



Investitionen für ein klimafreundliches Deutschland

Studie im Auftrag des
Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Endbericht
Potsdam, 25. Juli 2008

E. Jochem*, C. Jaeger^{#,Δ}, A. Battaglini^{#,Δ}, H. Bradke*, C. Cremer*, W. Eichhammer*, H. Förster[#], A. Haas[#], E. Henning^Δ, F. Idrissova[□], B. Kasper[°], J. Köhler*, D. Köwener[□], J. Krause[#], W. Lass[#], J. Lilliestam[#], W. Mannsbart*, M. Müller^Δ, F. Meißner[#], B. Pflüger*, P. Radgen*, M. Ragwitz*, M. Rauschen[°], F. Reitze[□], L. Riffeser[□], K. Saure^Δ, W. Schade*, F. Sensfuß*, F. Toro[□], R. Walz*, M. Wietschel*

[□] BSR-Sustainability

^Δ European Climate Forum (ECF)

* Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)

[°] Öko-Zentrum NRW

[#] Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

<u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	<u>1</u>
<u>1 EINLEITUNG</u>	<u>3</u>
1.1 PROBLEMSTELLUNG	3
1.2 ZIELSETZUNG DER STUDIE	5
1.3 METHODISCHES VORGEHEN	8
1.3.1 VERWENDETE BASISDATEN UND UNTERSTELLTE ENTWICKLUNG DER RAHMENBEDINGUNGEN	10
1.3.2 ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE UND MIKROÖKONOMISCHE BEWERTUNG DER TREIBHAUSGASMINDERNDEN MAßNAHMEN	14
1.3.3 GESAMTWIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG DER UNTERSUCHTEN MAßNAHMEN	17
<u>2 KLIMAFREUNDLICHE INVESTITIONEN IN DEUTSCHLAND: AUSGANGSSITUATION UND HERAUSFORDERUNGEN</u>	<u>24</u>
2.1 DIE ROLLE DER KLIMAPOLITIK	24
2.2 DIE ENTWICKLUNG DER ENERGIEPREISE	27
2.3 DIE ENTWICKLUNG DES VOLKSWIRTSCHAFTLICHEN KAPITALSTOCKS	31
<u>3 ANALYSE DER EINZELMAßNAHMEN</u>	<u>37</u>
3.1 SEKTORÜBERGREIFENDE MAßNAHMEN	37
3.1.1 MAßNAHMEN 10 BIS 15 AN WOHN- UND NICHTWOHNGEBÄUDEN	37
3.1.2 ZUSATZMAßNAHME 2: BESCHLEUNIGUNG VON GEBÄUDESANIERUNGEN	51
3.1.3 MAßNAHMEN 6, 7 UND 24: ENERGIE-MANAGEMENT; NETZE, BESCHAFFUNG (INDUSTRIE UND GHD)	53
3.1.4 ZUSATZMAßNAHME 8: ÖKODESIGN-RICHTLINIE UND INNOVATIONSOFFENSIVE	57
3.1.5 MAßNAHME 1: KRAFT-WÄRME-KOPPLUNGS-GESETZ	62
3.2 MAßNAHMEN PRIVATE HAUSHALTE, GHD	66

3.2.1	MAßNAHME 4: INTELLIGENTE MESSVERFAHREN FÜR STROMNUTZER	66
3.2.2	MAßNAHME 8: ENERGIEEFFIZIENTE PRODUKTE	70
3.2.3	ZUSATZMAßNAHME 5: ZUSÄTZLICHE ANREIZE FÜR LANDWIRTE	72
3.3	MAßNAHMEN IM VERKEHRSBEREICH	75
3.3.1	MAßNAHME 16: CO ₂ -STRATEGIE PKW	78
3.3.2	MAßNAHME 17: AUSBAU VON BIOKRAFTSTOFFEN	83
3.3.3	MAßNAHME 18: UMSTELLUNG DER KFZ-STEUER AUF CO ₂ -BASIS	88
3.3.4	MAßNAHME 19: VERBRAUCHSKENNZEICHNUNG FÜR PKW	89
3.3.5	MAßNAHME 26: ELEKTROMOBILITÄT	92
3.3.6	ZUSATZMAßNAHME 9: ÄNDERUNG DER BESTEUERUNG FÜR DIENSTWAGEN	97
3.3.7	ZUSATZMAßNAHME 3: LEICHTLAUFÖLE VERPFLICHTEND AB 2009 FÜR PKW	99
3.3.8	MAßNAHME 20: VERBESSERTE LENKUNGSWIRKUNG DER LKW-MAUT	101
3.3.9	MAßNAHME 21: FLUGVERKEHR	106
3.3.10	MAßNAHME 22: SCHIFFSVERKEHR	108
3.4	MAßNAHMEN INDUSTRIE	110
3.4.1	MAßNAHME 23: FLUORIERTE TREIBHAUSGASE	110
3.4.2	ZUSATZMAßNAHME 1: NICHT FLUORIERTE NICHT-CO ₂ -TREIBHAUSGASE	113
3.5	UMWANDLUNGSSEKTOR	115
3.5.1	MAßNAHME 2: AUSBAU DER ERNEUERBAREN ENERGIEEN IM STROMBEREICH	115
3.5.2	ZUSATZMAßNAHMEN 6 UND 7: EMISSIONSARME FOSSILE KRAFTWERKE	118
3.5.3	MAßNAHME 9: EINSPEISEREGELUNG FÜR BIOGAS IN ERDGASNETZE	125
3.5.4	ZUSATZMAßNAHME 4: SUPERGRID-VARIANTEN	128
4	<u>GESAMTABSCHÄTZUNG VON MESEBERG-PLUS</u>	135
4.1	GESAMTERGEBNISSE FÜR DIE MESEBERG-MAßNAHMEN BIS 2020	135
4.2	GESAMTERGEBNISSE FÜR ZUSÄTZLICHE MAßNAHMEN IN 2020	141
4.3	MAKROÖKONOMISCHE WIRKUNGEN EINES MESEBERG-PLUS-PROGRAMMS	146
4.3.1	BETRACHTUNG RELEVANTER MAKROÖKONOMISCHER WIRKUNGSKETTEN	146
4.3.2	MAKROÖKONOMISCHE ERGEBNISSE DER KLIMAPOLITIK	156

<u>5</u>	<u>INNOVATIONEN FÜR DEN KLIMASCHUTZ</u>	<u>167</u>
5.1	VISION UND KONSEQUENZEN EINER 2 000 WATT PRO-KOPF-GESELLSCHAFT FÜR FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG	168
5.1.1	TECHNISCHE POTENTIALE DER ENERGIE- UND MATERIALEFFIZIENZ	169
5.1.2	POTENZIALE DURCH VERHALTENS- UND NACHFRAGEÄNDERUNGEN	172
5.1.3	UM EINEN FAKTOR 5 EFFIZIENTER BIS ENDE DES JAHRHUNDERTS	173
5.2	INNOVATIONSPOTENTIALE DURCH KLIMASCHUTZ	174
<u>6</u>	<u>LEUCHTTURMPROJEKTE</u>	<u>177</u>
6.1	HGÜ IN DEUTSCHLAND	178
6.2	LERNENDE ENERGIEEFFIZIENZ-NETZWERKE	180
6.3	SOLARTHERMISCHE PROZESSWÄRME	183
6.4	SANIERUNG BESTEHENDER GEBÄUDE	189
6.5	ELEKTRO-STRASSEN-VERKEHR	194
6.6	DER DEUTSCHE KLIMAFONDS	198
<u>7</u>	<u>SCHLUSSFOLGERUNGEN</u>	<u>203</u>
<u>8</u>	<u>LITERATUR</u>	<u>212</u>

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Zugrundeliegende Rahmenbedingungen: Wohnbevölkerung, Zahl der Haushalte, Bruttoinlandsprodukt, Industrieproduktion und Erwerbstätige in Deutschland 2000-2030.....	10
Tabelle 1-2: Erzeugungsdaten für energieintensive Industrieprodukte, 2000 - 2030	11
Tabelle 1-3: Preise für Primärenergieträger (reale Preise, Preisbasis 2000), 2000-2030	12
Tabelle 1-4: Preise für Mineralölprodukte, Erdgas und Kohle für verschiedene Sektoren, (reale Preise, Preisbasis 2000), 2000-2030.....	13
Tabelle 1-5: Preise für Elektrizität und einzelne Sektoren (reale Preise, Preisbasis 2000), 1995-2030.....	13
Tabelle 2-1: Struktur des deutschen Kapitalstocks (2005) nach Vermögensarten, Billionen €, gerundet.....	31
Tabelle 2-2: Struktur des deutschen Kapitalstocks und Treibhausgas-Emissionen (2005) nach Branchen, Billionen € und Mio. t CO _{2eq} , gerundet	31
Tabelle 2-3: Investitionen nach Branchen 2005, Mrd. €, gerundet.....	32
Tabelle 2-4: Emissionsmindernde Investitionen 2005, in Mrd. €, gerundet	35
Tabelle 3-1: Ergebnisse der Maßnahmen an Wohn- und Nichtwohngebäuden	42
Tabelle 3-2: Energieverbrauchswerte der allgemeinbildenden Schulen.	46
Tabelle 3-3: Emissionsfaktor der verdrängten Energieträger konventioneller Wärmeerzeugung	49
Tabelle 3-4: Ergebnisse der Maßnahme: Ausbau erneuerbarer Energien im Wärmebereich	51
Tabelle 3-5: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Beschleunigung von Gebäudesanierungen	53
Tabelle 3-6: Ergebnisse der Maßnahme: Energie-Management; Beratung, Netze, Beschaffung für den Bereich der Industrie	56
Tabelle 3-7: Ergebnisse der Maßnahme: Energie-Management; Beratung, Netze, Beschaffung für den Bereich Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	56
Tabelle 3-8: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Ökodesign-Richtlinie und Innovationsoffensive GHD.....	61
Tabelle 3-9: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Ökodesign-Richtlinie und Innovationsoffensive–Industrie	61
Tabelle 3-10: Ergebnisse der Maßnahme: Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz	65
Tabelle 3-11: Zentrale Annahmen für Maßnahme 4: intelligente Messverfahren für private Haushalte	68
Tabelle 3-12: Ergebnisse der Maßnahme: Intelligente Messverfahren bei der Stromnutzung	69
Tabelle 3-13: Ergebnisse der Maßnahme: Energieeffiziente Produkte	72
Tabelle 3-14: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Zusätzliche Anreize für Landwirte.....	74

Tabelle 3-15: Projektion des Energiebedarfs des Verkehrssektors in Deutschland, ohne Meseberg-Maßnahmen, 2000 bis 2030.....	76
Tabelle 3-16: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen der Endenergieträger des Verkehrssektors in Deutschland, ohne Meseberg, 2000 bis 2030, Emissionen ohne Vorketten im Umwandlungssektor.....	76
Tabelle 3-17: Überblick Meseberg-Maßnahmen und zusätzlich anrechenbare Maßnahmen aus Fraunhofer- ISI et al. (2008b) im Verkehrssektor	78
Tabelle 3-18: Entwicklung der Produktions-Zusatzkosten für Neuwagen zur Erzielung der CO ₂ -Reduktion, geteilt nach drei Hubraumklassen, 2008 bis 2030	80
Tabelle 3-19: Entwicklung der CO ₂ -Emissionsfaktoren für Neuwagen zur Erzielung der CO ₂ -Reduktion, 2008 bis 2030	80
Tabelle 3-20: Ergebnisse der Maßnahme: CO ₂ -Strategie PKW	82
Tabelle 3-21: Ergebnisse der Maßnahme: Ausbau von Biokraftstoffen	87
Tabelle 3-22: Ergebnisse der Maßnahme: Umstellung der KFZ-Steuer auf CO ₂ -Basis.....	89
Tabelle 3-23: Einspar-Potenzial an Kraftstoff und CO ₂ durch eine PKW-Verbrauchskennzeichnung	90
Tabelle 3-24: Ergebnisse der Maßnahme: Verbrauchskennzeichnung für PKW	91
Tabelle 3-25: Analysierte Elektrofahrzeuge mit Kenngrößen	94
Tabelle 3-26: Ergebnisse der Maßnahme: Ausbau der Elektromobilität.....	96
Tabelle 3-27: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Änderung der Besteuerung für Dienstwagen	98
Tabelle 3-28: Ergebnisse der Maßnahme: Vorschrift für Leichtlauföle für PKW.....	100
Tabelle 3-29: Ergebnisse der Maßnahme: Verbesserte Lenkungswirkung der LKW-Maut.....	105
Tabelle 3-30: Ergebnisse der Maßnahme: Flugverkehr	107
Tabelle 3-31: Ergebnisse der Maßnahme: Schiffsverkehr (Wirkungen nur im Ausland).....	110
Tabelle 3-32: Ergebnisse der Maßnahme: Fluorierte Treibhausgase.....	112
Tabelle 3-33: Emissionsfaktor der verdrängten konventionellen Erzeugung	116
Tabelle 3-34: Angenommene Entwicklung der Strompreise bis 2030	116
Tabelle 3-35: Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien inkl. Anlagenbestand	116
Tabelle 3-36: Ergebnisse der Maßnahme: Ausbau der erneuerbaren Energien im Strombereich	118
Tabelle 3-37: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Drei moderne Braunkohlekraftwerke	122
Tabelle 3-38: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: CCS für drei moderne Braunkohlekraftwerke	125
Tabelle 3-39: Ergebnisse der Maßnahme: Einspeiseregulierung für Biogas in Erdgasnetze.....	127
Tabelle 3-40: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Wind & HGÜ Nordsee.....	130
Tabelle 3-41: Ergebnisse der alternativen Zusatzmaßnahme: Wind & HGÜ Marokko	131
Tabelle 4-1: Energiebedarf ohne Maßnahmen des Meseberg-Programms, 2005-2030.....	137
Tabelle 4-2: Energiebedarf mit Maßnahmen des Meseberg-Programms, 2005-2030	138

Tabelle 4-3: Treibhausgasminderungen, induzierte Investitionen und spezifische Vermeidungskosten des Meseberg-Programms bis 2020	140
Tabelle 4-4: Energiebedarf mit zusätzlichen Maßnahmen zum Meseberg-Programms, 2005- 2030.....	142
Tabelle 4-5: Treibhausgasminderungen, induzierte Investitionen und spezifische Minderungskosten weiterer Maßnahmen bis 2020	145
Tabelle 4-6: Mögliche Ausprägungen der Auswirkungen von Klimaschutzmaßnahmen auf die gesamtwirtschaftliche Produktivitätsentwicklung	150
Tabelle 6-1: Prozesse mit typischen Temperatur-Niveaus mit dem größten Potenzial für solarthermische Anwendungen	184

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Überblick über das methodische Vorgehen zur Bewertung des Meseberg-Programms und weiterer Maßnahmen zur Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen	9
Abbildung 1-2: Struktur und Hauptcharakteristika des ASTRA-Modells.....	18
Abbildung 1-3: Verknüpfung der technologiebasierten Bottom-up-Inputs mit den ökonomischen Modellen in ASTRA.....	23
Abbildung 2-1: Emissionsreduktionen in Deutschland: Vergangene Werte und einige Szenarien. Emissionen in Mio. t.....	25
Abbildung 2-2: Schema eines „Fahrplans“ für den Aufbau eines zukunftsfähigen Energiesystems in Deutschland	26
Abbildung 2-3: Entwicklung des realen Ölpreises 1869-2008 [$\$_{2007}/\text{bbl}$], jährliche Mittelwerte der Sorte WTI. Wert für 2008 ist der Spotpreis WTI 3. Juli 2008	28
Abbildung 2-4: Entwicklung der realen Gaspreise (US-Erdgaspreise) [$\$_{2007}/1\,000\,\text{ft}^3$] und (Grenzübergangspreise Deutschland) [$\text{€}_{2007}/\text{TJ}$] sowie der realen Drittlandssteinkohlepreise frei deutsche Grenze [$\text{€}_{2007}/\text{TJ}$].....	30
Abbildung 2-5: Nettoanlageinvestitionen in % des Nettoinlandsprodukts in ausgewählten Ländern des Euroraums 1991-2007	33
Abbildung 2-6: Nettoinvestitionsquoten im internationalen Vergleich, 2006.....	33
Abbildung 2-7: Nettoinvestitionsquoten (NIQ) und Wachstumsraten (BIP) in Deutschland 1960-2007	34
Abbildung 2-8: Anteil des noch nicht abgeschrieben Anlagevermögens am gesamten Kapitalbestand (links Gebäude, rechts Ausrüstungen).....	35
Abbildung 3-1: Entwicklung der Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien, Deutschland ...	49
Abbildung 3-2: Erläuterung wichtiger Hemmnisse entlang des Produktlebenszyklus eines Investitions- oder langfristigen Gebrauchsgutes	57
Abbildung 3-3: Entwicklung der Registrierung von neuen PKW in Deutschland, 2002 bis 2025	79
Abbildung 3-4: Entwicklung des Bedarfs von fossilen und regenerativen Kraftstoffen (PJ), 2008-2030	84
Abbildung 3-5: Fahrleistungsanteile LKW >12t auf BAB nach Euro-Emissionsklassen 2000 bis 2012	102
Abbildung 4-1: Importanteile und Arbeitsintensitäten von unterschiedlichen Wertschöpfungsketten (in %) (kumulierte direkte und indirekte Effekte).....	148
Abbildung 4-2: Spezialisierung auf Klimaschutztechnologien bei Patenten (Relativen Patentaktivität (RPA) 2000-2004), im Außenhandel (Revealed Comparative Advantage (RCA) 2005) und Welthandelsanteil für ausgewählte OECD-Länder (in %)	154

Abbildung 4-3: Zeitpfade der Klimaschutzinvestitionen für die einzelnen Maßnahmen (Dateninput aus der Bottom-up-Analyse verarbeitet in ASTRA)	157
Abbildung 4-4: Differenzierung der Klimaschutzinvestitionen nach Sektoren	158
Abbildung 4-5: Gesamte prozentuale Veränderung der Energie- bzw. Kraftstoffkosten für Haushalte im Vergleich mit dem Referenz-Szenario.....	159
Abbildung 4-6: Veränderungen der Ausgaben für Verkehr der Haushalte	160
Abbildung 4-7: Einsparung an Energieimporten nach Deutschland.....	161
Abbildung 4-8: Dynamik der gesamtwirtschaftlichen Investitionen durch Klimaschutz	162
Abbildung 4-9: Veränderung der Hauptkomponenten des BIP in Deutschland	163
Abbildung 4-10: Anstieg der Beschäftigung durch Klimaschutzpolitik in Deutschland	164
Abbildung 4-11: Zusätzlicher Anstieg der Beschäftigung durch einen First-Mover-Erfolg durch Klimaschutzpolitik in Deutschland	165
Abbildung 4-12: Wirkungen auf den Staatshaushalt in Deutschland	166
Abbildung 5-1: Energieflussdiagramm der Welt und Energieverluste auf allen drei Stufen der Energienutzung und -wandlung, 2003.....	168
Abbildung 5-2: Weltweite Patentdynamik von Klimaschutztechnologien im Vergleich zu allen Patentanmeldungen, 1991 bis 2004	174
Abbildung 5-3: Schema des „Systems of Sustainability Innovation“-Ansatzes	176
Abbildung 7-1: Gegenwärtig zu erwartende Vermeidungskosten für unterschiedliche Maßnahmen	204

Verzeichnis der Abkürzungen

a	-	Jahr
AEP	-	American Electric Power
AMECO	-	Annual macro-economic database
BAFA	-	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhr
BBR	-	Bundesamt für Bauordnung und Raumwesen
BDEW	-	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BDI	-	Bundesverband der Deutschen Industrie
BEE	-	Bundesverband Erneuerbare Energien
BEI	-	Bremer Energie-Institut
BEV	-	Battery-powered electric vehicles (kleine Batteriefahrzeuge)
BHKW	-	Blockheizkraftwerk
BIP	-	Bruttoinlandsprodukt
BMELV	-	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMF	-	Bundesministerium der Finanzen
BMU	-	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBS	-	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMWi	-	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BSR	-	Büro für sozialverträgliche Ressourcennutzung
CCS	-	Carbon capture and storage (Kohlenstoffabscheidung und -speicherung)
CEPE	-	Centre for Energy Policy and Economics
CO ₂	-	Kohlenstoffdioxid („Kohlendioxid“)
CO _{2eq}	-	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
dena	-	Deutsche Energieagentur
DG ECFIN	-	Directorate-General for Economic and Financial Affairs
DIW	-	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DKF	-	Deutscher Klimafonds
DL	-	Dienstleistungen
DLR	-	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ECF	-	European Climate Forum
EEG	-	Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien („Erneuerbare-Energien-Gesetz“)
EEX	-	European Energy Exchange

EIA	-	Energy Information Administration, US Government
EnEV	-	Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden („Energieeinsparverordnung“)
EU	-	Europäische Union
EV	-	Electric vehicles (Elektrofahrzeuge)
EWEA	-	European Wind Energy Association
EWI	-	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln
FKW	-	Fluorkohlenwasserstoffe
FZJ	-	Forschungszentrum Jülich
GOs	-	Guarantees of origin (Ursprungszertifikate für Strom aus erneuerbaren Energien)
GW	-	Gigawatt
GWh	-	Gigawattstunde
GWP	-	Global warming potential (Treibhauspotenzial)
HEV	-	Hybrid electric vehicle (Hybrid-elektrisches Fahrzeug)
HFKW	-	halogenisierte Fluorkohlenwasserstoffe
HGÜ	-	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HMRC	-	Her Majesty's Revenue and Customs
HVAC	-	High-voltage alternating current (Drehstrom-Hochspannungs-Übertragung)
IEA	-	International Energy Agency (Internationale Energieagentur)
IEKP	-	Integriertes Energie- und Klimaprogramm
ifeu	-	Institut für Energie- und Umweltforschung
IPCC	-	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISI	-	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
IWU	-	Institut für Wohnen und Umwelt
IZES	-	Institut für Zukunftssysteme
KBA	-	Kraftfahrt-Bundesamt
KfW	-	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KKW	-	Kernkraftwerk
KWK	-	Kraft-Wärme-Kopplung
LDV	-	Light duty vehicles (Transporter)
MwSt	-	Mehrwertsteuer
N ₂ O	-	Distickstoffmonoxid („Lachgas“)
NAWARO	-	Nachwachsende Rohstoffe
NIQ	-	Nettoinvestitionsquote

OECD	-	Organisation for Economic Co-operation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
ÖI	-	Öko-Institut
PHEV	-	Plug-in hybrid electric vehicle (Hybrid-elektrisches Fahrzeug mit externer Lademöglichkeit)
PIK	-	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PPP	-	Public private partnership (Öffentlich-Private Partnerschaft)
PV	-	Photovoltaik
RAENG	-	Royal Academy of Engineering
RCA	-	Revealed comparative advantage (offenbarter komparativer Vorteil)
REG	-	Regenerative Energien
RPA	-	Relative Patentaktivität
SF ₆	-	Schwefelhexafluorid
SVR	-	Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung
THG	-	Treibhausgase
UBA	-	Umweltbundesamt
V2G	-	Vehicle to grid (Elektromobil mit bidirektionaler Verbindung zum Stromnetz)
VCD	-	Verkehrsclub Deutschland e.V.
VdKI	-	Verein der Kohlenimporteure
VO	-	Verordnung
WTI	-	West Texas Intermediate

Zusammenfassung

Der fortschreitende Klimawandel, die Verknappung fossiler Ressourcen sowie die Preisfluktuationen für fossile Energieträger sind zentrale Herausforderungen dieses Jahrhunderts. Um diese Herausforderungen zu meistern, ist global ein wesentlich energieeffizienteres und emissionsärmeres Wirtschaften nötig – und damit einhergehend die entsprechende Umstrukturierung des weltweiten Kapitalstocks. Nur so kann der Energiebedarf aus erneuerbaren Ressourcen gedeckt und die notwendige Minderung der Treibhausgas-Emissionen erreicht werden.

Die Bundesregierung hat durch die Kombination von Emissionshandel und Meseberg-Programm mit seinen sektor- und technologiespezifischen Maßnahmen ein bemerkenswertes klimapolitisches Instrumentarium ins Leben gerufen. Das Meseberg-Programm dürfte in der bisher konkretisierten Form zur Minderung von Treibhausgasemissionen von gut 34% führen. Die verbleibenden sechs Prozentpunkte sind durch die Umsetzung weiterer Maßnahmen zu moderaten oder sogar negativen Vermeidungskosten in allen Sektoren der Wirtschaft erreichbar.

Angesichts der hohen technischen Fortschritte im Energiebereich, der hohen Primärenergiepreise und des Nachholbedarfs an Investitionen in Deutschland ist jetzt der richtige Zeitpunkt für eine Investitions-Offensive. Das Meseberg-Programm bietet eine wichtige Grundlage zur ökologischen Umstrukturierung des Kapitalstocks in Deutschland. Bei geeigneter Umsetzung und mittels einiger ergänzender Maßnahmen kann das Meseberg-Programm einen vierfachen Erfolg erzielen:

- Die Realisierung eines ambitionierten klimapolitischen Zieles bis 2020 und weiterer langfristiger Ziele im Sinne einer nachhaltigen klima- und energieeffizienten Wirtschaftsstruktur,
- eine über Jahrzehnte anhaltende Steigerung der Nettoinvestitionen um über 30 Mrd. € pro Jahr ab Mitte des kommenden Jahrzehnts,
- eine ebenfalls langfristige Steigerung des Bruttoinlandsprodukts um mindestens 70 Mrd. € jährlich,
- und die Schaffung von mindestens 500 000 Arbeitsplätzen bis zum Jahre 2020.

Die deutsche Wirtschaft nimmt durch diese ehrgeizige Meseberg-Strategie keinen Schaden – im Gegenteil: Fast alle Investitionen und organisatorischen Maßnahmen zur effizienteren Nutzung von Energie sind grundsätzlich rentabel, durch verschiedenartige Marktdefizite und Koordinationsprobleme ist ihre Umsetzung durch die Unternehmen derzeit blockiert. Allein die Maßnahmen „Ausbau der erneuerbaren Energien“ und – sofern sie sich bewährt – die „Rückhaltung und Speicherung von CO₂“ sind in der ersten Umsetzung hingegen häufig mit Zusatzkosten verbunden. Die Beiträge dieser Maßnahmen zur Verminderung von Klimarisiken, die Kostensenkungspotentiale dieser neuen Technologien und die Stärkung der exportierenden Wirtschaft als „First Mover“ auf den Weltmärkten rechtfertigen aber trotzdem eine schnell steigende Nutzung auch dieser beiden Optionen. Insgesamt bietet das Meseberg-Programm für die deutsche Wirtschaft deutliche Investitions- und Entwicklungschancen im heimischen Markt und im internationalen Wettbewerb und es zeigt sich: Eine klug konzipierte Klimapolitik ist Wachstumspolitik!

Die Potentiale einer Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz und der erneuerbaren Energien werden auch in 2030 noch lange nicht ausgeschöpft sein. Vielmehr eröffnen sie bis weit in die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts den Weg zu einer nachhaltigen und global tragfähigen Industriegesellschaft mit weltweiter Dimension für eine Bevölkerung von rund 9 Mrd. Menschen. Forschung und Entwicklung auf der gesamten Breite der Technologien zur Energienutzung und -umwandlung, zur Materialeffizienz und zu unternehmerischen Innovationen haben dabei eine herausragende Bedeutung.

Dieses Dokument und der Synthesebericht dieser Studie sind unter www.klimainvest.net/download.html als pdf-Dokument verfügbar.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Der fortschreitende Klimawandel, die Verknappung fossiler Ressourcen sowie die Preisfluktuationen für fossile Energieträger sind zentrale Herausforderungen dieses Jahrhunderts. Der Vierte Sachstandsbericht des IPCC sowie nachfolgende Forschungen unterstreichen die Notwendigkeit rascher und umfassender Klimaschutzmaßnahmen, soll das innerhalb der EU akzeptierte 2°C-Ziel nicht verfehlt und damit gefährlicher Klimawandel in Gang gesetzt werden. In den nächsten 10-15 Jahren müssen die weltweiten Emissionen ihren Scheitelpunkt erreichen, um dann möglichst rasch zu sinken. Dies kann nur gelingen, wenn die emissionstreibenden Einflüsse zwischen komplexen Gesellschaften und der Erdatmosphäre grundlegend umgebaut werden und ein zukunftsfähiger Entwicklungspfad eingeschlagen wird. Dazu ist global ein wesentlich energie- und materialeffizienteres und emissionsärmeres Wirtschaften nötig – und damit einhergehend die entsprechende Umstrukturierung des weltweiten Kapitalstocks.

Mit den europäischen Beschlüssen vom März 2007 und dem von der Bundesregierung auf ihrer Klausurtagung in Meseberg in der Folge beschlossenen *Integrierten Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung* (IEKP) vom August 2007 (auch: „Meseberg-Programm“ genannt) liegt für Deutschland ein umfassendes klimapolitisches Instrumentarium in diesem Sinne vor, das sich derzeit zum Teil noch im parlamentarischen Verfahren befindet und ab 2009 Wirkungen erzielen wird. Eckpfeiler der Strategie sind die Steigerung der Energieeffizienz und der weitere Ausbau erneuerbarer Energien. Im Einzelnen definiert es folgende Ziele für das Jahr 2020:

- die Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen um 40% gegenüber 1990,
- einen Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung von 25-30%,
- einen Anteil von 14% erneuerbarer Energien an der Wärmeerzeugung,
- den Ausbau der Biokraftstoffe, um 10% der Kraftstoffemissionen zu senken (entspricht Biokraftstoffanteil von bis zu 17%),

- die Verdoppelung der Energieproduktivität – dem Verhältnis zwischen Bruttoinlandsprodukt und Primärenergiebedarf – gegenüber 1990.

Um diese Ziele zu erreichen, umfasst das Meseberg-Programm neunundzwanzig Programmpunkte, die in Ergänzung zum Emissionshandel und anderen bereits bestehenden sektoralen Maßnahmen wirken sollen. Sie umfassen ordnungsrechtliche Vorschriften und finanzielle Fördermaßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung sowie zum Einsatz erneuerbarer Energien.

Mit diesem Paket erweise sich Deutschland als Pionier der internationalen Klimapolitik, erklärte John Ashton, Klimabotschafter der britischen Regierung (Der Tagesspiegel 2008).

Diese ehrgeizigen klimapolitischen Ziele haben erhebliche technologische und wirtschaftliche Implikationen. Die Bundesregierung ist sich dieser Herausforderung der kommenden Jahrzehnte bewusst, wenn sie in der „Klimaagenda 2020“ feststellt, dass die Umsetzung dieser Ziele auf längere Sicht nicht weniger impliziere als einen „Umbau der heutigen Industriegesellschaft“ (BMU 2007b).

Der globale Klimawandel und die korrespondierende Klimapolitik sind in der Tat heute zunehmend mit Kernfragen von Wirtschaft und Gesellschaft verzahnt. Der *Stern-Report* „The Economics of Climate Change“ durch die britische Regierung verwies im Jahr 2006 bereits auf den Zusammenhang zwischen zu erwartendem Klimawandel und drohenden ökonomischen Aufwendungen für Anpassung und klimabedingte Schäden. Klimaschutz muss demnach nicht nur als umweltpolitische Notwendigkeit, sondern auch als wirtschaftlich sinnvolle Investition in die Zukunft verstanden werden (Stern 2006). Diese Sicht wurde durch den 2007 erschienenen 4. Sachstandsbericht des IPCC unterstützt (IPCC 2007).

Die klima- und energiepolitische Initiative der Bundesregierung trifft dabei auf eine deutsche Volkswirtschaft, deren Entwicklung spürbar unter den globalen Phänomenen der Verknappung fossiler Ressourcen und den Preisfluktuationen für fossile Energieträger zu leiden hat. Dies ist insbesondere für eine ressourcenarme, aber exportorientierte Volkswirtschaft ein Problem und die Frage der langfristig sicheren und finanzierbaren Energieversorgung gewinnt immer mehr an Bedeutung. Gesamtwirtschaftlich betrachtet

geht die Modernisierung des Kapitalstocks nur sehr langsam vonstatten. Trotz des ungebrochen regen deutschen „Erfindergeistes“ hapert es tendenziell mit der Einführung und Durchsetzung guter Ideen am heimischen Markt. Was die Exporte angeht, hält die deutsche Wirtschaft eine Spitzenposition im internationalen Wettbewerb inne, gleichzeitig haben Anstrengungen zur Sicherung und Vermehrung von Arbeitsplätzen nach wie vor eine hohe wirtschaftspolitische Priorität.

Unsere Gegenwart ist dadurch gekennzeichnet, dass klimapolitische, forschungs- und energiepolitische sowie allgemein wirtschaftspolitische Belange besonders eng ineinander greifen und ein multiples Gefüge an Herausforderungen bilden. Dies mag eine der Ursachen dafür sein, dass die derzeitige klimapolitische Debatte rund um das Meseberg-Programm leider noch über weite Strecken durch Vermutungen und Behauptungen geprägt ist, die ohne detaillierte analytische oder empirische Analysen der diskutierten Maßnahmen und der relevanten Zusammenhänge entstanden sind.

In solche erforderlichen - und hier im Ergebnis dargelegten - Analysen gehören etwa spezifische Eigenschaften konkreter Technologien und Marktverhältnisse, ihre mögliche Marktdurchdringung aufgrund von Re-Investitionszyklen oder unterstützender politischer Maßnahmen als auch makroökonomische Wirkungen für die deutsche Wirtschaft. Werden diese Sachverhalte nicht hinreichend spezifiziert, kommt es leicht zu Vereinfachungen und die Versuchung ist groß, je nach gegebener Interessenlage, bisherigen Erfahrungen oder politischer Präferenz zu glauben, dass eine wirksame Klimapolitik in Deutschland nur um den Preis gesamtwirtschaftlicher Einbußen zu haben ist, oder aber, dass es sich dabei um eine leichte Aufgabe handle, deren Bewältigung nur durch den Widerstand uneinsichtiger Lobbyisten erschwert wird.

1.2 Zielsetzung der Studie

Vor diesem Hintergrund setzte sich die vorliegende Studie zum Ziel, die Investitionsbedarfe für eine plausible Strategie zur Reduktion der deutschen Treibhausgase abzuschätzen.

„Plausibel“ heißt hier: im Rahmen der politischen Möglichkeiten technisch und wirtschaftlich optimiert. Entsprechend den Zielen und bisherigen Beschlüsse der Bundesre-

gierung soll die Strategie demnach

- im Jahr 2020 eine Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen um 40% gegenüber 1990 ermöglichen,
- und Pfade für weitere Reduktionen in den folgenden Jahrzehnten eröffnen.

Im Hinblick auf eine solche Strategie hat das Projekt

- spezifiziert, mit welchen Investitionsvolumina in verschiedenen Bereichen bis 2020 zu rechnen ist,
- die Beschäftigungswirkung der betrachteten Strategie abgeschätzt,
- den Wachstumseffekt der Strategie abgeschätzt,
- Investitionsbedarfe und Vermeidungskosten für Sektorspezifische Maßnahmen abgeschätzt,
- Ansätze für Pilotprojekte identifiziert, durch die die relevanten Innovationen entwickelt und auf den Markt gebracht bzw. ihre Diffusion beschleunigt werden können.

Ausgangspunkt der betrachteten Strategie war dabei die aktuelle Klimapolitik der Bundesregierung. Diese verbindet den europäischen Emissionshandel mit einem Bündel sektorspezifischer Maßnahmen, dem sogenannte Meseberg-Programm einer integrierten Energie- und Klimapolitik (IEKP).

Als erstes wurde deshalb untersucht, ob es mit den durch das Meseberg-Programm implizierten Investitionen gelingen kann, die ambitioniert klimapolitischen Ziele zu erreichen. Da dies nicht in vollem Umfang möglich scheint, wurde ein Paket zusätzlicher Maßnahmen entwickelt, mit dem diese Ziele erreichbar sind.

Die verwendete Methodik wird in Abschnitt 1.3 erläutert. Sie beruht auf einer detaillierten Untersuchung der möglichen Wirkungen sektorspezifischer Maßnahmen. Da diese Maßnahmen nicht unabhängig voneinander wirken, können die makro-ökonomischen Effekte auch nicht durch eine einfache Addition ermittelt werden. Vielmehr ist dazu ein umsichtiger Gebrauch von Computersimulationen erforderlich. Umsichtig deshalb, weil

jeder Versuch, das wirtschaftliche Geschehen über mehrere Jahrzehnte abzuschätzen, mit vielerlei Ungewissheiten konfrontiert ist.

Deshalb wurde als erstes die historische Entwicklung der vergangenen Jahrzehnte untersucht, um die Ausgangssituation und die spezifischen Herausforderungen für die betrachtete Strategie zu ermitteln. Kapitel 2 beleuchtet die Entwicklungen in drei dafür besonders relevanten Bereichen: der Klimapolitik, den Energiepreisen sowie dem Kapitalstock und der allgemeinen Investitionstätigkeit.

In Kapitel 3 werden dann die einzelnen Maßnahmen des Meseberg-Programms sowie die von den Autoren definierten zusätzlichen Maßnahmen im Detail betrachtet. Zum ersten Mal werden hier für ein integriertes Paket klimapolitischer Maßnahmen sowohl die Emissionswirkungen als auch die erforderlichen Investitionen sowie die laufenden Kosten bzw. Erträge abgeschätzt. Naturgemäß bestehen die Erträge in erster Linie in eingesparten Energiekosten (Exportchancen werden bei der makro-ökonomischen Betrachtung von Kapitel 4 miteinbezogen). Die Entwicklung dieser Größen im Zeitverlauf wird dann zu Gegenwartswerten abdiskontiert, sodass sowohl ein Gegenwartswert der jeweiligen Maßnahmen als auch eine Schätzung für maßnahmenspezifische Vermeidungskosten angegeben werden können.

In Kapitel 4 werden dann diese maßnahmenspezifischen Größen zu einer integrierten und makro-ökonomischen Analyse gebündelt. Das ist in dieser Form in der Fachliteratur bisher noch nicht geleistet worden und zeitigt bemerkenswerte Ergebnisse. Insbesondere zeigt sich, dass in der konkreten Situation Deutschlands die betrachtete Strategie zu einer Wohlstandssteigerung führen kann, bei der sowohl das Sozialprodukt als auch vor allem die Beschäftigung gegenüber dem Referenzfall steigen, nicht fallen. Es ist jedoch nicht zu übersehen, dass dazu erhebliche politische Hindernisse überwunden und nicht minder anspruchsvolle wirtschaftliche Koordinationsprobleme gelöst werden müssen.

Die betrachtete Strategie misst sich in erster Linie am Ziel einer 40%-igen Emissionsreduktion gegenüber 1990 im Jahr 2020. Sie muss jedoch so fortsetzbar sein, dass bis 2050 die von der Bundesregierung angestrebte Reduktion um 80% realisiert werden kann. In Kapitel 5 wird mit dem Begriff der „2000 Watt-Gesellschaft“ eine realisierbare Vision in dieser Perspektive vorgestellt und stellt die Konsequenzen für Forschung und Entwicklung dar. Sie mobilisiert technische Potentiale der Energieeffizienz, aber auch

Effizienzsteigerungen bei der Nutzung energieintensiver Materialien sowie sozialen Innovationen. Letztere zielen auf Faktoren wie Nachfrageverhalten, Entscheidungsrou-tinen, Prioritäten und Präferenzen sowie unternehmerische Innovationen ab. Anknüp-fend an die einleitenden Überlegungen in Kapitel 2 wird hier auch der Frage nachge-gangen, inwieweit man heute bereits einen Zusammenhang zwischen Klimaschutzpoli-tik und Innovationstätigkeit empirisch bestätigen kann.

Zur Lösung des Klimaproblems ist weltweit die Umsetzung noch vieler neuer Ideen in verschiedensten Lebensbereichen notwendig. Und selbst wenn innovative Lösungen schon vorhanden sind: der Weg vom „Reißbrett“ in den Alltag der Menschen scheitert in der Praxis oft an tradierten Normen und Denkmustern. In Kapitel 6 werden daher beispielhaft „Leuchtturmprojekte“ mit hohem Demonstrationspotential vorgestellt, die ökologisch effektiv sind und das Potential haben, eine „Kultur des Experimentie-rens“ anzustiften.

1.3 Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen der Analysen gliedert sich in drei Schritte (vgl. Abbildung 1-1):

1. die Festlegung der Basisdaten für die Ausgangslage und die Entwicklung der Rahmenbedingungen für den Energiebedarf Deutschlands und dessen Emissionen sowie der sonstigen Treibhausgasemissionen bis zum Jahre 2030;
2. eine energiewirtschaftliche und mikroökonomische Bewertung der Meseberg-Maßnahmen und zusätzlicher Maßnahmen mit Berücksichtigung ihrer Wechselwirkungen untereinander einschließlich der Rückkopplung zwischen Endenergiesektoren und Umwandlungssektor;
3. eine gesamtwirtschaftliche Bewertung der Meseberg- und der zusätzlichen Maßnahmen im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf Wachstum, Beschäftigung und Außenhandel.

Im Kern handelt es sich um einen Hybridansatz mit einer losen Kopplung von prozessorientierten Bottom-up-Modellen und einem gesamtwirtschaftlichen Modell, der im Folgenden kurz beschrieben ist.

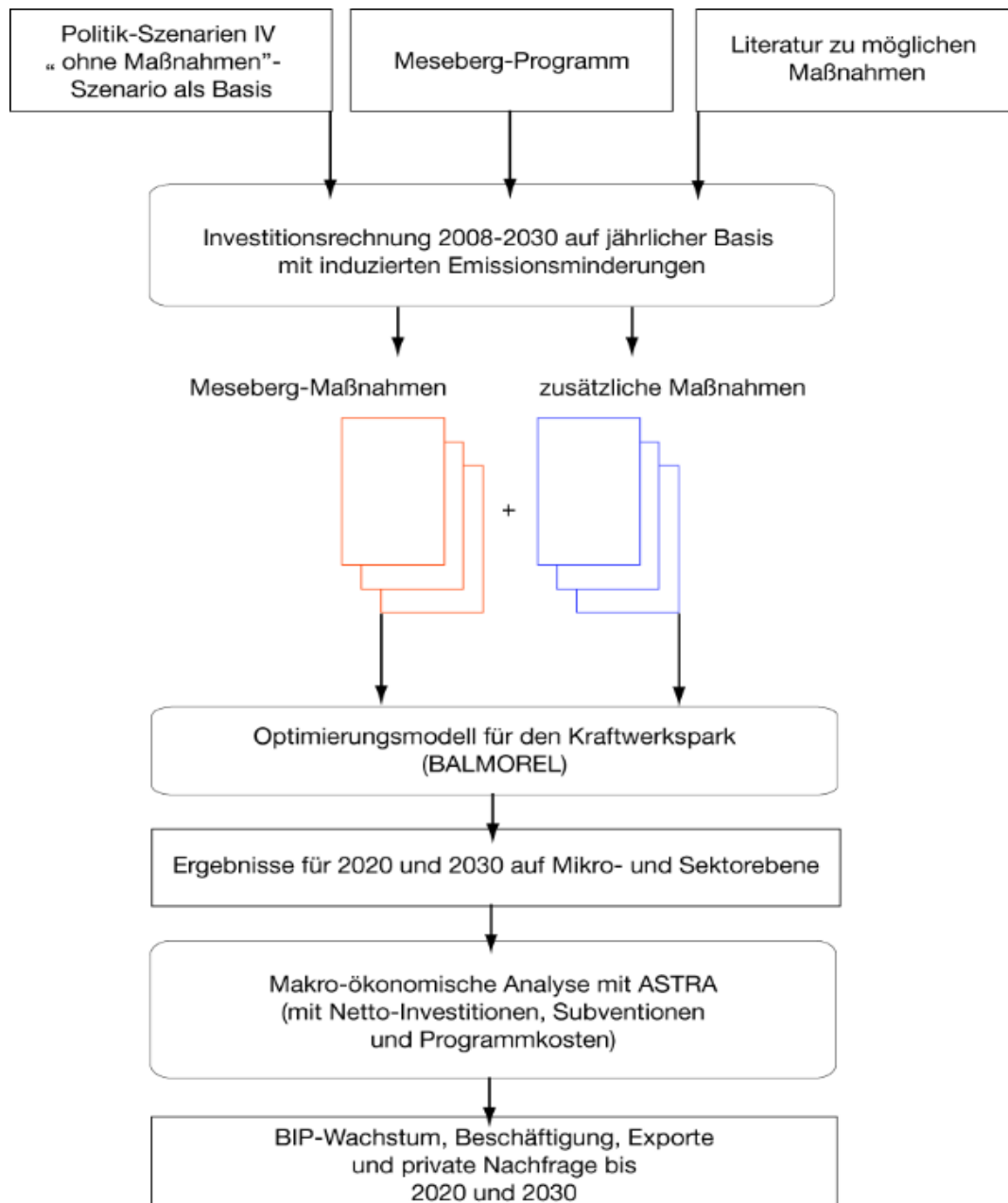


Abbildung 1-1: Überblick über das methodische Vorgehen zur Bewertung des Meseberg-Programms und weiterer Maßnahmen zur Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen

1.3.1 Verwendete Basisdaten und unterstellte Entwicklung der Rahmenbedingungen

Demographische, wirtschaftliche und andere Rahmendaten für die Szenarienentwicklung

Für die gesamtwirtschaftlichen Rahmendaten wird im Wesentlichen auf die Daten abgestellt, die der Hochpreisvariante zur energiewirtschaftlichen Referenzprognose von EWI/ Prognos (2006) zu Grunde lagen. Für die hier vorliegenden Analysen wurden die genannten Rahmendaten nicht variiert, sofern in Kapitel 3 nicht ausdrücklich darauf hingewiesen wird. Mit Blick auf die Unsicherheiten, die bei Projektionen über 25 Jahre ohnehin zu beachten sind, ist zwar vor dem Hintergrund der aktuellen Entwicklungen der eine oder andere Einfluss (z. B. eine noch höhere Preisentwicklung der Energieträger und der Rohstoffe) erkennbar. Eine Variationsrechnung für diese Einflussfaktoren wurde aber nicht durchgeführt.

Tabelle 1-1: Zugrundeliegende Rahmenbedingungen: Wohnbevölkerung, Zahl der Haushalte, Bruttoinlandsprodukt, Industrieproduktion und Erwerbstätige in Deutschland 2000-2030

Einflussgröße	Dimension	2000	2005	2010	2020	2030
Wohnbevölkerung	1 000	82 260	82 438	82 411	81 393	79 421
Private Haushalte	1 000	38 151	39 178	39 665	40 021	39 716
Bruttoinlandsprodukt	Mrd. € ₂₀₀₀	2 063	2 129	2 305	2 669	3 069
Inlandsprodukt	Mrd. €	403,1	398,5*	438,7	506,5	574,7
Erwerbstätige	1.000		38 671	38 346	38 220	36 843

* Wert: 2002

Quelle: Fraunhofer-ISI et al. (2008b:78–84)

Die demographische Entwicklung verläuft – gemessen an der Einwohnerzahl – bis zum Jahr 2030 auf einen Wert von 79,4 Mio. leicht sinkend (vgl. Tabelle 1-1). Eine wesentliche Determinante für den Heizenergiebedarf bildet die Struktur des Haushalts- bzw. Wohnungsbestandes in Deutschland, der sich im Vergleich zum Jahr 2000 bis 2020 um knapp 2 Mio. erhöht und dann bis zum Jahr 2030 etwa wieder auf das Niveau von 2010 zurückkehrt. Treiber dieser Entwicklung ist die deutlich zunehmende Zahl der Ein-

Personen-Haushalte, für deren Zahl bis zum Jahr 2030 eine Zunahme von etwa 2 Mio. unterstellt wird. Eine vergleichbare Zunahme wird auch für die Zwei-Personen-Haushalte erwartet, für die Haushalte mit drei oder mehr Mitgliedern wird ein deutlicher Rückgang prognostiziert.

Im Zeitraum 2000 bis 2030 nimmt das inflationsbereinigte Bruttoinlandsprodukt (BIP) um etwa 47 % zu, dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von etwa 1 % (real). Die Struktur der Wertschöpfung verschiebt sich bis 2030 nur leicht. Der Anteil des Verarbeitenden Gewerbes an der gesamten Wertschöpfung sinkt leicht von 20,7 % im Jahr 2000 auf 20,1 % im Jahr 2030. Deutlich höhere Wachstumsraten werden für die Bereiche Verkehrs und Nachrichtenübermittlung, Gesundheits- und Sozialwesen sowie die sonstigen Dienstleistungen prognostiziert. Im Vergleich zum BIP unterdurchschnittliche Wachstumsraten der Wertschöpfung werden für den Handel, das Baugewerbe, die Energiewirtschaft, den öffentlichen Sektor sowie den Bergbau und die Land- und Forstwirtschaft erwartet.

Für eine Reihe von Quellbereichen für prozessbedingte Treibhausgas-Emissionen wurden auch physische Produktionsdaten verwendet. Diese Daten wurden entweder direkt aus der Projektion von EWI/Prognos (2006) entnommen (Roheisen und Stahl) oder wurden vom ISI auf der Grundlage von Wertschöpfungsannahmen abgeschätzt (vgl. Tabelle 1-2).

Tabelle 1-2: Erzeugungsdaten für energieintensive Industrieprodukte, 2000 - 2030

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
	Mio. t						
Roheisen	30,8	28,9	27,3	26,3	25,1	23,9	23,2
Oxygenstahl	33,1	30,9	29,1	27,9	26,6	25,6	24,9
Elektrostahl	13,3	13,7	13,4	13,6	13,4	13,4	13,1
Primäraluminium	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Zement	38,0	31,2	31,6	30,8	30,0	30,5	31,0
Kalk (einschließlich Dolomit)	7,3	6,8	6,6	6,6	6,5	6,5	6,4
Glas (Summe der verschiedenen Sorten)	7,7	6,6	7,2	7,0	6,8	6,7	6,6

Quelle: Fraunhofer-ISI et al. (2008b:81)

Für die Entwicklung des Energiebedarfs (und der Emissionen) im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen werden oft Beschäftigtendaten verwendet (vgl. Tabelle 1-1). Ein weiterer Strukturwandel zwischen dem sekundären und tertiären Sektor zeigt sich

angesichts einer bis zum Jahr 2030 insgesamt leicht abnehmenden Zahl der Erwerbstätigen, wobei die Zahl der Beschäftigten im Verarbeitenden Gewerbe um fast ein Viertel zurückgeht. Im Jahr 2030 sind nur noch 16,5 % der insgesamt Erwerbstätigen in diesem Bereich tätig sind (2000: 20%). Deutliche Beschäftigungszuwächse erfolgen nur noch im Dienstleistungssektor sowie im Bereich des Gesundheits- und Sozialwesens, nicht zuletzt aufgrund der alternden Bevölkerung.

Energiepreisentwicklung

Die Festlegung der zukünftig zu unterstellenden Energiepreise bildet sowohl für die Entwicklung der Energienachfrage und induzierte Emissionen als auch für die Ermittlung der Vermeidungskosten energiebedingter Treibhausgasemissionen eine zentrale Einflussgröße. Eine eigene konsistente Projektion war im Rahmen dieser Analyse nicht möglich; daher wurde weitgehend – aber auch mit Blick auf die Annahmen im World Energy Outlook 2006 (IEA 2006) – auf das Hoch-Preisszenario von EWI/Prognos (2006) abgestellt (vgl. Tabelle 1-3).

Tabelle 1-3: Preise für Primärenergieträger (reale Preise, Preisbasis 2000), 2000-2030

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Weltmarktpreise							
Rohöl (Brent) fob (US-\$/bbl)	28,4	48,3	50,0	48,5	47,0	53,5	60,0
Grenzübergangspreise							
Rohöl (€/t)	227,2	299,6	353,0	348,0	343,0	389,0	435,0
Erdgas (ct/kWh)	1,07	1,54	1,60	1,6	1,50	1,7	1,80
Kraftwerkskohle (€/t SKE)	42,1	61,9	53,0	52,5	52,0	54,0	56,0
Drittlandskohle (€/t)	37,7		46	46	45	47	48
Einheimische Förderung Braunkohle (€/GJ)			0,83	0,83	0,83	0,83	0,83

Quellen: Fraunhofer-ISI et al. (2008b:81); EWI, Prognos (2006)

Ausgehend von den Primärenergieträgern wurden dann Energiepreise für einzelne Energieträger und Sektoren gebildet (vgl. Tabelle 1-4), die als Grundlage für die in Kapitel 3 durchgeführten Berechnungen dienten.

Tabelle 1-4: Preise für Mineralölprodukte, Erdgas und Kohle für verschiedene Sektoren, (reale Preise, Preisbasis 2000), 2000-2030

	2000	2005	2010	2015 ^a	2020	2025 ^a	2030
Industrie (ohne MwSt.)							
Heizöl EL (€/t)	381,5	485,0	556,4	558,7	560,9	628,1	695,3
Heizöl S (€/t)	188,9	242,6	244,6	244,7	244,7	267,3	289,9
Erdgas (ct/kWh)	1,7	2,4	2,4	2,4	2,4	2,6	2,8
Steinkohle (€/t SKE)	42,7	62,7	65,2	68,9	72,5	79,3	86,0
Stromerzeugung (ohne MwSt.)							
Steinkohle (€/GJ)	1,6		2,0	2,0	2,0	2,0	2,1
Braunkohle (€/GJ)	0,8		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Erdgas (€/GJ)	3,5		5,0	4,8	4,7	5,1	5,5
Heizöl, schwer (€/GJ)	4,6		5,6	5,4	5,2	5,6	5,9
Heizöl, leicht (€/GJ)	8,9		12,7	12,5	12,4	13,8	15,2
Haushalte (inkl. MwSt. ^b)							
Heizöl EL (ct/l)	40,8	50,7	60,9	61,4	61,9	69,4	76,9
Erdgas (ct/kWh)	3,7	4,8	5,4	5,5	5,5	6,3	7,0
Benzin (€/l)	0,99	1,14	1,27	1,28	1,29	1,36	1,43
Diesel (€/l)	0,80	1,02	1,11	1,12	1,14	1,21	1,27

Anmerkungen: ^a Mittelwert des vorhergehenden und des nachfolgenden Stützjahres. - ^b ab 2007 MwSt.-Satz 19%

Quelle: Fraunhofer-ISI et al. (2008b:83)

Schwieriger war die Festlegung der Entwicklung der zukünftigen Strompreise. Denn die Strompreise in der Hochpreisvariante (EWI/Prognos 2006) liegen außerhalb des plausibel darstellbaren Bereichs, was unter anderem auf die Unterschätzung der Einpreisung von CO₂-Kosten (bzw. der Preisentwicklung für die CO₂-Emissionsberechtigungen) zurückzuführen ist. Hier wurden die Annahmen für eine Neuberechnung der Strompreise von EWI/Prognos (2006) von den Politik-Szenarien IV übernommen; dort wurde eine volle Einpreisung der CO₂-Opportunitätskosten unterstellt, sonst aber von unveränderten Preisbestandteilen (Netznutzung, Vertrieb etc.) ausgegangen (vgl. Tabelle 1-5).

Tabelle 1-5: Preise für Elektrizität und einzelne Sektoren (reale Preise, Preisbasis 2000), 1995-2030

	1995	2000	2010	2015 ^a	2020	2025 ^a	2030
	€/MWh						
Industrie (ohne MwSt.)							
Sonderabnehmer	69,5	44,0					
Hochspannung			65,8	65,2	64,6	67,2	69,7
Mittelspannung			91,8	90,2	88,6	90,7	92,7
Haushalte (inkl. MwSt. ^b)							
Erlöse Tarifabnehmer	168,7	149,2					
Niederspannung			180,3	176,7	173,0	173,1	173,1
Großhandelspreis (Base)	-	18,6	47,1	47,2	47,2	49,8	52,3

Anmerkungen: ^a Mittelwert des vorhergehenden und des nachfolgenden Stützjahres. - ^b ab 2007 MwSt.-Satz 19%

Quelle: Fraunhofer-ISI et al. (2008b:84)

Auch wenn die Annahmen zu den hier dargelegten Energiepreisen heute eher als zu niedrig erscheinen und die Erlöse durch Treibhausgas-Vermeidung eher noch zunehmen würde, so erachten die Autoren die direkte Preiswirkung auf Energieverbrauch und Emissionen als relativ gering, weil die Hemmnisse einer rationellen Energienutzung in vielen Sektoren recht groß sind. Energiekosten werden in sehr vielen Sektoren automatisiert abgebucht, sind nur in seltenen Fällen Gegenstand von Investitionsabwägungen der Investoren und Energieverbraucher (auch wenn bei Energiepreissteigerungen das Gegenteil häufig gesagt wird, vgl. auch Kapitel 2.2).

Verwendete spezifische CO₂-Emissionen

Für die fossilen Brennstoffe wurden die spezifischen CO₂-Emissionen gewählt, wie sie vom Umweltbundesamt veröffentlicht sind. Beim Strom gab es zwei Aspekte zu beachten: einmal nimmt die durchschnittliche spezifische CO₂-Emission infolge verbesserter Wirkungsgrade der fossilen Kraftwerke, des verstärkten Einsatzes von erneuerbaren Energien und der Kraft-Wärme-Kopplung ab. Zum anderen kommt es darauf an, zu welchem Zeitpunkt Strombedarf reduziert wird oder durch erneuerbare Energien zusätzlich erzeugt wird.

Während die Berechnungen bei Stromeinsparungen in den Endenergiesektoren von einem Strommix ausgingen, wurde bei den meisten Strommengen durch die erneuerbaren Energien von einer Substitution eines fossilen Kraftwerkparks mit Schwerpunkt Kohleverstromung ausgegangen. So wurden beispielsweise die spezifischen CO₂-Emissionen für 2020 bei den Endenergiesektoren mit 525 g/kWh Strom gewählt, während sie bei den erneuerbaren Energien im Jahre 2020 mit 625 g/kWh verrechnet wurden.

1.3.2 Energiewirtschaftliche und mikroökonomische Bewertung der Treibhausgasmindernden Maßnahmen

Die mikroökonomische Bewertung der Einzelmaßnahmen des Meseberg-Programms und der zusätzlich identifizierten Maßnahmen erfolgte nach einem gemeinsamen Schema und Berechnungsmodell, das speziell für dieses Projekt entwickelt wurde. Dieses Berechnungstool ist als Kohorten-Modell auf jährlicher Basis ausgelegt und hatte als

Daten-Input die durch die Maßnahme induzierten und vermiedenen Investitionen, den typischen Re-Investitionszyklus, und alle Betriebs- sowie Energiekosten auf jährlicher Basis; außerdem mussten der Zinssatz zur Ermittlung der Kapitalkosten der jeweils betrachteten Investitionsgüter und einmalige Kosten zum Investitionszeitpunkt angegeben werden.

Mit diesem Berechnungs-Tool wurden auch die Wirkungen der Maßnahmen in Form von jährlichen Energieeinsparungen (oder jährlichem Energiemehrverbrauch in einigen Fällen) sowie in Form von jährlichen Minderungen der Treibhausgasemissionen berechnet. Die spezifischen Vermeidungskosten wurden einmal auf Jahresbasis und zudem als abdiskontierter Wert über den Zeitraum von 2008 bis 2030 ermittelt. Diese Methode wurde auf alle Maßnahmen in den Endenergiesektoren und auf die erneuerbaren Energien angewandt, nicht aber auf Maßnahmen im Kraftwerkspark, deren Netto-Investitionen und CO₂-mindernde Wirkung mit einem Optimierungsmodell berechnet wurden (s. u.).

Die Ergebnisse dieses Kohortenmodells wurden in einem einheitlichen Satz von Variablen und Bewertungsgrößen dargestellt; diese sind:

- *Differenzinvestitionen*: hier wird die Differenz zwischen der Investition für die Maßnahme und eventuellen vermiedenen Investitionen in Mrd. €/a in Preisen von 2006 ausgewiesen. Diese wurden für die Übergabe in das gesamtwirtschaftliche Modell (ASTRA, s.u.) auf die Preisbasis von 1995 zurückgerechnet.
- Die *jährlichen Kosten* sind die Differenz zwischen sonstigen jährlichen Auszahlungen und jährlichen Einzahlungen. Negative jährliche Kosten bedeuten, dass die Maßnahme Einnahmen erzielt (i.a. handelt es sich um eingesparte Energiekosten in Mrd. €/a).
- Die *Energieeinsparungen* an Brennstoffen oder Strom, die durch die Maßnahme erzielt werden, sind in TWh/a angegeben.
- Die *THG-Einsparungen* sind die durch die Maßnahme vermiedenen Treibhausgas-Emissionen in Mio. t CO_{2eq} in dem jeweiligen Jahr.
- Die *spezifischen Vermeidungskosten* sind das Verhältnis der jährlich anfallenden Kosten der Maßnahme dividiert durch die in dem gleichen Jahr vermiedenen

Treibhausgasemissionen (in €/t CO_{2eq}). Wenn dieser Wert negativ ist, dann handelt es sich um eine profitable Maßnahme.

- Die *abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen* ist ebenso wie der Barwert der Maßnahme auf das Basisjahr hin abdiskontiert mit der jeweiligen Zinsrate (in Mrd. €).
- Ebenso sind die *abdiskontierten spezifischen Vermeidungskosten* durch den Barwert der Maßnahme gebildet (in €/t CO_{2eq}).

Der jeweils verwendete Zinssatz ist im zweiten Teil der Tabelle jeweils angegeben; dieser variiert zwischen 4 und 10 Prozent je nach Investitionsgut und Investorengruppe. Er soll den betriebswirtschaftlichen Blickwinkel spiegeln, ohne große Risiko- oder Gewinnzuschläge zu unterstellen.

Die einzelnen Maßnahmen sind möglichst einzelnen Sektoren zugeordnet. Dies war allerdings nicht immer möglich, da die Maßnahmen sich auch zum Teil gegenseitig beeinflussen. Dies wurde entweder direkt in Kapitel 3 berücksichtigt oder spätestens in den Kapiteln 4.1 bis 4.3. Daher kann es auch zu Abweichungen zwischen den Ergebnissen in Kapitel 3 und den zusammenfassenden Tabellen in Kapitel 4.1 und 4.2 kommen. Der Kraftwerksbereich wurde stets als letzter berechnet, um die Stromeffizienz-Effekte in den Endenergiesektoren und die zunehmende Strom-Produktion der erneuerbaren Energien und der KWK-Anlagen direkt bei der Netto-Stromnachfrage für die konventionelle Stromerzeugung angemessen berücksichtigen zu können.

Das Optimierungsmodell für die konventionelle Stromerzeugung (BALMOREL) simuliert die einzelnen Kraftwerkstypen (Cremer 2005, Ravn 2001). Der Ausstieg der Kernenergiekraftwerke wurde – wie seitens der Regierung festgelegt – für die Jahre ihrer Außerbetriebnahme vorgegeben, ebenso ein langsamer Rückgang seiner CO₂-Emissionen insgesamt. Weiterhin waren die Re-Investitionszeiten der einzelnen Kraftwerke eine Restriktion, die das Modell zu beachten hatte. Auf diese Weise wurde es möglich, nach Ausloten der Treibhausgasminderungsmöglichkeiten in den übrigen Sektoren den Kraftwerkspark kostenminimal sich so entwickeln zu lassen, dass das Gesamtziel der Treibhausgasminderungen von 40% annähernd erreicht wurde.

Auf Seiten der Energie und der Prozesse wurden dann schließlich ab einer Zielerreichung von gut 39% keine weiteren Maßnahmen in diesen Bereichen, sondern bei der Materialeffizienz unterstellt, weil letztere rentabel sind, während bei den ersteren die Vermeidungskosten über 100 €/t CO_{2eq} anstiegen.

1.3.3 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der untersuchten Maßnahmen

Die gesamtwirtschaftliche Analyse erfolgte mit einem an der Universität Karlsruhe und am Fraunhofer-ISI entwickelten makro-ökonomischen Simulationsmodell (ASTRA), das neben seinem gesamtwirtschaftlichen Teil einen differenzierten Teil des Transportsektors hat. Dies sei im Folgenden kurz beschrieben.

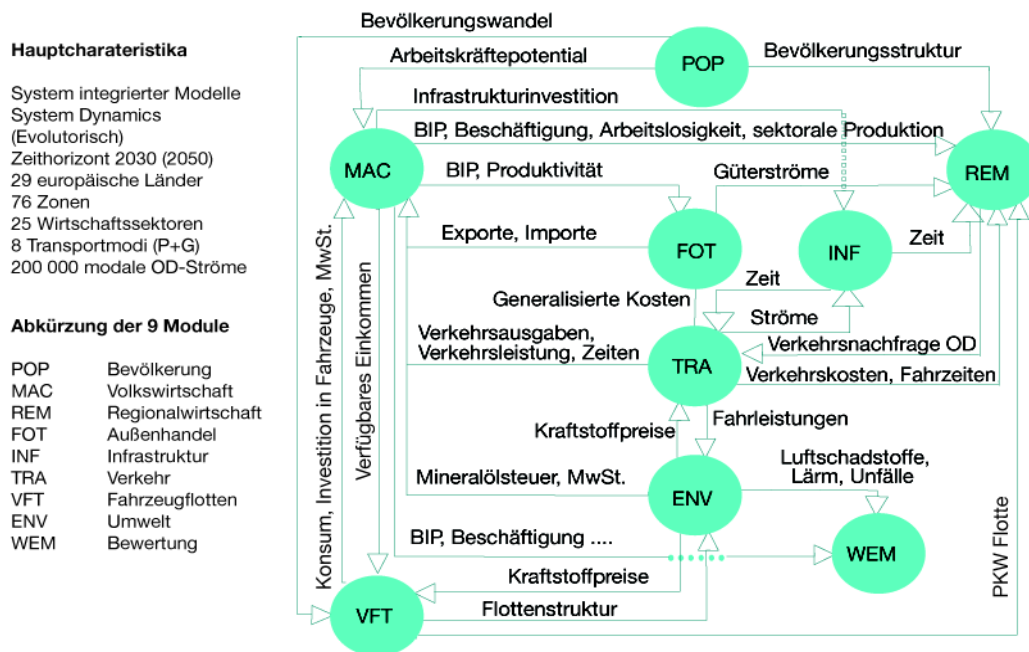
Modellierungsansatz mit dem ASTRA-Modell

Das ASTRA-Modell wurde ursprünglich im Rahmen des EU-Projektes ASTRA im 4. Forschungsrahmenprogramm der europäischen Kommission mit dem Ziel entwickelt, ein Werkzeug zur strategischen Bewertung der europäischen Verkehrspolitik aufzubauen. „Strategisch“ bedeutete zum einen eine längerfristige Perspektive (30-50 Jahre Zeithorizont) zu wählen und zum anderen eine integrierte Analyse der Wirkungen sowohl im Verkehrssystem als auch im Wirtschaftssystem und im Umweltbereich durchzuführen. Da zwischen den einzelnen Systemen eine Vielzahl von Rückkopplungen beobachtet werden können, wurde „System Dynamics“ als Modellierungsansatz gewählt, dessen Stärken genau in der Abbildung solcher Rückkopplungsschleifen liegen (Sterman 2000, Bossel 1994). Wesentliche Zusammenhänge zwischen den einzelnen Sektoren und Einflussfaktoren sowie die berücksichtigten übergeordneten Rückkopplungen sind in ASTRA aufgegriffen (vgl. Abbildung 1-2).

Im Laufe des 5. und 6. EU-Forschungsrahmenprogramms sowie tagesaktueller politischer Fragestellungen der EU wurde das ASTRA-Modell kontinuierlich weiterentwickelt und angewendet z.B. bei der Entwicklung der Lissabon-Strategie, zur Abschätzung der Beschäftigungswirkung von Technologiepolitiken und von Politiken zur Förderung erneuerbarer Energien, zur Bewertung der Transeuropäischen Verkehrsnetze, von Verkehrsbepreisungspolitiken und von Szenarien zur Einführung neuer Technolo-

gien und Kraftstoffe im Verkehrssystem, zur Abschätzung der ökonomischen Wirkungen hoher Ölpreise auf die EU und zur Bewertung von Klimaschutzstrategien im Verkehr. Eine detaillierte Beschreibung des ASTRA-Modells findet sich in Schade (2005) mit Ergänzungen zu neueren Entwicklungen in Krail et al. (2007).

Die Version von ASTRA, die in der vorliegenden Studie genutzt wurde, umfasst 29 europäische Länder, deren Ökonomien jeweils in 25 Sektoren unterteilt sind und die untereinander verknüpft sind sowohl über den innereuropäischen Außenhandel als auch über die Verkehrsströme zwischen den einzelnen Ländern. Relevant für die Auswertung in diesem Projekt sind die Ergebnisse für Deutschland, welches für einige klimapolitikspezifische Aspekte detaillierter implementiert wurde als die übrigen Länder. Wesentliche Modellelemente von ASTRA sind kalibriert anhand von Zeitreihen von 1990 bis 2003/2006.



Quelle: Schade (2005), Krail et al. (2007)

Abbildung 1-2: Struktur und Hauptcharakteristika des ASTRA-Modells

ASTRA nutzt ein 1-Jahres-Kohortenmodell zur Abbildung der Bevölkerungsstruktur in den einzelnen Ländern. Dieses liefert relevante Rahmenbedingungen an andere Module, wie das Arbeitskräftepotential für das makroökonomische Modul oder die verkehrsver-

haltensrelevanten Altersgruppen für das Verkehrsmodul. Im makroökonomischen Modul werden die Angebots- (d.h. Produktionsfaktoren und Technologie) und die Nachfrageseite (d.h. Elemente der Endnachfrage) der Volkswirtschaften, die sektoralen Verflechtungen mittels Input-Output-Tabellen, die sektorale Beschäftigung und der Staatshaushalt abgebildet. Dabei lässt sich das Konzept von ASTRA nicht einer einzelnen ökonomischen Theorie zuordnen, sondern es kommen Elemente aus verschiedenen Theoriegebäuden zum Einsatz wie keynesianisch konsumgetriebenes Investitionsverhalten ergänzt durch den Einfluss von Exportströmen und -erwartungen, neoklassische Produktionsfunktionen zur Abschätzung des Produktionspotentials der Volkswirtschaften und in Abhängigkeit von Investitionen und Zeiteinsparungen beim Güterverkehr endogenisierter technischer Fortschritt aus der endogenen Wachstumstheorie. Diese Einzelelemente sind durch eine Vielzahl von Rückkopplungen – ggf. unter Berücksichtigung von zeitlichen Verzögerungen – verknüpft. Über Mikro-Makro-Brücken werden ökonomische Impulse, die sich aus der detaillierten Modellierung (Bottom-up) des Verkehrs- oder Energiesystems ergeben, in das makroökonomische Modul eingespeist. Umgekehrt liefert ASTRA über Makro-Mikro-Brücken die ökonomischen Treiber für die Bottom-up-Modelle, insbesondere für das direkt integrierte Verkehrsmodell.

Direkte wechselseitige Interaktionen bestehen zwischen dem makroökonomischen Modul und dem Außenhandelsmodul, wo das Wachstum der einzelnen Volkswirtschaften deren Importe ankurbelt, welche wiederum auf der Exportseite der übrigen Volkswirtschaften wachstumsfördernd wirken. Gleichzeitig liefern die sektoralen Exportströme mit den Produktionswerten einen wichtigen Treiber für das Güterverkehrsmodell, während das Personenverkehrsmodell durch die Bevölkerungs- und Einkommensentwicklung sowie die Fahrzeugflotten getriggert wird.

Das Verkehrssystem ist mit einem voll integrierten 4-Stufen Verkehrsmodell implementiert, mit der Einschränkung, dass die Routenwahl sich nur auf die Wahl der Routenkategorie (z.B. Autobahn, Landstraße) bezieht und nicht auf die Wahl der exakten, linkbasierten Route. Die vier Stufen (Verkehrserzeugung, -verteilung, Modal- und Routenwahl) des Personen- und Güterverkehrsmodells sind im regionalökonomischen Modul (REM) und im Verkehrsmodul (TRA) abgebildet. In diesen beiden Modulen setzen die meisten verkehrspolitischen Maßnahmen an, da hier die regional- und modalspezifischen Zeit- und Kostenkomponenten hinterlegt sind, die dann in die Entscheidungsfunk-

tionen (Logit-Funktionen) der Verkehrsnutzer Eingang finden. Reaktionen der Verkehrsnutzer können auf allen Entscheidungsstufen gemessen werden, d.h. unterschiedliche Modalwahl, veränderte Zielwahl und damit auch veränderte Distanzen. Damit einhergehende Veränderungen der Ausgaben für Verkehr werden in das makroökonomische Modul eingespeist und verändern dort z.B. die Konsumausgaben für Nicht-Verkehrssektoren oder die Einnahmen und Ausgaben des Staatshaushaltes, aber auch die Investitionsneigung der Verkehrssektoren.

Die Fahrzeugflotten der Straßenverkehrsmodi sind im Flottenmodul durch technologie-differenzierte Kohortenmodelle abgebildet. Die Kohortenmodelle ermöglichen eine detaillierte Abbildung der Altersstruktur und der Diffusion neuer Technologien in die Fahrzeugflotten. Die Technologiedifferenzierung erlaubt die Verknüpfung der Flotten mit dem Umweltmodul zur Berechnung der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs durch den Verkehr unter Berücksichtigung der jeweiligen Fahrleistungen, die im Verkehrsmodul abgeschätzt wurden.

Verkehrs- und Fahrzeugflottenmodul werden in der vorliegenden Studie genutzt, um die verkehrsbezogenen Maßnahmen insbesondere im Personenverkehr auf einer detaillierten Modellierungsebene zu integrieren.

Üblicherweise werden in ASTRA Politiken gegenüber einer Referenzentwicklung anhand eines mit/ohne-Vergleiches analysiert. ASTRA ermöglicht eine flexible Gestaltung von Politiken hinsichtlich ihrer Intensität, ihrer zeitlichen Staffelung oder ihrer Kombination zu Politikpaketen. Letzteres ist bedeutsam zur Analyse von Synergien zwischen verschiedenen Politiken sowie für die Untersuchung von Politikprogrammen wie dem Klimaschutzprogramm der Bundesregierung. Außerdem wird dadurch die Analyse der Verbesserung von Maßnahmen durch flankierende Maßnahmen ermöglicht, z.B. um negative ökonomische Wirkungen einer Maßnahme zu kompensieren. Integrierte Funktionen zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen runden das Spektrum der Analysemöglichkeiten von ASTRA ab.

Wichtige ökonomische Zusammenhänge des ASTRA-Modells, die für die Modellierung und Analyse eine Rolle spielen, sowie die Verknüpfung mit den Ergebnissen aus der Bottom-up Analyse (vgl. Kapitel 3) laufen über vier verschiedene Wirkungsketten (vgl. Abbildung 1-3):

- **Investitionen:** dies sind zum einen die zusätzlichen Investitionen, die durch die Klimaschutzpolitik ausgelöst werden (z.B. Investition in erneuerbare Energien oder Isolierung von Gebäuden). Zum anderen können dies auch vermiedene Investitionen sein, z.B. wenn aufgrund der Investition in Erneuerbare Energien die Investition in ein kohlebetriebenes Großkraftwerk entfallen. In beiden Fällen werden die Investitionen sektorscharf aufgegliedert und im Investitionsmodell additiv bzw. subtraktiv berücksichtigt.
- **Energiekosten bzw. -ausgaben:** durch die Investitionen ergeben sich veränderte Kosten der Energiebereitstellung. Die Kostenänderungen sind differenziert in Haushalts-, GHD- und Industriepreise sowie in Energiekosten für Strom, Brennstoffe/Fernwärme und Kraftstoffe. Bei der Verknüpfung der Bottom-up Ergebnisse mit den ökonomischen Modellen in ASTRA muss der jeweils geeignete Anknüpfungspunkt identifiziert und für die Modellierung genutzt werden. Aus ökonomischer Sicht kann je nach Maßnahme die Änderung der Energieausgaben (d.h. die Multiplikation von geänderten Mengen mit geänderten Preisen aus der Bottom-up Analyse) maßgeblich sein. Veränderung der Energiekosten der Haushalte für Strom, Brennstoffe und Kraftstoffe führen zu einer veränderten Konsumnachfrage im Energiesektor und aufgrund der Budgetrestriktion zu kompensierenden Veränderungen bei den übrigen Sektoren. Gleichfalls führen die Änderungen der Energiekosten der Industrie zu geänderten Produktpreisen und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Elastizitäten zu Substitutionseffekten zwischen den Sektoren. Für die Industrie und die GHD-Sektoren führen Änderungen der Energiekosten zu Anpassungen in der Input-Output-Tabelle und damit einer geänderten Verflechtungsstruktur.
- **Energieimporte:** durch Effizienzsteigerung und Substitution von fossilen Energieträgern erzielte Energieeinsparungen schlagen sich in einer Reduktion der Importe fossiler Energieträger nieder, die sich direkt auf den Endnachfragevektor und die Bruttowertschöpfung des Energiesektors auswirkt.
- **Staatshaushalt:** eine Reihe von Maßnahmen werden staatlich gefördert. Dadurch ergeben sich Veränderungen des Staatshaushaltes.

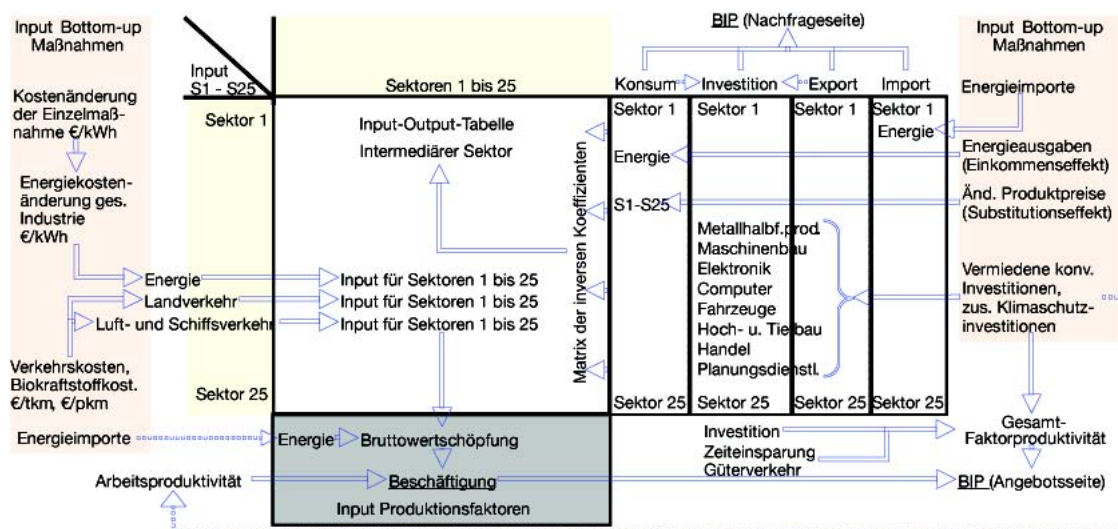
Die Ankopplung der Bottom-up-Ergebnisse erfolgt unterschiedlich für Klimaschutzmaßnahmen mit Bezug auf das Energiesystem oder das Verkehrssystem. Maßnahmen des Energiesystems werden komplett über die vier oben beschriebenen Wirkungsketten verknüpft, während Maßnahmen des Verkehrssystems größtenteils direkt in die Flotten- und Verkehrsmodelle von ASTRA implementiert werden und so die Ankopplung über die bereits in ASTRA vorhandenen Mikro-Makrobrücken zwischen Verkehrs- und ökonomischem Modell geleistet werden. Die Ankopplung der Ergebnisse aus Bottom-up Analyse (vgl. Kapitel 3) erfolgt im Wesentlichen über drei ökonomische Modelle:

- **Nachfrageseite des BIP:** hierzu gehört die Veränderung der Konsumnachfrage sowohl durch veränderte Energieausgaben als auch durch Substitutionseffekte zwischen verschiedenen Produkten, die veränderten Investitionen und die veränderten Energieimporte. Über die aggregierte, sektorale Nachfrageseite werden dann auch Veränderungen in der Input-Output-Tabelle induziert.
- **Angebotsseite des BIP:** hierzu gehören die veränderten Investitionen, die sich auf die Gesamt-Faktorproduktivität und den Kapitalstock auswirken.
- **Intermediäre Inputs in der Input-Output-Tabelle:** Energie- und Transportkostenveränderungen führen zu Anpassungen der intermediären Inputs der Energie- und Verkehrssektoren für die übrigen Sektoren. Diese schlagen sich in einer veränderten Bruttowertschöpfung aller Sektoren nieder. Hierbei überlagern sich die Effekte mit den Einflüssen von der Nachfrageseite der Input-Outputtabelle.

In der vorliegenden Studie wurde ASTRA für den Referenzlauf hinsichtlich der Bevölkerungs- und BIP-Entwicklung an die Rahmendaten von Politikszenerarien IV angepasst (Fraunhofer-ISI et al. 2008b) und um einige Modellelemente zur Ankopplung der Bottom-up Maßnahmen ergänzt. Die Ergebnisse des untersuchten Politikszenarios zur Analyse der Wachstumswirkung des Meseberg-Plus Klimaschutzprogramms werden gegenüber dieser Referenzentwicklung ausgewiesen.

Die Ankopplung der Bottom-up-Maßnahmen erfolgt auf der sektoralen Ebene z.B. über eine Veränderung der Konsumausgaben der Haushalte bzw. der Investitionsausgaben der Industrie (siehe Abbildung 1-3). Diese führen sowohl zu einer Änderung des BIP

auf der Nachfrageseite als auch zur Anpassung des Endnachfragevektors der Input-Output-Tabelle. Zusammen mit den Veränderungen auf der intermediären Ebene der IO-Tabelle durch die Energiekostenänderungen der Industrie ergibt sich eine Veränderung der sektoralen Bruttowertschöpfung, wobei hier auch die sektoralen Output-Änderungen zu berücksichtigen sind. Durch Verknüpfung der Bruttowertschöpfung mit den sektoralen Arbeitsproduktivitäten, die ggf. durch die Maßnahmen verändert werden, lässt sich die Beschäftigungswirkung des Klimaschutz-Programms abschätzen. Unter Berücksichtigung der Veränderung des BIP auf Nachfrage- und Angebotsseite kann die Wachstumswirkung abgeschätzt werden.



Quelle: Schade et al. (2008)

Abbildung 1-3: Verknüpfung der technologiebasierten Bottom-up-Inputs mit den ökonomischen Modellen in ASTRA

2 Klimafreundliche Investitionen in Deutschland: Ausgangssituation und Herausforderungen

Um den Bedarf, aber auch die Möglichkeiten und Schwierigkeiten einer Senkung der deutschen Treibhausgasemissionen in den kommenden Jahrzehnten abschätzen zu können, ist es zunächst erforderlich, die Ausgangssituation zu analysieren, auf die das Meiseberg-Programm trifft. Die bisherigen Schritte in Richtung klimafreundlicher Innovationen in Deutschland waren wesentlich durch zwei Faktorkomplexe bedingt: zum einen die umweltpolitische Diskussion um Klimawandel und Klimaschutz, für die die Einsetzung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages im Jahre 1988 (Enquete-Kommission 1990) ein erster Meilenstein war und zum anderen die Entwicklung der Energie-, allen voran die der Ölpreise. Auch die spezifische ökonomische Ausgangssituation Deutschlands und bestehende wirtschaftspolitische Herausforderungen auf die die IEKP-„Investitionsoffensive“ trifft, sind zu berücksichtigen.

2.1 Die Rolle der Klimapolitik

Die Bundesregierung hatte sich Anfang der 1990er Jahre ein ehrgeiziges Reduktionsziel für das Jahr 2005 gesetzt: 25% Verminderung bezogen auf das Jahr 1990. In der ersten Hälfte der 1990er Jahre schien Deutschland durch die Wiedervereinigung und den Niedergang der ostdeutschen Industrie sowie der folgenden Re-Investitionen auf gutem Wege, aber andere Faktoren wie Motorisierung und erhebliche Einkommenszuwächse in Ostdeutschland sowie geringe Energiepreise (und Strompreise durch die Liberalisierung) führten dann zu einer Phase der erheblichen Verlangsamung der Emissionsminderung in Deutschland (vgl. Abbildung 2-1).

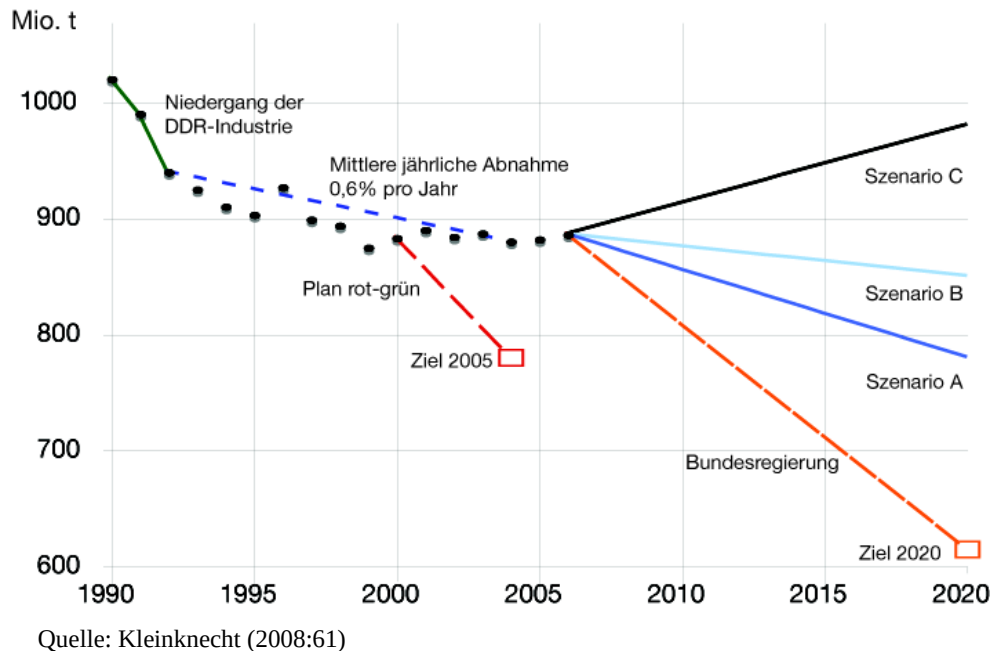


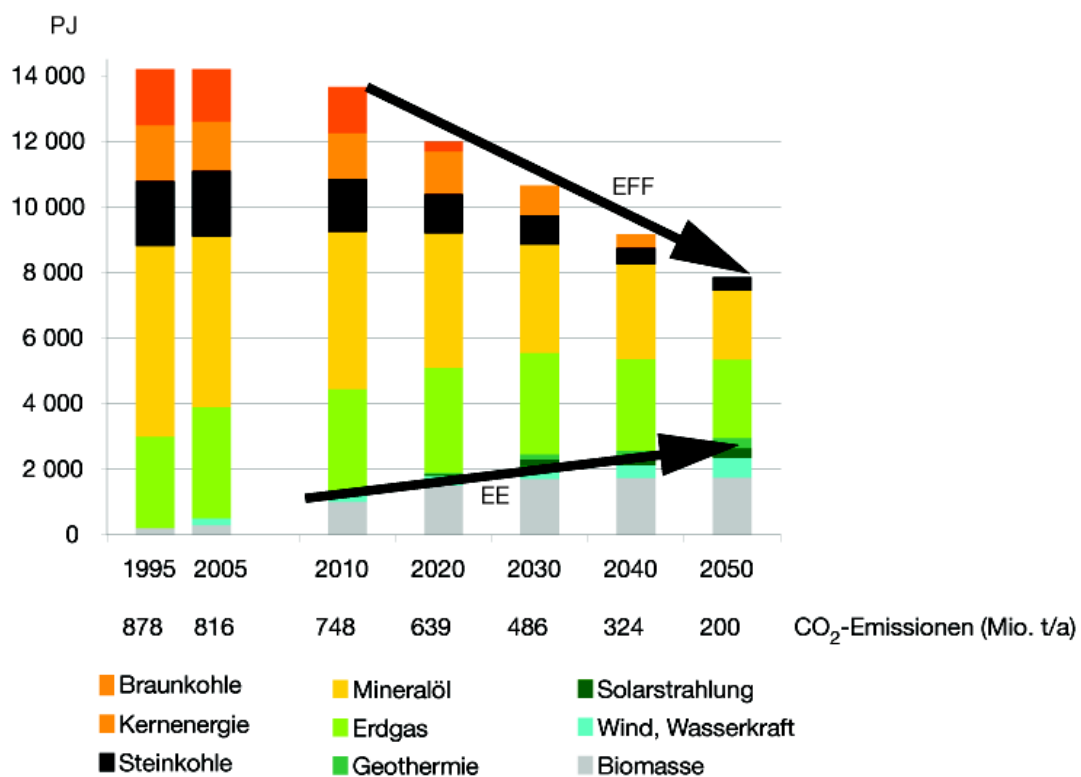
Abbildung 2-1: Emissionsreduktionen in Deutschland: Vergangene Werte und einige Szenarien.
Emissionen in Mio. t.

Längerfristig wichtiger ist jedoch die Tatsache, dass die deutschen Emissionen durch die Kombination von wirtschaftlichem Strukturwandel, energiesparenden Innovationen, emissionsärmeren Prozessen und dem Ausbau der Windenergie sowie anderen erneuerbaren Energien (Holzpellets und -chips, Biogas und Biokraftstoffe; Wärmepumpen und thermische Solarkollektoren) in den letzten beiden Jahrzehnten im Durchschnitt um über 0,5% pro Jahr zurückgingen.

Durch die Verbindung dieser drei Einflüsse liegen die aktuellen (2007) Treibhausgas-Emissionen rund 20% unter denen von 1990. Allerdings würde eine bloße Fortsetzung des bisherigen Trends keineswegs ausreichen, um das Ziel einer 40% Reduktion bis 2020 zu realisieren, vielmehr würde dann erst 2020 das Ziel für 2005 erreicht.

Immerhin konnte man bereits seit Mitte der 1970er Jahre beobachten, dass die Produkte energieeffizienter Investitionsgüter etwa um 50% in der inländischen Produktion und bei den Exporten schneller zunehmen als der Durchschnitt der industriellen Produktion bzw. der deutschen Exporte (Schön et al. 2004; Eichhammer 2004), seit den letzten 10 Jahren folgen die Technologien der erneuerbaren Energien mit noch höheren Zuwachsraten relativ gegenüber dem industriellen Durchschnitt.

Der drastische Anstieg der Ölpreise in der jüngsten Vergangenheit, aber auch der Preise für andere Energieträger, einschließlich Strom (vgl. ausführlich Kapitel 2.2.) dürfte die Tendenz zu schnelleren Fortschritten in der effizienten Nutzung von Energie und der Nutzung von erneuerbaren Energien deutlich verstärken, wie es sich bereits seit Anfang 2007 zeigt (Ziesing 2008). Und auch wenn die Preise für fossile Energieträger in der kommenden Zeit wieder etwas fallen sollten: Inzwischen ist die Fachwelt überzeugt und auch jedermann klar geworden, dass die Zeit der langfristig stabilen niedrigen Ölpreise abgelaufen ist.



Quelle: Persönliche Mitteilung von J. Nitsch auf der Grundlage von Nitsch (2007)

Abbildung 2-2: Schema eines „Fahrplans“ für den Aufbau eines zukunftsfähigen Energiesystems in Deutschland

Strategisch gesehen bestehen drei technische sich ergänzende Optionen (vgl. Abbildung 2-2):

- Große – und inzwischen rentabel gewordene – Potenziale der Energieeffizienz können an 100 Prozent des Energieverbrauchs ansetzen; eine zusätzliche

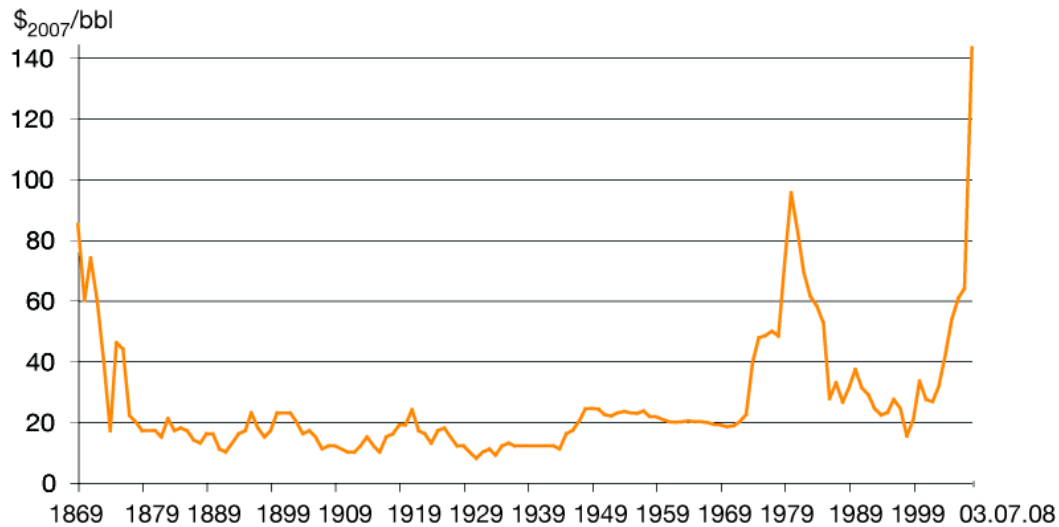
Verbesserung um 1% jährlich ist durchaus erreichbar, wie die Erfahrungen der 1980er Jahre zeigen.

- Die schnelle Zunahme der erneuerbaren Energien erfolgt zwar mit einem sehr geringen Ausgangsniveau von weniger als 10% vom derzeitigen Primärenergiebedarf, aber jede zusätzliche Energieeinheit bedeutet eine Verminderung der Treibhausgase in gleichem Umfang.
- Schließlich spielt indirekt die verbesserte Nutzung oder die Substitution energieintensiver Materialien eine nicht zu unterschätzende Rolle für die industrielle und die verkehrsbedingte Energienachfrage. Bei einer intelligenten und innovativen Materialeffizienz- und -substitutionspolitik sind primärenergieseitig 0,5% jährliche Einsparungen und eine ebenso große Verminderung von energiebedingten Treibhausgasen erreichbar (Enquete-Kommission 2002).

In dieser Situation ist die klimapolitische Zielsetzung der Bundesregierung einer weiteren 20%-igen Verminderung der Treibhausgasemissionen bis 2020 zwar äußerst ambitioniert, aber insbesondere wegen der technologischen Optionen, der einhergehenden Bewusstseinsänderungen bei den verschiedenen Zielgruppen der Endenergiesektoren und auch der preislichen Rahmenbedingungen keineswegs aussichtslos.

2.2 Die Entwicklung der Energiepreise

Die bisherigen klimafreundlichen Investitionen sind – ebenso wie von der proklamierten Zielsetzung her das Meseberg-Programm – auch als eine Antwort auf die langfristige Entwicklung wichtiger Energiepreise - allen voran der des Ölpreises - und den sich daraus ergebenden Herausforderungen zu verstehen. Die Energiepreise entwickelten sich inflationsbereinigt ungefähr von 1875 bis 1973, d.h. über einen Zeitraum von rund hundert Jahren, auf einem relativ konstanten Niveau und dann – nach den ersten beiden Ölpreiskrisen – in der Periode 1985 bis 2001 ebenfalls bemerkenswert stabil (vgl. Abbildung 2-3).



Quellen: WTRG (2008), Inflationdata (2008), Bloomberg (2008)

Abbildung 2-3: Entwicklung des realen Ölpreises 1869-2008 [\$₂₀₀₇/bbl], jährliche Mittelwerte der Sorte WTI. Wert für 2008 ist der Spotpreis WTI 3. Juli 2008

Vorher gab es eine kurze Phase, in der die Ölpreise drastisch fielen, weil zu Beginn der Ölförderung massive Lern- und Innovationsprozesse die Kosten senkten. Diese Entwicklung ist charakteristisch für erfolgreiche neue Technologien und wird heute zu Recht im Hinblick auf die Kostenentwicklung erneuerbarer Energiequellen betont. Allerdings ist festzuhalten, dass das Ende dieser Einführungsphase neuer Technologien zwar spätestens nach wenigen Jahrzehnten unausweichlich ist, sich aber im Einzelfall nicht prognostizieren lässt.

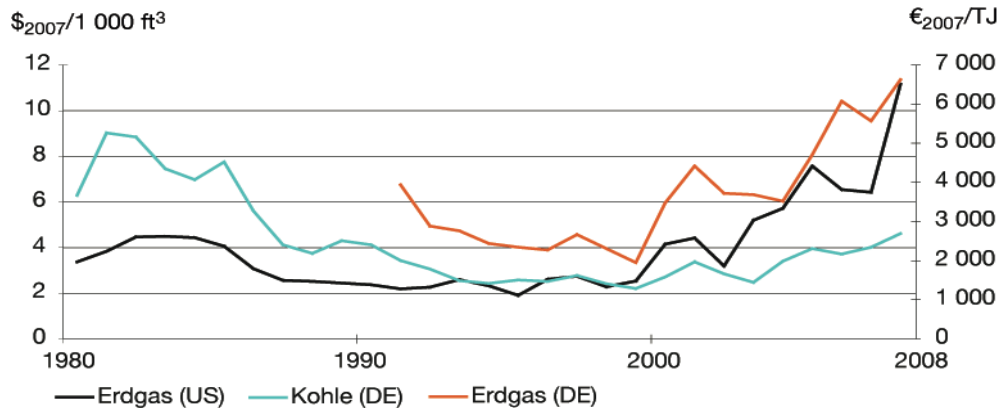
Beim Erdöl jedenfalls setzte um 1875 eine Entwicklung ein, wie sie für ausgereifte Technologien typisch ist: dauernde Innovationen steigern die Produktivität, doch weil das in anderen Sektoren ebenso geschieht, fluktuieren die relativen Preise mehr oder weniger zufällig in der Umgebung eines bemerkenswert konstanten Werts – und zwar trotz enormer Umwälzungen der verwendeten Technologien, trotz der Substitution der Kohle und der Einführung des Erdgases nach dem zweiten Weltkrieg und trotz drastischer Veränderungen der produzierten Mengen (man betrachte etwa die geringe Preisveränderung anlässlich der Weltwirtschaftskrise von 1929).

Angesichts der langfristigen Stabilität der Ölpreise über viele Jahrzehnte und der technisch interessanten Merkmale von Erdölprodukten (z.B. hohe Energiedichte, leichte Transport- und Verteilungsfähigkeit in kleinen Einheiten) ist es kein Wunder, dass sich

Manager und Ingenieure in Deutschland wie anderswo nicht besonders intensiv mit der Frage beschäftigten, ob und wie sich der Einsatz von Energie verringern lasse. In dieser Situation wirkten sich die ebenso unerwarteten wie massiven Anstiege der Ölpreise in den Jahren 1973 und 1979/80 als enorme Schocks auf die Betroffenen aus. Nun setzte in Unternehmungen und Forschungsanstalten eine zunächst fieberhafte, dann stetige Suche nach Möglichkeiten zur Einsparung des Kostenfaktors Energie und zu alternativen Energieträgern ein. Die öffentliche Diskussion und die Politik wandten dem Thema ihre Aufmerksamkeit zu, „Die Grenzen des Wachstums“ waren in aller Munde, Fördermittel und Regulierungen wurden eingesetzt, um andere Energie zu sparen, sowie um andere Energiequellen – insbesondere die Kernenergie – zu erschließen. Letzteres mündete in den erbitterten Streit um die Gefahren von Kernenergie und Plutoniumwirtschaft in vielen OECD-Staaten.

Doch zehn Jahre später begann der Ölpreis wieder zu fallen, 1986 hatte er real wieder das alte Niveau erreicht. Die politischen Anstrengungen zur Senkung des Energieverbrauchs und zu alternativen Energien verloren an Schwung. Die Umorientierung vieler Forschungs- und Entwicklungsprozesse in Richtung Energieeffizienz und Erneuerbare Energien blieb jedoch durchaus wirksam, wenngleich auf etwa halbiertem Förderniveau im Vergleich zu den 1980er Jahren.

Eine zusätzliche Herausforderung für die derzeitige Energiepolitik ergibt sich aus der zunehmend zu beobachtenden Volatilität anderer Energiepreise. So haben die Gas- und Kohlepreise in den letzten Jahrzehnten Schwankungen um über 300% gezeigt (Abbildung 2-4).



Quellen: BAFA (2006), EIA (2008), Bloomberg (2008); BMWi (2008), VdS (2008)

Abbildung 2-4: Entwicklung der realen Gaspreise (US-Erdgaspreise) [$\$_{2007}/1\,000\text{ ft}^3$] und (Grenzübergangspreise Deutschland) [$\text{€}_{2007}/\text{TJ}$] sowie der realen Drittlandssteinkohlepreise frei deutsche Grenze [$\text{€}_{2007}/\text{TJ}$]

Volatile Preise sind für langfristige Planungs- und Investitionsprozesse stets ein Problem und auch die breite Bevölkerung ist auf eine sichere und auch „bezahlbare“ Energieversorgung angewiesen. Im Zuge des Ölpreisanstiegs der letzten Jahre ist der daran gekoppelte Gaspreis ebenfalls kräftig angezogen. Obwohl Kohle aufgrund geologischer und geopolitischer Gegebenheiten (längere Verfügbarkeit, andere Förderregionen) nicht direkt an die Öl- und Gaspreisentwicklung gekoppelt ist, gibt es doch aufgrund von Substitutionsbeziehungen (z.B. Kohlekraftwerke statt Gaskraftwerke) eine indirekte, ökonomische Kopplung.

Angesichts der steigenden Nachfrage aus China, Indien und weiteren Schwellenländern einerseits und von Erweiterungsschwierigkeiten bei der Förderung bzw. möglichen Kostenexplosionen andererseits (siehe die Diskussion um die sog. „Peak-Oil“-Hypothese) sind konstante oder gar langfristig fallende Energiepreise für die kommenden Jahrzehnte nicht mehr zu erwarten. Auch werden Fragen der Versorgungssicherheit in Zukunft vermutlich eher relevanter, da insbesondere Öl und Gas aus teilweise politisch instabilen Regionen kommen und im übrigen eine gewisse Vulnerabilität gegenüber dem anthropogenen Klimawandel aufweist (man denke z. B. an die Kühlwasserproblematik der deutschen Kohle- und Kernkraftwerke im Sommer 2003 sowie die Schäden an Öl-Plattformen bei Hurrikans vom Typ „Katrina“ im Jahr 2005). Aber auch heimische Kohlereserven bieten angesichts einer weltmarktorientierten Preisbildung keine wirkliche Versorgungssicherheit. Diese Gesamtsituation wird zunehmend zu einer der zentralen Herausforderungen für moderne Volkswirtschaften.

2.3 Die Entwicklung des volkswirtschaftlichen Kapitalstocks

Eine moderne Volkswirtschaft auf einen klimafreundlichen Entwicklungspfad zu lenken, ist eine große Herausforderung. Für die gegenwärtig verfolgte „innovationsorientierte Umweltpolitik“ ist mindestens die Kompatibilität mit ökonomischen Ausgangsfaktoren und Herausforderungen unverzichtbar.¹ Der Kapitalstock der deutschen Wirtschaft hat einen Wert von rund 7 Billionen €, das entspricht knapp dem Dreifachen des deutschen Sozialprodukts.

Tabelle 2-1: Struktur des deutschen Kapitalstocks (2005) nach Vermögensarten, Billionen €, gerundet

Wohnbauten	3,4
Nichtwohnbauten	2,3
Maschinen	0,7
Fahrzeuge	0,2
Rest	0,2
Total	6,8

Anlagevermögen nach Vermögensarten in Preisen von 2000, netto („Nettokapitalstock“). Rest = Nutztiere und Nutzpflanzen aus dem Bereich der Sachanlagen plus immaterielle Anlagegüter

Quelle: DESTATIS (2008a)

Tabelle 2-2: Struktur des deutschen Kapitalstocks und Treibhausgas-Emissionen (2005) nach Branchen, Billionen € und Mio. t CO_{2eq}, gerundet

	Gebäude	Andere Anlagen und Fahrzeuge	Summe	Emissionen [Mio. t CO_{2eq}]
Dienstleistungen und private Haushalte	5,3	0,6	5,9	169
Energieversorgung	0,1	0,1	0,2	366
Industrie	0,2	0,3	0,5	213
Weitere	0,1	0,1	0,2	257
Total	5,7	1,1	6,8	1 005

Quelle: DESTATIS (2008a), UBA (2007a), Berechnungen des PIK und ECF

¹ Zur allgemeinen Rolle des Staates im ökologischen Innovationsprozess siehe Kapitel 5.

Was die gegenwärtige Struktur von Kapitalstock und Investitionen betrifft, so entfallen von den rund 7 Billionen €:

- die Hälfte auf Wohnbauten,
- weitere 2,5 Billionen € auf Nichtwohnbauten,
- 10% auf Maschinen und
- weniger als 5% auf Fahrzeuge (vgl. Tabelle 2-1).

Der hohe Anteil der Gebäude deutet schon auf den hohen Investitionsbedarf in diesem Teil des Kapitalstocks hin. Die weitere Aufteilung nach Sektoren zeigt einen relativ geringeren Anteil von Industrie und Energiewirtschaft am gesamten Kapitalstock, aber auch den hohen Anteil an Maschinen und Anlagen in der Industrie (vgl. Tabelle 2-2). Der Kapitalstock wird durch die jährlichen Bruttoinvestitionen erneuert, und eine positive Differenz zwischen Bruttoinvestitionen und Abschreibungen führt zu einer Ausweitung des Kapitalstocks, den Nettoinvestitionen (vgl. Tabelle 2-3).

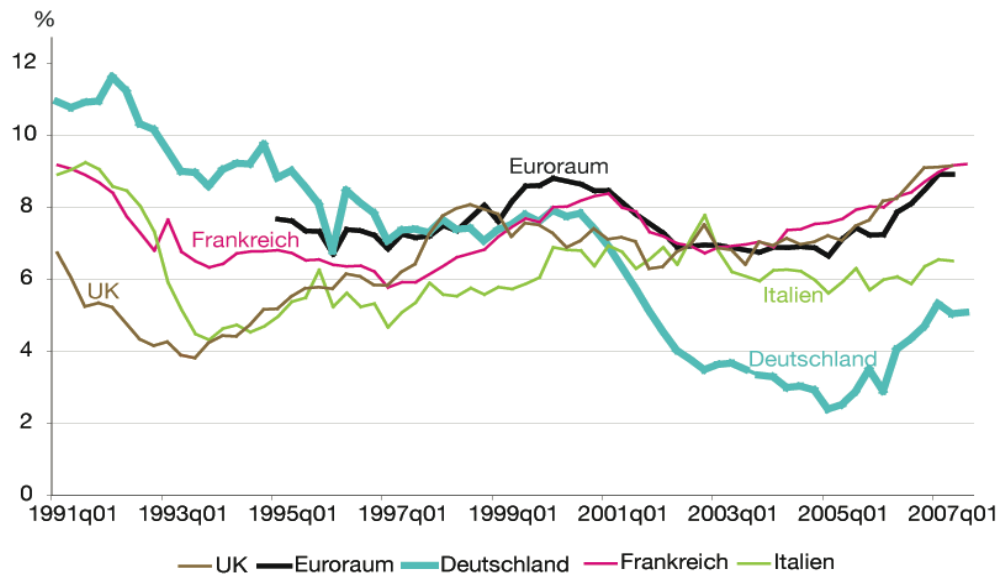
Im Jahr 2005 betrugen die Nettoinvestitionen mit 69 Mrd. € lediglich etwa 17% der Bruttoinvestitionen. In den Sektoren Industrie, Energiewirtschaft und Landwirtschaft wurde sogar de-investiert, der Trend zur Dienstleistungsgesellschaft war ausgeprägt zu beobachten.

Tabelle 2-3: Investitionen nach Branchen 2005, Mrd. €, gerundet			
	Brutto	Abschreibungen	Netto
Dienstleistungen	326	246	80
Energieversorgung	9	10	-1
Industrie	55	63	-8
Rest	14	16	-2
Total	404	335	69

Quelle: DESTATIS (2008a)

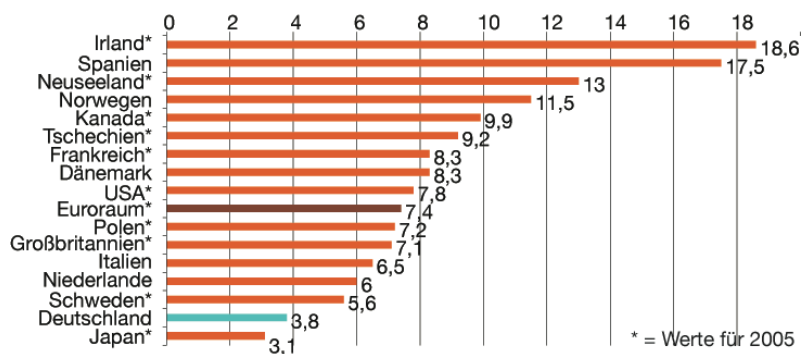
Der Anteil der Nettoinvestitionen am Bruttoinlandsprodukt sinkt in Deutschland seit Jahrzehnten, und zwar von 10 bis 15% Anteil in den 1960er Jahren auf unter 5% seit 2003 und - dies zeigt ein internationaler Vergleich - ist auch gegenwärtig schwächer als

in vielen anderen Ländern (Abbildungen 2-5 und 2-6). Während die sinkende Nettoinvestitionsquote Deutschlands eine robuste wissenschaftliche Erkenntnis darstellt, ist die Analyse der Ursachen keineswegs klar (vgl. etwa: Bond et al. (2003) und Culpepper (1999)).



Quelle: Horn, Rietzler (2007)

Abbildung 2-5: Nettoanlageinvestitionen in % des Nettoinlandsprodukts in ausgewählten Ländern des Euroraums 1991-2007

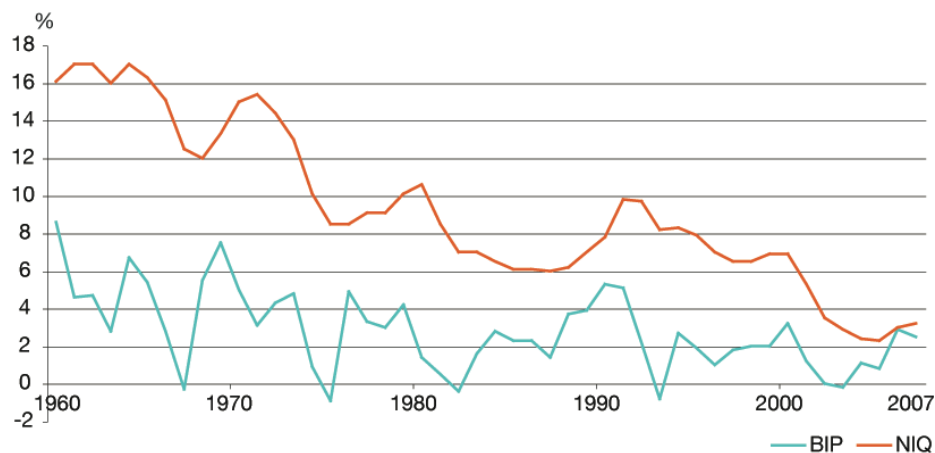


Quelle: Sinn (2007)

Abbildung 2-6: Nettoinvestitionsquoten im internationalen Vergleich, 2006

Bemerkenswert synchron mit der fallenden deutschen Nettoinvestitionsquote zeigen auch die gesamtwirtschaftlichen Wachstumsraten der letzten Jahrzehnte einen fallenden

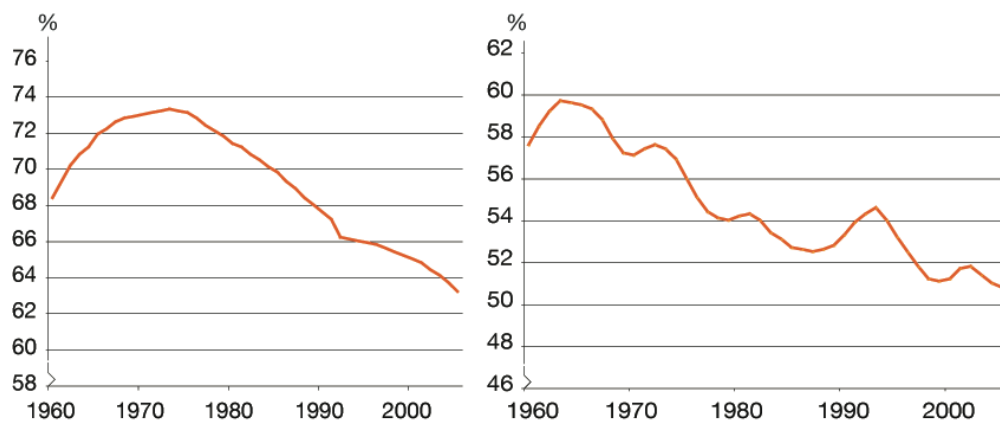
Trend (vgl. Abbildung 2-7). Angesichts des Zusammenhangs zwischen Investitionstätigkeit und wirtschaftlicher Entwicklung stimmt dies bedenklich. Schon 2002/03 stellte der Sachverständigenrat zur Begutachtung der wirtschaftlichen Entwicklung aufgrund einer sorgfältigen empirischen Analyse in seinem Jahresgutachten fest: „Zunächst ist Wachstum primär durch eine nachhaltige Stärkung der privaten Investitionstätigkeit sicherzustellen.“ (SVR 2002:336). Ob der Anstieg der deutschen Nettoinvestitionen in den letzten zwei Jahren mehr darstellt als eine kurzfristige Fluktuation, kann durchaus davon abhängen, ob in den kommenden Jahren ein ökologischer Investitionsschub einsetzt.



Quelle: DESTATIS (2008b), DG ECFIN (2007)

Abbildung 2-7: Nettoinvestitionsquoten (NIQ) und Wachstumsraten (BIP) in Deutschland 1960-2007

Insgesamt ist festzustellen, dass die deutsche Investitionsschwäche nicht nur weitere positive wirtschaftliche Entwicklung in nennenswertem Ausmaß erschwert, sondern auch der Erneuerung des Kapitalstocks entgegensteht: Der Rückgang der Nettoinvestitionsquote geht einher mit einer zunehmenden Überalterung des deutschen Kapitalstocks (Abbildung 2-8). Dies gilt insbesondere für den Gebäudebestand, an dem ein hoher Re-Investitionsbedarf für diejenigen Gebäude besteht, die zwischen 1946 und 1973 erstellt wurden. Damit bietet sich von der volkswirtschaftlichen Ausgangssituation her jetzt nicht nur die Chance, sondern – mit Blick auf die langfristige Sicherung moderner Produktionsgrundlagen sowie die internationale Situation – gar der Bedarf, relativ schnell einen moderneren, ressourcenschonenderen Kapitalstock aufzubauen.



Quelle: BMF (2005)

Abbildung 2-8: Anteil des noch nicht abgeschrieben Anlagevermögens am gesamten Kapitalbestand (links Gebäude, rechts Ausrüstungen)

Eine erfolgreiche Umsetzung des Meseberg-Programms induziert vor diesem Hintergrund zusätzliche Nettoinvestitionen in der Größenordnung von 30 Mrd. € pro Jahr bis 2020. Wird ein solcher Anstieg bis 2015 nicht realisiert, werden noch erheblich größere Investitionen in den Folgejahren erforderlich, um die Klimaziele zu erreichen.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass schon derzeit emissionsmindernde Investitionen in einer Höhe von etwa 5% des BIP getätigt werden. Durch das Meseberg-Programm sind sie um etwa ein Drittel auf 6,5% zu erhöhen (siehe Tabelle 2-4).

Tabelle 2-4: Emissionsmindernde Investitionen 2005, in Mrd. €, gerundet

	Brutto-Investitionen	davon emissions-mindernd	Zusatzbedarf durch Meseberg-Programm
Gebäude	197	40	14
Maschinen	121	39	3
Kraftwerke/Netze*	12	5	10
Fahrzeuge	50	10	2
Rest	20	1	1
Total	400	95	30
Anteil am BIP (%)	20	5	1,5

Quelle: DESTATIS (2008a), BEE (2006), BDEW (2008), Berechnungen des PIK und ECF

*Einschließlich erneuerbarer Energien.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein großer Teil des volkswirtschaftlichen Kapitalstocks im Laufe der nächsten 10-15 Jahre erneuert werden muss. Dies muss so erfolgen, dass er in Zukunft mit deutlich weniger und emissionsärmerer Energie gewinnbringend genutzt werden kann; hierbei sind die langfristigen Vorteile der erneuerbaren Quellen besonders zu beachten. Die Verminderung nicht-erneuerbarer Ressourcen setzt zusätzliche Investitionen und neue Technologien voraus. In dieser Situation kann ein ökologischer Investitionsschub gleichzeitig:

- die deutsche Wirtschaft von der Volatilität der Energiepreise unabhängiger machen,
- die Technologien und Infrastruktur einer klima- und energieeffizienten Wirtschaft entwickeln,
- sowie die Investitionsschwäche der vergangenen Jahre überwinden helfen und damit Wachstum und Beschäftigung generieren.

Deshalb wird die Umsetzung des Meseberg-Programms einen erheblichen Investitionsschub für die deutsche Wirtschaft bedeuten, aber auch neue Exportpotentiale zur Lösung globaler Herausforderungen eröffnen.

3 Analyse der Einzelmaßnahmen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Maßnahmen-orientierten Bottom-up-Analysen kurz dargestellt und erläutert. Zum methodischen Vorgehen sei auf Kapitel 1.3.2 und für die verwendeten Rahmendaten einschließlich der verwendeten Energiepreise und spezifischen CO₂-Emissionen auf Kapitel 1.3.1 verwiesen. Die Ergebnisse der einzelnen untersuchten Maßnahmen wurden dann in Kapitel 4 unter energiewirtschaftlichen und klimapolitischen Aspekten zusammengefasst.

3.1 Sektorübergreifende Maßnahmen

Die in diesem Unterkapitel behandelten Maßnahmen konnten nicht weiter sektoral untergliedert werden, sei es aus Datenmangel, sei es, dass man die gleiche Maßnahme nicht mehrfach beschreiben wollte. Die Mehrzahl der Maßnahmen konnte jedoch jeweils einem energiewirtschaftlichen Sektor zugeordnet werden.

3.1.1 Maßnahmen 10 bis 15 an Wohn- und Nichtwohngebäuden

Die Ausschöpfung wirtschaftlich nutzbarer Potenziale zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Nutzung erneuerbarer Energien im Gebäudebereich soll im Rahmen des Integrierten Energie- und Klimaprogramms durch folgende Maßnahmen beschleunigt werden:

- Verschärfung der energetischen Anforderungen an Gebäude um 30% ab 2009 und nochmals um bis zu 30% im Jahr 2012, Ausweitung einzelner Nachrüstungsspflichten und Stärkung des Vollzugs, stufenweiser Ersatz von Nachtstromspeicherheizungen (Energieeinsparverordnung),
- Nutzungspflicht für erneuerbare Energien zur Wärmeerzeugung bei Neubauten (Erneuerbare Energien-Wärmegesetz) und Ausweitung des Marktanreizprogramms,

- Fördermittel für umfassende energetische Sanierungen, u. a. von Wohngebäuden, Schulen, Kindergärten und Bundesbauten (CO₂-Gebäudesanierungsprogramm, Investitionspakt und Programm für Bundesbauten).

3.1.1.1 Maßnahme 10a: Energieeinsparverordnung

Zur Abschätzung der Wirkungen der einzelnen Maßnahmen im Gebäudebereich wird hier die Gesamtheit der Maßnahmen zur Verbesserung der energetischen Qualität von Wohn- und Nichtwohngebäuden betrachtet. Die Maßnahme 10a Energieeinsparverordnung (EnEV) ist eine übergreifende Maßnahme, die bei der Umsetzung aller den Gebäudebereich betreffenden Maßnahmen wirksam ist. Die Maßnahmen 10b, 11, 12, 13, 14 und 15 sind somit echte Teilmengen der Maßnahme 10a, wobei ihre Summe nicht deckungsgleich mit ihr ist, da zusätzlich Überschneidungen der einzelnen Maßnahmen im Gebäudebereich untereinander bestehen. So wird beispielsweise ein Teil der Fördermittel des CO₂-Gebäudesanierungsprogramms (Maßnahme 12) zur Beschleunigung des Austauschs von Nachtstromspeicherheizungen genutzt (Maßnahme 10b) und erneuerbare Energien zur Wärmeerzeugung (Maßnahme 14) werden auch bei geförderten Sanierungen (Maßnahmen 12, 13 und 15) eingesetzt. Die Wirkungen der Maßnahmen lassen sich daher besser in der Summe darstellen, weil man davon ausgehen kann, dass sich Schwankungen bis zu einem gewissen Grad gegenseitig ausgleichen. Auch Mitnahmeeffekte können nicht gesondert quantifiziert werden.

Annahmen

Im Rahmen der Novellierung der Energieeinsparverordnung (EnEV) ist eine Verschärfung der Anforderungen an den Primärenergiebedarf von Gebäuden um 30% ab 2009 und nochmals um bis zu 30% im Jahre 2012 vorgesehen. Bei Neubauten und umfassenden energetischen Sanierungen können diese Anforderungen beispielsweise durch stärkere Dämmstoffdicken, effizientere Fenster, hocheffiziente Brennwertkessel und den Einsatz erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung erfüllt werden. Durch die Ausweitung einzelner Nachrüstungspflichten, den stufenweisen Ersatz von Nachtstromspei-

cherheizungen und die Stärkung des Vollzugs der EnEV sollen weitere Einsparungen bei Heizenergie und Treibhausgas-Emissionen erreicht werden. Hintergrund ist, dass bisher bei vielen der rund 17,5 Mio. Wohngebäuden und 1,5 Mio. Nichtwohngebäuden zwar Erneuerungs- oder Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden, jedoch keine Maßnahmen zur Verbesserung der energetischen Qualität. Die Datenlage zu den jährlichen Sanierungsraten ist allerdings sehr unsicher, auch zur Anzahl und Art von bereits durchgeführten energetischen Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand liegen keine detaillierten Daten vor (BMVBS/BBR 2007). Schätzungen gehen von einer jährlichen Sanierungsrate von rund 2,5% des Gebäudebestands aus, wobei nur bei etwa einem Drittel der Maßnahmen auch energetische Verbesserungen durchgeführt werden (ca. 0,8% des Gebäudebestands, siehe IWU (2007)). Dies ist eine „statistische“ Zahl, mit der die häufig durchgeführten Teilmodernisierungen zu umfassenden energetischen Vollsanierungen zusammengefasst werden. Bei den durchgeführten energetischen Sanierungen werden die möglichen Einsparpotentiale bisher ebenfalls nur unzureichend genutzt. Die nur zögerlich umgesetzten Maßnahmen zur Energieeinsparung bei Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden sollen daher verstärkt und die energetische Qualität durchgeführter Sanierungen erhöht werden.

Angesichts der stark gestiegenen Heizkosten und zahlreicher aufgeschobener Sanierungsinvestitionen wird im Rahmen dieser Abschätzung ab 2008 mit einer steigenden Anzahl und verbesserten Ausführung von energetischen Sanierungen gerechnet. Die Gebäudehülle wird durchschnittlich nach 50 Jahren erneuert, daher kommen derzeit Gebäude aus den Baujahren ab 1955 in den ersten großen Erneuerungszyklus. Bei diesen Gebäuden bestehen besonders große Energieeinsparpotentiale, die durch die verschärften Anforderungen der EnEV bei Maßnahmen im Bestand umfassender ausgeschöpft werden. Zusätzlich werden eine größere Markttransparenz durch den Energieausweis und eine verstärkte Kontrolle des Vollzugs angenommen, welche u. a. die Einhaltung der Nachrüstungsspflichten der EnEV sicherstellt, wie den Austausch alter Heizkessel bis Ende 2008, die Dämmung oberster Geschossdecken oder die Inspektion von Klimaanlageanlagen.

Vor allem bei den Neubauten wird erwartet, dass zur Einhaltung der um 30% erhöhten energetischen Anforderungen und aufgrund der Vorgaben des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes verstärkt hocheffiziente Heizungstechnik und erneuerbare Energien

eingesetzt werden. Dies forciert deren Einsatz auch im Gebäudebestand durch Kostendegressionseffekte. Zusammen mit einem verstärkten Austausch alter Heizungsanlagen im Gebäudebestand wird daher angenommen, dass dabei vorrangig hocheffiziente Heizungstechnik (Brennwertkessel) und zunehmend erneuerbare Energieträger zum Einsatz kommen.

Neben der Verschärfung der energetischen Anforderungen um weitere 30% in 2012 wird dieses Jahr auch als Stichjahr für weitere Nachrüstungsspflichten angenommen. Die endgültige Festlegung steht noch aus. Ab 2013 wird eine Verstetigung der energetischen Sanierungsrate bei knapp 2% pro Jahr mit einem zunehmend stärkeren Schwerpunkt bei der Wärmedämmung der Gebäude angenommen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die energetischen Sanierungsmaßnahmen mit Erneuerungsmaßnahmen an der Gebäudehülle gekoppelt werden.

Begleitende Maßnahmen wie verstärkte Öffentlichkeitsarbeit, Förderprogramme, Verbesserung der Aus- und Weiterbildung im Baubereich sowie Nachweispflichten unterstützen die verstärkte und verbesserte Umsetzung der Sanierungsmaßnahmen. Diese Rahmenbedingungen sind als so genannte „weiche“ Maßnahmen sehr wichtig, damit die möglichen Einsparpotentiale erkannt und so weit wie möglich genutzt werden.

Zu den möglichen Einsparungen durch verstärkte und effizientere Gebäudesanierungen wurden in co2online (2007), IEKP (2008), Fraunhofer-ISI et al. (2008b) und IWU (2007) verschiedene Szenario-Berechnungen durchgeführt. Diese wurden anhand von Durchschnittswerten und typischen Erneuerungszyklen für den Gebäudebestand ausgeführt und sind daher, genauso wie die zukünftige Neubau- und Sanierungsrate, mit Unsicherheiten verbunden. Für die Gesamtentwicklung im Gebäudebereich wird hier das „Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario“ der Politikszenerien IV (Fraunhofer-ISI et al. 2008b) zugrunde gelegt, das die Auswirkungen von höheren Anforderungen an Neu- und Altbauten, verbesserten Sanierungen sowie dem verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien abschätzt.

Für die Abschätzung der zusätzlichen Investitionen zur Einhaltung der höheren Anforderungen im Gebäudebestand ist zu berücksichtigen, dass die Vorgaben der Energieeinsparverordnung dem Wirtschaftlichkeitsgebot gemäß Energieeinsparungsgesetz entsprechen müssen und die Sicherstellung einer erhöhten Qualität bei sowieso durchgeführten energetischen Sanierungen nur zu geringen Mehrkosten führt. Eine Erhöhung

der Anforderungen in diesem Rahmen verursacht daher Kosten, die voraussichtlich während der Lebensdauer durch Energieeinsparungen refinanziert werden können. Außerdem ist durch die Ankündigung der geplanten Verschärfungen mit Anpassungen bei den Planungs- und Baustandards zu rechnen. Diese tragen zusammen mit technologischen Entwicklungen und Kostendegressionseffekten dazu bei, dass die Kosten für besonders energiesparende Technologien nach und nach sinken. Die zusätzlich notwendigen Investitionen bei Neubauten werden auf 1-2 Mrd. € pro Jahr geschätzt. Die Mehrkosten der mit Erneuerungsmaßnahmen gekoppelten energetischen Sanierungen werden vergleichbar zu (IWU 2007) auf 8-10 Mrd. € pro Jahr abgeschätzt. Die derzeitigen Investitionen für Maßnahmen im Wohngebäudebestand liegen zum Vergleich bei insgesamt etwa 80 Mrd. € pro Jahr (DIW 2007).

Ergebnisse

Die Übersicht in Tabelle 3-1 zeigt die große Bedeutung des Gebäudesektors für die Senkung der CO₂-Emissionen und für die Verringerung der Energieimporte. Durch die Maßnahmen 10a bis 15 lassen sich im Gebäudebereich insgesamt Einsparungen in Höhe von etwa 48 Mio. t CO_{2eq} im Jahr 2020 erzielen. Dies erfordert Investitionen von rund 150 Mrd. € im Zeitraum von 2008-2020. Es wurden ein Zinssatz von 4% und eine Lebensdauer von 30 Jahren angesetzt.

Tabelle 3-1: Ergebnisse der Maßnahmen an Wohn- und Nichtwohngebäuden

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	10	12	12	270 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	-2	-12	-22	-255 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	37	165	290	3 485 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	11	48	84	1 009 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-69	-80	-77	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 4%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	-100
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	39
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-39

Quelle: Berechnungen des Öko-Zentrums

3.1.1.2 Maßnahme 10b: Ersatz von Nachtstromspeicherheizungen

Der Ersatz von elektrischem Strom zu Heizzwecken und Warmwasserbereitung durch andere Energieträger bietet auf Grund der hohen Umwandlungsverluste bei der Stromerzeugung große Potentiale zur Senkung des CO₂-Ausstoßes. Die existierenden Nachtstrom-Speicherheizungen zur Erzeugung von Raumwärme in Gebäuden sollen daher ab 2008 stufenweise gegen andere Heizungssysteme ersetzt werden (erste Tranche bis 2020, in Abweichung zu IEKP (2008)). Der Austausch wird im CO₂-Gebäudesanierungsprogramm nach Maßgabe der durch den Haushalt zur Verfügung gestellten Mittel gefördert.

Annahmen

Die Anzahl der in Haushalten vorhandenen Nachtstromspeicherheizungen wird auf rund 1,4 Mio. Anlagen geschätzt (IZES 2007), die ggf. auf Grund von Härtefallregelungen nicht alle betroffen sind. Der Stromverbrauch dieser Heizungen wird mit rund 20,6 TWh/a angegeben (IZES 2007 und IEKP 2008). Die geplante Höhe der Förderung aus

Mitteln des CO₂-Gebäudesanierungsprogramms der KfW ist nicht bekannt. Diese wird vergleichbar zur derzeitigen freiwilligen Regelung mit 15% der Investitionssumme als Zuschuss oder Kredit angenommen.

Ergebnisse

Um bis 2030 stufenweise alle Nachtstromspeicherheizungen in Haushalten zu ersetzen, müssen pro Jahr etwa 60 000 Anlagen ausgetauscht werden. Dadurch ergibt sich eine Einsparung von 883 GWh und etwa 500 kt CO₂. Von diesen Einsparungen muss allerdings noch der Energieverbrauch der Ersatzheizungen abgezogen werden. Diese werden generell als Gas-Brennwertkessel angenommen. Die erzielbaren Einsparungen liegen dann bei rund 300 kt CO₂ pro Jahr. Bei verstärktem Einsatz von Heizungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energien sind auch etwas höhere CO₂-Einsparungen erreichbar. Durch den Ersatz der Heizungen entstehen Differenzinvestitionen gegenüber dem Austausch mit neuen Nachtstromspeicherheizungen, da beispielsweise ein Schornstein und neue Heizkörper eingebaut werden müssen. Diese Mehrkosten werden mit etwa 300 Mio. € pro Jahr angesetzt. Auf Grund der Überschneidung mit Maßnahme 12 CO₂-Gebäudesanierungsprogramm wurde ein Abzug von 15% vorgenommen. In 2030 sind dann durch diese Maßnahme Einsparungen in Höhe von knapp 6 Mio. t CO_{2eq} möglich.

3.1.1.3 Maßnahme 12: CO₂-Gebäudesanierungsprogramm

Energetische Sanierungen werden seit 2001 mit zinsverbilligten Krediten und Zuschüssen aus dem CO₂-Gebäudesanierungsprogramm der KfW unterstützt. Die dafür zur Verfügung gestellten Bundesmittel und Konditionen sind seitdem mehrfach ausgeweitet und verbessert worden, so dass in den Jahren 2008 und 2009 etwa 700 Mio. € für energetische Sanierungen von Wohngebäuden zur Verfügung stehen. Die Förderung soll auf dem bisherigen Niveau weitergeführt und auf quartiersbezogene Lösungen zur Wärmeversorgung von Gebäuden ausgeweitet werden.

Annahmen

Nach einem Kreditvolumen in Höhe von 1,14 Mrd. € in 2005 wurden auf Grund höherer Bundesmittel und besonders günstiger Konditionen in 2006 Kredite in Höhe von über 3 Mrd. € abgerufen. Im folgenden Jahr lag das Kreditvolumen bei geringeren Bundesmitteln nur noch bei knapp 2 Mrd. €. Das in IEKP (2008) unterstellte Kreditvolumen von 3,5 Mrd. € pro Jahr bis 2030 erscheint vor diesem Hintergrund recht hoch. Das Kreditvolumen wird daher nur mit 2 Mrd. € pro Jahr bis 2030 fortgeschrieben. Darin sind auch die geplanten Zuschüsse für den Ersatz von Nachtstromspeicherheizungen aus Maßnahme 10b enthalten. Als Programmkosten werden etwa 20% des Kreditvolumens angesetzt. Diese dienen der Zinsverbilligung, Teilschulderlässen, Zuschüssen, den Verwaltungskosten der KfW und denen der durchleitenden Banken.

Im Rahmen des Förderprogramms wurden beispielsweise 2005 mit einem Kreditvolumen von etwas über 1 Mrd. € Einsparungen von 340 kt CO_{2eq} erzielt (BEI 2007). Auf Grund günstiger Zinskonditionen und durch die im Rahmen des Programms vorgegebenen Maßnahmenpakete werden bei den Sanierungen eher höhere Kredite pro Gebäude eingesetzt als bei Teilmodernisierungen. Damit können umfangreichere Maßnahmen durchgeführt werden, die im Mittel höhere CO₂-Einsparungen erbringen.

Dies wird zusätzlich unterstützt durch den Ende 2007 eingeführten Zuschuss für eine Baubegleitung zur Qualitätssicherung bei den durchgeführten Sanierungen. Die mit 2 Mrd. € Kreditvolumen erreichbaren CO₂-Einsparungen werden daher, auch nach Abgleich zu Fraunhofer-ISI et al. (2008b), mit 600 kt CO₂ pro Jahr angesetzt.

Ergebnisse

Durch die Investitionen von 2 Mrd. € pro Jahr sparen die Bewohner der Gebäude unter diesen Annahmen durchschnittlich 150 Mio. € Energiekosten pro Jahr. In 2030 werden durch diese Maßnahme CO₂-Einsparungen in Höhe von knapp 14 Mio. t erzielt.

3.1.1.4 Maßnahme 11: Betriebskosten bei Mietwohnungen

Durch die geplante Novellierung der Heizkostenverordnung und Ausbau von Contracting sind unterstützende Effekte bei den energetischen Gebäudesanierungen zu erwarten. Im Rahmen dieser Maßnahme ist keine Sanierungspflicht für vermietete Mehrfamilienhäuser vorgesehen. Daher sind keine zusätzlichen Einsparungen zu erwarten, die über die bereits in Maßnahme 10a enthaltenen Effekte hinausgehen.

3.1.1.5 Maßnahme 13: Soziale Infrastruktur

Annahmen

Im Rahmen eines Investitionspaktes zwischen Bund, Ländern und Kommunen werden ab 2008 Mittel in Höhe von 600 Mio. € pro Jahr für die energetische Sanierung von Schulen, Kindertagesstätten und Jugendeinrichtungen bereitgestellt. Dazu kommen jährlich 200 Mio. € durch zinsverbilligte Darlehen der KfW. Für diese Kredite werden Programmkosten in Höhe von 30 Mio. € pro Jahr angenommen. Der Gesamtbetrag der Investitionen von 800 Mio. € pro Jahr wird bis 2030 fortgeschrieben.

Ziel der Maßnahmen ist laut Bundesregierung eine Primärenergieeinsparung von bis zu 50% je saniertes Gebäude, die durch umfassende Wärmedämmmaßnahmen und Erneuerung der Heizungsanlagen erreicht werden soll. Es wird vorausgesetzt, dass vorrangig ältere Gebäude mit hohem Energieverbrauch energetisch saniert werden. Hintergrund ist der hohe Anteil der Schulen und Kindertagesstätten am Energieverbrauch der Kommunen und der bestehende Modernisierungstau bei vielen der insgesamt etwa 90 000 Gebäude, insbesondere bei Kommunen in „Haushaltsnotlage“.

Die erzielbaren Einsparungen werden beispielhaft anhand von allgemein bildenden Schulen betrachtet, für die in dena, Prognos (2007) die durchschnittlichen Wärmeverbräuche ermittelt wurden (siehe Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Energieverbrauchswerte der allgemeinbildenden Schulen

	Anzahl	Energie- verbrauch [GWh]	Spezifischer Wärmeverbrauch [kWh/(m²a)]
Grundschulen	17 000	4 500	243
Haupt- und Realschulen	18 000	8 000	244
Gymnasien	3 000	6 600	229
Summe	38 000	19 100	238

Quellen: dena, Prognos (2007)

Mit den zur Verfügung stehenden Mitteln können laut Integriertem Energie- und Klimaprogramm etwa 600 Schulen pro Jahr energetisch saniert werden (Bundesregierung 2007). Dies entspricht einem durchschnittlichen Investitionsvolumen von 1,3 Mio. € pro Schule. Anhand von Beispielberechnungen für Schulen aus den 50er und 60er Jahren können damit umfassende Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden, die durchschnittlichen Einsparungen von 500-600 MWh und 0,15-0,2 kt CO₂ pro Jahr erbringen. Dies entspricht bei 600 Schulen in der Summe 300-360 GWh und 90-120 kt CO₂ pro Jahr. Diese Ergebnisse stimmen gut mit den Berechnungen aus Fraunhofer-ISI et al. (2008b) überein, welche bei 420 GWh und 107 kt CO₂ pro Jahr liegen. Die Angaben zur Beheizungsstruktur der Schulen wurden aus Fraunhofer-ISI et al. (2008b) übernommen. Die Maßnahmen zur Energieeinsparung an Schulen werden zusätzlich mit dem Modellvorhaben Niedrigenergiehaus im Bestand für Schulen der Deutschen Energieagentur (dena) unterstützt, die begleitende Beratungen und Pilotprojekte zur Erprobung neuer energieeffizienter Technologien durchführt.

Ergebnisse

Die CO₂-Einsparungen durch diese Maßnahme belaufen sich auf etwa 2,5 Mio. t in 2030 und als kumulierte Einsparung von 2008 bis 2030 auf knapp 30 Mio. t CO₂.

3.1.1.6 Maßnahme 15: Bundesgebäude

Annahmen

Das seit 2006 bestehende Programm zur energetischen Sanierung von Bundesgebäuden in Höhe von 120 Mio. € pro Jahr wird auf dem bisherigen Niveau weitergeführt. Ziel ist die Realisierung von umfangreichen Energie- und Kosteneinsparungspotenzialen sowie die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes bei Bundesgebäuden im Rahmen der Selbstverpflichtung der Bundesregierung. Hintergrund sind die Energiekosten von zahlreichen zivilen und militärischen Liegenschaften des Bundes, die laut (BMU 2007a) Energiekosten in Höhe von etwa 0,5 Mrd. € und CO₂-Emissionen in Höhe von etwa 3,5 Mio. t/a verursachen.

Das Programm soll auf Gebäude der mittelbaren Bundesverwaltung ausgeweitet und die Mittel für die Förderung innovativer, aber bisher unrentabler Techniken für energetische Sanierungen von 5% auf 15% erhöht werden.

Die zivilen und militärischen Bundesgebäude umfassen sehr unterschiedliche Gebäudearten, -größen und -verbrauchswerte. Der durchschnittliche Heizenergieverbrauch der zivilen Nutzungen wird mit 220 kWh/m²a angegeben. Dieser kann durch umfassende energetische Sanierungsmaßnahmen um 30-50% gesenkt werden. Es wird davon ausgegangen, dass vorrangig Gebäude mit vergleichsweise hohem Energieverbrauch saniert werden.

Die Berechnungen aus IEKP (2008) nennen eine jährliche Einsparung von 112 GWh und 29 kt CO₂ bei einer Sanierung von 60 Bundesgebäuden pro Jahr mit etwa 2 Mio. € Investitionsvolumen pro Gebäude. Diese Ergebnisse decken sich mit der Aussage der Bundesregierung, dass bisher Mittel in Höhe von 370 Mio. € für energetische Sanierungen genehmigt wurden und damit voraussichtlich etwa 17 Mio. € und 120 kt CO₂ eingespart werden (BMU, BMWi 2007). Die etwas höheren CO₂-Einsparungen sind auf die Erneuerung und den Energieträgerwechsel bei Heizungsanlagen zurückzuführen, die mit Kohle oder Strom betrieben wurden. Auf Grund der geplanten Steigerung des Anteils innovativer Techniken, die mit höheren Kosten verbunden sind, wird in Zukunft eine etwas geringere durchschnittliche CO₂-Einsparung von 30 kt pro Jahr unterstellt.

Ergebnisse

Bei Fortschreibung der Investitionen in Höhe von 120 Mio. € pro Jahr bis 2030 wird durch diese Maßnahme eine CO₂-Einsparung von knapp 0,7 Mio. t in 2030 erreicht.

3.1.1.7 Maßnahme 14: Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz

Das Ziel dieser Maßnahme ist die Erhöhung des Anteils von erneuerbaren Energien am Wärmeverbrauch von rund 6% im Jahre 2007 auf 14% im Jahr 2020 sowie ein weiterer kontinuierlicher Ausbau nach 2020.

Die zentrale Maßnahme zur weiteren Erhöhung der Wärmeproduktion aus erneuerbaren Energien ist im Meseberg-Programm das Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz, mit dem eine Pflicht zur anteiligen Nutzung von Erneuerbaren Energien im Wärmeeinsatz im Niedertemperaturbereich eingeführt wird. Dabei kommen insbesondere solare Strahlungsenergie, Biomasse und Wärmepumpen in sowohl dezentralen Anwendungen als auch in Nah- und Fernwärme zum Einsatz. Beim Einsatz von solarer Strahlungsenergie ist eine Nutzungspflicht von 0,04 m² Kollektorfläche pro m² Wohnfläche vorgesehen, dies entspricht bei Neubauten einem Anteil von etwa 15% des Wärmebedarfs. Für die Nutzung von fester Biomasse, Geothermie und Umweltwärme ist eine überwiegende Nutzung dieser Energieträger Voraussetzung für die Erfüllung der Nutzungspflicht.

Das Marktanreizprogramm für Erneuerbare Energien zur Wärmeerzeugung wird auf mindestens 500 Mio. € pro Jahr verstärkt. Hierbei werden insbesondere der Gebäudebestand, Nahwärmenetze und erneuerbare KWK (in Kombination mit dem EEG) adressiert.

Annahmen

Für die Abschätzung des Ausbaus erneuerbarer Energien wird an dieser Stelle auf die im Auftrag des BMU erstellte Leitstudie 2007 „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ zurückgegriffen (Nitsch 2007). Um Konsistenz zu den anderen Maßnahmen des Klimaprogramms zu erreichen, werden hier nur die ab 2008 installierten Anlagen betrachtet. Die zentralen Annahmen zum Ausbau der erneuerbaren Energien und zur CO₂-

Vermeidung sind in Abbildung 3-1 und Tabelle 3-3 dargestellt. Demnach erhöht sich die Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen von etwa 85 000 GWh in 2007 auf knapp 150 000 GWh (oder 540 PJ) in 2020 und 215 000 GWh (oder 780 PJ) in 2030. Als Emissionsfaktor der substituierten Energieträger (meist Heizöl oder Erdgas) wird rund 71 g/MJ angenommen, der auch den Energieaufwand für Verteilung und Raffination in Deutschland enthält.

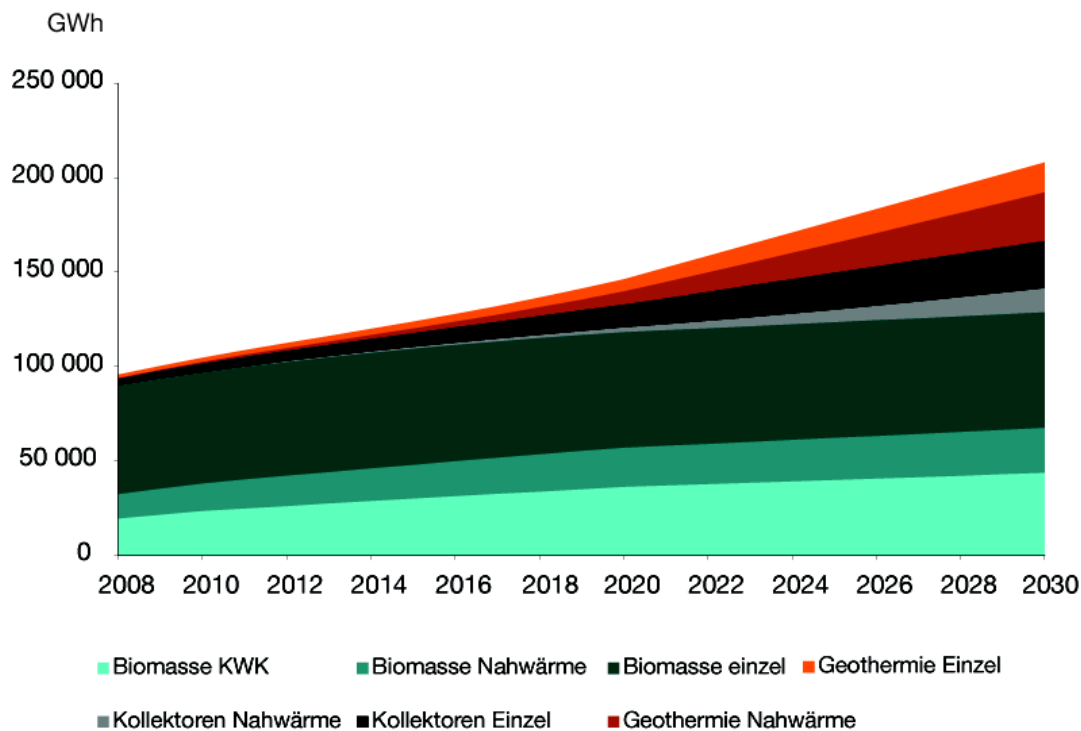


Abbildung 3-1: Entwicklung der Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien, Deutschland

Tabelle 3-3: Emissionsfaktor der verdrängten Energieträger konventioneller Wärmeerzeugung

		2010	2020	2030
Emissionsfaktor	[g/kWh]	256	256	257

Quelle: Berechnungen des ISI auf Basis von Fraunhofer-ISI et al. (2008b)

Für die Ermittlung der Kapitalkosten wurde eine Verzinsung von 4% unterstellt, weil die Investitionen im Wesentlichen von Gebäudeeignern oder Stadtwerken getätigt werden. Je nach Erzeugungsart wurden auch Degressionen der Investitionskosten infolge von Lern- und Skaleneffekten unterstellt.

Ergebnisse

Die Resultate umfassen die Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien, die zusätzlich durch Anlagen ab dem Baujahr 2008 zur Verfügung steht. Somit beziehen sich die berechneten Indikatoren auf die Periode 2008-2030 und stellen die Veränderungen zum Ende des Jahres 2007 dar. Die Ergebnisse erbringen kurz zusammengefasst folgendes Bild (vgl. Tabelle 3-4):

- Die zusätzlichen Investitionen wachsen von knapp 2 Mrd. € in 2010 auf 4,5 Mrd. € in 2030. Kumuliert über diesen Zeitraum werden 85 Mrd. € investiert.
- Kumuliert bis 2030 werden durch neue Anlagen ca. 1 340 TWh (370 PJ) Wärme erzeugt und 340 Mio. t CO₂ vermieden. Der Beitrag zur Einsparung fossiler Energien ist im Jahre 2020 rund 58 TWh (oder 210 PJ) und die jährliche CO₂-Einsparung 15 Mio. t; sie erreicht in 2030 auf fast 32 Mio. t.
- Wertmäßig betragen die Energieeinsparungen 2,4 Mrd. € in 2020 und fast 7 Mrd. € in 2030.
- Die spezifischen Vermeidungskosten nehmen zwischen 2010 und 2020 von -23 € je t CO₂ auf gut 70 €/t erheblich zu, weil zunächst die rentablen Potentiale und Optionen mit geringeren Kapitalkosten (z.B. Holzpellets) ausgeschöpft werden. Im folgenden Zeitraum wird die Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien durch ihre Kostendegression einerseits und den Preisanstieg der fossilen Energieträger andererseits wettbewerbsfähig; somit sinken die Vermeidungskosten und die Kosten der Förderung für diesen Technologiebereich.
- Der Barwert der CO₂-Einsparungen für die gesamte Periode 2008-2030 erreicht somit einen negativen Wert knapp von 5 Mrd. € und einen moderaten Wert für die abdiskontierten spezifischen Vermeidungskosten von 14 €/t CO₂.

Tabelle 3-4: Ergebnisse der Maßnahme: Ausbau erneuerbarer Energien im Wärmebereich

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	1,9	4,7	4,5	85 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	-0,6	-2,4	-6,9	-63 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	15	58	123	1 338 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	3,8	15	32	343 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-24	73	-29	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 4%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	-39
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	-5
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	14

Quelle: Berechnungen des ISI

3.1.2 Zusatzmaßnahme 2: Beschleunigung von Gebäudesanierungen

Im gesamten Gebäudebereich besteht ein hohes Potential für Energieeinsparungen und damit zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Wie die Berechnungen zu den Maßnahmen 10a, 10b bis 12 zeigen, sind hier Emissionseinsparungen mit vergleichsweise geringen Kosten bzw. mit Erträgen verbunden. Dies resultiert aus der Einsparung von Energieträgern zur Wärmeerzeugung in Gebäuden. Als Zusatzmaßnahme definieren wir im Folgenden eine Beschleunigung von Sanierungen im Altbaubestand bzw. weitere Verschärfung der energetischen Anforderungen im Neubau.

Annahmen

Eine Beschleunigung im Bereich der Gebäudesanierung ist durch eine Ausweitung von Anreizen möglich. Hierzu sind, wie in der Maßnahme 12 dargelegt, öffentliche Förderungen durch zinsverbilligte Darlehen der KfW notwendig. Erfahrungen der vergangenen Jahre zeigen, dass eine Ausweitung des Kreditangebots zu einer Anpassung der Nachfrage nach solchen geführt hat. Die Gewähr von solchen Zuschüssen ermöglicht

den Einsatz höherer Kredite, was zu einer umfangreicheren Sanierung führt, als bei einer Teilmodernisierung von Gebäuden. Durch eine Aufstockung des Kreditprogramms von 2 Mrd. €/a um 25% lassen sich weitere Einsparungen von ca. 2 Mio. t CO₂ in 2020 erzielen. Dies ist mit Investitionen von ca. 7 Mrd. € verbunden. Eine Beschleunigung in der Verpflichtung zum Austausch von Nachtspeicheröfen – in unserer Annahme eine Ausweitung um 20% gegenüber der Beschreibung aus Maßnahme 10b – ermöglicht weitere Einsparungen von 0,6 Mio. t bei einer Investitionssumme von ca. 700 Mio. €.

Wir unterstellen ferner, dass durch eine Verringerung von Vollzugsdefiziten in der Umsetzung der Energieeinsparverordnung ein weiteres Potential zu CO₂-Reduktion besteht. Hier ist es entscheidend, dass bei Neubau von Gebäuden die Einhaltung dieser Verordnung strenger überwacht wird. Wir unterstellen, dass in der hier betrachteten Zusatzmaßnahme die notwendigen Investitionskosten mit jeder zusätzlich erzielten Reduktion einer Mio. t CO₂ steigen. Dies resultiert aus der Beobachtung, dass solche Investitionen früher getätigt werden, bei denen monetäre Aufwendungen im Verhältnis zu möglichen Einsparungen von Heizwärme gering sind. Der Zinssatz ist 4%.

Ergebnisse

Im Ergebnis unterstellen wir Gesamtinvestition von jährlich etwa 1,5 Mrd. €, was ca. 10% der Gesamtinvestitionen zur energetischen Modernisierung im Gebäudebereich entspricht. Dies erbringt eine Emissionsreduktion von 4,2 Mio. t. CO₂ in 2020 (vgl. Tabelle 3-5).

Tabelle 3-5: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Beschleunigung von Gebäudesanierungen

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	1,3	1,5	1,5	35 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	-0,3	-1,1	-2	-25 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	5	16	27	350 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	1,2	4,2	7	89 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-81	-10	-97	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 4%)		
Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	11
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	2,3
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-27

Quelle: Berechnungen des PIK

3.1.3 Maßnahmen 6, 7 und 24: Energie-Management; Netze, Beschaffung (Industrie und GHD)

Die Maßnahmen 6 und 7 des Meseberg-Programms werden auf Grund wechselseitiger Synergien und kaum voneinander zu trennenden Wirkungen gemeinsam behandelt. Auch die Maßnahme der gemeinsamen Beschaffung des Bundes und der Länder (Maßnahme 24) wird hier für den Sektor Dienstleistungen miteinbezogen. Dieses Vorgehen einer gemeinsamen Behandlung dieser drei Maßnahmen ist vor allem inhaltlich bedingt, da eine Reihe von Hemmnissen – je nach Energiekostenintensität und Unternehmensgröße – dazu führen, dass bestehende rentable Energieeffizienzpotentiale (aber auch zunehmend die Nutzung von Abfällen und erneuerbaren Energien) von den meisten Unternehmen (und den Gebietskörperschaften) nicht hinreichend realisiert werden. Wegen der Vielfalt der Hemmnisse ist ein Portfolio von Maßnahmen erforderlich, das nicht nur seitens der Politik realisiert werden sollte, sondern auch zu einem erheblichen Anteil durch die Selbstorganisationen der Wirtschaft oder direkt von Unternehmen (z. B. in der beruflichen Fortbildung, beim Betrieb lernender lokaler Netzwerke). Im Einzelnen schließen die Maßnahmen 6 und 7 sowie 24 folgende Elemente mit ein:

- die Einführung von Energiemanagementsystemen in Betrieben, daran angeknüpft die Gewährung von Steuererleichterungen (Maßnahme 6). Dies schließt den Aufbau von lernenden örtlichen Netzwerken zum Klimaschutz mit ein, durch welche Unternehmen in der Schweiz beispielsweise bei eingegangenen Selbstverpflichtungen von der CO₂-Abgabe befreit werden können,
- die Förderung von Beratungen (Energie-Audit, Initialberatungen), verschiedener finanzieller Anreizprogramme für die Durchführung von Investitionen in Energieeffizienz und in erneuerbare Energien oder Abfallstoffe seitens der Industrie und sonstiger gewerblicher Unternehmen. Dies erfolgt nach dem Stand der Diskussion der Umsetzung der Meseberg-Programmpunkte mittels eines Klimafonds, dessen jährliche Mittel bis zu 300 Mio. € ausmachen könnten (Maßnahme 7).
- Ausgeschlossen sind dabei alle Maßnahmen der energetischen Verbesserung der Gebäudehülle, der Bürogebäude und der Produktions- und Fertigungshallen im Industrie-, Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor, die unter den Maßnahmen 10a für Neubauten und Maßnahmen 12, sowie 13 für den Gebäudebestand, getrennt behandelt werden.

Annahmen

Die wesentlichen Annahmen zu den Wirkungen der Maßnahmen 6 und 7 sowie 24 des Meseberg-Programms sind:

- die in der IEKP-Studie (IEKP 2008:39ff) unterstellten wirtschaftlichen Energieeinsparpotentiale bis zum Jahre 2020 basieren auf Abschätzungen der Politikszenerarien III mit 118 TWh für Brennstoffe und 20,5 TWh für Stromanwendungen (Markewitz, Ziesing 2004). Hierbei wurde in IEKP (2008) unterstellt, dass 60% dieser Potentiale bis 2020 mittels der Meseberg-Maßnahmen realisiert werden kann. Diese Schätzungen gingen von wesentlich geringeren Preisannahmen für Brennstoffe und Strom aus, als man heute nach den Entwicklungen der letzten vier Jahre unterstellen muss (zumindest die Hochpreis-Entwicklung der Studie von EWI, Prognos 2006);

- außerdem beschränkten sich die Potentiale im Strombereich in der IEKP-Analyse auf Querschnittstechnologien, während die Wirkungen der hier behandelten Maßnahmen auch die elektrische Prozesswärme und Rückspeisung von Bremsenergie über Leistungselektronik umfassen.
- Der Zinssatz für die Kapitalkosten wurde mit 8% angenommen.

Ergebnisse

Die Wirkungen sind in diesem Maßnahmenpaket relativ gering, gemessen an den vorhandenen Potentialen, deshalb sei für weitere Maßnahmen und Wirkungen dieser Art auch auf Kapitel 3.1.4 (Ökodesign-Richtlinie und Innovationsoffensive) verwiesen. Die Ergebnisse werden für die Industrie und den Sektor Gewerbe/Handel/Dienstleistungen (einschließlich Landwirtschaft) getrennt ausgewiesen (vgl. Tabelle 3-6 und 3-7)

- Im Ergebnis werden über den betrachteten Zeitraum 2008 bis 2030 in der Industrie rund 220 TWh Brennstoffe und Fernwärme eingespart und etwa 130 TWh Strom. Dies führt zu Investitionen von knapp 21 Mrd. €, einer CO₂-Emissionsminderung von 190 Mio. t und Energiekosteneinsparungen von etwa 38 Mrd. € (vgl. Tabelle 3-6). Entsprechend der energiewirtschaftlichen Bedeutung des GHD-Sektors sind die Beiträge in diesem Sektor um rund 70% geringer, aber relativ in gleicher Größenordnung (vgl. Tabelle 3-7).
- Die jährlichen Nettoerträge nehmen bei beiden Sektoren kontinuierlich wegen der fortschreitenden Investitionen in Energieeffizienz und etwas in erneuerbare Energien zu und erreichen gemeinsam in 2030 knapp 5 Mrd. €.
- Die Vermeidungskosten der Maßnahmen der Industrie in 2020 sind mit 80 €/t vermiedenes CO₂ negativ und etwa doppelt so günstig wie im GHD-Sektor mit etwa 45 €/t CO₂ (vgl. Tabelle 3-6 und 3-7). Die Vermeidungskosten verbessern sich leicht in beiden Sektoren, weil die Energiepreise steigen und die spezifischen Kosten der Investitionen durch Lern- und Skaleneffekte teilweise leicht rückläufig sind.

Tabelle 3-6: Ergebnisse der Maßnahme: Energie-Management; Beratung, Netze, Beschaffung für den Bereich der Industrie

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0,2	0,9	1,4	21 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	-0,12	-1,7	-3,7	-38 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	2,5	30	56	350 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0,6	8,9	18	190 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-76	-80	-90	

) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008 – 2030 (Zinssatz 8%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	6,5
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	4,7
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-25

Quelle: Berechnungen des ISI

Tabelle 3-7: Ergebnisse der Maßnahme: Energie-Management; Beratung, Netze, Beschaffung für den Bereich Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/ a]	0,25	0,5	0,7	9,0 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/ a]	-0,12	-0,54	-1,2	-12 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/ a]	1,6	7,2	15	160 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} / a]	0,53	2,3	4,9	52 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/ t CO _{2eq}]	-43	-47	-50	

) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008 – 2030 (Zinssatz 8%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	3,1
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	0,8
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/ t CO _{2eq}]	-15

Quelle: Berechnungen des ISI

Mit insgesamt 11,2 Mio. t CO₂ Verminderungen im Jahre 2020 erreichen die drei Meseberg-Maßnahmen 6, 7 und 24 einen ansehnlichen Reduktionsbeitrag. Die Programmkosten werden auf rund 3 Mrd. € in der Periode 2008 bis 2020 veranschlagt.

3.1.4 Zusatzmaßnahme 8: Ökodesign-Richtlinie und Innovationsoffensive

Die Maßnahmen 6, 7 und 24 (Kapitel 3.1.3) orientieren sich einerseits nur an einem Teil der bestehenden *Hemmnisse* der Treibhausgasminderungen in Industrie und GHD-Sektor. Andererseits werden neu entstehende Reduktionspotentiale durch Nutzung der erneuerbaren Energien und durch verbesserte Materialeffizienz im Meseberg-Programm noch nicht gezielt in weitere Maßnahmen umgesetzt. Die unzureichende Berücksichtigung bestehender Hemmnisse – aber auch möglicher fördernder Faktoren – sei an folgenden Fakten angedeutet (vgl. Abbildung 3-2):

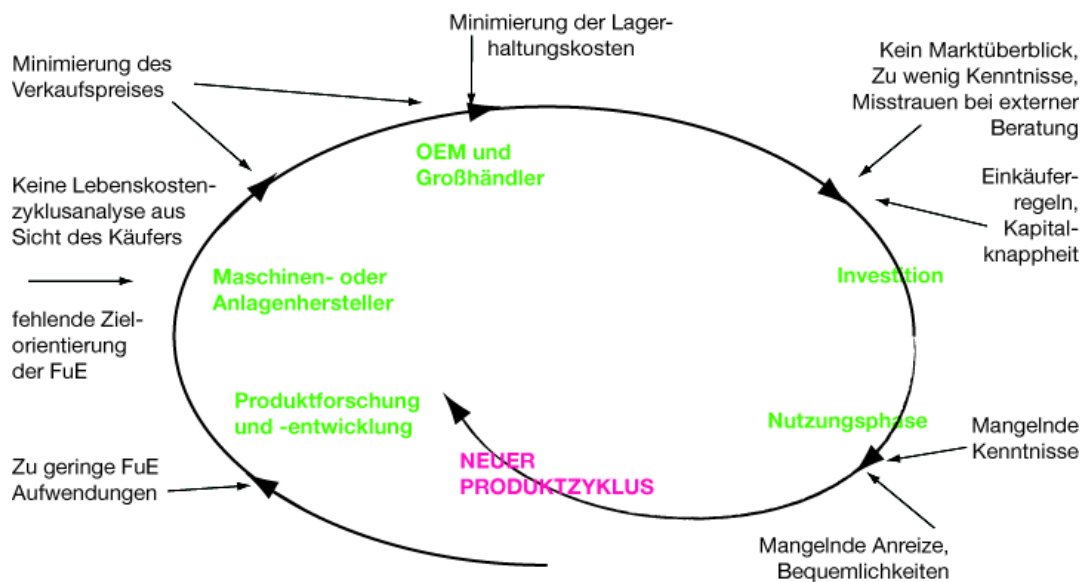


Abbildung 3-2: Erläuterung wichtiger Hemmnisse entlang des Produktlebenszyklus eines Investitions- oder langfristigen Gebrauchsgutes

- Großhändler von Massenprodukten (Elektromotoren, Pumpen, Ventilatoren) haben aus Gründen der Minimierung der Kapitalkosten viele Effizienzprodukte nicht am Lager, die Energieanwender brauchen den Ersatz häufig in wenigen Stunden und können nicht auf tage- oder wochenlange Lieferfristen der energieeffizienten Produkte warten.
- Maschinen- und Anlagenhersteller sehen es nicht als Vorteil, hocheffiziente Lösungen wegen der höheren Investitionen anzubieten, da ihre Produkte im Wettbewerb in den meisten Fällen nach der Höhe der Investitionskosten und nicht nach der Höhe der Lebenszykluskosten bewertet werden (z. B. Wärmedämmung in Öfen der Pulverlackierung, Hocheffizienz-Motoren in Holzbearbeitungsmaschinen); Der Einbau von hocheffizienten Komponenten in Maschinen und Anlagen wird wegen mangelnder Kenntnisse und Information auch seitens der Käufer nicht gewürdigt.
- Maschinen- und Anlagenhersteller sind häufig mittlere Unternehmen, die komplexere technische Innovationen ohne Mithilfe von Partnern aus der angewandten Forschung und Zulieferbranchen nicht realisieren können.
- 80% der deutschen Unternehmen entscheiden ihre Investitionen in Energieeffizienz nach der Amortisationszeiten-Methode und schneiden damit hochrentable langlebige Effizienz-Lösungen systematisch ab.
- örtliche oder branchenorientierte Bündelung von Nachfrage als gemeinsames Beschaffungsprogramm zur Verminderung der Kosten/Preise findet im Bereich Energieeffizienz oder erneuerbare Energien nur in seltenen Ausnahmefällen statt.

Hinzu kommen *fördernde Faktoren*, die eine Klimaschutzpolitik aufgreifen könnte. Hierbei handelt es sich auch um organisatorische und sozial- sowie individualpsychologische Aspekte:

- Die Setzungsmacht der Unternehmensleitungen für die Routinen der Investitionsentscheidungen (Rentabilität durch interne Verzinsung ermitteln, Einkäufer anhalten, die Lebenszykluskosten abzufragen, bzw. die Verkäufer der

Maschinen- und Anlagenhersteller anzuhalten, die Lebenszykluskosten als Verkaufsargument herauszustellen) wird bisher kaum genutzt.

- Bedürfnisse für Sozialprestige und Imagegewinn der Unternehmen und Unternehmensleitungen z.B. durch öffentliche Auszeichnungen oder Klimaschutz-Ratings seitens der Banken (ähnlich wie der Green Dow Jones) werden kaum genutzt.

Annahmen

Es wurde unterstellt, dass die Bedeutung des Themas Energieeffizienz in Zukunft die Maschinen- und Anlagenhersteller zu einem neuen Innovationsschub führen wird. Hierzu wurde entsprechend der o.g. Hemmnisse und fördernder Faktoren eine Reihe von Maßnahmen unterstellt, die zusätzlich zu den Maßnahmen 6, 7 und 24 des Meseberg-Programms ergriffen werden. Hierbei spielen die Selbstorganisationen der Wirtschaft (z.B. des DIHT, VDMA, ZVEI und der Branchenverbände) sowie der Gebietskörperschaften (z.B. Städte und Gemeindetag, die Landesregierungen) eine wichtige Rolle.

- Zuschüsse zu Investitionen, Lagerhaltung für Großhändler, Fortbildungsveranstaltungen oder persönliche Fortbildung, Klimaschutz-Ratings,
- Pilotversuche mit Großhändlern von Elektromotoren, Ventilatoren, Pumpen etc. und in verstärktem Umfang Neu-Entwicklungen mit ausgewählten Anlagen- oder Maschinenherstellern.
- Labelling von eingebauten Hocheffizienz-Aggregaten (High Efficiency Inside), auch für Massenprodukte auf EU-Ebene Ausweitung des bestehenden Systems für Elektro-Motoren.
- Auszeichnungen von Betrieben verschiedener Größe gemäß spezifischer Emissionsminderungen durch die Bundesregierung oder den Bundespräsidenten.
- Anregungen von betriebsinternen Belobigungs-Mechanismen für Maschinenführer, Kesselhaus- und Anlagenbetreiber, Verbesserungsvorschläge etc.
- ein Regierungslabel für klimaschützende Betriebe (die sich zu merklichen spezifischen Emissionsminderungen verpflichten und jährlich über ein

Reporting/Monitoring mit Zufallskontrolle (ähnlich wie in der Schweiz für die Ausnahmegenehmigung von der CO₂-Abgabe) ihr Regierungslabel rechtfertigen müssen.

Inhaltlich in diese Maßnahmen mit eingeschlossen sind alle Möglichkeiten, durch die Substitution mittels Abfallstoffen, Holznutzung (Pellets und Hackschnitzel) und thermische Solarenergie die Wärmekosten – und damit auch die CO₂-Emissionen – mit rentablen Maßnahmen zu senken; ebenso mit eingeschlossen sind Innovationen zur Verbesserung der Materialeffizienz energieintensiver Materialien und deren Substitution durch weniger energieintensive Rohstoffe oder Naturrohstoffe wie Holz, Flachs, Hanf oder Stärke. Die vom Bundeswirtschaftsministerium begonnene Materialeffizienz-Initiative wird damit wesentlich intensiviert.

Das ganze Paket der zusätzlichen oben angesprochenen Maßnahmen wird mit dem Schlagwort „Ökodesign-Richtlinie und Innovationsoffensive“ bezeichnet.

Ergebnisse

Die Wirkungen sind in diesem zusätzlichen Maßnahmenpaket noch einmal erheblich, weil durch die Innovationsoffensiven bei den Herstellern von Maschinen- und Anlagen, dem Großhandel und bei der Frage des Einsatzes von erneuerbaren Energien zur Prozesswärmeerzeugung erhebliche Potentiale der Treibhausgasemissionen neu geschaffen werden. Die Ergebnisse werden für die Industrie und den Sektor Gewerbe/Handel/-Dienstleistungen (einschließlich Landwirtschaft) getrennt ausgewiesen (vgl. Tabelle 3-8 und 3-9):

- Im Ergebnis werden über den betrachteten Zeitraum 2008 bis 2030 in der Industrie rund. 580 TWh und im GHD-Sektor von 180 TWh eingespart bzw. durch erneuerbare Energien substituiert. Dies führt zu Investitionen von rund 44 Mrd. € (Industrie) bzw. 14 Mrd. € im GHD-Sektor.
- Die CO₂-Emissionsminderung beträgt im gesamten Zeitraum 2008 bis 2030 rund 260 Mio. t (Industrie) und 67 Mio. t (GHD-Sektor). Die Energiekosteneinsparungen belaufen sich für beide Sektoren auf etwa 66 Mrd. € (vgl. Tabelle 3-8 und 3-9).

Tabelle 3-8: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Ökodesign-Richtlinie und Innovationsoffensive - GHD

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0,35	0,75	1,1	14 Mrd. €
Jährliche Kosten [*]	[Mrd. €/a]	-0,15	-0,7	-1,5	-16 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	3,6	13	22	180 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0,7	3,0	6,3	67 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-5	-5	-10	

) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 8%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	5,0
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	0,1
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-2,0

Quelle: Berechnungen des ISI

Tabelle 3-9: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Ökodesign-Richtlinie und Innovationsoffensive - Industrie

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €]	0,6	1,8	3,3	44 Mrd. €
Jährliche Kosten [*]	[Mrd. €/a]	-0,15	-2,3	-5,0	-50 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	11	40	75	580 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0,8	12	24	260 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-10	-15	-20	

) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 8%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	14
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	1,3
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-5,0

Quelle: Berechnungen des ISI

- Die spezifischen Vermeidungskosten der Maßnahmen in 2020 sind mit -5 €/t vermiedenes CO₂ im GHD-Sektor und mit etwa -15 €/t CO₂ in der Industrie zwar noch leicht negativ, aber im Durchschnitt gerade noch profitabel (vgl. Tabelle 3-8 und 3-9). Auch hier verbessern sich die spezifischen Vermeidungskosten in beiden Sektoren etwas, weil die Energiepreise steigen und die spezifischen Kosten der Investitionen durch Lern- und Skaleneffekte teilweise leicht rückläufig sind.

Mit insgesamt 15 Mio. t CO₂-Verminderungen im Jahre 2020 erreichen diese zusätzlichen Maßnahmen einen Beitrag von 1,2 Prozentpunkten bei der weiteren Verminderung der Treibhausgase. Die Programmkosten werden auf rund 3 bis 4 Mrd. € in der Periode 2008 bis 2020 veranschlagt.

3.1.5 Maßnahme 1: Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz

Eine wesentliche Maßnahme des Meseberg-Programms ist das Ziel, den Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) an der Nettostromerzeugung von derzeit gut 11% auf 25% zu erhöhen, dies bedeutet eine zusätzliche Errichtung von KWK-Anlagen mit einer jährlichen Stromerzeugung von gut 80 TWh in Jahre 2020². Die Spezifikationen dieser Maßnahme in ihrer politischen und technischen Ausprägung sowie ihren Wirkungen auf Investitionen wurde von der IEKP-Studie (IEKP 2008:21ff) voll übernommen, so dass in diesem Endbericht nur die Annahmen für die Periode 2020 bis 2030 erläutert und die Gesamtergebnisse dargelegt werden.

Annahmen

Ungeachtet der Tatsache, dass das aktuelle Niveau der KWK-Stromerzeugung in Deutschland nur mit einer gewissen Unschärfe bekannt ist (vgl. dazu IER 2005,

² Zielgröße 2020: 127 TWh/a; Bestand 2005: 70 TWh/a; Abgang bis 2020: 24 TWh/a;
=> Zubau bis 2020: 81 TWh/a.

DIW/Öko-Institut 2007) wird für die Analyse ein aktuelles Niveau der KWK-Stromerzeugung von 70 TWh angenommen, welches die durch das KWK-G 2002 induzierten KWK-Projekte im Bereich der großen KWK-Anlagen voll berücksichtigt (IEKP 2008:21).

Da in IEKP zu über 90% große KWK-Anlagen (größer als 2 MW) mit einer angenommenen Lebensdauer von 25 Jahren zum Ausbau der KWK herangezogen werden, kommt es bis 2030 zu keinem Re-Investitionszyklus. Es sind bis ausschließlich Bestandsanlagen zu ersetzen. Für den Zeithorizont 2020 ergibt sich ein altersbedingter Abgang von Anlagen mit einer Stromerzeugung von ca. 24 TWh/a (IEKP 2008:21). Für den Zeitraum 2020 bis 2030 wird von einem jährlichen Abgang in einer Größenordnung von knapp 2 TWh/a ausgegangen. Damit werden bis 2030 insgesamt KWK-Anlagen mit einem Produktionsvolumen von etwa 40 TWh/a pro Jahr zu ersetzen sein. Nach 2020 wird mit keiner weiteren Ausweitung der KWK-Erzeugung gerechnet, weil die Stromerzeugung zusätzlich über die erneuerbaren Energien eine größere Bedeutung erhält und die in KWK erzeugte Wärme nicht kosteneffizient abgesetzt werden kann. Somit bleibt der weitere Neubau auf den Ersatz von Bestandsanlagen beschränkt. Da der Netto-Strombedarf mit dem Meseberg-Programm bis 2030 wegen der zunehmenden Elektromobilität auf dem gleichen Niveau von 2020 verharret, verändert sich sein Anteil an der Stromerzeugung nicht.

Zur Erreichung des 25%-Ziels bis 2020 ist ein Bündel von politischen Maßnahmen zu realisieren, dessen Eckpunkte nachfolgend aus IEKP (2008:22f) zitiert sind:

- Weiterführung der Förderung im Rahmen des KWK-G für bis 2013 errichtete Anlagen, Förderung der Neuerrichtung von KWK-Anlagen und des Ausbaus von Fernwärmenetzen. Damit erreicht das KWK-G bis 2013 insgesamt einen Zubau von 30 TWh/a.
- Förderung der KWK-Nettostromerzeugung an Stelle der Einspeisung von KWK-Strom in die Netze der öffentlichen Versorgung.
- Fördersätze für den Neubau von großen KWK-Anlagen 1,5 €/kWh, für kleine KWK-Anlagen in der Leistungsklasse 50 kW bis 2 MW 2,0 €/kWh, von 5 €/kWh für kleine KWK-Anlagen bis 50 kW sowie 5 €/kWh für Brennstoffzel-

lenanlagen; Förderung von kleinen KWK-Anlagen und Brennstoffzellen über 10 Jahre, sonst über 30 000 Vollbenutzungsstunden.

- Netzausbauförderung von maximal 150 Mio. € jährlich bis 2020.
- Deckelung der Förderung bei 750 Mio. € jährlich.
- Wegfall der kostenlosen Zuteilung von Emissionszertifikaten für Stromerzeugungsanlagen nach 2012, sowie ambitionierte Reduktionsziele, die zu vergleichsweise hohen Zertifikatspreisen führen.

Stromseitig verdrängen die KWK-Anlagen Kondensationskraftwerke aus dem Mittellastbereich. Hierbei wird von einer jeweils hälftigen Verdrängung von Steinkohle und Erdgas ausgegangen. Im Wärmebereich verdrängen die KWK-Anlagen vor allem erdgasbefeuerte Heizsysteme. Hierbei sind aufgrund der vorliegenden Analysen (Eikmeier et al. 2006, DIW/Öko-Institut 2007, AGFW 2005) im Bereich der prinzipiell verfügbaren Wärmesenken vor dem Hintergrund des 25 %-Ausbauziels keine grundsätzlichen Restriktionen zu erwarten. Dies bedeutet jedoch nicht, dass sich die praktische Erschließung dieser Wärmesenken überwiegend im Selbstlauf vollzieht.

Ergebnisse

Zunächst sehr ins Auge fallen die Werte für die Differenz-Investitionen (Zusatz-Investitionen abzüglich vermiedener Investitionen für Kondensationskraftwerke und Wärmeerzeuger) mit geringfügig negativen Werten (vgl. Tabelle 3-10). Der Grund hierfür liegt in den relativ geringeren spezifischen Investitionen der KWK im Vergleich zu den verdrängten Kondensationskraftwerken und Wärmeerzeugern. Ein Ausbau der Fernwärmenetze wurde hierbei nur insofern unterstellt, soweit er sich kostenneutral darstellen lässt.³ Andererseits führt der Ausbau zu deutlich erhöhten Betriebskosten, da das teure Erdgas günstige Kohle verdrängt. Diese Betriebskostensteigerungen überwie-

³ Die Investitionen in die Fernwärmeinfrastruktur sowie die notwendigen Spitzenerzeugungsanlagen und die Investitionen in dezentrale Heizungsanlagen kompensieren sich in etwa, d. h. hierbei stehen Verdichtungen und Lückenschließungen im Vordergrund. Ein Neubau von großflächigen Fernwärmenetzen ist damit nicht darstellbar.

gen die eingesparten Kapitalkosten, so dass spezifische Vermeidungskosten von etwa 10 €/t CO₂ ab dem Jahr 2020 zu erwarten sind. Bis 2010 sind diese Kosten mit rund 30 €/t sogar noch höher, da hier zunächst die erhöhten Ausbaukosten der Netze sowie die höheren spezifischen Kosten der KWK-Anlagen aufgrund des anfänglich geringen Ausbauvolumens dominierend sind.

Die THG-Reduktionen belaufen sich auf etwa 20 Mio. t pro Jahr ab 2020; sie bleiben dann bis 2030 konstant, da zu diesem Zeitpunkt kein weiterer Ausbau der KWK angenommen wird.

Betrachtet man den Gesamtzeitraum von 2008 bis 2030, so belaufen sich die annuisierten und abgezinsten Investitionen auf -300 Mio. €. Aufgrund der erhöhten Betriebskosten ist die Maßnahme mit einem Barwert von -1,1 Mrd. € nicht rentabel. Daher liegen die abgezinsten Vermeidungskosten bei 3,5 € pro Tonne vermiedenen CO₂ (vgl. Tabelle 3-10).

Tabelle 3-10: Ergebnisse der Maßnahme: Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €]	-0,04	-0,09	0	-0,7 Mrd. €
Jährliche Kosten	[Mrd. €/a]	0,05	0,24	0,24	4,0 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	6,0	38	38	610 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	3,2	20	20	320 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	30	9,0	9,0	

2008 -2030 (Zinssatz 8%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	-300
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	-1,1
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	3,5

Quelle: Berechnungen des BSR

3.2 Maßnahmen private Haushalte, GHD

3.2.1 Maßnahme 4: Intelligente Messverfahren für Stromnutzer

Der Einsatz intelligenter Zählersysteme bietet den privaten Haushalten die Möglichkeit, ihre Stromnutzung effizienter zu gestalten. Denn bislang ist den wenigsten Haushalten ihr tatsächlicher Stromverbrauch bekannt. Auf Grund der nur jährlichen Abrechnung des Stromverbrauchs und der üblichen monatlichen Abbuchung vom Bankkonto ist eine direkte Rückkopplung des eigenen Verhaltens auf die Stromnutzung nicht möglich. Auch die Auswirkungen des Kaufs von effizienten Geräten auf den Strombedarf lassen sich von privaten Haushalten nur schwer erfassen. Auf Grund der jährlichen Abrechnung vermischen sich die Effekte von Verbrauchssteigerungen durch einen veränderten Gebrauch von Elektro-Geräten und der Anschaffung zusätzlicher Geräte einerseits und der Einsparungen durch effizientere Neu-Geräte oder ein verändertes Verhalten andererseits. An dieser Stelle der Intransparenz setzt die Maßnahme „Intelligente Messverfahren bei der Stromnutzung“ an, die zu einer effizienteren und bewussten Stromnutzung im Haushaltsbereich, aber auch bei vielen kleinen Dienstleistungs-, Gewerbe- und Handelsbetrieben) beitragen kann.

Derzeit starten einige Feldversuche, in denen durch Analyse des Verbraucherverhaltens ausgewählten privaten Haushalten verstärktes Feedback über Display-Anzeigen zu ihrem aktuellen und zeitlich aggregierten Stromverbrauch gegeben wird (eEnergy 2008, Intellikon 2008). Durch den Einsatz intelligenter Zählersysteme, die auch eine bidirektionale Kommunikation zwischen Stromversorger und den Stromnutzern zulassen, können diesen aktuelle Informationen zu ihrem Stromverbrauch übermittelt werden. Sichtbare Einsparungen lassen sich dann durch Verhaltensänderungen sowie durch die Anschaffung effizienter Geräte bewirken und von den Nutzern unmittelbar nachvollziehen.

Annahmen

Ausgangspunkt für die vorliegende Analyse ist eine Investition von 200 € pro Haushalt, die für die Anschaffung eines intelligenten Zählers und die notwendige Infrastruktur benötigt wird (Franz et al. 2006, Jones 2003). Investitionen in die Kommunikationsinfrastruktur bedeuten z.B. eine Modernisierung der Verteilernetze, um über diese eine PowerLine-Kommunikation zu ermöglichen oder Investitionen in die Abrechnungssysteme der Energieversorger. Auch bei der Übermittlung und Aufbereitung der aktuellen oder aggregierten Stromverbrauchs-Informationen fallen (geringe) Kosten an.

Die erzielbaren Stromeinsparungen lassen sich nach heutigem Kenntnisstand nur sehr schwer abschätzen. Vorliegende Daten aus anderen Ländern sind zum teil widersprüchlich, auf jeden Fall spielen Gewöhnungseffekte und kulturelle Unterschiede sowie Einkommensunterschiede mit eine Rolle. Daher wurden im vergangenen Jahr mehrere Pilotprojekte (z.B. das vom BMWI und BMU geförderte Forschungsprogramm eEnergy bzw. das vom BMBF geförderte Forschungsprogramm Intelliekon) gestartet, um mögliche Einsparungen zu ermitteln und um Hinweise für die Gestaltung der Informationsrückkopplung für Stromverbraucher zu erhalten.

Um dennoch eine erste Einschätzung der möglichen Einsparungen zu erhalten, wird mit einer Einsparung von 6,5% des jährlichen Strombedarfes eines Haushalts mit intelligentem Zähler, im Vergleich zu einem Haushalt ohne intelligenten Zähler, gerechnet. Grundlage dafür sind Untersuchungen, die in Kanada durchgeführt wurden (Darby 2006, Mountain 2006). Dabei wurden von 2004 bis 2006 Feldversuche in 400 privaten Haushalten durchgeführt. Diese stellen einen aktuelleren Stand dar, als die in den 1990er Jahren in Deutschland durchgeführten Feldversuche (Hegemann et al. 1992; Gruber, Brand 1995). Darüber hinaus dauerten die Untersuchungen in Kanada über 2,5 Jahre, so dass davon ausgegangen werden kann, dass Aspekte wie Anfangseffekte und nachlassende Bereitschaft zu einem effizienteren Umgang mit Strom berücksichtigt wurden. Gleichwohl bleibt die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf einen deutschen Haushalt mit Unsicherheit behaftet, da sich verschiedene Merkmale deutscher Haushalte wie Stromverbrauch pro Haushalt, Geräteausstattung, klimatische Bedingungen von denen kanadischer Haushalte unterscheiden. In einem umfassenden Review internationaler Arbeiten zu Feedback-Instrumenten wie intelligente Zähler werden in Fischer (2007)

mögliche Einsparungen zwischen 5 und 12 % genannt, so dass die hier gewählte Annahme von 6,5% als kurzfristig umsetzbar eingeschätzt wird.

Für die Bestimmung der Einsparungen durch intelligente Messverfahren wird eine Referenzentwicklung des Haushaltsstromverbrauches festgelegt. In dieser wird bereits eine Effizienzsteigerung unterstellt (Fraunhofer-ISI et al. 2008b). Der durchschnittliche Strombedarf aller Haushalte (HH) fällt in der Referenzentwicklung von 3 780 kWh/HH 2005 auf 3 340 kWh/HH 2030. Der durchschnittliche Strombedarf der Haushalte mit intelligenten Messverfahren liegt dann 6,5% unterhalb dieser Referenzentwicklung, d.h. bei 3 530 kWh/HH 2005 bzw. bei 3 125 kWh/HH 2030. Die erzielbaren Einsparungen ergeben sich dann aus der Geschwindigkeit der Verbreitung intelligenter Zähler. Dafür wird unterstellt, dass der Anteil intelligenter Zähler ab 2008 bis 2030 von fast null auf 30 Mio. Stück steigt und somit ca. 75% der Haushalte mit einem intelligenten Zähler ausgestattet sind (vgl. Tabelle 3-11). Die Verbreitung intelligenter Zähler erfolgt nach einer typischen Marktpenetrationskurve, die ihre Sättigung bei 75% aller Haushalte etwa im Jahr 2022 erreicht. Die maximale Installationszahl erreicht 4 Mio. Zähler pro Jahr (Zeitraum 2015–2020). Derzeit werden pro Jahr ca. 800 000 Zähler neu installiert. Die gewählte Diffusionsrate liegt etwas oberhalb des Reinvestitionszyklus, aber noch deutlich unterhalb von Diffusionsraten, die z.B. in Italien erreicht wurden (Jones 2003).

Tabelle 3-11: Zentrale Annahmen für Maßnahme 4: intelligente Messverfahren für private Haushalte

Bereich	Annahmen
Kosten	Investition in Zähler und notwendige Infrastruktur: 200 €/Haushalt
Einsparungen Strom	6,5 % des jährlichen Strombedarfs gegenüber Referenzhaushalt ohne intelligente Messverfahren
Marktdiffusion	ca. 7,6 Mio. Zähler bis 2015 und 25 Mio. Zähler bis 2020, Sättigung bei 75 % aller Haushalte bzw. 30 Mio. Zähler

Quelle: Berechnungen des ISI

Für den einzelnen Haushalt ergeben sich reduzierte Stromkosten, die sich an Hand des durchschnittlichen Haushaltsstrompreises berechnen lassen. Für die Berechnung wurde ein realer Strompreis (Preisbasis 2000) für Haushalte von 180 €/MWh 2005 und 173 €/MWh um 2030 unterstellt (Fraunhofer-ISI et al. 2008b). Der Haushaltsstrombedarf

aller Haushalte in der Referenzentwicklung basiert auf dem Mit-Maßnahmen-Szenario (Fraunhofer et al. 2008b) (HH-Strombedarf 148 TWh in 2005, 133 TWh in 2030).

Ergebnisse

Im Ergebnis ergibt sich unter diesen Annahmen (vgl. Tabelle 3-12):

- eine Gesamtinvestition von 6 Mrd. € bis zur völligen Marktdurchdringung in den privaten Haushalten, was bis 2020 fast erreicht sein könnte,
- eingesparte Stromkosten abzüglich der übrigen Kosten von rund 0,5 Mrd. € pro Jahr nach voller Marktdurchdringung, so dass die spezifischen Vermeidungskosten bei etwa 150 €/t CO₂ liegen,

Tabelle 3-12: Ergebnisse der Maßnahme: Intelligente Messverfahren bei der Stromnutzung

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0,04	0,56	0,0001	6,0 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	-0,01	-0,52	-0,5	-7,8 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	0,07	5,9	6,5	92 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0,04	3,4	3,3	51 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-150	-150	-150	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008 -2030 (Zinssatz 10%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	2
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	2
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-35

Quelle: Berechnungen des ISI

- eine CO₂-Verminderung von maximal 3-3,4 Mio. t/a bei einer hohen Durchdringung der Haushalte mit Zählern ab etwa 2020,
- ein Barwert von knapp 2 Mrd. € für die gesamte Periode und über den Zeitraum 2008 bis 2030 abdiskontierte spezifische Vermeidungserlöse von 35 €/t CO₂.

Ob sich dieses positive Resultat erzielen lässt, hängt nicht zuletzt von der Art der Mess- und Anzeigeconfiguration der Messgeräte und der Beachtung der privaten Haushalte der gegebenen Informationen ab. Außerdem könnte man diese Messverfahren auch auf kleine Betriebe im Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungsbereich ausdehnen.

3.2.2 Maßnahme 8: Energieeffiziente Produkte

Die Bezeichnung *energieeffiziente Produkte* bezieht sich auf alle im Haushalt vorhandenen Geräte. Der Anteil dieser Geräte am Gesamtstromverbrauch deutscher Haushalte liegt bei 60% (Fraunhofer-ISI et al. 2008b:267), womit in diesem Bereich ein signifikantes Energie- und damit CO₂-Reduktionspotential besteht. Die größten Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz der Haushalte werden im Bereich Kühlgeräte und Beleuchtung gesehen, sowie in der konsequenten Reduktion von Leerlaufverlusten bei elektronischen Produkten (UBA 2006:4).

Die beschlossenen Maßnahmen zur Energie- und CO₂-Reduktion im Bereich energieeffiziente Produkte zielen maßgeblich auf eine großflächige Markteinführung von effizienten Produkten, durch die Setzung von Mindeststandards für Geräte und eine übersichtliche und verbraucherfreundliche Kennzeichnung aller stromverbrauchenden Geräte ab. Die Realisierung dieser Maßnahmen soll zu einer Effizienzsteigerung von 20% führen (Bundesregierung 2007:20).

Annahmen

Die erwartete Wirkung obiger Maßnahmen ist, dass der Stromverbrauch zukünftiger Geräte kontinuierlich sinkt und zudem der Marktanteil von Geräten mit einer höheren Energieeffizienzklasse weiter steigt. Dazu soll europaweit eine klare sowie für die Industrie verbindlich anzuwendende energieverbrauchsbezogene Produktkennzeichnungspflicht für elektrische Geräte eingeführt werden, welche den Verbraucher über Geräte mit hohem Verbrauch aufklärt.

Weiterhin wird mit einer deutlichen Reduktion der Leerlaufverluste von elektrischen Produkten gerechnet, da zukünftig ein verpflichtender Einbau von netztrennenden Schaltern vorgeschrieben sein wird und eine verpflichtende Kennzeichnung des Leerlaufverbrauchs die Verbraucher informiert.

Orientieren soll sich die Energieeffizienz von elektronischen Geräten an Instrumenten wie dem „Top-Runner-Ansatz“, welcher innerhalb einer festgelegten Periode einen Mindeststandard festsetzt, der sich auf das jeweils effizienteste Gerät einer Periode bezieht (BMU 2008)

Parallel zu all diesen Maßnahmen, wird eine Kostendegression durch verbesserte Technologien unterstellt, welche den Mehrpreis eines Haushaltsgeräts bis 2020 auf 20% des Mehrpreises von 2008 sinken lässt (IEKP 2008:43). Für die Berechnungen wurde ein Zinssatz von 4% verwendet.

Ergebnisse

Die Kosten für energieeffiziente Geräte werden nahezu ausschließlich von Verbraucher und Industrie getragen. Die Mehrkosten beim Kauf eines elektronischen Geräts bestehen überwiegend aus der Differenz zwischen dem Preis eines energieeffizienten Produkts und einem Standardgerät. Kosten für den Staat fallen bei dieser Maßnahme kaum an, somit sind die Programmkosten in diesem Fall vernachlässigbar.

Die durch die betrachteten Maßnahmen entstehenden möglichen Energieeinsparungen belaufen sich bis 2020 bzw. 2030 auf 120,7 TWh, bzw. 298,1 TWh. Dabei betragen die Einsparungen im Jahr 2020 16,3 TWh und im Jahr 2030 18,4 TWh.

Aus diesem sinkenden Stromverbrauch resultieren sinkende CO₂-Emissionen. Dabei wird angenommen, dass die Stromproduktion in Zukunft weniger CO₂-intensiv abläuft und auch durch den gesunkenen Stromverbrauch CO₂ eingespart werden kann. Im Ergebnis lassen sich in 2020 rund 8,2 Mio. t CO₂ und bis 2030 etwa 10,3 Mio. t CO₂ einsparen. Die kumulierten CO₂-Einsparungen bis 2030 sind 158 Mio. t.

Die von uns errechneten CO₂- und Stromeinsparungen sind Ergebnis jährlicher Investitionen, wobei auf Grund der begrenzten Lebensdauer elektronischer Geräte nach 14 Jahren Ersatzinvestitionen anfallen. Wir gehen davon aus, dass der Höhepunkt der zu tätigenen Investitionen um das Jahr 2020 liegt, danach sind sinkende Investitionen zu

erwarten. So ergeben unsere Berechnungen im Bereich der elektronischen Geräte für Verbraucher und Industrie bis zum Jahr 2020 Investitionen von 0,8 Mrd. € und bis zum Jahr 2030 von 1,6 Mrd. €.

Den Investitionen stehen die zu erwartenden Einsparungen gegenüber. Durch die verbesserte Energieeffizienz neuer Geräte ist bei fast allen Elektrogeräten mit massiven Stromeinsparungen zu rechnen, das bedeutet niedrigere Ausgaben während der gesamten Lebensdauer eines elektronischen Geräts.

So können durch Maßnahme 8 die Stromeinsparungen (inkl. MwSt.) im Zeitraum von 2008 bis 2030 in etwa 52 Mrd. € betragen. Die folgende Tabelle stellt die Ergebnisse für diese Maßnahme zusammen.

Tabelle 3-13: Ergebnisse der Maßnahme: Energieeffiziente Produkte

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0,09	0,03	0,06	1,6 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	-0,7	-2,8	-3,2	-52 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	3,6	16	18	300 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	1,9	8,2	10	158 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-330	-330	-300	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008 -2030 (Zinssatz 4%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	1,0
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	30
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-185

Quelle: Berechnungen des PIK

3.2.3 Zusatzmaßnahme 5: Zusätzliche Anreize für Landwirte

Die Landwirtschaft verursacht rund 11% der THG-Emissionen in Deutschland. Die größten Emissionsminderungen könnten durch ein Zurückfahren des Viehbestandes und die Umstellung von konventioneller auf ökologische Landwirtschaft getätigt werden.

Veränderungen in Viehbestand und Fruchtfolge werden nachfolgend ausgeblendet. Stattdessen stehen Möglichkeiten zur Emissionsreduktion, die sich durch die Umstellung auf ökologischen Landbau und den damit verbundenen geringeren Einsatz an Düngemitteln ergeben, im Vordergrund.

Annahmen

Die ökologische Landwirtschaft muss durch strengere Auflagen mit weniger Düngemitteln auskommen als die konventionelle. Der Einsatz mineralischer N-Dünger nimmt ab, so dass neben den Emissionen aus der Düngerherstellung auch N-Einträge und N₂O-Emissionen aus dem Boden eingespart werden können. Die Einträge im Boden waren im Jahre 2003 für 23,1 Mio. t CO_{2eq} und für 36% der bundesweiten Lachgas-Emissionen verantwortlich (BMELV 2005). Daher besteht durch die Umstellung auf ökologische Landwirtschaft Reduktionspotential. Im Jahre 2008 betrug der Anteil der ökologischen Landwirtschaft an der gesamten Landwirtschaft in Deutschland rund 5%. Wir gehen in unserer Berechnung davon aus, dass der Anteil bis zum Jahre 2030 auf 20% steigen kann.

Im Schnitt können 40% Düngemittel bei der Umstellung eines konventionellen Betriebes auf einen ökologischen Betrieb reduziert werden. (BÖLW 2008, LfL 2008) Die Erträge des ökologischen Landbaus sind um 20% geringer, was durch die höheren Kosten ökologischer Lebensmittel nur teilweise kompensiert werden kann. (BÖLW 2008) Der geringere Ertrag hebt sich durch die Einsparungen bei den Düngemitteln für die Bauern wieder auf (IÖL 2008). Wir gehen daher für konventionelle und ökologische Investoren von gleichem Gewinn aus, weshalb die Ergebnisse in der zusammenfassenden Tabelle nicht die Investorensicht sondern die volkswirtschaftliche Sicht darstellen. Für die Zeit von 2008 bis 2030 sind dies 35 Mio. t CO_{2eq}.

Im Jahre 2006 wurden 150 Mrd. € für Lebensmittel ausgegeben. Bioprodukte sind zurzeit durchschnittlich 30% teurer als die Produkte der konventionellen Landwirtschaft. Wir gehen davon aus, dass durch die Erhöhung des Anteils der ökologischen Landwirtschaft an der gesamten Landwirtschaft ökologische Produkte in den nächsten Jahren günstiger werden und sich langsam den Preisen von konventionell hergestellten Produkten anpassen (BÖLW 2008). Die zusätzlichen jährlichen Kosten für Privathaushalte belaufen sich im Jahr 2020 auf 4,8 Mrd. €, im Jahre 2030 auf 6,4 Mrd. €. Dies ent-

spricht Mehrkosten von 3% bzw. 4%. Die THG-Reduktionen im Jahr 2020 sind 1,8 Mio. t CO_{2eq}; im Jahr 2030 2,4 Mio. t CO_{2eq}.

Ergebnisse

In 2020 entstehen Vermeidungskosten von 10 €/t CO_{2eq}, ein recht moderater Wert, für etwa 1,8 Mio. t CO_{2eq}-Einsparungen. Wir unterstellen, dass keine zusätzlichen Investitionen notwendig werden, bzw. diese sich im Aggregat der unterschiedlichen landwirtschaftlichen Nutzungen ausgleichen. Zusätzliche jährliche Kosten entstehen durch einen höheren Aufwand für Beschäftigung und den Verzicht von intensivem Anbau, wobei wir davon ausgehen, dass die Kostendifferenzen zur konventionellen Landwirtschaft sinken werden. Der Zinssatz ist 8%.

Tabelle 3-14: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Zusätzliche Anreize für Landwirte

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0	0	0	0 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	0,02	0,01	0,02	0,4 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	0	0	0	0 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0,6	1,8	2,4	35 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	10	10	10	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008 -2030 (Zinssatz 8%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	0
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	-0,2
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	5

Quelle: Berechnungen des PIK

3.3 Maßnahmen im Verkehrsbereich

Der Verkehrssektor galt bis vor wenigen Jahren als politisch kaum antastbar für Maßnahmen zur CO₂-Reduktion. Das kontinuierliche Wachstum des Sektors Verkehr wurde in der Vergangenheit als Voraussetzung für wirtschaftliche Entwicklung und das Zusammenwachsen des europäischen Binnenmarktes gesehen und sollte nicht durch Regulierungen beeinflusst werden. Dies zeigt sich auch in der ursprünglichen Nichtberücksichtigung des Verkehrssektors im EU-Emissionshandel für Treibhausgase (EU-ETS). Da die verstärkte Verkehrsnachfrage, der Trend zu leistungstärkeren Fahrzeugen und das Wachstum des Flugverkehrs auch zu schnell zunehmenden Emissionen von Treibhausgasen führte, kommen zukünftige Maßnahmenpakete, welche die Kontrolle und Verringerung der Treibhausgase zum Ziel haben, nicht umhin, den Verkehrssektor mit einzubeziehen.

Erste Studien für einzelne Verkehrsträger (TNO 2006) oder verkehrsträgerübergreifende Maßnahmenpakete (Fraunhofer-ISI et al. 2008b) zeigen, dass im Verkehrssektor deutliche CO₂-Einsparungen erzielt werden können. Diese Maßnahmen könnten zu vertretbaren Kostenerhöhungen führen bzw. wären sogar aus Nutzer- bzw. Investorensicht ökonomisch positiv gestaltbar (McKinsey 2007, ISI, FZJ, ÖI, CEPE 2008).

Annahmen

Die Berechnungen der Energie- und CO₂-Einsparungen für die verkehrsbezogenen Maßnahmen aus dem Meseberger Klimaschutzprogramm verwenden als Grundlage die Daten des Projektes Politikszenerarien IV (Fraunhofer-ISI et al. 2008b). Dort wurden für den Verkehr zum Zeitpunkt 2006 folgende Energienachfrage (siehe Tabelle 3-15) bzw. CO₂-Emissionen ermittelt (siehe Tabelle 3-16). Die Abschätzung erfolgte zeitlich vor dem großen Ölpreisanstieg seit 2007 und unterstellt noch einen weiteren Trend hin zum Diesel. Angesichts der Angleichung der Dieselpreise an Benzin wird dieser Trend aus heutiger Sicht möglicherweise gebrochen. Bei den CO₂-Emissionen wurde berücksichtigt, dass für nicht-fossile Kraftstoffe und Strom die Emissionen in anderen Sektoren einbezogen sind, wie z.B. bei Strom im Umwandlungssektor. Daher sind die entsprechenden Zeilen für die Endenergieträger mit Nullangaben gefüllt. Allerdings werden in

den nachfolgenden ökologischen Bewertungen der Verkehrsmaßnahmen diese Emissionen in den Vorketten mitberücksichtigt.

Tabelle 3-15: Projektion des Energiebedarfs des Verkehrssektors in Deutschland, ohne Meseberg-Maßnahmen, 2000 bis 2030

[PJ]	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Benzin	1 237	1 008	694	562	506	457	417
Diesel	1 145	1 107	1 149	1 262	1 296	1 269	1 219
Kerosin	60	69	83	98	115	134	145
LPG	0	0	3	6	8	9	9
CNG	0	0	6	27	48	73	79
(Bio-) Ethanol	0	0	82	84	85	85	84
FAME	9	71	148	151	154	154	151
Pflanzenöl	0	0	8	8	9	9	9
Methanol	0	0	0	0	0	0	0
Wasserstoff	0	0	0	1	2	7	13
Andere	1	1	1	1	1	1	1
Strom	137	133	130	130	129	131	132
Summe	2 589	2 390	2 304	2 330	2 353	2 329	2 258

Quelle: Fraunhofer-ISI et al. (2008b) – ohne Kerosin des internationalen Luftverkehrs

Tabelle 3-16: Entwicklung der CO₂-Emissionen der Endenergieträger des Verkehrssektors in Deutschland, ohne Meseberg, 2000 bis 2030, Emissionen ohne Vorketten im Umwandlungssektor

[Mio. t CO ₂]	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Benzin	89	73	50	41	36	33	30
Diesel	85	82	85	93	96	94	90
Kerosin	4	5	6	7	8	10	11
LPG	0	0	0	0	1	1	1
CNG	0	0	0	2	3	4	4
(Bio-) Ethanol	0	0	0	0	0	0	0
FAME	0	0	0	0	0	0	0
Pflanzenöl	0	0	0	0	0	0	0
Methanol	0	0	0	0	0	0	0
Wasserstoff	0	0	0	0	0	0	0
Andere	0	0	0	0	0	0	0
Strom	0	0	0	0	0	0	0
Summe	178	160	142	143	144	141	136

Quelle: Fraunhofer-ISI et al. (2008b) – ohne CO₂-Emissionen des internationalen Luftverkehrs

Bei der Berechnung der folgenden Maßnahmen wurden die Maßnahmen 20 *verbesserte LKW-Maut*, 21 *Flugverkehr* und 22 *Schiffsverkehr* separat ohne Betrachtung von Interaktionen mit anderen Maßnahmen gerechnet, während für die Maßnahmen 16 bis 19 und 26 ihre Interaktionen berücksichtigt sind. Hier wurden zuerst die Penetrationsraten für Elektromobile (Stadtautos mit Batteriebetrieb und Plug-in-Hybride) ermittelt und dann von den gesamten PKW-Zulassungszahlen abgezogen, so dass sich die Berechnungen der Maßnahme 16 auf die gesamten Benzin- und Diesel-PKW und die dafür zur Verfügung stehenden technologischen Verbesserungen nach (TNO 2006) beziehen. Dies schließt auch die PKW-Hybride der ersten Generation ein, d.h. mit Verbrennungsmotor und Elektromotor, dessen Batterie aber nur durch den Verbrennungsmotor bzw. durch Bremsenergieerückgewinnung geladen wird.

Auf dieser Basis werden die Energie- und CO₂-Einsparungen der Maßnahme 16 *CO₂-Strategie-PKW* berechnet, d.h. im Wesentlichen die Setzung von CO₂-Emissionsobergrenzen für PKW-Neuwagen sowie die Berücksichtigung der technologischen Parameter und Kosten-Parameter zur Einhaltung dieser CO₂-Emissionsobergrenzen. Darauf aufbauend werden die erreichbaren Einsparungen der Maßnahme 18 *Umstellung der KFZ-Steuer auf CO₂-Basis* quantifiziert. Deren Potentiale werden bei der Umsetzung von Maßnahme 16 durch die stärkere Spreizung der spezifischen CO₂-Emissionen der angebotenen PKW und die detaillierter Betrachtung bei den vorliegenden Berechnungen etwas höher eingeschätzt als in Fraunhofer-ISI et al. 2008b. An diesem Ergebnis setzt die Berechnung für Maßnahme 19 *Verbrauchskennzeichnung für PKW* an, die aufbauend auf einer detaillierten Studie (E.V.A. et al. 1999) die erzielbaren Einsparungen für verschiedene PKW-Größenklassen bestimmt.

Zum Abschluss wird auf dem nun vorliegenden Mengengerüst die Wirkung der Maßnahme 17 *Ausbau von Biokraftstoffen* quantifiziert, so dass für den Bereich der PKW-bezogenen Maßnahmen Überlappungen und Doppelzählungen ausgeschlossen werden. Für den Schiffs- und Flugverkehr kann auch argumentiert werden, dass bis 2030 bei diesen Verkehrsträgern Biokraftstoffe allenfalls geringfügig zum Einsatz kommen, so dass Überschneidungen hier nicht ins Gewicht fallen.

Eine Zusammenfassung der CO₂-Einsparungen ergibt einen Gesamtrückgang für das Paket der Meseberg-Maßnahmen im Verkehrsbereich von knapp 33 Mio. t CO₂ bis

2020 und infolge des Kohorteneffektes bis 2030 knapp 35 Mio. t CO₂ (vgl. Tabelle 3-17).

Tabelle 3-17: Überblick Meseberg-Maßnahmen und zusätzlich anrechenbare Maßnahmen aus Fraunhofer- ISI et al. (2008b) im Verkehrssektor

[Mio. t CO ₂]	Nr.	2010	2015	2020	2025	2030
CO ₂ -Strategie PKW	M16	-7,1	-14,3	-17,2	-16,8	-15,8
Ausbau von Biokraftstoffen	M17	-0,3	-2,7	-5,0	-5,8	-6,6
Umstellung der KFZ-Steuer auf CO ₂ -Basis	M18	-1,7	-3,3	-3,1	-2,6	-2,2
Verbrauchskennzeichnung für PKW	M19	-1,3	-3,1	-3,5	-3,2	-2,8
Verbesserte Lenkung via LKW-Maut	M20	-0,2	-0,2	-0,3	-0,1	0,0
Flugverkehr (Single EU Sky, SESAR, EU-ETS)	M21	-0,1	-0,2	-0,4	-0,5	-0,6
Schiffsverkehr (EU-ETS, SkySail)	M22	0,0	-0,2	-0,5	-0,7	-1,0
Elektromobilität (Battery electric & plug in hybrid)	M26	0,0	-1,0	-3,0	-4,8	-5,6
Summe Klimainvest-2020 Meseberg		-10,7	-25,0	-32,9	-34,5	-34,7

Quelle: Berechnungen des ISI und BSR

3.3.1 Maßnahme 16: CO₂-Strategie PKW

Das Kernstück der CO₂-Strategie-PKW bildet die Setzung von CO₂-Emissionsstandards für Neuwagen in Deutschland in Anlehnung an den Vorschlag der EU-Kommission (KOM (2007)856). Diese setzt das Ziel bis 2012 durch Maßnahmen am Antriebsstrang den Emissionswert von 130 g CO₂/km als Durchschnittswert aller Neuzulassungen von PKW in Deutschland bzw. Europa zu erreichen. Durch nicht-motorische Maßnahmen soll der Zielwert von 120 g CO₂/km erreicht werden.

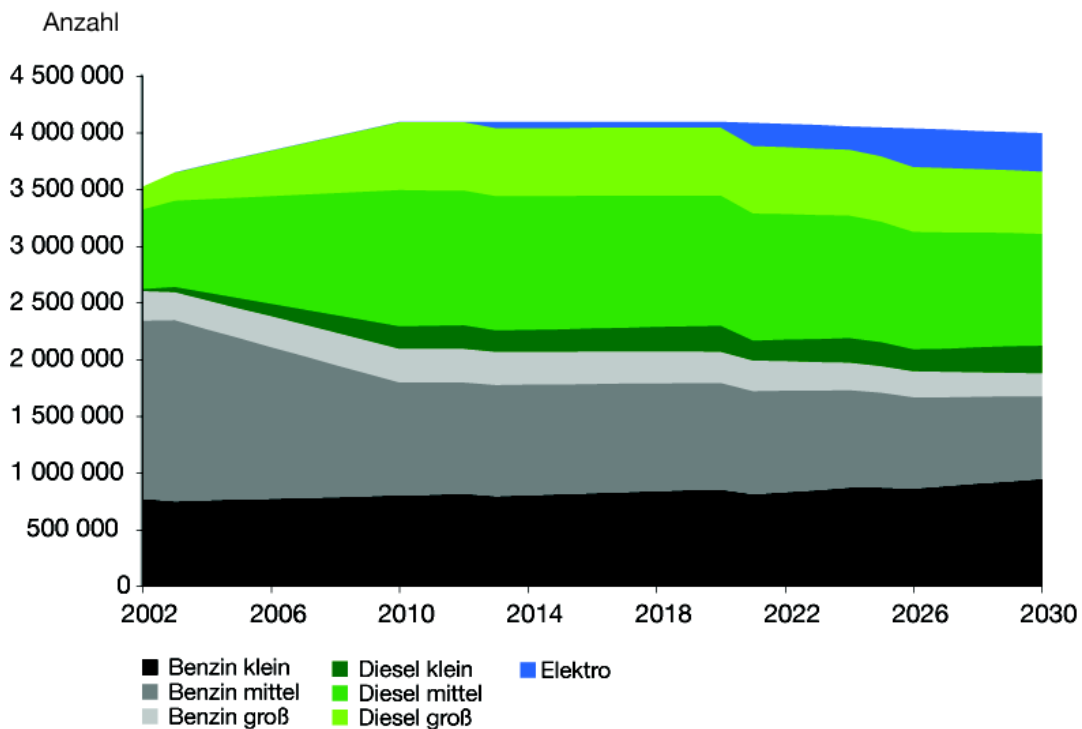
Annahmen

Die Analyse dieser Maßnahme setzt sich aus vier zentralen Annahmen zusammen:

- Entwicklung von energiesparenden Technologien im PKW-Antriebsstrang,
- Investitionen der Autoindustrie zur Technologieentwicklung und -produktion,
- zusätzlichen Investitionskosten der PKW-Nutzer (vgl. Tabelle 3-18),

- Kraftstoffeinsparungen der PKW-Nutzer, die durch den verstärkten Einsatz von Kraftstoff sparenden Technologien im Antriebsstrang über die Lebensdauer eines PKWs entstehen (bei gleichbleibender Zusammensetzung der Struktur der Neuwagenflotte).

Die Basisgrößen zur Abschätzung der Maßnahme 16 beinhalten die Entwicklung der PKW-Neuzulassungen bis 2030 (siehe Abbildung 3-3), die Entwicklung der Kosten- und Emissionsparameter von PKW (TNO 2006 mit eigenen Annahmen zu den Lernkurven nach 2012, siehe Tabelle 3-18 und Tabelle 3-19) und die Entwicklung der Kraftstoffpreise (nach Fraunhofer-ISI et al. 2008b bzw. EWI, Prognos 2006).



Quelle: ifeu (2005), Berechnungen des ISI

Abbildung 3-3: Entwicklung der Registrierung von neuen PKW in Deutschland, 2002 bis 2025

Die zusätzlichen Produktionskosten (vgl. Tabelle 3-18) und die erzielten Verbesserungen der CO₂-Emissionsfaktoren (vgl. Tabelle 3-19) wurden aus TNO (2006) abgeleitet, wo die entsprechenden Parameter in Zusammenarbeit mit der Autoindustrie abgeschätzt

wurden. Emissions- und Verbrauchsfaktoren in TNO (2006) stehen bis 2012 zur Verfügung und werden dann konstant gehalten, während die Zusatzkostenkurven in TNO (2006) ebenfalls bis 2012 bestimmt wurden und für den Zeitraum 2013 bis 2030 degressive Lerneffekte für die Kostenentwicklung angenommen wurden, die im Vergleich zu McKinsey (2007) eher konservativ angesetzt sind. Damit ergibt sich die höchste Kostensteigerung für das Jahr 2012.

Tabelle 3-18: Entwicklung der Produktions-Zusatzkosten für Neuwagen zur Erzielung der CO₂-Reduktion, geteilt nach drei Hubraumklassen, 2008 bis 2030

[€/PKW]	Hubraumklasse	2010	2015	2020	2025	2030
Benziner	klein	954	906	765	669	599
	mittel	1 072	1 096	944	835	756
	groß	1 409	1 561	1 375	1 228	1 119
Diesel	klein	425	493	388	326	283
	mittel	590	679	536	449	392
	groß	843	912	712	593	515

Quelle: TNO 2006, Berechnungen des ISI

Tabelle 3-19: Entwicklung der CO₂-Emissionsfaktoren für Neuwagen zur Erzielung der CO₂-Reduktion, 2008 bis 2030

[g/km]	Hubraumklasse	2010	2015	2020	2025	2030
Benziner	klein	120	116	112	112	112
	mittel	148	143	138	138	138
	groß	185	178	172	172	172
Diesel	klein	115	111	107	107	107
	mittel	141	136	131	131	131
	groß	178	172	165	165	165

Quelle: TNO 2006

Ergebnisse

Diese Maßnahme gehört zu den effektivsten Maßnahmen des Meseberg-Programms mit kumulierten Einsparungen von 300 Mio. t CO₂ von 2008 bis 2030 und einem spezifischen Gewinn (abdiskontiert) von rund 100 € pro eingesparter Tonne CO₂ über diesen

Zeitraum (vgl. Tabelle 3-20). Im Einzelnen kommen die Berechnungen zu folgenden Ergebnissen:

- Die zusätzlichen Investitionen wachsen von ca. 2 Mrd. € in den kommenden Jahren auf 6,6 Mrd. € in 2020, um dann auf knapp 4 Mrd. € abzuschmelzen.
- Die jährlichen Kraftstoffkosten nehmen für die PKW-Besitzer um gut 2 Mrd. € in 2010 bis auf fast 9 Mrd. € in 2030 ab. Hiermit lassen sich die Kapitalkosten mit Gewinn finanzieren.
- Die Kraftstoffeinsparungen erhöhen sich von 110 PJ in 2010 auf rund 270 PJ in 2020; insgesamt werden über die Periode 2008 bis 2030 mehr als 5 100 PJ fossile Kraftstoffe eingespart.
- Die erzielten CO₂-Emissionsminderungen erhöhen sich von 4 Mio. t CO₂ in 2010 auf fast 16 Mio. t in 2030 infolge der gesamten Erneuerung des PKW-Bestandes bis 2030.
- Die spezifischen Vermeidungskosten variieren über dem Zeitraum infolge der Dynamik der Neuzulassungen für fossil betriebene PKW, der Zusatzkosten und Kostendegressionen und der angenommenen Entwicklung der Kraftstoffpreise. In jedem Fall sind sie mit mindestens 130 € je vermiedene t CO₂ ökonomisch sehr attraktiv. Den PKW-Investoren muss also klar gemacht werden, dass sich die Mehrinvestitionen in die Fahrzeuge über den Lebenszyklus gut rentieren.
- Die Rentierlichkeit der Maßnahme ist an dem Barwert von 31 Mrd. € ablesbar.

Tabelle 3-20: Ergebnisse der Maßnahme: CO₂-Strategie PKW

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	2,3	6,6	3,9	110 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	-2,1	-8,7	-8,9	-160 Mrd. €
Energieeinsparungen	[PJ/a]	110	270	250	5 100 PJ
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	4,1	17	16	300 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-380	-130	-150	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 4%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	61
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	31
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-100

Quelle: Berechnungen des ISI

Als Ergänzung soll hier noch erwähnt werden, dass die Referenz-PKW in TNO (2006) sich auf 2002 beziehen. Durch Verzögerungen in der Umsetzung der Maßnahmen muss ggf. von leicht höheren Kosten bzw. einer leicht verzögerten Einführung von neuen Technologien ausgegangen werden. Allerdings befördern die aktuell und vermutlich auch permanent höheren Ölpreise eine schnelle Umsetzung, so dass ein realistischer Umsetzungszeitraum immer noch bei 2012 bis 2014 liegen dürfte.

Eine alternative Abschätzung in Fraunhofer-ISI et al. (2008b) basierend auf einer Referenz mit autonomem Effizienz-Fortschritt und Verschärfung der CO₂-Emissionsgrenzwerte nach 2012 kommt zu ähnlichen CO₂-Einsparungen. Für diese Abschätzung stehen aber keine Angaben zu den Zusatzkosten der PKW zur Verfügung, so dass in dieser Studie der TNO-Ansatz gewählt wurde, der sowohl CO₂-Einsparungen als auch Zusatzkosten quantifiziert.

3.3.2 Maßnahme 17: Ausbau von Biokraftstoffen

Neben einer Verringerung der Abhängigkeit von erdöl-basierten Kraftstoffen kann eine höhere Durchdringung des Kraftstoffmarkts mit Biokraftstoffen zur Verminderungen von Treibhausgasemissionen im Verkehrsbereich beitragen. Dies betrifft insbesondere:

- reines Biodiesel oder die Beimischung von Biodiesel in Diesel,
- reines Bioethanol oder die Beimischung von Bioethanol in Benzin,
- reine Biokraftstoffe oder die Beimischung von Biokraftstoffen der zweiten Generation in Benzin bzw. in Diesel.

Seitens der EU-Kommission wurde deshalb in einer Bio-Kraftstoffrichtlinie ein Zeitplan mit mehreren Stufen verabschiedet (ein biogener Kraftstoffanteil, bezogen auf den Energiegehalt, von 5,75% bis 2010 sowie ein Vorschlag von 10% Anteil bis 2020 (wobei dies in Reinform oder als Beimischung erreicht werden kann) (EC/2003/30 Art. 3; Europäische Kommission 2008 Art. 3). Auch im Integrierten Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung (Bundesregierung 2007) wurden für die Biokraftstoffbeimischung (im BiokraftstoffquotenGesetz) Quoten vorgegeben (umgerechnet auf den Energieinhalt):

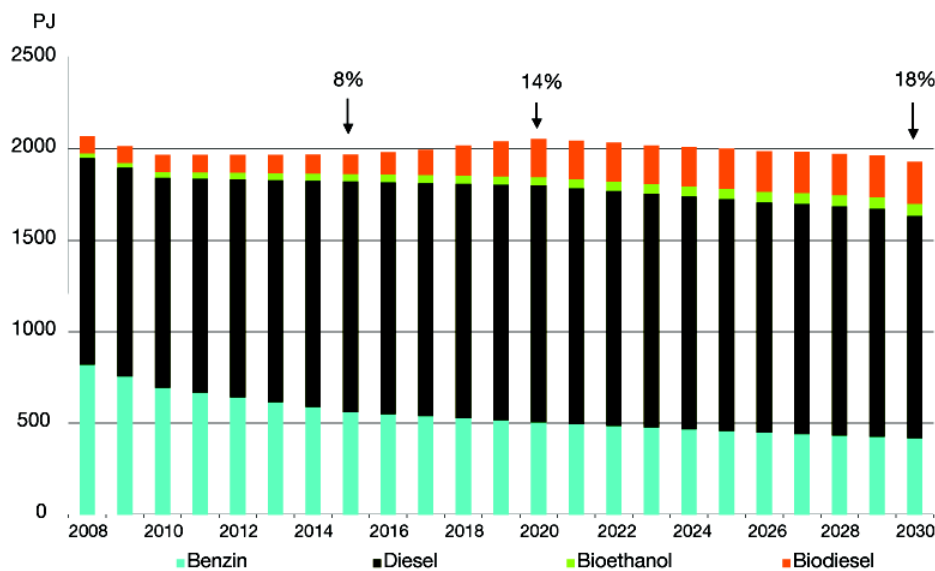
- für das Jahr 2008 eine Beimischungsquote von 6%,
- für das Jahr 2015 wurde die Beimischungsquote auf 8% gesetzt,
- für das Jahr 2020 wird derzeit eine Beimischungsquote von 14% angestrebt;
- für den Zeithorizont 2030 wird ein Biokraftstoffanteil von ca. 18% für möglich gehalten.

Annahmen

Die Biokraftstoffquoten wurden auf Basis der Kraftstoffnachfrage der Politikszenerarien IV, „Mit-Maßnahmen“-Szenario (Fraunhofer-ISI et al. 2008b) angewendet. Die Benzin- und Diesel-Bedarfsentwicklung bis 2030 enthält also die Effizienzsteigerung von Straßenfahrzeugen in einem erheblichen Umfang ähnlich den hier diskutierten Maßnahmen

des Meseberg-Programms. Demnach stagniert der Kraftstoffbedarf in Deutschland zwischen heute und 2020 auf dem heutigen Niveau von rund 2 000 PJ, bevor er sich dann in der folgenden Dekade auf 1 900 PJ zurückbildet. (vgl. Abbildung 3-4).

Der zentrale Ansatzpunkt zur Erreichung der genannten Quotenziele zur Biokraftstoffbeimischung, basiert auf einer Regierungsverordnung zum nachhaltigen Anbau und zur Nutzung von Biokraftstoffen (Nachhaltigkeitsverordnung). Die Erfüllung dieser Verordnung gilt als Voraussetzung für die Quotenanrechnung und die Steuerbegünstigung und wird hier als Annahme für die Berechnungen zugrunde gelegt.⁴



Quelle: Berechnungen des ISI, Fraunhofer-ISI et al. (2008b)

Abbildung 3-4: Entwicklung des Bedarfs von fossilen und regenerativen Kraftstoffen (PJ), 2008-2030

Für den Ausbau des Biokraftstoffeinsatzes gemäß den Quoten im Integrierten Klima- und Energieprogramm der Bundesregierung wurde eine Nettobetrachtung hinsichtlich der Treibhausgasminderung durch den Biokraftstoffeinsatz durchgeführt, d.h. die Treibhausgas-Emissionen bei der Erzeugung und Verarbeitung wurde berücksichtigt. In den

⁴ Für das Jahr 2010 beträgt der Benzingesamtverbrauch ca. 694 PJ, während der Dieserverbrauch 1 149 PJ beträgt. Für das Jahr 2015 wurde ein Verbrauch von 562 PJ für Benzin und 1 269 PJ ermittelt. Für das Jahr 2020 beträgt der Gesamtverbrauch 496 PJ für Benzin und 1 296 PJ für Diesel. Für den Zeithorizont 2030 sinken der Benzinverbrauch auf 417 PJ, der Dieserverbrauch auf 1 219 PJ.

Eckpunkten für das Integrierte Energie- und Klimaschutzprogramm (Bundesregierung 2007) geht man davon aus, dass etwa die Hälfte der vermiedenen Emissionen im Fahrzeugeinsatz durch die Vorketten wieder ausgewogen wird, d.h. die Nettoeffekte lediglich 50% betragen. Bei der Analyse der Treibhausgasminderung durch den Ausbau von Biokraftstoffen zeigen neuere Analysen, dass sich insbesondere durch den Einbezug der Effekte direkter Landnutzungsänderungen deutlich geringere Nettoeffekte oder sogar Nettomehremissionen ergeben können. In dieser Studie wird ein Nettoemissionsminderungseffekt von durchschnittlich 50% (bezogen auf den Emissionsfaktor der fossilen Kraftstoffe ohne Vorkettenbetrachtung) unterstellt⁵, was dazu führt dass die vorliegende Berechnung eher optimistisch ist. Diese Annahme wurde aus der Studie „Wirtschaftliche Bewertung des Integrierten Energie- und Klimaprogramms“ übernommen (IEKP 2008).

Diese Angaben beziehen sich auf Biokraftstoffe der ersten Generation (Biodiesel und Bioethanol). Für Biokraftstoffe der zweiten Generation, in der die gesamte erzeugte Biomasse in Biokraftstoff umgewandelt wird, werden deutlich positivere Nettovermeidungseffekte angenommen (IEKP 2008). Die künftige Marktdurchdringung mit Biokraftstoffen der zweiten Generation (z.B. BTL aus Restholz und Stroh) ist aus heutiger Sicht noch schwer einzuschätzen.

Die Investitionen für den Ausbau von Biokraftstoffen zwischen 2008 und 2030 wurden durch technische Daten von Großanlagen für Biodiesel und Bioethanol, zusammen mit Annahmen zur jährlichen Biokraftstoffnachfrage (im BiokraftstoffQuotenGesetz) hochgerechnet. Die Investitionen und technischen Daten der Großanlagen wurden von Anlagenbauern und dem Biokraftstoffverband in Deutschland bestätigt. Die Kapazitäten für Großanlagen schwanken zwischen 200 000 t/a für Bioethanolanlagen und 250 000 t/a für Biodieselanlagen. Diese Anlagen kommen zukünftig sehr wahrscheinlich auf dem Markt. Die Investitionen liegen zwischen 80 und 110 Mio. € für Großanlagen (Toro et al. 2006, persönliche Mitteilungen Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie, Mai

⁵ Im vom Bundeskabinett beschlossenen Entwurf zur Biomassenachhaltigkeitsverordnung wird ein Treibhausgasverminderungspotenzial von mindestens 30% sowie von mindestens 40% ab Anfang 2011 vorgegeben (BMU 2007). Dabei werden die Treibhausgasemissionen mit Vorkettenemissionen als Vergleichswerte für die fossilen Kraftstoffe herangezogen. Zu beachten ist, dass sich durch die Berücksichtigung der Vorkettenemissionen die Verminderungsquote (s.o.) auf 35 bzw. 47% reduziert.

2008 (Baumann, Volkernrodt)). Allerdings hängen diese Investitionen wesentlich von den technischen Anforderungen sowie von der notwendigen zusätzlichen Transportinfrastruktur ab. In den Berechnungen wurden Kostendegressionen über die Lebensdauer berücksichtigt, die durch Technologieverbesserungen und Skaleneffekte erfüllt werden. Dennoch ist die zukünftige Entwicklung von Rohstoffpreisen (z.B. Rapssaat, Weizen, Holzchips, usw.) schwer absehbar und enthält erhebliche Unsicherheiten. Die Preisannahmen basieren auf Toro et al. (2006).

Ergebnisse

Die Unsicherheiten beziehen sich nicht nur auf technische Optionen und ihre jeweilige wirtschaftliche Bewertung, sondern auch auf die Zusammenhänge von Nahrungsmittel- und Energiepflanzenproduktion sowohl im Inland als auch im Ausland und wie hierzu die öffentliche Meinung sich entwickelt.

Mit diesem Vorbehalt und den oben geschilderten Annahmen kommen die Berechnungen zu folgenden Ergebnissen (vgl. Tabelle 3-21):

- Die Differenzinvestitionen für die Erzeugungsanlagen von Biodiesel und Bioethanol belaufen sich für die gesamte Periode 2008 – 2030 auf rund 2 Mrd. €. Nicht mit berücksichtigt sind eventuelle zusätzliche Investitionen bei der Kraftstoffverteilung und dem Tankstellenbereich.
- Die jährlichen Kosten sind hier die Differenz aus dem Wert der substituierten Benzin- und Dieselmotorkraftstoffmengen einerseits und den Rohstoffkosten der Biomasse und den Betriebs- und Wartungskosten der Biokraftstoff-Erzeugung andererseits. Diese Nettokosten steigen entsprechend der zunehmenden Mengen von 70 Mio. € in 2010 auf rund 1 Mrd. € in 2030

Tabelle 3-21: Ergebnisse der Maßnahme: Ausbau von Biokraftstoffen

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0,10	0,15	0,13	2,0 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	0,1	0,7	1,0	12 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	2,0	37,5	50	600 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0,3	4,6	6,6	80 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	290	170	170	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 6%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	0,8
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	-5,6
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	70

Quelle: Berechnungen des ISI

- Die zusätzlich zu den heutigen 6% Biokraftstoffanteilen erreichten Substitutionsmengen der fossilen Kraftstoffe betragen 2 TWh (knapp 7,2 PJ) in 2010 und 50 TWh (180 PJ) in 2030. In der genannten Periode werden 600 TWh fossile Kraftstoffe substituiert.
- Die Vermeidung der Treibhausgasemissionen berücksichtigt alle vorgelagerten Emissionen zur Erzeugung der Biomasse und der Umwandlung in Bio-Kraftstoffe. Hierbei wurden die vermiedenen CO₂-Emissionen im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffen halbiert.
- Die spezifischen Vermeidungskosten sinken von einem relativ hohen Niveau von 290 €/t CO₂ auf 170 €/t CO₂ in 2020. Vermutlich dürften sie weiter sinken, wenn die Biokraftstoffe der 2. Generation nach 2020 in höherem Umfang zur Anwendung kommen.
- Insofern dürften die errechneten Kostenwerte für den Gesamtzeitraum von 2008 bis 2030 am oberen Ende liegen, und zwar mit einem negativen Barwert von knapp 6 Mrd. € und den abdiskontierten spezifischen Vermeidungskosten von 70 €/t CO₂.

3.3.3 Maßnahme 18: Umstellung der KFZ-Steuer auf CO₂-Basis

Die Wirkung einer Umstellung der KFZ-Steuer auf CO₂-Emissionen als Bemessungsbasis wurde für die Europäische Kommission durch COWI (2002) abgeschätzt. Bei effektiver Gestaltung der Maßnahme lässt sich in Deutschland nach COWI (2002) eine Verbrauchsminderung von 5,5% für Benzinern und 3,4% für Diesel-PKW erzielen. Diese Einsparung wird ohne Downsizing erzielt, d.h. durch verändertes Kaufverhalten in derselben Fahrzeugklasse. Die Einsparpotenziale dürften größer sein, wenn auch auf der Angebotsseite eine stärkere Differenzierung vorliegt, wie sie z.B. durch die CO₂-Strategie (Meseberg-Maßnahme 16) angestrebt wird (vgl. Kapitel 3.3.1).

Annahmen

Für die Berechnung der Einsparungen wurde die Einführung der Maßnahme in 2008 und ein Abklingen des Einspar-Effektes über die Zeit angenommen, so dass 2015 die Einsparung um 1% geringer ausfällt und 2025 um 1,5%. Wie in COWI (2002) wurde unterstellt, dass die Maßnahme kostenneutral gestaltet wird und keine Änderung der Steuererhebung notwendig wird. Somit entstehen keine Zusatzkosten und damit führt auch diese Maßnahme zu Einsparungen aus Nutzersicht, die in Tabelle 3-22 dargestellt sind.

Ergebnisse

Kurz zusammengefasst ergibt sich folgendes Bild (vgl. Tabelle 3-22):

- Knapp 60 Mio. t CO₂ und rund 470 PJ können bis 2030 durch die Umstellung der KFZ-Steuer auf CO₂-Basis eingespart werden.
- Die Kraftstoffeinsparungen sind mit knapp 30 Mrd. € für den Zeitraum erheblich und führen zu spezifischen Vermeidungserlösen zwischen 470 und gut 500 €/t CO₂.
- Der Barwert der Maßnahme für die gesamte Periode liegt bei 18 Mrd. € und die abdiskontierten spezifischen CO₂-Emissionsminderungserlöse bei 300 € je vermiedene t CO₂.

Tabelle 3-22: Ergebnisse der Maßnahme: Umstellung der KFZ-Steuer auf CO₂-Basis

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0	0	0	0 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	-0,8	-1,4	-1,2	-29 Mrd. €
Energieeinsparungen	[PJ/a]	24	43	31	470 PJ
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	1,7	3,1	2,2	60 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-480	-470	-530	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 4%)		
Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	0
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	18
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-300

Quelle: Berechnungen des ISI

3.3.4 Maßnahme 19: Verbrauchskennzeichnung für PKW

Die Wirkung der Einführung einer Verbrauchskennzeichnung für PKW wurde nach E.V.A. et al. (1999) abgeschätzt.

Annahmen

Auch hier kann - wie für Maßnahme 18 - davon ausgegangen werden, dass ihre Umsetzung die Wirkung der Maßnahme durch die Spreizung der CO₂-Emissionsfaktoren auf der PKW-Angebotsseite unterstützt. Allerdings muss die Definition des Labels so gestaltet sein, dass die dargestellten Emissionsfaktoren nicht der besten Effizienzklasse (also A) entsprechen, sondern allenfalls einer mittleren Klasse (z.B. C), da sich die in der Tabelle angegebenen Emissionsfaktoren jeweils auf den Durchschnitt der Klasse beziehen. Die Wirkung der Maßnahme beruht auf einem veränderten Kaufverhalten der PKW-Nutzer. Die Verhaltensänderungen können nach E.V.A. et al. (1999) in drei Klassen eingeteilt werden:

- Wechsel des Herstellers bei gleich bleibender PKW-Klasse,
- Verringerung der Motorisierung bei gleich bleibendem PKW-Modell,
- Wechsel der PKW-Klasse hin zu einer kleineren Klasse.

Jeweils rund 30% der PKW-Käufer fallen in die ersten beiden Kategorien, während rund 10% zur dritten Kategorie gehören und ungefähr ein Viertel der Käufer ihr Kaufverhalten nicht durch eine Verbrauchskennzeichnung beeinflussen lassen. Unter Berücksichtigung des technischen Potentials dieser drei Verhaltensreaktionen ergibt sich ein Einsparpotenzial für CO₂-Emissionen durch eine effektive Verbrauchskennzeichnung, wie in Tabelle 3-23 dargestellt.

Tabelle 3-23: Einspar-Potenzial an Kraftstoff und CO₂ durch eine PKW-Verbrauchskennzeichnung

[% Einsparung]	Hubraumklasse	2008	2010	2015	2020	2025	2030
Benziner	klein	3,8	5,1	5,1	4,6	4,1	3,9
	mittel	3,5	4,7	4,7	4,2	3,7	3,5
	groß	3,5	4,6	4,6	4,1	3,6	3,4
Diesel	klein	3,4	4,5	4,5	4,3	4,0	3,9
	mittel	3,4	4,5	4,5	4,3	4,0	3,9
	groß	3,8	5,1	5,1	4,9	4,6	4,5

Quelle: E.V.A. et al. (1999), Berechnungen des ISI. Ausgangswerte der Emissionsfaktoren nach TNO (2006) siehe Tabelle 3-19.

Für die Umsetzung der Maßnahme 19 wird von keinen zusätzlichen Kosten ausgegangen, da:

- die Hersteller auch heute schon die spezifischen Verbrauchs- und CO₂-Emissionsfaktoren ermitteln müssen und einem entsprechenden Monitoring unterliegen, also die entsprechenden Angaben zur Erstellung der Kennzeichnung parat haben. Allenfalls könnte eine Kontrolle der korrekten Anwendung und Anbringung des Labels zusätzliche Kosten verursachen. Hier wird aber von einer zuverlässigen Einhaltung bezüglich der Verbrauchskennzeichnung seitens des Handels ausgegangen.

- Der Wechsel zu geringerer Motorisierung und in eine kleinere Fahrzeugklasse dürfte im allgemeinen zu einer Einsparung bei den Investitionen aus Nutzersicht führen, während der Wechsel innerhalb der Klasse zu einem anderen Hersteller als indifferent einzuschätzen ist, d.h. sowohl zu Einsparungen als auch zu Mehrkosten führen kann. Hier wird angenommen, dass mögliche Mehrkosten dieses Wechsels durch Einsparungen bei den anderen beiden Wechselvorgängen kompensiert werden.

Ergebnisse

Damit ergeben sich auch für diese Maßnahme erhebliche Vorteile (vgl. Tabelle 3-24):

- Neben den CO₂-Einsparungen von insgesamt 64 Mio. t in der Zeit bis 2030 sind Kraftstoffeinsparungen von 30 Mrd. € oder fast 450 PJ möglich.
- Pro eingesparter Tonne CO₂ kann durch die Verbrauchskennzeichnung ein abdiskontierter spezifischer Erlös von 280 € je t CO₂ für den Nutzer erzielt werden.

Tabelle 3-24: Ergebnisse der Maßnahme: Verbrauchskennzeichnung für PKW

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0	0	0	0 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	-0,6	-1,6	-1,4	-30 Mrd. €
Energieeinsparungen	[PJ/a]	19	48	39	445 PJ
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	1,4	3,5	2,8	64 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-440	-450	-500	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 4%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	0
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	18
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-280

Quelle: Berechnungen des ISI

3.3.5 Maßnahme 26: Elektromobilität

Der Einsatz von Fahrzeugen mit Hybrid (HEV), Plug-in-Hybrid (PHEV) und reinen Elektroantrieben (EV) kann die Umweltbilanz des Verkehrs unter gewissen Annahmen verbessern. Gleichzeitig kann durch die Integration dieser Fahrzeuge in moderne Stromnetze ein weiterer Beitrag zur Verbesserung des Netzmanagements erzielt werden (Vehicle to Grid (V2G) Dienstleistungen). Im Integrierten Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung (Bundesregierung 2007) fehlten bisher quantitative Zielvorgaben für die Elektromobilität, auch ist die Höhe von Fördermitteln nicht bekannt. Weiterhin wird aus der Maßnahmenplanung deutlich, dass nicht die Markteinführung und Marktdurchdringung das primäre Ziel sind, sondern dass es um Erkenntnisse zur Machbarkeit und Gewinnung erster Erfahrungen geht. Um trotzdem erste Aussagen zu den ökonomischen und ökologischen Konsequenzen treffen zu können, wird deshalb eine mögliche realitätsnahe Marktdurchdringung unterstellt und diese wirtschaftlich und klimapolitisch bewertet. Somit wird unterstellt, dass die im Meseberg-Programm aufgeführten Maßnahmen eine solche Marktdurchdringung anstoßen, die gegebenenfalls notwendige weitere Förderung und Regulierung ist noch offen und wird Gegenstand weiterer Überlegungen in den kommenden Jahren sein.

Annahmen

Eine wesentliche Unsicherheit bei der Elektromobilität ist, dass noch relevante technologische Durchbrüche bei den Batterietechnologien für PHEV- und EV-Fahrzeuge erzielt werden müssen. Weiterhin ist unklar, wie sich die Batteriekosten entwickeln. Die Kundenakzeptanz, also die Zahlungsbereitschaft für Elektromobilität, sowie die Reaktion auf V2G-Dienstleistungen sind ebenso weitgehend unbekannt. Die Wirtschaftlichkeit der Elektromobilität wird im Wesentlichen durch folgende Parameter determiniert, wobei in Klammern die wesentlichen Berechnungsannahmen stehen:

- Batteriepreisentwicklung (optimistische Kostendegression über die Zeit von 1000 auf 200 €/kWh für die Batteriekapazität)⁶,
- Berücksichtigung von Steuern (Neutralität bei den Steueraufkommen, d.h. gleich wie konventionelle Fahrzeuge bei Berücksichtigung der Effizienzunterschiede),
- Benzin- und Dieselpreisentwicklung (nach Hochpreisvarianten von EWI, Prognos (2006)),
- Kostendegression für Antriebsstrang (optimistische Kostendegression über die Zeit von 3 000 auf 1 000 €/kWh für PHEV)⁷,
- Kosten auf Netzebene (moderate Anschlusskosten),
- Erlöse durch V2G-Dienstleistungen, einschließlich Arbitragegeschäften (je nach V2G-Dienstleistung, im Durchschnitt für PHEV rund 200 €/a und BEV 300 €/a, was die Batterieabnutzung und Anschlusskosten bereits monetär einschließt)⁸.

Die vorangestellten Annahmen spiegeln i.d.R. eine eher optimistische Sichtweise wieder. Allerdings ist zu beachten, dass die unterstellten Erdölpreisannahmen aus EWI, Prognos (2006) aus heutiger Sicht eher als sehr konservativ einzuschätzen sind und dass sich bei einer deutlichen Erdölpreissteigerung die Elektromobilität wirtschaftlich bedeutend günstiger darstellen lässt. Die Wirtschaftlichkeit ist auch sehr spezifisch für jedes Fahrzeugkonzept der Elektromobilität und den spezifischen Nutzungseigenschaften wie z. B. Jahresfahrleistung. Die berücksichtigten Elektrofahrzeuge sind zwar verschiedener Art, aber im Wesentlichen handelt es sich um Hybrid-Fahrzeuge (vgl. Tabelle 3-25).

⁶ Zu möglichen Szenarien für Batteriepreisentwicklung: Kalhammer et al. (2007) und Tatsumi (2006).

⁷ Der Startwert wird aus CONCAWE et al. (2007) übernommen; die Kostendegression wird über einen Lernkurvenansatz selber berechnet.

⁸ Siehe zu einer möglichen Bewertung von V2G-Dienstleistungen Kempton, Tomic (2005), Kempton, Tomic (2007) und Wietschel (2008); hier werden eigene Berechnungen angeführt, die in der Größenordnung von den anderen angegebenen Studien liegen.

Tabelle 3-25: Analyisierte Elektrofahrzeuge mit Kenngrößen

Fahrzeugtyp		Markt- eintritt ab	Batterie- kapazität	Verbrauch	Anteil elektr. Fahrten (Netz- strom)
Hybrid PKW	PKW HEV	2008	2 kWh	0,16 kWh/km	0 ²⁾
Plug-in Hybrid PKW	PKW PHEV	2010	14 kWh	0,16 kWh/km	60%
PKW Batteriefahrzeuge	PKW BEV	2020	40 kWh	0,16 kWh/km	100%
Hybrid LDV ¹⁾	LDV ¹⁾ HEV	2008	14 kWh	0,23 kWh/km	37%
Plug-in Hybrid LDV	LDV PHEV	2010	14 kWh	0,23 kWh/km	0 ²⁾
LDV Batteriefahrzeuge	LDV BEV	2020	40 kWh	0,23 kWh/km	100%
Kleine Batteriefahrzeuge als Zweitwägen in Städten	Stadt-PKW BEV	2010	2 kWh	0,10 kWh/km	100%
Elektroroller und Elektro- fahrräder		2008	1 kWh	0,025 kWh/km	100%

¹⁾ LDV: Light Duty Vehicles (Transporter)

²⁾ Verbrauchsminderung gegenüber konventionellen Verbrennungsmotoren: 16% am Anfang, später dann über 20%

Die unterstellte Marktpenetration wird durch den Bestand an HEV dominiert. Dieser steigt kontinuierlich auf etwas mehr als 9 Mio. Fahrzeuge in 2030 an. Alle anderen Typen zusammen kommen bis 2030 auf mehr als 4 Mio. Einheiten⁹. Für die Fahrleistungen der einzelnen Fahrzeugtypen werden heutige Werte unterstellt. Ein möglicherweise sich änderndes Mobilitätsverhalten wird nicht berücksichtigt.

In der politischen Diskussion steht die Forderung, dass der Strom für Elektromobilität ausschließlich aus neuen erneuerbaren Anlagen kommen sollte. Dies wird hier nicht berücksichtigt, sondern der sich aus dem künftigen Kraftwerksmix ergebende Strom wird zugrunde gelegt, wobei die CO₂-Emissionen über die Zeit sinken, u.a. wegen höheren erneuerbaren Anteilen und Effizienzsteigerungen bei fossilen Kraftwerken.

⁹ Das unterstellte Marktpenetrationsszenario entspricht im Wesentlichen dem sogenannten Pluralismus-Szenario aus Wietschel (2008). Eine optimistischere Marktpenetration ließe sich aus METI (2006) ableiten.

Ergebnisse

Die Ergebnisse umfassen alle in Tabelle 3-25 aufgeführten Fahrzeuge mit ihrem jeweils unterstellten Marktdurchdringungsgrad und seien hier kurz zusammenfassend erläutert (vgl. Tabelle 3-26):

- Die zusätzlichen Investitionen nehmen von knapp 1 Mrd. € in 2010 auf 3 Mrd. € in 2030 zu. Kumuliert über den Zeitraum werden knapp 60 Mrd. € zusätzlich von den Fahrzeughaltern investiert.
- Kumuliert bis 2030 werden durch die elektrobetriebenen Fahrzeuge ca. 190 TWh (680 PJ) fossile Kraft- und Brennstoffe eingespart und 100 Mio. t CO₂ vermieden. Der Beitrag zur Einsparung fossiler Energien ist im Jahre 2020 knapp 12 TWh (oder 43 PJ) und die jährliche CO₂-Einsparung knapp 5 Mio. t; sie erreicht in 2030 fast 9 Mio. t.
- Wertmäßig betragen die Energieeinsparungen 12 Mrd. € in 2020 und 28 Mrd. € in 2030.
- Die spezifischen Vermeidungskosten halbieren sich zwischen 2010 und 2020, sind aber mit 210 € je t CO₂ immer noch erheblich, auch wenn durch Kostendegression die Kosten der Förderung für diesen Technologiebereich sinken könnten.
- Der Barwert der CO₂-Einsparungen für die gesamte Periode 2008-2030 erreicht somit einen relativ hohen negativen Wert von 18 Mrd. €, und die abdiskontierten spezifischen Vermeidungskosten von gut 180 €/t CO₂ sind erheblich.

Tabelle 3-26: Ergebnisse der Maßnahme: Ausbau der Elektromobilität

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0,9	2,2	3	58 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	-0,03	-0,8	-2,3	-20 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	0,2	12	28	190 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0,2	4,9	8,8	99 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	430	410	220	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 4%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	28
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	-18
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	182

Quelle: Berechnungen des ISI

Differenziert man nach den unterschiedlichen Fahrzeugtypen, so liegen die Vermeidungskosten nach einer Phase der Kostendegression für kleine Batteriefahrzeuge (BEV) wegen der niedrigen Kosten des Antriebstranges niedriger, ebenso für alle Typen der Transporter (LDVs) wegen der hohen Fahrleistung; damit schneiden diese Fahrzeugtypen kostenseitig positiver gegenüber anderen elektromobilen Fahrzeugtypen ab. Für die Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PEHV) spricht möglicherweise die höhere Kundenakzeptanz, weil kaum Nutzungseinschränkungen bei der individuellen Mobilität hingenommen werden müssen; dies könnte sich auch in einer entsprechenden Zahlungsbereitschaft der Käufer äußern.

Die Hybridfahrzeuge sind von der unterstellten Marktpenetration der wichtigste Fahrzeugtyp; sie alleine tragen zu CO₂-Minderung in 2020 rund 3,6 Mio. t und in 2030 etwa 6,3 Mio. t. bei. Allerdings sind sie auch bezogen auf die Vermeidungskosten die teuerste Maßnahme.

Wie oben bei den Annahmen verdeutlicht wurde, ist die Unsicherheit über die wirtschaftliche Entwicklung und damit auch der Marktpenetration und CO₂-Einsparungen noch sehr hoch.

3.3.6 Zusatzmaßnahme 9: Änderung der Besteuerung für Dienstwagen

Ziel dieser Maßnahme ist es, steuerliche Anreize dafür zu setzen, dass Inhaber von Dienstwagen zukünftig Modelle mit geringeren CO₂-Emissionen wählen.

Annahmen

In Großbritannien wurde eine steuerliche Neuregelung für Dienstwagen getroffen, die den zu versteuernden Anteil des Wertes von Dienstwagen von dessen CO₂-Emissionen abhängig macht. 1999 wurde die Regelung angekündigt. Laut einer Studie hat diese Regelung dazu geführt, dass in 2004 die Dienstwagen 15 g CO₂/km weniger ausstießen, als es ohne diese Regelung der Fall gewesen wäre (HMRC 2006). Hier wird angenommen, dass für Deutschland ebenfalls eine Besteuerung von Dienstwagen nach CO₂-Ausstoß eingeführt wird, die ähnliche Auswirkungen hat wie in Großbritannien. Die Regelung soll steueraufkommensneutral gestaltet werden. Die Festlegung der genauen Steuersätze und Emissionsgrenzen erfordert weitere Untersuchungen. Es gibt heute etwa 46,5 Mio. PKWs in Deutschland; davon sind etwa 41,5 Mio. Privat-PKWs (KBA 2008b).

Die Auswirkungen der Maßnahme werden wie folgt berechnet: Jeder nach der neuen Regelung gekaufte Dienstwagen stößt im Durchschnitt 15 g CO₂/km weniger aus, als es ohne Regelung der Fall gewesen wäre. Der Dienstwagenbestand wird über eine Dauer von 4 Jahren komplett ausgetauscht, nach vier Jahren ist also der Dienstwagenbestand komplett durch neuere, verbrauchsärmere PKW ersetzt worden. Zusätzlich gehen die Dienstwagen anschließend in den Privatmarkt über, so dass auch dort ein Anteil verbrauchsärmerer PKW entsteht. Private PKWs werden im Durchschnitt nach 12 Jahren ausgetauscht (KBA 2008a).

Zusätzlicher Effekt der Regelung ist, dass einige ehemalige Dienstwagenbesitzer auf einen Privatwagen umsteigen. Die Anzahl der Dienstwagen sinkt nach der Neuregelung um 5% jährlich bis auf 75% der ursprünglichen Zahl. Die Gesamtanzahl an PKWs bleibt konstant. Privatwagen, die wegen der Neuregelung Dienstwagen ersetzen, stoßen 5 g CO₂/km mehr aus, als die Dienstwagen ohne Neuregelung verursacht hätten. Diese Annahmen wurden in Analogie zu den Erfahrungen in Großbritannien getroffen. Die

durchschnittliche Fahrleistung eines Firmen-PKW's war 2002 etwa 21 400 km/a, was mit der Fahrleistung von Privat-PKW's von 12 400 km/a zu vergleichen ist (DIW 2005:47). Es wird angenommen, dass ein ehemaliger Dienstwagenbesitzer im Durchschnitt 16 900 km/a fährt.

Ergebnisse

Die THG-Einsparungen in 2020 sind 2,6 Mio. t; über die gesamte Zeitperiode addieren sich die Emissionseinsparungen auf 45 Mio. t. In 2020 führt die Maßnahme zu Kosteneinsparungen in Höhe von 1,4 Mrd. €, so dass die spezifischen Vermeidungskosten in 2020 etwa -560 €/t CO₂ betragen. Die abdiskontierten Vermeidungskosten für die gesamte Periode sind -200 €/t CO₂. Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 3-27: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Änderung der Besteuerung für Dienstwagen

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0	0	0	0 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	-0,4	-1,4	-1,4	-25 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	2,5	9,5	9,5	165 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0,7	2,6	2,6	45 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-560	-560	-560	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 8%)		
Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	0
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	9
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-200

Quelle: Berechnungen des PIK

3.3.7 Zusatzmaßnahme 3: Leichtlauföle verpflichtend ab 2009 für PKW

Leichtlauföle sind Öle, die eine niedrige Viskosität haben. Dadurch entstehen signifikant geringere Verluste durch Reibung im Motor. Nach Aussagen der Deutschen Energie-Agentur haben Leichtlauföle folgende Vorteile (dena 2008):

- besseres Fließverhalten bei niedrigen Temperaturen, dadurch geringere Reibung im Motor beim Kaltstart,
- weniger Verschleiß durch schnellere Durchölung des Motors,
- kein Abreißen des wichtigen Schmierfilms - auch bei hoher Belastung und hohen Temperaturen,
- Senkung des Ölverbrauchs durch höheren Verdampfungspunkt sowie
- Vermeidung von Ablagerungen durch bessere Schmutzaufnahmefähigkeit.

Etwa seit dem Jahr 2000 befürworten Hersteller den Einsatz von Leichtlauf-Ölen für moderne Autos. Diese Öle können an normalen Tankstellen und in Autowerkstätten erworben werden. Bei der Einführung von Leichtlaufölen spielt vorwiegend die Einstellung der Konsumenten zu diesem Produkt eine Rolle sowie die Altersstruktur der Autoflotte und eine mögliche Regulierung, welche die Nutzung von Leichtlaufölen vorschreiben würde.

Annahmen

Hier wird von einer Regulierung ausgegangen, um die Unsicherheit einer langsamen Marktdurchdringung zu eliminieren. Da ein Auto im Durchschnitt gut elf Jahre gefahren wird, ist der Anteil der Autos, die Leichtlauföl noch nicht verwenden können, gering. TNO (2006) berichtet, dass ein Ölwechsel mit Leichtlauföl zusätzlich 15 bis 25 € kostet und dass die PKW dabei 2,5 % des Kraftstoffverbrauchs sparen. Für die Berechnungen wird angenommen, dass nach dem Jahr 2008 durch die Regulierung sämtliche Autos mit Leichtlauföl fahren werden. Weiterhin wird angenommen, dass Automobile durchschnittlich 12 500 km im Jahr fahren und dass das Öl einmal im Jahr gewechselt wird.

Da zukünftig Automobile im Verbrauch effizienter werden (analog zu den Emissionsfaktoren in Tabelle 3-19), werden sich auch die Kraftstoff-Ersparnisse über die Zeit verringern. Dies wurde mitberücksichtigt (siehe auch Fraunhofer-ISI et al. 2008b).

Ergebnisse

Mit den oben beschriebenen Annahmen für den PKW-Bereich ergeben sich die in Tabelle 3-28 dargestellten Effekte.

Tabelle 3-28: Ergebnisse der Maßnahme: Vorschrift für Leichtlauföle für PKW

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0,83	0,88	0,87	19 Mrd. €
Jährliche Kosten ^{*)}	[Mrd. €/a]	-1,4	-1,2	-1,1	-29 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	12	10	8	240 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	2,9	2,5	1,9	58 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-440	-190	-130	

^{*)} eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 4%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	9,0
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	10
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-180

Quelle: Berechnungen des ISI

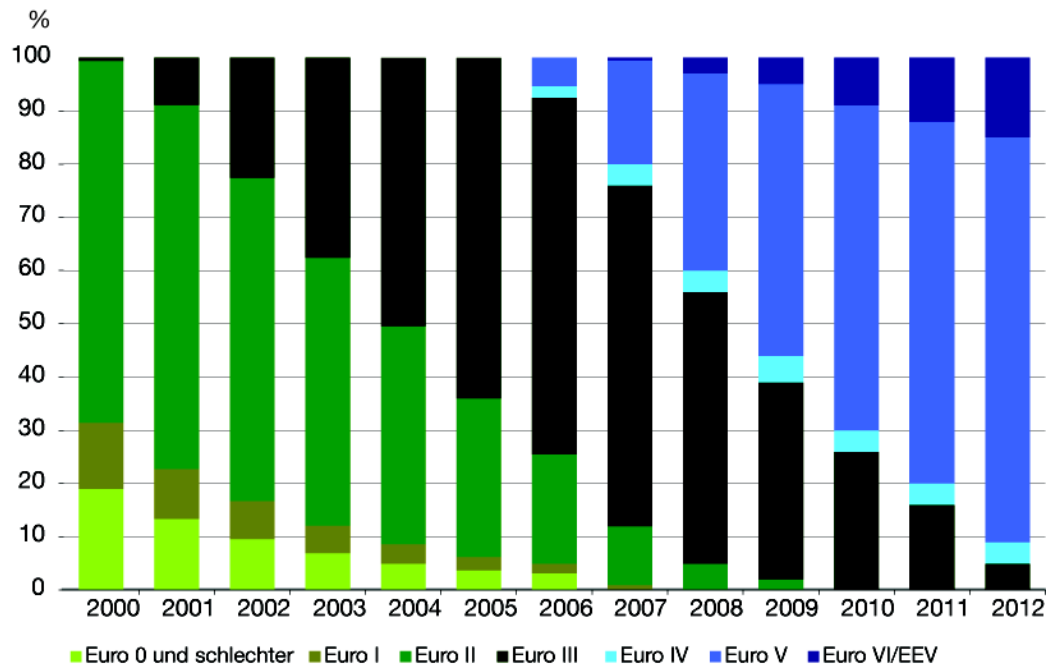
- Die insgesamt über den Zeitraum investierten Leichtlaufölmengen kosten etwa 19 Mrd. €; die jährlich vermiedenen Kraftstoffkosten nehmen von 1,4 Mrd. € in 2010 auf 1,1 Mrd. € in 2030 ab, weil die Fahrzeuge zunehmend effizienter werden.
- Dementsprechend sind auch die eingesparten Kraftstoffmengen von knapp 12 TWh (43 PJ) in 2010 auf 8 TWh (29 PJ) in 2030 rückläufig und damit auch die spezifischen Vermeidungserlöse von 440 €/t CO₂ in 2020 auf 130 €/t CO₂ in 2030.

- Der Barwert der Maßnahme liegt für den gesamten Zeitraum bei 10 Mrd. €, so dass die abdiskontierten spezifischen Vermeidungskosten mit ihrem negativen Wert von 180 €/t CO₂ immer noch einen erheblichen Vorteil für die PKW-Fahrer und die Volkswirtschaft darstellen.

3.3.8 Maßnahme 20: Verbesserte Lenkungswirkung der LKW-Maut

Die Maßnahme unterstellt eine Anpassung der existierenden LKW-Maut, so dass eine stärkere Spreizung der Gebühren nach Euro-Emissionsklassen erreicht wird. Während bisher auf Grundlage der Richtlinie 1999/62/EG die Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Mautsatz auf Grund von Umweltstandards auf 50% bezogen auf den niedrigsten Mautsatz beschränkt ist, lässt die aktuell geltende Fassung der EU-Wegekostenrichtlinie 2006 eine Spreizung von 100% zu. Laut Beschluss der Bundesregierung vom 18.6.2008 soll diese erweiterte Gestaltungsoption ab dem 1.1.2009 ausgeschöpft werden.

Ferner ist vorgesehen die durchschnittlichen Mauttarife an die aktuelle Kostenentwicklung anzupassen und die bislang gewährte Kompensation dem Straßenverkehr zuzurechnender Anteile der Mineralölsteuer in Höhe von 2,6 €/km zurückzunehmen. Die durchschnittlichen Mauttarife über alle Emissionsklassen steigen damit von 12,4 €/km auf 15,6 €/km. Grundlage der Tarifiermittlung ist der aktuelle Wegekostenbericht des BMVBS (ProgTrans/IWW 2007). Abbildung 3-5 stellt die bisherige und für die kommenden Jahre prognostizierte Entwicklung der Fahrleistungsstruktur nach Emissionsklassen, und damit die Entwicklung des Modernitätsgrades der Flotte dar.



Quelle: ProgTrans/IWW (2007)

Abbildung 3-5: Fahrleistungsanteile LKW >12t auf BAB nach Euro-Emissionsklassen 2000 bis 2012

Durch die fortlaufende Modernisierung der LKW-Flotte gehen die durchschnittlichen Mautsätze bei einer starren Tarifstruktur mit der Zeit zurück. Das Autobahnmautgesetz (ABMG 2002) hält jedoch die Möglichkeit der Anpassung der Mauttarife an Veränderungen in der Flottenstruktur vor. Damit soll gewährleistet werden, dass die Gesamthöhe der Gebühreneinnahmen den gesamten Wegekosten der LKW >12t zGG im Sinne der Richtlinie 2006/38/EG entspricht.

Entgegen den erweiterten Möglichkeiten der Richtlinie 2006/38/EG bleibt der gegenwärtige Geltungsbereich der LKW-Maut erhalten. Gebühren werden weiterhin nur für schwere Nutzfahrzeuge ab 12t zGG auf Bundesautobahnen erhoben. Eine Mautspreizung nach Tageszeiten oder die Internalisierung externer Kosten wird nicht angenommen.

Die wesentlichen Wirkungen der erweiterten Definition der LKW-Maut auf Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen sind einerseits die Verminderung und Verlagerung der Verkehrsnachfrage auf Grund der höheren Gebührensätze und zum anderen die frühzeitigere Beschaffung moderner Fahrzeuge auf Grund der Tarifiedifferenzierung. Bei letztere-

rem Effekt wird unterstellt, dass modernere Fahrzeuge grundsätzlich kraftstoffeffizienter sind als vergleichbare ältere Fahrzeuge.

Aus staatlicher Sicht stehen erhöhten Mauteinnahmen keine wesentlichen Kostenblöcke außer der Kompensation des Fuhrgewerbes durch Investitionsbeihilfen und Steuernachlässen gegenüber. Aus unternehmerischer Sicht sind erhöhte Mautzahlungen und erhöhte Neubeschaffungskosten einerseits, und verminderter Kraftstoffverbrauch, Übernahme der Mehrkosten durch die Kunden und ggf. staatliche Kompensationsleistungen andererseits zu berücksichtigen. Durch die periodische Anpassung der Tarifstruktur wirken sich jedoch die vorgezogenen Neubeschaffungen über den gesamten LKW-Park nicht gebührensenkend aus. Die Bilanz der Maßnahme für die Unternehmen wird demnach vollständig von der Höhe der staatlichen Kompensationszahlungen bestimmt.

Annahmen

Neubeschaffungskosten für LKW mit aktuellem Emissionsstandard werden auf der Grundlage von Marktbeobachtungen mit 150 000 € über den gesamten Zeitraum 2008 bis 2030 angesetzt. Hierbei wird angenommen, dass sich Lernkurveneffekte bei der Produktion schadstoffarmer Antriebe und kontinuierlich steigende Anforderungen durch die Weiterentwicklung der Euro-Emissionsstandards ausgleichen. Insgesamt ergeben sich jährliche Mehrkosten durch die geänderten Tarifstrukturen in Höhe von 29,5 Mio. € 2009 und 39,4 Mio. € 2030.

Auf der Grundlage von DG-TREN (2006) wird angenommen, dass der Kraftstoffverbrauch von Neuwagen jährlich um 0,27 l/100km sinkt. Mit einer Mautspreizung von 50% (100%) wird ein Anstieg der Kraftstoffeffizienz auf 3,7 (4,3) l/100 km unterstellt. Die Kraftstoffpreise werden mit 1,44 €/l 2008 und 1,78 €/l 2030 angesetzt (Fraunhofer-ISI 2008b).

Es wird angenommen, dass Verkehrsverlagerungen von der Straße auf die Bahn und weniger auf das Binnenschiff erfolgen. Nach Schreyer et al. (2007) und Maibach et al. (2008) beträgt der spezifische CO₂-Ausstoß im Güterverkehr der Bahn lediglich 6% im Vergleich zum LKW. Für den Güterfernverkehr auf Bundesautobahnen muss von einer geringeren Differenz ausgegangen werden, die zusätzlichen CO₂-Emissionen des Schienenverkehrs werden mit 20% der LKW-Emissionen für das Jahr 2005 veranschlagt.

Die direkten Preiselastizitäten wurden mit -0,3 und die Kreuzpreiselastizität der Schienentransportmenge wurde mit 0,05 entsprechend Fraunhofer-ISI et al. (2008c) veranschlagt.

Ausgegangen wurde von einem durchschnittlichen Mautsatz von 15,6 €/km über alle Gewichts- und Emissionsklassen. Durch kontinuierliche Anpassung der Mauttabellen wird angenommen, dass dieses Niveau bis 2030 gehalten wird. Mit einer Mautspreizung von 100% und durchschnittlichen Betriebskosten von 1,20 €/km verkürzt sich die Nutzungsdauer gegenüber der bisherigen Mautgestaltung um etwa drei Monate. Hieraus leiten sich zusätzliche Investitionskosten von 30 (2008) bis 39 (2030) Mio. € ab. Diese sind durch das Fuhrgewerbe zu tragen, eine Erneuerung des Innovationsprogramms zur Beschaffung schadstoffarmer LKW wird nicht angenommen.

Die Marktbeobachtungen der Bundesanstalt für Güterverkehr (BAG 2006) ermitteln, dass die Transporteure etwa 80% der erhöhten Mautkosten an die verladende Wirtschaft weiter geben können. Weiter wird unterstellt, dass die Bundesregierung dem Transportgewerbe durch die Senkung der KFZ-Steuer Kompensationen in Höhe der verbleibenden 158 (2008) bis 237 (2030) Mio. € gewährt.

Ergebnisse

Durch die Erweiterung der LKW-Maut nach dem Beschluss der Bundesregierung vom 23.6.08 lassen sich im Zeitraum 2008 bis 2030 gegenüber einer Fortführung der bisherigen Ausgestaltung 11,5 Mio. t CO₂ einsparen. Für das Fuhrgewerbe bedeutet dies eingesparte Kraftstoffkosten in Höhe von 3 Mio. € bezogen auf 2008. Demgegenüber stehen Mehrausgaben für Schadstoffarme Fahrzeuge von 746 Mio. € und nicht an die verladende Wirtschaft weiterreichbare Mautmehrkosten von 2,8 Mrd. €. Letztere Position wird voraussichtlich durch Kompensationsleistungen der Bundesregierung in Form reduzierter KFZ-Steuer an das Gewerbe zurückgegeben. Insgesamt ergeben sich, bezogen auf 2008, abdiskontierte Vermeidungskosten von 45 €/t CO₂.

Die Ergebniswerte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass die Höhe der angenommenen Kompensationsleistungen der Bundesregierung das Ergebnis der Vermeidungskosten aus Sicht des Transportgewerbes entscheidend beeinflusst. Bereits moderate Änderungen können die spezifischen Vermei-

dungskosten deutlich erhöhen oder gar negativ werden lassen. Während sich bei der Kompensation aller durch die Maßnahme entstehenden Mehrkosten ein leichter Nutzen der Vermeidung in Höhe von 0,3 €/t CO₂ ergibt, betragen die auf 2008 bezogenen Vermeidungskosten ohne jegliche Kompensation 292 €/t CO₂.

Tabelle 3-29: Ergebnisse der Maßnahme: Verbesserte Lenkungswirkung der LKW-Maut

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0,03	0,04	0,05	0,85 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	0,00	0,00	0,00	-0,01 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	0,99	1,9	3,3	44 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0,26	0,50	0,53	12 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	140	78	52	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 4%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	0,52
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	-0,52
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	45

Aus Sicht des Fuhrgewerbes erscheint die Maßnahme leicht positiv, da u.a. Ausgaben für Neufahrzeuge steuerlich über mehrere Jahre abschreibungsfähig sind. Alternative Annahmen zu deren steuerlicher Behandlung können auch die einzelwirtschaftlichen Ergebnisse drehen.

3.3.9 Maßnahme 21: Flugverkehr

Die Maßnahme 21 des Meseberg-Programms setzt sich aus zwei Komponenten zusammen:

1. der Entwicklung des SESAR EU-Flugverkehrsmanagementsystems zur Optimierung von Flugrouten und
2. der Einbeziehung des Flugverkehrs in das EU-Emissionshandelssystem für Treibhausgase (EU-ETS).

Annahmen

SESAR soll dazu führen, bis 2020 rund 3% Kraftstoff im Flugverkehrssektor gegenüber dem Verbrauch im Jahr 2007 einzusparen. Das Programm hat nach einer Projektdefinitionsphase gerade begonnen, so dass die Investitionen zwischen 2008 und 2020 getätigt werden. Es wird angenommen, dass Deutschland 20% der Gesamtinvestitionen übernehmen wird und dass 80% der CO₂-Einsparung auf den internationalen Verkehr und 20% auf den Inlandsverkehr entfallen werden (Nach der UNFCCC-Konvention beträgt der national anrechenbare Anteil des gesamten von einem Land ausgehenden Luftverkehrs 20%). Die Verringerung des Kraftstoffverbrauchs ist Ergebnis einer besseren Routenplanung und verbesserter Start-Steuerung für Flugzeuge (CEC 2007, SESAR 2007).

Der gesamte an- und abfliegende Flugverkehr in der EU wird ab 2012 in den EU-ETS einbezogen (European Parliament 2008). Dies führt bei den unterstellten Zertifikatepreisen in diesem Projekt (aus Fraunhofer-ISI et al. 2008b) zu einem leichten Anstieg der Kosten des Flugverkehrs und einer leichten Verringerung der Nachfrage, vor allem im touristisch motivierten Billigflugsegment. Das Einsparen von Kraftstoffen hängt darüber hinaus von dem vorgezogenen Ersatz älterer durch modernere Flugzeuge und der Entwicklung effizienterer Flugzeuge ab. Hierfür wurden zusätzliche Investitionskosten von rund 100 Mio. € pro Jahr ab 2012 unterstellt. Die CO₂-Einsparungen wurden aus dem Endbericht PSz-IV (Fraunhofer-ISI et al. 2008b) übernommen. In 2020 beträgt der CO₂-Emissions-Zertifikate Preis 23 €/t CO₂. Die Gesamtnachfrage sinkt dadurch um 2,3% im Vergleich mit dem Referenzfall. Die zusätzlichen Investitionen entfallen zu

rund 60% auf die Anschaffung effizienterer Flugzeuge. Die Einsparungen beziehen sich auf alle Flüge.

Ergebnisse

Es ergeben sich für diese Maßnahmen die in Tabelle 3-30 dargestellten Effekte.

- Die insgesamt über den Zeitraum induzierten Investitionen für die Implementierung von SESAR und effizientere Flugzeuge belaufen sich auf gut 3,7 Mrd. €. Diese Kosten können durch die eingesparten Kerosinkosten mehr als gedeckt werden.
- Die Vermeidungskosten sind daher Erlöse in der Höhe von 100 €/t CO₂ mit steigender Tendenz infolge der steigenden Kerosinpreise in der Periode 2020 bis 2030, der besseren Ausnutzung von SESAR und der verstärkten Anpassung der Flotten.

Tabelle 3-30: Ergebnisse der Maßnahme: Flugverkehr

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0,18	0,23	0,09	3,7 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	0	-0,3	-0,6	-6,5 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	0	2,9	4,7	52 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0	1,9	3,2	39 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	k.A.	-95	-124	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008 -2030 (Zinssatz 4%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	0,9
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	1,9
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-50

Quelle: Berechnungen des ISI

- Die eingesparten Treibstoffmengen belaufen sich auf gut 50 TWh (180 PJ) für die gesamte Periode, davon werden Einsparungen von 20% (36 PJ) im Inland unterstellt.
- Der Barwert der Maßnahme liegt für den gesamten Zeitraum bei 1,9 Mrd. €, so dass die abdiskontierten spezifischen Vermeidungskosten mit ihrem negativen Wert von gut 50 € immer noch einen Erlös unter dem Strich darstellen.

3.3.10 Maßnahme 22: Schiffsverkehr

Die betrachteten Maßnahmen für den Schiffsverkehr beinhalten – analog zum Flugverkehr zwei Elemente:

1. Die Einführung von SkySail für neue Fracht-Schiffe in Deutschland und
2. Der Einbezug der Schifffahrt in ein internationales THG-Emissionshandelsschema.

Für die Einbeziehung der Schifffahrt in den Emissionshandel liegt noch kein konkreter Rahmen vor, so dass diese in den folgenden Abschätzungen nur als Treiber zur Einführung von SkySails interpretiert wurde, aber nicht mit einem eigenen Investitions- und Einsparbeitrag. Außerdem werden Einsparungen bei der Schifffahrt nach den heutigen Konventionen nicht auf die deutschen CO₂-Reduktionen angerechnet. Daher wurden diese Einsparungen in den Rechnungen zur Zielerreichung für 2020 nicht mit berücksichtigt.

Annahmen

Ein SkySail ist ein neuartiges Segel, das wie ein Drachen aufgebaut ist und bei geeigneten Winden geeignet ist, einen Teil der Vortriebskraft eines Schiffes auf den Ozeanen zu übernehmen. Hiermit sind erste Prototyp-Frachtschiffe ausgerüstet (TreeHugger 2008). In Probefahrten konnten Verringerungen des Kraftstoffverbrauches um bis zu 20 bis 30% erzielt werden (WINNTECC 2008). Das signifikante Einsparpotential bei modera-

ten Kosten legt nahe, zukünftig eine hohe Durchdringung der deutschen Frachtschiffe anzunehmen. Für die Berechnungen wurde daher unterstellt, dass ab 2013 alle neuen Frachtschiffe mit einem SkySail ausgestattet werden. Die tatsächliche Einsparung hängt davon ab, welche Route befahren wird und welche Windrichtungen vorliegen. Es wurde angenommen, dass die Einsparung fast die Hälfte vom theoretischen Maximum (das 50% beträgt) sei, d.h. sich auf gut 20% Kraftstoffeinsparungen belaufen. Im Durchschnitt werden 24 Schiffe durchschnittlicher Größe pro Jahr ausgeliefert. Diese Zahl wurde als konstant angenommen. Die Investition beträgt rund 2 Mio. € pro Schiff.

Ergebnisse

Für diese beiden Maßnahmen ergeben sich die Einsparungen und Veränderungen nach Tabelle 3-31.

- Die insgesamt über den Zeitraum induzierten Investitionen für die Segelausstattung der Schiffe belaufen sich auf knapp 1 Mrd. €; deren Kosten die eingesparten Schiffsdieselskosten mehr als kompensieren.
- Die Vermeidungskosten sind daher Erlöse in der Höhe von 390 €/t CO₂ mit gleich bleibender Tendenz.
- Die in der gesamten Periode eingesparten Kraftstoffmengen belaufen sich auf rund 40 TWh (144 PJ), die allerdings praktisch alle im Ausland auf den Weltmeeren realisiert werden.
- Der Barwert der Maßnahme liegt für den gesamten Zeitraum bei 2 Mrd. €, so dass die abdiskontierten spezifischen Vermeidungskosten mit ihrem negativen Wert von rund 200 € recht attraktiv sind.

Tabelle 3-31: Ergebnisse der Maßnahme: Schiffsverkehr (Wirkungen nur im Ausland)

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0	0,05	0,05	0,9 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	0	-0,2	-0,5	-4,8Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	0	0,7	4,2	40 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0	0,46	1,0	10 Mio. t CO _{2eq} (im Ausland)
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	0	-390	-390	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008 -2030 (Zinssatz 4%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	0,5
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	2,0
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	-200

Quelle: Berechnungen des ISI

Diese Maßnahme ist zwar von relativ geringer klimapolitischer Bedeutung (1 Mio. t CO₂-Minderungen in 2030), aber sie macht deutlich, dass auch im internationalen Raum des Schiffsverkehrs Maßnahmen ergriffen werden müssen und dass diese rentabel sein können.

3.4 Maßnahmen Industrie

3.4.1 Maßnahme 23: Fluorierte Treibhausgase

In dieser Maßnahme werden die Einsparmöglichkeiten von fluorierten Treibhausgasen untersucht. Aufgrund des hohen Treibhauspotenzials (GWP) dieser Gase müssen alternative Stoffe und Techniken verwendet und gefördert werden, um die Emissionen zu reduzieren. Die fluorierten Gase umfassen halogenisierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) und Schwefelhexafluorid (SF₆).

HFKW-Emissionen entstehen durch den Gebrauch von Kühl- und Klimaanlage, bei der Herstellung von Schäumen, sie sind in Feuerlöschmitteln vorhanden und sind Teil

von Aerosolen und medizinischen Dosiersprays. FKW-Emissionen entstehen zum größten Teil in der Aluminiumverhüttung durch Aluminiumelektrolyse sowie bei der Produktion von Halbleitern. SF₆-Gase werden als Schutzgase in Magnesium-Gießereien und in elektrischen Betriebsmitteln verwendet, bei der Befüllung von Reifen und als Dämmstoff bei Schallschutzfenstern.

Der größte Teil der fluorierten Treibhausgase entsteht durch HFKW-Emissionen, die zwei Drittel der Gesamtemissionen verursachen. Die Hauptemittenten in dieser Gruppe sind Kühl- und Klimaanlage, die mit HFKW befüllt sind. Dies betrifft vor allem Anlagen in der Industrie und dem Gewerbe (Supermarktkühlung) aber auch im hohen Maße Autoklimaanlagen. Die Emissionen aus diesen Quellen liegen 2008 bei ca. 9,5 Mio. t CO_{2eq}. Nach dem „Ohne-Maßnahmen-Szenario“ der Politiksszenarien IV (Fraunhofer-ISI 2008b:235ff) würden diese Emissionen im Jahr 2020 bei fast 12 Mio. t CO_{2eq} liegen. Bei der Schaumherstellung (zweitgrößter HFKW-Emittent) gäbe es ebenfalls einen Anstieg von ca. 2,5 Mio. t CO_{2eq} in 2008 auf ca. 4,5 Mio. t CO_{2eq}.

Bei den SF₆-Emittenten sind es vor allem Schallschutzfenster und elektrische Anlagen, die zusammen über 55% der Emissionen in dieser Stoffgruppe verursachen. Allein die Emissionen aus der Befüllung von Schallschutzfenstern machen in 2008 ca. 2,4 Mio. t CO_{2eq} aus, die sich ohne Maßnahmen auf 4,7 Mio. t CO_{2eq} in 2020 erhöhen würden. Die Gesamtemission für alle SF₆-Emissionsbereiche liegt in 2008 bei ca. 6,6 Mio. t CO_{2eq} und würde sich bis zum Jahr 2020 nach dem „Ohne-Maßnahmen-Szenario“ auf 10,5 Mio. t CO_{2eq} erhöhen.

Den kleinsten Anteil an den Gesamtemissionen der fluorierten Treibhausgase stellen die Fluorkohlenwasserstoffe. Nach dem „Ohne-Maßnahmen-Szenario“ aus Fraunhofer-ISI (2008b:235ff) würde es hier eine Emissionssteigerung von ca. 1,3 Mio. t CO_{2eq} in 2008 auf 2,8 Mio. t CO_{2eq} im Jahr 2020 geben.

Annahmen

Eine Quantifizierung notwendiger Investitionen ist schwierig, da selbst in den Branchenverbänden noch in Unternehmen Angaben hierzu vorhanden sind. Zur Begrenzung des Anstiegs der Emissionen werden von uns Investitionen von ca. 12,3 Mrd. € bis 2020 unterstellt. Dies erfolgt durch eine konservative Projektion der vorhandenen Investiti-

onsdaten des K hlmittelbereichs. Einsparungen von Energie werden von uns vernachlässigt, da sie im Verhältnis zum hohen GWP der HFKW kaum emissionsmindernde Wirkung zeigen. Für die Berechnungen wurde ein Zinssatz von 8% verwendet.

Ergebnisse

Nach dem „Ohne-Maßnahmen-Szenario“ der Politikszenerien IV steigen die Emissionen aller fluorierten Gase in Deutschland von aktuell ca. 15 Mio. t CO_{2eq} auf 33,8 Mio. t CO_{2eq} im Jahr 2020 an. Mit dem bereits angelegten Mit-Maßnahmen-Szenario können diese Emissionen auf 16,3 Mio. t CO_{2eq} im Jahr 2020 reduziert werden (Fraunhofer-ISI 2008b). Wir unterstellen somit einen Anstieg der Emissionen von 1,3 Mio. t CO_{2eq} bis 2020 (siehe Tabelle 3-32).

In unten aufgeführter Tabelle werden von uns die gesamten Einsparungen an CO_{2eq} aufgeführt. Wir weisen darauf hin, dass diese Einsparungen allein als Differenz zum Ohne-Maßnahmen-Szenario der Politikszenerien IV zu verstehen sind. Um die für jeden Emissionssektor speziell notwendigen Investitionen genau zu beziffern, müssen weitere Analysen in den emissionsverursachenden Bereichen folgen.

Tabelle 3-32: Ergebnisse der Maßnahme: Fluorierte Treibhausgase

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. �/a]	0,7	1,7	1	22 Mrd. �
Jährliche Kosten*	[Mrd. �/a]	0	0	0	0 Mrd. �
Energieeinsparungen	[TWh/a]	0	0	0	0 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	12	18	20	305 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[�/t CO _{2eq}]	120	120	150	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008 -2030 (Zinssatz 8%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. �]	6
Barwert der Maßnahme	[Mrd. �]	-6
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[�/t CO _{2eq}]	100

Quelle: Berechnungen des PIK

3.4.2 Zusatzmaßnahme 1: Nicht fluoridierte Nicht-CO₂-Treibhausgase

Diese Treibhausgasemissionen mit derzeit knapp 117 Mio. CO_{2eq} umfassen folgende Bereiche, die in den vorangegangenen Abschnitten noch nicht behandelt wurden: die Methan- und N₂O-Emissionen aus Verbrennungsprozessen (ca. 8 Mio. t CO_{2eq}), flüchtige Methan-Emissionen aus dem Energiesektor (Bergbau, Ölförderung und Erdgas mit 0,75 Mio. t CO_{2eq}), prozessbedingte CO₂-Emissionen aus verschiedenen Prozessen der Grundstoffindustrien mit 78 Mio. t CO₂, Methan- und N₂O-Emissionen aus Industrieprozessen, Produktverwendung und der Abfallwirtschaft mit derzeit rund 30 Mio. t CO_{2eq}. Noch eingeschlossen sind hier die fluoridierten Treibhausgase, die speziell im vorangegangenen Kapitel 3.4.1 behandelt sind.

Die Maßnahmen zur Verminderung dieser sehr vielfältigen Emissionen sind sehr zahlreich und häufig prozess- oder produktspezifisch. Es hätte die für diese Analysen zur Verfügung stehende Zeit bei weitem überschritten, um eigene Recherchen auf diesen Gebieten bzgl. der Potentiale der Emissionsminderungen und der entsprechenden Kosten durchzuführen. Deshalb werden im Folgenden aus Gründen der Vollständigkeit lediglich diejenigen Ergebnisse wiedergegeben, die in den Politik-Szenarien IV erzielt wurden (Fraunhofer-ISI et al. 2008b:216ff).

Annahmen

Die Annahmen zur Verminderung der Methan- und N₂O-Emissionen aus den verschiedenen Prozessen und der prozessbedingten CO₂-Emissionen nehmen Bezug auf die Ergebnisse des „Mit-Maßnahmen-“ und des „Mit-weiteren-Maßnahmen“-Szenarios der Politik-Szenarien IV (Fraunhofer-ISI et al. 2008b:216-241, 319-330). Folgende wesentliche Annahmen seien erwähnt:

- Die Methan-Emissionen aus dem Kohle-Bergbau, der Ölförderung und der Erdgasverteilung werden durch verbesserte Nutzung im Kohle- und Ölbereich und durch kleinere technische Maßnahmen bei der Erdgasverteilung – gegenüber dem Trend (z.B. verminderte Kohleförderung) weiter reduziert.
- Die prozessbedingten CO₂-Emissionen können kaum abnehmen, da sie im wesentlichen von den produzierten Mengen von Zement, Kalkstein, Glas,

Roheisen und Stahl sowie Primäraluminium abhängen. Hier sind nur in geringem Umfang durch veränderten Klinkereinsatz, Recycling-Glas oder Elektrostahleinsatz sowie verminderter Elektrodenabbrand weitere Emissionsminderungen möglich. Eine weitere Möglichkeit, die in der Analyse nicht untersucht wurde, ist die Substitution durch andere Werkstoffe mit geringerem Energieeinsatz und durch Natur-Werkstoffe wie z.B. Holz oder Natursteine (vgl. Kapitel 4.2).

- Bei den Methan- und N₂O-Emissionen aus Produktionsprozessen werden die Minderungsmöglichkeiten (vielleicht mit Ausnahme der Salpetersäure-Herstellung) als gering eingeschätzt, da diese Prozesse in den vergangenen 15 Jahren bereits extrem optimiert und die Emissionen gegenüber 1990 um fast 40% reduziert wurde,
- Ähnlich ist die Erfolgsgeschichte bei den Methan- und N₂O-Emissionen in der Abfallwirtschaft, wo die Emissionen seit 1990 um zwei Drittel vermindert wurden und kaum noch weitere Minderungsmöglichkeiten bestehen.

Ergebnisse

Fasst man die Treibhausgas-Emissionen, die in den beiden Szenarien für die Szenarien „Mit-Maßnahmen-“ und „Mit-weiteren-Maßnahmen“ der Politik-Szenarien IV (Fraunhofer-ISI et al. 2008b:216-241, 319-330) gesehen werden, erhält man für 2020 einen Wert von 8,5 Mio. t CO_{2eq} und für 2030 rund 9 Mio. t CO_{2eq}. Die Ergebnisse werden nicht in einer Tabelle dargestellt, da nur die möglichen Emissionsreduktionen, aber nicht die Investitionen oder Vermeidungskosten, ermittelt werden konnten.

Diese Verminderungen ließen sich mit rentablen Potentialen weiter erhöhen, wenn man nicht in die Prozesse selbst eingreifen würde, sondern die Nachfrage nach den betroffenen Grundstoffen durch verbesserte Materialeffizienz und Materialsubstitution zu Werkstoffen mit geringeren spezifischen Treibhausgas-Emissionen vermindern würde (vgl. auch Enquete-Kommission 2002). Hier liegt noch ein großes Treibhausgas-Senkungspotential, das bei intensiver Ausschöpfung bis zu 0,5% des Primärenergiebedarfs pro Jahr und entsprechend etwa die gleiche Prozentzahl für die Verminderung der

Treibhausgasemissionen in Höhe von 3 bis 4 Mio. t CO_{2eq} pro Jahr erbringen könnte (siehe auch Kapitel 4.2).

3.5 Umwandlungssektor

3.5.1 Maßnahme 2: Ausbau der erneuerbaren Energien im Strombereich

Der Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor kann einen wertvollen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Das Ziel der Bundesregierung ist eine Steigerung des Anteils der Erneuerbaren Energien an der Stromproduktion auf 25 – 30% bis 2020 (vgl. Beschlüsse der CDU/CSU- sowie der SPD-Fraktion) sowie ein weiterer kontinuierlicher Ausbau nach 2020. Zentrales Förderinstrument für die Marktdurchdringung der erneuerbarer Energien im Stromsektor ist das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Es wird angenommen, dass die Einspeisetarife auch in der Zukunft so gesetzt werden, dass ein kontinuierlich hoher Ausbau erneuerbarer Energien möglich ist. Weiterhin wird unterstellt, dass der notwendige Ausbau des Stromnetzes zügig erfolgt und die Genehmigungsverfahren den bisher erreichten jährlichen Zubau nicht verlangsamen.

Annahmen

Für die Abschätzung der Entwicklung der erneuerbaren Energien wurde die Leitstudie 2007 (Nitsch 2007) zu Grunde gelegt (siehe Tabelle 3-35). Die in der Studie vorgesehenen Stromimporte aus erneuerbaren Energien ab 2017 wurden bei den hier dargestellten Berechnungen nicht berücksichtigt.

Ein zentraler Bestandteil für die Berechnung der CO₂-Einsparung erneuerbarer Energien ist der Emissionsfaktor der verdrängten Kraftwerke, da erneuerbare Energien ein eigenes fluktuierendes Einspeiseprofil aufweisen, kann hier nicht vom durchschnittlichen Emissionsfaktor des Kraftwerksparks ausgegangen werden. Auf Basis der Leitstudie 2007 wurden hier eigene Berechnungen ausgeführt (vgl. Tabelle 3-33).

Tabelle 3-33: Emissionsfaktor der verdrängten konventionellen Erzeugung

	Einheit	2010	2020	2030
Emissionsfaktor	[g/kWh]	770	625	675

Quelle: Berechnungen des ISI auf Basis von Nitsch (2007)

Von zentraler Bedeutung für die Betrachtung der Kosten des Fördersystems ist die Entwicklung der Strompreise. Hier wurde für die Sicherstellung der Konsistenz ebenfalls auf die Leitstudie zurückgegriffen (vgl. Tabelle 3-34), auch wenn die unterstellte Entwicklung der Strompreise aus heutiger Sicht als zu niedrig einzustufen ist. Die derzeitigen Baseload Futures für das Jahr 2009 werden an der EEX zu Preisen von mehr als 80 €/MWh gehandelt. Der Zinssatz zur Kalkulation der Kapitalkosten wurde mit 6% gewählt.

Tabelle 3-34: Angenommene Entwicklung der Strompreise bis 2030

	Einheit	2010	2020	2030
Strompreis	[€/MWh]	44	59	59

Quelle: Nitsch (2007)

Die Annahmen über die realisierbaren Potentiale der Stromerzeugung sind für die verschiedenen recht unterschiedlich: während die Wasserkraft ihre Erzeugung von derzeit 23 TWh auf knapp 25 TWh in 2030 erhöht, verdreifachen Wind und Photovoltaik ihre Erzeugung auf 133 TWh bzw. knapp 13 TWh (vgl. Tabelle 3-35). und die Biomasse-Nutzung verdoppelt ihre heutige Stromerzeugung auf 44 TWh bis 2030.

Tabelle 3-35: Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien inkl. Anlagenbestand

		2010	2020	2030
Wasser	[TWh/a]	23,3	24,6	24,9
Wind	[TWh/a]	42,3	83,6	133,2
PV	[TWh/a]	4,2	9,3	12,8
Biomasse inkl. biogene Abfälle	[TWh/a]	24,6	36,9	43,9
Geothermie	[TWh/a]	0,5	3,4	9,4

Quelle: Nitsch (2007)

Ergebnisse

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse berücksichtigen nur diejenige Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, die durch neue Anlagen ab dem Baujahr 2008 erbracht werden. Alle berechneten Indikatoren beziehen sich somit auf die Periode 2008-2030 und stellen die Veränderungen gegenüber dem Ende des Jahrs 2007 dar. Insgesamt gehört die Förderung erneuerbarer Energien im Stromsektor zu den Maßnahmen mit den größten CO₂-Minderungseffekten und den größten involvierten Finanzvolumina. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse kurz zusammengestellt (vgl. Tabelle 3-36):

- Die zusätzlichen Investitionen steigen von knapp 5 Mrd. € in 2010 auf 7 Mrd. € in 2030. Kumuliert über den Zeitraum werden rund 135 Mrd. € investiert.
- Kumuliert bis 2030 werden durch die neuen Anlagen fast 1 680 TWh Strom erzeugt und 1 100 Mio. t CO₂ vermieden. Die jährliche CO₂-Einsparung beträgt knapp 50 Mio. t in 2020 und erreicht in 2030 auf fast 100 Mio. t.
- Für die Errichtung der Anlagen werden Differenzinvestitionen in Höhe von 135 Mrd. € benötigt, davon knapp 5 Mrd. € in 2010 und steigend bis 7 Mrd. € in 2030.
- Die höchsten CO₂-Vermeidungskosten treten im Zeitraum bis 2015 auf (z.B. im Jahre 2010 belaufen sie sich auf 86 €/t CO₂). Im folgenden Zeitraum wird die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zunehmend kostengünstiger, während die Stromerzeugungskosten aus traditionellen Energieträgern zunehmen. Somit reduzieren sich die Vermeidungskosten bis 2030 auf 15 €/t CO₂ unter den gegebenen Annahmen. Einige der erneuerbaren Energiequellen werden um 2020 wettbewerbsfähig und somit sinken die Kosten der Förderung. Bei einer Berücksichtigung der derzeitigen Strompreise, auf die aus methodischen Gründen verzichtet wurde, würden die Vermeidungskosten noch niedriger ausfallen.
- Der Barwert der Investitionen in die Stromerzeugung der erneuerbaren Energiequellen für die gesamte Periode 2008-2030 erreicht einen negativen Wert (knapp 23 Mrd. €) und einen moderaten Wert für die abdiskontierten spezifischen Vermeidungskosten von 20 €/t CO₂.

Tabelle 3-36: Ergebnisse der Maßnahme: Ausbau der erneuerbaren Energien im Strombereich

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	4,8	6,3	7	135 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	-0,2	-3,6	-7,7	-80 Mrd. €
Stromerzeugung	[TWh/a]	16	79	150	1 680 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	13	50	98	1 120 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	86	45	15	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008 -2030 (Zinssatz 6%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	53
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	-23
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	20

Quelle: Berechnungen des ISI

Erinnert sei daran, dass die spezifischen Vermeidungskosten in Relation zu den vermiedenen Anpassungskosten und Schadenskosten des Klimawandels und der vermiedenen externen Kosten durch die lokal und regional auftretenden Schäden der Verbrennung von fossilen Energieträgern zur Stromerzeugung betrachtet werden müssen.

3.5.2 Zusatzmaßnahmen 6 und 7: Emissionsarme fossile Kraftwerke

Nach Ermittlung der realisierbaren Potentiale der Stromerzeugung durch die erneuerbaren Energien (vgl. Kapitel 3.5.1) wird die Entwicklung des übrigen Stromsektors anhand eines Optimierungsmodells simuliert, denn Partialanalysen zu einzelnen Kraftwerkstypen würden hier leicht in die Irre führen. Einerseits geht es um die planmäßige Außerbetriebnahme der Kernkraftwerke nach den Beschlüssen der Bundesregierung und zum anderen um die zeitgerechte Re-Investition von alten fossilen Kraftwerken entsprechend den durch den Emissionshandel implementierten CO₂-Reduktionszielen und dem

verbleibenden Strombedarf auf Seiten der Endenergieträger, der erzeugungsseitig teilweise durch die erneuerbaren Energien produziert wird.

Das hier verwendete Optimierungsmodell (BALMOREL¹⁰) erhielt ein iterativ ermitteltes Ziel der spezifischen CO₂-Emissionen des Strommixes für 2020. Es kann zur Deckung des verbleibenden Strombedarfs zwischen allen fossilen Kraftwerken und der Errichtung neuer fossiler Kraftwerke wählen. Zielfunktion des Modells ist die Minimierung der Gesamtkosten der hier betrachteten Stromerzeugung unter der Randbedingung der Deckelung der CO₂-Emissionen; die Option des Baus neuer Kernkraftwerke wurde ausgeschlossen.

Als Referenzentwicklung wurde zunächst die Entwicklung der Politik-Szenarien IV (Fraunhofer-ISI et al. 2008b) für das Szenario „ohne Maßnahmen“ abgebildet. Dann wurde der Kraftwerkspark berechnet, der

- ein Ausphasen der Kernkraftwerke lt. Beschluss der Bundesregierung beschreibt,
- denjenigen Strombedarf noch zu erzeugen hat, der nach Durchführung aller Effizienzmaßnahmen (siehe Kapitel 3.1 bis 3.4) und der unterstellten Realisierung der Stromerzeugung auf Basis der erneuerbaren Energien besteht.

Dieser „Meseberg-Programm“-Lauf führt gegenüber einem Lauf ohne die Effizienzmaßnahmen und ohne die Realisierung der Stromerzeugung der erneuerbaren Energien zu erheblichen vermiedenen Investitionen in dem fossilen Kernkraftwerkspark von rund 44 Mrd. €. Da aber dieses „Meseberg“-Szenario nicht zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen um 40% gegenüber 1990 führt, sondern nur zu etwa 35% (vgl. Kapitel 4.1), wurden als weitere Maßnahmen im Umwandlungssektor die Investition von drei Braunkohlekraftwerken mit CCS unterstellt.

Um an dieser Stelle jedoch aufzeigen zu können, dass einerseits die neuen Braunkohlekraftwerke einen wesentlich höheren Umwandlungswirkungsgrad als die von ihnen substituierten Anlagen haben (und daher auch wesentlich geringere spezifische CO₂-

¹⁰ Zum BALMOREL-Modell siehe Ravn (2001) oder Cremer (2005).

Emissionen), und andererseits die CCS-Technik einen erheblichen Mehrbedarf an Strom und Braunkohle verursacht, werden diese beiden Schritte im Folgenden getrennt erläutert (vgl. Kapitel 3.5.2.1 und 3.5.2.2). Dieses Vorgehen ist von daher sinnvoll, als bei der Bewertung der Emissionsminderungen, die durch CO₂-Abscheidung und Speicherung erreicht werden können, unterschiedliche Referenzanlagen verwendet werden können. Bei der Bewertung von zukünftigen Handlungsoptionen zur Emissionsminderung werden neue CCS-Kraftwerke mit neuen konventionellen Kraftwerken als mögliche Alternativen verglichen (vgl. z.B. Fishedick et al. 2007:31). In diesem Fall liegt die im Vergleich der Anlagen erreichbare Emissionsminderung der CCS-Kraftwerke deutlich unter der Abscheiderate, da der Gesamtenergiebedarf der CCS-Kraftwerke höher ist als derjenige von konventionellen Kraftwerken ohne CCS.

Ziel der hier durchgeführten Untersuchungen ist jedoch nicht die Untersuchung und der Vergleich verschiedener zukünftiger Handlungsoptionen im Stromsektor, sondern die Analyse der möglichen Emissionsminderungen aus dem real bestehenden Umwandlungssektor. Im Fall der CCS-Kraftwerke bedeutet dies, zu analysieren, welche der heute real betriebenen Anlagen sie substituieren würden und welche Emissionsminderungen sich daraus ergeben (vgl. Kapitel 3.5.2.2).

3.5.2.1 Zusatzmaßnahme 6: Drei neue Braunkohlekraftwerke

Im ersten Schritt wird die Errichtung von drei neuen Braunkohlekraftwerken mit jeweils 800 MW Leistung untersucht, die etwas vorzeitig alte Braunkohlekraftwerke aus den 1960er Jahren ersetzen. Damit wird bis zum Jahr 2020 ein Beitrag zur Emissionsminderung von rund 7 Mio. t. CO₂ erreicht. Die Emissionsminderung gegenüber dem „Meiseberg-Programm“-Lauf geht in den darauf folgenden Jahren wieder zurück, da dann auch in diesem Lauf die alten Kraftwerke ersetzt werden.

Annahmen

Für die neuen Kraftwerke wird angenommen, dass sie einen Wirkungsgrad von 45 % erreichen. Dies ist gemessen an den Entwicklungszielen der Kraftwerksbauer und der großen Stromerzeuger noch eine konservative Annahme.¹¹ Die Kraftwerke ersetzen ältere Braunkohlekraftwerke, für die Wirkungsgrade von rund 32% angenommen wurden. Dies entspricht ungefähr den Parametern der 300 MW-Blöcke, die in diesem Zeitraum errichtet wurden.¹² Für die spezifischen Investitionen der Kraftwerke wurden 1600 €/kW Nettoleistung angenommen. Die jährlich vermiedenen Brennstoffkosten beziehen sich nicht auf eine einfache Partialanalyse im Sinne von drei re-investierten Braunkohlekraftwerken, sondern sie verstehen sich als vermiedene Brennstoffkosten von entweder in geringem Umfang produzierenden Kohle- und Gaskraftwerken (Gaskraftwerke-Einsatz wegen der CO₂-Emissionsrestriktionen) oder vermiedenen Kohlekraftwerken. Diese Substitutionen werden vom Optimierungsmodell berechnet. Dabei wird angenommen, dass die drei Kraftwerke stufenweise in den Jahren 2014, 2017 und 2020 jeweils voll ins Netz einspeisen. Der Zinssatz beträgt 8%.

Ergebnisse

Die Investitionen liegen mit 1,5 Mrd. € deshalb relativ niedrig (vgl. Tabelle 3-37), weil es sich um Netto-Investitionen handelt. Während die Brutto-Investitionen bei etwa 3,9 Mrd. € für die drei Kraftwerke liegen, können durch die hohen Effizienzgewinne der neuen Kraftwerke gut 2 Mrd. € an anderen Kraftwerksinvestitionen vermieden werden.

Insgesamt ergeben sich vermiedene Brennstoff- bzw. Betriebskosten in Höhe von 3 Mrd. € bis 2030. Die Brennstoffeinsparungen von Braunkohle, Steinkohle und Erdgas belaufen sich in der Periode 2014 bis 2030 auf etwa 33 TWh und die entsprechenden CO₂-Minderungen betragen 107 Mio. t CO₂ (in 2020 belaufen sie sich auf 7,4 Mio. t) (vgl. Tabelle 3-37).

¹¹ Zum Vergleich kann hier das Ziel der „50+ Kraftwerke“ dienen, die im kommenden Jahrzehnt in Betrieb genommen werden sollen. Dabei handelt es sich um Kraftwerke auf Steinkohlebasis mit 700°C Dampfkreislauf. Der Abschlag von mehreren Prozentpunkten wird wegen den schlechteren Brennstoffeigenschaften der Braunkohle, insbesondere dem höheren Feuchtigkeitsgehalt, angenommen.

¹² Zur Stilllegungspraxis älterer Kraftwerksblöcke vergleiche z.B. Landesregierung NRW (2007)

Die spezifischen Vermeidungskosten liegen in 2020 bei 15 €/t CO₂, die wegen der in den folgenden Jahren außer Betriebgenommenen Kraftwerke mit schlechteren Wirkungsgraden noch rückläufig sind. Wegen der langen Lebensdauer von Braunkohlekraftwerken würde aber diese Investition langfristig ein Hemmnis für weiter rückläufige Emissionen von Treibhausgasen. Deshalb wird im folgenden Abschnitt untersucht, welche zusätzlichen Emissionsvermeidungskosten entstehen, wenn man diese drei Braunkohle-Kraftwerke mit CCS-Technik ausrüsten würde.

Tabelle 3-37: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Drei moderne Braunkohlekraftwerke

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008–2030
Differenzinvestitionen ¹	[Mrd. €/a]	0	-0,7	0	1,5 Mrd. €
Jährliche Kosten ²	[Mrd. €/ a]	0	-0,1	0,15	-3,0 Mrd. €
Energieeinsparungen ³	[TWh/ a]	0	2,3	2,7	33 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} / a]	0	7,4	8,6	107 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten ³	[€/ t CO _{2eq}]	0	15	-2	

) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

- 1) Aufgrund der Änderung des gesamten Kraftwerksparks kommt es in einzelnen Jahren auch zu neg. Investitionen im Vergleich zur Basisentwicklung.
- 2) Durch den Brennstoffwechsel zur günstigen Braunkohle werden die Kosten für die Primärenergieträger erheblich gesenkt.
- 3) Aufgrund der Änderung des gesamten Kraftwerksparks sind die Jahreswerte stark schwankend.

2008-2030 (Zinssatz 8%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	1
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	-0,2
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/ t CO _{2eq}]	1,4

Quelle: Berechnungen des ISI

3.5.2.2 Zusatzmaßnahme 7: CO₂-Rückhaltung und -speicherung (CCS) für drei Braunkohle-Kraftwerke

Im zweiten Schritt wurde statt drei konventioneller Braunkohlekraftwerke die Errichtung von drei neuen Braunkohlekraftwerken unterstellt, die mit CO₂-Rückhaltung und der Infrastruktur für eine CO₂-Speicherung in nahegelegenen Aquiferen ausgerüstet sind. Die Analysen beziehen sich dabei nicht auf den Fall einer Nachrüstung von Anlagen zur CO₂-Abscheidung, da bei einer Nachrüstung noch höhere spezifische Kosten entstehen würden und die Wirkungsgradverluste ebenfalls noch höher ausfallen würden. Verständlicherweise haben auch neue Kraftwerke mit einer integralen CO₂-Rückhaltung einen niedrigeren Wirkungsgrad als neue konventionelle Kraftwerke, da für die Rückhaltung – egal mit welcher Technologie – zusätzliche Energie benötigt wird.

Annahmen

Die Investitionen wurden für das gesamte System der CCS mit 5,5 Mrd. € unterstellt. Im Detail wurden für die Kraftwerke zusätzliche Technologiekosten für die Anlagen zur CO₂-Abscheidung von 1300 €/kW Nettoleistung der Kraftwerke und eine Minderung des Wirkungsgrades gegenüber neuen Anlagen von 9 Prozentpunkten angenommen.¹³ Diese Zahl ist mit erheblicher Unsicherheit verbunden, weil derartige großtechnische Anlagen noch nicht realisiert wurden und auch die Kontroll- und Sicherheitsauflagen für die CO₂-Speicher noch unsicher sind. Für den Transport des abgeschiedenen CO₂ wurde die Errichtung einer Pipeline bis zu einem geeigneten Aquifer angenommen. Die Kosten für Transport und Speicherung fallen im Wesentlichen ex ante an, da es sich um Investitionen in eine Pipelineinfrastruktur und in Verpressungsbohrungen handelt. Bei den Modellrechnungen wurde von Aufwendungen von 2 Mrd. € für diese Infrastruktur für alle drei Kraftwerke gemeinsam ausgegangen. Der Zinssatz wird mit 8% angenommen. Die drei Anlagen sind 2016, 2018 und 2020 in Betrieb. Dieser Investitionsrhyth-

¹³ Dieser reduzierte Netto-Wirkungsgrad umfasst den Energiebedarf für die Kompression des CO₂ auf überkritischen Zustand. Es wird davon ausgegangen, dass am Kraftwerksstandort so weit komprimiert wird, dass eine Zwischenkompression nicht mehr notwendig ist, wie dies z.B. beim Weyburn-Projekt durchgeführt wird.

mus wäre zweifellos sehr ambitioniert, er soll aber verdeutlichen, dass schon sehr bald Braun- und Steinkohle-Kraftwerke mit CCS-Technik ausgerüstet werden (oder zur Nachrüstung geplant werden) müssen, um langfristige Ziele bis Mitte dieses Jahrhunderts entsprechend den Empfehlungen der Enquete Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ (1990) eine Verminderung der Treibhausgasemissionen um 80% in heutigen Industriestaaten realisieren zu können.

Ergebnisse

Die Ergebnisse seien kurz wie folgt erläutert (vgl. Tabelle 3-38):

- Die Investitionen laufen zwischen 2013 und 2020 und erreichen insgesamt ein Volumen von 5,5 Mrd. €.
- Die jährlichen Kosten der drei Anlagen selbst steigen nach 2020 wegen steigender Braunkohlekosten von 500 Mio. € auf 600 Mio. € an. Als System betrachtet (d.h. drei neue Braunkohlekraftwerke mit direkt integrierten CCS-Anlagen) belaufen sich die jährlichen Kosten zunächst auf etwa 80 bis 100 Mio. €, gehen dann aber in eine Netto-Einsparung über, da mit der deutlichen Emissionsminderung durch die Abscheidung auf den Einsatz von teurerem Erdgas verzichtet werden kann. Dies kompensiert den höheren Energiebedarf für die CO₂-Rückhaltung, der über einen höheren Bedarf an der vergleichsweise kostengünstigen Braunkohle gedeckt wird.
- Der Brennstoffmehrbedarf beträgt knapp 4 PJ/a für die drei Anlagen und summiert sich auf 12 TWh bis 2030.
- Die vermiedenen CO₂-Emissionen liegen in 2020 bei etwa 12,5 Mio. t/a und summieren sich bis 2030 auf 180 Mio. t CO₂.
- Die spezifischen Vermeidungskosten belaufen sich in der gesamten Periode auf etwa 50 €/ t vermiedenes CO₂.

Wenngleich diese Vermeidungsmaßnahme für den Zeithorizont 2020 bis 2030 als relativ teuer erscheinen mag, so muss doch ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass diese Investition unter dem Gesichtspunkt eines 60%- bis 80%-Reduktionsziels bis Mit-

te dieses Jahrhunderts für Deutschland deshalb eine kostengünstige Option werden könnte, weil die Braunkohlekosten als relativ stabil einzuschätzen sind.

Tabelle 3-38: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: CCS für drei moderne Braunkohlekraftwerke

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €]	0	0,3	0	5,5 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	0	0,5	0,6	9,2 Mrd. €
Energieeinsparungen¹	[TWh/a]	0	-1,0	-1,0	-12,0 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0	13	13	180 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	0	50	50	

) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

1) Strommehrbedarf für CCS-Betrieb

2008-2030 (Zinssatz 8%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	2,7
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	-3
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	15

Quelle: Berechnungen des ISI

3.5.3 Maßnahme 9: Einspeiseregulierung für Biogas in Erdgasnetze

Biogas wird zurzeit primär zur dezentralen Verstromung in Blockheizkraftwerken (BHKW) genutzt. Der hier genutzte Anlagenbestand ist sehr heterogen. Die zentrale Nutzung von Biogas im Erdgasnetz ermöglicht eine von Ort und Zeitpunkt der Produktion weitgehend unabhängige energetische Umwandlung. Dies ist in Bezug auf die Energiesicherheit, auch wenn Biogas hier nur einen geringen Anteil beisteuern kann, von Bedeutung. Die Menge des heute in Erdgasnetzen genutzten Biogases ist vernachlässigbar gering. Wir unterstellen, dass es in den kommenden Jahren zu einem moderaten Anstieg des Zubaus in diesem Bereich kommt, so dass in 2020 ca. 5 TWh und in 2030 ca. 14 TWh Biogas in das Gasnetz eingespeist werden. Dies entspricht in 2030 ca. 20-30% der dann voraussichtlich genutzten Biogasmenge.

Annahmen

Für unsere Berechnungen haben wir unterstellt, dass nur sehr große Anlagen Biogas für die Erdgaseinspeisung produzieren. Der Bau von Großanlagen zur Biogasproduktion ist mit weit geringeren spezifischen Investitionskosten als kleinere Anlagen verbunden. Weiterhin sind die Kosten der Aufbereitung auf Erdgasqualität geringer. Die Investitionskosten setzen wir mit 20 €/kWh Jahresproduktion Produktgas an und die Betriebskosten mit 3,5 €/kWh für das Jahr 2008 an (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2007:144). Wir unterstellen eine Degression bei den Investitionen durch Lerneffekte von 1%/a bis 2020. Die Betriebskosten bleiben bis 2020 konstant und sinken dann auf 3 €/kWh. Unserer Einschätzung nach ist dies der untere Rand einer möglichen Kostendegression. Einnahmen durch den Verkauf von Biogas entstehen in Höhe von 1,5 €/kWh. Hier unterstellen wir den Grenzübergangspreis von Erdgas. Dieser liegt zurzeit über 1,5 €/kWh, in einer langfristigen, konservativen Projektion halten wir den von uns gewählten Preis jedoch für realistisch und er verhindert das Überschätzen von Einnahmen. Bei vorliegender Berechnung unterstellen wir, dass es keine Förderung durch EEG-Maßnahmen gibt. Werden diese beschlossen, so ließe sich der Barwert der THG-Einsparungen reduzieren, was die Kosten je eingesparter Tonne CO_{2eq} verringern würde. Die angegebenen Barwerte bzw. Annuitäten berechnen sich mit einer unterstellten Lebensdauer der Anlagen von 16 Jahren und einem Zinssatz von 8%.

Wir unterstellen weiterhin, dass primär Gülle und Abfallstoffe für die Fermentation genutzt werden. Dies ist zum einen gegenüber der Nutzung von NAWARO mit geringeren Substratkosten verbunden und zum anderen hat diese Nutzung einen weit positiveren Effekt auf die Vermeidung von Emissionen. Dies resultiert aus dem hohen GWP von Methan. Dieses Methan entweicht nicht in die Atmosphäre, sondern wird verbrannt, was die Treibhauswirkung erheblich senkt.

Zu berücksichtigen in der Umsetzung dieser Maßnahme bleiben aus unserer Sicht die Probleme der Massentierhaltung und des Anbaus von Energiepflanzen. Weitere Forschung zu möglichen negativen Auswirkungen ist aus unserer Sicht angeraten.

Ergebnisse

Durch die Nutzung von Biogas als Substitut für Erdgas entstehen zwei Effekte von entscheidender Bedeutung. So lassen sich durch die Maßnahme in 2020 3 Mio. t CO_{2eq} und in 2030 8,3 Mio. t CO_{2eq} einsparen. Hierbei unterstellen wir eine CO_{2eq} Minderung von ca. 600 g/kWh (Wuppertal-Institut et al. 2005:33). Parallel dazu können Importe von Energieträgern um insgesamt 2,4 Mrd. € bis 2030 reduziert werden, was die Importabhängigkeit verringert.

Die Energieerzeugung beträgt insgesamt 119 TWh im Zeitraum 2008 bis 2030 und lässt Brennstoffeinsparungen in Höhe von 2 Mrd. € zu.

Die Höhe der jährlichen Investitionen steigt. Dies folgt zum einen aus dem unterstellten wachsenden Zubau und aus dem Ersatz von Anlagen nach 2020. Investitionen werden in Höhe von ca. 3 Mrd. € im gesamten Betrachtungszeitraum erforderlich. Zusätzliche Kosten ergeben sich von ca. 2 Mrd. €. Die folgende Tabelle fassen unsere Berechnungen zusammen.

Tabelle 3-39: Ergebnisse der Maßnahme: Einspeiseregulierung für Biogas in Erdgasnetze

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0,03	0,16	0,23	3 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	0,006	0,09	0,22	2 Mrd. €
Energieeinsparungen	[TWh/a]	0	0	0	0 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0,2	3,5	8,9	81 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	71	55	60	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 8%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	0,8
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	-1,4
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	17

Quelle: Berechnungen des PIK

3.5.4 Zusatzmaßnahme 4: Supergrid-Varianten

Um die Einspeisung von erneuerbarem Strom ins deutsche Stromnetz langfristig weiterhin stark zu erhöhen, sind große Investitionen in das Stromnetz notwendig (dena 2005). Der größte Teil der neuen erneuerbaren Stromproduktion in Deutschland bis 2030 wird von der Windkraft gedeckt werden, die größten inländischen Potentiale hierfür gibt es an und vor der norddeutschen Küste. Die Lastzentren sind jedoch im Süden des Landes, weshalb große Übertragungskapazitäten in Nord-Süd-Richtung notwendig sind, um Versorgungsengpässe zu vermeiden. Diese Situation wird zusätzlich verstärkt durch die Schließung der Atomkraftwerke, welche sich in Süddeutschland konzentrieren. Die Hochspannungs-Gleichstromsübertragungstechnik (HGÜ) ist für diese Langstreckenübertragung eine Alternative, die effizienter als die konventionelle Drehstromübertragung ist. Die HGÜ-Übertragung ist bei Strecken über etwa 600-700 km billiger als die Drehstromübertragung (z.B. DLR 2006). Die HGÜ-Technik ist so effizient, dass auch die Möglichkeit der Übertragung über sehr lange Strecken eine reale Option ist. Deshalb wird im Folgenden die Möglichkeit für über die im Leitszenario hinaus vorgesehenen Kapazitäten 3 GW Offshorewindkraft in der Nordsee bis 2020 und weitere 7 GW bis 2030, inklusive Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Leitungen für den Transport nach Süddeutschland¹⁴ untersucht. Zusätzlich wird die Möglichkeit der Übertragung von Windstrom aus Südmarokko diskutiert und mit der Nordsee-Variante verglichen.

Annahmen

Untersucht wird die Möglichkeit, bis 2030 zusätzlich 10 GW Windkraft in der Nordsee zu errichten und den Strom mittels 800 kV Bipol-HGÜ nach Bayern zu transportieren. Es wird angenommen, dass die Windparks immer gleichzeitig und in gleicher Leistung wie die HGÜ-Kapazität in Betrieb genommen werden. Diese Inbetriebnahme geschieht in 3 Schritten um 3,3 und 4 GW mit Anfang 2018. Für jeden Schritt werden 5 Jahre Bauzeit angenommen. Die Auslastung wird auf 3 500 Volllaststunden angesetzt (vgl.

¹⁴ Als Anschlusspunkt wurde KKW Isar angenommen, dessen Blöcke voraussichtlich 2011 und 2020 vom Netz gehen werden

BMU 2004:29; Czisch 2006:57; Saharawind 2008). Die angenommenen Investitionskosten des Windparks sind 1 500 €/kW; die jährlichen Betriebskosten 6% der Investition (vgl. BMU 2004:29; Czisch 2006: 67; EWEA 2007:27; 2008:49; RAENG 2004:46; 48; IEA 2005). Für die HGÜ-Leitungen werden Investitionskosten in Höhe von 300 €/(MW*km) über 850 km angenommen, mit jährlichen Betriebskosten (inkl. Betriebskosten für die Converter) in Höhe von 1% der Investitionskosten und Übertragungsverluste von 2,8%/1 000 km. Die Converterstationen kosten 120 €/kW (für beide benötigten Stationen an jedem Ende der HGÜ) und haben Verluste von 0,5% (vgl. Bahrman, Johnson 2007:39; Czisch 1999:6; AEP 2006:13ff). Die Abschreibungsdauer aller Anlagen ist 20 Jahre und der Zinssatz 8%.

Der in Bayern eingespeiste Windstrom verdrängt einen Mix aus Grund- und Mittellaststrom (70% Steinkohle, 20% Braunkohle, 10% Erdgas), mit einem kombinierten Emissionsfaktor von 865 g CO₂/kWh (vgl. Klobasa, Ragwitz 2005:28f). Die vermiedenen Kosten des verdrängten Stroms werden von den Windstrom- und Übertragungskosten subtrahiert (siehe Tabelle 3-34).

Ergebnisse

Durch die Zusatzmaßnahme 4 können bis 2020 8,8 Mio. t CO₂/a eingespart werden; bis 2030 erhöht sich diese Einsparung auf 29,4 Mio. t/a. Die kumulierten Investitionen sind 18,8 Mrd. € und verteilen sich relativ gleichmäßig (1,1-1,5 Mrd. €/a) über die Periode 2013-2027. Für die Windstromkapazität fallen Investitionen von 15 Mrd. € an, während für die Übertragung Investitionen in Höhe von 2,6 Mrd. € (Leitungen) und 1,2 Mrd. € (Converter) anfallen¹⁵. Durch die vermiedenen Betriebs- und Brennstoffkosten des verdrängten Stroms sind die Netto-Betriebskosten der Windkapazität negativ und führen somit zu Einsparungen bei den laufenden Kosten. Insgesamt sind die CO₂-Vermeidungskosten relativ bescheiden: der abdiskontierte spezifische Barwert der CO₂-Einsparungen ist 16,5 €/t CO₂.

¹⁵ Es wird angenommen, dass die HGÜ-Leitungen ausschließlich für den Windstrom benutzt werden, was zu einer sehr niedrigen Auslastung dieser Leitungen führen würde (im Durchschnitt knapp 40%). Ein besser optimierter Einsatz der Leitungen würde deshalb die Kosten pro durchgeleiteter kWh deutlich senken.

Tabelle 3-40: Ergebnisse der Zusatzmaßnahme: Wind & HGÜ Nordsee

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0	1,1	0	19 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	0	-0,3	-1,1	-8 Mrd. €
Stromeinspeisung	[TWh/a]	0	10	34	250 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0	9	29	221 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten ¹⁶	[€/t CO _{2eq}]	0	29	29	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 8%)

Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	5,6
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	-3,6
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	17

Quelle: Berechnungen des PIK

Variante: Windstrom aus Marokko

Die Effizienz der Gleichstromsübertragung ist so hoch, dass auch eine Übertragung über sehr weite Strecken in Frage kommt. Als Vergleich wird hier die gleiche Berechnung wie oben beschrieben durchgeführt, für den Bau von Onshore-Windkraftwerken in Südmarokko. Die Annahmen sind wie oben, aber die Übertragungsstrecke¹⁷ ist hier rund 3 000 km, die Investitionskosten 1 000 €/kW, die Betriebskosten 3% der Investitionskosten pro Jahr und die Auslastung 3 400 FLh/a (vgl. BMU 2004:29; Czisch 2006:57; 67; EWEA 2007:27; 2008:49; RAENG 2004:46; 48; Saharawind 2008). Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 3-41 aufgeführt.

¹⁶ Die Vermeidungskosten in 2020 berücksichtigen nur die erste Ausbaustufe, die ab 2018 in Betrieb genommen wird; nicht aber die Investitionen für die zweite und dritte Ausbaustufe, die erst 2023 bzw. 2028 in Betrieb genommen werden.

¹⁷ Ajun-KKW Isar, via Gibraltar, Spanien, Frankreich

Tabelle 3-41: Ergebnisse der alternativen Zusatzmaßnahme: Wind & HGÜ Marokko

	Einheit	2010	2020	2030	Kumuliert 2008-2030
Differenzinvestitionen	[Mrd. €/a]	0	1,2	0	20 Mrd. €
Jährliche Kosten*	[Mrd. €/a]	0	-0,4	-1,4	-10 Mrd. €
Stromeinspeisung	[TWh/a]	0	9	31	230 TWh
THG-Einsparungen	[Mio. t CO _{2eq} /a]	0	8	27	201 Mio. t CO _{2eq}
Spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	0	26	26	

*) eingesparte Energiekosten und geänderte Betriebskosten

2008-2030 (Zinssatz 8%)		
Abdiskontierte kumulierte Annuität der Investitionen	[Mrd. €]	6
Barwert der Maßnahme	[Mrd. €]	-3,5
Abdiskontierte spezifische Vermeidungskosten	[€/t CO _{2eq}]	17

Quelle: Berechnungen des PIK

Deutlich ist, dass die spezifischen CO₂-Vermeidungskosten nicht signifikant höher sind als für die Nordseealternative, trotz der mehr als 3-mal so langen Übertragungstrecke aus Marokko. Die CO₂-Emissionsreduktion in 2020 ist 8 Mio. t (Nordsee: 8,8 Mio. t, wegen der höheren Auslastung und der geringeren Übertragungsverluste); in 2030 ist die jährliche Reduktion 26,8 Mio. t CO₂ (Nordsee: 29,4 Mio. t CO₂). Die Investitionskosten sind in beiden Fällen ähnlich hoch (1,2-1,6 Mrd. €/a), da die Kosten für die HGÜ-Leitung durch die billigeren Baukosten für die Onshore-Kraftwerke in Marokko zu einem großen Teil ausgeglichen werden. Die Investitionskosten für die HGÜ-Leitungen von Marokko liegen bei 9 Mrd. € und zusätzlichen 1,2 Mrd. € für die Converter. Bei der Nordsee-Alternative liegen diese Kosten bei 2,6 und weiteren 1,2 Mrd. €; während sich die Windparkkosten auf 10 Mrd. € (Marokko) bzw. auf 15 Mrd. € (Nordsee) belaufen. Durch die niedrigeren Betriebskosten Onshore sind die Kosteneinsparungen durch die vermiedenen Brennstoff- und Betriebskosten der verdrängten Stromproduktion im Fall Marokko etwas höher als im Fall Nordsee.

Reality check

Die oben angesprochenen Projekte der Windstromproduktion an der Nordsee und in Marokko, beziehen sich auf 3 GW bis 2020 zusätzlich zur bisherigen Planung der Bundesregierung, und 10 GW zusätzlich bis 2030. Dies sind Kapazitätssteigerungen, die ambitioniert aber nicht unrealistisch sind und die gut mit früheren Annahmen und Zielsetzungen der Bundesregierung korrelieren (vgl. BMU 2004:159, wo 25 GW als die realistischerweise erschließbare Offshore-Kapazität bis 2030 angegeben wird). Da der Offshore-Ausbau bisher nur sehr schleppend vorankommt, wurde dieses Ziel im Leit-szenario auf 10 GW heruntergesetzt (Nitsch 2007). Das Potential für Windstrom ist aber nach wie vor sehr hoch, der Ausbautakt ist deshalb eine Frage der Investitionsbereitschaft und der Fähigkeit der Industrie genügend Kraftwerke produzieren zu können.

Zurzeit besteht ein Engpassproblem bei der Herstellung von Windkraftanlagen (EWEA 2007, 2008), was zu steigenden Preisen und auch zu direkten Bauverzögerungen führt. Es werden große neue Fabrikkapazitäten aufgebaut, die allerdings schnell ausgelastet sind. Mittelfristig könnte also der Ausbau der Windenergie durch einen Kapazitätsmangel bei den Windradfabriken, aber auch durch Kapazitätsmängel bei den Herstellern von Windradfabriken gebremst werden. Langfristig, auf einem gut funktionierenden europäischen oder weltweiten Markt dürfte dies jedoch kein großes Hindernis werden. Voraussetzung ist allerdings, dass die politischen Rahmenbedingungen stimmen, diese langfristig ausgelegt und stabil sind, was sich außerdem positiv auf die Investitionsbereitschaft auswirken würde. Ein sehr schneller Ausbau der erneuerbaren Energien könnte sich auf die Kosten der Kraftwerke auswirken, so dass ein forcierter Ausbau teurer wird als ein mäßiger. Dies ist auch der Grund für obige Annahme, bei der die Investitionskosten für Windkraftwerke mit der Zeit nicht weiter abnehmen.

Die HGÜ-Technik ist in einer großen Zahl von Projekten seit Jahrzehnten erprobt, die Windkrafttechnik ist ebenfalls eine bekannte und ausgereifte Technik. Aus der technischen Perspektive dürfte es wenige Probleme bei der Durchführung der Projektvarianten geben.

Ein zu beachtender Punkt ist die Frage des öffentlichen Widerstands gegen neue Stromleitungen. Dieser Widerstand ist fast überall in Europa sehr stark, was die Genehmigungsprozesse für neue Leitungen sehr langwierig und unsicher macht. Ein Instrument zur Lösung dieses Problems richtet sich deshalb direkt an die Öffentlichkeit, deren Zu-

rückhaltung zum Teil auf Unwissen basiert. Dass Klimaschutz, der von der großen Breite der Öffentlichkeit gefordert wird und neue Stromleitungen zwei Seiten einer Medaille sind, ist den Meisten nicht klar. Durch die Offenlegung des Zusammenhangs Klimaschutz-Stromnetze könnte dieser verringert, aber kaum komplett überwunden werden. Die möglicherweise einzige Lösung dieses Problems wäre, die neuen Verbindungen als Erdkabel zu verlegen, was allerdings deutlich teurer wäre (3- bis 5-mal teurer als Freileitungen).

Die Frage stellt sich, ob es politisch realistisch ist, Stromleitungen durch Europa zu fordern, da es schon jetzt problematisch ist, einfache Kuppelstellen zwischen den nationalen Strommärkten zu bauen. Die Arbeit mit dem gesamteuropäischen Strommarkt schreitet jedoch auf europäischer Ebene voran. Die Vereinigung der europäischen Strommärkte ist abzusehen, es ist nur unsicher, wie viel Zeit vergeht bis dies geschieht und wie die genauen Rahmenbedingungen aussehen werden. So lange aber der europäische Markt fragmentiert ist und die nationalen Großkonzerne grenzüberschreitende Hochspannungsleitungen blockieren, wird es schwierig, eine internationale HGÜ-Leitung zu bauen. Die Vereinigung der europäischen Strommärkte, sei es ganz Europa auf einmal oder die schrittweise Vereinigung durch die Entstehung kleinerer, regionaler Märkte, würde dies erheblich erleichtern. Die Übertragung der Hochspannungsnetze an einen europäischen Betreiber könnte dies noch stärker erleichtern.

Die politische Durchführbarkeit eines großangelegten Stromimports aus Nicht-EU-Ländern und einer Übertragung quer durch Europa ist eine sehr komplexe Frage. Der Entwurf der neuen Erneuerbaren-Energien-Richtlinie der EU vom Januar 2008 sieht die Möglichkeit einer Anrechnung solcher Importe, auch aus Nicht-EU-Ländern, für das Erneuerbare-Energienziel des Empfängerlandes vor. Dies soll in einem europaweiten Handel mit einer Art grünen Zertifikaten, „Guarantees of Origin“ (GOs), handgehabt werden (Europäische Kommission 2008). Die Debatte über diese GOs läuft zurzeit (z.B. EurActiv 2008), es ist jedoch wahrscheinlich, dass eine solche Importmöglichkeit auch in der endgültigen Fassung der EU-Direktive enthalten ist. Dies wird Pläne in verschiedenen Mitgliedsstaaten hervorrufen, Teile der Erneuerbaren-Ziele bis 2020 durch Importe zu decken, was in den kommenden Jahren die Frage nach der Übertragung von erneuerbarem Strom über sehr lange Strecken auf die energiepolitische Tagesordnung bringen wird.

Neben den hier angesprochenen Fragen zum Netzausbau ist dabei die Frage der Investitionssicherheit für die Kraftwerksinvestoren in den nordafrikanischen Ländern die wichtigste Frage. Die Investitionssicherheit der im Ausland zu betätigenden Investitionen wird oft als zu niedrig angesehen, und dieses Risiko wird durch die Größe der benötigten Investitionen in Wind- oder Solarkraftwerken verstärkt. Durch den ökonomischen Fortschritt und die politische Stabilisierung der nordafrikanischen Länder, sowie die engere Anbindung an Europa (z.B. durch die Freihandelsabkommen, die in den kommenden Jahren implementiert werden sollen) wird sich die Sicherheit der Investoren erhöhen. Das Investitionsrisiko in Nordafrika wird mit großer Wahrscheinlichkeit aber auch in Zukunft als höher als das Risiko in Europa angesehen werden.

Politisch problematisch könnte die durch Stromimporte steigende Importabhängigkeit werden. Allerdings ist die Energieimportabhängigkeit der EU bereits heute hoch (etwa 40% bei Kohle, bei Erdgas 60% und Uran noch höher) und der Trend zeigt eine steil anwachsende Importabhängigkeit (Eurostat 2008:13; DG-TREN 2006:26). Die hier diskutierten Strommengen, sind bislang jedoch zu klein um ernsthaft problematisch zu werden. Sollte sich die EU oder sollten sich einzelne Mitgliedsstaaten dazu entschließen im großen Stil erneuerbaren Strom zu importieren, ist dies jedoch eine Frage die diskutiert werden muss. Generell gilt, dass eine Importabhängigkeit von erneuerbarem Strom nicht problematischer ist als eine Importabhängigkeit von den für die Stromerzeugung benötigten Brennstoffen Öl, Gas oder Uran. Da diese Brennstoffimporte durch erneuerbare Stromimporte langfristig ersetzt werden, steigt in diesem Fall nicht die totale Importabhängigkeit, sie verschiebt sich lediglich von Ländern wie Russland und Saudi-Arabien zu z.B. Marokko und Algerien. Das Importabhängigkeitsproblem ist deshalb abzuwägen gegen das Problem der CO₂-Emissionen, das durch Stromimporte erneuerbaren Stroms erheblich gemildert werden kann, und der reduzierten Abhängigkeit von anderen ausländischen Energieressourcen. Die wahre politische Entscheidung ist deshalb, ob man eine fortgesetzte Energieimportabhängigkeit akzeptieren kann, um die CO₂-Emissionen drastisch zu senken.

4 Gesamtabschätzung von Meseberg-Plus

Die in Kapitel 3 beschriebenen Ergebnisse berücksichtigten zum Teil nicht die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Maßnahmen, insbesondere in den Endenergiesektoren. Außerdem fehlten die Angaben zu den jeweils verbleibenden Energiemengen in den Sektoren in einer energiewirtschaftlich leicht verständlichen Form. Dieses Kapitel beschreibt die Integration aller Maßnahmen, sowohl des Meseberg-Programms (Kapitel 4.1) als auch weitergehender Maßnahmen, um die Plausibilität und Machbarkeit eines Treibhausgas-Reduktionszieles von 40% zu prüfen (Kapitel 4.2). Schließlich werden die makro-ökonomischen Implikationen einer derartigen energie- und klimapolitischen auf Wachstum, Beschäftigung und Investitionen beruhenden Entwicklung anhand eines makroökonomischen Modells analysiert und kommentiert (Kapitel 4.3).

4.1 Gesamtergebnisse für die Meseberg-Maßnahmen bis 2020

Technischer Fortschritt – auch bei Energieeffizienz und Brennstoff-Substitution - erfolgt bei Neu- und Reinvestitionen; ein gewisser Anteil geschieht auch ohne jegliche energie- und klimapolitischen Eingriffe durch neue technische Kompetenzen und organisatorische Verbesserungen „autonom“. Dieser autonome technische Fortschritt ist abgebildet in einer energiewirtschaftlichen Referenz-Entwicklung, die hier auf das „Ohne Maßnahmen“-Szenario der Politik-Szenarien IV zurückgreift (Fraunhofer-ISI et al. 2008b; vgl. Tabelle 4-1). Demnach würde der Endenergiebedarf zuzüglich des Energiebedarfs des Umwandlungssektors (Raffinerien, Kokereien, etc) und für Transportverluste – aber ohne den Eigenbedarf der Kraftwerke – bei etwa 10 000 PJ ab etwa 2010 stagnieren und sich bis 2030 kaum verändern; d.h. das zusätzliche Wirtschaftswachstum würde an 2010 durch den autonomen technischen Fortschritt und die heute bestehenden energie- und klimapolitischen Maßnahmen nicht mehr zu einem weiteren Anstieg des Energiebedarfs in Deutschland (ohne den Brennstoffbedarf für thermische Kraftwerke) führen.

Auch die Treibhausgas-Emissionen Deutschlands würden in dieser Referenz-Entwicklung insgesamt bis 2020 auf dem heutigen Niveau von 981 Mio. t CO_{2eq} stagnieren und sich auch bis 2030 kaum verändern.

Die Umsetzung des Meseberg-Programms, wie es in den einzelnen Maßnahmen zu den Programmpunkten in Kapitel 3 definiert wurde, führt dann im energiewirtschaftlichen Gesamtbild zu folgendem Ergebnis (vgl. Tabelle 4-2).

- Der *Nettostrombedarf* (ohne Eigenbedarf der Kraftwerke) stagniert zunächst auf dem heutigen Niveau bis und sinkt dann bis 2020 um 8% auf knapp 1 890 PJ (524 TWh), um anschließend in der folgenden Dekade weiter um etwa 9% abzunehmen auf 1712 PJ (476 TWh). Bezogen auf die Referenzentwicklung beschleunigt sich der stromsparende technische Fortschritt um etwa 1%, ein plausibles Ergebnis angesichts der zusätzlich durch das Meseberg-Programm ergriffenen Maßnahmen.
- Der *Brennstoff-, Kraftstoff- und Fernwärmebedarf* sinkt bereits ab 2010 bis 2020 mit etwa 8% auf gut 7 000 PJ und dann in der folgenden Dekade um weitere 7% auf 6 570 PJ. Der Zusätzliche Effizienzfortschritt durch die Meseberg-Maßnahmen beträgt somit rund 0,8% pro Jahr (ohne Brennstoffbedarf für die thermischen Kraftwerke).

Insgesamt vermindert das Meseberg-Programm den Endenergiebedarf zuzüglich der Verteilungsverluste und des Energiebedarfs des Umwandlungssektors (ohne Energieeinsatz in den Kraftwerken) um 8% auf etwa 8 930 PJ in der kommenden Dekade bis 2020 und um weitere 7% auf gut 8 283 PJ in der Dekade 2020 bis 2030. Bezogen auf die Referenzentwicklung vermindert sich der Nettoenergiebedarf um 11% im Jahre 2020 und um etwa 16% im Jahre 2030. Dieses Ergebnis bedeutet eine Beschleunigung des energiesparenden technischen Fortschritts durch das Meseberg-Programm um 1% pro Jahr, ein Ergebnis, das angesichts der unterstellten Maßnahmen möglich erscheint.

**Tabelle 4-1: Energiebedarf ohne Maßnahmen des Meseberg-Programms,
2005-2030**

Gesamt Energiebedarf Politik-Sz. IV - „Ohne-Maßnahmen“-Szenario	Einheit	2005	2010	2015	2020	2030
Haushalte (HH) + Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)	[PJ]	4 164	4 412	4 431	4 448	4 417
Verkehr	[PJ]	2 839	2 939	3 046	3 117	3 045
Industrie	[PJ]	2 323	2 239	2 178	2 113	2 044
Summe Endenergiebedarf	[PJ]	9 326	9 590	9 655	9 678	9 506
Umwandlungssektor außer Kraftwerke, mit sonstigen Verlusten	[PJ]	418	443	400	388	397
Summe Nettoenergiebedarf mit Umwandlungssektor (ohne Kraftwerke)	[PJ]	9 744	10 033	10 055	10 066	9 903
	[TWh]	2 707	2 787	2 793	2 796	2 751

Gesamtstrombedarf Politik-Sz. IV - „Ohne-Maßnahmen“-Szenario	Einheit	2005	2010	2015	2020	2030
Haushalte (HH) + Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)	[PJ]	1 006	1 036	1 043	1 042	996
Verkehr	[PJ]	130	127	130	130	133
Industrie	[PJ]	761	771	774	777	794
Summe Strombedarf (Endenergie)	[PJ]	1 897	1 934	1 947	1 949	1 923
Umwandlungssektor außer Kraftwerke, mit sonstigen Verlusten	[PJ]	148	151	152	152	150
Summe Nettostrombedarf (ohne Kraftwerke)	[PJ]	2 045	2 085	2 099	2 101	2 073
	[TWh]	568	579	583	584	576

Quelle: Fraunhofer-ISI et al. (2008b), Berechnungen des ISI

**Tabelle 4-2: Energiebedarf mit Maßnahmen des Meseberg-Programms,
2005-2030**

Gesamt Energiebedarf - Meseberg Programm	Einheit	2005	2010	2015	2020	2030
Haushalte (HH) + Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)	[PJ]	4 164	4 206	3 931	3 683	3 180
Verkehr	[PJ]	2 839	2 853	2 757	2 856	2 896
Industrie	[PJ]	2 323	2 231	2 113	2 010	1 855
Summe Endenergiebedarf	[PJ]	9 326	9 291	8 801	8 549	7 913
Umwandlungssektor außer Kraftwer- ke, mit sonstigen Verlusten	[PJ]	415	414	393	381	351
Summe Nettoenergiebedarf - Meseberg Programm (ohne Kraft- werke)	[PJ]	9 741	9 705	9 194	8 930	8 283
	[TWh]	2 706	2 696	2 554	2 481	2 301
Reduktion der Meseberg - Maßnah- men	[PJ]	3	328	861	1 136	1 620
Reduktion der Meseberg - Maßnah- men	[TWh]	1	91	239	316	455
Gesamt Strombedarf - Meseberg Programm	Einheit	2005	2010	2015	2020	2030
Haushalte (HH) + Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)	[PJ]	1 006	1 001	931	871	728
Verkehr	[PJ]	130	127	130	133	151
Industrie	[PJ]	761	770	760	745	710
Summe Strombedarf (Endenergie)	[PJ]	1 897	1 898	1 821	1 749	1 589
Umwandlungssektor außer Kraftwer- ke, mit sonstigen Verlusten	[PJ]	148	148	142	136	123
Summe Nettostrombedarf - Meseberg Programm (ohne Kraft- werke)	[PJ]	2 045	2 046	1 964	1 886	1 712
	[TWh]	568	568	545	524	476
Reduktion der Meseberg- Maßnahmen	[PJ]	0	39	135	215	361
Reduktion der Meseberg- Maßnahmen	[TWh]	0	11	38	60	100

Quelle: Berechnungen des ISI

Das Meseberg-Programm führt nach den Berechnungen dieser Analyse, die außer den in der IEKP enthaltenen Analyse alle inländisch wirksamen Emissionswirkungen umfasst,

zu einer weiteren Verminderung der Treibhausgase um gut 170 Mio. t CO_{2eq} bis zum Jahre 2020. Nicht enthalten sind darin die Methan- und N₂O-Emissionen, die bei den verminderten Verbrennungsprozessen in geringem Umfang anfallen; sie wurden nicht bei den Meseberg-Maßnahmen sondern als Zusatzmaßnahme behandelt (siehe Kap. 3.4.2). Der Vergleich mit den Ergebnissen der IEKP-Studie (IEKP 2008) zeigt einerseits geringe Abweichungen, die entweder auf eine etwas andere Maßnahmenkombination der Meseberg-Programmpunkte zurückzuführen sind, oder auf eine verfeinerte Betrachtung der Maßnahmenwirkung, die verbliebene Doppelzählungen herausnimmt.

Die in dieser Analyse zusätzlichen Punkte des Meseberg-Programms, die in der IEKP-Analyse nicht behandelt wurden (Maßnahmen 4, 9, 17, 18, 23 und 26) führen zu einem zusätzlichen Bruttoverminderungspotential von rund 33 Mio. t CO_{2eq}. Dabei kommt der größte Beitrag von den fluorierten Treibhausgasen mit 17,5 Mio. t CO_{2eq}, wobei die Ergebnisse von den Politik-Szenarien „mit Maßnahmen“ übernommen wurden (vgl. Tabelle 4-3).

Insgesamt erreicht das Meseberg-Programm bis 2020 eine Reduktion gegenüber 2008 von 173 Mio. t CO_{2eq}, d.h. etwa 14,1 Prozentpunkte, die sich mit den bis 2008 erreichten Verminderungen (20,1%) **gegenüber 1990 zu einer Gesamtreduktion von rund 34,2%** summieren (vgl. Tabelle 4-3). Damit ist das Ziel der Bundesregierung, die Treibhausgas-Emissionen von 1990 um insgesamt 40% zu reduzieren, noch nicht ganz erreicht. Deshalb wurden weitere mögliche Maßnahmen identifiziert und auf ihre Wirkung hin geprüft, um die Machbarkeit des Reduktionsziels für 2020 zu prüfen. In geringem Umfang werden durch die Maßnahmen im Luft- und Schiffsverkehr auch Emissionsminderungen im Ausland erzielt (bis 2020: ca. 2,4 Mio. t CO_{2eq}; vgl. Tabelle 4-3). Bis zum Jahre 2030 wirken die meisten Maßnahmen durch die weiteren Investitionen im Re-Investitionszyklus weiter, so das mindestens von den energiebedingten Treibhausgasreduktionen eine weitere Abnahme um etwa 1% pro Jahr erwartet werden kann.

Tabelle 4-3: Treibhausgasminderungen, induzierte Investitionen und spezifische Vermeidungskosten des Meseberg-Programms bis 2020

Emissionsbasis 1990: 1 228,1 Mio. t CO _{2eq}		Reduktion 1990 bis 2007: 20,1%	
Emissionsbasis 2007: 981,3 Mio. t CO _{2eq}			
Maßnahme	Emissionsreduktion [Mio. t CO _{2eq}]	Bruttoinvestitionen 2008-2020 [Mrd. €]	Spezifische Vermeidungskosten in 2020 [€/t CO _{2eq}]
Übergreifende Maßnahmen			
Gebäudemaßnahmen	48	150	- 80
davon Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz	15	39	73
Energie-Management Industrie	8,9	7,2	- 80
Energie-Management-GHD	2,3	3,3	- 47
Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz	20	- 0,3	9
Private Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen			
Intelligente Messverfahren Strom	3,4	5,0	-150
Energieeffiziente Produkte	8,2	0,8	- 330
Maßnahmen im Verkehr			
CO ₂ -Strategie PKW (mit Hybridfahrzeugen)	17	60	- 130
Ausbau Biokraftstoffe	4,6	1,3	170
Umstellung KFZ-Steuer auf CO ₂ -Basis	3,1	0,0	- 470
Verbrauchskennzeichnung für PKW	3,5	0,0	- 450
Elektromobilität (ohne Hybridfahrzeugen)	1,3	2,5	290
LKW-Maut besser	0,5	0,5	78
Flugverkehr (Ausland: 1,9 Mio. t)	0,4	2,7	- 95
Schiffsverkehr (Ausland: 0,5 Mio. t)	-	0,4	- 390
Maßnahmen in der Industrie			
Fluorierte THG (Wirkung: 17,5 Mio. t)	- 1,3	12	120
Maßnahmen im Umwandlungssektor			
Stromerzeugung REG	50	67	45
Biogaseinspeisung	3,5	1,1	55
Summe Meseberg-Programm	173	314	- 38 ¹
Reduktion Meseberg-Programm ab 2008 (Basis 1990)	14,1%		
Reduktion 1990 bis 2020	34,2%		

1) Für die Berechnungen der durchschnittlichen Vermeidungskosten wurde mit der Gesamtwirkung der Maßnahme „Fluorierte THG“, 17,5 Mio. t, gerechnet.

1) Für die Berechnungen der durchschnittlichen Vermeidungskosten wurde mit der Gesamtwirkung der Maßnahme „Fluorierte THG“, 17,5 Mio. t, gerechnet.

Quelle: Berechnungen des ISI, BSR, PIK und ECF

Die durch die Meseberg-Programmpunkte induzierten Brutto-Investitionen belaufen sich in den 12 Jahren auf insgesamt gut 310 Mrd. €, die sich ab 2015 bei rund 35 Mrd. € pro Jahr bewegen. Einige Maßnahmen haben keine oder sehr geringe Investitionen, weil sie entweder organisatorische Maßnahmen auslösen oder hohe Betriebskosten (z.B. Pelletsbedarf, Biokraftstoffe), aber keine oder geringe direkten Investitionen. Die indirekten Investitionen werden im makro-ökonomischen Modell berechnet (vgl. Kapitel 4.3). Die Investitionen in Energieeffizienz und erneuerbare Energien bewirken auch vermiedene Investitionen in neue Kraftwerks- und Raffinerie-Kapazitäten, in Kessel-, Heizungs- und Druckluftanlagen, Motoren sowie andere Energiewandler; diese wurden zum Teil errechnet (z.B. im Kraftwerksbereich mit etwa 3 Mrd. € pro Jahr), zum Teil mussten sie geschätzt werden. Insgesamt wurden vermiedene jährliche Investitionen von 10 Mrd. € ab 2015 unterstellt.

4.2 Gesamtergebnisse für zusätzliche Maßnahmen in 2020

Als Zusatzmaßnahmen werden solche Maßnahmen bezeichnet, die CO₂-Einsparungen ermöglichen, die über die im Meseberg-Programm angestrebten Maßnahmen hinausgehen. Hierbei werden weitere Maßnahmen in mehreren Sektoren betrachtet. Im Ergebnis der Umsetzung werden Treibhausgas-Minderungen von etwa 74 Mio. t CO_{2eq} bei notwendigen Brutto-Investitionen von etwa 84 Mrd. € möglich (vgl. Tabelle 4-5).

Im Energiebereich tragen die beschleunigte Gebäudesanierung, die diversen Maßnahmen in Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, die mit dem Schlagwort „Ökodesign und Innovationsoffensive“ bezeichnet wurden, die Dienstwagen-VO und die Leichtlauföle zu einer weiteren Verminderung des Nettoenergiebedarfs bis 2020 um 10% auf 8 600 PJ und um weitere 9% auf rund 7 760 PJ in 2030 (vgl. Tabelle 4-4). Eine nicht unerhebliche Reduktion der Treibhausgase wird auch durch die Verminderung der nicht fluorierten Nicht-CO₂-Treibhausgase mit 8,5 Mio. t CO_{2eq} erreicht, die meistens aus der Industrie, dem Umwandlungssektor und der Landwirtschaft stammen (vgl. Tabelle 4-5). Allerdings sind diese Maßnahmen so vielfältig und zahlreich, dass hierzu zwar Investitionen geschätzt, aber keine Vermeidungskosten erhoben bzw. geschätzt werden konnten, weil die sehr verschiedenen Vermeidungsoptionen auch Veränderungen

gen der Betriebskosten nach sich ziehen werden, die im Rahmen dieser Arbeit nicht recherchiert werden konnten.

Tabelle 4-4: Energiebedarf mit zusätzlichen Maßnahmen zum Meseberg-Programms, 2005-2030

Gesamt Energiebedarf - Meseberg Programm + zusätzliche Maßnahmen	Einheit	2005	2010	2015	2020	2030
Haushalte (HH) + Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)	[PJ]	4 164	4 175	3 858	3 573	2 995
Verkehr	[PJ]	2 839	2 801	2 693	2 784	2 833
Industrie	[PJ]	2 323	2 190	2 020	1 867	1 585
Summe Endenergiebedarf	[PJ]	9 326	9 166	8 571	8 224	7 413
Umwandlungssektor außer Kraftwer- ke, mit sonstigen Verlusten	[PJ]	415	414	393	381	351
Summe Nettoenergiebedarf - Meseberg-Programm + zusätzliche Maßnahmen (ohne Kraftwerke)	[PJ]	9 741	9 580	8 964	8 605	7 764
	[TWh]	2 706	2 661	2 490	2 389	2 157
Reduktion der Zusätzlichen Maß- nahmen	[PJ]	0	124	230	325	519
Reduktion der Zusätzlichen Maß- nahmen	[TWh]	0	35	64	90	144
Gesamt Strombedarf - Meseberg Programm + zusätzliche Maßnahmen	Einheit	2005	2010	2015	2020	2030
Haushalte (HH) + Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)	[PJ]	1 006	1 000	926	859	697
Verkehr	[PJ]	130	127	130	133	151
Industrie	[PJ]	761	739	723	703	600
Summe Strombedarf (Endenergie)	[PJ]	1 897	1 866	1 779	1 695	1 448
Umwandlungssektor außer Kraftwer- ke, mit sonstigen Verlusten	[PJ]	148	146	140	133	116
Summe Nettostrombedarf - Meseberg Programm + zusätzliche Maßnahmen (ohne Kraftwerke)	[PJ]	2 045	2 012	1 919	1 828	1 564
	[TWh]	568	559	533	508	434
Reduktion der Zusätzlichen Maß- nahmen	[PJ]	0	35	45	58	148
Reduktion der Zusätzlichen Maß- nahmen	[TWh]	0	10	12	16	41

Quelle: Berechnungen des ISI

Die weiteren Maßnahmen sind bzgl. ihrer Wirkungen, der notwendigen Voraussetzungen und ihrer Realisierbarkeit sehr unterschiedlich. So sind Maßnahmen wie z.B.:

- *Anreize Bio-Landwirtschaft*, die *Dienstwagen-VO* oder die *Verwendung von Leichtlaufölen* ohne Investitionen umsetzbar, wohingegen die Maßnahme *Beschleunigte Gebäudesanierung* mit erheblichen Investitionen, aber auch zusätzlichen Transaktions- und Programmkosten verbunden ist, um bestehende Widerstände und Bedenken der Gebäudeeigner und der Lobbygruppen im PKW-Bereich zu überwinden. Ähnliches gilt für die *Ökodesign und Innovationsoffensive* hinsichtlich der Einflüsse von Bedenkenträgern.
- Auch die Vermeidungskosten der Maßnahmen differieren erheblich. Die *Beschleunigung der Gebäudesanierung* generiert noch geringe monetäre Erträge für den Investor. Durch die *Anreize Bio-Landwirtschaft* muss man mit zusätzlichen Aufwendungen für den Verbraucher rechnen, diese resultieren aus Mehrkosten im ökologischen Landbau. Alle drei weiteren Maßnahmen zur emissionsarmen Stromerzeugung (*Braunkohle-Kraftwerke*, *CCS-Anlagen* und weiterer *Offshore-Wind mit HGÜ*) weisen Vermeidungskosten im Umfang von 15 bis 50 € je t vermiedenes CO₂ auf. Die *Ökodesign-Richtlinie* und *Innovationsoffensive* lassen im Durchschnitt nur noch geringe Erträge erwarten.
- Die Determinanten, die die Umsetzbarkeit der Maßnahmen bestimmen, differieren ebenfalls. Hier werden politische Information und Überzeugung der Investoren, der Autofahrer, der Verbraucher und Zielgruppen in der Wirtschaft notwendig. Um diese Widerstände zu vermindern werden auch finanzielle Anreize und eine Vielzahl von Kommunikationsmaßnahmen nicht nur der Bundesregierung, sondern der Selbstorganisationen der Wirtschaft und der Zivilgesellschaft erforderlich sein. Für die Maßnahme *beschleunigte Gebäudesanierung*, beispielsweise, werden zusätzliche finanzielle Mittel z.B. über die KfW erforderlich, gegebenenfalls eine Ausweitung gesetzlicher Vorschriften für Renovierungen im Gebäudebestand und Initiativen der betroffenen Verbände und der Banken. Für die Maßnahmen *drei neue Braunkohle-*

Kraftwerke und *die CCS-Anlagen* wird man neben Gesprächen mit den betroffenen Unternehmen viel Kommunikationsarbeit leisten, um die Sinnhaftigkeit und den Risikoabgleich derartiger Maßnahmen so zu kommunizieren, dass diese Investitionen auf Akzeptanz stoßen.

- Da einerseits mit den definierten energie- und prozessorientierten Minderungsmaßnahmen das Reduktionsziel der Bundesregierung nicht ganz erreicht würde und deren Vermeidungskosten steigen, und andererseits es unklug wäre, *rentable Effizienz- und Substitutionspotentiale energieintensiver Materialien* nicht zu beachten, wurde davon ausgegangen, dass ab 2010 knapp ein Drittel vorhandener Materialeffizienz-Potentiale in Deutschland realisiert werden. Diese wurden mit mindernden Wirkungen auf den Primärenergiebedarf mit 0,5% pro Jahr oder 3,5 Mio. t CO_{2eq} pro Jahr ermittelt (Enquete-Kommission 2002, Schön et al. 2004, ADL, Fraunhofer-ISI, Wuppertal-Institut 2005). Hiervon werden 1 Mio. pro Jahr zu realisieren sein, was sich auf etwa 10 Mio. t CO_{2eq} bis 2020 summiert. Die Investitionen hierzu konnten im Rahmen dieser Arbeiten nicht ermittelt werden, dürften aber in der gleichen Höhe liegen wie die rentablen Energieeffizienzpotentiale.

Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass jede der vorgeschlagenen Maßnahmen in der Lage sein wird, einen Beitrag zur Reduktion von CO₂- oder Treibhausgas-Emissionen zu erbringen. Die Heterogenität der Maßnahmen und die Möglichkeit einer Skalierung (Ausweitung der Maßnahme bzw. Reduktion) ermöglichen es, sich ergebende politische Handlungsspielräume zu nutzen, wo die betroffenen Investoren oder Verbrauchergruppen ihre Akzeptanz signalisieren. In jedem Fall wird es eine große Herausforderung an viele Investoren und Verbrauchergruppen sowie deren Vertretungen sein, das technisch-wirtschaftliche Potential auch erreichen zu wollen und auch zu realisieren. Immerhin geht es um Investitionen von knapp 400 Mrd. € innerhalb von 12 Jahren, die im Durchschnitt rentabel sind und deren ökonomische Auswirkungen im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

Tabelle 4-5: Treibhausgasminderungen, induzierte Investitionen und spezifische Minderungskosten weiterer Maßnahmen bis 2020

Emissionsbasis 1990: 1 228,1 Mio. t CO _{2eq}		Reduktion 1990 bis 2007: 20,1%	
Emissionsbasis 2007: 981,3 Mio. t CO _{2eq}		Reduktion Mesebergprogramm: 14,1%	
Zusätzliche Maßnahmen	Emissionsreduktion [Mio. t CO _{2eq}]	Bruttoinvestitionen 2008-2020 [Mrd. €]	Spezifische Vermeidungskosten in 2020 [€/t CO _{2eq}]
Übergreifende Maßnahmen			
Beschleunigte Gebäudesanierung	4,2	19	-10
Öko-Design und Innovationsoffensive Industrie	12	15	-15
Öko-Design und Innovationsoffensive GHD	3,0	5,2	-5
Materialeffizienz	10	k.A.	k.A.
Private Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen			
Anreize Bio-Landwirtschaft	1,8	0,0	10
Maßnahmen im Verkehr			
Änderung Dienstwagen-VO	2,6	0,0	-560
Leichtlauföle verpflichtend (PKW)	2,5	11 ¹	-190
Maßnahmen in der Industrie			
Nicht fluoriierte Nicht-CO ₂ -Treibhausgase	8,5	20	k.A.
Maßnahmen im Umwandlungssektor			
Drei moderne Braunkohlekraftwerke	7,4	2,3	15
Zusätzlich CCS für die drei Braunkohlekraftwerke	13	5,7	50
HGÜ-Wind-Nordsee (zusätzlich 3 GW)	9,0	6,0	29
Summe zusätzliche Maßnahmen	74	84	-21²
Reduktion zusätzliche Maßnahmen	6,0%		
Summe (Meseberg & zusätzl. Maßnahmen)	247	398	-34
Reduktion 1990 – 2020	40,2%		

1) Keine Investitionen, sondern Kosten der Leichtlauföle

2) Die Maßnahmen „Nicht fluoriierte Nicht-CO₂-Treibhausgase“ sowie „Materialeffizienz“ sind in der Tabelle ausgewiesen, sind aber nicht in die Berechnung der spezifischen Vermeidungskosten miteinbezogen

Quelle: Berechnungen des ISI, BSR, PIK und ECF

4.3 Makroökonomische Wirkungen eines Meseberg-Plus-Programms

Zunächst werden in einem ersten Teilkapitel die relevanten makroökonomischen Wirkungsketten betrachtet (Kapitel 4.3.1) und im Anschluss daran die Ergebnisse der makroökonomischen Simulationen mit dem ASTRA-Modell dargestellt und interpretiert (Kapitel 4.3.2). Dabei sei betont, dass die makroökonomischen Ergebnisse durch mehrere interagierende Wirkungsmechanismen hervorgerufen werden. Sie sind die Ursache, dass die mit den Klimaschutzmaßnahmen verbundenen wirtschaftlichen Impulse positive oder negative gesamtwirtschaftliche Wirkungen nach sich ziehen. Im nächsten Abschnitt werden die üblicherweise betrachteten Preis- und Kosteneffekte sowie die Nachfragestruktur und die Einkommenskreislaufeffekte behandelt. Darauf aufbauend werden zu zwei besonders relevanten Teilaspekten – den Produktivitätswirkungen und den First-Mover-Vorteilen bzw. Vorreitermärkten – weitergehende Überlegungen angestellt. Diese sind unter Innovationsaspekten von besonderer, aber bisher wenig beachteter Bedeutung für die Größenordnung der makroökonomischen Wirkungen.

4.3.1 Betrachtung relevanter makroökonomischer Wirkungsketten

Preis-, Kosten- und Nachfrageeffekte

Die Preis- und Kosteneffekte stehen im Vordergrund der neoklassischen Theorie. Wenn die Klimaschutzmaßnahmen einzelwirtschaftlich rentabel sind, kommt es zu einer gesamtwirtschaftlichen Kostenentlastung und damit tendenziell zu positiven Effekten bei Beschäftigung und gesamtwirtschaftlicher Produktion. Führen diese Maßnahmen hingegen zu einer Erhöhung der Kostenbelastung, sind tendenziell negative Abweichungen bezüglich gesamtwirtschaftlicher Produktion und Beschäftigung zu erwarten, die durch die im internationalen Preiswettbewerb verschlechterte Wettbewerbssituation noch verstärkt werden. Insbesondere in Zusammenhang mit der Einführung einer ökologischen Steuerreform werden auch stärker gesamtwirtschaftliche Preismechanismen diskutiert, die Faktorsubstitutionen und Veränderungen in den volkswirtschaftlichen Zusatzkosten der Besteuerung (excess burden) auslösen. Sie sind aber für die hier analysierten Maßnahmenpakete des Meseberg-Programms von nachrangiger Bedeutung.

Die Klimaschutzmaßnahmen bewirken auch indirekte Effekte auf die Kosten, indem sie die Innovationstätigkeit beeinflussen. In der Innovationsforschung ist es unbestritten, dass der steigende Einsatz von Technologien auf Innovationsrichtung und -geschwindigkeit einer Volkswirtschaft zurückwirkt. Maßnahmen zur Steigerung der Diffusion emissionsarmer Technologien wirken damit als nachfrageorientierte Innovationspolitik (vgl. Fraunhofer-ISI 2006; IEKP 2008). Dadurch kommt es zu Verbesserungen und Kostensenkungen bei den Klimaschutztechnologien selbst, hervorgerufen durch Skalen- und Lerneffekte bei der Produktion und der forcierten Anwendung der Klimaschutztechnologien.

Die Kosteneffekte werden in diesem Projekt durch eine sorgfältige Erhebung auf technologischer Basis erhoben (Bottom-up Approach). Sie gehen als Dateninput in die Modellierung der Wirkungen mit dem ASTRA-Modell ein. Sie beinhalten auch die zuletzt erörterten Lern-Effekte, die im Rahmen der Energiemodellierung durch die Verwendung von Kosten-Degressionskurven berücksichtigt werden.

Bei den Nachfragestruktureffekten dürfen nicht nur die *direkten Nachfrageeffekte* berücksichtigt werden, sondern auch die *indirekten Effekte* müssen mit einbezogen werden. Sie entstehen, da zur Bereitstellung der jeweiligen Nachfrage zahlreiche Vorleistungen aus anderen Branchen notwendig sind. Bei den direkten Nachfragestruktureffekten müssen Effekte auf der Konsum- und der Investitionsseite unterschieden werden:

- Konsumseitig führen die veränderten Energiekosten zu einer Anpassung der Produktpreise in Abhängigkeit vom Energieinput eines Produktes. Die jeweiligen Nachfrageelastizitäten führen dann zu einer Anpassung der Nachfragestruktur der privaten Haushalte (Substitutionseffekt).
- Investitionsseitig speist sich der Nachfragestruktureffekt aus zwei Quellen: erstens, liefern die Bottom-up-Analysen der Technologien ein verändertes sektorales Investitionsmuster aufgrund der Einführung neuer/effizienterer Technologien, und zweitens ergibt sich aus dem veränderten Konsumverhalten (Substitutionseffekt) ein veränderter Investitionsbedarf.

Zusätzlich kann – speziell im Hinblick auf die Beschäftigungswirkung – als weiterer Teileffekt zum Tragen kommen, dass die durch die Strategien beeinflussten Sektoren eine deutlich ausgeprägte unterschiedliche Arbeitsintensität aufweisen. Die Nachfragestruktureffekte lassen für Deutschland tendenziell positive Effekte erwarten, da im Saldo durch die positiven Impulse eher inlandsbasierte und arbeitsintensivere Sektoren begünstigt werden (vgl. IEKP 2008 sowie Abbildung 4-1).

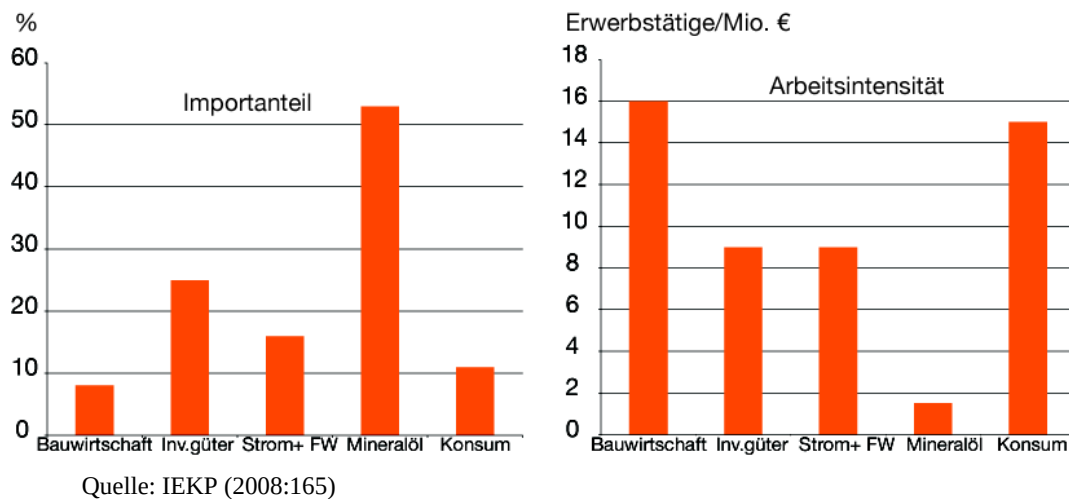


Abbildung 4-1: Importanteile und Arbeitsintensitäten von unterschiedlichen Wertschöpfungsketten (kumulierte direkte und indirekte Effekte)

Gesamtwirtschaftlich bedeutsame Unterschiede auf der Nachfrageseite können ebenfalls ausgelöst werden, wenn die Klimaschutzmaßnahmen zu deutlichen Änderungen in den importierten Güterströmen führen.

Die beschriebenen Nachfrage- und Nachfragestruktureffekte stoßen die bei einer ökonomischen Analyse der Wachstumsimpulse eines Klimaschutzprogrammes wichtigen Multiplikator- und Akzeleratoreffekte an. Sie werden typischerweise durch die in makroökonomischen Modellen abgebildeten Wirkungszusammenhänge beschrieben.

Produktivitätswirkungen

Neben den gerade skizzierten Kosten- und Nachfrageeffekten können von der Investition in und Diffusion von Klimaschutztechnologien zusätzlich Auswirkungen auf die Modernisierung des Produktionsapparates ausgehen. Diese beiden Effekte werden im

Folgenden näher betrachtet. Bei den Auswirkungen auf die *Modernisierung des Produktionsapparates* der Gesamtwirtschaft und damit auf die Produktivitätsentwicklung können unterschiedliche Wirkungsrichtungen auftreten (vgl. Tabelle 4-6):

- Wenn die Klimaschutztechniken selbst keine produktiven Wirkungen besitzen, würde bei konstantem Nettoinvestitionsvolumen eine Verdrängung von produktiven Investitionen der Unternehmen erfolgen. Durch ein derartiges „technologisches crowding out“ würde die Produktivitätsentwicklung gemindert. Gesamtwirtschaftlich ließe sich dieser Effekt allerdings dann vermeiden, wenn die Investitionen in die Klimaschutztechniken vollständig aus einer Erhöhung der Nettoinvestitionen alimentiert werden.
- Wenn die Klimaschutztechniken hingegen selbst Bestandteil von produktiven Investitionen sind, d.h. selbst eine produktivitätssteigernde Wirkung aufweisen (z.B. typischer Weise bei zusätzlicher Prozessregelung mit Produktivitätswirkungen bei Kapital und Arbeit, Verminderung von Ausschuss), tragen sie selbst - neben der Verminderung der CO₂-Emissionen - auch zu einer Erhöhung der einzelwirtschaftlichen Produktivität bei. Wenn nun zusätzlich das Investitionsvolumen steigt, kann es sogar zu einem „technologischen crowding in“ kommen, d.h. die Klimaschutzmaßnahmen würden sogar die Modernisierung der Volkswirtschaft beschleunigen.
- Die produktive Wirkung der Klimaschutztechniken kann zwar auftreten, aber schwächer ausgeprägt sein als bei den „normalen“ Investitionen. Gleichzeitig kann es auch zu einer Steigerung der gesamtwirtschaftlichen Nettoinvestitionen kommen, die allerdings schwächer ausfällt als die Investitionen in die Klimaschutztechnologien. In diesen Fällen kann es ebenfalls zu einem schwach ausgeprägten crowding out oder crowding in produktiver Investitionen kommen.
- Wenn auf Grund des Zusammenspiels mit den übrigen Wirkungsmechanismen die Zunahme der Nettoinvestitionen stärker ausfällt als die erforderlichen Klimaschutzinvestitionen, kommt es in jedem Fall zu einem crowding in von produktiven Investitionen und einer Steigerung des Produktionspotentials. Die Größenordnung dieses Effekts hängt allerdings wiederum vom Charakter der Klimaschutzinvestitionen ab. Je stärker diese selbst eine produktive Wirkung aufweisen, desto höher fällt auch der Effekt aus.

Tabelle 4-6: Mögliche Ausprägungen der Auswirkungen von Klimaschutzmaßnahmen auf die gesamtwirtschaftliche Produktivitätsentwicklung

	Gesamtwirtschaftliches Nettoinvestitionsvolumen bleibt konstant	Gesamtwirtschaftliches Nettoinvestitionsvolumen steigt weniger als Klimaschutzinvestitionen	Gesamtwirtschaftliches Nettoinvestitionsvolumen steigt um den Betrag der Klimaschutzinvestitionen
Keine produktive Wirkung der Klimaschutztechnologien	Crowding out von produktiven Investitionen, Rückgang des Produktivitätsanstiegs	Schwach ausgeprägtes crowding out von produktiven Investitionen	Kein Unterschied gegenüber Referenzentwicklung
Teilweise produktive Wirkung der Klimaschutztechnologien	Schwach ausgeprägtes crowding out von produktiven Investitionen	Je nach Größenordnung schwach ausgeprägtes crowding in oder out	Schwach ausgeprägtes crowding in von produktiven Investitionen
gleiche produktive Wirkung der Klimaschutztechnologien wie sonstige Investitionen	Kein Unterschied gegenüber Referenzentwicklung	Schwach ausgeprägtes crowding in von produktiven Investitionen	Crowding in von produktiven Investitionen, Zunahme der Produktivitätsentwicklung

Insgesamt ergibt sich die gesamtwirtschaftliche Produktivitätswirkung der Klimaschutzmaßnahmen damit sowohl durch die einzelwirtschaftliche Produktivitätswirkung der eingesetzten Technologien als auch durch die Auswirkungen der Maßnahmen auf die makroökonomischen Aggregate, und hier insbesondere auf die Höhe der gesamtwirtschaftlichen Nettoinvestitionen. Da Klimaschutztechnologien zu einem größeren Teil produktionsintegrierten Charakter haben (insbesondere auf der Nutzenergieebene und der Materialeffizienz), kann davon ausgegangen werden, dass auch Klimaschutzmaßnahmen teilweise positive Produktivitätseffekte nach sich ziehen. Dies wird durch empirische Untersuchungen der zentralen Klimaschutztechnologien belegt (vgl. Walz 1999). Die Entwicklung des gesamtwirtschaftlichen Nettoinvestitionsvolumens wird durch das Zusammenspiel der unterschiedlichen Wirkungsmechanismen, insbesondere von Kosteneffekten einerseits und Akzeleratoreffekten andererseits geprägt, sie kann somit nicht a priori vorhergesagt werden.

Beide Effekte werden bei der Modellierung mit ASTRA berücksichtigt: Zum einen wird innerhalb des ASTRA-Modells den spezifischen Klimaschutzinvestitionen eine – wenn auch im Vergleich zu anderen Investitionen geringere – Produktivitätswirkung zugesprochen. Zum anderen ergibt sich die gesamtwirtschaftliche Nettoinvestition modellendogen aus der Wirkung der Impulse im Kontext des makroökonomischen Wirkungsgeflechts.

First-Mover-Advantage und Verbesserung der Lead-Markt-Faktoren

Eine forcierte Einführung und Diffusion von Klimaschutztechniken führt dazu, dass sich die betreffenden Länder frühzeitig auf die Bereitstellung von innovativen Technologien spezialisieren und damit ihre Wettbewerbsposition stärken („First-Mover-Advantage“). Die Ziele der EU-Nachhaltigkeitsstrategie, die High-Tech-Strategie der Bundesregierung oder die Initiativen des BMU hinsichtlich einer „ökologischen Industriepolitik“ beruhen alle auf der Logik der Erzielung von First-Mover-Vorteilen: Eine forcierte (nationale) Strategie im entsprechenden Technologie- und Politikfeld führt nach dieser Argumentation dazu, dass sich die Vorreiter-Länder frühzeitig auf die Bereitstellung der hierzu erforderlichen Güter spezialisieren. Bei einer nachfolgenden Ausweitung der internationalen Nachfrage nach diesen Gütern sind diese Länder dann auf Grund ihrer frühzeitigen Spezialisierung und des erreichten Innovationsvorsprungs in der Lage, sich im internationalen Wettbewerb durchzusetzen. Die Etablierung eines Pilot-Markts garantiert damit nicht automatisch, dass bei einem Nachziehen der Marktentwicklung im Ausland sich erhebliche Exportpotenziale für den „First-Mover“ realisieren lassen. Das im Inland etablierte Design der Technologien muss sich auch im Ausland durchsetzen, und die Produktion der Technologien gerade für den Auslandsmarkt muss auch langfristig im Inland verbleiben und nicht im Ausland angesiedelt werden. Hierfür ist die technologische Leistungsfähigkeit der betreffenden Technologien ein wichtiger Faktor. Für die Realisierung von First-Mover-Vorteilen ist es erforderlich, dass die heimischen Anbieter dauerhafte Wettbewerbsvorteile bei den Techniklinien aufweisen. Hier spielen die Bedingungen für die Etablierung so genannter Vorreitermärkte („Lead Markets“) eine wichtige Rolle (vgl. Meyer-Krahmer 2004; Walz 2006; IEKP 2008).

- Nicht alle Güter und Technologien eignen sich für die Etablierung von dauerhaften Vorreiter-Märkten. Wichtige Eigenschaften, die die Vorreitermarktfähigkeit von Technologien begünstigen, sind eine hohe Wissensintensität, ein hoher Anteil impliziten Wissens sowie ein erhebliches noch nicht ausgelastetes Lernpotenzial der betrachteten Technologien. Hier zeigen neuere Untersuchungen im Projekt „Zukunftsmarkt Umwelt“ (Walz et al. 2008a) eine erhebliche Patentdynamik bei den Klimaschutztechnologien.

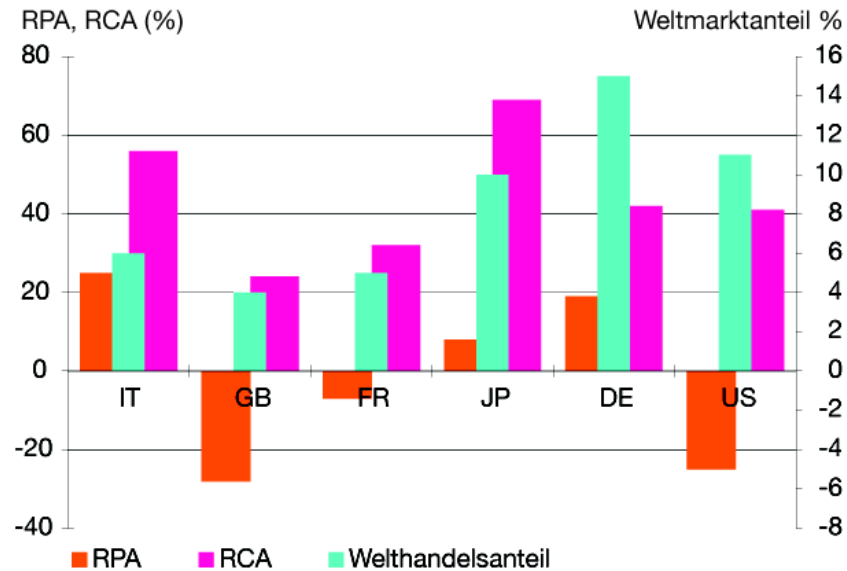
Insgesamt können diese Bedingungen bei den Klimaschutztechnologien als erfüllt gelten.

- Das Vorliegen einer zur betrachteten Technologie komplementären Wissensbasis erhöht das Vorreitermarkt-Potenzial des betreffenden Landes. Neben den Anforderungen an das Humankapital und die technologische Leistungsfähigkeit der betrachteten Technologien selbst spielt auch die Einbindung der Technologielinien in wettbewerbsstarke Branchencluster eine Rolle. Deutschland besitzt hier auf Grund des hohen Spezialisierungsvorteils in den relevanten Teilbereichen des Maschinenbaus besonders gute Ausgangsbedingungen.
- Eine frühzeitige Antizipation globaler Trends (Nachfragevorteil), Größenvorteile des Marktes (Preisvorteil) sowie die Reputation und die Sensibilität gegenüber Änderungen auf dem Weltmarkt (Transfer- und Exportvorteil) werden als zentrale Faktoren auf der Marktnachfrageseite angeführt (vgl. Beise, Cleff 2004). Eindeutig wirken eine beschleunigte Einführung der Technologien positiv auf den Preisvorteil (Skaleneffekte) und den Transfer- und Exportvorteil (Nachweis der Funktionsfähigkeit der Technologien, Reputation als Technologieführer). Beim Nachfragevorteil ist zu beachten, inwieweit heimische Lösungen auch den internationalen Anforderungen entsprechen.
- Der Regulierung kommt eine ganz zentrale Bedeutung zu. Die bisher in der Forschung erzielten Ergebnisse unterstreichen, dass für die Bestimmung von Vorreitermärkten neben einer Beurteilung der Innovationsfreundlichkeit des allgemeinen nationalen Regulierungsregimes eine Beurteilung der Innovationsfreundlichkeit der sektorspezifischen ökologischen und ökonomischen Regulierung besonders notwendig ist. Am Beispiel einzelner Technologielinien wurde dies auch durch neuere ökonometrische Untersuchungen bestätigt (vgl. Walz et al. 2008b). Durch mehrere Untersuchungen belegt ist der vorteilhafte Effekt von Einspeisevergütungen auf die Innovationstätigkeit. Ein weiterer Vorteil insbesondere im Kraftwerks- und Industriebereich ist die Einführung des CO₂-Emissionshandels, die den europäischen Ländern eine Vorreiterstellung in der Anpassung an die künftig

erforderlichen Rahmenbedingungen ermöglichen. Insgesamt sind daher auch bezüglich dieses Faktors überdurchschnittliche Ausgangsbedingungen für Deutschland – insbesondere verglichen mit den Hauptkonkurrenten USA und Japan – zu konstatieren.

- Da Außenhandelserfolge bei technologieintensiven Gütern durch die technologischen Fähigkeiten mit verursacht werden, kommt Indikatoren, die diese technologiespezifisch und zugleich international vergleichend messen, erhebliche Bedeutung für die Erklärung von Außenhandelserfolgen zu. Neben der Messung der Außenhandelsanteile und der entsprechenden Spezialisierung als Maß der aktuellen Wettbewerbsfähigkeit spielen hier auch die Patente als Frühindikator für künftige Leistungsfähigkeit eine bedeutende Rolle.

Neuere Untersuchungen der Leistungsfähigkeit bei Klimaschutztechnologien (z.B. Walz et al. 2008a) zeigen auf, dass Deutschland eine starke Position bei den Klimaschutztechnologien aufweist. Die weltweiten Anteile, die Deutschland bei den Patenten (ca. 20%) und im Außenhandel (ca. 16%) dieser Produktgruppen erreicht hat, gehen gleichzeitig mit einer positiven Spezialisierung sowohl beim Außenhandel als auch den Patenten einher. Damit stellen die Klimaschutztechnologien überdurchschnittliche Stärken im Technologie- und Exportportfolio Deutschlands dar (Abbildung 4-2). Neben Deutschland weisen allerdings auch noch Japan, Italien und die Schweiz eine entsprechende positive Spezialisierung bei beiden Innovationsindikatoren auf.



Quelle: Berechnungen des ISI

Abbildung 4-2: Spezialisierung auf Klimaschutztechnologien bei Patenten (Relativen Patentaktivität (RPA) 2000-2004), im Außenhandel (Revealed Comparative Advantage (RCA) 2005) und Weltmarktanteil für ausgewählte OECD-Länder (in %)

Insgesamt sind daher die gegenwärtigen Ausgangsbedingungen Deutschlands sehr vorteilhaft, um durch die betrachteten Klimaschutzmaßnahmen auch First-Mover-Vorteile zu erreichen. Hierbei ist zu beachten, dass mit zunehmender Globalisierung auch die Marktanteile der führenden Länder abnehmen werden, da immer mehr Länder als Anbieter auftreten. Gleichzeitig ist zu bedenken, dass es im Rahmen der Beschäftigungswirkungen der Klimaschutzmaßnahmen darauf ankommt, die Differenz gegenüber dem Referenzszenario zu erfassen. Denn die Klimaschutzmaßnahmen werden dafür sorgen, dass die oben genannten Faktoren für die Etablierung eines Lead-Markts stärker ausfallen als im Referenzfall. Aufgabe ist es, die daraus resultierenden Effekte eines – gegenüber dem Referenzfall – gestiegenen Anteils Deutschland am Weltmarkt auf die Beschäftigung abzuschätzen.

Wichtige Hinweise für die Abschätzung des zusätzlichen Weltmarktanteils Deutschlands bei den Klimaschutztechnologien können aus unterschiedlichen Arbeiten entnommen werden:

- Nach Roland Berger (2007) ist damit zu rechnen, dass der Weltmarkt für klimaschutzrelevante Technologien (inklusive Verkehr) auf etwa 900 Mrd. € in 2010 und 1700 Mrd. € im Jahr 2020 ansteigt. Gleichzeitig wird für plausibel

gehalten, dass der Anteil europäischer Hersteller an diesem Potenzial von gegenwärtig 35-40% auf etwa 25% im Jahr 2020 absinkt. Allerdings fehlen quantitative Aussagen darüber, in welchem Ausmaß eine Verbesserung von Lead-Markt-Faktoren die Welthandelsanteile beeinflusst.

- Nach den oben bereits zitierten Ergebnissen von Walz et al. (2008a) weist Deutschland positive Spezialisierungen bei Klimaschutztechnologien auf. Allerdings schwanken diese Werte zwischen den Einzeltechnologien beachtlich, was eine technologiespezifische Betrachtung nahe legt.
- Bezüglich der Differenz im Weltmarktanteil Deutschlands kann eine Analogie zu den Arbeiten von Staiß et al. (2006) gebildet werden. Danach führen die Rückwirkungen bei (sehr) günstigen und verhaltenen Ausgangsbedingungen zu Änderungen der Weltmarktanteile Deutschlands bei erneuerbaren Energien in der Größenordnung von 2-5 Prozentpunkten.
- Eine systematische Berücksichtigung der relevanten Einflussfaktoren für die Etablierung eines Lead-Markts wurde in der Arbeit von Enzmann (2008) vorgenommen. Basierend auf den Ergebnissen der Lead-Markt-Datenbank des ISI sowie den Arbeiten von Walz et al. (2008b) hinsichtlich des Einflusses der Regulierung auf Innovationen führt er eine System-Dynamics-basierte Modellierung der künftigen Weltmarktanteile Deutschlands am Beispiel der Windenergie durch. Nach den entsprechenden Modellverläufen ist damit zu rechnen, dass die Weltmarktanteile Deutschlands in Abhängigkeit von einer sehr günstigen und der weniger günstigen Ausprägung der Lead-Markt-Faktoren um etwa drei Prozentpunkte variieren.

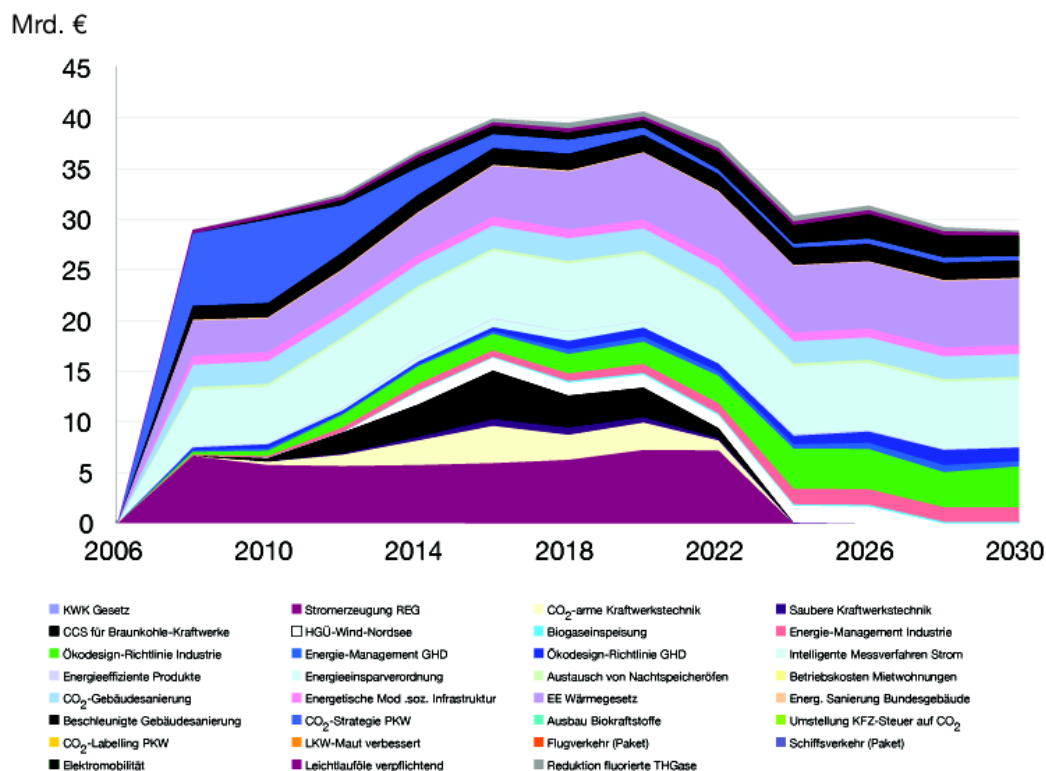
Solange für das Gros der Klimaschutztechnologien keine Modellierung der Weltmarktanteile in Abhängigkeit der Lead-Markt-Faktoren vorliegt, muss der Dateninput für die zusätzlichen Exportnachfrage nach deutschen Klimaschutztechnologien mit Hilfe von Plausibilitätsannahmen getroffen und im Sinn einer Sensitivitätsanalyse interpretiert werden.

Da die Intensität der Klimaschutzmaßnahmen zwischen dem Referenzszenario (in etwa Konstanz der heute erreichten CO₂- und sonstiger Treibhausgas-Emissionen) und dem

Politikscenario (-40% CO₂-Emissionen) doch sehr differiert, ist in beiden Szenarien die Güte der – durch nachfrageorientierte Innovationspolitik veränderten – Lead-Markt-Faktoren doch unterschiedlich zu beurteilen. Damit erscheint es plausibel, von einer Veränderung in den Weltmarktanteilen zwischen beiden Szenarien auszugehen, wie sie sich in den Arbeiten von Staiß et al. (2006) und Enzmann (2008) findet. In einer vorsichtigen ersten Näherung werden daher zwei Prozentpunkte Veränderung des deutschen Weltmarktanteils als Differenz zwischen den Szenarien angenommen. Andererseits ist zu bedenken, dass diese politikinduzierte Steigerung des deutschen Weltmarktanteils nicht das komplette Spektrum aller klimarelevanten Technologien betreffen dürfte. Daher wird nicht das volle, von Roland Berger (2007) prognostizierte Weltmarktvolumen zu Grunde gelegt, sondern nur 50% hiervon. Unter diesen Szenarienannahmen ergibt sich für das Jahr 2020 damit ein zusätzliches außenhandelsinduziertes Nachfragevolumen nach deutschen Klimaschutztechnologien in Höhe von ca. 17 Mrd. €. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass auf Grund von Verzögerungseffekten die Verbesserung der Lead-Markt-Faktoren erst ab dem Jahr 2010 wirksam wird. Daher wird für das Jahr 2010 ein zusätzliches außenhandelsinduziertes Nachfragevolumen nach deutschen Klimaschutztechnologien in Höhe von ca. 9 Mrd. € angenommen, das danach kontinuierlich bis zum für 2020 genannten Wert ansteigt. Diese zusätzliche Exportnachfrage geht als Dateninput ins ASTRA-Modell ein und wird dort im gesamtwirtschaftlichen Kontext auf ihre Folgewirkungen analysiert.

4.3.2 Makroökonomische Ergebnisse der Klimapolitik

Die folgenden makroökonomischen Ergebnisse basieren auf dem Zusammenspiel der technologischen Bottom-up Analyse und den daraus abgeleiteten ökonomischen Impulsen der Klimapolitik, die die makroökonomischen Simulationen mit ASTRA antreiben. Für die Generierung der Impulse als Input für ASTRA wurden bis zu 31 Maßnahmen berücksichtigt. Abbildung 4-3 präsentiert den Brutto-Investitionsimpuls von 31 Maßnahmen, die sowohl die relevanten Maßnahmen des Meseberger Programms als auch die in der vorliegenden Studie definierten zusätzlichen Maßnahmen beinhalten.



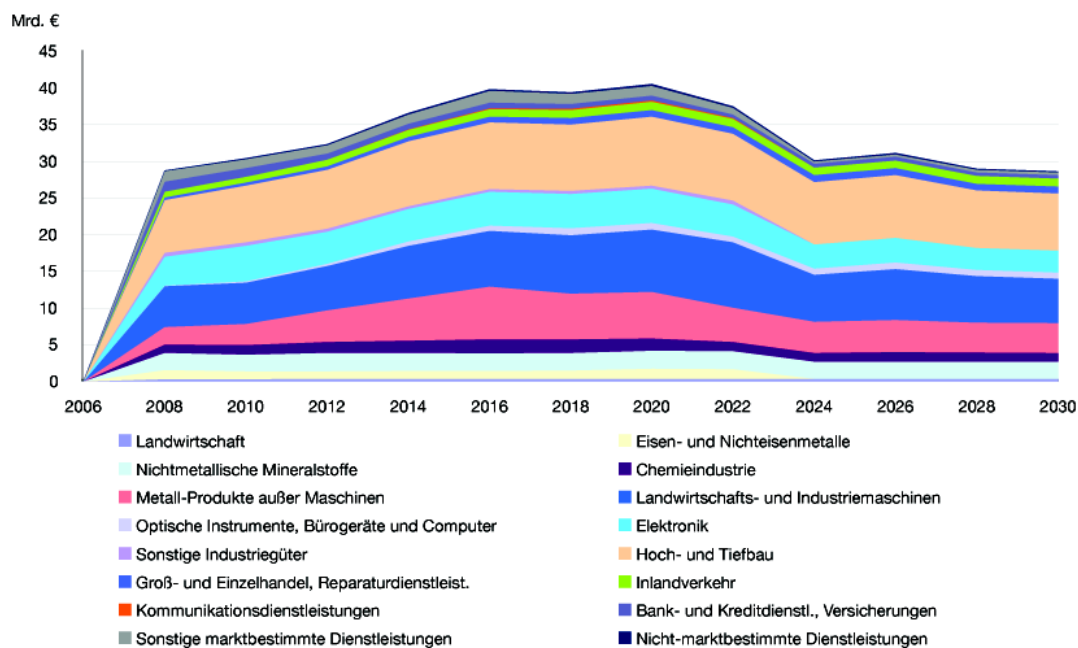
Quelle: Berechnungen des ISI mit dem ASTRA-Modell basierend auf Berechnungen des ISI, PIK, BSR und ECF

Abbildung 4-3: Zeitpfade der Klimaschutzinvestitionen für die einzelnen Maßnahmen (Dateninput aus der Bottom-up-Analyse verarbeitet in ASTRA)

Diese Investitionsimpulse können aber müssen nicht notwendigerweise identisch sein mit den Investitionssummen aus Kapitel 3, da letztere die Nutzer- oder besser Nachfragersicht repräsentieren, während in ASTRA die Investition aus Produzenten- oder Anbietersicht eingeht und die Nutzersicht über Kostenerhöhungen bzw. -veränderungen berücksichtigt wird. Am Beispiel der Maßnahme *CO₂-Strategie PKW* kann der Unterschied deutlich gemacht werden: die zusätzlichen Klimaschutzinvestitionen aus Nutzersicht umfassen die Summe der zusätzlichen Ausgaben die fällig werden beim Kauf eines neuen, durch diese Maßnahme effizienteren und damit in der Anschaffung teureren PKW. Diese Ausgaben beinhalten neben den für ASTRA relevanten zusätzlichen Investitionen der Autoindustrie in R&D und neue Produktionsanlagen für effizientere PKW auch die zusätzlichen Umsätze des Handels (rund 40% der Zusatzkosten nach TNO 2006). Außerdem fällt die Zusatz-Investition der Autoindustrie über einen anderen Zeitraum an, nämlich eher zu Beginn der ersten Dekade, als die Zusatzinvestition der Nutzer, die sich über den gesamten Zeitraum bis 2030 erstreckt. Daher ergibt sich für die

Maßnahme *CO₂-Strategie PKW* ein anderer, geringerer Investitionsimpuls als für die Nutzersicht berechnet mit einer zeitlichen Verteilung, die ihren Schwerpunkt im Zeitraum 2008 bis 2016 hat (siehe auch Abbildung 4-3).

Die oben dargestellten Investitionsimpulse wurden für jede Maßnahme separat sektorscharf differenziert und führen zu Zeitpfaden der sektoralen Investitionsimpulse wie in Abbildung 4-4 dargestellt. Der Schwerpunkt der zusätzlichen Investitionen liegt in dieser Reihenfolge bei den fünf Sektoren Hoch- und Tiefbau (25%), Landwirtschafts- und Industriemaschinenbau (21%), Metallhalbfertigprodukte (14%), Elektronik (12%) und nichtmetallischen Mineralstoffe (7%).

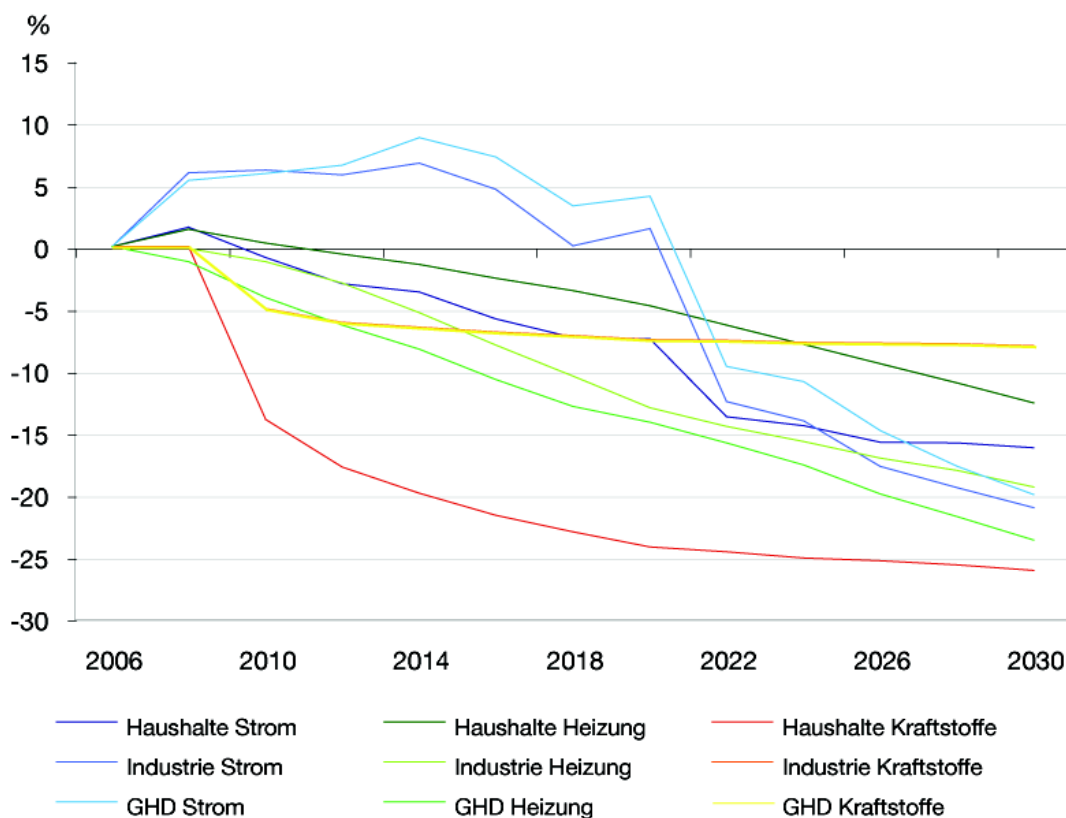


Quelle: Berechnungen des ISI mit dem ASTRA-Modell basierend auf Berechnungen des ISI, PIK, BSR und ECF

Abbildung 4-4: Differenzierung der Klimaschutzinvestitionen nach Sektoren

Neben den Investitionen wird der zweite bedeutsame Impuls des Klimaschutzprogramms durch die Änderung der Energiekosten ausgelöst. Abbildung 4-5 zeigt die über alle Maßnahmen kumulierten Energiekostenänderungen im Zeitverlauf für Haushalte, Industrie und GHD auf. Für Haushalte ergeben sich für eine kurze Übergangsphase leicht erhöhte Kosten bei Strom, die insbesondere durch die forcierte Einführung der Erneuerbaren angetrieben werden, sowie bei Heizung, durch das EE-Wärmegesetz und den Austausch von Nachtspeicheröfen. Danach überwiegen aber die Einsparungen deut-

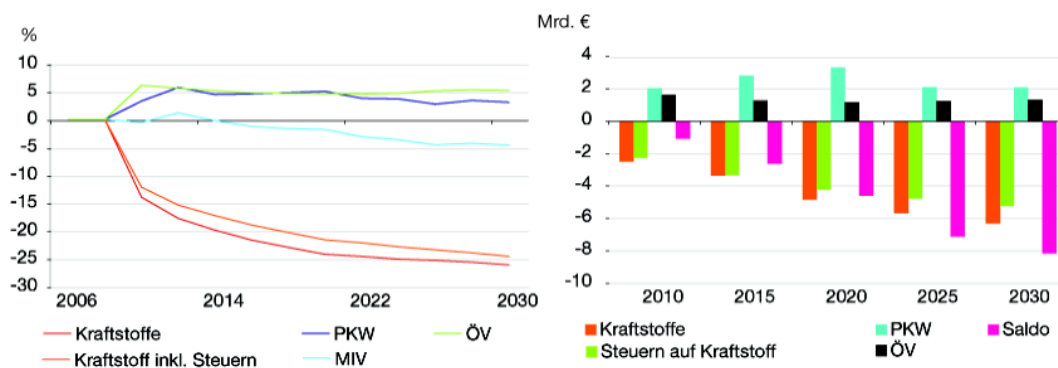
lich und führen zu Kostenreduktionen von -13% bei Wärme und -16% bei Strom. Betrachtet man für den Verkehr ausschließlich die Kraftstoffe so werden dort bis zu -25% Reduktion erzielt, die allerdings durch Betrachtung der gesamten Ausgaben im Folgenden relativiert werden. Für Industrie- und GHD-Sektoren führen die Erneuerbaren und die saubere Kraftwerkstechnologie zu einem Stromkostenanstieg von maximal +6 bzw. +9% bis 2016. Danach führen die Erfolge des Energie-Managements und der Ökodesign-Richtlinie sowie die Kostendegression bei Erneuerbaren zu einer deutlichen Kostenreduktion, so dass bis 2030 Industrie- und GHD-Sektor rund -20% niedrigere Stromkosten haben. Im Bereich der Wärmenutzung dieser Sektoren können ebenfalls Kosteneinsparungen bis 2030 von -20% bzw. -23% erzielt werden, im Wesentlichen durch Energie-Management und Ökodesign-Richtlinie.



Quelle: Berechnungen des ISI mit dem ASTRA-Modell basierend auf Berechnungen des ISI, PIK, BSR und ECF

Abbildung 4-5: Gesamte prozentuale Veränderung der Energie- bzw. Kraftstoffkosten für Haushalte im Vergleich mit dem Referenz-Szenario

Für den Verkehrssektor können mit ASTRA detailliertere Betrachtungen angestellt werden. Abbildung 4-6 zeigt die prozentualen Veränderungen der Verkehrsausgaben der privaten Haushalte gegenüber dem Referenzszenario. Eine deutliche Reduktion der Ausgaben kann für Kraftstoffe (mit und ohne Steuern) festgestellt werden. Diese können durch das Maßnahmenbündel CO₂-Strategie-PKW, Umstellung KFZ-Steuer auf CO₂, Verbrauchskennzeichnung für PKW und Leichtlauföle in relativ kurzer Zeit erzielt werden. Dies führt allerdings zu einem Anstieg der Ausgaben für den PKW-Kauf, durch den Einbau der effizienzsteigernden Technologien im PKW, und den öffentlichen Verkehr (ÖV) durch eine leicht veränderte Modalwahl zugunsten des ÖV. Nach einer leichten Erhöhung der Kosten des MIV (PKW und Kraftstoffe) führen die Maßnahmen zu Einsparungen im MIV von bis zu -5% in 2030 gegenüber dem Referenzszenario. In absoluten Zahlen entspricht dies im Jahre 2030 einer jährlichen Ersparnis bei Verkehrsausgaben der privaten Haushalte von 8 Mrd. €.

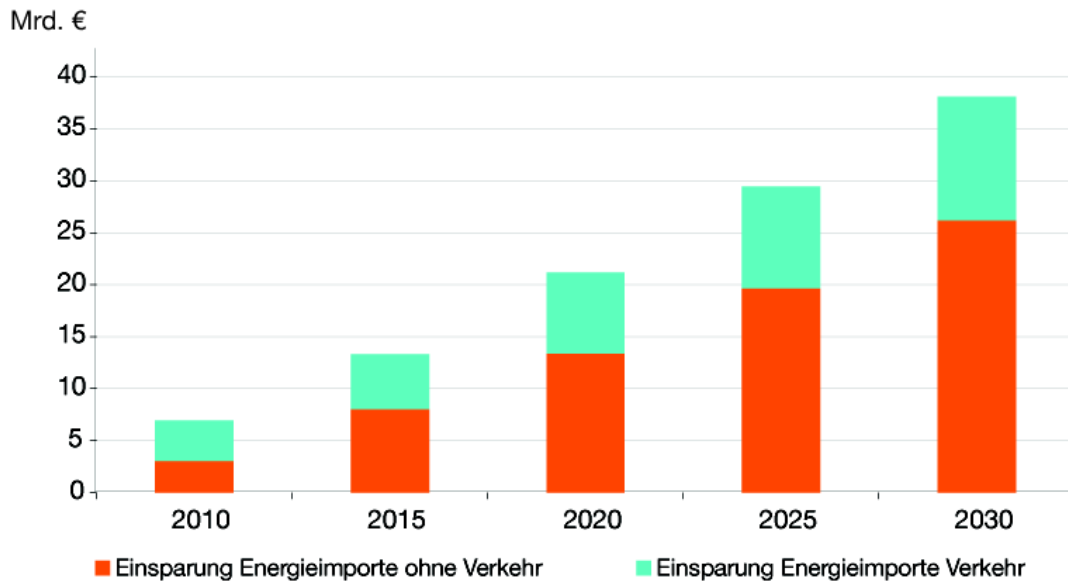


Quelle: Berechnungen des ISI mit dem ASTRA-Modell basierend auf Berechnungen des ISI, PIK, BSR und ECF

Abbildung 4-6: Veränderungen der Ausgaben für Verkehr der Haushalte

Der dritte ökonomische Impuls entsteht durch die Einsparungen an importierten Energieträgern aufgrund von Effizienzverbesserungen bzw. der Substitution von importierten fossilen Energieträgern (wie Öl oder Steinkohle) durch inländische Energiequellen (wie Erneuerbare). Abbildung 4-7 zeigt die erzielbare Einsparung an Energieimporten differenziert in Verkehrs- und Nicht-Verkehrssektor. Es zeigt sich, dass aufgrund der hohen Abhängigkeit des Verkehrssystems von Erdöl und einiger kurzfristig wirksamen Maßnahmen (wie CO₂-basierte KFZ-Steuer, Verbrauchskennzeichnung, Leichtlauföle)

Energieeinsparungen im Verkehrssektor kurzfristig, d.h. in 2010 bereits zu deutlichen Importeinsparungen führen können. Langfristig trägt der Verkehr rund ein Drittel zu den Importeinsparungen bei und es gewinnen die Maßnahmen im Gebäudebereich eine größere Bedeutung. In 2020 belaufen sich die Importeinsparungen auf rund 20 Mrd. € und in 2030 auf 38 Mrd. €.



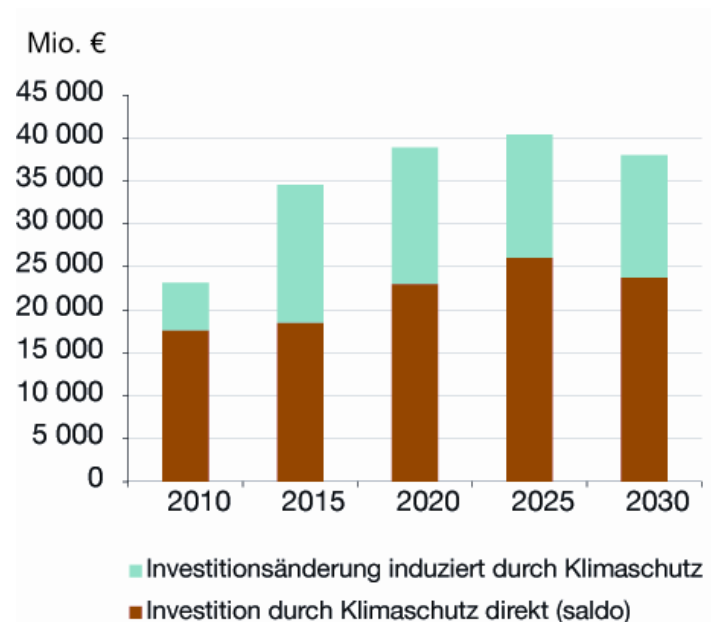
Quelle: Berechnungen des ISI mit dem ASTRA-Modell

Abbildung 4-7: Einsparung an Energieimporten nach Deutschland

Abbildung 4-8 zeigt die Veränderung der gesamtwirtschaftlichen Investitionen durch das Klimaschutzprogramm. Diese unterscheiden sich von dem oben dargestellten technologiebasierten Brutto-Investitionsimpuls (Abbildung 4-3) zum einen durch die Berücksichtigung der durch Klimapolitik vermiedenen Investitionen (z.B. Verzicht auf Bau eines Kohle-Großkraftwerkes durch verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien), so dass sich der volkswirtschaftlich relevante direkte Investitionsimpuls des Klimaschutzprogramms als Saldo der zusätzlichen und vermiedenen Investitionen ergibt. Letztere weisen mit einem Maximalwert von rund 20 Mrd. € in der ersten Dekade einen anderen zeitlichen Verlauf auf als die zusätzlichen Investitionen, da sie zeitlich z.B. durch den Re-Investitionszyklus bei Kraftwerken bestimmt sind.

Zum anderen können sowohl die Nachfragestrukturänderungen als auch die Einkommenskreislauffeffekte (siehe Kapitel 4.3.1) zu Zweitrundeneffekten führen, die als indirekte oder induzierte Änderungen der Investitionen durch das Klimaschutzprogramm

bezeichnet werden. Diese durch Zweitrundeneffekte induzierten Investitionen entwickeln sich über einen Zeitraum von 5 bis 7 Jahren auf bis zu 17 Mrd. € und stagnieren dann auf diesem Niveau, so dass die gesamten zusätzlichen Investitionen sich im Maximum auf rund 40 Mrd. €. belaufen.



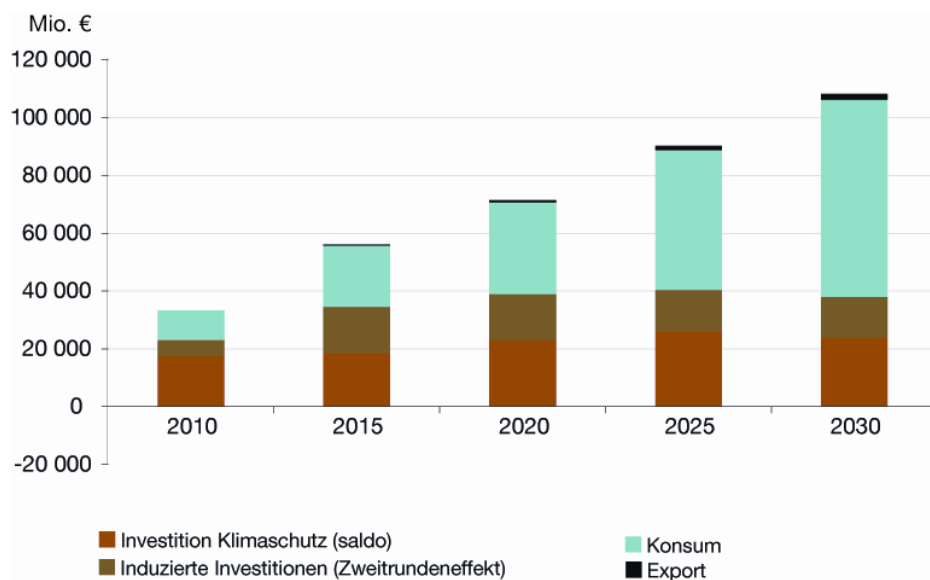
Quelle: Berechnungen des ISI mit dem ASTRA-Modell

Abbildung 4-8: Dynamik der gesamtwirtschaftlichen Investitionen durch Klimaschutz

Die gesamtwirtschaftliche Wirkung des Meseberg-Programms und der zusätzlichen Maßnahmen ist deutlich in zwei Phasen gegliedert (vgl. Abbildung 4-9):

- in der ersten Phase treiben vor allem die zusätzlichen Investitionen für den Klimaschutz den Anstieg der Investitionskomponente und damit das Bruttoinlandsprodukt (BIP). In 2020 stammt der größte Wachstumsbeitrag des BIP mit rund 60% von den Investitionen, von denen knapp zwei Drittel direkte Klimaschutzinvestitionen sind und ein Drittel durch Zweitrundeneffekte induzierte zusätzliche Investitionen.
- Mit Beginn der zweiten Phase ab 2020 nimmt das Wachstum des Konsums durch die gleichzeitige Verringerung der Energiekosten und die sich verstärkenden Multiplikatoreffekte zu und steuert in 2030 rund 60% des

zusätzlichen BIP bei. Da ASTRA als ökonomisches Modell für die EU29 konzipiert ist, führt der Anstieg des deutschen BIP zu zusätzlichen Importen aus den EU-Ländern, wodurch deren BIP steigt und diese wiederum mehr Güter importieren, von denen Deutschland dann einen Teil liefert. Diese Rückkopplung über Handelsströme führt zu dem dargestellten leichten Wachstum der deutschen Exporte.

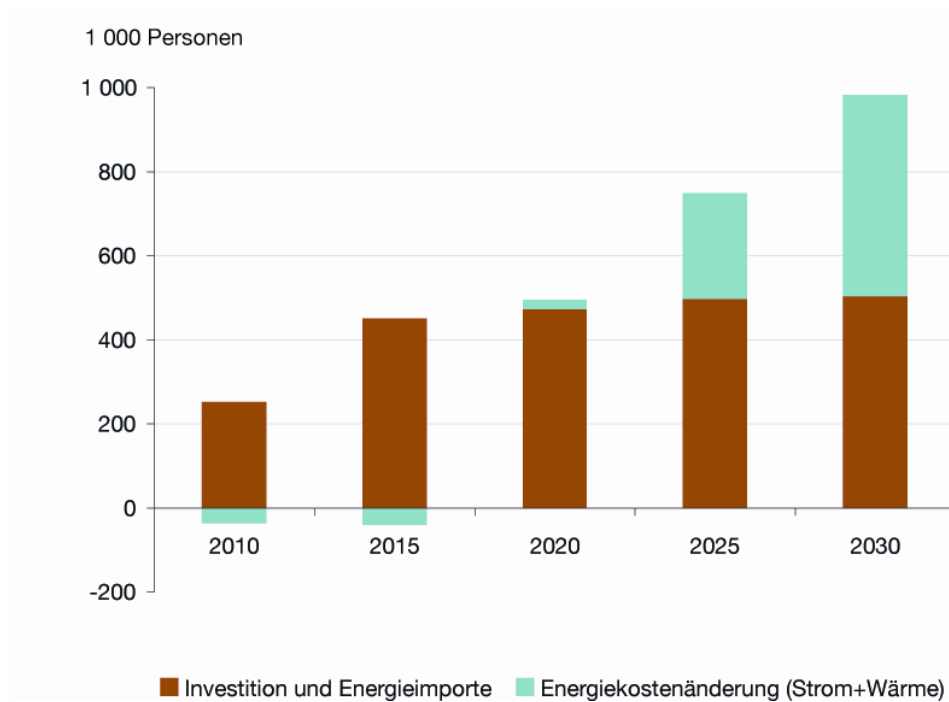


Quelle: Berechnungen des ISI mit dem ASTRA-Modell

Abbildung 4-9: Veränderung der Hauptkomponenten des BIP in Deutschland

Diese Phasen spiegeln sich auch in der Entwicklung der zusätzlichen Beschäftigung wieder (Abbildung 4-10). Bis 2020 steigert das Klimaschutzprogramm die Beschäftigung in Deutschland um rund 500 000 Personen. Diese entstehen fast ausschließlich durch die zusätzlichen Investitionen und die Einsparung bei den Energieimporten, während die Veränderung der Energiekosten bis 2018 einen leicht dämpfenden Einfluss auf die Beschäftigung ausübt. In der zweiten Dekade (2020 bis 2030) ändern sich die Wirkungen deutlich. Der Einfluss des Impulses durch Investitionen und Energieimporte auf die Beschäftigung stagniert, während die Bedeutung der verringerten Energiekosten bis 2030 deutlich ansteigt, und zum Ende der Periode ebenfalls knapp 500 000 zusätzliche Beschäftigte entstehen lässt, so dass beide Impulse ungefähr von gleicher Bedeutung sind. Die sektorale Betrachtung zeigt, dass der Bausektor kontinuierlich zulegt bei der

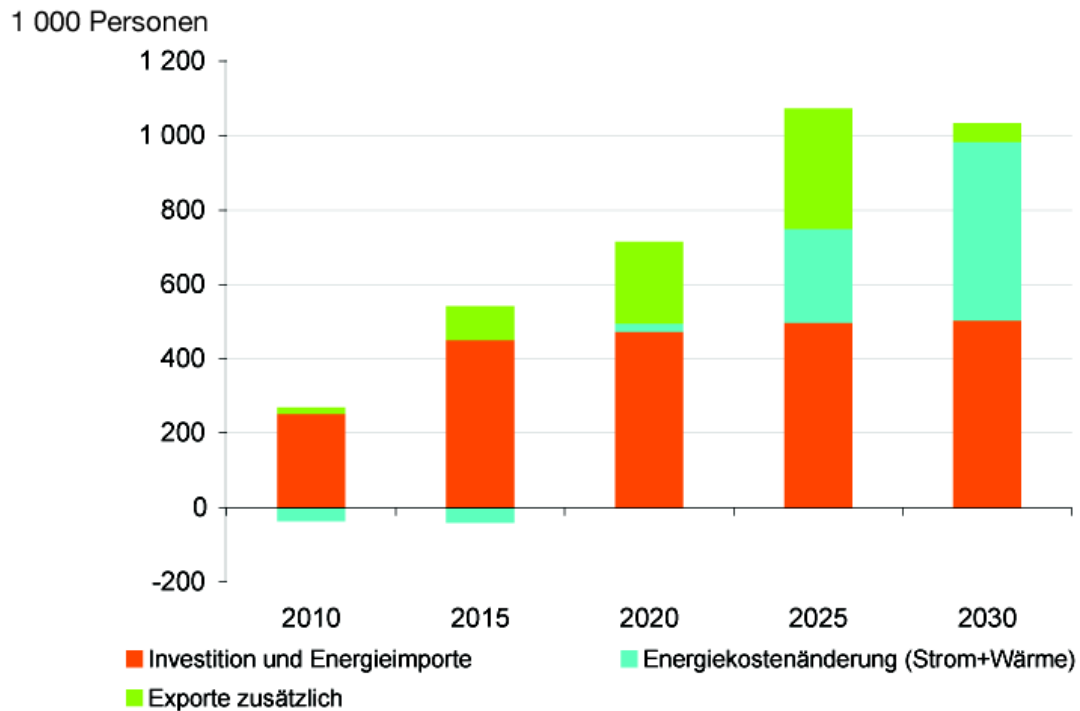
Beschäftigung, während bei der Industrie zu Beginn der Einfluss der zusätzlichen Investitionen und der Energiekostenerhöhung sich kompensieren und die Beschäftigung erst ab 2015 dann kontinuierlich ansteigt, und über die lange Frist absolut die meisten Arbeitsplätze in den marktbestimmten Dienstleistungen entstehen.



Quelle: Berechnungen des ISI mit dem ASTRA-Modell

Abbildung 4-10: Anstieg der Beschäftigung durch Klimaschutzpolitik in Deutschland

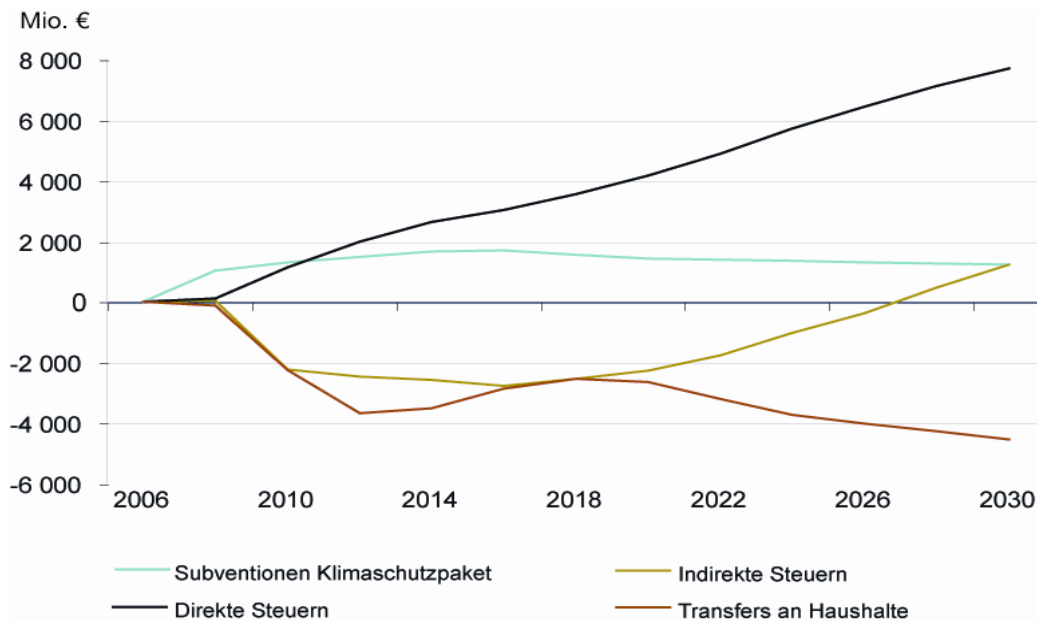
Abbildung 4-11 beschreibt die zusätzlich mögliche Beschäftigungswirkung, wenn es Deutschland gelänge durch die Klimaschutzpolitik auf dem Weltmarkt einen First-Mover-Vorteil bei Klimaschutztechnologien zu erringen, wie er in Kapitel 4.3.1 beschrieben ist, d.h. mit zusätzlichen Exporten an Klimaschutztechnologien von rund 17 Mrd. € in 2020. Durch diesen Export-Impuls könnten über den Zeitraum 2015 bis 2025 im Durchschnitt 200 000 zusätzliche Arbeitsplätze in Deutschland geschaffen werden.



Quelle: Berechnungen des ISI mit dem ASTRA-Modell

Abbildung 4-11: Zusätzlicher Anstieg der Beschäftigung durch einen First-Mover-Erfolg durch Klimaschutzpolitik in Deutschland

Auch der Staatshaushalt profitiert von der Umsetzung des Klimaschutzpaketes. Die knapp 2 Mrd. € jährlichen Subventionen zur Implementierung des Klimaschutzpaketes werden trotz sinkender Einnahmen aus indirekten Steuern (z.B. aufgrund verringerter Einnahmen bei den Mineralölsteuern) durch steigende Einnahmen bei den direkten Steuern sowie verringerte Transferleistungen, die beide durch die zunehmende Beschäftigung bedingt sind, überkompensiert (siehe Abbildung 4-12). Im Ergebnis läge dann die Staatsverschuldung in 2030 um rund 180 Mrd. € niedriger als ohne Klimaschutzpolitik.



Quelle: Berechnungen des ISI mit dem ASTRA-Modell

Abbildung 4-12: Wirkungen auf den Staatshaushalt in Deutschland

5 Innovationen für den Klimaschutz

Der Zeithorizont des Meseberg-Programms reicht bis 2020, und die hier vorgelegten quantitativen Zahlen für Energiebedarf, deren induzierte CO₂-Emissionen und weitere Treibhausgasemissionen Deutschlands haben einen Zeithorizont bis 2030. Von Seiten von Ökonomen wird gelegentlich befürchtet, dass die Energieeffizienz-Potentiale in zwei, drei Jahrzehnten erschöpft seien und dass angesichts einer Weltbevölkerung am Ende dieses Jahrhunderts von 9 Mrd. Menschen und eines Weltsozialprodukts, das ein Faktor von 10 bis 15 höher ist als heute, die Ausweitung des Energieangebotes Priorität haben müsse. Sie stützen ihre Befürchtungen mit dem Hinweis, dass der spezifische Bedarf energieintensiver Prozesse sich bereits bis auf etwa 10 bis 20% dem theoretischen Minimum angenähert habe, und dies gelte auch in ähnlichem Umfang für viele andere Energiewandler wie z.B. Elektromotoren, Generatoren oder Kesselanlagen.

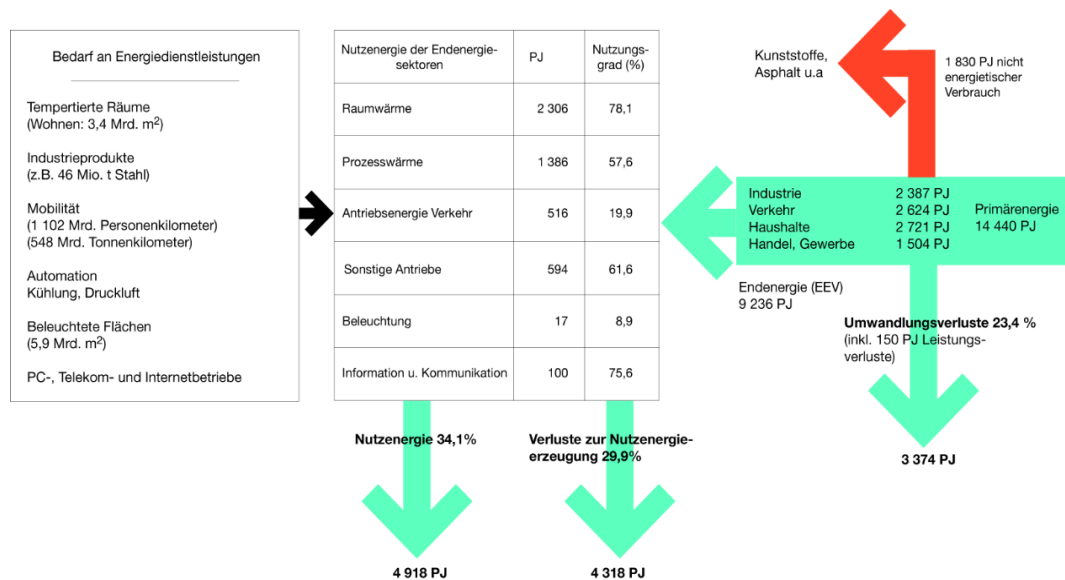
Wenn diese Ansicht richtig wäre, dann stünde die Menschheit vor einer sehr großen Aufgabe, da der heutige Primärenergieverbrauch zu 80% aus fossilen Brennstoffen besteht und schon heute die CO₂-Emissionen einen Faktor 4 über dem langfristig verträglichen Emissionsniveau liegen. Im Folgenden soll kurz dargestellt werden, dass diese Befürchtung eines „Rolltreppen-Effektes“ zu Unrecht besteht und dass in diesem Jahrhundert der Pro-Kopf-Primärenergiebedarf der heutigen Industrieländer um einen Faktor 5 reduziert werden kann (vgl. Kapitel 5.1). Hierbei geht es nicht nur um technische Potentiale der Energieeffizienz, sondern auch um mehr Effizienz bei der Nutzung energieintensiver Materialien (vgl. Kapitel 5.1.1) und um soziale und unternehmerische Innovationen, die das Nachfrageverhalten, Entscheidungsrouinen, Prioritäten sowie Präferenzen verändern können (vgl. Kapitel 5.1.2).

Kapitel 5.2 widmet sich dann der Frage, inwieweit man heute bereits einen Zusammenhang zwischen Klimaschutzpolitik und Innovationstätigkeit empirisch bestätigen kann.

5.1 Vision und Konsequenzen einer 2 000 Watt Pro-Kopf-Gesellschaft für Forschung und Entwicklung

Die o.g. Befürchtungen einer baldigen Erschöpfung von Energieeffizienzpotentialen gehen der Frage nach den Möglichkeiten höherer Effizienz zur Bedienung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen durch beispielhafte Hinweise aus dem Weg. Richtig ist vielmehr, dass

- die Energieverluste eines Industrielandes oder der Welt auf allen drei Ebenen der Nutzenergie, der Endenergie wandlung und der Primärenergie wandlung sehr hoch sind (vgl. Abbildung 5-1),
- die Effizienz des Einsatzes von energieintensiven Materialien durch vielfältige Maßnahmen wesentlich erhöht werden könnte, so dass deren reduzierende Wirkung auf den Primärenergiebedarf mit 0,5% pro Jahr zu veranschlagen ist (Enquete-Kommission 2002).



Quelle: Fraunhofer-ISI (2006)

Abbildung 5-1: Energieflussdiagramm der Welt und Energieverluste auf allen drei Stufen der Energienutzung und -wandlung, 2003

Die Energieverluste betragen

- bei der Energienutzung etwa ein Drittel, bezogen auf die Primärenergie in der Bundesrepublik, mit den größten Verlusten im Bereich der Raumwärme,
- bei der Wandlung von Endenergie bei 30%, mit den größten Verlusten bei den Straßenfahrzeugen, und
- bei der Wandlung von Primärenergie in Endenergie mit 23% mit den größten Verlusten bei den thermischen Kraftwerken.

Schließlich gehen etwa 12% des Primärenergieaufwandes in den nicht-energetischen Verbrauch, insbesondere auf der Basis von Erdöl und Erdgas.

5.1.1 Technische Potentiale der Energie- und Materialeffizienz

Bereits die Untersuchungen der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages von 1990 und neuere Studien zeigen, dass der Primärenergiebedarf zur Befriedigung der menschlichen Bedürfnisse an Energiedienstleistungen auf Basis der heutigen Bedürfnisstruktur binnen der nächsten 50 bis 80 Jahre um möglicherweise mehr als 80%, d.h. um einen Faktor 5 reduziert werden könnte. Diese Potentiale seien anhand von vier technischen Kategorien kurz mit Beispielen erläutert:

1) Verbesserung der Energieeffizienz im Bereich der Energiewandler

Praktisch alle Energiewandler und Energiewandlersysteme (z.B. Brenner, Kessel, Dampf- und Gasturbinen, Elektro- und Verbrennungsmotoren, Wärmetauscher und Kompressoren) haben noch kleinere oder größere Verbesserungsmöglichkeiten durch hitzebeständigere Materialien, bessere Regelung, konstruktive Verbesserungen, Sauerstoff- statt Luftsauerstoffnutzung, neue Strukturmaterialien mit einem besseren Stoffaustauschflächen- zu Volumenverhältnis. Hinzu kommt die Verbesserung des exergetischen Wirkungsgrades durch Substitution von Brennern durch Gasturbinen oder HT-Brennstoffzellen im Mitteltemperatur-Prozessbereich, der Einsatz von Wärmetransfor-

matoren bei hohem Abfallwärmeanfall unter 300°C, der heute sehr groß ist. Zur Realisierung dieser Potentiale sind gezielte und vermehrte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten von zentraler Bedeutung, aber auch die Internalisierung von externen Kosten in die Energiepreise, um den Technologieproduzenten einen langfristigen Rahmen für ihre Entwicklungsüberlegungen zu geben.

2) Verminderung des Nutzenergiebedarfes durch Prozessänderungen und -substitutionen

Die Effizienzmöglichkeiten bei der Verminderung des Nutzenergiebedarfes sind sehr zahlreich und durch Prozesssubstitutionen teilweise recht groß – bis zu 90% des heutigen Nutzenergiebedarfs. Als Beispiele für viele Möglichkeiten seien genannt: die Verminderung der Wärmeverluste bei Gebäuden durch wesentlich bessere Isolation und Dichtigkeit, die Entwicklung von sehr leichten Fahrzeugen; die Substitution von Industrieprozessen; der Ersatz von thermischen Trennverfahren durch Membran- oder Adsorptionsverfahren, wie es in der Nahrungsmittel- und pharmazeutischen Industrie schon praktiziert wird; oder der Einsatz neuer enzymatischer oder biotechnologischer Verfahren zur Synthese. Abwärmeverluste können durch Rückspeisung von Bremsenergie (z.B. von Aufzügen, Hochregallagern und Fertigungsmaschinen in das Stromnetz mittels Leistungselektronik) sowie durch Wärmerückgewinnung aus vielen Aggregaten (z.B. Kompressoren und Abwasser) vermindert werden.

Viele dieser Möglichkeiten sind heute schon Stand der Technik, andere sind noch Gegenstand von Forschung und Entwicklung.

3) Verstärkte Verwertung und verbesserte Materialeffizienz energieintensiver Materialien

Die Erzeugung von energieintensiven Werkstoffen aus Sekundärmaterialien benötigt häufig deutlich weniger Energie als die Erzeugung von Primärmaterial des gleichen Werkstoffs, einschließlich des Energiebedarfs der Recyclingrouten. Bei vielen Werkstoffen hat der Sekundärrohstoffzyklus bereits heute relativ hohe Einsatzquoten erreicht (z.B. in Deutschland: Rohstahl 42%, Papier 60%, Behälterglas 81%); dagegen liegen die Werte bei anderen Werkstoffen deutlich niedriger. Forschung und Entwicklung sind

gefordert, um beim Trennen, Sortieren und Raffinieren von energieintensiven Werkstoffen hohe Reinheiten zu erreichen, insbesondere bei Post-Consumer-Abfällen. Durch Ausschöpfung des Recycling-Potentials könnte der gesamte industrielle Energiebedarf um mindestens 10% weiter reduziert werden.

Zudem kann der spezifische Bedarf je Werkstoffdienstleistung durch Verbesserung der Eigenschaften der Werkstoffe und konstruktive Änderungen des jeweiligen Produktes vermindert werden; die Beispiele sind zahlreich im Bereich Stahl, Glas, Papier oder Kunststoffe. Auch in Zukunft ist mit weiteren Verminderungen des spezifischen Werkstoffbedarfs zu rechnen, etwa durch dünnere Verpackungsmaterialien und leichtere Flächengewichte von Printmedien, Schäumen von Aluminium, Magnesium und Kunststoffen, dünnere Oberflächenaufbauten bei Lacken oder Katalysatoren, Zusätze bei der Zementherstellung oder bei Beton. Dabei bleiben die Funktionen erhalten, die der Werkstoff jeweils zu leisten hat. Der Energiebedarf zur Herstellung dieser Werkstoffe könnte jährlich um 1 bis 2% rückläufig sein.

4) Ersatz von Werkstoffen und Materialien durch weniger energieintensive Werkstoffe

Oft besteht ein Substitutionspotenzial zwischen verschiedenen Werkstoffen. Da der spezifische Energiebedarf verschiedener Werkstoffe sehr unterschiedlich sein kann, insbesondere unter Berücksichtigung der Verwendung natürlicher Werk- oder Rohstoffe (z.B. Holz, Fasern, Stärke), eröffnen sich theoretisch erhebliche Energieeinsparpotenziale durch eine entsprechend gewählte Werkstoffsubstitution. Entscheidungen über die Werkstoffwahl und damit über Substitutionsprozesse erfolgen in erster Linie unter Aspekten von Kostenvorteilen, der Werkstoff- und Nutzungseigenschaften sowie des Image des Werkstoffs und bestehender Modetrends. An der Schwelle zur Anwendung stehen auch biogene und biotechnologisch herstellbare Werkstoffe und Produkte (z.B. Holz, Flachs, Stärke, natürliche Fette und Öle) mit wesentlich geringerem spezifischem Energieeinsatz als traditionelle Werkstoffe.

Hier eröffnen Forschung und Entwicklung eine große Chance, langfristig in erheblichem Umfang den industriellen Energiebedarf zu senken. Im Sinne der Entwicklung nachhaltiger Materialien ist dabei der gesamte Lebenszyklus zu betrachten. Langfristig denkbare technische Entwicklungen biotechnologischer Verfahren oder die Nutzung

biogener Werkstoffe im Zusammenhang mit der Gentechnik sind wenig analysiert. Insgesamt sind die Energieeffizienz-Potentiale in diesen vier Kategorien erheblich und werden heute bei weitem unterschätzt.

5.1.2 Potenziale durch Verhaltens- und Nachfrageänderungen

Das Verhalten wird beim Umgang mit Energie und bei energierelevanten Investitionsentscheidungen vielfach nicht allein von ökonomischer Rationalität gelenkt. Dazu tragen verschiedene Faktoren bei: Die Effizienz eines Elektrogerätes ist für den jeweiligen Privathaushalt beispielsweise ein nachrangiges Kriterium bei der Auswahl. Die Energieeffizienz einer Investition ist für die meisten Betriebe mit einem durchschnittlichen Energiekostenanteil an den Produktionskosten von weniger als 2 bis 3% von marginaler Bedeutung. Auch bei Investitionen in energieintensive Geräte, Maschinen oder Kesselanlagen werden die Anschaffungskosten oft höher bewertet als die Kosten des laufenden Unterhalts. Informationen zur Energieeffizienz eines Gerätes, eines Straßenfahrzeuges, einer Anlage oder einer Fertigungsmaschine gehen unter oder werden im Vergleich mit anderen Produkteigenschaften (Design, Funktionen, Markenimage) als nachrangig angesehen. Daher müssen energieeffiziente Produkte und Investitionsgüter hinsichtlich ihrer Funktion und möglichst auch im Hinblick auf Design, Verlässlichkeit und Sicherheit den Kundenansprüchen voll genügen. Wie der Verkauf der energieeffizienteren Lösungen mehr als bisher unterstützt werden könnte, sollte auch Gegenstand sozialwissenschaftlicher Forschung sein.

Durch Intensivierung der Nutzung von Gebrauchs- und Investitionsgütern lässt sich die Materialeffizienz ebenfalls verbessern – und damit indirekt die industrielle Energienachfrage vermindern. „Nutzen statt besitzen“ setzt den Nutzungsaspekt eines Gebrauchsgutes vor den Eigentumsaspekt. Beispiele hierfür sind heute das – kurzfristige – Vermieten von Baumaschinen, Werkzeugen oder Fahrzeugen. Der ökologische Nutzen liegt in der Verringerung der notwendigen Gütermenge, um die Bedürfnisse zu befriedigen (so ist z.B. Car-Sharing etwa ein Faktor 5 effizienter als die heutige Situation bezüglich Fahrzeugbedarf und Parkplatzraum). Für die Nutzungsintensivierung ist vor allem eine sozialwissenschaftliche Forschung nötig, die die Voraussetzungen und erforderlichen Informationen über für eine Nutzungsintensivierung erarbeitet.

5.1.3 Um einen Faktor 5 effizienter bis Ende des Jahrhunderts

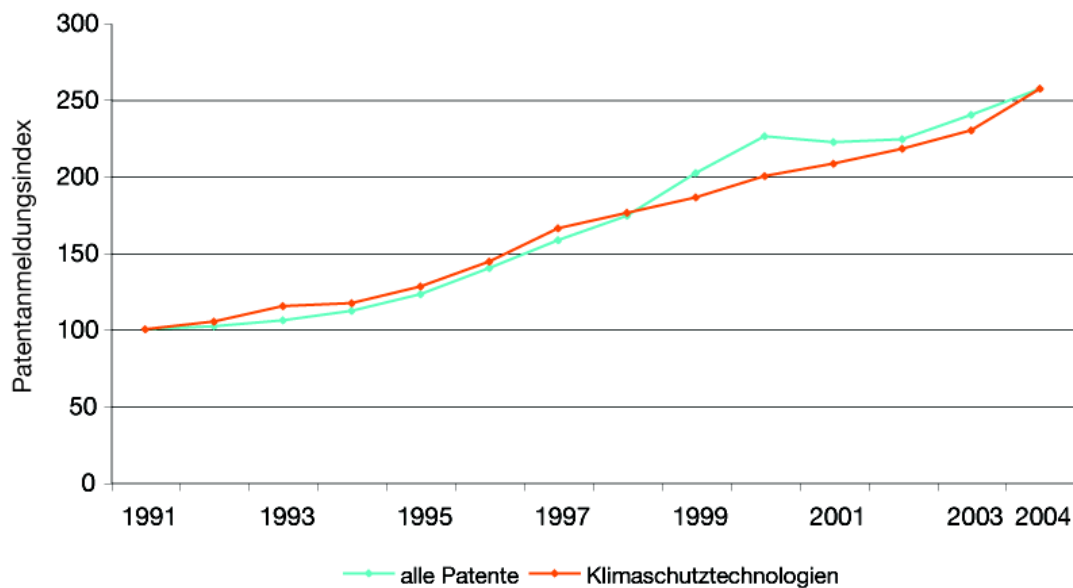
Die seitens der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ bereits im Jahre 1990 postulierte Material- und Effizienz-Verbesserung um einen Faktor von fünf auf der Primärenergieseite wurde vom ETH-Rat in der Schweiz im Jahre 1998 als griffige Metapher einer 2000 Watt pro Kopf-Industriegesellschaft formuliert. Diese – zunächst ungeprüfte – Vision wurde von einem großen Forschungskonsortium zwischen 2000 und 2003 auf ihre technische Machbarkeit hin geprüft. Das Ergebnis war, dass alle technischen Lösungen zur Verbesserung der Primärenergienutzung um einen Faktor 5 bereits heute wenigstens im Labormaßstab verfügbar sind (Jochem et al. 2004).

Die Ergebnisse zeigen, dass eine derartige Effizienzverbesserung innerhalb dieses Jahrhunderts den gesamten Kapitalstock einer Volkswirtschaft erfassen und notwendiger Weise erneuern würde. Dies setzt allerdings voraus, dass jede Art heutiger Forschung und Produkt-, Anlagen- und Fahrzeugentwicklung viel intensiver als bisher unter Ressourceneffizienz-Gesichtspunkten angelegt sein muss. Dabei geht es nicht nur um die Ressourceneffizienz einzelner Produkte, Maschinen, Anlagen und Fahrzeuge, sondern auch um diejenige der entsprechenden Systeme (z. B. Flug- versus Schienengüterverkehr, Städtebau mit getrennten und durchmischten Siedlungsfunktionen, dezentrale und zentrale Stromerzeugung).

Eine Effizienzstrategie muss sich naturgemäß auf vielfältige Ansatzpunkte, eine große Anzahl von Akteuren und individuell betrachtet auf oft nur geringe Einzelpotenziale beziehen. Gerade diese Voraussetzung hat bislang dazu geführt, dass die „kleinteilig“ anmutenden Potentiale vor allem auf Grund von Kommunikationsdefiziten nicht engagiert genug erschlossen wurden. Dabei geht es häufig um bereits bekannte und meist rentable technische Lösungen oder veränderte Verhaltensweisen. Daher werden diese Potentiale als Handlungsoptionen einer an der Nachhaltigkeit orientierten Forschungs- und Innovationspolitik ausdrücklich betont.

5.2 Innovationspotentiale durch Klimaschutz

Für den Klimaschutz ist die Fortentwicklung der Klimaschutztechnologien eine zentrale Herausforderung. Ein Blick auf die Patententwicklung seit den 1990er Jahren zeigt zwar eine erhebliche Dynamik bei den Klimaschutztechnologien auf. Gegenüber Anfang der 1990er Jahre sind die jährlichen Patentanmeldungen bei den Klimaschutztechnologien in etwa um das Zweieinhalbfache angestiegen. Allerdings konnten sie damit keine überdurchschnittliche Entwicklung gegenüber der allgemeinen Dynamik erreichen (vgl. Abbildung 5-2). Um die gesetzten Ziele einer Begrenzung des Anstiegs der mittleren Erdoberflächentemperatur auf 2°C in diesem Jahrhundert und einer 2 000 Watt Pro-Kopf-Industriegesellschaft erreichen zu können, erscheint daher eine Steigerung der Innovationsdynamik erforderlich.



Quelle: Berechnungen des ISI

Abbildung 5-2: Weltweite Patentdynamik von Klimaschutztechnologien im Vergleich zu allen Patentanmeldungen, 1991 bis 2004

Eine Steigerung der Innovationsdynamik kann nur erfolgreich sein, wenn die Bedingungen berücksichtigt werden, unter denen Weiterentwicklungen von Klimaschutztechnologien erfolgen können. So ist eine aktive staatliche Innovations- und Technologiepolitik erforderlich. Im Unterschied zu den streng liberalen – staatliche Steuerung eher

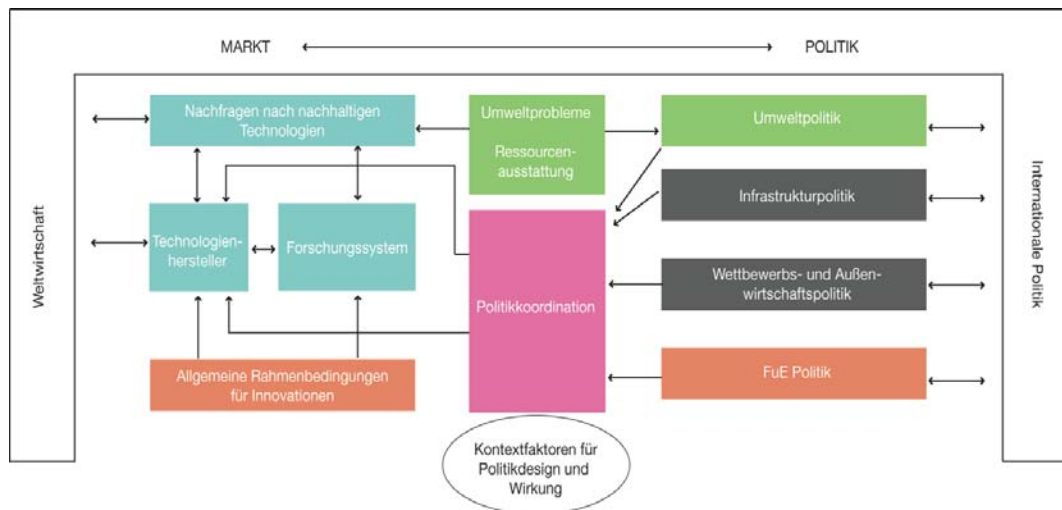
ablehnenden – Ökonomen verweisen ihre Befürworten auf bestehende Marktmängel. Ihre Argumentationslinien rücken die positiven Externalitäten von F&E (spillovers von F&E, Netzwerkexternalitäten) sowie Hemmnisse bei öffentlichen Gütern, beim Marktzutritt neuer Unternehmen und bei der Verbreitung neuer Technologien in den Vordergrund.

Des Weiteren hat die neuere Innovationsforschung zahlreiche Einsichten zu Tage gebracht, welche die Bedeutung von Lernerfolgen im Markt sowie die Pfadabhängigkeit von technologischen Entwicklungen betonen:

- Die Entwicklung von Technologien verläuft nicht linear, sondern ist durch zahlreiche Rückkopplungen zwischen Forschung, Entwicklung und Anwendung geprägt. Ohne frühzeitige Erfahrungen in der Anwendung können Technologien nicht zielgerichtet weiterentwickelt werden. Entwicklung und Diffusion der Technologien müssen gekoppelt miteinander erfolgen. Daher ist eine frühzeitige Durchdringung im Markt eine Voraussetzung für die langfristige Verfügbarkeit kostengünstiger Technologien und die Realisierbarkeit der Kostendegressionen.
- Der Prozess der Herausbildung eines dominanten Designs von Technologien braucht Zeit. Gleichzeitig ist eine Diversität von Technologien erforderlich, die im Wettbewerb mit einander weiterentwickelt werden müssen. Eine Beschränkung der Förderung auf wenige Klimaschutztechnologien wäre aus innovationspolitischer Sicht daher weniger geeignet.
- Ein funktionierendes Innovationssystem ist durch Netzwerkbildung zwischen Forschung, Entwicklung und Anwendung gekennzeichnet. Zentrale Aussage dieser Konzeption ist, dass das Hervorbringen und die Diffusion neuer Lösungen wesentlich vom Zusammenspiel der unterschiedlichen Akteure des Innovationsprozesses abhängen (siehe Abbildung 5-3). Im Rahmen dieser Heuristik können auch weiche Kontextfaktoren (z. B. situative Handlungsbedingungen für Politikdesign und -wirkungen) analysiert werden. Ihnen wird nach den Ergebnissen der Forschung im Bereich Umwelt und Innovation eine erhöhte Bedeutung zugeschrieben.
- Im Bereich von umweltfreundlichen Technologien wird die Nachfrageentwicklung bedeutend durch umweltpolitische Maßnahmen gestaltet.

Im Kontext des Innovationssystems ist die Klimapolitik damit zugleich nachfrageorientierte Innovationspolitik. Gleichzeitig ist es erforderlich, ein innovationsfreundliches System der Regulierung aufzubauen, das einerseits Netzworkebildung fördert, andererseits aber den Akteuren auch langfristig verlässliche Rahmenbedingungen bei gleichzeitigem Anreiz zu weiteren Innovationen vermittelt (vgl. Walz 2007 sowie Walz et al. 2008b).

Für die künftige Gestaltung der Innovationspolitik wird damit eine Koordination der F&E-Politik mit den nachfrageseitigen Maßnahmen der Klimapolitik zu einer zentralen Herausforderung. Einerseits erfordert dies, dass die Formulierung von F&E-Programmen auf die klimapolitischen Prioritäten abgestimmt werden sollte. Andererseits muss bei der Ausgestaltung der klimapolitischen Maßnahmen nicht nur auf Diffusionswirkung und Kosteneffizienz, sondern explizit auch auf die Wirkung geachtet werden, die sie im Innovationssystem entfalten.



Quelle: Walz et al. (2008a)

Abbildung 5-3: Schema des „Systems of Sustainability Innovation“-Ansatzes

6 Leuchtturmprojekte

Um das Klimaproblem zu lösen, müssen durch Politik und Wirtschaft zwei Wege gleichzeitig beschritten werden. Einerseits muss – wie oben beschrieben – das große Potential bereits bekannter – und wie man gesehen hat – oft rentabler Lösungen in Deutschland (und weltweit) schneller diffundieren; Gebietskörperschaften und Unternehmen sollten intensiver Mechanismen finden und nutzen, um national und international existierende Best-Practice-Beispiele konsequent aufzugreifen und im eigenen Verantwortungsbereich umzusetzen.

Zum zweiten macht es die Größe der Herausforderung zur Begrenzung des Klimawandels notwendig, dass völlig neue Wege beschritten werden (vgl. auch Rennings et al. 2008). Die Menschheit braucht zur Lösung des Klimaproblems nicht nur inkrementelle, sondern auch tiefgreifende Innovationen im Sinne von Einsteins Satz: „Wir können die Probleme der Welt nicht mit den Denkmustern lösen, die zu ihnen geführt haben“.

In der „Erfindernation“ Deutschland mangelt es oft nicht an den Erfindungen (Inventionen) selbst, sondern Defizite treten in der Folge, d.h. bei der Markteinführung oder – Durchdringung auf: Tradierte, d.h. bislang bewährte oder als bewährt interpretierte Organisationsformen in Wissenschaft und Wirtschaft sowie Entscheidungs- und Nutzungsmuster im Alltag verhindern oft, dass Neues seinen Weg dorthin nimmt, wo es zu erwünschten Lösungen beitragen würde: in den Alltag von Wirtschaft und Gesellschaft.

Eine der Möglichkeiten, um solche Befangenheiten in Routinen oder Denk-Blockaden zu überwinden und für eine „Kultur des Experimentierens“ zu werben, besteht darin, die Machbarkeit und die Chancen einer Innovation konkret vor Augen zu führen. Wenn es sich bei dieser Innovation um ein besonders bedeutsames Vorhaben handelt (z.B. weil es, wenn flächendeckend angewandt, sehr große Emissionsminderungen bringen würde), dann hat es Leuchtturm-Charakter. Als „Leuchttürme“ bezeichnen wir also innovative Ideen mit erheblichem Reduktionspotenzial und hohem Marktpotenzial, deren Umsetzung bisher aber an verschiedenen Hindernissen des „alten Denkens“ gescheitert ist. Fünf solcher Leuchtturmprojekte mit hohem Demonstrationspotential in unterschiedlichsten Bereichen (Technologie, Organisation, Institutionen) werden hier vorgestellt. Ihre Umsetzung scheint geeignet, ein neues Denken – und entsprechend neues Handeln,

neue Routinen, neue Organisationsabläufe – zu fördern und weitere Innovationen technischer und unternehmerischer Art anzustoßen. Eine erfolgreiche Umsetzung des Meseberg-Programms hat diese und viele weitere Leuchtturmprojekte zur Voraussetzung.

6.1 HGÜ in Deutschland

Um die Stromversorgung in Deutschland langfristig zu gewährleisten, müssen in den kommenden Jahrzehnten große Investitionen im Netzbereich getätigt werden. Die Anforderungen an das Übertragungsnetz werden steigen, wenn die Produktionskapazität der Kernkraftwerke im Süden mit fossiler Kapazität im Norden ersetzt wird. Die Herausforderung wird noch größer, wenn der zu erwartete Ausbau der Offshore-Windkraft in Gang kommt (siehe auch Kapitel 3.5.4). Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, muss das Netz verstärkt und umgebaut werden. Es stellt sich die Frage, wie und mit welcher Technologie dies geschieht. Eine Möglichkeit ist der Bau von HGÜ-Leitungen (Hochspannungsgleichstromübertragung), die wie „Stromautobahnen“ für den Langstreckentransport von Nord nach Süd führen. Die Idee von Stromautobahnen ist eine Idee, die auch von der Deutschen Energie Agentur (dena) aufgegriffen wurde (siehe z.B. Schlandt 2008). Für diese „Autobahnen“ stehen grundsätzlich 2 Alternativen zur Verfügung: HGÜ oder Wechselstrom (HVAC)¹⁸. HVAC ist eine Technik, die zwar das Übertragungsnetz heute dominiert, die aber über lange Strecken ineffizient ist. HGÜ hat nur etwa halb so hohe Verluste wie HVAC, braucht weniger Leitung für die gleiche Kapazität und verbraucht deshalb weniger Fläche für die Leitungsstrassen.

Der Einsatz von HGÜ-Leitungen bringt nur geringe direkte CO₂-Einsparungen. Die CO₂-Einsparungen durch Verlustminderungen im Vergleich zur Drehstromübertragung sind etwa 30 kt CO₂/TWh bei Vollast-Übertragung von der Nordsee nach Stuttgart oder München.

HGÜ-Leitungen ermöglichen aber einen kräftig verstärkten Einsatz erneuerbaren Stroms durch den effizienten Stromtransport von den Produktionsstandorten zu den

¹⁸ Die HVAC-Variante wird von der Deutschen Energie-Agentur befürwortet für die „Stromautobahnen“.

Verbrauchsregionen. Die indirekten Einsparungen der so ermöglichten Einspeisung von erneuerbarem Strom sind um ein Vielfaches höher als die direkten Einsparungen.

Die Frage die sich stellt ist, wie man den Ausbau der Netze am effizientesten und billigsten gestalten kann. Die Kosten für HGÜ-Leitungen sind generell etwas niedriger als für HVAC-Leitungen. Andererseits braucht man an jedem Ende einer HGÜ-Leitung Wechsel- oder Gleichrichter, welche teuer sind und dazu führen, dass HGÜ erst ab etwa 600 km billiger als HVAC wird (vgl. DLR 2006).

Da es sich bei Drehstrom um eine sehr verbreitete Technologie handelt, sind große Kostensenkungen nicht zu erwarten. Die HGÜ-Technik ist ebenfalls eine bekannte und erprobte Technik, die aber nicht im gleichen Umfang benutzt wird wie die Drehstromübertragung. Die Durchführung von neuen, größeren HGÜ-Projekten könnte deshalb zu erheblichen Lerneffekten führen, zum Teil durch Verbesserungen von Know-How aber auch durch direkte Skaleneffekte bei der Produktion von Leitungen und Convertern (siehe z.B. Bahrman, Johnson (2007); Czisch (2006), DLR (2006)).

Eine weitere wichtige Wirkung eines innerdeutschen HGÜ-Projekts könnte seine Funktion als Wegweiser für weitere, ähnliche Projekte innerhalb Europas und auch interkontinental sein. Die HGÜ-Technik wurde in Europa und in der westlichen Welt vorwiegend für Unterseekabel verwendet, nicht aber für die Punkt-zu-Punkt-Übertragung von Strom über lange Überland-Strecken. Ein gut durchgeführtes innerdeutsches HGÜ-Projekt könnte deshalb als Türöffner für weitere nationale, internationale, transeuropäische oder sogar interkontinentale Projekte dienen. Dies würde die Netzintegration von sehr großen Mengen an erneuerbarem Strom erleichtern und die Möglichkeit zu Importen von klimaneutralem Strom aus beispielsweise Nordafrika eröffnen.

Der nächste Schritt wäre eine Machbarkeitsstudie, die die beiden Alternativen zur Netzverstärkung innerhalb Deutschland untersucht und vergleicht, unter besonderer Berücksichtigung von Effizienz-, Kosten-, Klima-, Netzintegrations- und Genehmigungsaspekten.

6.2 Lernende EnergieEffizienz-Netzwerke

Bei den Lernenden EnergieEffizienz Netzwerken (LEEN) handelt es sich nicht um eine neue Technologie, sondern um eine organisatorische Maßnahme in Form moderierter Unternehmensnetzwerke. Ziel der Netzwerke ist es, die Energieeffizienz in den teilnehmenden Betrieben bzw. Unternehmen deutlich zu steigern, um so die Energiekostensteigerung zu dämpfen und die CO₂-Belastung für die Umwelt zu senken. Basis der LEEN ist die Identifizierung von Energiesparmaßnahmen in den Betrieben. Durch Expertenvorträge und insbesondere einen regelmäßigen Erfahrungsaustausch unter den Unternehmen erhalten die Teilnehmer alle relevanten Informationen, um identifizierte Maßnahmen zügig umzusetzen. Durch die Netzwerke werden die hierdurch verursachten Such- und Entscheidungskosten deutlich gesenkt und das Thema Energie erhält über die Institutionalisierung des Prozesses einen höheren Stellenwert im jeweiligen Unternehmen.

Derzeit existieren in der Schweiz gut 70 und in Deutschland etwa 15 Energieeffizienz- bzw. Klimaschutz-Netzwerke. Diese LEEN erreichen eine Verminderung der spezifischen Energieverbräuche um 2 bis 3% pro Jahr gegenüber dem Durchschnitt der Wirtschaft von 1% pro Jahr. Das Instrument ist beschränkt auf Betriebe zwischen 200 000 und 20 Mio. € Jahresenergiekosten. Das Potential für derartige Klimaschutz-Netzwerke liegt in Deutschland auf Grund der Erfahrungen in der Schweiz bei bis zu 700 LEEN, von denen in der zweiten Hälfte des kommenden Jahrzehnts etwa 300 bis 500 realisiert werden könnten.

Denkbare Beiträge zur Treibhausgasminderung nach Markteintritt durch Effizienzgewinne oder Brennstoff-Substitution bis 2020 und 2030

Der direkte CO₂-Ausstoß im *produzierenden Gewerbe* beträgt heute etwa 85 Mio. t pro Jahr oder etwa 10% der gesamten CO₂-Emissionen Deutschlands. Rechnet man die indirekten Emissionen hinzu, die durch den Stromverbrauch verursacht werden, so ergibt sich ein Wert von etwa 230 Mio. t CO₂ pro Jahr. Um die gesamte Wirtschaft zu erfassen, welche als potentielle Kunden für LEEN in Frage kommen, müssen sowohl die direkten als auch indirekten Emissionen der Dienstleistungsbranchen betrachten. Diese liegen bei 135 Mio. t (direkte und indirekte Emissionen). Wenn es in der Zukunft 500

Netzwerke gäbe könnten bis 2020 von den genannten 370 Mio. t CO₂ zwischen 10 und 20 Mio. t eingespart werden. Dieses Potential ist bis 2030 noch erweiterbar (ca. 700 Netzwerke).

Hinweise zur Wirtschaftlichkeit und möglicher Kostendegressionen im Betrachtungszeitraum

In den LEEN werden mögliche Maßnahmen zur Energiekostenreduktion identifiziert und ökonomisch bewertet. Da es den Unternehmen freigestellt ist, welche Maßnahmen sie umsetzen wollen, werden nur wirtschaftliche Maßnahmen umgesetzt. Somit sind die Investitionen in hohem Maße rentabel. Die interne Verzinsung liegt in der Regel zwischen 10% und 50%, wobei einerseits begleitende Nutzen wegen mangelnder Quantifizierung häufig nicht mitgerechnet wurden, andererseits aber auch die Programmkosten nicht berücksichtigt sind. Die Programmkosten für den Betrieb der Netzwerke belaufen sich derzeit auf etwa 10 € je vermiedene Tonne CO₂. Allerdings ist davon auszugehen, dass diese Kosten noch etwas sinken werden, wenn solche Netzwerke in großer Zahl realisiert werden und dann sog. Economies of Scale durch Routinen und Berechnungshilfen erzielt werden können.

Empfehlungen für die nächsten Schritte

Um die Diffusion der lernenden Energieeffizienz-Netzwerke vorzubereiten, haben die Autoren gegenüber der Bundesregierung (BMU) ein bundesweites koordiniertes Markteinführungsprojekt mit 30 neuen LEEN - jeweils ein bis zwei Netzwerken je Bundesland - vorgeschlagen. Das Budget für diese Projektidee ist inzwischen durch den Haushaltsausschuss (72. Haushaltsausschusssitzung vom 18. Juni 2008,) genehmigt worden. Die 30 Netzwerke sollen für vier Jahre mit einem Drittel ihrer Kosten für Moderation, Initialberatung und Monitoring gefördert werden. Darüber hinaus werden das bestehende Organisationsmaterial und das Bewertungsinstrumentarium (z.B. Vertragsmuster, Vorträge, Monitoring und insbesondere, technikspezifische Investitionstools) neu- und weiterentwickelt.

Die Potentiale zur Energieeffizienz und Möglichkeiten für erneuerbaren Energien sollen schneller identifiziert werden und die Qualität der Analysen soll vereinheitlicht und

erhöht werden, weshalb das besondere Augenmerk in der Entwicklung von EDV-gestützten Investitionsberechnungshilfen für eine Reihe wichtiger Querschnittstechniken liegt. Diese Techniken sind z.B. Druckluft- und Pumpensysteme, Ventilatorensysteme, Vakuumerzeugung, Kälteerzeugung, Abwärmenutzung, Beleuchtung, Nachtauskühlung, Klimatisierung, Heizungsanlagenhydraulik, Wärmeschutz von Fabrikationshallen, oder die Wärmerückgewinnung aus Abwasserströmen).

Weiterhin ist die effiziente Umsetzung solcher Netzwerke für deren breite Anwendung entscheidend. Daher ist ein ganzes Portfolio von organisatorischen Hilfsinstrumenten zu entwickeln (Vorträge, Vertragsunterlagen, Hinweislisten für den Ablauf der regelmäßigen Treffen, Briefvordrucke, Bedienungsanleitungen für die Investitionsberechnungen etc.), deren Anwendung in einem Leitfaden zur Realisierung der LEEN beschrieben wird.

Ziel ist es, die Performance der 30 Netzwerke laufend zu evaluieren, Verbesserungen vorzunehmen und Potentiale netzwerkübergreifender Synergien auszunutzen (z.B. gemeinsame Hotline, Austausch erfolgreicher Einzelmaßnahmen, jährliche Tagung für alle Moderatoren und Beratenden Ingenieure). Geht man von Kosten je Netzwerk und Jahr von 80 000 bis 100 000 € aus, so wäre der Förderbetrag bei 30 Netzwerken etwa 1 Mio. € pro Jahr. Die beteiligten Unternehmen müssten 2 Mio. € pro Jahr und zudem ihre eigenen Kosten für die Teilnahme an den Treffen aufwenden. Die eingesparten Energiekosten der beteiligten Betriebe sind erfahrungsgemäß nach vier Jahren Betrieb mindestens 30 bis 50 Mio. € pro Jahr, von denen der Kapitaldienst für die getätigten Investitionen gedeckt werden muss.

Die Vorbereitung dieses bundesweiten Demonstrationsprojektes wird im Jahre 2008 erfolgen; erfahrungsgemäß braucht es etwa vier bis sechs Monate von der ersten Ansprache der Unternehmen an einem Standort bis zum ersten Treffen der beteiligten Unternehmen. Die geförderte Laufzeit der 30 LEEN liegt deshalb im Zeitraum von 2009 bis 2012.

Die hier geforderte Umsetzung von Maßnahmen zur Energieeffizienz und dem Einsatz erneuerbarer Energien in Industrie und Dienstleistungssektoren beinhaltet also nicht die Durchführung von Effizienz-Netzwerken mit Pilotcharakter, diese gibt es schon in ausreichender Zahl in Deutschland. Sie setzt vielmehr bei der flächendeckenden Diffusion des benötigten Know-hows für Moderatoren und beratende Ingenieure sowie zur Um-

setzung der Netzwerke in bundesweitem Maßstab an, indem sie das Instrumentarium dafür entwickelt und anwendet.

Die Verwaltung dieses gesamten Instrumentariums (Organisationsmaterial, Berechnungshilfen) soll durch die noch in 2008 zu gründende LEEN GmbH stattfinden, die zu Beginn auch die Schulung und Zertifizierung für die Moderatoren der Netzwerke und interessierte beratende Ingenieure übernehmen wird, damit diese in der Lage sind, Netzwerke selbstständig zu initiieren bzw. durchzuführen. Dieses Demoprojekt der 30 Netzwerke wird in enger Kooperation mit dem DIHK durchgeführt.

6.3 Solarthermische Prozesswärme

Wärmeerzeugung für industrielle Prozesse ist bisher kein Einsatzgebiet für solarthermische Anwendungen in Deutschland oder Industrieländern mit vergleichbarem Klima gewesen. Der Niedertemperatur-Prozesswärmebedarf für den Industrie- sowie den Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor (GHD), der mit 600 bis 700 PJ pro Jahr nicht unerheblich ist, wird derzeit fast ausschließlich mittels fossiler Energieträger erzeugt. Um das 40%-CO₂-Minderungsziel der Bundesregierung bis zum Jahre 2020 zu erreichen, müssen weitere Effizienzgewinne erzielt und Anwendungspotenziale der erneuerbaren Energien bei der Warm- und Heißwassererzeugung in der Industrie und dem GHD-Sektor erschlossen werden.

Etwa ein Drittel des Prozesswärmebedarfs der deutschen Industrie liegt im Temperaturbereich unterhalb von 250°C, was die Anwendung solarthermischer Großanlagen ermöglicht. Nach verschiedenen Untersuchungen in Österreich (Weiss, Müller 2004) liegen die wesentlichen Einsatzbereiche für solche Anlagen in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie, der Textilindustrie, der Zellstoffindustrie, der Galvanik sowie in der Metallverarbeitung und der chemischen Industrie (insbesondere Pharma-Herstellung), weil hier häufig Prozesstemperaturen zwischen 30°C und 90°C notwendig sind (Hennecke et al. 2005). Die Industriebranchen mit besonders großem Anwendungspotenzial sind in der Tabelle 6-1 zusammengefasst. Damit besteht die Möglichkeit, thermische Solarkollektorsysteme zu nutzen, die schon heute zur Verfügung stehen. So können beispielsweise im Bereich 80°C bis etwa 150°C die Vakuumröhrenkollektoren

oder konzentrierende CPC-Kollektoren eingesetzt werden (Rommel 2008, Procesol II 2002). Trotz guter Leistungscharakteristik dieser Kollektoren und hoher garantierter Standzeiten werden solche Anlagen bisher nur in Einzelfällen eingesetzt.

Tabelle 6-1: Prozesse mit typischen Temperatur-Niveaus mit dem größten Potenzial für solarthermische Anwendungen

Industriesektor	Prozess	Prozesstemperaturen [°C]
Lebensmittel und Getränke	Trocknen	30-90
	Waschen	40-80
	Pasteurisieren	80-110
	Kochen	95-105
	Sterilisieren	140-150
	Wärmebehandlung	40-60
Textilindustrie	Auswaschen	40-80
	Bleichen	60-100
	Färben	100-160
Zellstoff- und Papierindustrie	Kochen	95-105
	Trocknen	30-90
	Ablaugeinedickung	100-130
Chemische Industrie, insbes. Pharmazeutische Industrie	Kochen	95-105
	Destillieren	110-300
	Diverse chem. Prozesse	120-180
Holzindustrie	Beizen	40-70
	Pressen	120-170
	Trocknen (auch für Pellets)	50-90
Metallindustrie	Trocknen	100-120
	Galvanisieren	40-110
	Waschen	60
	Entlacken	60-80
Alle Industrie-Sektoren	Vorwärmung von Kesselwasser	30-100
	Beheizung von Industriehallen	30-80
	Kühlung und Klimatisierung	>80
	Gewächshäuser	40-90
	Sauna	80-100

Quellen: Weiss, Rommel (2005), Hennecke et al. (2005), Blesl et al. (2007)

Insgesamt steht diese Technologie heute noch am Anfang einer aussichtsreichen Marktdiffusion. Deshalb ist es wichtig, eine konstruktive Diskussion über bestehende Hemm-

nisse und fördernde Faktoren zu führen, sowie mögliche Markteinführungsstrategien und Fördermaßnahmen seitens der Politik und der Wirtschaft zu initiieren. Außerdem besteht Bedarf, unter Berücksichtigung des jetzigen Entwicklungsstandes der thermischen Solartechnik, das tatsächlich nutz- und realisierbare Potenzial in aussichtsreichen Anwendungen und Branchen zu analysieren. Aus Sicht der Solartechnik wären die vier Temperaturbereiche bis 80°C, bis 130°C, bis 170°C und bis 250°C von Interesse und sollten getrennt ausgewertet werden. Dies könnte im Rahmen der hiermit vorgeschlagenen Markteinführungsstrategie als nächster Schritt durchgeführt werden.

Stand im Technologiezyklus und technische Wettbewerber

Bei einer beschleunigten Markteinführung der solarthermischen Kollektoranlagen sind verschiedene Faktoren zu berücksichtigen, die deren Stand im Technologiezyklus beeinflussen:

- Eine detaillierte Energieanalyse von Produktionsanlagen und deren Re-Investitionsoptionen ist notwendig, um mögliche Alternativen des gesamten Prozessablaufs zu ermitteln. Hierzu gehören auch organisatorische Umstellungen, um beispielsweise die Spitze des Prozesswärmebedarfs in den Nachmittagstunden abzufangen. Eine wichtige Rolle spielen auch die Technologien, die mit zur Solarthermie in Konkurrenz stehen, wie z.B. die Kraft-Wärme-Kopplung, Wärmepumpen, die Abwärmenutzung und Energieeffizienz-Maßnahmen (Schnitzer et al. 2006).
- Der hohe Beratungs- und Planungsaufwand stellt auch eine Herausforderung dar, weil für jede Anlage individuell geplant werden muss. Häufig fehlen bei Herstellern oder planenden Ingenieuren geeignete Simulationstools für die schnelle Auslegung der Anlagen, für Wirtschaftlichkeitsberechnungen, aber auch zur Berücksichtigung von Planungsrichtlinien (Meyer 2007).
- Das größte Hindernis stellt jedoch der benötigte Umbauaufwand für die Integration der Solaranlage in das Gesamtsystem dar, der zum Teil auch durch die zusätzliche Dachlast verursacht wird, die oft eine neue Statikberechnung nach sich zieht. Daher sind Umbau- und Installationskosten bei bestehenden Anlagen in der Regel ein großer Kostenblock (Meyer 2007).

- Teilweise fehlen zusätzlich - aus architektonischen Gründen oder wegen der Gebäudeausrichtung – hinreichend geeignete Kollektorstellflächen. Außerdem stehen diese Flächen in Nutzungskonkurrenz zu PV-Anlagen oder Werbetafeln.

Denkbare Beiträge zur Treibhausgasminderung nach Markteintritt durch Effizienzgewinne oder Brennstoff-Substitution bis 2020 und 2030

Das CO₂-Minderungspotenzial der solarthermischen Anwendung in Industrie und GHD dürfte relativ einfach abzuschätzen sein, da die erforderliche Prozesswärme in den meisten Fällen heute durch erdgas- oder heizölbetriebene Kesselanlagen erzeugt wird. In einer zurzeit nicht bekannten Anzahl von Fällen wird die Niedertemperatur-Wärme unter 80°C auch aus Abwärme (z.B. von Kompressoren, warmen Abwässern und Kondensationswärme) gewonnen. Bewertet man das o. g. Potential der solaren Wärme mit 50 PJ/a, so entspricht dies einem CO₂-Minderungspotenzial von 3 Mio. t CO₂/a.

Hinweise zur Wirtschaftlichkeit und möglicher Kostendegressionen

Etwa 80% der Investitionsentscheidungen werden derzeit – insbesondere in kleinen und mittelständischen Unternehmen - nach der Methode der Amortisationszeit, d.h. einem Risikomaß getroffen, anstatt sie nach ihrer Rentabilität zu beurteilen (Barwert oder interne Verzinsung). Somit stellen die geforderten oft sehr kurzen Amortisationszeiten von maximal drei Jahren eine völlig unangemessene Forderung für die in der Regel langfristigen Investitionen in die Wärmeversorgung und die Energieeffizienz dar. Darunter fallen auch solarthermische Systeme mit Nutzungsdauern zwischen 10 und 20 Jahren (Gruber et al. 2006).

Sollten solarthermische Anlagen jedoch in größerem Umfang eingesetzt werden, dürfte eine weitere Kostendegression diese Maßnahme mittelfristig konkurrenzfähig zur herkömmlichen Wärmebereitstellung machen.

Empfehlungen für die nächsten Schritte und Ausblick

Am 8. Mai 2008 wurde ein Workshop mit Vertretern seitens der Hersteller und Anwender solarthermischer Anlagen, mit Vertretern der Banken, des Bundes-

Umweltministeriums und der angewandten Forschung durchgeführt. Der Workshop diente dazu, für den Bereich der solarthermischen Kollektorsysteme die wirtschaftlichsten Anwendungen in der Industrie und im Gewerbe zu identifizieren und die Hemmnisse und fördernden Faktoren, die für diese Technologie von Bedeutung sind, zu identifizieren und zu prüfen. Der Workshop zeigte, dass es hinreichend Interessierte aus den anwesenden Akteursgruppen gibt, die an einer weiteren gemeinsamen Arbeit mit dem Ziel einer beschleunigten Marktdiffusion der solarthermischen Prozesswärmeerzeugung beteiligt sein würden. Dabei sollte der Kreis der Interessierten auf diejenigen ausgedehnt werden, die sich dem Ziel dieser Plattform verpflichten und die hierzu einen Beitrag leisten können.

Als Ergebnis der Diskussion wurden folgende Maßnahmen empfohlen, die in den kommenden zwei Jahren von den relevanten Akteuren ergriffen werden sollten:

- Es sollte geprüft werden, inwieweit die Förderung der solarthermischen Kollektorsysteme in der industriellen und gewerblichen Anwendung nach exergetischen Gesichtspunkten für Kollektorleistung und Wärmespeicher einheitlich für m³-Volumen und Latentwärmespeicher mit Leistungsfaktor zu realisieren ist. Als Folge einer solchen Förderung kann der technische Fortschritt beschleunigt werden, die Anlagen mit Speicher mehr Anwenderorientiert geplant und insgesamt die Akzeptanz der solarthermischen Prozesswärmeerzeugung als High-Tech-Lösung gefördert werden.
- Durch diese Förderung und durch weitere Änderungen und Vereinfachungen sollten die Förderrichtlinien des BMU den o.g. Erfordernissen von solarthermischer Prozesswärme in Industrie und Gewerbe in Bezug auf der Speicherauslegung und -förderung bei den kleineren Anlagen in der BAFA-Variante, den Kumulationsmöglichkeiten und einer einfachen Antragsstellung besser gerecht werden. Hierzu sollten mit dem BMU, dem BAFA und der KfW Gespräche geführt werden, in welcher Form die bestehenden Förderprogramme vereinfacht und an die technische Entwicklung und Anwendung in Industrie und Gewerbe angepasst werden könnten, z. B. durch Förderung nach Leistung (beim Einstrahlungsmittel) und nicht nach der Bruttofläche im Marktanreizprogramm oder ohne bzw. mit branchenangepasste Auflagen für Speicher bei

entsprechenden Anwendungen kurzfristig verwendeter Wärme in gewerblichen Prozessen.

- Eine Reihe von Demonstrationsprojekten sollten in geeigneten Anwendungen und Branchen realisiert werden, um über die gleichzeitige wissenschaftliche Evaluation dieser Projekte konkrete Anwendungen und verlässliche Informationen für die jeweiligen Branchen zur Verfügung zu haben. Hierzu werden Solarkollektorsystem-Hersteller und Forschungsinstitute herausgefordert sein, Anwender und beratende Ingenieure zu Netzwerken zusammenzufügen, um eine Serie dieser Anlagen in 2008 bis 2010 zu realisieren.
- Planungsempfehlungen sowie Simulations- und Investitionsberechnungshilfen für Hersteller und beratende Ingenieure sind zeitlich parallel zu entwickeln bzw. zu verbessern. Hierzu könnte ein Antrag im Herbst 2008 von interessierten Forschungs-Instituten, Herstellern und Ingenieurbüros beim BMU gestellt werden.
- Spezielle Informationskampagnen und Fortbildungsangebote für Zielgruppen wie Energieverantwortliche in ausgewählten Industrie- und Gewerbebranchen, für beratende Ingenieure und Installationsfirmen sind von den Herstellern und einigen Forschungsinstituten im Laufe der Jahre 2008 und 2009 vorzubereiten. Hierbei geht es nicht nur um technische Inhalte, sondern auch um Vorträge zu Wirtschaftlichkeitsberechnungen von Anlagen und um Aufklärungsvorträge für Einkäufer und Geschäftsführer der Anwenderbranchen. Dabei ist es wichtig branchenabhängige Kommunikationskanäle zu finden und zu nutzen.
- Die große Unbekannte sind die unter Temperaturniveau, saisonalem Bedarf und Energiekosten am Besten geeigneten wärmeverbrauchenden Prozesse. Eine zusammenfassende Studie zu verfahrenstechnischen Industrieprozessen bis 130°C wäre deshalb hilfreich, wobei der heutige Stand der Solarthermie (nach technischen und Kosten-Parametern) berücksichtigt werden soll, um besonders günstige Anwendungen für solare Prozesswärme zu identifizieren.
- Zu erwägen ist auch der Bau vergleichbarer Solaranlagen innerhalb einer Branche (z.B. Brauerei oder metallbearbeitende Betriebe), um einen direkten Vergleich bei ähnlicher Prozesstechnik zu erzielen. Hierbei sollte auch die

Erstellung eines Energiekonzeptes zu Energieeffizienz und Solarintegration in irgendeiner Form gefördert werden, da dies zunächst recht arbeitsaufwendig ist und die Entwicklung von rechnergestützten Modellen erfordert.

- Bei einer Weiterführung des am 8. Mai 2008 entstandenen Arbeitskreises sollten Verfahrenstechniker aus Forschung und Prozessanlagenhersteller mit Kenntnissen der Prozesse der in Frage gekommenen Branchen hinzugezogen werden, da deren Hintergrundwissen eine maßgebliche Bereicherung und Hilfestellung darstellen würde.

6.4 Sanierung bestehender Gebäude

Der Gebäudebestand in Deutschland bietet umfangreiche Potentiale für Energieeinsparungen, da die meisten Gebäude noch nicht den heutigen Anforderungen an Wärmeschutz und effiziente Heizungsanlagen entsprechen. Diese Potentiale in Gebäuden werden aber nur unzureichend genutzt, notwendige Sanierungen werden vielfach verschoben oder mit Reparaturen überbrückt. Bei durchgeführten Sanierungen werden häufig nicht alle Möglichkeiten zur Energieeinsparung genutzt. Durch die Einführung der Energieeinsparverordnung (EnEV) oder mit Hilfe von Förderprogrammen der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) wurden bereits Schritte unternommen, um dieses Potential besser zu erschließen. Auch regionale Kampagnen und branchenbezogene Initiativen haben in den vergangenen Jahren umfangreiche Anstöße gegeben.

Durch die Beschlüsse von Meseberg können weitere Energieeinsparungen im Gebäudebestand erzielt werden, diese müssen allerdings durch verstärkte begleitende Maßnahmen wie Öffentlichkeitsarbeit, Weiterbildung, Qualitätssicherung und Kontrollen unterstützt werden.

Darüber hinaus bestehen Einsparpotentiale, die durch eine weitere Beschleunigung der Gebäudesanierungen realisiert werden können. Dazu müssen in mehreren Bereichen parallel Anstrengungen unternommen werden, da derzeit aus ganz unterschiedlichen Gründen Hemmnisse bei energetischen Sanierungen existieren. Besondere Schwerpunkte sollten dabei auf Instrumente zur verstärkten Information, Qualifikation und Motivation der Gebäudebesitzer und der Baufachleute gelegt werden. Zusätzlich können neue

technologische Entwicklungen helfen, die Sanierungseffizienz zu steigern bzw. deren Kosten zu senken.

Pilotprojekt Wohngebäude: Sanierungsquote steigern – die Menschen erreichen

Trotz aller Anstrengungen im politischen Raum, durch Subventionen, Gesetze und Verordnungen sowie durch qualitative Maßnahmen ist es bislang noch nicht gelungen, die Sanierungsquote und die Sanierungsqualität auf einen für den Klimaschutz erforderlichen Stand zu bringen. Es gilt daher, ein Maßnahmenpaket auf den Weg zu bringen, das mehr Hauseigentümer erreicht und Argumente für positive Sanierungsentscheidungen liefert.

- **Sanierungskampagne:** Auch wenn auf verschiedenen Ebenen bereits Öffentlichkeitsarbeit betrieben und Kampagnen lanciert werden, ist der Bedarf in diesem Bereich noch immens. Offensichtlich gibt es bedeutende Zielgruppen, wie etwa selbst nutzende Gebäudeeigentümer über 60 Jahre, die noch nicht mit den geeigneten Argumenten erreicht werden. Dazu könnten neben einer stärkeren Vernetzung bestehender Initiativen auch andere „Kanäle“ genutzt werden, beispielsweise die regelmäßige Vorstellung von sanierten Energiesparhäusern vor der Ziehung der Lottozahlen, um die unfassende energetische Sanierung als „Trend“ zu etablieren. Ziel ist es, einen neuen Trend der Sanierungskultur zu etablieren, der neben dem Klimaschutz die vielen weiteren Vorteile der Modernisierung von bestehenden Gebäuden vermittelt.
- **Qualitätsoffensive:** In die langfristige Qualitätsverbesserung der Sanierung lässt sich am Besten durch die verstärkte Qualifizierung von Bauschaffenden investieren. Da diese weder an den Hochschulen noch in den handwerklichen Erstausbildungen ausreichend in der energetischen Modernisierung geschult werden, muss dies durch Fort- und Weiterbildung erfolgen. Hier bestehen auch Ansatzpunkte, um die Verbreitung und Anwendung neuer, besonders energieeffizienter Technologien zu beschleunigen. Qualität lässt sich aber auch durch die Bindung von Fördermitteln an bauliche Kontrollen oder – wie jetzt von der KfW angeboten – durch die Förderung baubegleitender Beratungen verbessern. Im Rahmen der Qualitätsoffensive sollten auch höhere Sanierungsstandards etabliert werden, die von den Gebäudeeigentümern beauftragt und

überprüft werden können, beispielsweise orientiert am Minergie-Standard in der Schweiz.

- **Rahmenbedingungen:** Eine Novellierung des Mietrechts, um in moderater Form energetische Investitionen auf die Miete umzulegen und letztlich Mieter und Vermieter stärker von einsparenden Maßnahmen profitieren zu lassen, ist dringend erforderlich. Auch für die Objekte, die Eigentümergeinschaften gehören, sollten Anreize für Sanierungsmaßnahmen geschaffen werden. Bereits existierende Nachweispflichten bei der Umsetzung der EnEV sollten durch stichprobenhafte Kontrollen der Bauausführung ergänzt werden. Die Jahre 2005 bis 2007 haben gezeigt, dass der Markt in starker Weise von der Förderung der KfW nach dem CO₂-Gebäudesanierungsprogramm abhängt und sich durch hohe Zuschusssummen erheblich beschleunigen lässt. Zu achten ist neben der Höhe der Förderung auch auf die Kontinuität und Berechenbarkeit. Zinsschwankungen bei den KfW-Gebäudesanierungsprogrammen verunsichern nicht nur Bauherren, sie führen auch zu erheblichen Auf- und Abentwicklungen bei Bauindustrie, Baustoffherstellern sowie Planern und Handwerkern.

Mit dem vorgeschlagenen Ausbau von Instrumenten zur Information, Qualifikation und Motivation von Gebäudebesitzern und Baufachleuten sowie Schaffung unterstützender Rahmenbedingungen können Anzahl und Qualität der energetischen Sanierungen gesteigert und die Einsparpotentiale stärker genutzt werden.

Pilotprojekt Nichtwohngebäude: Grundlagen für eine dynamische Entwicklung schaffen

Gewerblich und kommunal genutzte Nichtwohngebäude bieten beträchtliche Einsparpotenziale bei Heizwärme- und Stromverbrauch, die bislang noch kaum in den Fokus der Politik, geschweige denn der Eigentümer und Nutzer getreten sind. Bauherren und Immobilienbesitzer in der privaten Wirtschaft und bei der öffentlichen Hand kennen in der Regel ihre Einsparpotenziale nicht und auch die Tatsache, dass diese wirtschaftlich zu erzielen sind, ist ihnen unbekannt. Dementsprechend mangelt es auch an Strategien, mit denen Sanierungen für den Gebäudebestand entwickelt und umgesetzt werden können

und an einer ausreichenden Kompetenz unter den Baufachleuten, die diese vermitteln können sollten. Um eine schnell wirkende Strategie für die energetische Modernisierung in diesem Bereich zu schaffen, müssen aber zunächst die Grundlagen geschaffen werden:

- **Gebäudetypologien:** Ein erster Problempunkt liegt schon in der Datenlage oder bei fehlenden Benchmarks. Bei Bürogebäuden, Schulen oder Produktions- und Gewerbehallen sind oft weder deren Anzahl und Größe noch deren Verbräuche genau bekannt. Es gibt außerdem keine Gebäudetypologien, ausreichend dokumentierte Sanierungskonzepte oder Vorbilder. Für eine geeignete politische Sanierungsstrategie für Nichtwohngebäude fehlt es an Daten und Erfahrungen, welche Einsparungen in welcher Zeit realistisch zu erzielen sind. Es sind daher Maßnahmen notwendig, die die Datengrundlagen zu Energieverbrauch unterschiedlicher Nichtwohngebäude, Entscheidungsprozessen sowie Sanierungsraten und -standards kurzfristig verbessern und Benchmarks als Entscheidungshilfen zur Verfügung stellen.
- **Technologieoffensive:** Der Kostendruck durch die Energiepreise hat schon in der Vergangenheit zu einem höheren Innovationsgrad in der Baubranche geführt. Der Stand der Technik erlaubt längst sehr viel mehr Energieeffizienz bei Neubau und Sanierung als in der Realität umgesetzt wird. Mit einer Informations- und Qualifizierungsinitiative müssen Architekten, Bauingenieure und professionelle Immobilienmanager in die Lage versetzt werden, die Chancen der Technik zu erkennen, die entsprechenden Einsparpotenziale zu nutzen und gleichzeitig der Industrie durch steigende Nachfrage die Signale zu geben, dass sich weitere Forschung und Entwicklung lohnt.
- **Ordnungsrecht:** Die bestehende Energieeinsparverordnung (EnEV) schreibt seit ihrer Novellierung von Oktober 2007 vor, die DIN 18599 zur energetischen Bewertung von Nichtwohngebäuden anzuwenden und bildet damit die Grundlage für die systematische Erfassung des Energiebedarfs und die entsprechende Transparenz. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen sind aber kaum bekannt. Um die positiven Wirkungen der EnEV zur Entfaltung kommen zu lassen, müssen neben intensiver Informationsarbeit auch Kontrollmaßnahmen in geeigneter unbürokratischer Form eingeführt werden.

- **Qualifizierungssprung:** Der hohe und noch steigerbare Innovationsdruck auf den Baufachleuten findet noch keinen adäquaten Widerhall in der Aus- und Weiterbildung der Branche. Die Hochschulen müssen das Thema Energie insgesamt deutlich stärker in ihre Curricula integrieren und darüber hinaus interdisziplinär aufgebaute Studienangebote schaffen, die für die ganzheitliche Planung von Gebäuden und deren Sanierung gebraucht werden. Ebenso müssen Bildungsangebote auf- und ausgebaut werden, mit denen Architekten und Ingenieure berufsbegleitende attraktive Schulungen erhalten können. Dringend erforderlich sind Sanierungsbeispiele, die als Leuchttürme die Wirtschaftlichkeit sowie die Sanierungsstrategien erläutern.
- **Brancheninitiativen:** Ausgehend von der Bauwirtschaft mit ihren Projektentwicklern und Immobilienverwaltern müssen weitere Branchen ihre Netzwerke nutzen, um die Einsparmöglichkeiten und Einsparwege transparent zu machen. Dabei muss die konsequente Orientierung auf die Betrachtung der Betriebskosten bei Gebäuden erfolgen. Die Motivation, hoch energieeffizient zu bauen und zu sanieren kann auch durch Multiplikatoren wie die Finanzwirtschaft geschürt werden. Gerade die niedriginvestiven Maßnahmen mit ihren schnellen Amortisationen können als Türöffner genutzt werden, um auch für die eher langfristig wirkenden, aber nicht weniger lohnenden Maßnahmen zu werben.

Mit den genannten Programmen kann nicht nur eine Beschleunigung der Sanierungen von Nichtwohngebäuden angestoßen werden, sondern auch die Qualität der ausgeführten Maßnahmen erhöht werden. Dadurch können die großen Einsparpotentiale bei den rund 1,5 Mio. beheizten Nichtwohngebäuden stärker genutzt werden. Der durchschnittliche Energieverbrauch pro Nichtwohngebäude liegt beispielsweise fast viermal höher als der Verbrauch pro Wohngebäude, auch darum haben Nichtwohngebäude trotz der geringen Anzahl einen bedeutenden Anteil am Endenergieverbrauch in Deutschland.

6.5 Elektro-Straßen-Verkehr

Ziel dieses Pilotprojektes ist es, die Markteinführung mit Elektrofahrzeugen durch weitere empirische Beobachtungen zu beschleunigen (siehe die möglichen Wirkungen in Kapitel 3.3.5). Der Fokus dieser Maßnahme liegt dabei auf dem Stadtverkehr sowie auf zwei Arten elektrischer Fahrzeuge: Kleinere Batteriefahrzeuge, die als Stadtfahrzeuge sowie zum Einpendeln in Städte verwendet werden (kleine BEV), sowie elektrische Transporter (sog. Light Duty Vehicles, daher im Folgenden als LDV-BEV bezeichnet). Der Pilotversuch soll in einer deutschen Großstadt mit relativ vielen Einpendlern und Liefer- bzw. Dienstleistungsverkehr, z.B. Frankfurt oder München, gestartet werden. Bei Erfolg lässt sich das Vorhaben auf weitere Städte ausweiten. Die Motivation für ein derartiges Pilotvorhaben ergibt sich aus folgenden Punkten:

- Hoher Beitrag der Elektromobilität zur Umweltentlastung kritischer innerstädtischer Problemzonen,
- Konzentration auf den Stadtverkehr, weil die Reichweiten von BEV generell bislang durch die Batteriekapazität beschränkt sind, sowie
- Ergänzung zu bestehenden Pilotversuchen, die sich entweder auf Plug-in-Hybride oder auf Austauschbatteriekonzepte fokussieren.

Kleine BEV mit Reichweiten von 100 bis 150 km sind als Zweitwagen für Stadtfahrten und für Pendler mit kurzen Strecken geeignet. LDV-BEV sind für den Geschäfts- und Lieferverkehr sinnvoll, da sie viele kurze Strecken zurücklegen und ihr Einsatzprofil in vielen Fällen bekannt ist und somit ein gesteuertes Aufladen möglich erscheint. Innerstädtisch kommen einerseits die Effizienzvorteile des Elektromotors bei Teillast zum Tragen. Andererseits kann in den Standphasen bei geeigneter Infrastruktur die Batterie geladen werden.

Um die Nutzung von BEV zu fördern, sind politische Anreiz-Maßnahmen erforderlich. Es müssen geeignete Lademöglichkeiten geschaffen werden, um Komforteinbußen zu vermeiden. Im Rahmen des Pilotprojektes soll untersucht werden, inwiefern es für die Nutzer der kleinen BEV von Vorteil ist, wenn in der Stadt Parkplätze mit Lademög-

lichkeit zur Verfügung stehen. Für Flotten von LDV BEV muss die nötige Infrastruktur an Lade-Parkplätzen geschaffen werden. Angesichts von knappem und teurem Parkraum in Innenstädten könnte das Angebot kostengünstiger (Lade-)Parkplätze für BEV ein sinnvoller Nutzungsanreiz sein. Zu berücksichtigen ist hierbei auch die Auslastung des Stromnetzes – BEV sollten möglichst dann geladen werden, wenn die Stromnachfrage anderer Verbraucher gering ist. Hierzu sollten kleine BEV während der Parkdauer angeschlossen werden und im Sinne des Netzmanagements ge- oder (teilweise) entladen werden können. Ein weiterer interessanter Aspekt wäre es zu untersuchen, ob und wie dezentrale erneuerbare Energien eingebunden werden könnten.

Eine weitere Fördermöglichkeit sind innerstädtische Umweltzonen, in denen BEV Vorteile genießen. Ein Beispiel ist die Londoner City-Maut von 8 UK£ pro Tag, die für Elektrofahrzeuge erlassen wird. Die bislang hohen Kosten von Batterien verursachen einen preislichen Nachteil von BEV gegenüber konventionellen Fahrzeugen. So sind laut Smart im Londoner Versuch die Nutzungskosten für einen Elektro-Smart nach 4 Jahren in etwa gleichauf mit den Kosten eines Smart mit Verbrennungsmotor, die Einsparung von City-Maut in Höhe von ca. 10 000 € eingerechnet (Specht 2007). Dieser monetäre Nachteil sollte in einer Anfangsphase ausgeglichen werden, entweder über den Ansatz der Umweltzone oder durch geeignete Modelle der KFZ-Steuer. Mit fortlaufender Kostendegression bei Batterien sollte die steuerliche Förderung wieder abgebaut werden – ähnlich wie bei den Einspeisetarifen für Strom aus erneuerbaren Energien. Außerdem könnten in der Einführungsphase kleine BEV im Leasing-Verfahren oder über Car-Sharing angeboten werden, damit die Kunden nicht dem Risiko technischer Probleme ausgesetzt sind.

Bisherige Pilotprojekte der Elektromobilität, die bereits durchgeführt werden oder sich in der Planung befinden, beziehen sich auf Plug-in-Hybride oder Austauschbatterien (Better-Place-Konzept in Israel und Dänemark geplant), sie haben somit einen anderen Fokus. Gegenüber den Plug-in-Hybrid- und den Better-Place-Pilotprojekten bietet das vorgeschlagene Pilotprojekt eine sinnvolle Ergänzung für ein anderes Fahrzeug- und Kundensegment.

Stand im Technologiezyklus und technische Wettbewerber

Bei Batterien für BEV besteht wesentlicher technologischer Entwicklungsbedarf. Dies betrifft auch die Batterien für LDV-BEV, die erheblich leistungstärker werden müssen. Die Reichweite bisheriger und für die nächsten Jahre angekündigter kleiner BEV liegt lediglich bei maximal 150 km.

Viele Autohersteller entwickeln derzeit kleine BEV. So werden in London 100 Elektro-Smarts getestet (Grünweg 2007). VW hat kürzlich ein Konzept für einen Feldversuch mit Plug-In Elektroautos in Deutschland vorgelegt (BMU 2007a), das zusammen mit E.On und anderen Partnern sowie der Unterstützung der Bundesregierung laufen soll. Weitere in Entwicklung befindliche Elektroautos sind z.B. das Renault-Nissan Electric Car, das im Rahmen von Project Better Place entwickelt wird (Project Better Place Website 2008), und der Loremo EV (Loremo Website 2008), die jeweils 2011 bzw. 2010 am Markt sein sollen. Für kleine BEV wird ein Markteintritt ab 2010 erwartet, für LDV-BEV ab 2020.

Diese Fahrzeuge stehen u.a. in Konkurrenz zu erdölbasierten Kraftstoffen und Antriebssystemen, Biokraftstoffen, Coal-to-liquid Kraftstoffen, erdgasbasierten Lösungen sowie Wasserstoff und Brennstoffzellen. Auf Grund von hohen elektrischen Wirkungsgraden und zurzeit noch niedriger Steuerlast sind die Kraftstoffkosten von Elektrofahrzeugen verglichen mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren geringer. Ein wesentlicher Vorteil liegt in niedrigen Treibhausgasemissionen, selbst bei heutigem deutschem Strommix, und den niedrigen lokalen Emissionen (Ozonvorläufersubstanzen, Säurebildnern, Feinstaub und Lärm). Hier kommen lediglich in Abhängigkeit der Wasserstoffherstellung Brennstoffzellenfahrzeuge zu vergleichbaren Umweltvorteilen. Weiterhin ist die Elektromobilität das einzige Antriebssystem, das die Energieeffizienz im Verkehr deutlich steigern kann. Die Nachteile sind zurzeit die zurzeit noch hohen Investitionen und die je nach Batterie offenen Fragen nach Sicherheit und Alltagstauglichkeit.

Denkbare Beiträge zur Treibhausgasminderung nach Markteintritt durch Effizienzgewinne oder Brennstoff-Substitution bis 2020 und 2030

Der Beitrag des Pilotprojektes zur Minderung von Treibhausgasemissionen ist gering, sofern es bei nur einer teilnehmenden Stadt bleibt. Wenn sich der Ansatz jedoch auf

eine Vielzahl von Städten bundesweit ausdehnen lässt, ist Potential vorhanden. Insgesamt fuhren PKW 2006 in Deutschland 586,3 Mrd. km (BASt 2007), davon fuhren fast die Hälfte in Städten. Durch häufiges Anfahren und Abbremsen entstehen hierbei relativ viele Treibhausgasemissionen und eine hohe Belastung an lokalen Emissionen.

Auch der Ansatz, LDV mit Elektroantrieb zu versehen, könnte beträchtliche Auswirkungen haben. Laut dem Verkehrsclub Deutschland (VCD) erreicht der Wirtschaftsverkehr in großen Städten einen Anteil von 25 bis 30% am werktäglichen KFZ-Verkehrsaufkommen. Der darunter subsumierte Güterverkehr (rund ein Drittel des Wirtschaftsverkehrs) nutzt überwiegend leichte Nutzfahrzeuge (VCD 2006). Auch im Dienstleistungsverkehr und in der städtische Ver- und Entsorgung können LDV-BEV zum Einsatz kommen.

Sowohl PKW-Stadtfahrten als auch LDV-Einsätze machen also wesentliche Anteile des Straßenverkehrs aus. Emissionsminderungen hängen davon ab, welcher Anteil der Verkehrsströme mit konventionellen Fahrzeugen durch BEV ersetzt werden kann. Die Beiträge dieses Pilotprojektes und des Potentials dieser Fahrzeugtypen (BEV und LDV-BEV) müssen bei den Auswirkungsanalysen des Kapitels 3.3.5 bis 2030 als gering angesehen werden.

Hinweise zur Wirtschaftlichkeit und möglicher Kostendegression

Die Wirtschaftlichkeit dieses Pilotprojektes hängt u.a. erheblich von der Kostendegression bei Batterien sowie der Preisentwicklung von erdölbasierten Kraftstoffen gegenüber Elektrizität für den Verkehr ab. Für Abschätzungen hierüber sowie über die Entwicklung weiterer Kostenfaktoren siehe Kapitel 3.3.5.

Empfehlungen für die nächsten Schritte

Im Vorfeld des Pilotprojektes muss geklärt werden, welche Fahrzeughersteller bereit zu festen Zusagen sind und wann und in welchem Umfang sie kleine BEV und LDV-BEV anbieten werden. Mit Batterieherstellern muss geklärt werden, in welchem Umfang und zu welchen Preisen sie in den kommenden Jahren geeignete Batterien anbieten können. Außerdem sind die Identifikation geeigneter Nutzergruppen sowie deren Bereitschaft für die Teilnahme am Pilotprojekt zu klären. Weiterhin muss ein Energieversorger zum

Aufbau einer Netzinfrastruktur sowie ein weiterer Marktteilnehmer zum Aufbau von Ladestationen in das Projekt integriert werden.

Darüber hinaus ist die Wahl einer Stadt erforderlich, die sich für die Umsetzung des Pilotprojektes eignet. Hier bieten sich Städte an, in denen die Einführung einer Umweltzone bereits beschlossen wurde oder die diese diskutieren. Nutzergruppen für kleine BEV und LDV-BEV müssen identifiziert und ihre Anforderungen und Bedürfnisse eruiert werden. Außerdem muss geklärt werden, ob das Konzept der Lade-Parkplätze sinnvoll und umsetzbar ist.

Schließlich ist die Abgrenzung und Anpassung zu laufenden oder in der Planung befindlichen Pilotprojekten der Elektromobilität vorzunehmen, um zu einem Gesamtkonzept der bestehenden technischen Optionen und ihrer Pilotversuche zu gelangen. .

6.6 Der Deutsche Klimafonds

Die Ausgangslage

In der Sprache der Volkswirtschaftslehre ausgedrückt erzeugen die Emissionsrechte des Europäischen Emissionshandelssystems eine Klimarente. Mit der zunehmenden Versteigerung der Emissionsrechte wird dieses Renteneinkommen mehr und mehr abgeschöpft. Für die innere Kongruenz der deutschen Klimapolitik wird es entscheidend sein, welchen Akteuren die durch die Versteigerung abgeschöpfte Klimarente zugute kommt. Wir schlagen vor, den Deutschen Klimafonds (DKF) zu schaffen, der dieses Renteneinkommen bündelt und in eine volkswirtschaftlich und klimapolitisch produktive Verwendung lenkt.

Die vier Dimensionen des Fonds

Der DKF wird die ihm zufließenden Mittel teilweise für nationale und teilweise für internationale Aufgaben einsetzen. In beiden Dimensionen werden es einerseits Ausgaben im Bereich der Vermeidung des Klimawandels sein, andererseits Ausgaben für Anpassungsmaßnahmen. Um die Internalisierung der externen Kosten langfristig leisten zu

können, sollte der Fonds so dimensioniert werden, dass er die langfristig zu erwartenden Anpassungskosten und die verbleibenden Klimaschäden finanzieren kann.

Die volkswirtschaftliche Herausforderung

In Deutschland liegt die volkswirtschaftliche Investitionsquote deutlich unter dem volkswirtschaftlichen Optimum. Viele Innovationen unterbleiben, da die mit ihnen verbundenen Risiken aus einzelwirtschaftlicher Perspektive als zu groß angesehen werden, obwohl sie für die Gesellschaft als ganzes – unter Einbeziehung aller Risiken – wohlfahrtssteigernd wären. Eine klug agierende Klimapolitik kann dazu beitragen, Deutschland aus dieser unvorteilhaften Lage herauszuführen. Durch einen stetigen Dialog können Politik, Wirtschaft und Wissenschaft die Rahmenbedingungen für neue Märkte herausarbeiten, in denen Lern- und Skaleneffekte die Wettbewerbsfähigkeit der neuen klimafreundlichen Industrien konsolidieren. Damit diese Industrien entstehen können, sollte die öffentliche Hand einen Teil der Klimarente dazu einsetzen, das einzelwirtschaftliche Innovations- bzw. Investitionsrisiko zu mindern und damit die Innovation bzw. Investition erst zu ermöglichen. Eine entscheidende Randbedingung für eine erfolgreiche Klimapolitik wird sein, dass die durch sie ausgelösten Investitionen die „herkömmlichen“ Investitionen nicht verdrängen (crowding-out), sondern mindestens ergänzen und optimalerweise sogar vergrößern.

Die Strategie des DKF

Um die nationalen und internationalen Aufgaben auf den Feldern Mitigation und Adaptation zu erfüllen, benötigt Deutschland ein leistungsfähiges Klima-Innovationssystem, das die benötigten klimafreundlichen Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in gebotener Menge und Schnelligkeit generieren und umsetzen kann. Wie jedes erfolgreiche Innovationssystem ist das Klima-Innovationssystem darauf angewiesen, dass staatliche und private Aktivitäten sinnvoll und zu gegenseitigem Nutzen ineinandergreifen. Der DKF setzt einen wesentlichen Teil seiner Mittel als Hebel ein, um privates Kapital für die Schaffung von Public-Private Partnerships (PPP) zu mobilisieren und in innovative Start-ups, Unternehmen und Strukturen zu lenken.

Beispielhafte Aktivitäten des DKF

An zwei Beispielen wollen wir erläutern, wie der DKF Innovationen fördern kann. Hierzu skizzieren wir einen *Innovations-Wettbewerb* und eine *Klima-PPP zur Innovationsförderung*.

Der Innovations-Wettbewerb: Im Rahmen des Innovations-Wettbewerbs können Ideen und Konzepte für klimafreundliche Innovationen eingereicht werden. Prämiert werden herausragende Ideen, die das Potential haben, einen wesentlichen Beitrag zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen oder zur Anpassung an den Klimawandel zu leisten. Die fünf besten Ideen werden öffentlichkeitswirksam vorgestellt. Den Gewinnern wird eine Auszeichnung durch den Bundesumweltminister überreicht, zudem werden sie als „Spitzen-Innovationen“ durch die Klima-PPP zur Innovationsförderung besonders gefördert.

Die Klima-PPP zur Innovationsförderung: Ziel dieser Public-Private Partnership ist die Förderung klimafreundlicher Innovationen von ihrer Entwicklung bis zu ihrer erfolgreichen Vermarktung. Die Klima-PPP zur Innovationsförderung setzt in der Gründungsphase eines Unternehmens an. Zu diesem Zeitpunkt muss zur Bereitstellung der Förderung lediglich ein schlüssiges Konzept zur technischen Umsetzung einer klimafreundlichen Innovation sowie die Bereitschaft zur Unternehmensgründung vorhanden sein. Die Klima-PPP zur Innovationsförderung begleitet die Unternehmensgründung von der Seed- über die Start-up-Phase des Unternehmens bis zur Vermarktung der Innovation. Dabei verfolgt sie methodisch einen umfassenden Ansatz: Neben der Bereitstellung von finanziellen Mitteln werden die Unternehmensgründer mit einem Netzwerk von Akteuren aus Marketing, Organisationsentwicklung, Produktion und Finanzwirtschaft in Kontakt gebracht, das dem Unternehmensgründer beratend zur Seite steht.

Aufgabenteilung zwischen öffentlicher Hand und Privatwirtschaft

Die politische Initiative und die Ausgestaltung des DKF obliegen der öffentlichen Hand. Um die Expertise der Privatwirtschaft für die Konzeption erfolgversprechender PPPs zu nutzen, sollten potentielle private Partner frühzeitig in den Gestaltungsprozess einbezogen werden. Für eine möglichst zügige Umsetzung des DKF kann auf bereits bestehende Strukturen aufgebaut werden. Wir halten das Finanz-Forum Klimawandel für diese

Aufgabe für besonders geeignet, da es die einschlägige Expertise bereitstellt und dazu konzipiert wurde, die deutsche Finanzwirtschaft und wesentliche Sektoren der deutschen Wirtschaft im Hinblick auf Klimawandel und Klimapolitik zu koordinieren.

Begleitende Forschung

Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für den DKF wird die kluge Ausgestaltung der PPPs sein. Wie bei jeder PPP werden dabei Fragen der Governance und der Risikotragung eine zentrale Rolle spielen. Um eine möglichst reibungslose Implementierung und Weiterentwicklung der PPPs zu gewährleisten, regen wir eine nahe an der Praxis operierende Forschung an, die den DKF und seine Aktivitäten von Beginn an begleitet und frühzeitig Optimierungspotentiale identifiziert. Diese Forschung sollte stakeholder-basierte Methoden anwenden, um die Erfahrungen aller beteiligten Akteure angemessen berücksichtigen und praxisgerechte Schlüsse daraus ziehen zu können. Insbesondere sollte diese Begleitforschung dazu beitragen, die Interessen der deutschen Klimapolitik, der privaten Investoren und der Innovatoren fortlaufend zu identifizieren und aufeinander abzustimmen.

Als Fazit dieses Kapitels zu den hier ausgewählten Leuchtturm-Projekten bleibt festzuhalten, dass die Realisierung einer ambitionierten Klimapolitik eine Vielfalt von technologischen, unternehmerischen und institutionellen Innovationen bedarf, um den gesamten Kapitalstock eines Landes mit der Geschwindigkeit und den neuen Qualitäten der Ressourcenschonung umzuwälzen, die eine Abbremsung des Konzentrationsanstiegs der Treibhausgase in der Atmosphäre auf rund 450 ppm bis Ende dieses Jahrhunderts ermöglichen. Denn es geht um

- große technologische Sprünge – nicht um inkrementelle Verbesserungen -, wie sie anhand des Elektro-Straßen-Verkehrs, der solarthermischen Prozesswärmeerzeugung in Industrie und im Dienstleistungssektor oder der grundlegenden Sanierung des gesamten Gebäudebestandes als Beispiel herausgestellt wurde,
- es geht um *institutionelle Innovationen*, sei es der Klimafond, der mit dazu beiträgt, dass Verbrauch natürlicher Ressourcen in einer bisher unbekannten

Geschwindigkeit durch Kapitel ersetzt werden kann, sei es die lernenden lokalen Energieeffizienz und Klimaschutz-Netzwerke, die eine aktive und kommunikative Herausforderung für Tausende von Unternehmen allein in Deutschland sein werden,

- es geht um *langfristig angelegte und multinationale Kooperationen* angesichts mehrerer globaler Herausforderungen von Klimawandel, schwindender Öl- und Erdgasressourcen und einer weltweiten Arbeitslosigkeit. Hier steht die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Technik als ein Synonym für multinationale Zusammenarbeit.

Die sechs Leuchtturmprojekte zeigen aber auch, dass sie angesichts der großen Aufgaben des Klimaschutzes und der Ressourcenschonung nur kleine Beispiele sind und dass es einer großen Anzahl derartiger Leuchtturmprojekte in den kommenden Jahren und ihres Wettbewerbs untereinander bedarf. Denn niemand weiß, welche Schwierigkeiten, welche Chancen und welche Akzeptanz man bei der Durchführung dieser Leuchtturmprojekte entdecken wird.

7 Schlussfolgerungen

Die Zielsetzung der Bundesregierung, bis 2020 die Treibhausgas-Emissionen Deutschlands gegenüber 1990 um 40% zu reduzieren, verlangt weitere Emissionsreduktionen um knapp 250 Mio. t CO_{2eq} zwischen 2008 und 2020. Die vorliegende Studie zeigt, dass dieses Ziel eine große Herausforderung für Politik, Wirtschaft und die Zivilgesellschaft ist und nur unter großen Anstrengungen und mit einer intelligenten, konzertierten Politik erreichbar ist. Als großer Anreiz für alle Beteiligten kann dabei die Erkenntnis dienen, dass die deutsche Volkswirtschaft und die Gesellschaft bei einer klugen Implementierung der Klimaschutzmaßnahmen deutlich profitieren würden.

Vermeidungskosten

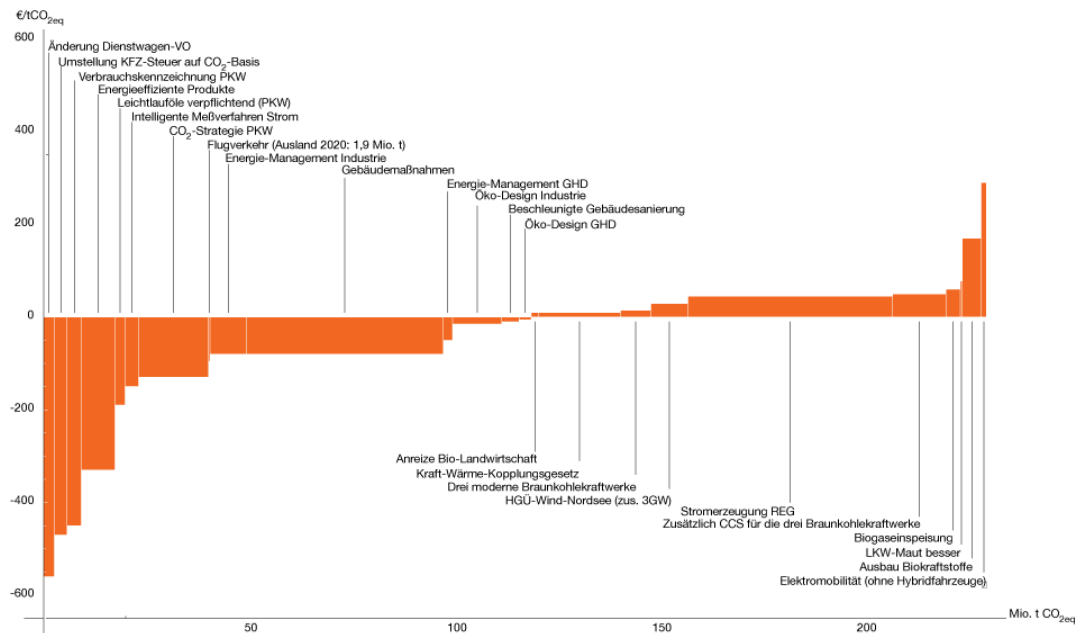
Diese Vorteile sowohl auf Seiten der Wirtschaft und der Umwelt (auch als Win-Win-Situation bezeichnet) entstehen vornehmlich dadurch, dass bei richtigen Anreizen, bei rechtzeitiger Ausbildung und beruflicher Fortbildung sowie rechtzeitiger Einführung von „Spielregeln“, die Anstrengungen zur Emissionssenkung einen erheblichen Investitionsschub von jährlich mehr als 30 Mrd. € auslösen. Diese Investitionen werden nicht nur den technischen Fortschritt der deutschen Wirtschaft beschleunigen, sondern es werden auch besondere Kompetenzen in den Bereichen des Verarbeitenden Gewerbes und der Dienstleistungssektoren aufgebaut, von denen in den kommenden Jahren – vielleicht Jahrzehnten – überdurchschnittliche Exportchancen erwartet werden. Um diese Chance zu nutzen und die erforderlichen Investitionen auch von der Kapitalseite her zu erleichtern, ist eine aktive Rolle der Finanzwirtschaft mit neuen Formen der Public-Private Partnership wesentlich, damit die erforderlichen Investitionskredite und weitere Finanzmittel mobilisiert und zielführend eingesetzt werden können.

Ordnet man die hier untersuchten Minderungspotentiale nach ihren gegenwärtig zu erwartenden Vermeidungskosten (vgl. Abbildung 7-1), so sind

- etwa die Hälfte der erforderlichen Minderungen mikro-ökonomisch in unterschiedlichem Ausmaß rentabel. Dabei wurden begleitende Nebeneffekte wie z. B. Schallschutz, bessere Produktqualität, weniger Ausschuss noch nicht mit berücksichtigt. Dass diese Minderungen nicht schon längst realisiert wurden,

liegt an Informationsdefiziten, hohen Transaktionskosten, mangelhaften Marktstrukturen, Koordinationsproblemen, anderen Präferenzen und Systemträgheiten wie z. B. unangepassten technischen Richtlinien oder Ausbildungsinhalten;

- die andere Hälfte der möglichen Investitions- und organisatorischer Maßnahmen repräsentieren Vermeidungskosten in Höhe von 10 bis 100 € je vermiedener Tonne CO_{2eq};



Quelle: Berechnungen des PIK

Abbildung 7-1: Gegenwärtig zu erwartende Vermeidungskosten für unterschiedliche Maßnahmen¹⁹

- Im Durchschnitt des gesamten Maßnahmenpakets errechnen sich für die Investoren Erlöse von durchschnittlich 34 € je Tonne vermiedenes CO_{2eq} in 2020, da der rentable Anteil der Maßnahmen leicht überwiegt.
- Zwei der betrachteten Maßnahmen (Biokraftstoffe und Elektromobilität) haben Vermeidungskosten jenseits von 150 €/t CO_{2eq}, wobei es sich hier um noch

¹⁹ Die Abbildung zeigt nicht die Maßnahmen „fluorierte Treibhausgase“, „Materialeffizienz“ und „Nicht fluorierte Nicht-CO₂-Treibhausgase“, da diese in dieser Form nicht abbildbar sind.

junge Technologien handelt, die fortentwickelt werden müssen – bei den Biokraftstoffen mit Blick auf Biomass-to-Liquid und bei Elektromobilität mit Blick auf Antriebseffizienz, Batterietechnologie und die emissionsarme Bereitstellung des zusätzlich benötigten Stroms.

Die hier ermittelten Vermeidungskosten beinhalten in der Regel keine Transaktionskosten, d. h. Kosten für die Investoren bei ihrer Suche nach der richtigen Lösung und Aufwendungen des Entscheidungsprozesses für die jeweilige Investition oder organisatorische Maßnahme. Dieses Vorgehen wurde einerseits gewählt, weil es kaum systematische Informationen über die Höhe der Transaktionskosten gibt. Zum anderen sind die Transaktionskosten in hohem Maße durch Maßnahmen von Politik und den Selbstorganisationen der Wirtschaft bestimmt und können durch sie vermindert werden. Dies ist als Kriterium bei der Auswahl der Policies zu beachten (z. B. technische Standards oder Energieverbrauchs-Etikettierung bei jeder Art von Massenprodukten, Ausbildung und berufliche Fortbildung, hohe Verbreitung von qualitativ hoch stehenden elektronischen Investitionsberechnungshilfen, lernende Netzwerke in der Wirtschaft und in den Gebietskörperschaften).

Die ermittelten Vermeidungskosten sind von den Größenordnungen her mit denen früherer Studien vergleichbar (vgl. McKinsey 2007; IEKP 2008). Ein Punkt-für-Punkt-Vergleich kann dennoch nicht unmittelbar vorgenommen werden, insbesondere weil die vorliegende Studie auch Betriebskosten einbezieht, zum Teil aktuellere und differenzierten Energiepreisannahmen trifft und bei der Beschreibung der Maßnahmen den aktuellen Stand der politischen Entscheidungen abbildet.²⁰ Angesichts der höheren Energiepreise, die man heute erwartet, liegen die ermittelten spezifischen Minderungskosten eher auf der sicheren Seite.

²⁰ Daraus ergibt sich auch, dass die Vermeidungspotentiale z.T. höher ausfallen als von McKinsey geschätzt – wobei zusätzlich ins Gewicht fällt, dass in jener Studie Änderungen im Produktdesign explizit ausgeschlossen wurden.

Makroökonomische und klimapolitische Schlussfolgerungen

Die vorgelegten Abschätzungen beziehen sich auf eine Situation, in der die deutsche Wirtschaft durch den europäischen Emissionshandel ein wichtiges politisches Signal aufgenommen hat. Die vorliegende Studie zeigt damit, dass die Kombination von Emissionshandel und sektoralen oder technologie-spezifischen Maßnahmen eine für Deutschland potentiell äußerst attraktive Klima-, Energie- und Wirtschaftspolitik ergibt.

In Deutschland ist die Ausgangslage für eine ambitionierte Klimapolitik besonders günstig, weil drei Faktoren zusammentreffen:

- Die deutsche Wirtschaft hat einen historisch gewachsenen Wettbewerbsvorteil bei Produkten, deren Herstellung großes Know-How einer Vielzahl von Beschäftigten verlangt;
- Trotz verbesserter Konjunkturdaten bestehen weiterhin beträchtliche ungenutzte Kapazitäten am Arbeitsmarkt;
- Schließlich leidet die deutsche Wirtschaft seit zwei Jahrzehnten an einer zunehmenden Investitionsschwäche, die u. a. durch eine innovationsorientierte Klima- und Energiepolitik abgebaut werden kann.

In dieser Situation machen es das Meseberg-Programm und die diskutierten weiteren Maßnahmen (im Umfang von rund 74 Mio. t CO_{2eq}) möglich, das Ziel der Bundesregierung, die Treibhausgasemissionen bis 2020 im Vergleich zu 1990 um 40% zu reduzieren, umzusetzen. Weitere technische Fortschritte und steigende Energiepreise würden die Maßnahmen ökonomisch noch attraktiver machen. Die Realisierung dieses Ziels ist eine große Herausforderung für Wirtschaft, Bevölkerung und Politik, weil es mit einem Umdenkprozess vieler Investoren und in Millionen privater Haushalte einhergeht. Die Botschaft lautet: Klimaschutz ist eine große Chance für die deutsche Wirtschaft und für ein langfristig nachhaltiges globales Energiesystem. Bei adäquater Umsetzung des Meseberg-Programms und weiterer Maßnahmen entstehen bis 2020 in Deutschland mindestens 500 000 zusätzliche Arbeitsplätze, im Jahr 2030 könnten es über 900 000 Stellen sein. Diese Dynamik passt ausgezeichnet in die demographische Entwicklung von Deutschland, denn in den kommenden zwei Jahrzehnten gibt es ein Überangebot an

Arbeitskräften, während es nach 2030 zu erheblichen Engpässen gut ausgebildeter Arbeitskräfte kommen dürfte.

Der Bedarf an zusätzlichen Arbeitskräften infolge einer engagierten Klima- und Energiepolitik erfordert aber auch eine breit angelegte Qualifizierungsoffensive für das Bauhandwerk, Architekten und beratende Ingenieure, Energieverantwortliche in der Wirtschaft und den Gebietskörperschaften bei der beruflichen Ausbildung und Fortbildung. Sie erfordert auch eine Reflexion der Ausbildung in den Schulen und Universitäten zu einem erweiterten und qualitativ hoch stehenden Curriculum, das es heute zu wenig und von den inhaltlichen Erfordernissen her betrachtet kaum gibt.

Sektorale Schlussfolgerungen

Im *Gebäudebereich* sind die sehr großen Einsparpotentiale nur dann realisierbar, wenn es gelingt, die Sanierungsquote und die Sanierungsqualität deutlich zu erhöhen. Ein Schlüssel zur Beschleunigung der energetischen Verbesserung liegt in einem Bündel von Maßnahmen, darunter die Verstetigung der KfW-Förderung, langfristig und Zielgruppen-spezifisch angelegte Kommunikationskampagnen, um die betroffenen Investoren und Gebäudeeigner zu gewinnen, die Investitionsentscheidungen treffen sollen, sowie eine Qualifizierungsoffensive, die das Energieeffizienz-Denken als konstitutives Element in die Architektur- und Bauhandwerkerausbildungen einbringt. Speziell für den Nichtwohnbereich (Schulen, Büros, Krankenhäuser, Industriehallen etc.) müssen noch Curricula entwickelt werden, die die Komplexität von internen Kosten, Wärmeschutz und Lüftung/Klimatisierung thematisieren. Diese sind notwendig, um Gebäudetypologien sowie Standards für Sanierungskonzepte zu entwickeln und Erfahrungen über die Wirtschaftlichkeit und gute Sanierungsbeispiele zu sammeln. Die Auswirkungen der neuen Energieeinspar-VO auf die Energiekostenverteilung bei komplexeren Heizsystemen mit Unterstützung erneuerbarer Energien müssen ebenfalls bedacht werden.

Für die *Elektrogeräte* wären erhebliche Chancen zu realisieren, die sowohl die Geschwindigkeit des technischen Fortschritts der Geräte durch eine Dynamisierung der Effizienzklassen erhöht, z. B. das Top-Runner Modell, das Ende der 1990er Jahren in Japan umgesetzt wurde und auch in Deutschland und Europa große Wirkung erzielen könnte (siehe Kapitel 3.2.2). Zum anderen könnte man die Energieetikettierung auf weitere Elektroanwendungen ausdehnen (z. B. PCs, Bildschirme, Kaffeemaschinen) und

solche Verbrauchsetikettierung oder Geräte initiieren, die die Energiekosten offen legen, wie z. B. auch intelligente Stromzähler und zeitlich detaillierten Strompreisen (siehe Kapitel 3.2.1). Nur so wird dem Konsumenten klar, wie sehr sich die Anschaffung neuer, effizienterer Geräte tatsächlich lohnt. Außerdem wird der gezielte Einsatz von energieintensiven Geräten – wie z. B. Waschmaschinen – zu Schwachlastzeiten ermöglicht, was zu Effizienzgewinnen im Kraftwerksbereich und zu Kosteneinsparungen beim Verbraucher führt.

Im *Industriebereich und im Bereich des Gewerbes/Handels und Dienstleistungen* liegen erhebliche Reduktionspotentiale nicht nur energiebedingter Treibhausgase, sondern auch prozessbedingter Emissionen, die mit 38 Mio. t bis 2020 die gleiche Höhe erreichen wie die Potentiale im Verkehrsbereich. In diesen Wirtschaftssektoren sind die Zielgruppen sehr unterschiedlich: sehr kleine Unternehmen mit wenigen Beschäftigten und sehr geringer Kompetenz, Lösungen zur Verminderung von Treibhausgasemissionen realisieren zu können, bis hin zu sehr großen und weltweit operierenden Unternehmen mit großer Expertise im Bereich Energieeffizienz und Minimierung prozessspezifischer Emissionen. Entsprechend dieser Unterschiede bei den Voraussetzungen der potentiellen Investoren sind die zu ergreifenden Maßnahmen sehr unterschiedlich. Sicherlich wird eine preisorientierte Energie- und Klimapolitik nicht erfolgreich sein können, weil die Hemmnisse – wie fehlende Kenntnisse und fehlender Marktüberblick, deshalb hohe Transaktionskosten, Entscheidungen nicht mittels Rentabilitätskriterien und unter Nichtbeachtung von Lebenszykluskosten – wesentlich stärker wirken als Preissignale. Es wird also bei einer effektiven Energie- und Klimaschutz-Politik darum gehen, die unterschiedlichen Voraussetzungen der Unternehmen und bestehende Hemmnisse in einzelnen Produktgruppen, Unternehmensgrößen und Branchen zu beachten.

Im *Straßenverkehr* sind die politischen Ansatzpunkte zwischen PKW einerseits und Güterverkehr andererseits sehr unterschiedlich, die Emissionsminderungspotenziale mit 35 Mio. t CO₂ aber erheblich. Sozialprestige und geteilte Rollen zwischen Investor und Nutzer der PKW erfordern ganz andere politische Initiativen, die auf eine Umstellung gesellschaftlicher Werte in Richtung einer ressourcenschonenden Mobilität abzielen. Grundsätzliche Innovationen des Antriebsstrangs der Fahrzeuge erfordern wegen ihrer meist globalen Vermarktung eine Kooperation zwischen Staat, Fahrzeugherstellern und Energielieferanten in einem Umfeld, das sich wegen konkurrierender Lösungen (z.B.

Bio-Kraftstoffe, Brennstoffzelle, Elektrofahrzeuge) als sehr schwierig erweist. Hier werden auch die Fahrzeughersteller kreativer und auf ihre Kunden vorausschauender als in der Vergangenheit ihr Marketing gestalten müssen, um zu einer nachhaltigen Mobilität und zu einem Beitrag der Lösungen des Klimaschutzes zu gelangen.

Die *erneuerbaren Energien* erhalten mit ihrem Beitrag von gut 70 Mio. t CO₂-Minderung im Meseberg-Programm eine politische Aufmerksamkeit, die dem Zukunfts- und Innovationspotential dieser heimischen Energiequellen angemessen erscheinen. Dennoch gibt es eine Fülle von begleitenden Maßnahmen, z.B. im Bereich der Ausbildung, der beruflichen Fortbildung und der Standardisierung bis hin zur Änderungsnotwendigkeiten der Verordnungen zur Verrechnung von Energiekosten in Gebäuden bei z.B. solarer Unterstützung konventioneller Wärmeerzeugung und -verteilung. Oder die Förderbedingungen für erneuerbare Energien müssen an die Situation einer effizienten Anwendung für industrielle Prozesswärme und -kälte angepasst werden (z.B. andere Bemessungsparameter und keine unnötigen Auflagen für Speicherinvestitionen).

Im *Kraftwerksbereich* wurde deutlich, dass der ermittelte Nettostrombedarf bei Realisierung der Stromeffizienzpotentiale sowie des Zuwachses der Kraft-Wärme-Kopplung und der erneuerbaren Energien an der Stromproduktion der Ausstieg der Kernenergie ohne belastende Emissionseffekte des verbleibenden fossilen Kraftwerksparks möglich ist, wenn drei Braunkohlekraftwerke um 2020 mit CCS-Technologie ausgestattet wären.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass das Meseberg-Programm die rentablen Potentiale der *Material-Effizienz und der Material-Substitution* in einer Größenordnung von 30 Mio. t CO_{2eq} nicht integriert hat und auch diese Analyse diese Potentiale nur zu einem Drittel berücksichtigt. Man könnte sie also auch als weiteren Bestandteil in die integrierte nationale Klimastrategie aufnehmen, um über den Wettbewerb der Technologien und Akteure die Zielerreichung einer 40%-igen Verminderung der Treibhausgasemissionen Deutschland bis 2020 zu erleichtern. Denn leicht lässt sich dieses Ziel auf keinen Fall erreichen.

An den Beispielen der in der Studie skizzierten *Leuchtturm- bzw. Markteinführungsprojekten* wird erstens deutlich, wie intensiv die Zusammenarbeit zwischen den betroffenen Wirtschaftszweigen, der Verwaltung und angewandter Forschung sein muss, und zweitens, dass zur schnellen Marktdiffusion zeitnah innovative unternehmerische Konzepte

und Finanzierungsformen gefunden werden müssen. Je klarer Regierung und Wirtschaft die Signale dafür setzen, dass angesichts der Herausforderung des Klimawandels in den kommenden Jahrzehnten eine neue industrielle Revolution beginnt, desto eher wird die deutsche Wirtschaft hiervon auch profitieren können.

Fazit

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie lassen sich in sechs Thesen bündeln:

1. *Eine Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen um 40% relativ zu 1990 bis 2020 ist möglich.* Dabei kann und muss einerseits der Trend zu steigender Energieeffizienz aufgegriffen werden, andererseits das Potential erneuerbarer Energien ausgebaut und genutzt werden. Die effektivere Nutzung und teilweise Substitution energieintensiver Materialien ist hierbei kaum berücksichtigt, bietet aber rentable Chancen.
2. *Dazu sind sektorspezifische Initiativen wie die des Meseberg-Programms geeignet.* Die Komplexität einer modernen Volkswirtschaft bedeutet, dass die Schwierigkeiten der Emissionssenkung im Einzelfall untersucht werden müssen, um die jeweilige Akteure bei der Überwindung bestehender Hemmnisse und Kompromisse zu unterstützen. Hierbei geht es um vielfältige Herausforderungen wie z. B. die wärmetechnische Sanierung von denkmal-geschützten Gebäuden bis zum Erhalt sehr energieintensiver Grundstoffproduktionen, die jeweils ihre spezifischen Lösungen brauchen.
3. *Diese Ziele erfordern einen deutlichen Anstieg der Nettoinvestitionen.* Deutschland leidet seit Jahrzehnten unter einer wachsenden Investitionsschwäche. Die Klimapolitik kann (und muss) mit dazu beitragen, diese Schwäche durch geeignete Anreize und die aufgeführten Maßnahmen zu beheben. So erfordert die Senkung der Emissionen um 40% bis 2020 einen Anstieg der Nettoinvestitionen um mindestens ein Viertel des heutigen Wertes.
4. *Ein solcher Anstieg steigert die Wettbewerbsfähigkeit und fördert die Beschäftigung.* Die klimapolitisch gebotenen Investitionen eröffnen die Möglichkeit, dass die deutsche Wirtschaft sowohl ihr Arbeitspotential als auch ihr Innovationspotential in Zukunft deutlich besser ausschöpft. Bis 2020 können

dadurch mindestens eine halbe Million zusätzliche Arbeitsplätze geschaffen werden.

5. *Gefragt ist eine Public-Private Partnership von Regierungen, Technologieproduzenten, Bauhandwerk, Beratungs- und Finanzwirtschaft.* Die Mobilisierung und Allokation der zusätzlichen Investitionsmittel erfordert neue Kooperationsformen zwischen diesen Gruppen und auch den Organisationen der Zivilgesellschaft. Ein zentrales Instrument dürfte dabei ein deutscher Klimafonds werden. Dieser kann Mittel aus der Versteigerung von Zertifikaten bündeln und zur Förderung klimapolitischer Innovationen nutzen.
6. *Auf dieser Grundlage können Leuchtturmprojekte klimapolitischer Innovation realisiert werden.* Es ist nicht möglich, vorauszusagen, welche der vielen denkbaren Möglichkeiten zu den erheblichen Emissionssenkungen am meisten beitragen werden. Deshalb ist ein offenes Technologiewettrennen nötig, bei dem viel versprechende Möglichkeiten in Leuchtturm- oder Demonstrationsprojekten so vorangetrieben werden, dass maximale Lerneffekte erzielt und die Kenntnisse über die Akzeptanz technischer Lösungen und politischer Instrumente schnell erreicht werden.

8 Literatur

1999/62/EG: *Richtlinie 1999/62/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 1999 über die Erhebung von Gebühren für die Benutzung bestimmter Verkehrswege durch schwere Nutzfahrzeuge*, Amtsblatt Nr. L 187 vom 20/07/1999 S. 0042 – 0050.

2003/30/EG: *Richtlinie 2003/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor*, Europäisches Parlament, Brüssel.

2006/38/EG: *Directive 2006/38/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 amending Directive 1999/62/EC on the charging of heavy goods vehicles for the use of certain infrastructures*. Amtsblatt der Europäischen Union L 157/8 vom 9.6.2006.

ABMG (2002): *Gesetz über die Erhebung von streckenbezogenen Gebühren für die Benutzung von Bundesautobahnen mit schweren Nutzfahrzeugen*, BGBl I 2002, 1234, 5. April 2002.

ADL, Fraunhofer-ISI, Wuppertal-Institut (2005): *Studie zur Konzeption eines Programms für die Steigerung der Energieeffizienz in mittelständischen Unternehmen*, Arthur D. Little, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wiesbaden, Karlsruhe, Wuppertal.

AEP (2006): *The AEP Interstate Project Proposal. A 765 kV Transmission Line From West Virginia to New Jersey*, American Electric Power (AEP), Columbus.

AGFW (2005): *Perspektiven der Fernwärme und Kraft-Wärme-Kopplung. Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der AGFW-Studie „Pluralistische Wärmeversorgung“*, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft e.V (AGFW), VDEW, Frankfurt am Main.

BAFA (2006): *Drittlandssteinkohleimporte frei deutsche Grenze*, Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhr (BAFA), Hamburg,
<http://www.bafa.de/bafa/de/energie/steinkohle/statistiken/preise.xls>, 26.05.2008.

- BAG (2006): *Marktbeobachtung Güterverkehr. Sonderbericht: Eineinhalb Jahre streckenbezogene LKW-Maut – Auswirkungen auf das deutsche Güterverkehrsgewerbe*, Bundesamt für Güterverkehr (BAG), Köln.
- Bahrman, M. P., Johnson, B. K. (2007): The ABCs of HVDC transmission technologies, ABB, in: *IEEE Power & Energy Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York.
- BAST (2007): *Verkehrs- und Unfalldaten. Kurzzusammenstellung der Entwicklung in Deutschland*, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, http://www.bast.de/cln_007/nn_42540/DE/Publikationen/Broschueren/Dokumente/infokarten-national-deutsch,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/infokarten-national-deutsch.pdf, 24.04.2008.
- BDEW (2008): *Zahlen und Fakten der Energie- und Wasserwirtschaft*, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), Berlin, [http://www.bdew.de/bdew.nsf/id/D03DE1C5B5E24E8AC1257432002E4ABC/\\$file/Zahlen%20und%20Fakten.pdf](http://www.bdew.de/bdew.nsf/id/D03DE1C5B5E24E8AC1257432002E4ABC/$file/Zahlen%20und%20Fakten.pdf), 27.05.2008
- BEE (2006), *Erneuerbare Energien-Branche will 200 Milliarden investieren*, Bundesverband Erneuerbare Energien (BEE), Berlin, <http://www.bee-ev.de/index.php?a=180>, 26.05.2008.
- BEI (2007): *Effekte des KfW-CO₂-Gebäudesanierungs-programms 2005 und 2006*. KfW-Bankengruppe, Bremer Energie Institut, Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Institut für Statistik der Universität Bremen, Frankfurt am Main.
- Beise, M., Cleff, T. (2004): *In: Journal of International Management 10 (4)*, S.453-477.
- Blesl, M., Kempe, S., Ohl, M., Fahl, U. (2007): *Wärmeatlas Baden-Württemberg – Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen*, Zwischenbericht anlässlich des Statuskolloquiums des PWPLUS am 07. und 08. März 2007, Forschungszentrum Karlsruhe.
- Bloomberg (2008): *Energy prices*, Bloomberg.com, London, <http://www.bloomberg.com/markets/commodities/energyprices.html>, 06.07.2008.

- BMELV (2005): *Bericht zum Klimaschutz im Bereich Forst- und Landwirtschaft*, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), http://www.bmelv.de/cln_045/nn_750586/DE/04-Landwirtschaft/Agrarumweltmassnahmen/BerichtKlimaschutz.html__nnn=true, 18.04.2008.
- BMF (2005): *Entwicklung von Investitionen und Kapitalstock in Deutschland*, Bundesministerium der Finanzen (BMF), http://www.bundesfinanzministerium.de/nn_17844/DE/BMF__Startseite/Aktuelles/Monatsbericht__des__BMF/2005/10/051019agmb004,templateId=raw,property=publicationFile.pdf, 12.05.2008.
- BMU (2004): *Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin.
- BMU (2007a): Sigmar Gabriel: *Alternativen sind möglich. Elektroantrieb mit erneuerbaren Energien*, Pressemitteilung Nr. 297/07, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, http://www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle_pressemitteilungen/pm/40341.php, 06.11.2007.
- BMU (2007b): *Klimaagenda 2020. Der Umbau der Industriegesellschaft*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hintergrund_klimaagenda.pdf, 05.07.08.
- BMU (2008): *Top-Runner-Ansatz*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, http://www.bmu.de/produkte_und_umwelt/oekodesign/top_runner_ansatz/doc/39038.php, 10.07.2008.
- BMU, BMWi (2007): *Bericht zur Umsetzung der in der Kabinettsklausur am 23./24.08.2007 in Meseberg beschlossenen Eckpunkte für ein Integriertes Energie- und Klimaprogramm*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi),

http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/gesamtbericht_iekp.pdf,
30.04.2008.

BMVBS, BBR (2007): *Grundlagen für die Entwicklung von Klimaschutzmaßnahmen im Gebäudebestand. Untersuchung über die bautechnische Struktur und den Ist-Zustand des Gebäudebestandes in Deutschland*, Bundesamt für Bauordnung und Raumwesen (BBR),
[http://www.bbr.bund.de/cln_007/nn_23582/DE/Veroeffentlichungen/BBR-
Onli-
ne/2007/DL__ON222007,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/DL_ON222007.pdf](http://www.bbr.bund.de/cln_007/nn_23582/DE/Veroeffentlichungen/BBR-Online/2007/DL__ON222007,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/DL_ON222007.pdf), 30.04.2008.

BMWi (2008): *Monatliche Entwicklung des Grenzübergangspreises*, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhr (BAFA), Berlin, Hamburg,
<http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Service/publikationen,did=53736.html>,
17.05.2008.

BÖLW (2008): *Zahlen, Daten, Fakten. Die Bio-Branche 2008*, Bund ökologische Lebensmittelwirtschaft (BÖLW), Berlin, www.boelw.de, 16.07.08.

Bond, S., Elston, A., Mairesse, J., Mulkay, B. (2003): Financial Factors and Investment in Belgium, France, Germany, and the United Kingdom: A Comparison Using Company Panel Data, in: *Review of economics and statistics 85 (2003)*, MIT Press Journals, Cambridge.

Bossel, H. (1994): *Modellbildung und Simulation – Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme*, 2. Ausgabe, Vieweg, Braunschweig.

Bundesregierung (2007): *Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm*, Bundesregierung, Berlin.

CEC (2007): *State of progress with the project to implement the new generation European air traffic management system (SESAR)*, Communication from the Commission, Brüssel,
http://ec.europa.eu/transport/air_portal/sesame/doc/0315_comm_sesar_en.pdf,
30.04.2008.

- co2online (2007): *CO₂-Gebäudereport 2007*, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Berlin,
http://www.bmvbs.de/Anlage/original_1033497/CO2-Gebaeudereport.pdf,
 30.04.2008.
- CONCAWE, EUCAR, JRC (2007): *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*, TANK-TO-WHEELS Report, Appendix 1.
- COWI (2002): *Fiscal Measures to Reduce CO₂ Emissions from New Passenger Cars. Final Report*. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission, Kopenhagen.
- Cremer, C. (2005): *Integration of Regional Aspects in Modelling of Electricity Generation – the Example of CO₂ Capture and Storage*. Diss. ETH-Zürich No. 16119, Zürich.
- Culpepper, P. (1999): The future of high-skilled equilibrium in Germany, in: *Oxford review of economic policy* Vol. 15 No. 1, Oxford University Press, Oxford.
- Czisch, G. (1999): *Potentiale der regenerativen Stromerzeugung in Nordafrika - Perspektiven ihrer Nutzung zur lokalen und großräumigen Stromversorgung*, Universität Kassel, Kassel.
- Czisch, G. (2006): *Szenarien zur zukünftigen Stromversorgung. Kostenoptimierte Variationen zur Versorgung Europas und seiner Nachbarn mit Strom aus erneuerbaren Energien*, Universität Kassel, Kassel.
- Darby, S. (2006): *The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption, A Review for DEFRA of the Literature on Metering, Billing and Direct Displays*, Environmental Change Institute, University of Oxford, Oxford.
- dena (2005): *Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020*, Deutsche Energie-Agentur (dena), Köln.
- dena, Prognos (2007): *Marktstudie zur Potentialbewertung in Liegenschaften des Bundes, der Länder und Kommunen – Aktuelle Marktbetrachtung und Trendanalyse*, Deutsche Energieagentur GmbH (dena), Berlin.

- dena (2008): *Spartipp: Leichtlauföle! Gut für den Geldbeutel. Gut fürs Klima*. Deutsche Energie Agentur, Berlin.
- Der Tagesspiegel (2008): Vorbild Europa, in: *Der Tagesspiegel 09.05.2008*, Verlag der Tagesspiegel, Berlin.
- DESTATIS (2008a): *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Fachserie 18 Reihe 1.4. Inlandsproduktberechnung. Detaillierte Jahresergebnisse* (Stand: Februar 2008), Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2008b): *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Bruttoinlandsprodukt, Bruttonationaleinkommen, Volkseinkommen. Lange Reihen ab 1950* (Stand: Februar 2008), Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DG ECFIN (2007): *Annual macro-economic database (AMECO)*, Europäische Kommission, Directorate General for Economic and Financial Affairs (DG ECFIN), Brüssel.
- DG-TREN (2006): *European energy and transport. Trends to 2030 – Update 2005*, Directorate-General Transport and Energy (DG-TREN), Brüssel.
- DIW (2005): *Aktualisierung und Weiterentwicklung der Berechnungsmodelle für die Fahrleistungen von Kraftfahrzeugen und für das Aufkommen und die Verkehrsleistung im Personenverkehr (MIV). Endbericht*, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin, <http://www.diw.de/documents/dokumentenarchiv/17/44088/ModellaktEndbericht.pdf>, 27.06.2008.
- DIW (2007): *Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe – Berechnungen für das Jahr 2006*, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn, http://www.bbr.bund.de/cln_007/nn_112742/DE/Forschungsprogramme/ZukunftBau/Auftragsforschung/Strukturdaten/DL__Strukturdaten__Baugewerbe__Endbericht,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/DL_Strukturdaten_Baugewerbe_Endbericht.pdf, 30.04.2008.
- DIW, Öko-Institut (2007): *Ermittlung der Potenziale für die Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung und der erzielbaren Minderung der CO₂-Emissionen einschließlich Bewertung der Kosten (Verstärkte Nutzung der Kraft-Wärme-*

- Kopplung*), Climate Change 10/07, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Öko-Institut, Umweltbundesamt, Dessau.
- DLR (2006): *Trans-Mediterranean interconnection for concentrating solar power*, German Aerospace Center (DLR), Berlin, Stuttgart.
- E.V.A, NOVEM, TU Graz (1999): *Labelling and its impacts on fuel efficiency and CO₂-reduction*, Energie Verwertungsagentur, Wien.
- eEnergy (2008): *E-Energy - IKT-basiertes Energiesystem der Zukunft*, Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, <http://www.e-energie.info/>, 30.04.2008.
- EIA (2008): *Natural gas prices*, Energy Information Administration (EIA), Washington D.C., http://tonto.eia.doe.gov/dnav/ng/ng_pri_sum_dcu_nus_m.htm, 17.05.2008.
- Eichhammer, W. (2004): *Geschäftschancen für Produzenten von energieeffizienten Technologien und von Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien*, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe.
- Eikmeier, B., Schulz, W., Krewitt, W., Nast, M. (2006): Nationales Potenzial für hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplung, in: *EuroHeat&Power 35 (2006)*, H. 6, S. 2-10.
- Enquete-Kommission (1990): *Dritter Bericht der Enquete-Kommission Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre*, Deutscher Bundestag, 11. Wahlperiode, Drucksache 11/8030 vom 24.05.1990, Deutscher Bundestag, Bonn.
- Enquete-Kommission (2002): *Schlussbericht der Enquete-Kommission Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung*, Deutscher Bundestag, 14. Wahlperiode, Drucksache 14/9400 vom 7.7.2002, Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft Berlin, Bonn.
- Enzmann, A. (2008): *Abschätzung zukünftiger Welthandelsanteile Deutschlands im Bereich der Windenergie anhand eines systemdynamischen Lead Markt Ansatzes*, Arbeitspapier, Fraunhofer-Institut System- und Innovationsforschung, April 2008.
- EurActiv (2008): *Traders and governments at odds over renewables trading*, EurActiv, Brüssel, <http://www.euractiv.com/en/energy/traders-governments-odds-renewables-trading/article-171993>, 2008-04-30.

Europäische Kommission (2008): *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources*, Europäische Kommission, Brüssel.

European Parliament (2008): *Draft European Parliament legislative resolution on the Council common position for adopting a directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2003/87/EC so as to include aviation activities in the scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community (05058/2008 – C6-0177/2008 – 2006/0304(COD))*, vom Parlament am 8. Juli verabschiedet, Europäisches Parlament, Brüssel.

Eurostat (2008): *Energy & Transport in figures 2007*, Eurostat, European Commission, DG-TREN, Brüssel.

EWEA (2007): *Offshore wind in Berlin*, Conference proceedings, European Wind Energy Association (EWEA), Brüssel.

EWEA (2008): *Pure power. Wind energy scenarios up to 2030*, European Wind Energy Association (EWEA), Brüssel.

EWI, EEFA (2007): *Studie Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept 2030, Szenariendokumentation*, Energiewirtschaftliches Institut der Universität Köln (EWI), Energy Environment Forecast Analysis (EEFA), Köln.

EWI, Prognos (2006): *Auswirkungen höherer Ölpreise auf Energieangebot und –nachfrage. Ölpreisvariante der Energiewirtschaftlichen Referenzprognose 2030*, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Köln, Basel.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2006): *Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz*, Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Leipzig.

- Fischedick, M., Esken, A., Pastowski, A., Schüwer, D., Supersberger, N., Nitsch, J., Viebahn, P., Bandi, A., Zuberbühler, U., und Edenhofer, O. (2007): *RECCS – Strukturell-ökonomisch-ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien mit Carbon Capture and Storage. im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, DLR - Institut für Technische Thermodynamik, Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Wuppertal, Stuttgart, Potsdam.*
- Fischer, C. (2007): *Influencing Electricity Consumption via Consumer Feedback. A Review of Experience.* Conference Proceedings of the ECEEE 2007 Summer Study.
- Franz, O., Wissner, M., Büllingen, F., Gries, C.-I., Cremer, C., Klobasa, M., Sensfuß, F., Kimpeler, S., Baier, E., Lindner, T., Schäffler, H., Roth, W., Thoma, M. (2006): *Potenziale der Informations- und Kommunikations-Technologien zur Optimierung der Energieversorgung und des Energieverbrauchs (eEnergy),* Wik-Consult und Fraunhofer Verbund Energie, Bad Honnef.
- Fraunhofer-ISI (2006): *Energieverluste im Energieflußdiagramm Deutschland 2004,* Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe.
- Fraunhofer-ISI, Öko-Institut, Forschungszentrum Jülich (2008a): *Wirtschaftlicher Nutzen des Klimaschutzes – Kostenbetrachtung ausgewählter Einzelmaßnahmen der Meseberger Beschlüsse,* Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Öko-Institut, Forschungszentrum Jülich, Karlsruhe, Berlin, Jülich, Zürich.
- Fraunhofer-ISI, Öko-Institut, Forschungszentrum Jülich (2008b): *Politiksznarien für den Klimaschutz IV - Szenarien bis 2030 für den Projektionsbericht 2007,* Öko-Institut, Forschungszentrum Jülich, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung, Karlsruhe, Berlin, Jülich.
- Fraunhofer-ISI, FZ-Jülich, Öko-Institut, Ziesing, H.J., ETH Zürich (2008c): *Wirtschaftlicher Nutzen des Klimaschutzes,* Karlsruhe, Berlin, Jülich, Zürich.
- Gruber, E.; Brand, M. (1995): *HEW-Modellversuch - Zeitvariable lineare Stromtarife - Empirische Untersuchung im Versorgungsgebiet der Hamburgischen*

- Elektrizitäts-Werke AG, Hamburgische Elektrizitäts-Werke AG, Hamburg, Karlsruhe.*
- Gruber, E., Jochem, E., Mannsbart, W., Roser, A., Ott, V. (2006): *Sonderfonds für Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe. Marktstudie an die KfW Bankengruppe, Karlsruhe.*
- Grünweg, T. (2007), *Elektro-Smart für London: Umsonst im Sperrbezirk*, in: Spiegel Online, 08.08.07, <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,494250,00.html>, 22.04.2008.
- Hegemann, K. H.; Hein, L.; Heinrich, F.; Jäger, P.; Kuhn, P.; Plöger, W.; Rose, B.; Schlomann, B. (1992) *Das Modellvorhaben "Zeitvariabler linearer Stromtarif"*. Abschlußbericht Arbeitsgemeinschaft Tarifstudie Saarland, Saarbrücken: Stadtwerke Saarbrücken.
- Hennecke, K., Lokurlu, A., Rommel, M., Späte, F. (2005): *Solare Prozesswärme für Industrie, Meerwasserentsalzung und Solarchemie*. Jahrestagung des Forschungsverbunds Sonnenenergie in Kooperation mit der Landesinitiative Zukunfts-Energien NRW 22, 23.09.2005, Köln.
- HMRC (2006): *Report on the Evaluation of the Company Car Tax Reform: Stage 2*, Her Majesty's Revenue & Customs (HMRC), <http://www.hmrc.gov.uk/cars/stage-2-evaluation.pdf>, 22.03.2006.
- Horn, G., Rietzler, K. (2007): *Forcierte Angebotspolitik löst keinen zusätzlichen Investitionsschub aus. Ein Zyklusvergleich. IMK Report, Nr. 24, November 2007*, Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf.
- IEA (2005): *Projected costs of generating electricity*, International Energy Agency (IEA), Paris.
- IEA (2006): *World energy outlook 2006*, International Energy Agency (IEA), Paris.
- IEKP (2008): *Wirtschaftliche Bewertung von Maßnahmen des Integrierten Energie- und Klimaprogramms (IEKP)*, Endbericht, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), FZ Jülich, Öko-Institut, Dr. Ziesing, CEPE/ETH, Zürich Karlsruhe, Berlin, Jülich.

- IER (2005): *Untersuchung der Wirksamkeit des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes*, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (IER), Stuttgart.
- ifeu (2005): *Fortschreibung "Daten- und Rechenmodell": Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030*. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu), http://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/TREMOD_Zusammenfassung.pdf, 21.04.2008.
- Inflationdata (2008): *Historical crude oil prices*, Inflation Data, Richmond, http://www.inflationdata.com/inflation/inflation_rate/Historical_Oil_Prices_Table.asp, 17.05.2008.
- Intellikon (2008): *Nachhaltiger Energiekonsum von Haushalten durch intelligente Zähler-, Kommunikations- und Tarifsysteme*, Projekt gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, Projektkoordination durch Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme.
- IÖL (2008): *Grundlagen*, Informationsportal Ökolandbau (IÖL), Bonn, <http://www.oekolandbau.de/erzeuger/grundlagen/>, 16.07.08.
- IPCC (2007): *IPCC fourth assessment report: Climate change 2007*, Cambridge University Press, Cambridge.
- ISI, FZJ, ÖI, CEPE (2008): *Wirtschaftlicher Nutzen des Klimaschutzes*, Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung, Forschungszentrum Jülich, Öko-Institut, Centre for Energy Policy and Economics an der ETH Zürich, Karlsruhe, Jülich, Berlin, Zürich.
- IWU (2007): *Querschnittsbericht Energieeffizienz im Wohngebäudebestand. Techniken, Potentiale, Kosten und Wirtschaftlichkeit*, Institut für Wohnen und Umwelt (IWU), Verband der Südwestdeutschen Wohnungswirtschaft e.V. (VdW südwest), Darmstadt, http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/IWU_QBer_EnEff_Wohngeb_Nov2007.pdf, 30.04.2008.

- IZES (2007): *Studie zu den Energieeffizienzpotenzialen durch Ersatz von elektrischem Strom im Raumwärmebereich*, Institut für Zukunftsenergiesysteme (IZES), Saarbrücken.
- Jaeger, C. C., Schellnhuber, H. J., Brovkin, V. (2008): Stern's review and Adam's fallacy, in: *Climatic change, Special issue on the „Stern review and its critics“* (in Press), Springer-Verlag, Heidelberg.
- Jochem, E., Andersson, G., Favrat, D., Gutscher, H., Hungerbühler, K., Rudolph v. Rohr, P., Spreng, D., Wokaun, A., Zimmermann, M. (2004): *Steps towards a sustainable Development – A White Book for R&D of energy-efficient technologies*, CEPE, ETH, novatlantis, Zürich.
- Jochem, E., Ott, V., Weissenbach, K. (2007): Lernende Netzwerke – einer der Schlüssel zur schnellen Energiekostensenkung, in: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 57(2007)3, S. 8-11, ETV GmbH, Essen.
- Jones, M. (2003): *The Power To Choose - Demand Response in Liberalised Electricity Markets*, International Energy Agency, Paris.
- Kalhammer, F., Kopf, B., Swan, D., Roan, V., Walsh, M. (2007): *Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology*, California Air Resources Board, http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevreview/zev_panel_report.pdf, 06.04.2008.
- KBA (2008a): *Außerbetriebsetzungen im Jahr 2007 nach Alter der Fahrzeuge*, Kraftfahrtbundesamt (KBA), Flensburg, http://www.kbashop.de/webapp/wcs/stores/servlet/ProductDisplay?catalogId=10051&categoryId=10018&storeId=10001&productId=10855&langId=-3&parent_category_rn=10018&top_category=10002, 27.06.2008.
- KBA (2008b): *Bestand am 1. Januar 2007 nach Haltern*, Kraftfahrtbundesamt (KBA), Flensburg, http://www.kbashop.de/webapp/wcs/stores/servlet/ProductDisplay?catalogId=10051&categoryId=10014&storeId=10001&productId=10018&langId=-3&parent_category_rn=10014&top_category=10002, 27.06.2008.
- Kempton, W., Tomic, J. (2005): Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue, in: *Journal of Power Sources* 144.

- Kempton, W., Tomic, J. (2007): Using fleets of electric-drive vehicles for grid support, *Journal of Power Sources* 168.
- Kleinknecht, K. (2008): Energieversorgung in Zeiten des Klimawandels, in: *Spektrum der Wissenschaft*, No. 4, S. 60-64.
- Klobasa, M., Ragwitz, M. (2005): *CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien*, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe.
- KOM (2007)856: *Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen*, Von der EU-Kommission vorgelegt im Dezember 2007, Europäische Kommission, Brüssel.
- Krail, M., Schade, W., Fiorello, D., Fermi, F., Martino, A., Christidis, P., Schade, B., Purwanto, J., Helfrich, N., Scholz, A., Kraft, M. (2007): *Outlook for Global Transport and Energy Demand*, Deliverable 3 des EU-Projektes TRIAS (Sustainability Impact Assessment of Strategies Integrating Transport, Technology and Energy Scenarios), Karlsruhe.
- Landesregierung NRW (2007): *Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrage 1443 der Abgeordneten Reiner Priggen und Horst Becker, Grüne*, Drucksache 14/4077 vom 28.3.2007, Landesregierung Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.
- LfL (2008): *Ökologische Landwirtschaft*, Landesamt für Landwirtschaft Bayern (LfL), München, <http://www.lfl.bayern.de/iab/oekologisch/>, 16.07.08.
- Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., v.Essen, H., Boon, B.H., Smokers, R., Schroten, A., Doll, C., Pawlowska, B., Bak, M. (2008): *Handbook on Estimation of External Costs in the Transport Sector. Bericht im Rahmen der Studie „Internalisation Measures and Policies of all External Costs of Transport (IMPACT) in Auftrag der Europäischen Kommission*, CE Delft, Delft.
- Markewitz, P., Ziesing, H.-J. (Hrsg.) (2004): *Politiksznarien für den Klimaschutz. Langfrististszenarien und Handlungsempfehlungen ab 2012 (Politiksznarien III)*, Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt / Environment. Band / Volume 50.

- McKinsey (2007): *Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland*, Studie im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz.“
- METI (2006): *Strategic Technology Roadmap (Energy Sector) - Energy Technology Vision 2100*, Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), Tokyo.
- Meyer, J-P. (2007): Prozesswärme: Waschen, kochen, trocknen, in: *Sonne, Wind & Wärme* 1 (2007), S. 46-53.
- Meyer-Krahmer, F. (2004): Vorreiter-Märkte und Innovation, in: Steinmeier, F.W.; Machnig, M. (Hrsg.): *Made in Deutschland 21*, Hamburg, S.95-110.
- Mountain, D. (2006): *The Impact of Real-Time Feedback on Residential Electricity Consumption: the Hydro One Pilot*, Mountain Economic Consulting and Associates Inc., Ontario.
- Nitsch, J. (2007): *Leitstudie 2007. Ausbaustrategie Erneuerbare Energien. Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.
- Procesol II (2002): *Solarthermischen Anlagen in Industriebetrieben – Planungs- und Wartungsrichtlinien*. Bericht im Rahmen des Projekts „Solar Thermal Process Heating coupled with Heat Recovery Technologies in Industrial Applications, ALTENER 4.1030/Z/02-084/2002“. AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich, ZAE Bayern, Garching.
- ProgTrans / IWW (2007): *Aktualisierung der Wegekostenrechnung für die Bundesfernstraßen in Deutschland. Bericht an das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung*, ProgTrans, IWW, Basel, Karlsruhe.
- RAENG (2004): *The costs of generating electricity*, Royal Academy of Engineering (RAENG), London.
- Ravn, H. (2001): *Balmorel: A Model for Analyses of the Electricity and CHP Markets in the Baltic Sea Region*, <http://www.balmorel.com>, 21.07.08.
- Rennings, K., Rammer, C., Oberndorfer, U., Jakob, K., Boie, G., Brucksch, S., Eisgruber, J., Haum, R., Mußler, P., Schossig, C., Vagt, H. (2008): *Instrumente zur Förderung von Umweltinnovationen. Bestandsaufnahme, Bewertung und Defizitanalyse*,

- Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), Forschungsstelle für Umweltpolitik (FFU), Mannheim, Berlin.
- Roland Berger (2007): *Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen*, Reihe „Umwelt, Innovation und Beschäftigung“ des BMU/UBA, Berlin.
- Rommel, M. (2008): *Übersicht zu Entwicklungen von Prozesswärmekollektoren*. 18. Symposium „Thermische Solarenergie“; 23-25 April 2008, Bad Staffelstein.
- Saharawind (2008): *Economics of wind power*, Saharawind, Rabat,
http://www.saharawind.com/index.php?option=com_content&task=view&id=34&Itemid=51, 18.04.2008.
- Schade, W. (2005): *Strategic Sustainability Analysis: Concept and application for the assessment of European Transport Policy*, Nomos, Baden-Baden.
- Schade, W., Köhler, J., Lüllmann, A. (2008): *IEKP-Makro – Gesamtwirtschaftliche Bewertung von Maßnahmen des IEKP*, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe.
- Schlandt, J. (2008): Deutschland droht Stromlücke, in: *Berliner Zeitung*,
<http://www.berlinonline.de/berliner-zeitung/archiv/.bin/dump.fcgi/2008/0414/wirtschaft/0010/index.html>, 22.04.2008.
- Schnitzer, H., Brunner, C., Taferner, K., Slawitsch, B., Giannakopoulou, K. (2006): *Solare Prozesswärme. Task 33 des IEA Solar Heating and Cooling Programms*, Phase I Subtask B: Investigation of Industrial Processes, Graz.
- Schön, M. et al. (2004): *Werkstoffeffizienz. Einsparpotentiale bei Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Schreyer, C., Maibach, M., Sutter, D., Doll, C., Bickel, P. (2007): *Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland – Aufdatierung 2005. Studie im Auftrag der Allianz pro Schiene e.V.* Zürich.
- SESAR (2007): *The ATM Deployment Sequence D4*, SESAR consortium,
<http://www.sesar-consortium.aero/>, 30.04.2008.

- Sinn, H.-W. (2007): *Woher kommt der Aufschwung?*, Vortrag anlässlich der 58. Jahresversammlung des ifo-Institut für Wirtschaftsforschung 2007.06.25, ifo-Institut für Wirtschaftsforschung, München.
- Specht, M. (2007): *Elektro-Smart: Abgasfreies Sparwunder*, in: Stern, 20.07.2007, <http://www.stern.de/sport-motor/autowelt/probefahrten/smart/:Elektro-Smart-Abgasfreies-Sparwunder/593379.html>, 22.08.08.
- Staiß, F. (2007): *Jahrbuch Erneuerbare Energien 2007*, Radebeul.
- Staiß, F., Kratzat, M., Nitsch, J., Lehr, U., Edler, D., Lutz, C. (2006): *Erneuerbare Energien: Arbeitsplatzeffekte – Wirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf den deutschen Arbeitsmarkt*, Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin.
- Sterman, J. (2000): *Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw Hill, Boston.
- Stern, N. (2006): *Stern Review on the economics of climate change*, Her Majesty's treasury, London.
- SVR (2002): *Zwanzig Punkte für Beschäftigung und Wachstum, Jahresgutachten 2002/03*, Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (SVR), Stuttgart.
- Tatsumi, K. (2006): *Battery Technologies for Cars*, International Workshop on Technology Learning and Deployment, International Energy Agency (IEA), <http://www.iea.org/Textbase/work/2007/learning/Tatsumi.pdf>, 19.03.2008.
- TNO (2006): *Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO₂-emissions from passenger cars*. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission. Delft, 31.10.2006.
- Toro F., Hasenauer U., Wietschel M., Schade W. (2006): *Technology trajectories for transport and its energy supply, Deliverable 2 of TRIAS (Sustainability Impact Assessment of Strategies Integrating Transport, Technology and Energy Scenarios)*, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, Germany.
- TreeHugger (2008): *Beluga Group Signs Contract for Sky Sail Power*, http://www.treehugger.com/files/2006/02/beluga_group_si.php, 26.02.2008

- UBA (2006): *Politikinstrumente zur Effizienzsteigerung von Elektrogeräten und – anlagen in Privathaushalten, Büros und im Kleinverbrauch*, Umweltbundesamt (UBA), Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg (ifeu), Ingenieurbüro für Energieberatung, Haustechnik und ökologische Konzepte GbR (ebök), Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Dessau.
- UBA (2007a): *Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen*, Umweltbundesamt (UBA), Dessau, http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/archiv/Trendtabellen_Emissionen_DE_1990_2005_ohne_HM_POP.zip, 26.05.2008.
- UBA (2007b): *Wirkung der Meseberger Beschlüsse vom 23. August 2007 auf die Treibhausgasemission in Deutschland im Jahr 2020*, Umweltbundesamt (UBA), Berlin.
- VCD (2006): *Güterverkehr in der Stadt: Ein Unterschätztes Problem*, Verkehrsclub Deutschland e.V. (VCD), Berlin, http://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/redakteure/themen/gueterverkehr/St_dt._G_terverkehr/VCD_6-Seiter_G_terverkehr__400_kb_.pdf, 24.04.2008.
- VdKI (2008): *Preise für Steinkohlen*, Verein der Kohleimporteure (VdKI), Hamburg, <http://www.verein-kohlenimporteure.de/deutsch/preise/inhalt.htm>, 26.05.2008.
- Walz, R. (1999): Productivity effects of technology diffusion induced by an energy tax, in: *Energy and Environment 10 (1999)*, Nr. 2, S.169-180.
- Walz, R. (2006): Increasing Renewable Energy in Europe – Impacts on Competitiveness and Lead Markets, in: *Energy & Environment*, Vol. 17 (2006), Nr. 6, S. 951-975.
- Walz, R. (2007): The role of regulation for sustainable infrastructure innovations: the case of wind energy, in: *International Journal of Public Policy*, Vol. 2 (2007), No. 1/2, S. 57-88.
- Walz, R.; Ostertag, K; Doll, C.; Eichhammer, W.; Frietsch, R.; Helfrich, N.; Marscheider-Weidemann, F.; Sartorius, C.; Fichter, K.; Beucker, S.; Schug, H.; Eickenbusch, H.; Zweck, A.; Grimm, V.; Luther, W. (2008a): *Zukunftsmarkt Umwelt. Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern*, Schriftenreihe Umwelt - Innovation - Beschäftigung, Band 3-2008, Berlin.

- Walz, R., Ragwitz, M., Schleich, J. (2008b): *Regulation and innovation: the case of renewable energy technologies*, DIME Conference on Environmental Innovations, Karlsruhe, 14/15.1.2008.
- Weiss, W., Müller, T. (2004): *Solare Prozesswärme, Entwicklungen im Rahmen der IEA SHC Task 33/4*, AEE INTEC, Österreich.
- Weiss, W., Rommel, M. (2005): *Medium Temperature Collectors, State of the Art within Task 33/4 IEA SHC Programme*, AEE INTEC, Austria.
- Wietschel, M. (2008): *Wirtschaftlichkeit und Systemintegration der Elektromobilität*, Vortrag auf dem Fachgespräch Elektromobilität: Energiewirtschaftliche Potenziale und Konsequenzen, 11. April 2008, Berlin.
- Wilson, E. J., Morgan, G. M., Apt, J., Bonner, M., Bunting, C., Gode, J., Haszeldine, R. S., Jaeger, C. C., Keith, D. W., McCoy, S. T., Pollak, M. F., Reiner, D. M., Rubin, E. S., Torvanger, A., Ulardic, C., Vajjhala, S. P., Victor, D. G., Wright, I. W. (2008): Regulating the geologic carbon sequestration, in: *Environmental science and technology* Vol. 42, Iss. 8, S. 2718–2722, University of Iowa, Iowa City.
- WINTeCC (2008): *Demonstration einer innovativen Windantriebstechnologie für Frachtschiffe*, WINTeCC, Hamburg, http://www.wintecc.de/index_de.html, 22.07.08.
- WTRG (2008): *Crude Oil Prices 1869 - 2007*, <http://www.wtrg.com/prices.htm>, 02.05.2008.
- Wuppertal-Institut, Fraunhofer-Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik, Gaswärmeinstitut (2005): *Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse*, Wuppertal-Institut für Klima Umwelt Energie, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Fraunhofer-Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik, Gaswärme-Institut e.V., Wuppertal, Leipzig, Oberhausen, Essen.
- Ziesing, H.-J. (2008): *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2007*, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, AG Energiebilanzen e.V., Berlin.