industrie	3205	2623	2977	2474	8	6
Kleinverbrauch ²⁾	1726	1556	1702	1569	1	-1
Haushalt	2710	2783	2383	2651	14	5
Verkehr	2052	2332	2379	2614	-14	-11
Summe	9692	9295	9441	9308	3	0
Nachr.: Militär			139	47		
	Nach Energieträgergruppen					
Feste Brennstoffe ³⁾	2013	971	1558	633	29	54
Mineralölprodukte ⁴⁾	3823	4342	3980	4305	-4	1
Gase ³⁾	1885	2025	1870	2260	1	-10
Strom	1640	1603	1607	1648	2	-3
Fernwärme	278	274	383	352	-27	-22
Erneuerbare	53	80	42	110	26	-28
Summe	9692	9295	9441	9308	3	0
Nachr.: Flüss./Raff.gas			81	97		
¹⁾ Daten entsprechend dem IKARUS-Modell-Basis-Szenario. ²⁾ bei Energiebilanzen einschließlich militärische Dienststellen.- ³⁾ bei Energiebilanzen einschließlich Müll u.ä.- ⁴⁾ ohne Flüssig- und Raffineriegas.- ⁵⁾ einschließlich Flüssig- und Raffineriegas.						

Quellen: IKARUS 1998; AG Energiebilanzen; Berechnungen des DIW.

Tabelle 2:

**Differenzen der Daten zum Stromverbrauch nach dem IKARUS-Modell
und nach den Energiebilanzen für 1990 und 1995 in Deutschland**

	IKARUS-98 in Mrd. kWh		Energiebilanz in Mrd. kWh		Abweichung IKARUS-98 von Energiebilanz in %	
	1990	1995	1990	1995	1990	1995
Haushalte und Kleinverbraucher	220,7	237,3	224,9	248,3	-1,9	-4,4
- Kleinverbrauch	99,9	109,7	107,7	121,1	-7,2	-9,4
- Haushalte	120,8	127,6	117,2	127,2	3,0	0,3
Industrie	222,0	195,3	207,8	190,4	6,8	2,5
Verkehr	12,6	12,4	13,7	16,2	-7,7	-23,2
Summe Endenergie	455,3	445,0	446,4	454,9	2,0	-2,2
sonstige ¹⁾	21,0	15,4	25,9	17,6	-19,1	-12,4
Verbrauch insgesamt	476,3	460,5	472,3	472,6	0,8	-2,6

¹⁾ Bei Energiebilanzen: Eigenverbrauch im Umwandlungsbereich ohne Kraftwerkseigenverbrauch.

Quellen: Bundesministerium für Wirtschaft; IKARUS 1998; AG Energiebilanzen;
Berechnungen des DIW.

Tabelle 3:

**Differenzen der Daten zu den Stromerzeugungskapazitäten nach dem IKARUS-
Modell und nach der amtlichen Statistik für 1990 und 1995 in Deutschland**

IKARUS-98		Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) ¹⁾		Differenz= Ikarus-98 - BMWi
Bezeichnung	MW	MW	Bezeichnung ²⁾	MW
Braunkohle	18,491	21,993	Braunkohle	-3,502
Erdgas	12,109	19,683	Erdgas	-7,574
Kernenergie	21,081	22,834	Kernenergie (mit Mülheim-K)	-1,754
Steinkohle	25,899	31,047	Steinkohle mit Mischfeuerung	-5,148
Öl	6,942	9,379	Heizöl	-2,437
Sonstige	1,161	1,616	übrige	-0,455
Wasserkraft	2,948	3,015	Laufwasser	-0,067
Wind	0,907	KA	keine Angabe	
Pumpspeicher	4,375	5,861	Speicher und Pumpspeicher	-1,486
KWK	6,949	KA		
Summe	100,861	115,428		-14,567

¹⁾ Statistischer Bericht des Referats Elektrizitätswirtschaft (IIIB2).
²⁾ Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen bei den einzelnen Energieträgern enthalten.
KA = keine Angabe

Quellen: Bundesministerium für Wirtschaft; IKARUS 1998.

Tabelle 4:

Differenzen der Daten zum Primärenergieverbrauch nach dem IKARUS-Modell und nach den Energiebilanzen für 1990 und 1995 in Deutschland

	IKARUS-98 in PJ		Energiebilanz in PJ		Abweichung IKARUS-98 von Energiebilanz in %	
	1990	1995 ¹⁾	1990	1995	1990	1995
Steinkohle	2290	2100	2306	2060	-1	2
Braunkohle	3179	1700	3201	1734	-1	-2
Mineralöl	4955	5545	5228	5689	-5	-3
Erdgas	2356	2700	2318	2812	2	-4
Kernenergie	1565	1586	1446	1682	8	-6
Erneuerbare ²⁾	201	228	287	292	-30	-22
Summe	14546	13859	14785	14269	-2	-3

¹⁾ Daten entsprechend dem IKARUS-Modell-Basis-Szenario.
²⁾ Bei Energiebilanzen einschließlich Stromaustauschsaldo, Müll u.ä.

Quellen: IKARUS 1998; AG Energiebilanzen; Berechnungen des DIW.

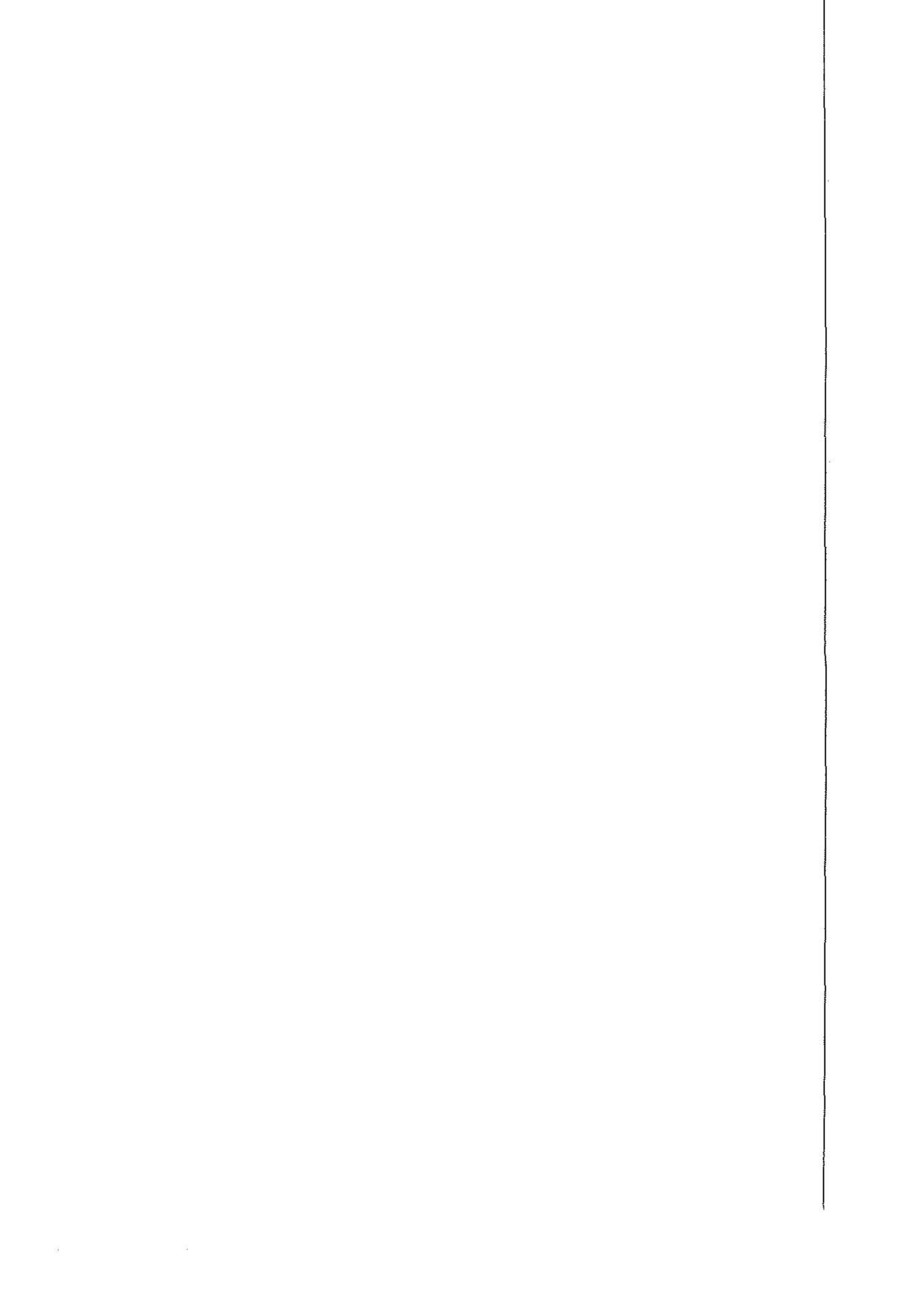
Tabelle 5:

Differenzen der Daten zu den CO₂-Emissionen nach dem IKARUS-Modell und nach Angaben des Umweltbundesamtes und des DIW auf der Basis der Energiebilanzen für 1990 und 1995 in Deutschland

CO ₂ -Emissionen in Mill. t	1990			1995	
	IKARUS-98	UBA/DIW: IPCC Gliederung	UBA/DIW: Energiebilanz- Gliederung	IKARUS-98	UBA/DIW: Energiebilanz- Gliederung
Verkehr	145	159	159	166	173
Straßenverkehr	x	x	151	x	165
Schiene	x	x	3	x	2
Luft-national	x	x	3	x	3
Binnenschiff	x	x	2	x	2
Industrie	189	170	170	135	127
Haushalte, Kleinverbr., Gewerbe ¹⁾	x	198	x	x	x
Kleinverbrauch	97	(70)	79	71	68
Haushalte	158	(128)	128	149	129
Andere (einschl. Militär) ²⁾	x	21	x	x	x
Militär	x	x	12	x	in KV
Umwandlung	388	439	439	334	380
Kraftwerke	x	x	354	x	320
Heizkraftwerke/Fernheizwerke	x	x	43	x	29
Übrige Umwandlung	x	x	43	x	30
Summe: Energiebedingte Emissionen	976	987	987	855	877
Nachrichtl.:					
Hochseebunkereien	x	8	x	x	x
Internationaler Luftverkehr	x	12	12	x	14
Luftverkehr (national und international)	x		14	x	17
SUMME Verkehr (einschl. international)	x		170	x	185

¹⁾ Ohne mobile Quellen in Land- und Forstwirtschaft; ohne Hochseefischerei. ²⁾ Einschließlich mobiler Quellen in Land- und Forstwirtschaft.

Quellen: IKARUS 1998; Umweltbundesamt; AG Energiebilanzen; Berechnungen des DIW.



Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Umwelt/Environment:

1. **Energiemodelle in der Bundesrepublik Deutschland. Stand der Entwicklung**
IKARUS-Workshop vom 24. bis 25. Januar 1996
herausgegeben von S. Molt, U. Fahl (1997), 292 Seiten
ISBN 3-89336-205-3
2. **Ausbau erneuerbarer Energiequellen in der Stromwirtschaft**
Ein Beitrag zum Klimaschutz
Workshop am 19. Februar 1997, veranstaltet von der Forschungszentrum Jülich GmbH und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
herausgegeben von J.-Fr. Hake, K. Schultze (1997), 138 Seiten
ISBN 3-89336-206-1
3. **Modellinstrumente für CO₂-Minderungsstrategien**
IKARUS-Workshop vom 14. bis 15. April 1997
herausgegeben von J.-Fr. Hake, P. Markewitz (1997), 284 Seiten
ISBN 3-89336-207-X
4. **IKARUS-Datenbank - Ein Informationssystem zur technischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Bewertung von Energietechniken**
IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien
Abschlußbericht Teilprojekt 2 „Datenbank“
H.-J. Laue, K.-H. Weber, J. W. Tepel (1997), 90 Seiten
ISBN 3-89336-214-2
5. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 1. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 410 Seiten
ISBN 3-89336-215-0
6. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 2. Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgase, ausgenommen energiebedingtes CO₂
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 110 Seiten
ISBN 3-89336-216-9

7. **Modelle für die Analyse energiebedingter Klimagasreduktionsstrategien**
 IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien
 Abschlußbericht Teilprojekt 1 „Modelle“
 P. Markewitz, R. Heckler, Ch. Holzapfel, W. Kuckshinrichs, D. Martinsen,
 M. Walbeck, J.-Fr. Hake (1998), VI, 276 Seiten
 ISBN 3-89336-220-7

8. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
 Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 3. Methodik-Leitfaden für die Wirkungsabschätzung von Maßnahmen zur Emissionsminderung
 herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1998), VIII, 95 Seiten
 ISBN 3-89336-222-3

9. **Horizonte 2000**
 6. Wolfgang-Ostwald-Kolloquium der Kolloid-Gesellschaft
 3. Nachwuchstage der Kolloid- und Grenzflächenforschung
 Kurzfassungen der Vorträge und Poster
 zusammengestellt von F.-H. Haegel, H. Lewandowski, B. Krahl-Urban (1998),
 150 Seiten
 ISBN 3-89336-223-1

10. **Windenergieanlagen - Nutzung, Akzeptanz und Entsorgung**
 von M. Kleemann, F. van Erp, R. Kehrbaum (1998), 59 Seiten
 ISBN 3-89336-224-X

11. **Policy Scenarios for Climate Protection**
 Study on Behalf of the Federal Environmental Agency
Volume 4. Methodological Guideline for Assessing the Impact of Measures for Emission Mitigation
 edited by G. Stein, B. Strobel (1998), 103 pages
 ISBN 3-89336-232-0

12. **Der Landschaftswasserhaushalt im Flußeinzugsgebiet der Elbe**
 Verfahren, Datengrundlagen und Bilanzgrößen
 Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im
 Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 1.
 von R. Kunkel, F. Wendland (1998), 110 Seiten
 ISBN 3-89336-233-9

13. **Das Nitratabbauvermögen im Grundwasser des Elbeeinzugsgebietes**
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im
Flußeeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 2.
von F. Wendland, R. Kunkel (1999), 166 Seiten
ISBN 3-89336-236-3

14. **Treibhausgasminderung in Deutschland zwischen nationalen Zielen und internationalen Verpflichtungen**
IKARUS-Workshop am 27.05.1998, Wissenschaftszentrum Bonn-Bad
Godesberg. Proceedings
herausgegeben von E. Läge, P. Schaumann, U. Fahl (1999), ii, VI, 146 Seiten
ISBN 3-89336-237-1

15. **Satellitenbildauswertung mit künstlichen Neuronalen Netzen zur Umweltüberwachung**
Vergleichende Bewertung konventioneller und Neuronaler Netzwerkalgorithmen
und Entwicklung eines integrierten Verfahrens
von D. Klaus, M. J. Canty, A. Poth, M. Voß, I. Niemeyer und G. Stein (1999),
VI, 160 Seiten
ISBN 3-89336-242-8

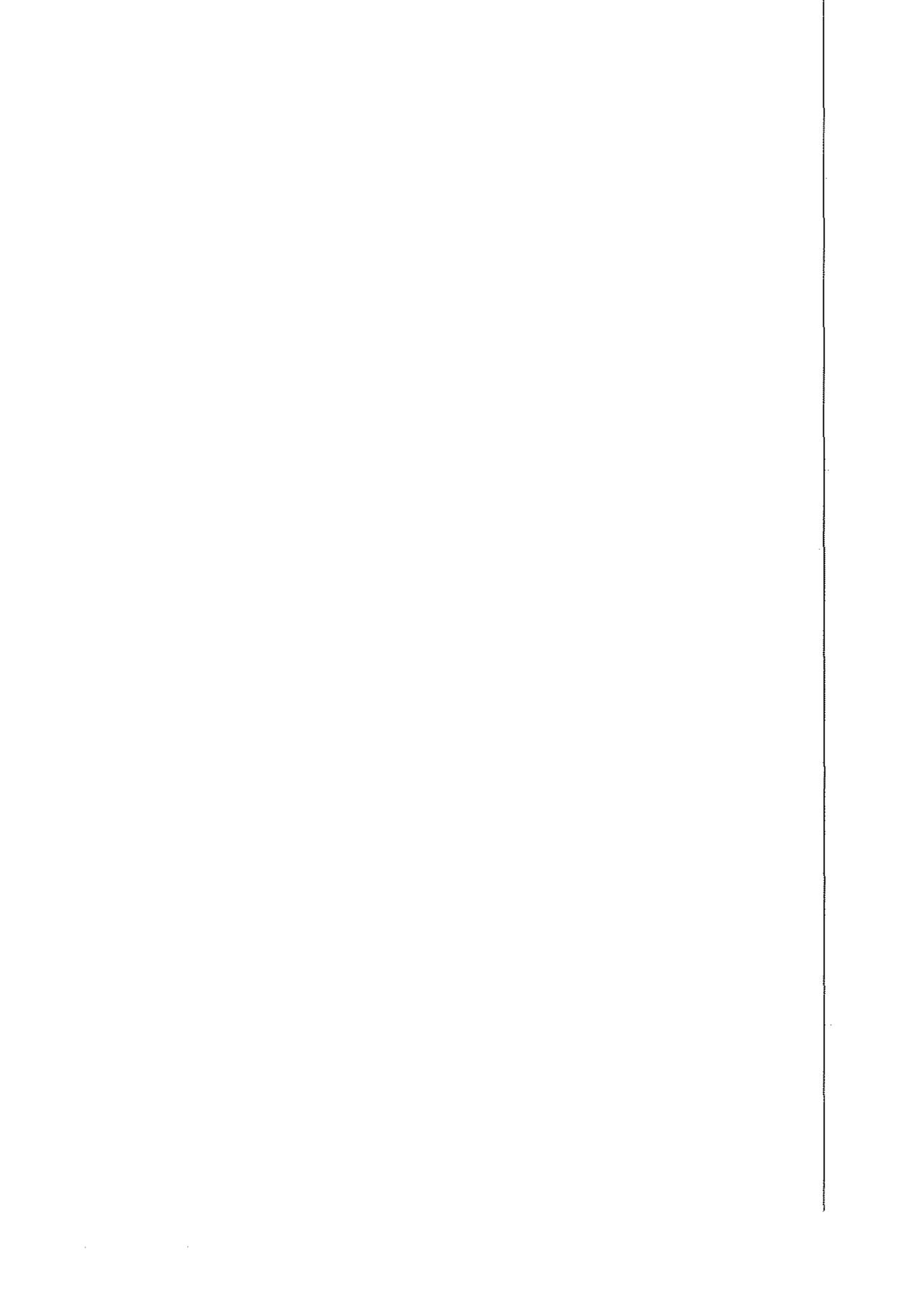
16. **Volatile Organic Compounds in the Troposphere**
Proceedings of the Workshop on Volatile Organic Compounds in the
Troposphere held in Jülich (Germany) from 27 – 31 October 1997
edited by R. Koppmann, D. H. Ehhalt (1999), 208 pages
ISBN 3-89336-243-6

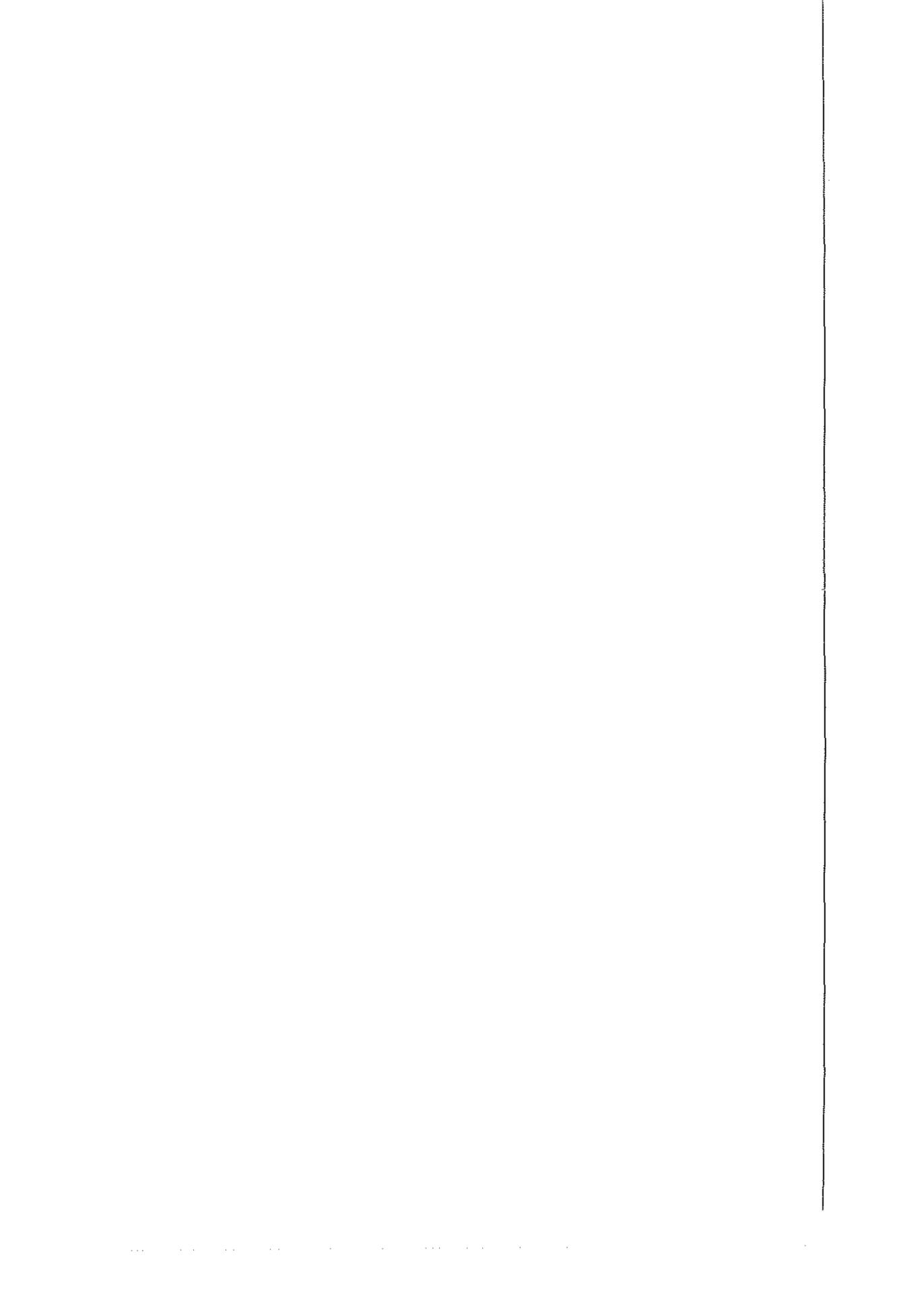
17. **CO₂-Reduktion und Beschäftigungseffekte im Wohnungssektor durch das CO₂-Minderungsprogramm der KfW**
Eine modellgestützte Wirkungsanalyse
von M. Kleemann, W. Kuckshinrichs, R. Heckler (1999), 29 Seiten
ISBN 3-89336-244-4

18. **Symposium über die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen Sonne und Wind auf Fischereischiffen und in Aquakulturbetrieben**
Symposium und Podiumsdiskussion, Izmir, Türkei, 28.-30.05.1998.
Konferenzbericht
herausgegeben von A. Özdamar, H.-G. Groehn, K. Ülgen (1999), IX, 245 Seiten
ISBN 3-89336-247-9

19. **Das Weg-, Zeitverhalten des grundwasserbürtigen Abflusses im Elbeeinzugsgebiet**
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im Flusseinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 3.
von R. Kunkel, F. Wendland (1999), 122 Seiten
ISBN 3-89336-249-5

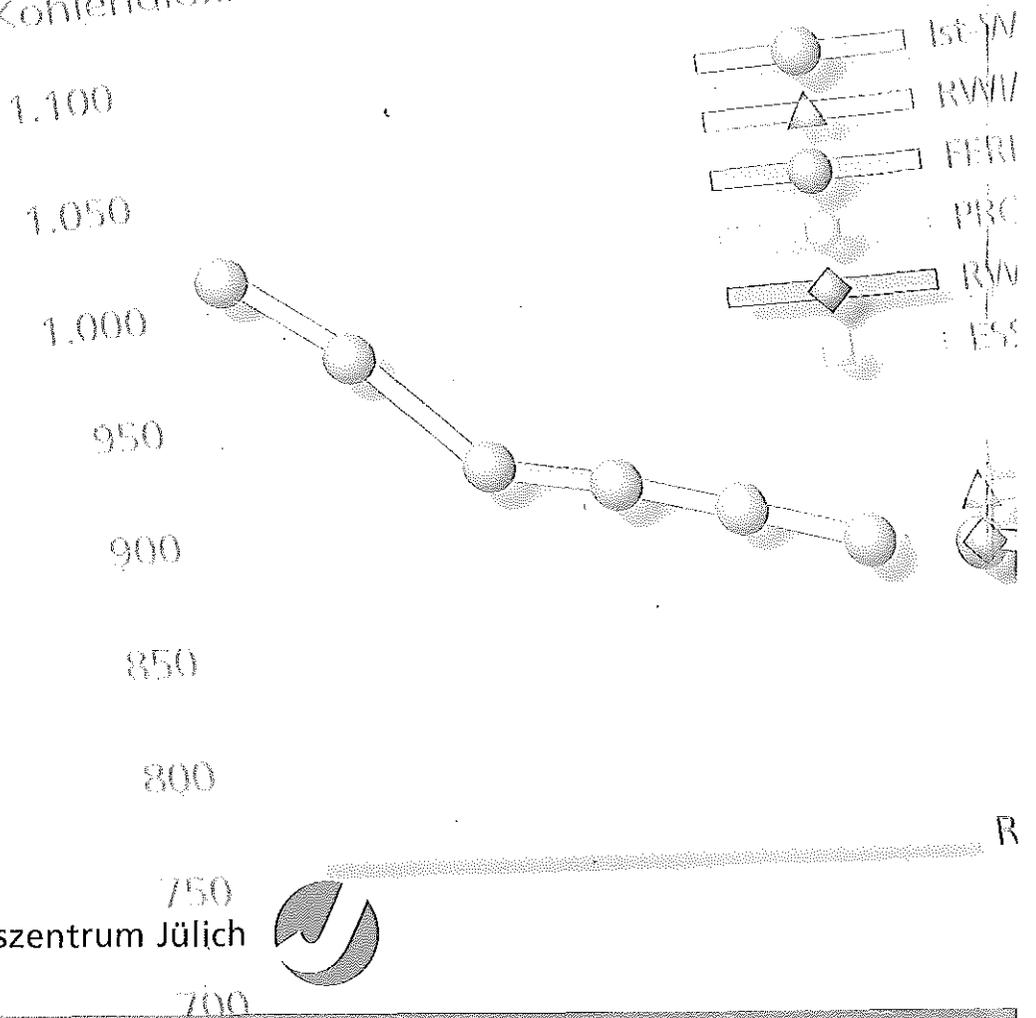
20. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 5. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2020
Abschlußbericht
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1999), XII, 201 Seiten
ISBN 3-89336-251-7





.....

Kohlendioxidemissionen in Mill. t



Forschungszentrum Jülich



Band/Volume 20
ISBN 3-89336-251-7

1990 1991 1992 1993 1994 1995

Umwelt
Environment

R